



Peningkatan Efisiensi Drainase Perkotaan melalui Penerapan Infrastruktur Jalan Berkelanjutan di Kota Malang

Rais Amin¹, Angel Natalin², Mega Putri Aulia³, Siti Fatimah⁴, Sri Rahayu⁵

^{1,2,3,4}Program Studi Teknologi Rekayasa dan Pemeliharaan Bangunan Sipil Universitas Negeri Malang, Indonesia

⁵Program Studi Pendidikan Teknik Bangunan Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia

DOI: <https://doi.org/10.26623/teknika.v21i1.13068>

Info Artikel

Sejarah Artikel:

Disubmit 27 Oktober 2025

Direvisi 02 Februari 2026

Disetujui 17 Februari 2026

Keywords:

Low Impact Development; Rainfall; Surface Water; Urban Drainage

Abstrak

Banjir yang sering terjadi di sepanjang Jalan Soekarno Hatta, Kota Malang menunjukkan bahwa kapasitas sistem drainase yang ada belum memadai serta kurangnya area resapan air di kawasan padat bangunan. Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas pendekatan *Low Impact Development* (LID) sebagai metode ramah lingkungan untuk meningkatkan kinerja drainase perkotaan dengan mengevaluasi dua teknik utama, yaitu saluran vegetatif (*vegetative swale*) dan perkerasan berpori (*permeable pavement*). Analisis dilakukan menggunakan EPA SWMM 5.1 dengan dua skenario, yaitu kondisi eksisting dan kondisi setelah penerapan LID, menggunakan data curah hujan periode 2015–2024 dari Stasiun Geofisika Malang yang diolah dengan *Hydrognomon* 4.0.3 menggunakan distribusi *Person III*. Hasil simulasi menunjukkan enam saluran mengalami limpasan berlebih dengan debit puncak melebihi 10 m³/detik pada kondisi eksisting, sedangkan setelah penerapan LID terjadi penurunan signifikan pada laju aliran dengan kesalahan kontinuitas di bawah 10%, menandakan model valid. Secara keseluruhan, *vegetative swale* memberikan hasil paling optimal dalam mengurangi limpasan dan meningkatkan infiltrasi, sehingga penerapan konsep LID terbukti efektif dan berkelanjutan untuk mitigasi banjir serta pengembangan infrastruktur hijau di Kota Malang.

Abstract

Frequent flooding along Soekarno Hatta Street in Malang City indicates the inadequate capacity of the existing drainage system and the lack of water infiltration areas in densely built environments. This study aims to analyze the effectiveness of the Low Impact Development (LID) approach as an environmentally friendly method for improving urban drainage performance. Two main LID techniques, vegetative swale and permeable pavement, were evaluated for their ability to reduce surface runoff and enhance groundwater infiltration. The analysis was conducted using the EPA SWMM 5.1 software through two simulation scenarios, the existing condition and the post LID implementation condition. Rainfall data were obtained from the Geophysical Station of Malang for the period of 2015-2024 and processed using Hydrognomon 4.0.3 with the Log Normal probability distribution. The simulation results revealed that six conduits experienced overflow with peak discharges exceeding 10 m³/s under existing conditions. After applying LID controls, a significant reduction in flow rate was observed, with continuity errors remaining below 10%, indicating acceptable model validity. The vegetative swale provided the most optimal performance in reducing surface runoff and improving infiltration along the roadway. Therefore, the implementation of LID concepts proves to be an effective and sustainable strategy for flood mitigation and the development of green urban infrastructure in Malang City.

✉ Alamat Korespondensi:
E-mail: rais.amin.fv@um.ac.id

PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur jalan di Indonesia memiliki peran strategis dalam memperkuat konektivitas antar wilayah serta mendukung pertumbuhan ekonomi, sosial, dan budaya. Jalan bukan hanya sarana transportasi, tetapi juga bagian penting dari struktur ruang kota yang memengaruhi dinamika pembangunan dan tata ruang wilayah (Octavia et al., 2024). Seiring dengan laju perubahan tata guna lahan yang tidak terkendali, banyak kawasan perkotaan mengalami degradasi fungsi ekologis, termasuk berkurangnya kemampuan tanah dalam menyerap air hujan. Dampaknya, genangan dan banjir menjadi permasalahan rutin di kota-kota besar di Indonesia.

Fenomena tersebut terlihat nyata di berbagai kota seperti Jakarta, Bandung, dan Malang. Peningkatan luas area terbangun mengakibatkan menurunnya kemampuan sistem drainase dalam menampung limpasan permukaan (H. Firmansyah et al., 2022). Kota Malang, khususnya di kawasan Jalan Soekarno Hatta yang merupakan koridor utama kegiatan ekonomi dan Pendidikan, sering mengalami genangan air saat hujan lebat. Hal ini menunjukkan bahwa sistem drainase konvensional belum mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan tata guna lahan yang semakin masif (Amin et al., 2025).

Konteks perencanaan perkotaan, sistem drainase tradisional yang hanya berfungsi mengalirkan air hujan ke hilir sudah tidak relevan dengan kebutuhan kota modern yang berkelanjutan. Dibutuhkan pendekatan baru yang tidak hanya berorientasi pada kapasitas saluran, tetapi juga memperhatikan aspek konservasi air, infiltrasi, dan keseimbangan ekosistem. Pendekatan *Low Impact Development* (LID) hadir sebagai solusi inovatif untuk meniru proses alami siklus air melalui penerapan teknologi hijau seperti *vegetative swale*, *permeable pavement*, dan lainnya (Nazarpour et al., 2023; Pour et al., 2020; Suprapti et al., 2024).

Beberapa penelitian terkini menunjukkan efektivitas penerapan LID di kawasan tropis. Penelitian terkait kombinasi *rain barrel*, *bioretention*, dan *permeable pavement* mampu meningkatkan kapasitas infiltrasi hingga 45% di wilayah permukiman padat Indonesia (Putri et al., 2023). Studi di Jakarta juga menyoroti pentingnya integrasi LID dengan konsep *Sustainable Urban Drainage System* (SUDS) dalam desain arsitektur infrastruktur perkotaan untuk mengurangi limpasan air permukaan (Gbran, 2024). Selain itu, penelitian di Palembang menunjukkan bahwa penerapan sistem drainase hijau mampu menurunkan potensi banjir tahunan sebesar 30% melalui peningkatan efisiensi saluran dan konservasi air hujan (Wahyu, 2017).

Metodologi hasil simulasi hidrologi dan hidraulika menggunakan EPA *Storm Water Management Model* (SWMM) telah terbukti efektif untuk mengevaluasi kinerja sistem drainase dan memprediksi dampak perubahan tata guna lahan terhadap volume limpasan (A. Firmansyah et al., 2024; Yuono et al., 2024) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa penerapan LID di Kota Serang mampu menurunkan nilai *continuity error* hingga di bawah 10%, menandakan peningkatan efisiensi model hidrologi secara signifikan.

Selain aspek teknis, keberhasilan penerapan sistem drainase berkelanjutan juga bergantung pada partisipasi masyarakat dan kebijakan pemerintah daerah dalam menjaga fungsi ruang terbuka hijau serta memperkuat kesadaran terhadap pentingnya pengelolaan air hujan (K, 2021). Dengan demikian, penerapan prinsip LID di kawasan perkotaan seperti Jalan Soekarno Hatta tidak hanya berfungsi sebagai solusi teknis mitigasi banjir, tetapi juga sebagai langkah strategis menuju pembangunan infrastruktur hijau yang berketahanan iklim.

Respon terhadap permasalahan genangan yang berulang akibat keterbatasan sistem drainase konvensional, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem drainase eksisting di kawasan Jalan Soekarno Hatta, Kota Malang serta mengevaluasi efektivitas penerapan konsep *Low Impact Development* (LID), khususnya *vegetative swale* dan *permeable pavement*, dalam menurunkan limpasan permukaan dan meningkatkan efisiensi hidrologi sistem drainase melalui simulasi

menggunakan EPA *Storm Water Management Model* (SWMM). Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan infrastruktur jalan perkotaan yang berkelanjutan dan adaptif terhadap perubahan tata guna lahan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif dengan metode simulasi hidrologi dan hidraulika untuk menganalisis efektivitas penerapan konsep *Low Impact Development* (LID) pada sistem drainase Jalan Soekarno Hatta, Kota Malang. Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak EPA *Storm Water Management Model* (SWMM) versi 5.1, yang mampu mensimulasikan aliran limpasan permukaan dan respon sistem drainase dinamis.

Lokasi Dan Data Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada kawasan Jalan Soekarno Hatta, Kota Malang, yang merupakan salah satu koridor utama aktivitas pendidikan, perdagangan, dan transportasi di wilayah perkotaan. Kawasan ini dipilih karena sering mengalami genangan air saat hujan deras akibat kapasitas saluran drainase yang terbatas serta meningkatnya luas permukaan kedap air. Kondisi tersebut menyebabkan aliran air hujan tidak dapat meresap ke tanah secara optimal, sehingga memperbesar potensi limpasan permukaan. Pemilihan lokasi juga mempertimbangkan karakteristik geomorfologi dan tata guna lahan yang representatif untuk penerapan konsep *Low Impact Development* (LID) sebagai solusi drainase berkelanjutan. Benda uji dalam keadaan utuh direndam dalam air hingga jenuh (24 jam), lalu ditimbang beratnya dalam keadaan basah.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Analisis Hidrologi

Analisis curah hujan dilakukan menggunakan perangkat lunak *Hydrognomon* 4.0.3. Data diolah dengan lima distribusi probabilitas, yaitu *Normal*, *Log Normal*, *Gumbel*, *Pearson Type III*, dan *Log Pearson Type III*, untuk menentukan model curah hujan rencana. Distribusi terbaik dipilih berdasarkan uji *Chi-Kuadrat* dan *Kolmogorov-Smirnov* pada taraf kepercayaan 5%.

Pemodelan dengan EPA SWMM Kondisi Eksisting dan Penerapan Teknologi LID

Pemodelan sistem drainase dilakukan dengan perangkat EPA SWMM 5.1 berdasarkan dua skenario utama yaitu, Skenario 1 (Eksisting): kondisi saluran saat ini tanpa penerapan teknologi LID dan Skenario 2 (Setelah LID) penerapan dua jenis kontrol LID, yaitu *Vegetative Swale* dan *Permeable Pavement*.

Parameter model yang digunakan mencakup luas subcatchment, kemiringan, koefisien limpasan permukaan (*runoff coefficient*), serta kondisi *node* dan *conduit*. Simulasi dilakukan dengan input

curah hujan rencana periode ulang 10 tahun untuk menganalisis perubahan debit maksimum, volume limpasan, dan *continuity error*.

Teknologi LID diterapkan pada beberapa titik strategis, yaitu pada LID *Vegetative Swale*, ditempatkan di sisi jalan untuk meningkatkan infiltrasi dan memperlambat aliran permukaan dan *Permeable Pavement*, diterapkan pada area parkir dan trotoar untuk mengurangi limpasan permukaan dan memperbesar infiltrasi tanah.

Evaluasi dan Validasi Penelitian

Hasil simulasi yang telah didapatkan dari EPA SWMM dievaluasi dengan membandingkan nilai debit puncak, volume limpasan, dan *continuity error* antara dua skenario. Nilai *continuity error* <10% menunjukkan hasil simulasi yang valid (Kim & Joo, 2018). Validasi lapangan dilakukan dengan membandingkan hasil model terhadap kondisi genangan aktual di beberapa titik di Jalan Soekarno Hatta.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini membahas secara komprehensif hasil analisis hidrologi dan pemodelan hidraulik yang dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem drainase Jalan Soekarno Hatta, Kota Malang, baik pada kondisi eksisting maupun setelah penerapan konsep *Low Impact Development* (LID). Analisis dilakukan melalui dua tahapan utama, yaitu analisis curah hujan menggunakan aplikasi *Hydrognomon* 4.0.3 untuk menentukan curah hujan rencana berdasarkan periode ulang tertentu, serta simulasi sistem drainase menggunakan *EPA Storm Water Management Model* (SWMM 5.1) untuk mengkaji debit aliran dan kapasitas saluran.

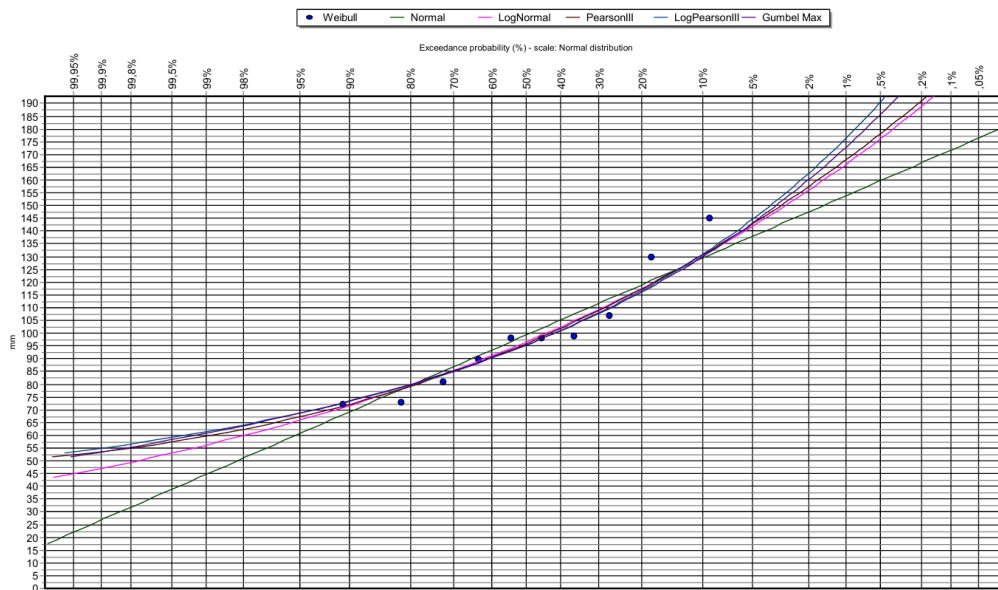
Analisis Debit Rencana Menggunakan Aplikasi *Hydrognomon* 4.0.3

Analisa debit banjir dihitung dengan mengumpulkan data curah hujan dari alat pengukur hujan yang terletak di sekitar lokasi penelitian. Stasiun hujan yang digunakan untuk analisis adalah Stasiun Geofisika Malang. Analisis data curah hujan diambil berdasarkan dari stasiun tersebut, dengan hasil nilai tertinggi setiap tahunnya. Rekapitulasi curah hujan yang diperoleh dari data BMKG periode 2015 hingga 2024 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Curah Hujan Maksimum Periode 2015-2024

No.	Tahun	Curah Hujan Maksimum (mm)
1	2015	89.9
2	2016	98.0
3	2017	99
4	2018	107
5	2019	81
6	2020	73
7	2021	98
8	2022	130
9	2023	72
10	2024	145

Tujuan pemodelan periode ulang menggunakan perangkat lunak *Hydrognomon* 4.0.3 (.25), bertujuan untuk menentukan distribusi yang dapat diterima dan tidak dapat diterima yang nantinya mempengaruhi pemilihan uji distribusi data yang digunakan dalam perhitungan rencana debit. Sehingga, hasil analisis oleh *Hydrognomon* 4.0.3(.25), berupa analisis time series dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik distribusi probabilitas Normal, Log Normal, Pearson III, Log Pearson III, dan Gumbel

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari *Hydrognomon*, curah hujan rencana yang dipilih adalah distribusi probabilitas Pearson III karena memiliki nilai debit tertinggi yaitu 99,975% dan diterima di kedua uji kesesuaian, yaitu uji *Chi-kuadrat* dan *Kolmogorov-Smirnov*. Sesuai dengan grafik pada Gambar 3 yang menunjukkan adanya kesesuaian antara data dan distribusi Log Normal. Sehingga diindikasikan bahwa distribusi tersebut adalah model yang paling tepat untuk menghitung debit rencana pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Hasil uji *Chi-Kuadrat* dan *Kolmogorov-Smirnov* yang diterima menggunakan *Hydrognomon* 5%

No.	Distribusi	Uji Kesesuaian ($\alpha = 5\%$)			
		Nilai <i>Chi-Kuadrat</i>	Ket	Nilai Kolmogorov-Smirnov	Ket
1	Normal	15,730%	<i>Accept</i>	94,417%	<i>Accept</i>
2	Log Normal	15,730%	<i>Accept</i>	99,870%	<i>Accept</i>
3	Pearson III	-		99,975%	<i>Accept</i>
4	Log Pearson Type III	-		99,910%	<i>Accept</i>
5	Gumbel	15,730%	<i>Accept</i>	99,902%	<i>Accept</i>

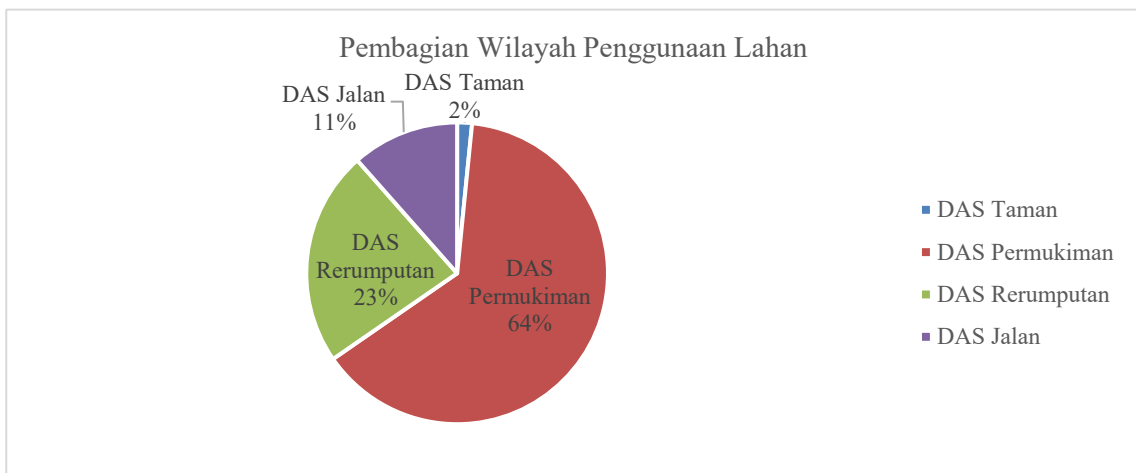
Tabel 3. Hasil distribusi probabilitas periode ulang hujan menggunakan *Hydrognomon*

No.	Periode Ulang (tahun)	Distribusi Probabilitas				
		Normal	Log Normal	Person III	Log Pearson III	Gumbel
1	2	99,290	96,629	95,986	95,411	95,411
2	5	119,036	117,572	117,449	116,176	116,176
3	10	129,357	130,268	130,679	130,854	129,909
4	20	137,881	141,780	142,692	144,561	143,082
5	25	140,364	145,321	146,381	148,946	147,169
6	50	147,474	155,958	157,424	162,604	160,133
7	100	153,870	166,189	167,974	176,443	172,910

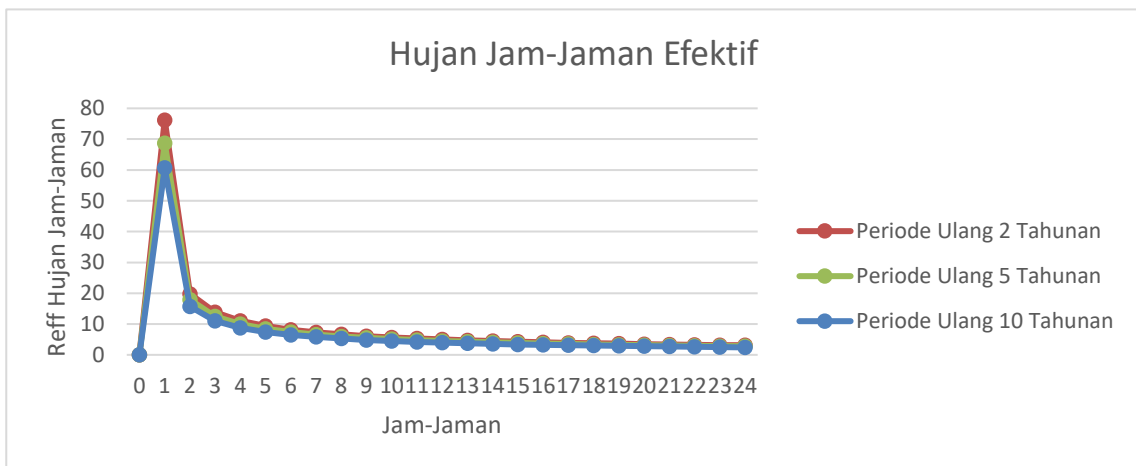
Dari hasil uji distribusi probabilitas, *Chi-kuadrat* dan *Kolmogorov-Smirnov* dengan persentase 5% diambil pada periode ulang tahunan 2, 5, dan 10. Ketiga ini akan dipilih untuk nilai hujan jam-jaman dan nilai yang dipakai pada input data pada EPA SWMM sebagai *time series*.

Perhitungan Hujan Jam-Jaman

Perhitungan time series yang diperoleh dari hasil Reff maksimum pada uji distribusi probabilitas pada kala ulang 2 tahunan sebesar 95,986, 5 tahunan sebesar 117,449, dan 10 tahunan sebesar 130,679 mm. Perhitungan ini akan digunakan sebagai input data pada aplikasi EPA SWMM. Dimana perhitungan ini menilai dari penggunaan lahan pada catchment area seluas 50,2 Hektare penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 3 dan nilai hujan jam-jaman efektif pada kala ulang 2, 5, dan 10 tahunan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Luas Wilayah Catchment Area Penelitian



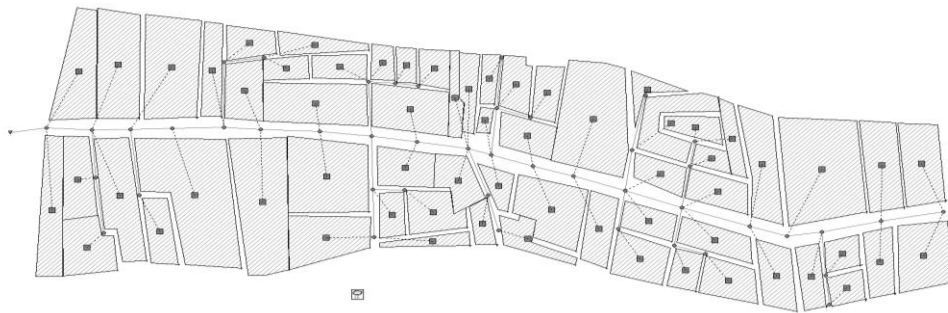
Gambar 4. Perhitungan Hujan Jam-Jaman Pada Periode Ulang 2, 5, Dan 10 Tahunan

Perhitungan Hujan Jam-Jaman

Tahap analisis hidrolika pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak EPA SWMM versi 5.1, setelah sebelumnya diperoleh hasil perhitungan curah hujan rencana dari aplikasi *Hydrognomon* 4.0.3. Analisis ini bertujuan untuk melakukan simulasi terhadap kinerja sistem drainase eksisting di koridor Jalan Soekarno Hatta, Kota Malang, serta mengevaluasi efektivitas

penerapan konsep LID dalam menurunkan debit limpasan permukaan dan meminimalkan potensi banjir kawasan.

Model EPA SWMM dipilih karena mampu mensimulasikan interaksi antara curah hujan, karakteristik permukaan lahan, dan perilaku sistem saluran secara hidrologis maupun hidraulis (Arifin, 2018). Dalam penelitian ini, data curah hujan hasil analisis Hydrognomon dengan periode ulang 10 tahun digunakan sebagai input rain gage dalam format time series. Selain itu, parameter utama seperti luas subcatchment, kemiringan, panjang aliran, dimensi saluran (*conduit*), dan titik pertemuan saluran (*junction*) ditentukan berdasarkan data lapangan dan hasil digitasi peta topografi (Lindawati et al., 2021).



Gambar 5. Hasil Digitasi Parameter pada Aplikasi EPA SWMM

Tabel 3. Dimensi Saluran Drainase Perencanaan

No.	Saluran (<i>Conduit</i>)	Tinggi (cm)	Lebar (cm)
1	Tersier	100	80
2	Primer	200	150
3	Sekunder	120	80

Setelah memasukkan data dimensi di setiap *conduits* selesai, selanjutnya running aplikasi sehingga didapat nilai status *run* dengan *surface runoff* sebesar -0,33% dan *flow routing* sebesar -0,24%. Simulasi LID *vegetative swale* dengan *surface runoff* sebesar 0,30% dan *flow routing* sebesar -1,96%, dan *Permeable Pavement* dengan *surface runoff* sebesar 0,29% dan *flow routing* sebesar -2,00%. maka hasil simulasi pada kondisi eksisting dikatakan benar karena nilai dibawah 10% validasi EPA SWMM.



(a)

(b)



(c)

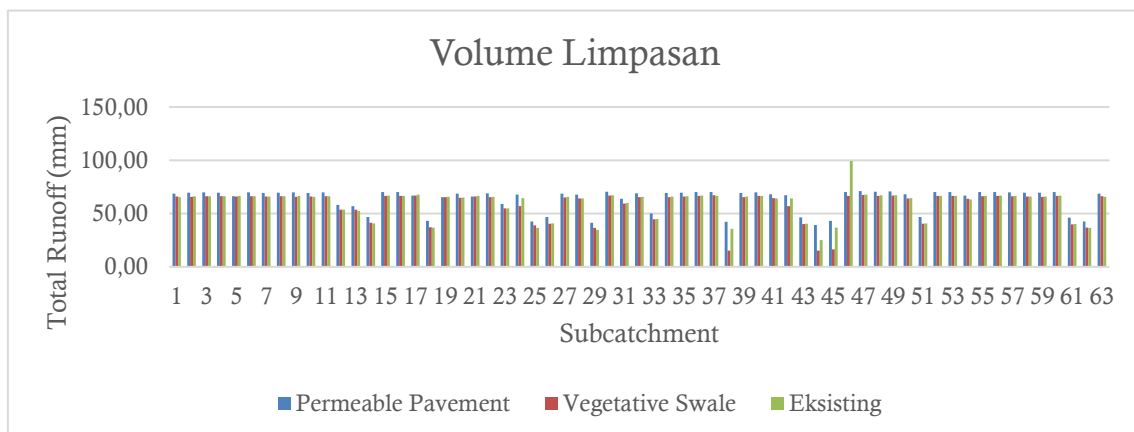
Gambar 6. Hasil Simulasi SWMM Kondisi (a) eksisting, (b) *Vegetative Swale*, dan (c) *Permeable Pavement*

Hasil simulasi menggunakan EPA SWMM 5.1 menunjukkan bahwa sistem drainase eksisting di Jalan Soekarno Hatta, Kota Malang belum mampu menampung debit hujan periode ulang 10 tahun. Sebagian besar *subcatchment* menghasilkan limpasan tinggi ($>0,50 \text{ m}^3/\text{s}$) dan beberapa *node* mengalami genangan signifikan, terutama di area padat bangunan. Hal ini menunjukkan kapasitas saluran yang terbatas akibat meningkatnya koefisien limpasan dan rendahnya infiltrasi lahan (Abdalla et al., 2024).

Penerapan konsep (LID) melalui *vegetative swale* dan permeable pavement terbukti menurunkan debit limpasan dan mengurangi titik genangan. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa *permeable pavement* memberikan penurunan debit paling signifikan ($<0,05 \text{ m}^3/\text{s}$) sekaligus meningkatkan infiltrasi air hujan. Dengan demikian, penerapan LID dapat menjadi strategi efektif untuk meningkatkan kinerja drainase dan mendukung pengelolaan infrastruktur jalan berkelanjutan di Kota Malang (Ardiyana et al., 2016).

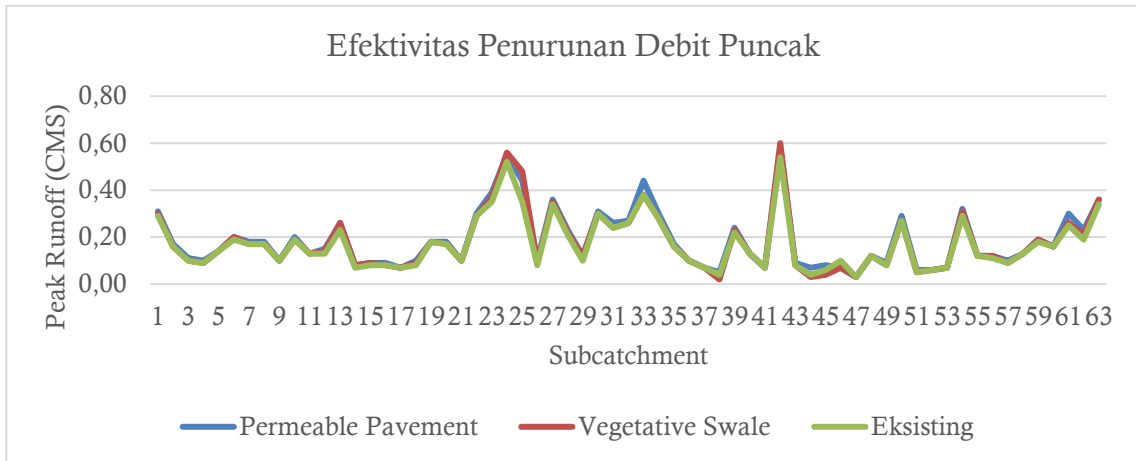
Analisis *Subcatchment Runoff* pada Kondisi Eksisting dan LID

Analisis ini dilakukan untuk membandingkan kinerja sistem drainase pada kondisi eksisting dengan dua penerapan LID, yaitu permeable pavement dan vegetative swale. Hasil simulasi dari EPA SWMM 5.1 kemudian diolah untuk melihat perubahan parameter hidrologi utama, seperti volume limpasan (*total runoff*), debit puncak (*peak runoff*), koefisien limpasan (*runoff coefficient*), serta kemampuan infiltrasi (*total infiltration*). Keempat parameter ini digunakan untuk menilai efektivitas penerapan LID dalam menurunkan limpasan permukaan dan meningkatkan efisiensi sistem drainase di kawasan Jalan Soekarno Hatta, Kota Malang.



Gambar 7. Grafik Volume Limpasan (*Total Runoff*)

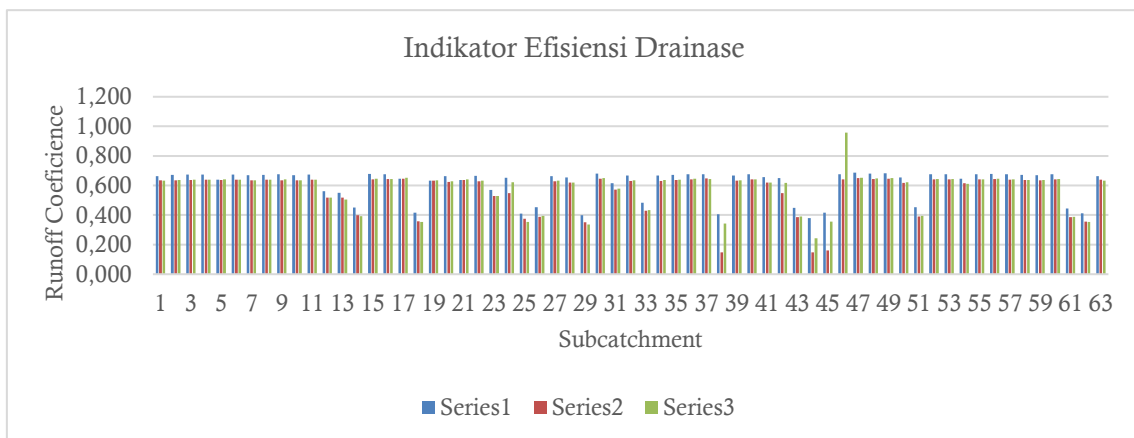
Volume limpas pada Gambar 8 memperlihatkan bahwa pada kondisi eksisting, sebagian besar *subcatchment* menghasilkan limpasan tinggi di atas 60 mm, yang menandakan rendahnya kemampuan infiltrasi kawasan. Setelah penerapan vegetative swale, terjadi penurunan signifikan pada nilai limpasan hingga berkisar antara 40–50 mm di sebagian besar area. Adapun penerapan *permeable pavement* menunjukkan kinerja terbaik, dengan penurunan total *runoff* hingga di bawah 30 mm pada beberapa *subcatchment*. Temuan ini mengindikasikan bahwa intervensi berbasis LID mampu mengurangi volume limpasan secara efektif dengan meningkatkan kemampuan peresapan air hujan pada permukaan lahan kedap air.



Gambar 8. Grafik Efektivitas Peurunan Debit Puncak (*Peak Runoff*)

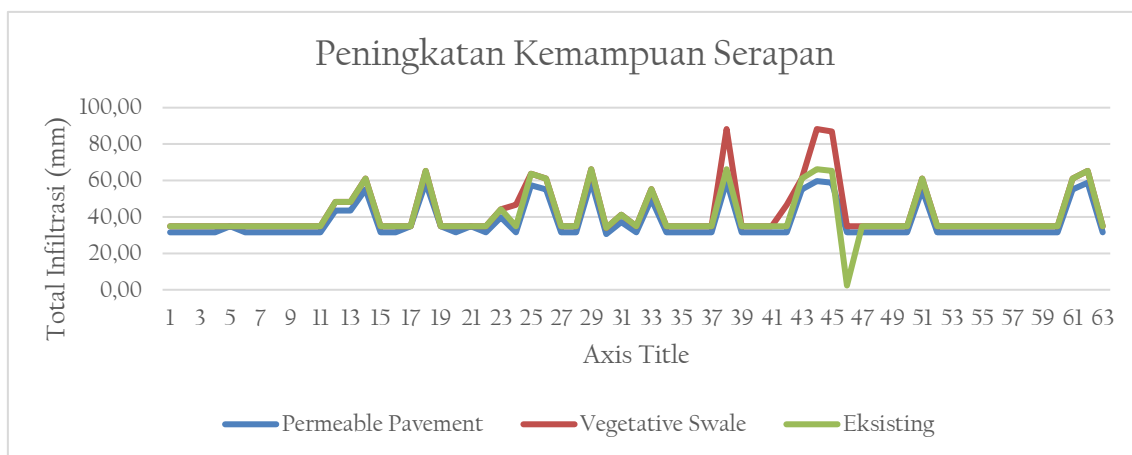
Grafik pada Gambar 9 ini menggambarkan perubahan nilai debit puncak limpasan (*Peak Runoff*, CMS) pada masing-masing *subcatchment*. Pada kondisi eksisting, debit puncak mencapai kisaran 0,3–0,6 *Centimeter Secon* dengan fluktuasi tajam di beberapa titik genangan. Setelah diterapkan *vegetative swale* dan *permeable pavement*, grafik menunjukkan penurunan debit puncak hingga di bawah 0,2 CMS pada sebagian besar titik.

Penurunan ini menunjukkan bahwa LID efektif dalam menunda dan menurunkan puncak aliran, yang berarti air hujan lebih banyak diserap dan disimpan secara lokal sebelum masuk ke sistem saluran utama. Dengan demikian, beban hidraulik pada saluran eksisting dapat berkurang dan risiko genangan berulang di kawasan padat permukiman dapat diminimalkan.



Gambar 9. Grafik Indikator Efisiensi Drainase (*Runoff Coefficient*)

Grafik *Runoff Coefficient* menggambarkan efisiensi sistem drainase melalui perbandingan antara volume limpasan dan curah hujan total. Pada kondisi eksisting, nilai koefisien limpasan cenderung tinggi (0,6–0,8), menunjukkan dominasi permukaan kedap air. Setelah penerapan *vegetative swale*, nilai koefisien menurun menjadi sekitar 0,5–0,6, sedangkan pada *permeable pavement* turun lebih signifikan hingga mendekati 0,4 di beberapa *subcatchment*. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja sistem drainase meningkat secara keseluruhan setelah penerapan desain jalan berkelanjutan, di mana aliran permukaan berkurang dan proses infiltrasi meningkat.



Gambar 10. Grafik Peningkatan Kemampuan Serapan (*Total Infiltration*)

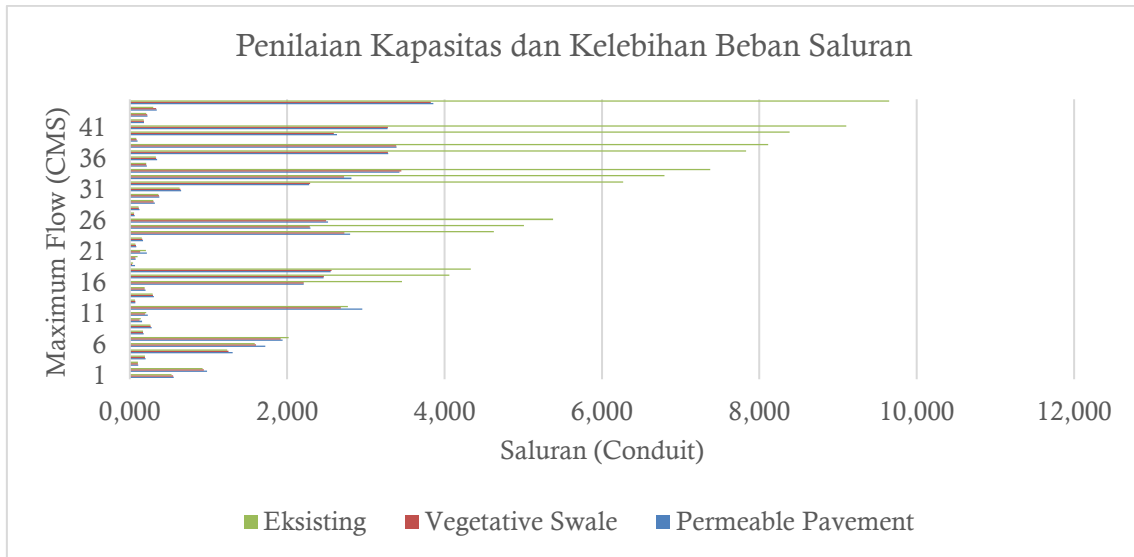
Grafik Total Infiltrasi menunjukkan peningkatan jumlah air hujan yang meresap ke dalam tanah (mm). Pada kondisi eksisting, nilai infiltrasi relatif rendah (sekitar 30–40 mm). Setelah diterapkan *vegetative swale*, nilai infiltrasi meningkat tajam hingga mencapai 80–90 mm di beberapa area, sedangkan *permeable pavement* memberikan peningkatan lebih moderat sekitar 60–70 mm.

Hal ini menunjukkan bahwa *vegetative swale* lebih unggul dalam meningkatkan infiltrasi tanah, karena kombinasi vegetasi dan media resapan dapat menahan aliran permukaan lebih lama. Namun, kombinasi keduanya *vegetative swale* dan *permeable pavement* dapat menjadi strategi paling efektif untuk menyeimbangkan efisiensi limpasan dan daya resap tanah pada sistem drainase perkotaan berkelanjutan.

Analisis Kinerja Hidraulik Saluran Drainase (*Link Flow*) pada Kondisi Eksisting dan LID

Analisis hidraulika pada penelitian ini bertujuan untuk menilai kinerja sistem drainase eksisting di Jalan Soekarno Hatta, Kota Malang, serta mengevaluasi efektivitas penerapan dua skenario *Low Impact Development* (LID), yaitu *vegetative swale* dan *permeable pavement*. Evaluasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak EPA SWMM 5.1, yang mampu mensimulasikan perilaku aliran dalam jaringan saluran secara dinamis terhadap input curah hujan hasil analisis periode ulang 10 tahun.

Simulasi dilakukan dengan meninjau tiga parameter utama, yaitu *Maximum Flow* (CMS), *Maximum Velocity* (m/s), dan *Max Full Flow*, yang merepresentasikan kapasitas, kestabilan, serta efisiensi saluran dalam menampung dan mengalirkan debit hujan. Parameter-parameter tersebut menjadi indikator kinerja saluran terhadap potensi banjir, erosi, dan efisiensi kapasitas desain. Dengan membandingkan hasil antar skenario, diperoleh gambaran yang komprehensif mengenai sejauh mana penerapan konsep LID dapat memperbaiki kinerja hidraulika drainase secara berkelanjutan di kawasan perkotaan.

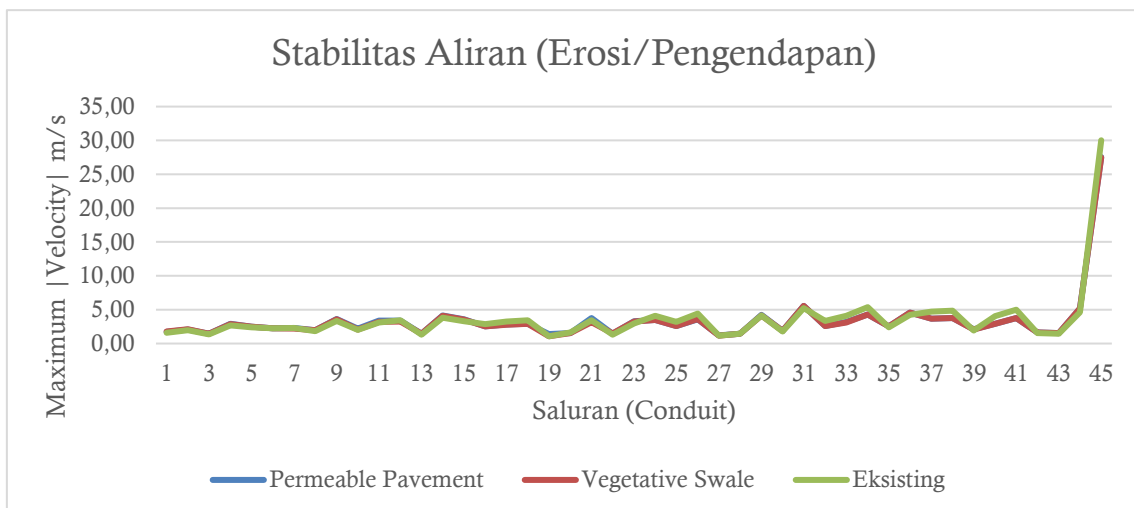


Gambar 11. Grafik Penilaian Kapasitas dan Kelebihan Beban Saluran

Grafik menunjukkan perbandingan *maximum flow* pada 45 saluran (*conduit*) di sepanjang koridor penelitian. Pada kondisi eksisting, beberapa saluran utama mencatat debit puncak mencapai lebih dari 8.000 L/s, yang menunjukkan bahwa sebagian besar sistem bekerja mendekati bahkan melampaui kapasitas desain. Hal ini disebabkan oleh tingginya koefisien limpasan akibat dominasi permukaan perkerasan dan rendahnya infiltrasi tanah.

Penerapan *vegetative swale*, debit maksimum menurun pada hampir seluruh segmen dengan penurunan rata-rata sekitar 30–40%, sedangkan skenario *permeable pavement* menghasilkan penurunan lebih besar hingga 50–60% dibandingkan kondisi eksisting.

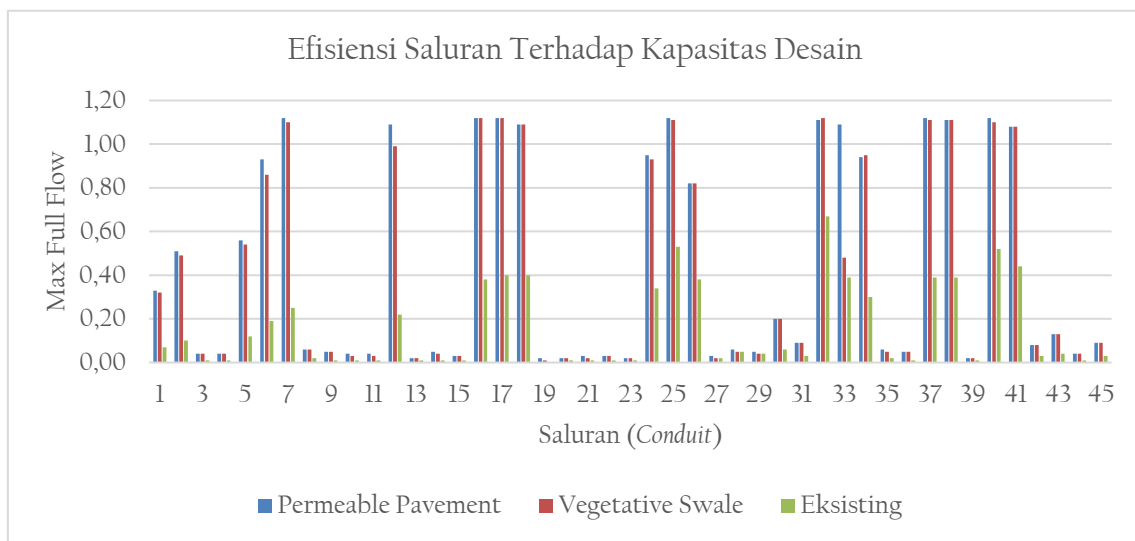
Hasil ini mengindikasikan bahwa kedua pendekatan LID mampu menurunkan beban hidraulik dan menunda waktu puncak limpasan, sehingga tekanan terhadap kapasitas saluran berkurang secara signifikan (Riduan et al., 2024).



Gambar 12. Grafik Stabilitas Aliran (Erosi/Pengendapan)

Grafik stabilitas aliran menunjukkan nilai *maximum velocity* pada masing-masing saluran yang menggambarkan potensi erosi atau pengendapan di dalam sistem drainase. Pada kondisi eksisting, kecepatan aliran di beberapa titik melebihi 25–30 m/s, yang berpotensi menimbulkan erosi dasar saluran, khususnya di segmen dengan kemiringan tinggi. Setelah diterapkan *vegetative swale*, kecepatan aliran menjadi lebih seragam dengan rata-rata penurunan sebesar 40%, sementara pada *permeable pavement* terjadi penurunan yang lebih signifikan, di mana kecepatan maksimum hanya berkisar antara 2–5 m/s.

Penurunan ini menunjukkan bahwa LID tidak hanya mengurangi debit limpasan tetapi juga meningkatkan kestabilan hidraulis saluran, menurunkan potensi erosi, dan memperpanjang umur infrastruktur drainase.



Gambar 13. Grafik Efisiensi Saluran Terhadap Kapasitas Desain

Grafik *Max Full Flow* digunakan untuk menilai efisiensi saluran dalam mengalirkan debit terhadap kapasitas maksimumnya. Pada kondisi eksisting, sebagian besar saluran menunjukkan nilai rasio antara 0,8–1,2, menandakan bahwa saluran bekerja hampir penuh bahkan melebihi kapasitas desain pada beberapa titik kritis. Hal ini menjelaskan seringnya terjadi genangan di area tengah koridor. Setelah penerapan *vegetative swale* dan *permeable pavement*, nilai *Max Full Flow* menurun di bawah 0,8, dengan distribusi aliran yang lebih merata di seluruh jaringan.

Hasil ini menegaskan bahwa penerapan LID mampu meningkatkan efisiensi sistem drainase dengan mengoptimalkan kapasitas penampang saluran tanpa perlu peningkatan dimensi fisik.

0	0,36	0,51	0,09	0,09	0,55	0,83	1,00	0,11	0,10	0	0,35	0,49	0,09	0,08	0,53	0,78	0,98	0,11	0,09
1	0,09	0,08	0,94	0,06	0,09	0,07	1,00	1,00	0,97	1	0,08	0,08	0,87	0,06	0,09	0,07	1,00	1,00	0,98
2	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,85	1,00	0,75	0,06	2	0,04	0,06	0,05	0,07	0,06	0,83	1,00	0,74	0,06
3	0,11	0,09	0,26	0,15	1,00	0,96	0,84	0,11	0,05	3	0,10	0,09	0,25	0,15	1,00	0,48	0,84	0,10	0,09
4	1,00	1,00	0,06	1,00	0,96	0,14	0,19	0,08	0,15	4	1,00	1,00	0,05	1,00	0,96	0,14	0,18	0,08	0,15
	0	1	2	3	4	5	6	7	8		0	1	2	3	4	5	6	7	8

(a)

(b)

0	0,12	0,16	0,04	0,04	0,17	0,24	0,30	0,05	0,04
1	0,04	0,03	0,27	0,03	0,04	0,03	0,40	0,42	0,42
2	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,37	0,52	0,41	0,06
3	0,10	0,09	0,10	0,06	0,63	0,41	0,34	0,04	0,04
4	0,42	0,42	0,02	0,52	0,46	0,06	0,07	0,03	0,08
	0	1	2	3	4	5	6	7	8

(c)

Gambar 14. Heatmap Kondisi (a) *Permeable Pavement*, (b) *Vegetative Swale*, dan (c) Eksisting

Heatmap pertama memperlihatkan dominasi warna hijau dan kuning muda, menandakan bahwa penerapan *permeable pavement* mampu secara efektif menurunkan limpasan permukaan di sebagian besar *subcatchment*. Nilai limpasan berada pada kisaran 0,02–0,4 mm, dengan rata-rata penurunan lebih dari 60% dibanding kondisi eksisting. Perkerasan berpori memungkinkan infiltrasi air ke lapisan bawah tanah, sehingga mengurangi aliran permukaan langsung menuju saluran drainase. Distribusi warna yang relatif seragam juga menunjukkan peningkatan pemerataan aliran dan stabilitas hidrologis kawasan, yang berdampak pada berkurangnya potensi genangan dan beban hidraulis saluran utama.

Heatmap kedua menunjukkan penurunan limpasan yang moderat dengan dominasi warna kuning kehijauan. Nilai limpasan rata-rata berkisar antara 0,3–0,6 mm, menunjukkan efektivitas *vegetative swale* dalam meningkatkan infiltrasi dan menunda waktu puncak limpasan. Area dengan nilai limpasan tinggi (merah muda–oranye) masih muncul pada beberapa titik, terutama di wilayah dengan elevasi lebih rendah atau kepadatan bangunan tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun *swale* berfungsi baik sebagai penahan aliran dan media infiltrasi, efektivitasnya masih terbatas oleh kondisi topografi dan kapasitas resapan tanah setempat.

Heatmap terakhir memperlihatkan dominasi warna merah dan oranye, mengindikasikan limpasan permukaan yang tinggi dan tidak terdistribusi merata di seluruh area. Nilai limpasan mencapai 0,5–1,0 mm, yang menandakan bahwa sistem drainase eksisting mengalami tekanan hidrologis besar akibat minimnya area resapan dan dominasi permukaan kedap air. Beberapa *subcatchment* menunjukkan warna merah pekat yang mengindikasikan area kritis genangan, khususnya pada zona tengah dan timur koridor penelitian. Kondisi ini menegaskan perlunya penerapan pendekatan *Low Impact Development* untuk menurunkan volume limpasan sekaligus meningkatkan kapasitas alami sistem drainase kawasan.

Secara keseluruhan, pola visual dari ketiga heatmap menunjukkan tren penurunan limpasan yang jelas dari kondisi eksisting ke arah penerapan *Vegetative Swale* dan paling signifikan pada *Permeable Pavement*. Hasil ini memperkuat bahwa integrasi konsep LID dalam desain drainase perkotaan dapat menjadi strategi efektif untuk mengendalikan banjir lokal, meningkatkan kapasitas resapan, serta mewujudkan sistem infrastruktur jalan yang lebih berkelanjutan di Kota Malang.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi EPA SWMM 5.1, sistem drainase eksisting di Jalan Soekarno Hatta, Kota Malang menunjukkan tingginya nilai *subcatchment runoff* dengan rata-rata debit mencapai 0,50–1,00 m³/s pada sebagian besar area tengah dan timur koridor. Nilai *link flow* pada beberapa saluran utama bahkan melebihi 10 m³/s, menandakan terjadinya kondisi *surcharge* dan genangan di titik-titik kritis. Hasil ini mengindikasikan bahwa kapasitas hidraulis saluran eksisting belum memadai

untuk menampung debit hujan periode ulang 10 tahun akibat tingginya tingkat kedap air dan minimnya area resapan.

Setelah diterapkan konsep *Low Impact Development* (LID) melalui dua skenario, yaitu vegetative swale dan permeable pavement, diperoleh penurunan signifikan pada hasil simulasi. Nilai subcatchment runoff berkurang menjadi rata-rata 0,10–0,35 m³/s pada skenario *vegetative swale* dan hanya 0,02–0,15 m³/s pada *permeable pavement*. Demikian pula, nilai link flow ekstrem yang semula mencapai lebih dari 10 m³/s menurun menjadi di bawah 4 m³/s, menunjukkan peningkatan efisiensi sistem drainase hingga lebih dari 60%.

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan EPA SWMM 5.1, dapat disimpulkan bahwa sistem drainase eksisting di Jalan Soekarno Hatta, Kota Malang belum mampu mengakomodasi limpasan permukaan akibat dominasi area kedap air dan keterbatasan kapasitas hidraulik saluran, sehingga memicu kondisi *surcharge* dan genangan pada beberapa titik kritis. Penerapan konsep *Low Impact Development* (LID) melalui *vegetative swale* dan *permeable pavement* terbukti efektif dalam menurunkan limpasan permukaan dan debit aliran saluran secara signifikan, yang menunjukkan peningkatan efisiensi kinerja sistem drainase. Dengan demikian, integrasi LID pada infrastruktur jalan dapat menjadi solusi yang adaptif dan berkelanjutan untuk meningkatkan kinerja drainase perkotaan di Kota Malang.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdalla, E. M. H., Sivertsen, E., Tamm, O., Werner, A., Koivusalo, H., & Helness, H. (2024). SWMMLIDopt: a tool for optimization of low-impact development (LID) measures using the SWMM model. *Journal of Hydroinformatics*, 26(11), 2781–2797. <https://doi.org/10.2166/hydro.2024.123>
- Amin, R., Rinanti, A., Kurniyaningrum, E., Anggraini, D. P., & Assidik, M. L. (2025). Implementation of Low Impact Development (LID) for Urban Drainage Optimization and Flood Mitigation. *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, 6(2), 35–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.38038/vocatech.v6i2.204>
- Ardiyana, M., Bisri, M., & Sumiadi. (2016). STUDI PENERAPAN ECODRAIN PADA SISTEM DRAINASE PERKOTAAN (Studi Kasus : Perumahan Sawojajar Kota Malang). *Jurnal Teknik Pengairan*, 7(2).
- Arifin, M. (2018). Evaluasi Kinerja Sistem Drainase Perkotaan Di Wilayah Purwokerto. *Jurnal Teknik Sipil-UCY*, 13(1), 53–65.
- Firmansyah, A., Kurniyaningrum, E., Herlina, L., Wihdah Misshuari, I., & Amin, R. (2024). Analisis pengaruh perubahan tata guna lahan menggunakan EPA-SWMM di DAS Krukut. *Indonesian Journal on Construction Engineering and Sustainable Development*, 7(2), 55–62. <https://doi.org/https://doi.org/10.25105/10.25105/cesd.v7i2.21759>
- Firmansyah, H., Daryanto, H. K., & Syarief, R. (2022). Analisis Strategi Pengembangan Bisnis Jasa Konstruksi (Studi Kasus: PT Tri Manunggal Karya). *Jurnal Manajemen*, 13(3), 396. <https://doi.org/10.32832/jm-uika.v13i3.8081>
- Gbran, H. (2024). Strategies for using sustainable urban drainage systems in the architectural design of civil infrastructure projects in Jakarta. *International Journal of Architecture and Urbanism*, 8(3), 358–370. <https://doi.org/10.32734/ijau.v8i3.17178>

- K, R. (2021). Analisis partisipasi masyarakat dalam pemeliharaan drainase Kota Makale. *Jurnal Plano Madani Perencanaan Wilayah & Kota*, 10(1), 90–98. <https://doi.org/10.24252/jpm.v10i1.21524>
- Kim, J., & Joo, J. (2018). Evaluation of Low Impact Development using EPA SWMM-LID Modeling. *13th International Conference on Hydroinformatics*, 1078–1080.
- Lindawati, L., Irawan, P., & Nursani, R. (2021). Evaluasi Sistem Drainase dalam Upaya Penanggulangan Banjir di Jalan A.H Nasution Kota Tasikmalaya Menggunakan Program EPA SWMM 5.1. *Jurnal Siliwangi*, 7(2), 41.
- Nazarpour, S., Gnecco, I., & Palla, A. (2023). Evaluating the effectiveness of bioretention cells for urban stormwater management: a systematic review. *Water (Switzerland)*, 15(5), 1–37. <https://doi.org/10.3390/w15050913>
- Octavia, S. N., Yulistiyanti, L. D., Setyanta, N. C., Wicaksono, R. H., & Setyobudi, R. (2024). Analysis of iri and sdi methods as a basis for determining road functional condition. *Jurnal Teknik Sipil & Teknologi Konstruksi*, 10(2), 1–8. <https://doi.org/10.35308/jts-utu.v10i2.9267>
- Pour, S. H., Wahab, A. K. A., Shahid, S., Asaduzzaman, M., & Dewan, A. (2020). Low impact development techniques to mitigate the impacts of climate-change-induced urban floods: Current trends, issues and challenges. In *Sustainable Cities and Society* (Vol. 62). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102373>
- Putri, F. K., Hidayah, E., & Ma'ruf, M. F. (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). <https://doi.org/10.2166/wst.2023.095>
- Riduan, R., Heraningtyas, C., Abdi, C., & Mazaya, G. I. (2024). Perencanaan Sistem Drainase Berwawasan Lingkungan (Eko-Drainase) di Kecamatan Banjarbaru Utara. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(4), 987–995. <https://doi.org/10.14710/jil.22.4.987-995>
- Suprapti, S., Hariati, F., Hidayat, A., Nuryanto, N., & Syaja'ah, S. K. (2024). Efektivitas Teknologi LID model sumur resapan untuk mereduksi runoff di perumahan Bumi Citra Asri, Bogor. *Jurnal Komposit: Jurnal Ilmu-Ilmu Teknik Sipil*, 8(1), 153–162. <https://doi.org/10.32832/komposit.v8i1.14983>
- Wahyu, H. M. H. (2017). Urban Drainage Management and flood control improvement using the duflo case study: aur sub catchment, Palembang, South Sumatra, Indonesia. *Makara Journal of Technology*, 21(2), 83. <https://doi.org/10.7454/mst.v21i2.3085>
- Yuono, A. L., Iryani, S. Y., Alia, F., & Al Amin, M. B. (2024). Simulasi pengendalian limpasan permukaan dengan penerapan low impact development di kawasan perumahan. *Cantilever: Jurnal Penelitian Dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 13(2), 113–128. <https://doi.org/10.35139/cantilever.v13i2.400>