

RESEARCH ARTICLE

# Implementation of Water Sensitive Urban Drainage to Overcome the Risk of Flooding in Malang City

(Penerapan Water Sensitive Urban Drainage untuk Mengatasi Resiko Banjir di Kota Malang)

Dandy Achmad Yani<sup>1</sup>, Suwignyo<sup>1</sup>, Azhar Adi Darmawan<sup>1\*</sup>, Khoirin Nissa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Malang, Jl. Raya Tlogomas No.46, Kota Malang, Indonesia

<sup>2</sup>Program Magister Teknik Pengairan, Universitas Brawijaya Malang, Jl. Veteran No. 10-11, Kota Malang, Indonesia

## ABSTRACT

This study aims to apply Water Resources Urban Design (WSUD) technology to improve water quantity and quality in the Brantas River Watershed (DAS), especially in Oro-Oro Dowo Village, Malang City. This village was chosen because several drainage channels have decreased efficiency in accommodating water runoff during the rainy season. The application of WSUD technology is expected to reduce the high surface runoff due to the decrease in water absorption areas, so this can be an alternative to conserving the availability of water resources in terms of quantity and quality. The modeling scenarios are arranged into two types. In the first scenario, the model is made without the application of WSUD, while in the second scenario, WSUD technologies are applied. There are permeable pavement, bioretention, constructed wetlands, and green roofs. The methodology used for the application of the WSUD concept is through the SWMM (Storm Water Management Model) program. The application of WSUD technology in the case study in Oro-Oro Dowo Village is planned along the sidewalks on Jalan Rinjani, Jalan Jakarta/Jalan Simpang Ijen, Jalan Besar Ijen, and Jalan Panggung, as well as green open spaces/city forests located in the administrative area of the village. The results of this study are in the form of a comparison of the total surface water runoff before and after the implementation of WSUD for each technology. As a result, green roof technology has the potential to reduce surface runoff higher than other technologies. However, the obstacles in the application of green roofs are the cost and roof leaks. Thus, the application of a combination of permeable pavement, bioretention, and constructed wetlands can be another option. The results of the application of the WSUD combination reached 96.88%.

Penelitian ini bertujuan untuk mengaplikasikan teknologi *Water Resources Urban Design* (WSUD) bagi perbaikan air permukaan DAS (Daerah Aliran Sungai) Sungai Brantas khususnya di Kelurahan Oro-Oro Dowo, Kota Malang. Kelurahan ini dipilih karena terdapat beberapa ruas saluran drainase yang sudah berkurang efisiensinya untuk menampung limpasan air pada saat musim hujan. Dengan adanya penerapan teknologi WSUD, diharapkan dapat mengurangi tingginya limpasan permukaan yang terjadi akibat penurunan daerah resapan air. Sehingga hal ini mampu menjadi alternatif dalam konservasi ketersediaan sumber daya air baik secara kuantitas maupun kualitas. Skenario pemodelan disusun menjadi dua macam. Pada skenario pertama, model dibuat tanpa diterapkannya WSUD, sedangkan pada skenario kedua dilakukan penerapan teknologi - teknologi WSUD seperti: *permeable pavement*, *bioretensi*, *rain barrel*, *constructed wetlands*, dan *green roof*. Metodologi yang digunakan yaitu, penerapan konsep WSUD yang akan dianalisa melalui program SWMM (*Storm Water Management Model*). Pengaplikasian teknologi WSUD pada studi kasus di Kelurahan Oro-Oro Dowo yaitu direncanakan disepanjang trotoar pada ruas Jalan Rinjani, Jalan Jakarta/Jalan Simpang Ijen, Jalan Besar Ijen, dan Jalan Panggung, serta ruang terbuka hijau/hutan kota yang terdapat di wilayah administrasi kelurahan tersebut. Hasil dari penelitian ini, berupa perbandingan total limpasan air permukaan sebelum dan sesudah diterapkannya WSUD masing - masing teknologi. Hasilnya, teknologi *green roof*, memiliki potensi mengurangi limpasan permukaan lebih tinggi daripada teknologi lainnya. Namun, kendala dalam pengaplikasian *green roof* adalah biaya dan kebocoran atap. Sehingga, pengaplikasian kombinasi *permeable pavement*, bioretensi dan *constructed wetlands* dapat menjadi opsi lain. Hasil dari penerapan kombinasi WSUD mencapai 96,88%.

**Keywords:** WSUD, Constructed Wetlands, Flood Mitigations.

\*Corresponding author:  
Azhar Adi Darmawan  
E-mail: azharadidfts@umm.ac.id

## PENDAHULUAN

Kota Malang merupakan salah satu daerah padat di Provinsi Jawa Timur. Saat ini di tahun 2023, domestik

di Kota Malang tercatat memiliki jumlah penduduk mencapai 846.126 jiwa, kepadatan penduduk mencapai 7.617 jiwa/km<sup>2</sup> dan laju pertumbuhan penduduk mencapai 0,14%. Sedangkan pada sektor

wisatawan, jumlah penduduk asing dapat mencapai 8.455 jiwa dan wisatawan lokal mencapai 2.749.783 jiwa [1]. Ironisnya kondisi kepadatan tersebut tidak dapat diimbangi dengan ketersediaan sumberdaya air yang bersih, bahkan sumber pasokan air bersih mengalami kecenderungan yang kian hari semakin mengalami kelangkaan [2]. Jika dirinci lebih lanjut permasalahan yang dihadapi pemerintah di bidang sumberdaya air di Kota Malang, yaitu: menurunnya curah hujan rerata harian tahunan karena berkurangnya daerah tangkapan hujan, penurunan kualitas air permukaan dan air tanah, dan problem banjir yang kerap terjadi akhir - akhir ini [3]. Salah satu penyebab banjir di Kota Malang adalah berkurangnya daerah resapan di DAS Brantas akibat perubahan fungsi lahan, dari Ruang Terbuka Hijau (RTH) menjadi pemukiman padat penduduk. Luas Daerah Aliran Sungai (DAS) mencapai 14.103 km<sup>2</sup> dengan panjang sungai 320 km [4]. Sehingga, salah satu upaya yang dapat diterapkan untuk mengurangi limpasan permukaan di DAS Brantas adalah dengan memperbanyak daerah resapan melalui konsep ekodrainase atau *Water Sensitive Urban Drainage* [5].

Kelurahan Oro-Oro Dowo merupakan salah satu daerah padat penduduk di Kota Malang yang memiliki permasalahan drainase karena kurang maksimalnya fungsi saluran drainase dalam menampung dan mengalirkan limpasan air hujan [5]. Penyebabnya adalah menumpuknya sampah di saluran. Penumpukan sampah di saluran meninggi selaras dengan pesatnya pertumbuhan penduduk yang diiringi oleh perubahan alih fungsi lahan seperti penyempitan RTH. Walaupun sudah adanya upaya dengan pengendalian fungsi lahan melalui ketetapan pemerintah di Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW), dengan tingkat pertumbuhan penduduk yang tinggi, proyeksi keberadaan RTH masih tetap dapat terancam [6]. Hal ini disebabkan oleh semakin tingginya pertumbuhan penduduk, maka semakin tinggi pembangunan kawasan terbangun yang terbukti dengan penurunan RTH dari tahun 2000-2015 di Kota Malang sebesar 30% [7].

Perubahan menjadi kawasan pemukiman padat seluruhnya atau tidak seimbang rasio kebutuhan RTH dengan jumlah penduduk dapat berdampak pada berkurangnya daerah resapan air. Berkurangnya daerah resapan air dan kurang efisiennya fungsi saluran drainase yang tersedia, pasti akan menimbulkan permasalahan cadangan air tanah dan

genangan dimasa depan yang juga diiringi dengan problematika kualitas air. *Water Sensitive Urban Drainage* atau biasa disingkat WSUD merupakan metode pengelolaan sumber daya air yang berprinsip pada pemulihan sirkulasi alami limpasan. WSUD di negara lain disebut juga dengan istilah *Sponge City* di China, *Sustainable Urban Drainage System (SUDS)* di Eropa, dan *Low Impact Development* di Canada. Sebelum WSUD diterapkan, kebijakan dalam penyelesaian masalah drainase perkotaan masih terpaku pada metode konvensional [8].

Metode konvensional ini, dianggap tidak cocok dalam penanganan masalah drainase perkotaan pada era perubahan iklim saat ini. Hal ini dikarenakan oleh sistem kerjanya yang melimpaskan air secara langsung ke saluran atau sungai dengan teknologinya yang menggunakan material kedap air, sehingga konstruksinya tidak akan bisa membantu dalam meningkatkan infiltrasi air untuk menyuplai cadangan air tanah dan *water sustainability* suatu kota. Di sisi lain, WSUD memiliki konsep teknologi untuk pengurangan limpasan air hujan, pengurangan aliran banjir pada jam puncak, dan pengurangan polutan dengan meningkatkan retensi, detensi, dan infiltrasi. Penerapan teknologi berbasis WSUD yang dapat dikembangkan dan digunakan untuk menyelesaikan permasalahan drainase perkotaan, contohnya: sumur resapan/*rain barrel*, bio-retensi, *rain garden*, *green-roof*, dan *permeable pavement* dan *constructed wetlands* [8].

Oleh sebab itu, pada Kelurahan Oro-Oro Dowo dibuat sebuah simulasi penanganan genangan melalui beberapa skenario penerapan WSUD pada *software Storm Water Management Model (SWMM)*. SWMM melacak kuantitas dan kualitas limpasan yang dihasilkan di setiap sub-DAS, dan laju aliran, kedalaman aliran, dan kualitas air di setiap pipa dan saluran selama periode simulasi yang terdiri dari beberapa langkah waktu [9]. Fokus pada penelitian ini yakni menganalisa hasil penerapan masing - masing teknologi WSUD dengan model *constructed wetland* yang dipilih (*surface with water lily vegetation*) terhadap pengurangan limpasan permukaan.

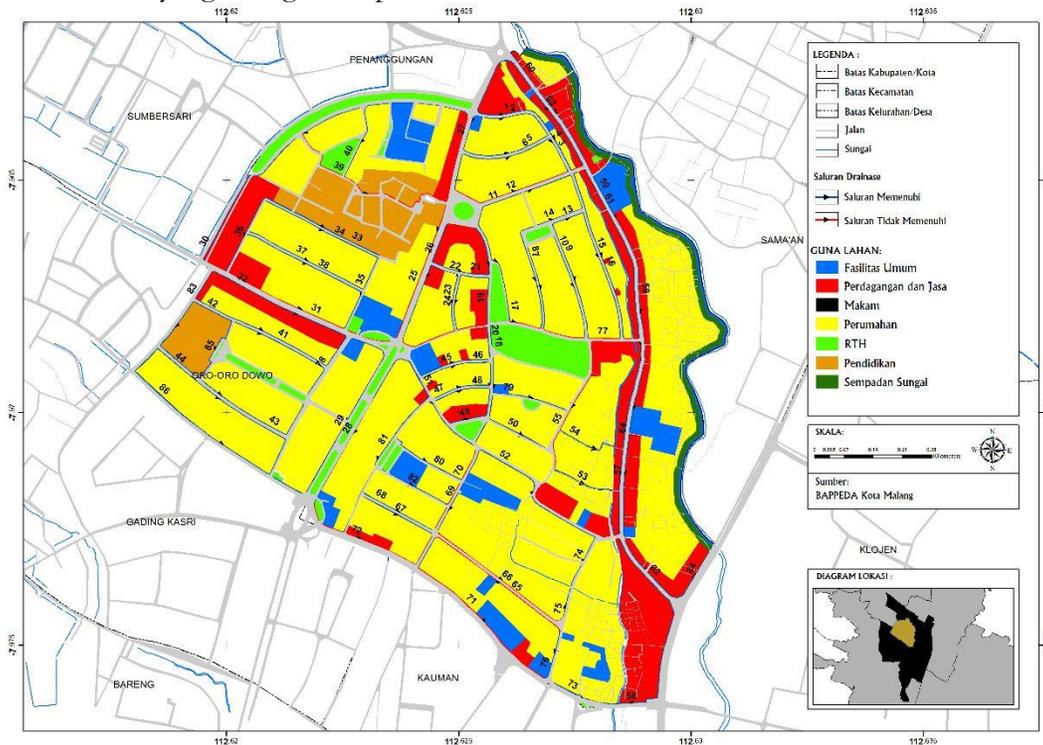
## METODE PENELITIAN

### Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di Kelurahan Oro-Oro Dowo, Kecamatan Klojen, Kota Malang, Provinsi Jawa Timur. Kelurahan Oro-Oro Dowo memiliki luas

wilayah berkisar 1,375 km<sup>2</sup>. Kelurahan Oro-Oro Dowo memiliki tata ruang yang cukup tertata. Dari hasil observasi yang dilakukan, ditemukan beberapa saluran di kelurahan ini yang mengalami penurunan

fungsi yang salah satunya disebabkan oleh pendangkalan saluran. Peta tata ruang Kelurahan Oro-Oro Dowo dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Kelurahan Oro-Oro Dowo [5]

### Data

Data yang digunakan pada penelitian ini, dirujuk dari hasil studi sebelumnya [5] dan pengumpulan data dari instansi terkait. Data yang digunakan untuk berlangsungnya penelitian ini, meliputi:

- Data Curah Hujan Rancangan 10<sup>th</sup> Pembacaan Stasiun Pendem.
- Peta Kelurahan Oro-Oro Dowo.
- Data Dimensi Saluran.

### Alur Penelitian

Simulasi limpasan permukaan dengan menggunakan SWMM untuk wilayah Kelurahan Oro-Oro Dowo dilakukan dengan dua skenario. Skenario pertama yakni analisa limpasan tanpa penerapan WSUD dan skenario kedua dengan penerapan WSUD. Runtutan pekerjaan adalah sebagai berikut:

- Pengumpulan data input SWMM seperti data curah hujan, peta kawasan/fungsi lahan, dimensi dan karakteristik saluran, elevasi dan luas *catchment area*.

- Analisis data curah hujan menjadi data hujan rancangan kala ulang 10<sup>th</sup>, serta identifikasi faktor kedap air sesuai fungsi lahan.
- Input data dan analisis SWMM pada *software* berdasarkan pemetaan tata guna lahan.
- Analisa limpasan permukaan skenario 1
- Analisa limpasan permukaan skenario 2. Penerapan teknologi WSUD dilakukan secara bertahap dengan urutan sebagai berikut: *permeable pavement* (PV), bioretensi (Br), *green roof* (GR) *constructed wetland* (CW). Penerapan PV dilakukan disepanjang trotoar pada ruas Jalan Rinjani, Jalan Jakarta/Jalan Simpang Ijen, Jalan Besar Ijen, dan Jalan Panggung. Penerapan CW di ruang terbuka hijau/hutan kota. Penerapan GR pada atap bangunan/rumah penduduk. Sedangkan penerapan Br dilakukan di ruas jalan dan juga hutan kota.
- Kesimpulan.

### Software SWMM

SWMM adalah model simulasi dinamis hubungan antara curah hujan dan limpasan air permukaan yang digunakan untuk menyimulasi kejadian tunggal atau jangka panjang (terus menerus) dari kuantitas dan kualitas limpasan disuatu daerah perkotaan. Komponen limpasan SWMM beroperasi pada daerah subcatchment (sub-DAS) yang menerima curah hujan dan menghasilkan limpasan dan beban polutan. SWMM melacak kuantitas dan kualitas limpasan yang dihasilkan di setiap sub-DAS, dan laju aliran, kedalaman aliran, dan kualitas air di setiap pipa dan saluran selama periode simulasi yang terdiri dari beberapa langkah waktu [10].

Parameter yang diinput untuk memulai analisis SWMM terdiri dari parameter *rain gages*, *subcatchment*, *conduit*, *junction*, dan *outfall*. SWMM memiliki sejumlah opsi yang mengontrol bagaimana simulasi sistem drainase air hujan dilakukan. Opsi dipengaruhi oleh koefisien infiltrasi yang dipilih, model *routing* untuk menentukan jenis aliran yang melewati sistem, dan opsi *routing* yang menentukan air dapat dikembalikan atau tidak ke *nodes* sebagai toleransi terhadap terjadinya genangan yang diinginkan. Saat proses running selesai, *continuity error* akan ditampilkan dengan batas wajar yang ditoleransikan adalah |10%| (harga mutlak).

Apabila melebihi batas tersebut, maka validitas hasil analisis harus dipertanyakan. Alasan paling umum untuk kesalahan kontinuitas yang berlebihan dapat terjadi karena langkah waktu komputasi yang terlalu panjang atau saluran yang terlalu pendek [9].

### Konsep WSUD

Pada *software* SWMM desain *green roof* (GR) terdiri dari *surface*, *soil*, *drainage mat*. Lapisan *drainage mat* merupakan lapisan penyimpanan yang dapat berbentuk rangkaian tabung bioretensi vertikal seperti sarang lebah [11]. Untuk *permeable pavement* (PV), terdiri atas beberapa jenis lapisan seperti: *surface*, *pavement*, *soil*, *storage*, dan *drain* [12]. Sedangkan bioretensi (Br) dan *Constructed Wetland* (CW) memiliki tiga lapisan, yaitu: *surface*, *soil*, dan *storage*. Lapisan *surface* dapat diisi oleh vegetasi yang dapat menyaring polutan. Perbedaan Br dan CW yaitu apabila mempertimbangkan peningkatan kualitas air CW akan lebih baik dari BR. Sedangkan untuk mereduksi limpasan permukaan, akan lebih baik menerapkan bioretensi [13]. CW dapat

menjadi sebuah alternatif dalam menangani limpasan permukaan yang dapat diterapkan secara pribadi di rumah, blok/komplek perumahan, area komersil, bahkan pada kompleks industri [14]. Namun, perlu dilakukan pemeliharaan secara berkala terhadap teknologi ini apabila polutan yang masuk memiliki beragam degradasi. Selain itu, untuk penerapan yang efektif dan berumur panjang perlu memperhatikan karakteristik curah hujan dan polutan didaerah tersebut. Hal ini disebabkan curah hujan dapat mempengaruhi kapastias tampungan (retensi) dan juga mempengaruhi konsentrasi polutan pada saat hujan terjadi [15].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Data Input SWMM

Data *rain gages* diperoleh dari analisis curah hujan rancangan yang digunakan dalam analisa limpasan air permukaan melalui *software* SWMM adalah kala ulang 10 tahun dalam ketentuan durasi/lamanya hujan selama 6 jam. Tabel 1 adalah hasil analisa curah hujan rancangan kala ulang tahun dalam durasi jam ke-1 sampai ke-6.

Tabel 1. Analisa Curah Hujan Kala Ulang 10 Tahun Durasi Jam-Jam an

No	Jam Ke	Hujan Jam-Jaman (mm/hari)
1	1	60,45
2	2	15,71
3	3	11,02
4	4	8,77
5	5	7,41
6	6	6,48
Total Precipitation		109,85

sumber: Hasil Analisa Stasiun Hujan Pendem

Data yang digunakan untuk membuat bagian – bagian *subcatchment* di lembar kerja SWMM, diperoleh dari *ploting* citra satelit Kelurahan Oro – Oro Dowo tahun 2020. Dari hasil *ploting*, dihitung luas, lebar, dan diidentifikasi persentase kedap air, non kedap air, *slope*, serta *outlet* untuk mepresentasikan karakteristik *subcatchment* yang dikehendaki pada program SWMM. Berikut Tabel 2 adalah data yang diinputkan pada bagian *subcatchment*.

Tabel 2. Parameter *Subcatchment*

<i>Subcatchment</i>	Luas (ha)	Lebar (m)	% Slope
S1	1,38	298,81	0,4016
S2	0,74	323,97	3,2102
S3	1,25	411,40	3,0141
S4	1,15	446,15	2,5552
S5	5,51	433,95	3,3184
S6	1,67	504,08	2,8567
S7	5,02	398,11	3,1147
S8	3,86	455,68	2,7212
S9	23,22	599,36	2,2357
S10	8,04	759,48	1,6327
S11	9,73	734,21	1,4165
S12	13,2	369,11	2,8176
S13	4,37	388,32	2,6782
S14	4,48	228,98	4,5419
S15	8,86	407,82	4,2666
S16	15,82	577,61	3,0124
S17	13,12	430,61	2,8796
S18	11,29	408,24	4,2622

Sumber : Hasil Perhitungan

Pada Kelurahan Oro-Oro Dowo yang merupakan kawasan pemukiman padat penduduk, nilai parameter

kedap air adalah 75%. Tata letak tiap *subcatchment* dapat dilihat pada Gambar 2.

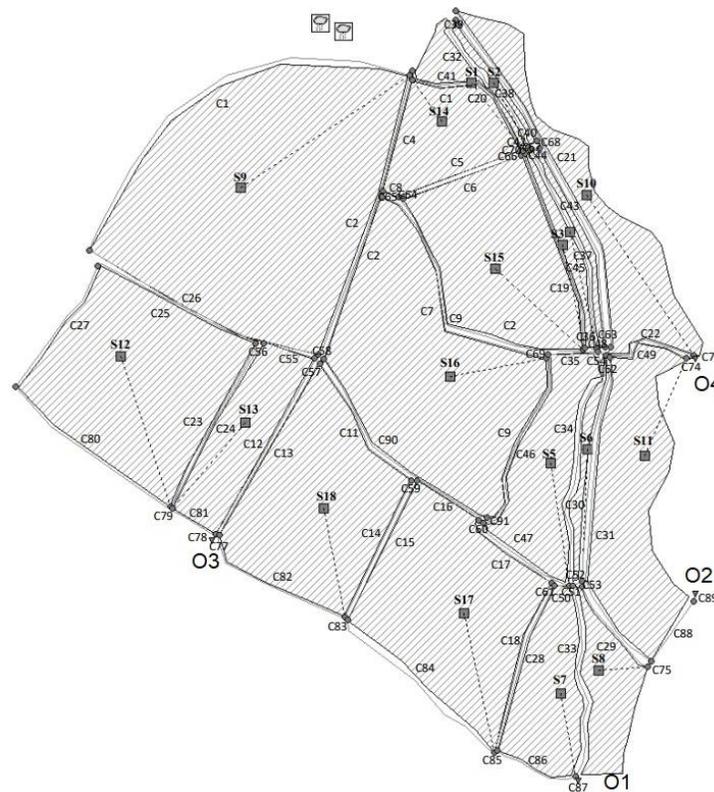
**Hasil Analisa SWMM - Skenario 1**

Berdasarkan hasil analisa melalui software SWMM dengan *running stimulation option* yang disetting pada:

- *Proses Model* : *Rainfall/Runoff*
- *Infiltration Model* : *Horton*
- *Routing Model* : *Dynamic Wave*
- *Routing Options* : - (tidak dicentang)

bahwa dampak perubahan fungsi lahan menjadi pemukiman padat pada masing - masing *subcatchment* terhadap adanya genangan di wilayah tersebut terangkum pada Gambar 3.

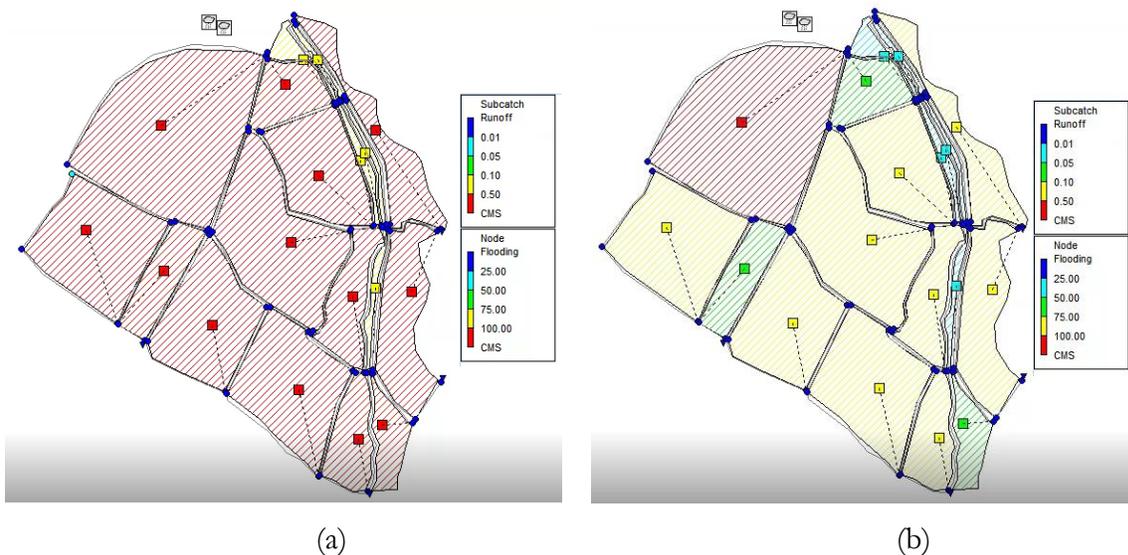
Dari hasil running skenario 1 (Gambar 3) menunjukkan bahwa limpasan permukaan pada pada tiap *subcatchment* berbeda - beda. Hal ini disebabkan karena limpasan yang terjadi, dipengaruhi oleh luasan masing - masing *subcatchment* [9]. Bisa dilihat pada Gambar 4 indikator berwarna kuning yang menerangkan bahwa meskipun S1, S2, S3, S4, dan S6 memiliki total run off paling besar (Gambar 3) justru memiliki peak run off lebih kecil daripada yang lain akibat luasan lahannya.



Gambar 2. *Lay Out* Kelurahan Oro-Oro Dowo pada software SWMM

Subcatchment	Total Precip mm	Total Runon mm	Total Evap mm	Total Infil mm	Imperv Runoff mm	Perv Runoff mm	Total Runoff mm	Total Runoff 10 <sup>6</sup> ltr	Peak Runoff CMS	Runoff Coeff
S1	109.85	0.00	0.00	0.78	81.69	26.00	107.68	1.49	0.25	0.980
S2	109.85	0.00	0.00	0.78	82.39	26.52	108.91	0.81	0.13	0.991
S3	109.85	0.00	0.00	0.78	82.35	26.45	108.80	1.36	0.22	0.990
S4	109.85	0.00	0.00	0.78	82.36	26.47	108.83	1.25	0.20	0.991
S5	109.85	0.00	0.00	0.78	81.72	26.01	107.74	5.94	0.98	0.981
S6	109.85	0.00	0.00	0.78	82.34	26.42	108.76	1.82	0.30	0.990
S7	109.85	0.00	0.00	0.78	81.70	26.00	107.71	5.41	0.89	0.980
S8	109.85	0.00	0.00	0.78	81.94	26.13	108.06	4.17	0.69	0.984
S9	109.85	0.00	0.00	0.78	80.44	25.30	105.74	24.55	4.13	0.963
S10	109.85	0.00	0.00	0.78	81.59	25.94	107.53	8.65	1.43	0.979
S11	109.85	0.00	0.00	0.78	81.33	25.81	107.15	10.43	1.73	0.975
S12	109.85	0.00	0.00	0.78	80.67	25.44	106.11	14.01	2.35	0.966
S13	109.85	0.00	0.00	0.78	81.73	26.02	107.74	4.71	0.78	0.981
S14	109.85	0.00	0.00	0.78	81.50	25.90	107.40	4.81	0.80	0.978
S15	109.85	0.00	0.00	0.78	81.38	25.84	107.22	9.50	1.58	0.976
S16	109.85	0.00	0.00	0.78	81.00	25.63	106.63	16.87	2.82	0.971
S17	109.85	0.00	0.00	0.78	80.86	25.55	106.41	13.96	2.34	0.969
S18	109.85	0.00	0.00	0.78	81.16	25.72	106.88	12.07	2.01	0.973

Gambar 3. Report Summaries Limpasan Puncak pada setiap Subcatchment sebelum penerapan WSUD



Gambar 4. Peta kondisi genangan pada saat jam puncak (a) dan pada saat akhir durasi hujan (b)

### Hasil Analisa SWMM - Skenario 2

Dengan *running stimulation options* yang sama dengan skenario 1, penerapan WSUD pada daerah pemukiman padat dapat dilihat pada Tabel 4.

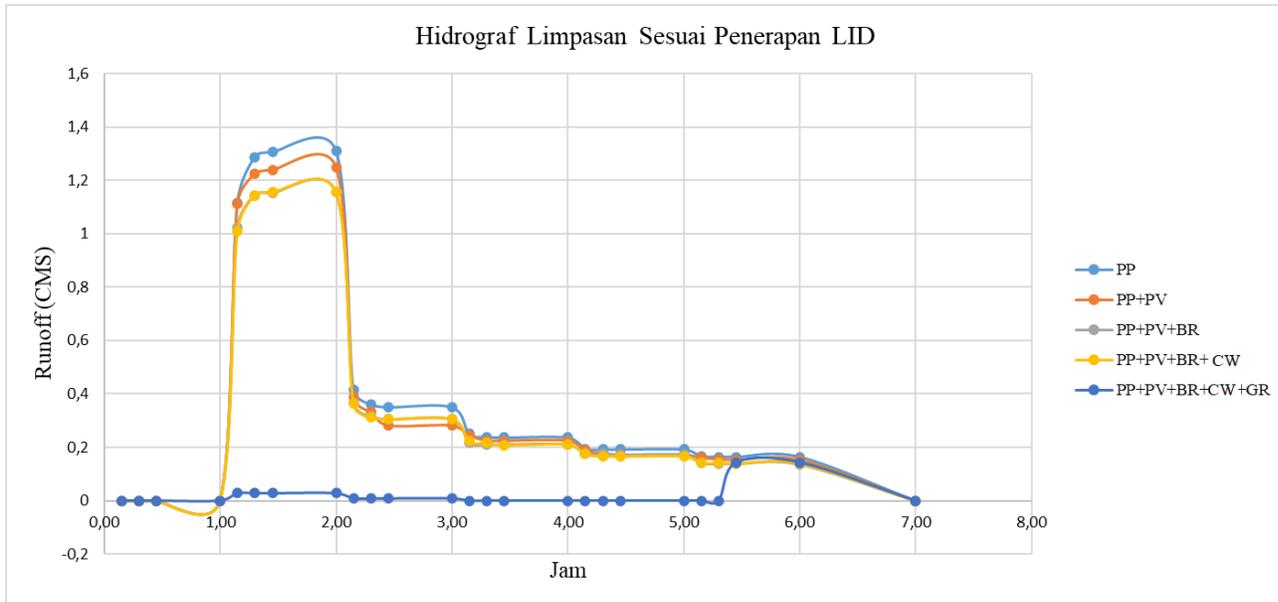
PP (Pemukiman Padat Penduduk) memiliki data input yang sama dengan skenario 1. Dari hasil yang ditunjukkan oleh Tabel 4, penerapan CW tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap reduksi limpasan permukaan daripada bioretensi [13]. Sedangkan apabila ditinjau berdasarkan kapasitas tampungan dari masing - masing teknologi WSUD, teknologi *green roof* memiliki efisiensi lebih besar

daripada yang lain. Untuk mengetahui, seberapa efektif penerapan masing - masing teknologi, maka perlu ditinjau dari perbandingan kapasitas tampungan dari reduksi limpasan permukaan yang dihasilkan. Namun, meskipun *green roof* memiliki kemampuan yang lebih baik daripada yang lain dalam mengatasi banjir pada jam puncak (Gambar 5), penerapan *green roof* lebih memiliki banyak tantangan, seperti biaya konstruksi dan perawatan yang mahal, hingga kebocoran pada atap [16].

Tabel 4. Dampak Penerapan WSUD terhadap Limpasan Permukaan yang Terjadi

No.	LID yang Diterapkan	Curah Hujan mm	Infiltrasi mm	Effective Storage mm	Runoff mm	CE %
1	PP	109,85	0,781	3,091	106,836	-0,781
2	PP + PV	109,85	0,743	8,306	101,592	-0,720
3	PP + PV + Br	109,85	0,695	15,263	94,591	-0,632
4	PP + PV + Br + CW	109,85	0,695	15,309	94,545	-0,632
5	PP+ PV + Br + CW + GR	109,85	0,005	106,432	3,328	0,075

Sumber : Hasil Analisa



Gambar 5. Hidrograf Limpasan Permukaan Jam - Jam-an

**Diskusi**

Software SWMM melakukan pengolahan data yang diinput sesuai dengan karakteristik *subcatchment* dan *rain gages* [9, 12]. Pada data analisis besarnya limpasan permukaan, koefisien limpasan setiap *subcatchment* berbeda - berbeda (Gambar 3). Hal ini dipengaruhi oleh kemiringan dan luas masing - masing *subcatchment*. Semakin miring dan semakin kecil sebuah *subcatchment*, maka akan semakin mendekati 1 angka koefisien limpasannya. Sebagai contoh yang terjadi pada S2 - scenario 1, luas *subcatchment* yakni 0,74 Ha dan *slope* 3,21% (Tabel 2) memiliki besaran koefisien limpasan 0,991 (Gambar 3). Sedangkan pada S9 dengan luas 23,22 Ha dan *slope* 2,24% (Tabel 2) memiliki besaran koefisien limpasan 0,963 (Gambar 3) yang juga merupakan *subcatchment* dengan tinggi limpasan paling rendah di antara yang lain, namun karena luasnya daerah tangkapan hujan, volume limpasan permukaan pada S9 bukan paling kecil dan tergolong besar, yakni  $24,55 \times 10^6$  Liter (Gambar 3). Artinya bahwa, semakin

curam dan semakin luas sebuah daerah, maka semakin besar pula limpasan air permukaanya. Hal ini disebabkan, kecuraman lahan dapat memperlambat laju infiltrasi [17].

Menurut Tabel 4, penerapan WSUD secara umum dapat mengurangi tinggi limpasan/genangan yang terjadi di lahan apabila diaplikasikan secara terpadu, meskipun dalam realisasinya akan dipenuhi oleh beragam tantangan [18]. Sesuai teknologi WSUD yang diterapkan secara bertahap, dapat diketahui bahwa masing - masing teknologi memiliki efisiensi kerja yang berbeda. Efisiensi tertinggi dihasilkan dari penerapan *green roof*, disusul *permeable pavement*, bioretensi, dan *constructed wetland*. Efisiensi PV bisa dikatakan lebih baik karena berdasarkan perbandingan *storage* masing - masing teknologi, PV mampu menampung 63,1% dari desain tampungannya. Dibandingkan dengan *green roof*, penerapan PV lebih mudah dijangkau dengan memanfaatkan trotoar jalan, lahan parkir, dan fasilitas umum. Meskipun begitu, tetap akan lebih baik jika

penerapan kombinasi dari beberapa jenis teknologi WSUD dapat diimplementasikan [19]. Terbukti dengan adanya kombinasi *permeable pavement*, bioretensi, dan *green roof*, limpasan permukaan dapat direduksi hingga 96,88%.

Keberhasilan penerapan WSUD pada permasalahan tinggi limpasan/genangan di Kelurahan Oro-Oro Dowo, tidak 100% dicapai. Hal ini dikarenakan adanya limit dalam pembagian luas area dan dimensi yang bisa diterapkan. Pada software SWMM, total luas dari semua luasan penerapan WSUD disebut *subcatchment*, haruslah sama dengan jumlah luas *subcatchment* tersebut. Sedangkan pengaruh dari ketelitian dan kesesuaian dimensi yang diterapkan, dapat meningkatkan hasil persentase *continuity error* [9].

## KESIMPULAN

Reduksi banjir di Kelurahan Oro-Oro Dowo, perlu memerlukan kombinasi teknologi - teknologi WSUD agar mencapai penurunan limpasan permukaan 96,88%. Reduksi limpasan permukaan paling besar dihasilkan dari penerapan *green roof*, kemudian *permeable pavement*, bioretensi, dan terakhir *constructed wetland*. Berdasarkan kemungkinan dalam pengaplikasiannya, teknologi *permeable pavement* dapat dipilih. Namun, apabila tidak mempertimbangkan biaya dan kebocoran atap, transisi ke *green roof* juga disarankan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan pada Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Malang (FT-UMM) yang telah mendanai pelaksanaan kegiatan penelitian dan pihak mitra dalam hal ini *stakeholder* yang telah memberikan serta membantu menyediakan data yang dibutuhkan guna pelaksanaan kegiatan. Selain itu, disampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu sehingga kegiatan penelitian ini dapat berjalan dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] BPS, "Badan Pusat Statistik Kota Malang," 25 February 2024. [Online].
- [2] A. A. Darmawan, S. M. Bisri and E. Suhartanto, "Assessment of spatial changes of LULC dynamics, using multi temporal landsat data (Case Study: Lesti Sub Watershed, Malang Regency, Indonesia)," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 930, p. 109, 2021.
- [3] A. A. Darmawan and E. Setyono, "Iptek bagi masyarakat dalam rangka pendampingan gambar teknik dan anggaran biaya di kawasan perumahan," *Jurnal Pendidikan Tambusai*, vol. 7, pp. 41-50, 2023.
- [4] B. Brantas, "Pola Sumber Daya Air Wilayah Sungai Brantas," 2020. [Online]. [Accessed 26 Februari 2024].
- [5] K. E. Sari, D. Harisuseno and C. A. Shafira, "Pengendalian air limpasan permukaan dengan penerapan konsep ekodrainase," *PLANO MADANI*, vol. 7, pp. 24-36, 2018.
- [6] T. Akbari, M. and G. Maslahat, "Strategi pengelolaan ruang terbuka hijau di kota Serang berbasis teknologi sistem informasi geografis," *Jurnal Kebijakan Pembangunan Daerah*, vol. 8, pp. 1-13, 2024.
- [7] M. R. Pratama, A. Rachmansyah and F. Usman, "Pemodelan dinamis kebutuhan ruang terbuka hijau kota Malang," *The Indonesian Green Technology*, vol. 5, 2016.
- [8] G. Fan, R. Lin and Z. Wei, "Effect of low impact development on the stormwater run off and pollution control," *Science of the Total Environment*, 2022.
- [9] L. A. Rossman, "Storm water management model user's manual version 5.1," *Cincinnati: Environmental Protection Agency (EPA)*, 2015.
- [10] EPA, "Storm Water Management Model (SWMM)," United States Environmental Protection Agency, 27 February 2024. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm#capabilities>. [Accessed 10 August 2024].
- [11] S. Jeffers, B. Garner, D. Hidalgo, D. Daoularis and O. Warmerdam, "Insight into green roof modeling using SWMM LID controls for detention-based designs," *Journal of Water Management Modeling*, 2022.
- [12] E. M. Uribeetxebarria, M. G. Antin and J. A. Berrondo, "Sensitivity analysis of permeable pavement hydrological modelling in the Storm Water Management Model," *Journal of Hydrology*, vol. 600, 2021.
- [13] A. Liu, P. Egodawatta and A. Goonetilleke, "Ranking three Water Sensitive Urban Drainage (WSUD) practices based on hydraulic and water quality treatment performances: implications for effective stormwater treatment design," *Water*, vol. 14, 2022.
- [14] A. I. Stefanakis, "The role of constructed wetlands as green infrastructure for sustainable urban water management," *Sustainability*, vol. 11, 2019.
- [15] H. Choi, M. Jeon, F. K. Geronimo, L.-H. Kim and J.-H. Min, "Evaluation of the performance of nature-based constructed wetlands for treating wastewater from various land uses in Korea," *Water*, vol. 12, 2020.

- [16] M. Shafique, R. Kim and M. Rafiq, "Green roof benefits, opportunities and challenges - a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, 2018.
- [17] M. Jourgholami, S. Karami, F. Tavankar, A. L. Monaco and R. Picchio, "Effects of slope gradient on runoff and sediment yield on machine-induced compacted soil in temperate forests," *Forest*, vol. 12, 2021.
- [18] S. Cotteril and L. J. Bracken, "Assessing the effectiveness of Sustainable Drainage Systems (SuDS): interventions, impacts and challenges," *Water*, vol. 12, 2020.