

STUDI PENERAPAN *ECODRAIN* PADA SISTEM DRAINASE PERKOTAAN (Studi Kasus : Perumahan Sawojajar Kota Malang)

Mita Ardiyana¹, Mohammad Bisri², Sumiadi²

¹Staf Sub Bagian Perencanaan Evaluasi & Pelaporan Dinas Pengairan Kabupaten Malang

²Dosen Jurusan Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang

¹mita_ardiyana@yahoo.com

ABSTRAK : Ekodrainase merupakan konsep pengelolaan air hujan dan limpasannya pada sistem drainase perkotaan. Pada musim hujan, Sawojajar sebagai kawasan padat bangunan dan penduduk, menjadi salah satu daerah genangan di Kota Malang. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kapasitas saluran drainase eksisting, mengetahui penempatan dan dimensi struktur ekodrainase yang sesuai dengan kondisi Perumahan Sawojajar serta mengetahui prosentase reduksi debit limpasan hujan dengan penerapan ekodrainase di lokasi studi. Untuk menganalisanya, dilakukan pemodelan limpasan hujan kala ulang 5 tahun menggunakan instrumen *Storm Water Management Model* (SWMM) dengan membandingkan kondisi jaringan drainase sebelum dan sesudah penerapan sumur resapan, bioretensi dan perkerasan permeabel. Untuk simulasi hujan rancangan, menggunakan data curah hujan jam-jaman yang diperoleh dari stasiun penakar Kedungkandang selama 10 tahun (2006 – 2015). Perhitungan intensitas hujan menggunakan metode Sherman, diperoleh intensitas hujan durasi 2 jam dengan kala ulang 5 tahun sebesar 22.67 mm/jam. Untuk kalibrasi model, data curah hujan dan debit outlet menggunakan hasil pengamatan pada tanggal 02 April, 14 April dan 20 Oktober 2016. Hasil kalibrasi model menunjukkan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) antara debit pemodelan dengan debit terukur sebesar 3.1%, sedangkan nilai RMSE hasil validasi dan verifikasi masing-masing sebesar 4.70% dan 4.43%. Hasil simulasi menunjukkan kapasitas saluran drainase eksisting tidak mampu menampung hujan kala ulang 5 tahun, mengakibatkan genangan di 25 titik. Prosentase reduksi debit limpasan lahan dan saluran dengan penerapan sumur resapan, bioretensi dan perkerasan permeabel berkisar antara 14.49% - 92.26%, sedangkan reduksi debit banjir di outlet akhir mencapai 37.55%. Sumur resapan mereduksi 23.41% debit limpasan, perkerasan permeabel 14.02% sedangkan bioretensi 0.1%.

Kata kunci: ekodrainase, debit limpasan hujan, pemodelan, kalibrasi, SWMM

ABSTRACT : *Ecodrain is the concept of rainwater management and its runoff on urban drainage systems. In the rainy season, Sawojajar as heavily built-up area and population, became one of the inundation area in Malang. This study aims to determine the capacity of existing drainage channels, determine the placement and dimension of ecodrain structures that accordance with the conditions of Sawojajar Housing and figure out the percentage reduction of runoff discharge with the application of ecodrain in the study area. For analyzing, rainfall runoff at a return period of 5 years can be modelled by using a Storm Water Management Model (SWMM), by comparing the drainage network conditions before and after implementation of infiltration wells, bioretention and permeable pavement. Rainfall data hourly obtained from hydrology post of Kedungkandang for 10 years (2006-2015), is used to simulate raindesign. Sherman method is used to calculate of rainfall intensity. It results a 2 hours duration of rainfall intensity with a return period of 5 years at 22.67 mm / hour. To calibrate the model, rainfall and outlet discharge observation data on April 2, April 14 and October 20, 2016 are used. The result of the model calibrations show Root Mean Square Error (RMSE) value between the simulation discharge and measured discharge is 3.1%, while the RMSE value of validation and verification respectively 4.70% and 4.43%. The simulation results show the capacity of the existing drainage channels are not able to accommodate the rain at return period of 5 years, triggered flooding in 25 points. Reduction of*

land runoff discharge and channel by the application of infiltration wells, bioretention and permeable pavement ranges between 14.49% - 92.26%, while the reduction of flood discharge at the outlet to reach 37.55%. Infiltration wells reduce the runoff discharge up to 23.41%, permeable pavement 14.02%, while bioretention 0.1%.

Keywords: ecodrain, runoff discharge, simulation, calibration, SWMM

Dalam dua dekade terakhir, telah terjadi pergeseran konsep dan paradigma pengelolaan sistem drainase perkotaan, dari konsep konvensional ke konsep eko-drainase atau konsep drainase berwawasan lingkungan; dari paradigma mengalirkan dan/atau membuang kelebihan air (hujan) menjadi mengelola air hujan dan limpasannya dengan tujuan meningkatkan daya guna air, meminimalkan kerugian serta konservasi lingkungan.

Salah satu daerah genangan limpasan hujan di wilayah Kota Malang, diantaranya adalah kawasan perumahan Sawojajar. Dari hasil studi lapangan, diperoleh gambaran permasalahan diantaranya :

- 1) Tinggi genangan rata-rata mencapai 5–25 cm dengan lama genangan berkisar 45-60 menit.
- 2) Jumlah daerah resapan yang semakin sempit.
- 3) Sebagian jaringan drainase sudah tidak dapat menampung debit banjir.
- 4) Tidak terdapat lahan yang memadai untuk dilakukan peningkatan kapasitas saluran drainase eksisting.

Beberapa studi terdahulu yang dijadikan sebagai referensi dalam studi ini adalah :

1. Andini (2015) memperoleh kesimpulan dari penelitiannya bahwa bioretensi dengan komposisi media pasir terbesar (60%) memiliki kapasitas infiltrasi yang tinggi (60 cm/jam) dan efisiensi penyisihan polutan Zn yang tinggi (92,5%).
2. Rizka Aditya Rahman (2014) melakukan penelitian menggunakan sumur resapan untuk mengatasi masalah drainase perkotaan. Dari hasil studi tersebut, diperoleh kesimpulan bahwa sumur resapan yang didesain di lokasi studi, dapat mereduksi limpasan banjir hingga 40,902 %.
3. Sabarani Adinda, dkk (2014) melakukan pemodelan saluran drainase dengan kotak

resapan buatan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap debit limpasan. Diperoleh hasil bahwa saluran dengan kotak resapan bermedia rumput grinting (*Cynodon dactylon*) lebih baik dalam menurunkan debit air pada saluran dibandingkan dengan kotak resapan dengan media tanah kosong saja.

4. Hua Peng Qin (2013) melakukan studi yang lebih lengkap mengenai kinerja struktur ekodrainase dalam mereduksi genangan akibat hujan, dengan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- Penerapan ekodrainase lebih efektif dalam mereduksi banjir pada peristiwa hujan berdurasi pendek.
- Parameter yang paling berpengaruh terhadap reduksi banjir adalah kedalaman lapisan penyimpanan / tampungan.
- Kinerja desain ekodrainase secara substansial dipengaruhi oleh luas daerah yang diinstal dengan komponen ekodrainase, luas total daerah drainase dan kapasitas penyimpanan efektif.

Dari beberapa studi terdahulu mengenai permasalahan drainase perkotaan, diketahui bahwa penerapan ekodrainase dapat menurunkan debit limpasan hujan. Pada riset ini dilakukan kajian tentang penerapan ekodrainase menggunakan beberapa tipe struktur yang berbeda guna mereduksi debit limpasan hujan di Perumahan Sawojajar, baik diterapkan bersamaan maupun tersendiri. Penerapan beberapa tipe ekodrainase sesuai dengan kondisi sub daerah tangkapan air diprediksi lebih efektif dalam menurunkan debit limpasan hujan. Adapun struktur yang digunakan yaitu sumur resapan, bioretensi dan perkerasan permeabel.

Sehingga tujuan yang ingin dicapai pada studi ini adalah :

- 1) Mengetahui kapasitas saluran drainase eksisting di lokasi studi.
- 2) Mengetahui penempatan dan dimensi

struktur ekodrainase yang sesuai dengan kondisi lokasi studi.

3) Mengetahui prosentase reduksi debit

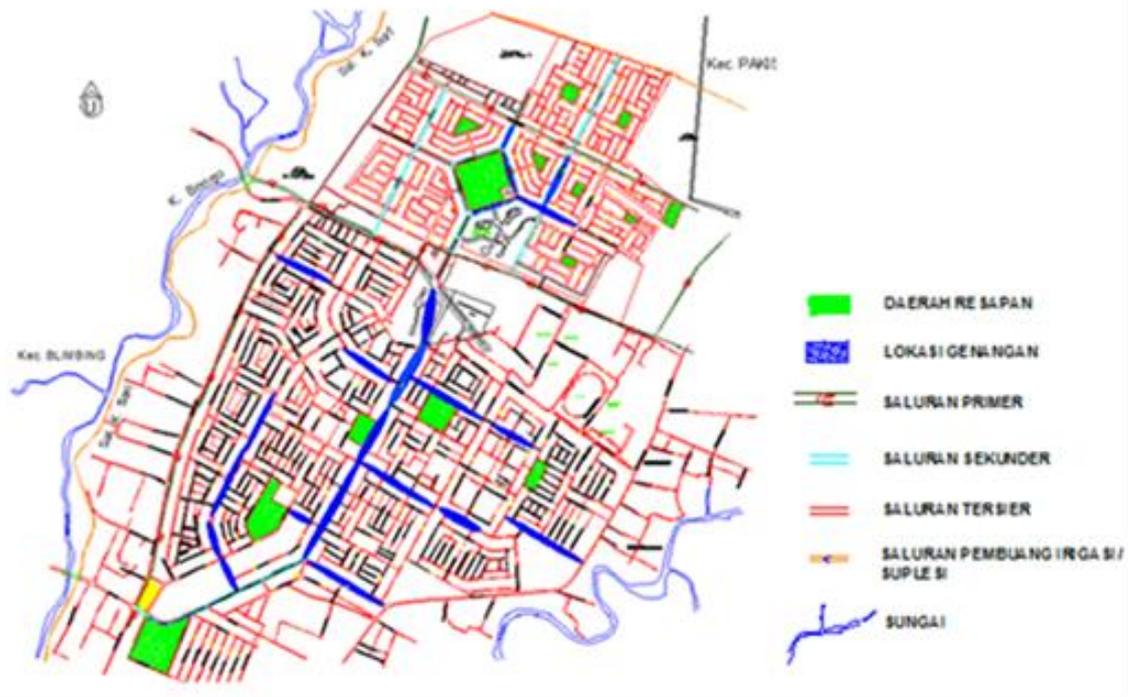
limpasan hujan dengan penerapan struktur sumur resapan, bioretensi dan perkerasan permeabel di lokasi studi.

METODE PENELITIAN

Kondisi Daerah Studi

Studi ini dilakukan di kawasan perumahan Sawojajar yang sebagian berada di wilayah Kecamatan Kedungkandang Kota Malang dan sebagian lainnya masuk dalam

wilayah Kecamatan Pakis Kabupaten Malang. Memiliki luas 339.7 ha, dengan dominasi penggunaan lahan untuk bangunan rumah (berkisar 90%) dan sisanya berupa ruang terbuka hijau serta fasilitas umum.



Gambar 1. Peta Jaringan Drainase Eksisting & Lokasi Genangan

Data yang Digunakan

- 1) Data curah hujan jam-jaman selama 10 tahun (2006 – 2015) dari stasiun penakar Kedungkandang, untuk perhitungan hujan rencana.
- 2) Data curah hujan jam-jaman dan debit outlet hasil pengamatan pada kejadian hujan tanggal 02 April, 14 April dan 20 Oktober 2016, untuk kalibrasi model.
- 3) Peta topografi, peta jaringan drainase eksisting, dan peta tata guna lahan.
- 4) Data kedalaman sumur (muka air tanah), diperoleh dari hasil peninjauan lapangan.
- 5) Data koefisien permeabilitas tanah, diperoleh melalui uji laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Sipil Universitas Brawijaya terhadap sampel tanah di lokasi studi.

Uji Konsistensi Data Hujan

Untuk menguji konsistensi data hujan pada stasiun individual (*stand alone station*) digunakan metode *Rescaled Adjusted Partial Sums* (RAPS). Cara RAPS membandingkan hasil uji statistik dengan Q_{RAPS}/\sqrt{n} . Bila yang didapat lebih kecil dari nilai kritis untuk tahun dan *confidence level* yang sesuai, maka data dinyatakan konsisten. Uji konsistensi dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut (Sri Harto, 2000):

$$S_k^* = \left(\sum_{i=1}^k Y_i - \bar{Y} \right), \quad (1)$$

dengan $k = 1, 2, 3, \dots, n$

$$S_k^{**} = \frac{S_k^*}{S_d}, \quad (2)$$

dengan $k = 1, 2, 3, \dots, n$

$$S_d^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_i - \bar{Y})^2}{n} \quad (3)$$

Dengan :

Y_i = data hujan ke- i

\bar{Y} = data hujan rerata - i

S_d = standar deviasi

n = jumlah data

Untuk uji konsistensi digunakan cara statistik :

$$Q_{RAPS} = \max |S_k^{**}|, 0 \leq k \leq n$$

Atau nilai range :

$$R_{RAPS} = \text{maksimum } S_k^{**} - \text{minimum } S_k^{**},$$

dengan $0 \leq k \leq n$

Lengkung Intensitas - Durasi Hujan

Intensitas hujan merupakan jumlah curah hujan yang dinyatakan dalam tinggi hujan tiap satuan waktu (mm/jam). Apabila data hujan jangka pendek tersedia, lengkung intensitas hujan dapat dibuat menggunakan salah satu dari persamaan Talbot, Sherman dan Ishiguro, yang menghasilkan deviasi terkecil terhadap hasil pengukuran (Sosrodarsono dan Takeda, 1983).

i. Rumus Talbot :

$$I = \frac{a}{t + b} \quad (4)$$

$$a = \frac{[I.t][I^2] - [I^2.t][I]}{n[I^2] - [I][I]} \quad (5)$$

$$b = \frac{[I][I.t] - n[I^2.t]}{n[I^2] - [I][I]} \quad (6)$$

ii. Rumus Sherman :

$$I = \frac{a}{t^N} \quad (7)$$

$$\log a = \frac{[\log I][(\log t)^2] - [\log I \cdot \log t][\log t]}{n[(\log t)^2] - [\log t][\log t]} \quad (8)$$

$$N = \frac{[\log I][\log t] - n[\log I \cdot \log t]}{n[(\log t)^2] - [\log t][\log t]} \quad (9)$$

iii. Rumus Ishiguro :

$$I = \frac{a}{\sqrt{t+b}} \quad (10)$$

$$a = \frac{[I.\sqrt{t}][I^2] - [I^2.\sqrt{t}][I]}{n[I^2] - [I][I]} \quad (11)$$

$$b = \frac{[I][I.\sqrt{t}] - n[I^2.\sqrt{t}]}{n[I^2] - [I][I]} \quad (12)$$

Penelusuran Banjir

Penelusuran banjir merupakan cara matematis untuk memperkirakan perubahan karakteristik hidrograf (hubungan debit – waktu) di suatu titik pada suatu bagian sungai maupun pada fasilitas tampungan (Suripin, 2004).

SWMM menggunakan persamaan kontinuitas dan momentum untuk aliran tidak seragam (*unsteady, gradually varied flow*), yakni persamaan *Saint Venant*.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(S - S_f) = 0 \quad (13)$$

- (a) perubahan kecepatan dari waktu ke waktu.
- (b) percepatan yang disebabkan oleh fluida memasuki suatu penyempitan atau pelebaran penampang saluran,
- (c) perubahan tekanan hidrostatik (*head*) terhadap ruang.
- (d) percepatan akibat selisih kemiringan dasar dengan garis energi akibat gesekan.

Kalibrasi, Validasi dan Verifikasi Model

Kalibrasi, untuk memeriksa ketepatan besaran parameter pemodelan, dengan membandingkan debit hasil simulasi dengan debit pengamatan pada keluaran sistem drainase. Validasi dan verifikasi dilakukan untuk menguji model dengan menggunakan nilai optimal parameter hasil kalibrasi pada kejadian hujan yang berbeda.

Salah satu uji statistik yang digunakan untuk kalibrasi, validasi dan verifikasi model adalah *Root Mean Square Errors* (RMSE). Nilai *RMSE* mensyaratkan mendekati nol (0).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2} \quad (14)$$

Dimana :

Q_{obs} = debit hasil pengamatan di lapangan (m^3/dt)

Q_{sim} = debit hasil simulasi (m^3/dt)

Sumur Resapan

Volume dan efisiensi sumur resapan dapat dihitung berdasarkan keseimbangan air yang masuk ke sumur dan air yang meresap ke dalam tanah (Sunjoto dalam Kementerian Pekerjaan Umum, 2013).

Debit air dalam sumur yang meresap, digunakan rumus:

$$Q_o = \frac{2\pi LkH}{\ln \left[\frac{L}{r} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{r} \right)^2} \right]} \quad (15)$$

Q_o = volume air hujan yang meresap (m^3/dt)

L = ketinggian lapisan porus (m)

H = tinggi muka air dalam sumur (m)

k = koefisien permeabilitas tanah (m/dt)

r = jari-jari sumur (m).

Bioretensi

Merupakan suatu sistem manajemen air hujan yang berupa daerah dangkal bervegetasi yang didesain untuk menerima, menahan, menyimpan, dan meresapkan limpasan air hujan. Komponen utama dari bioretensi ada 2 (dua) bagian, yaitu: 1). Permukaan bervegetasi yang merupakan zona penggenangan dan tampungan air hujan sementara, dan 2). Media tanah bioretensi yang merupakan zona filtrasi dan infiltrasi.

Menurut LADPW (2014) dalam *Low Impact Development Standards Manual*, kedalaman air maksimum yang dapat diresapkan dapat dihitung dengan rumus :

$$d_{\max} = \frac{f}{12} \times t \quad (16)$$

dengan kriteria:

$$d_{\max} \geq d_p$$

dimana :

d_{\max} = kedalaman air maksimum yang dapat diresapkan (m).

f = laju infiltrasi desain (m/jam)

t = waktu penggenangan (*detention*) maksimum (maks. 96 jam atau 4 hari)

Perkerasan Permeabel

Digunakan sebagai lapisan perkerasan jalan atau fasilitas lainnya, yang mampu melewati air hujan di permukaannya, kemudian berperkolasi ke dalam tanah.

Pada tanah dengan tingkat infiltrasi rendah, perkerasan permeabel dapat dirancang dengan menggunakan *underdrain*. Sehingga

sebagian air hujan yang terinfiltrasi dikumpulkan dalam *underdrain* dan kembali ke sistem saluran drainase.

Menurut *Virginia Department of Environmental Quality* (2011) prosedur perencanaan perkerasan permeabel menggunakan persamaan berikut :

$$d_s = \frac{\{(d_c \times r) + R_{24} - (i/2 \times t_f)\}}{V_r} \quad (17)$$

$$d_{s-\max} = \frac{(i/2 \times t_d)}{V_r} \quad (18)$$

d_s = kedalaman lapisan tampungan (m)

d_c = kedalaman limpasan dari daerah tadah

r = rasio luas daerah tadah dengan luas permukaan perkerasan permeabel

R_{24} = curah hujan maksimum harian dalam 24 jam (mm)

i = tingkat infiltrasi lapangan untuk tanah asli (cm/hari)

t_f = waktu untuk mengisi lapisan tampungan (hari)

V_r = rasio pori untuk lapisan tampungan (0.4)

t_d = waktu untuk menguras lapisan tampungan (biasanya 1-2 hari)

Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dan langkah pemodelan menggunakan SWMM 5.0 adalah sebagai berikut :

- 1) Menentukan luas daerah tangkapan (A), luas daerah porous dan kedap serta kemiringan lahan berdasarkan peta topografi dan peta tata guna lahan.
- 2) Penentuan arah aliran dan dimensi saluran dari peta jaringan drainase eksisting atau survey lapangan.
- 3) Membuat model limpasan hujan kondisi eksisting dengan SWMM 5.0, selanjutnya dilakukan kalibrasi, validasi dan verifikasi model menggunakan uji statistik RMSE.
- 4) Uji konsistensi data curah hujan menggunakan analisis RAPS (*Rescaled Adjusted Partial Sums*).
- 5) Mengelompokkan data curah hujan maksimum untuk setiap tahun berdasarkan durasi, kemudian dihitung intensitas hujan.
- 6) Analisa frekuensi data intensitas hujan kala ulang 5 tahun menggunakan distribusi *Log Pearson Tipe III*.

- 7) Uji kesesuaian distribusi menggunakan Uji Chi-Kuadrat dan Uji Smirnov-Kolmogorov, untuk menentukan apakah persamaan distribusi yang dipilih dapat mewakili distribusi statistik sampel data yang akan dianalisis.
- 8) Membuat lengkung intensitas-durasi hujan, menggunakan metode Talbot, Sherman dan Ishiguro. Metode yang menghasilkan deviasi terkecil dengan hasil pengukuran digunakan sebagai persamaan lengkung intensitas-durasi.
- 9) Evaluasi kapasitas saluran drainase eksisting menggunakan simulasi curah hujan - limpasan dengan SWMM 5.0.
- 10) Merencanakan lokasi, jumlah dan dimensi sumur resapan, bioretensi dan perkerasan permeabel.
- 11) Simulasi curah hujan - limpasan dengan SWMM 5.0. pada skenario penerapan sumur resapan, bioretensi, dan perkerasan permeabel secara bersamaan. Selanjutnya, simulasi penerapan masing-masing tipe, untuk mengetahui tipe mana yang paling berpengaruh terhadap penurunan debit limpasan.
- 12) Menganalisa pengurangan limpasan hujan pada penerapan ekodrainase.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Konsistensi Data Hujan

Untuk menguji konsistensi data hujan pada stasiun individual (*stand alone station*) digunakan metode *Rescaled Adjusted Partial Sums* (RAPS), dengan perhitungan sebagaimana ditampilkan pada **Tabel 1**, diperoleh besaran $\frac{Q}{\sqrt{n}}$ hitung = 0.778. Nilai ini dibandingkan dengan nilai kritis pada $n = 10$ dan *Confidence Interval* 90% = 1.05. Diperoleh nilai hitung < nilai kritis. Hasil ini menunjukkan bahwa data hujan pada stasiun pencatat hujan Kedungkandang adalah konsisten.

Analisa Frekuensi

Langkah awal untuk melakukan analisa frekuensi data curah hujan durasi pendek adalah dengan mengelompokkan data curah hujan maksimum tahunan berdasarkan durasi, kemudian dihitung intensitas hujan. Analisa frekuensi data intensitas hujan kala ulang 5 tahun menggunakan distribusi *Log Pearson Tipe III*. **Tabel 2** menunjukkan hasil

perhitungan intensitas hujan kala ulang 5 tahun pada berbagai durasi.

Tabel 1. Uji Konsistensi Data Hujan Stasiun Kedungkandang, Metode RAPS

No.	Tahun	Hujan Tahunan	S_k^*	S_k^{**}	$ S_k^{**} $
1	2015	1802	-142.9	-0.25	0.25
2	2014	1411	-533.9	-0.92	0.92
3	2013	2377	432.1	0.74	0.74
4	2012	1650	-294.9	-0.51	0.51
5	2011	2084	139.1	0.24	0.24
6	2010	3376	1431.1	2.46	2.46
7	2009	1903	-41.9	-0.07	0.07
8	2008	1683	-261.9	-0.45	0.45
9	2007	1760	-184.9	-0.32	0.32
10	2006	1403	-541.9	-0.93	0.93
Jumlah		19449	R	2.39	
Rata-rata		1944.9	$\frac{R}{\sqrt{n}}$	0.755	
Standar Deviasi		581.64	Q	2.46	
n		10	$\frac{Q}{\sqrt{n}}$	0.778	

Tabel 2. Intensitas Hujan Kala Ulang 5 Tahun Pada Berbagai Durasi

Durasi (menit)	Intensitas Hujan (mm/jam)	Durasi (menit)	Intensitas Hujan (mm/jam)
60	22.77	420	6.39
120	27.48	480	7.39
180	21.64	540	7.00
240	19.94	600	3.09
300	17.85	660	12.55
360	14.53		

Hubungan Intensitas Hujan - Waktu

Untuk keperluan perancangan, curah hujan rancangan yang telah ditetapkan berdasarkan hasil analisis perlu diubah menjadi lengkung intensitas curah hujan.

Apabila data hujan jangka pendek tersedia, lengkung intensitas hujan dapat dibuat menggunakan salah satu persamaan Talbot, Sherman dan Ishiguro. Dari perhitungan konstanta untuk memperoleh persamaan lengkung intensitas, diperoleh hasil sebagai berikut :

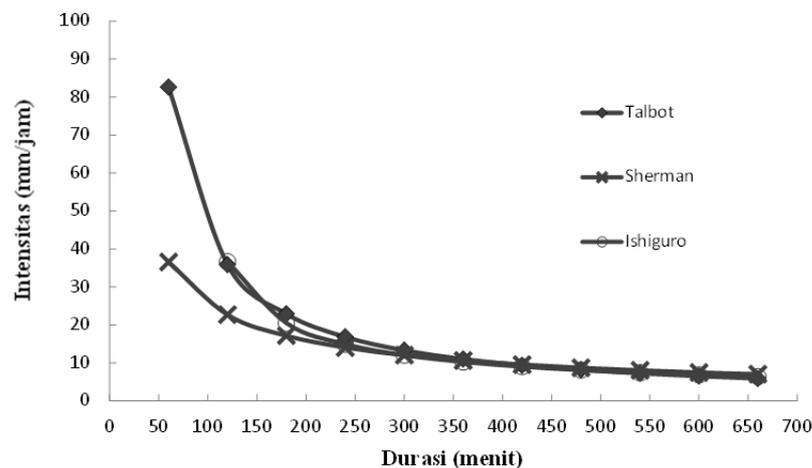
Tabel 3. Besaran Konstanta Dalam Rumus Intensitas Hujan Metode Talbot, Sherman dan Ishiguro

Metode	Konstanta	Rumus
Talbot	a = 3803.21 b = -13.968	$I = \frac{3.803,21}{t-13,97}$
Sherman	a = 614.87 N = 0.69	$I = \frac{614,87}{t^{0,69}}$
Ishiguro	a = 114.16 b = 7.84	$I = \frac{114,16}{\sqrt{t-7,84}}$

Dari ketiga persamaan pada **Tabel 3**, dapat dihitung intensitas hujan dan diperoleh lengkung intensitas hujan untuk masing-masing metode. Metode yang memiliki pendekatan terbaik dengan data hasil pengukuran, memiliki rerata deviasi yang terkecil. Perhitungan selengkapnya pada **Tabel 4**, diperoleh bahwa metode Sherman paling sesuai dengan data pengukuran.

Lengkung intensitas hujan - durasi masing-masing metode ditampilkan pada **Gambar 2**. Dan hasil perhitungan hubungan durasi – intensitas hujan kala ulang 5 tahun menggunakan metode Sherman dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Lengkung Intensitas Hujan



Gambar 2. Lengkung Intensitas Hujan Metode Talbot, Sherman dan Ishiguro

Tabel 4. Perbandingan Kecocokan Rumus Intensitas Hujan Metode Talbot, Sherman dan Ishiguro Dengan Data pengukuran

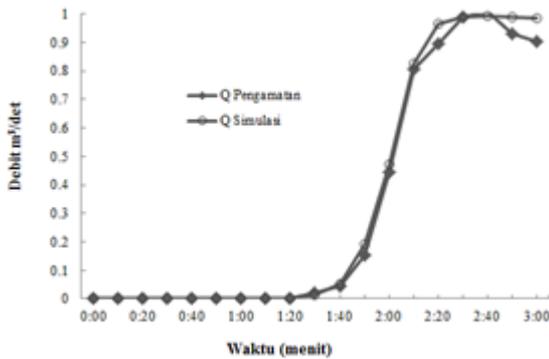
No.	t	I data	Intensitas hujan (I)			Deviasi M (Isl)		
			Talbot	Sherman	Ishiguro	Talbot	Sherman	Ishiguro
1	60	22.77	82.62	36.56	-1210.88	59.85	13.79	-1233.65
2	120	27.48	35.87	22.67	36.66	8.39	-4.81	9.18
3	180	21.64	22.91	17.14	20.47	1.27	-4.49	-1.16
4	240	19.94	16.83	14.06	14.92	-3.11	-5.88	-5.02
5	300	17.85	13.30	12.05	12.04	-4.55	-5.79	-5.81
6	360	14.53	10.99	10.63	10.25	-3.54	-3.90	-4.28
7	420	6.39	9.37	9.56	9.02	2.98	3.17	2.63
8	480	7.39	8.16	8.72	8.11	0.77	1.33	0.72
9	540	7.00	7.23	8.04	7.41	0.23	1.04	0.41
10	600	3.09	6.49	7.48	6.85	3.40	4.39	3.76
11	660	12.55	5.89	7.00	6.40	-6.66	-5.55	-6.16
Rerata Deviasi						10.46	4.87	203.81

Berdasarkan hasil analisa terhadap data curah hujan otomatis tahun 2006–2015 dari stasiun pengamatan Kedungkandang, diperoleh bahwa sebagian besar kejadian hujan di lokasi studi berlangsung selama 2 (dua) jam. Dari Tabel 5 diperoleh intensitas hujan durasi 2 jam dengan kala ulang 5 tahun sebesar 22.67 mm/jam. Besaran ini menjadi parameter masukan hujan pada simulasi dengan SWMM.

Tabel 5. Hubungan Intensitas Hujan - Durasi Kala Ulang 5 Tahun Metode Sherman

No.	t (menit)	I (Sherman) (mm/jam)	No.	t (menit)	I (Sherman) (mm/jam)	No.	t (menit)	I (Sherman) (mm/jam)
1	5	202.74	21	105	24.86	41	205	15.67
2	10	125.73	22	110	24.07	42	210	15.41
3	15	95.07	23	115	23.35	43	215	15.17
4	20	77.97	24	120	22.67	44	220	14.93
5	25	66.85	25	125	22.04	45	225	14.70
6	30	58.95	26	130	21.45	46	230	14.48
7	35	53.01	27	135	20.90	47	235	14.26
8	40	48.35	28	140	20.39	48	240	14.06
9	45	44.58	29	145	19.90	49	245	13.86
10	50	41.46	30	150	19.44	50	250	13.67
11	55	38.82	31	155	19.00	51	255	13.48
12	60	36.56	32	160	18.59	52	260	13.30
13	65	34.60	33	165	18.20	53	265	13.13
14	70	32.87	34	170	17.83	54	270	12.96
15	75	31.35	35	175	17.48	55	275	12.80
16	80	29.98	36	180	17.14	56	280	12.64
17	85	28.76	37	185	16.82	57	285	12.49
18	90	27.64	38	190	16.52	58	290	12.34
19	95	26.63	39	195	16.22	59	295	12.20
20	100	25.71	40	200	15.94	60	300	12.05

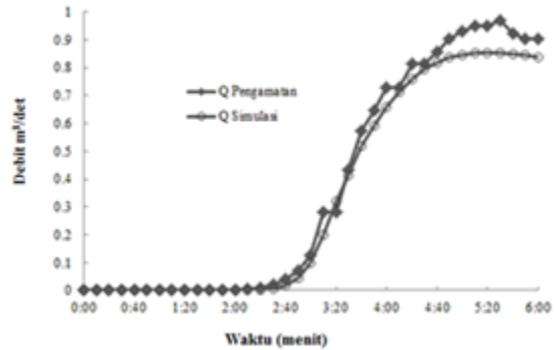
Kalibrasi, Validasi dan Verifikasi model



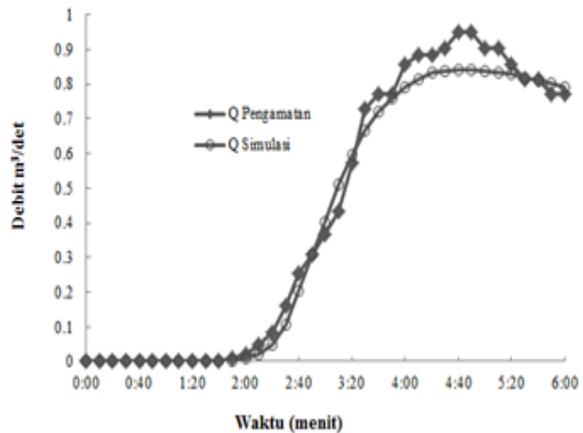
Gambar 3. Perbandingan Debit Pengamatan-an dan Simulasi Hasil Kalibrasi

hidrograf pengamatan dan simulasi pada **Gambar 3.** hidrograf pengamatan dan simulasi pada **Gambar 3.** Kalibrasi dimaksudkan untuk memeriksa ketepatan besaran parameter pemodelan, dengan membandingkan debit hasil simulasi dan pengamatan pada keluaran sistem drainase. Untuk kalibrasi model, digunakan data hujan hasil pengukuran ARR pada tanggal 2 April

2016. Nilai RMSE diperoleh sebesar 0.031 (3.1%) menunjukkan bahwa nilai parameter yang digunakan dalam pemodelan memiliki pendekatan yang baik dengan kondisi lapangan. Grafik perbandingan



Gambar 4a. Perbandingan Debit Pengamatan dan Simulasi Hasil Validasi



Gambar 4b. Perbandingan Debit Pengamatan dan Simulasi Hasil Verifikasi

Adapun coba ulang nilai dilakukan pada parameter-parameter berikut:

- depression storage, d_p area kedap
- depression storage, d_p area porous
- n Manning *overland flow* area kedap
- n Manning *overland flow* area porous

Validasi dan verifikasi dilakukan untuk menguji model menggunakan nilai optimal parameter hasil kalibrasi pada kejadian hujan yang berbeda. Untuk validasi menggunakan data hujan tanggal 14 April 2016 sedangkan verifikasi menggunakan masukan hujan tanggal 20 Oktober 2016. Dengan uji statistik yang sama, diperoleh nilai RMSE validasi 0.0470 (4.70%) dan nilai RMSE verifikasi 0.0443 (4.43%). Grafik perbandingan

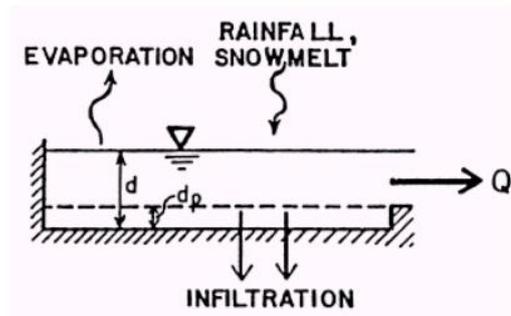
hidrograf pengamatan dan simulasi hasil validasi dan verifikasi disajikan pada Gambar 4a-b.

Simulasi kondisi drainase eksisting dengan hujan kala ulang 5 tahun

1) Limpasan Permukaan (*Surface RunOff*)

Setelah parameter DAS dikalibrasi, maka simulasi kondisi drainase eksisting dengan masukan hujan kala ulang 5 tahun dapat dilakukan. Salah satu keluaran SWMM yang menjadi kajian pada studi ini adalah limpasan permukaan (*Surface RunOff*).

Konsep limpasan permukaan yang digunakan oleh SWMM diilustrasikan pada Gambar 5. Setiap permukaan *subcatchment* diperlakukan sebagai tampungan nonlinear. Inflow berasal dari curah hujan dan hulu *subcatchment*. Ada beberapa *outflow*, diantaranya infiltrasi, evaporasi, dan limpasan permukaan. Limpasan permukaan per satuan luas, Q , terjadi hanya ketika kedalaman air di tampungan melebihi penyimpanan depresi maksimal, d_p , dengan besar arus keluar diberikan oleh persamaan Manning. Kedalaman air di atas *subcatchment* sebanding dengan waktu (t dalam detik), diperoleh dengan menggunakan persamaan neraca air. Sedangkan untuk pemodelan infiltrasi pada SWMM, dipilih metode Horton yang mengasumsikan infiltrasi berkurang secara eksponensial dari laju maksimum awal ke laju infiltrasi konstan.



Gambar 5. Konsep aliran permukaan
Sumber : US EPA (2010)

2) Debit Limpasan Pada Saluran Drainase

Penelusuran banjir di saluran dalam SWMM, menggunakan persamaan kontinuitas (konservasi massa) dan persamaan momentum untuk *unsteady, gradually varied flow*, yaitu persamaan *Saint Venant* (persamaan 13).

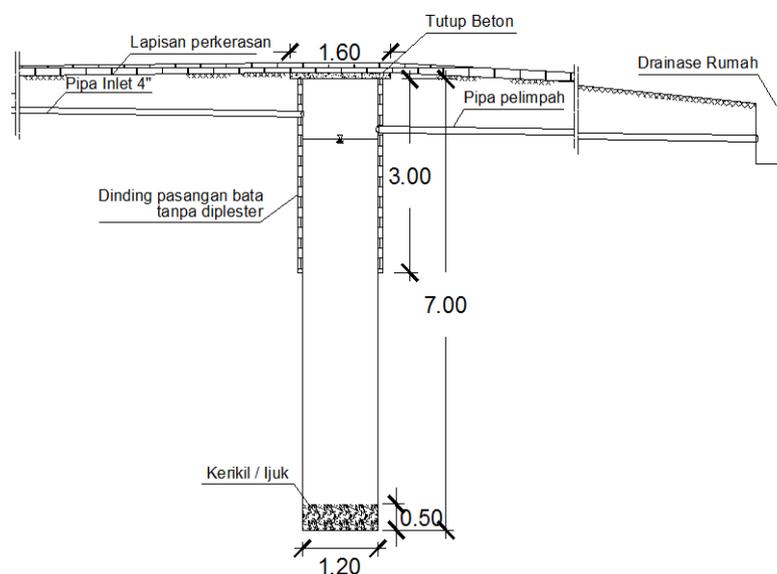
Untuk menyelesaikan persamaan ini, dipilih penelusuran gelombang dinamis (*Dynamic Wave Routing*) yang secara teoritis memberikan hasil paling akurat. Profil muka air hasil simulasi dengan hujan kala ulang 5 tahun di simpul J82-O3 ditampilkan pada Gambar 12.

Perencanaan sumur resapan, bioretensi dan perkerasan permeabel

1. Sumur Resapan

Dimensi dari sumur resapan sangat ditentukan oleh :

- Koefisien permeabilitas tanah
- Tinggi muka air tanah
- Intensitas hujan
- Luas daerah tadah



Gambar 6. Potongan Melintang Sumur Resapan

Pada studi ini, sumur resapan direncanakan seragam di semua titik. Berjenis sumur resapan dalam (kolektif) dengan bentuk lingkaran, kedalaman 7 meter dan konstruksi dinding terbuat dari pasangan batu bata tanpa diplester. Sedangkan penempatan sumur resapan kolektif berada pada lokasi dengan elevasi terendah dari daerah tadah, dengan memperhatikan kriteria jarak terhadap bangunan/obyek lain. Potongan melintang sumur resapan yang direncanakan sebagaimana **Gambar 6**.

Dengan menggunakan persamaan (15) dapat diperoleh kinerja sumur resapan sebagai berikut :

i. Debit resapan pada sumur (Q_o) :

$$\begin{aligned}
 L &= 4 \text{ m} \\
 k &= 1.71 \times 10^{-4} \text{ cm/det} \\
 &= 1.71 \times 10^{-6} \text{ m/det} \\
 H &= 6.25 \text{ m} \\
 r &= 0.60 \text{ m} \\
 T &= 2 \text{ jam} = 7200 \text{ det} \\
 Q_o &= \frac{2\pi \times 4 \times 1.71 \times 10^{-6} \times 6.25}{\ln \left[\frac{4}{0.60} + \sqrt{1 + \left(\frac{4}{0.60} \right)^2} \right]} \\
 &= 1.403 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{det}
 \end{aligned}$$

2. Volume air hujan yang meresap (V_{rsp})

$$\begin{aligned}
 Q_o &= 1.403 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{det} \\
 T &= 2 \text{ jam} = 7200 \text{ det} \\
 V_{rsp} &= Q_o \times T \\
 &= 1.403 \times 10^{-4} \times 7200 \\
 &= 1.010 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

iii. Kapasitas per unit sumur resapan

$$\begin{aligned}
 V_s &= \pi \times r^2 \times t \\
 &= \pi \times 0.6^2 \times 7 = 7.92 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Jika per unit sumur dapat meresapkan air hujan 1.010 m³, maka kapasitas total sumur :

$$\begin{aligned}
 V_{total} &= V_s + V_{rsp} \\
 &= 7.92 + 1.010 = 8.93 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Sehingga debit yang dapat tertampung oleh sumur dalam waktu 2 jam adalah :

$$\begin{aligned}
 Q_s &= \frac{V_{tot}}{T} \\
 &= \frac{8.93}{7200} = 1,24 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{det}
 \end{aligned}$$

Jika atap rumah di lokasi studi rata-rata memiliki luas tadah 84 m², maka volume

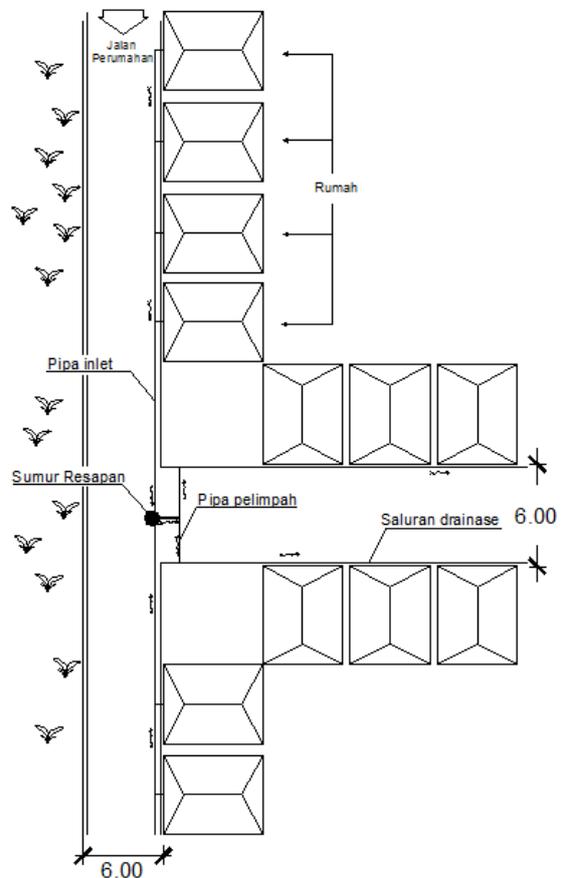
limpasan hujan dari tiap atap adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 Vol &= 0.278 \times c \times I \times A \times T \\
 &= 0.278 \times 0.95 \times 6.30 \times 10^{-6} \times 84 \times 7200 \\
 &= 1.01 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Dengan demikian kinerja per unit sumur resapan :

$$\begin{aligned}
 &= \frac{V_{tot \text{ sumur}}}{V_{per \text{ atap}}} \\
 &= \frac{8.93}{1.01} = 8.8 \approx 9 \text{ atap (rumah)}
 \end{aligned}$$

Namun demikian, jumlah sumur resapan kolektif di Perumahan Sawojajar ditetapkan berdasarkan hasil peninjauan lapangan, mengingat penempatannya memiliki kriteria jarak, sehingga diperoleh jumlah sumur resapan kolektif sebanyak 146 unit. **Gambar 7** menunjukkan instalasi sumur resapan yang ditempatkan pada median jalan.



Gambar 7. Instalasi sumur resapan di median jalan

2. Bioretensi

Bioretensi ditempatkan di area terbuka hijau kawasan perumahan karena selain difungsikan untuk mengurangi limpasan pada

permukaan kedap di sekitarnya, sekaligus untuk memperbaiki lansekap perumahan. Bioretensi direncanakan seragam di semua titik dengan struktur dan dimensi potongan melintang sebagaimana digambarkan pada **Gambar 8**.

Dengan menggunakan persamaan (16) dapat diperoleh kinerja bioretensi sebagai berikut :

- i. Direncanakan nilai laju infiltrasi (f) = 0.945 in/jam = 0.024 m/jam. Jika waktu penggenangan maksimum 96 jam, maka kedalaman air maksimum yang dapat diresapkan :

$$d_{\max} = \frac{0.024}{12} \times 96 \\ = 0.192 \text{ m} \approx 20 \text{ cm}$$

- ii. Volume air yang dapat diresapkan (V_{rsp})

$$T = 2 \text{ jam} = 7200 \text{ det} \\ k = 1.71 \times 10^{-4} \text{ cm/det} \\ = 1.71 \times 10^{-6} \text{ m/det} \\ A_s = (10 \times 10) + (2 \times 0.5 \times (8+10) \times 0.20) \\ + (2 \times 0.5 \times (8+10) \times 0.20) \\ = 107.2 \text{ m}^2$$

$$V_{rsp} = \frac{T}{24} A_s k$$

$$V_{rsp} = \frac{7200}{24} \times 107.2 \times 1.71 \times 10^{-6} \\ = 0.055 \text{ m}^3$$

$$Q_{rsp} = \frac{V_{rsp}}{T}$$

$$= \frac{0.055}{7200} = 7.64 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det}$$

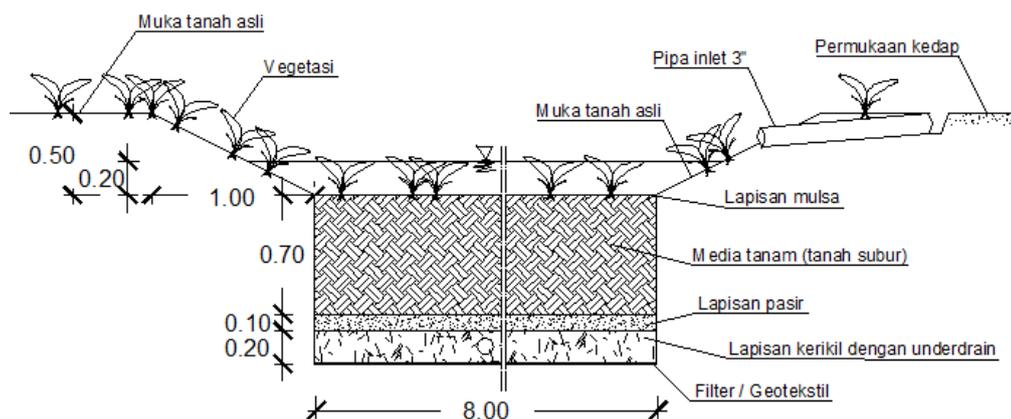
- iii. Kapasitas bioretensi (V_{br})

$$V_{br} = (0.5 \times (8+10) \times 0.5 \times 2) + (0.5 \times 8 \times 10 \times 0.5) \\ = 29.00 \text{ m}^3$$

$$V_{tot} = V_{br} + V_{rsp} \\ = 29.00 + 0.055 = 29.055 \text{ m}^3$$

Sehingga debit yang dapat tertampung oleh bioretensi dalam waktu 2 jam adalah :

$$Q_{br} = \frac{V_{tot}}{T} \\ = \frac{29.055}{7200} = 4.035 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{det}$$



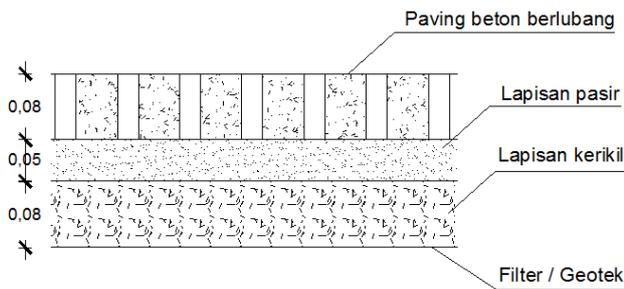
Gambar 8. Potongan Melintang Bioretensi

Jumlah bioretensi yang akan dibuat, ditetapkan sebanyak 19 unit pada titik-titik yang difungsikan sebagai area terbuka hijau atau taman.

3) Perkerasan Permeabel

Perkerasan permeabel direncanakan seragam di semua titik dengan struktur dan

dimensi potongan melintang sebagaimana digambarkan pada Gambar 9. Struktur perkerasan permeabel tidak membutuhkan ruang khusus karena dapat berfungsi ganda selain sebagai pengendali limpasan hujan, sekaligus sebagai areal parkir.



Gambar 9. Potongan Melintang Perkerasan Permeabel

Perencanaan perkerasan permeabel jenis paving beton berlubang (*Interlocking Pavers*) menurut *Virginia Department of Environmental Quality* (2011) dalam *Stormwater Design Specification No.7 – Permeable Pavement*, adalah sebagai berikut :

- Ketebalan lapisan perkerasan : 7-8 cm (digunakan 8 cm)
- Ketebalan lapisan dasar : 5 cm
- Lapisan tumpangan tanpa menggunakan *underdrain*, karena laju infiltrasi konstan 2.4 cm/jam (lebih dari 1.3 cm/jam).

Dengan menggunakan persamaan (17) dan (18) dapat diperoleh kinerja perkerasan permeabel sebagai berikut :

1. Kedalaman lapisan tumpangan (d_s) yang dibutuhkan

Untuk sub DTA X :

$$d_c = 0.0184 \text{ m}$$

$$A_p = 10,802.82 \text{ m}^2$$

$$A_c = r \times A_p$$

$$= 2 \times 10,802.82 = 21,605.64 \text{ m}^2$$

$$R_{24} = 0.0453 \text{ m}$$

$$i = 0.945 \text{ in/jam} = 0.024 \text{ m/jam}$$

$$t_f = 2 \text{ jam}$$

$$V_r = 0.75$$

$$d_s = \frac{\{(0.0184 \times 2) + 0.0453 - (0.024/2 \times 2)\}}{0.75}$$

$$= 0.078 \text{ m} \approx 8 \text{ cm}$$

3. Kedalaman maksimum lapisan tumpangan (d_{s-max})

$$t_d = 48 \text{ jam}$$

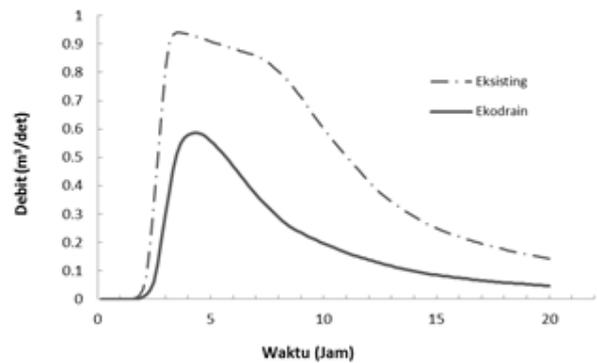
$$= \frac{0.024/2 \times 48}{0.75}$$

$$= 0.768 \text{ m}$$

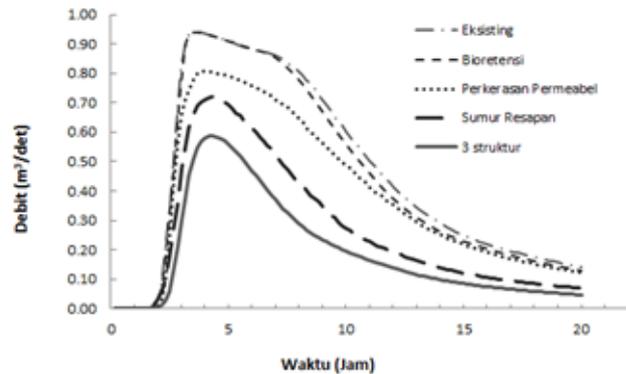
Diperoleh bahwa $d_s < d_{s-max}$, sehingga sistem perkerasan permeabel yang direncana tidak perlu menggunakan *underdrain*.

Simulasi kondisi jaringan drainase dengan penerapan ekodrainase

Setelah merencanakan unit sumur resapan, bioretensi dan perkerasan permeabel, maka dapat dilakukan simulasi penerapan ekodrain pada hujan kala ulang 5 tahun. Mula-mula disimulasikan penerapan sumur resapan, bioretensi dan perkerasan permeabel secara bersamaan, diperoleh perbandingan hidrograf sebelum dan sesudah penerapan ekodrainase pada saluran C108 (outlet akhir), sebagaimana **Gambar 10**. Sedangkan profil muka air simpul J82-O3 setelah penerapan ekodrainase, pada **Gambar 12**.



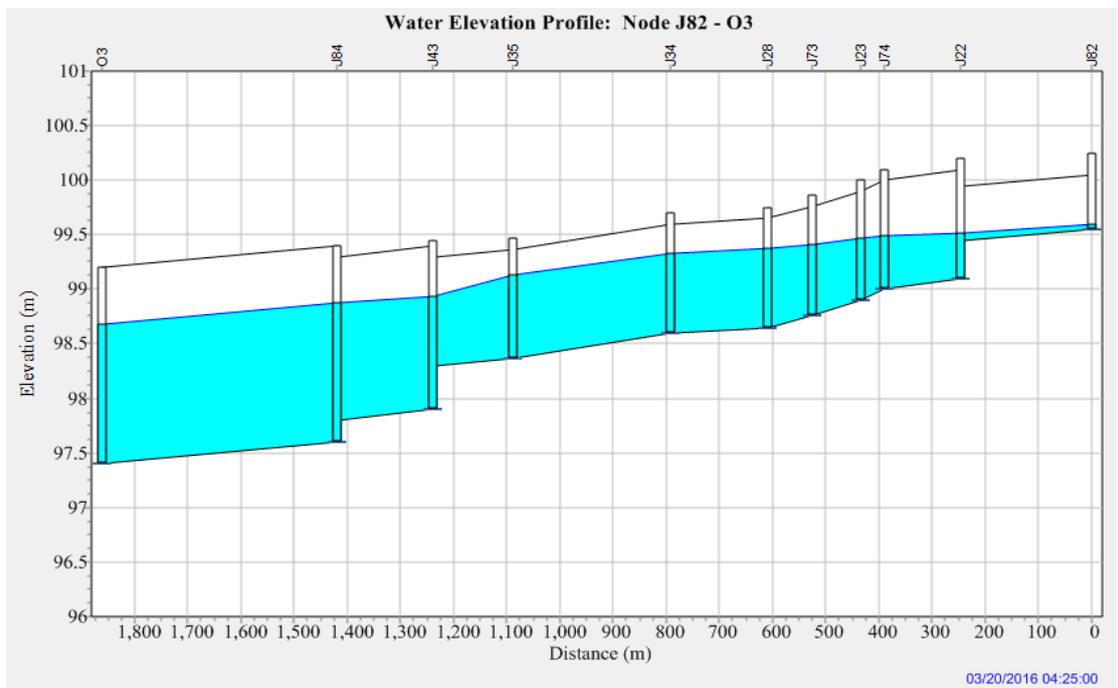
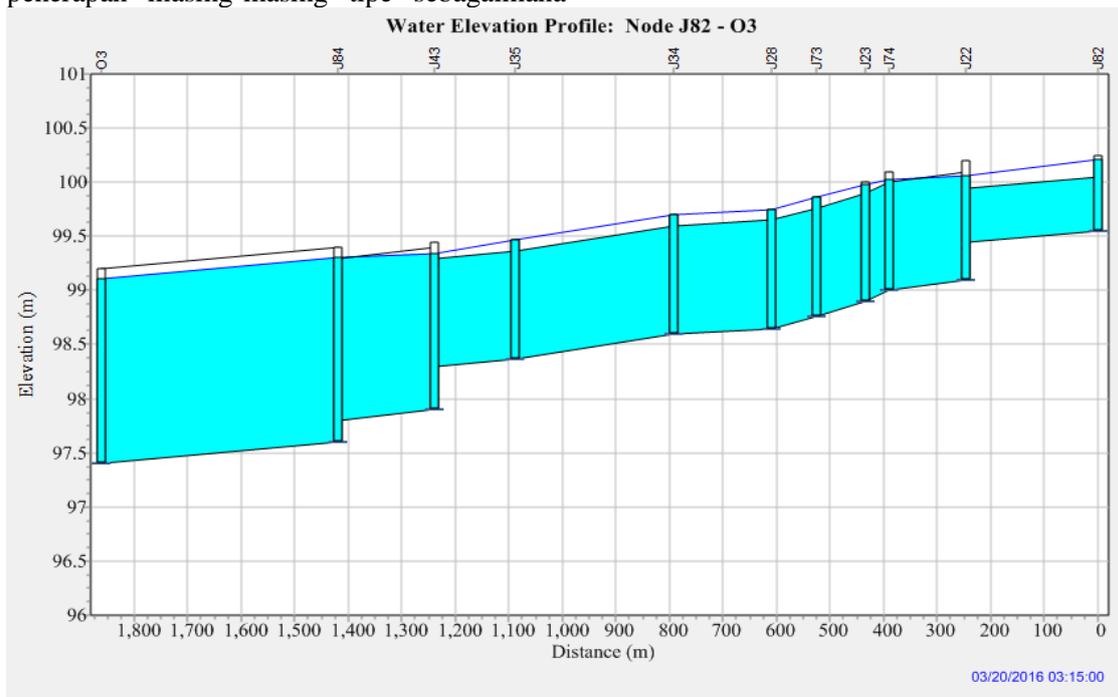
Gambar 10. Perbandingan hidrograf hasil simulasi sebelum dan sesudah penerapan ekodrainase pada outlet sistem (saluran C108)



Gambar 11. Perbandingan hidrograf hasil simulasi penerapan masing-masing tipe ekodrainase, pada outlet sistem drainase (saluran C108)

Selanjutnya dilakukan simulasi pada penerapan masing-masing tipe ekodrainase untuk mengetahui tipe mana yang paling berpengaruh dalam mengurangi debit limpasan (dengan jumlah sumur resapan 146 unit, bioretensi 19 unit dan perkerasan permeabel 6

unit). Sehingga diperoleh hidrograf untuk penerapan masing-masing tipe sebagaimana **Gambar 11.**



Gambar 12. Perbandingan profil muka air pada simpul J82 - O3 kondisi eksisting (atas) dan sesudah penerapan ekodrainase (bawah)

Penjelasan dari kondisi hasil simulasi adalah sebagai berikut :

- 1) Sumur resapan, bioretensi dan perkerasan permeabel mengakibatkan curah hujan yang jatuh di daerah tadah/kedap tiap sub DTA dialirkan menuju ke unit-unit struktur tersebut sampai akhirnya

dilimpahkan kembali ke saluran drainase apabila sudah melebihi kapasitas struktur.

- 2) Proses yang terjadi di awal masuknya limpasan hujan ke dalam struktur ekodrainase adalah infiltrasi air hujan ke dalam lapisan atas tanah yang masih dalam kondisi belum jenuh. Seiring waktu, laju infiltrasi makin berkurang dan akhirnya

tanah mencapai kondisi jenuh air. Pada saat ini, air yang memasuki unit ekodrainase mulai mengisi ruang tampungan sampai batas ketinggian tertentu dimana terdapat pipa yang akan melimpahkan air berlebih tersebut ke saluran drainase. Proses ini yang mengakibatkan debit saluran drainase berkurang dan waktu tiba banjir (debit puncak) tertunda.

- 3) Prosentase penurunan debit limpasan (*runoff* dan saluran) bervariasi. Sumur resapan memiliki kontribusi terbesar dalam mereduksi 23.41% limpasan di outlet karena secara struktur memiliki kapasitas tampungan yang cukup besar dan jumlah unit terbanyak. Hal ini menjadi kelebihan sumur resapan dibandingkan tipe lainnya karena fleksibilitas penempatannya (tidak membutuhkan ruang khusus).

Perkerasan permeabel berpengaruh mengurangi 14.02% limpasan di outlet, dan faktor-faktor yang mempengaruhi adalah luas daerah yang dipasang perkerasan permeabel serta ketebalan lapisan tampungan.

Bioretensi hanya sedikit berpengaruh terhadap penurunan debit di outlet karena jumlah unit dibatasi ketersediaan lahan. Namun, bioretensi tetap direkomendasikan untuk diterapkan pada area terbuka hijau karena berfungsi ganda untuk memperbaiki lansekap perumahan dan pengendalian limpasan. Pada studi ini, bioretensi yang direncanakan, dapat mengurangi 33.3% *runoff* sub DTA.

- Jenis: kolektif
- Kedalaman: 7 meter
- Penempatan: elevasi terendah sub DTA dengan memperhatikan kriteria jarak dengan bangunan/obyek lain.

B. Bioretensi

- Jenis : menggunakan *underdrain*
- Kedalaman lapisan genangan 0.2 meter; ketebalan lapisan tampungan : 0.2 meter
- Penempatan : ruang terbuka hijau

C. Perkerasan permeabel

- Jenis : paving beton berlubang, tanpa *underdrain*
- Ketebalan lapisan tampungan : 0.08 meter
- Penempatan: areal parkir

- 3) Prosentase reduksi debit banjir dengan penerapan sumur resapan, bioretensi dan perkerasan permeabel di lokasi studi sangat bervariasi pada sub DTA dan saluran, berkisar antara 14.49% sampai 92.26%. Sedangkan penurunan debit banjir pada outlet akhir (saluran C108) sistem drainase Perumahan Sawojajar mencapai 37.55% dari 0.94 m³/det menjadi 0.587 m³/det. Dari simulasi penerapan masing-masing tipe diperoleh bahwa sumur resapan memiliki pengaruh yang paling signifikan dalam mereduksi debit limpasan outlet dari 0.940 m³/det menjadi 0.720 m³/det atau sebesar 23.41%. Perkerasan permeabel berkontribusi menurunkan limpasan sebesar 14.02% sedangkan bioretensi hanya berpengaruh sebesar 0.1%.

PENUTUP

Kesimpulan

Dari hasil studi penerapan ekodrainase pada sistem drainase Perumahan Sawojajar Kota Malang, dapat disimpulkan sebagai berikut :

- 1) Kapasitas saluran drainase eksisting di lokasi studi tidak mampu menampung hujan dengan kala ulang 5 tahun, mengakibatkan genangan di 25 titik.
- 2) Sesuai dengan kondisi di lokasi studi, yaitu kedalaman muka air tanah, permeabilitas tanah dan kerapatan bangunan, dimensi struktur ekodrainase yang sesuai dengan lokasi studi adalah sebagai berikut :

A. Sumur resapan

Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah :

- 1) Jumlah stasiun hujan yang digunakan sebagai referensi data untuk perhitungan hujan rancangan pada DAS perkotaan, harus memperhatikan nilai rata-rata beberapa stasiun terhadap nilai individual stasiun pengamatan. Karena jika nilai rerata terlalu jauh dengan nilai individual, maka curah hujan rancangan yang diperoleh menjadi tidak mewakili kondisi sesungguhnya di lokasi studi, sehingga dapat digunakan 1 (satu) stasiun pengamatan yang terdekat.
- 2) Penggunaan jenis struktur ekodrainase lainnya yang disesuaikan dengan kondisi

masing-masing sub DTA sehingga capaian penurunan debit banjir lebih optimal, diantaranya adalah saluran berumput (*vegetative swale*) dan tampungan air hujan untuk penyediaan air bersih (*rain barrel*) kolektif.

- 3) Penelitian kualitas air limpasan hujan dan pengisian muka air tanah (*groundwater recharge*) dari penerapan struktur ekodrainase.

DAFTAR PUSTAKA

- Adinda, S., Barid, B., dan Ikhsan, J., 2014. Pengaruh Pemodelan Kotak Resapan Buatan di Saluran Drainase terhadap Debit Limpasan. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik Vol.17*. <http://journal.umy.ac.id>. Diakses tanggal 22 April 2016.
- Andini, 2015. *Pengaruh Komposisi Media Bioretensi Terhadap Kecepatan Infiltrasi Dan Penyisihan Logam Zn Limpasan Air Hujan (Studi Kasus: Lahan Parkir Motor Fakultas Teknik Universitas Indonesia)*. Skripsi. Universitas Indonesia. Tidak Diterbitkan.
- Kementerian Pekerjaan Umum. 2013. *Materi Bidang Drainase Diseminasi dan Sosialisasi Keteknikan Bidang PLP*. Tidak Diterbitkan.
- Los Angeles County Department of Public Works. 2014. *Low Impact Development Standards Manual*. <http://dpw.lacounty.gov>. Diakses tanggal 1 Desember 2015.
- Qin, H., dan Li, Z., 2013. The Effects of Low Impact Development on Urban Flooding Under Different Rainfall Characteristics. ELSEVIER, *Journal of Environmental Management Vol.129*. <https://ore.exeter.ac.uk>. Diakses tanggal 26 Mei 2015.
- Rahman, R.A., 2014. *Studi Pengendalian Genangan Air dan Sistem Drainasi Berwawasan Lingkungan di Kecamatan Kepanjen Kabupaten Malang*. Tesis. Universitas Brawijaya. Tidak Diterbitkan.
- Sosrodarsono, S. dan Takeda, K. 2003. *Hidrologi Untuk Pengairan*. Pradnya Paramita. Jakarta.
- Sri Harto, Br. 2000. *Analisis Hidrologi*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- Suripin, 2004. *Sistem Drainase Perkotaan yang Berkelanjutan*. Andi Offset. Yogyakarta.
- United States Environmental Protection Agency. 2010. *Storm Water Management Model 5.0 User's Manual*. <https://www.epa.gov/water-research>. Diakses tanggal 11 September 2015.
- Virginia Department of Environmental Quality. 2011. *Stormwater Design Specification No.7 Permeable Pavement Version 1.8*. <http://www.vwrrc.vt.edu>. Diakses tanggal 28 Januari 2016.