

[Type here]



UNIVERSITAS GADJAH MADA
FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL DAN LINGKUNGAN

Simulasi Aliran 1-Dimensi dengan bantuan Model Hidrologi-Hidraulika SWMM

Perangkat Lunak Teknik Sipil Hidro
Semester Genap
2 sks

Istiarto

<https://istiarto.staff.ugm.ac.id>
istiarto@ugm.ac.id

[Type here]

[Type here]

halaman kosong

[Type here]

Daftar Isi

1	PENDAHULUAN.....	1
1.1	PENGENALAN SWMM.....	1
1.2	INSTALASI SWMM.....	1
1.3	PENGATURAN AWAL SWMM.....	2
1.4	KEMAMPUAN SWMM.....	3
1.5	PEMODELAN ALIRAN DI SALURAN TUNGGAL SEDERHANA	7
1.6	PEMODELAN DRAINASE KAWASAN	8
1.7	KOLAM DAN PELIMPAH	14
1.8	FITUR SWMM.....	16

1 Pendahuluan

1.1 Pengenalan SWMM

SWMM dibuat dan dikembangkan oleh institusi besar dan kredibel di negara maju, yaitu *Office of Research and Development, Water Supply and Water Resources Division, United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA)*. SWMM merupakan singkatan *Storm Water Management Model*. Piranti lunak ini masih terus dirawat dan dikembangkan oleh pembuatnya. Saat naskah ini ditulis, versi terbaru SWMM adalah SWMM 5.1.015 yang terbit pada 20 Juli 2020.

1.2 Instalasi SWMM

Laman untuk mengunduh *file* instalasi SWMM 5.1.015 adalah <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>. Gambar 1.1 menampilkan laman SWMM. Geser ke bawah untuk menemukan tautan pengunduhan *file* instalasi SWMM. Pilih versi terbaru, SWMM 5.1.015. Ukuran *file* instalasi adalah 32 MB.



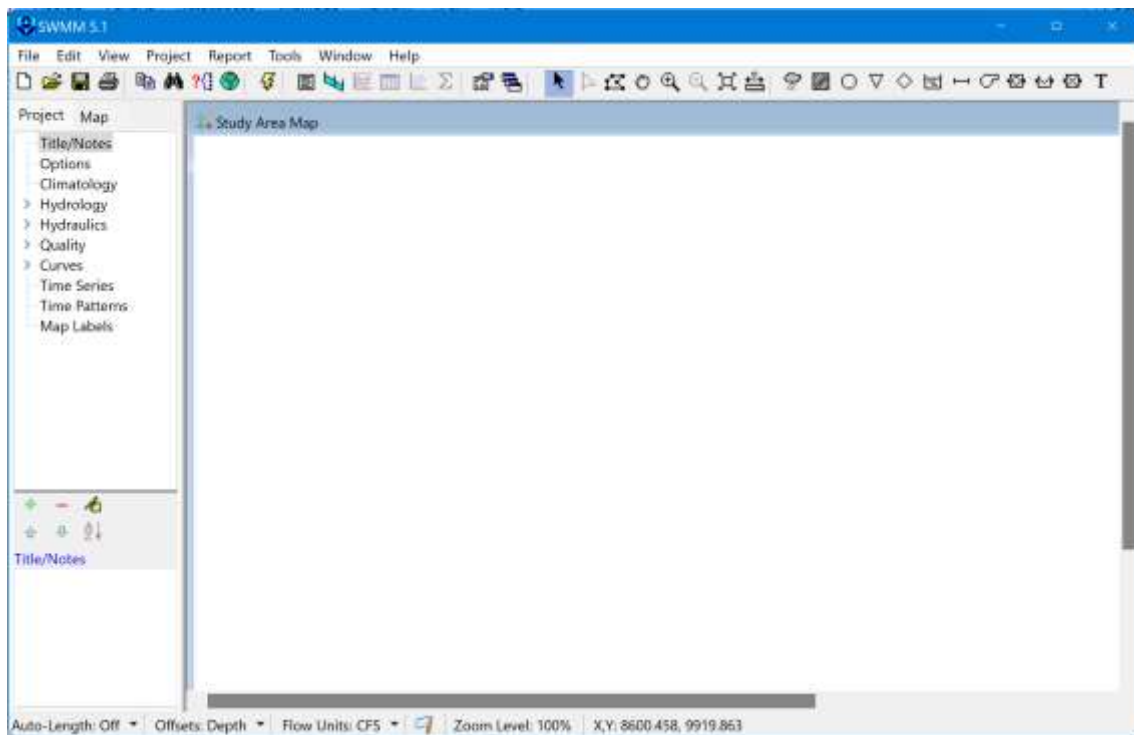
Gambar 1.1 Laman SWMM, <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

Instalasi SWMM dilakukan dengan cara baku, yaitu dengan mengklik *file* instalasi. Windows akan memandu pengguna dalam instalasi ini.

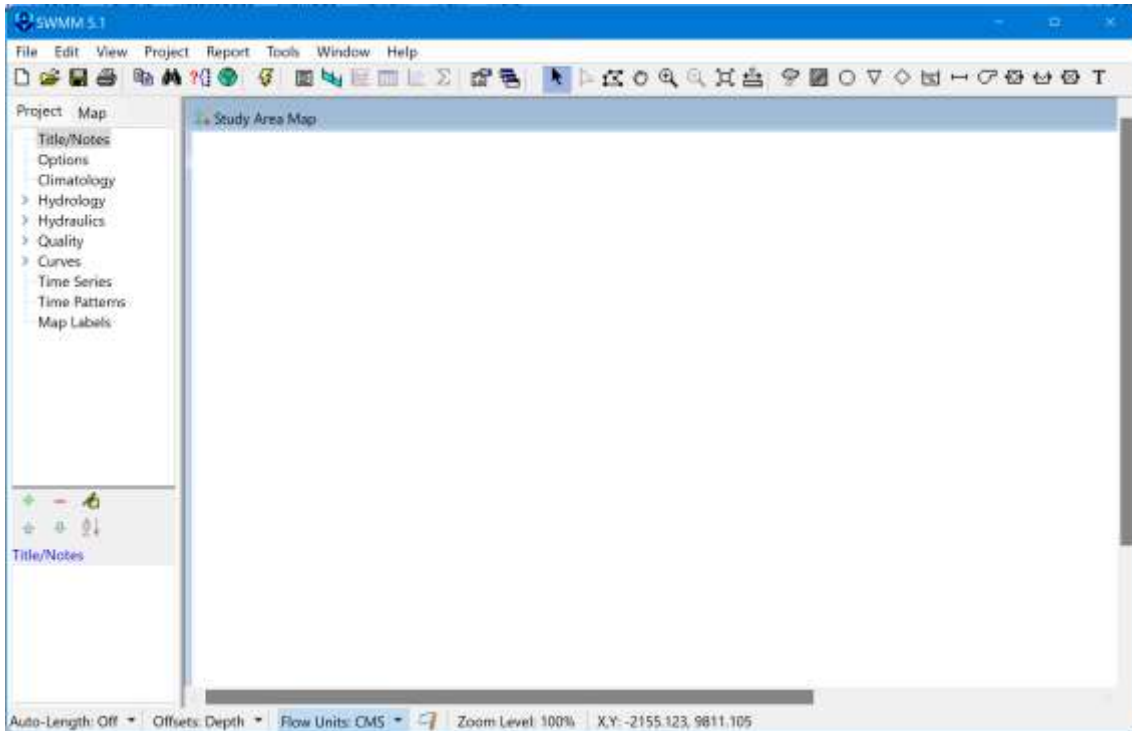
Gambar 1.2 menampilkan layar utama SWMM ketika SWMM diaktifkan untuk pertama kalinya. Seperti lazimnya layar perangkat lunak aplikasi, layar utama SWMM memiliki menu, papan tombol, editor, dan status. Bagian-bagian layar utama itu tidak akan dipaparkan secara rinci di sini.

1.3 Pengaturan Awal SWMM

SWMM tidak terlalu membutuhkan pengaturan awal. Satu pengaturan yang penting untuk dilakukan adalah menyangkut sistem satuan. SWMM dibuat di Amerika Serikat sehingga sistem satuan *default* adalah US *Costomary Unit*. Sistem satuan dapat diatur ke sistem metrik melalui pilihan Flow Unit yang ada di bagian bawah layar utama. Ketika SWMM diaktifkan setelah di-*install* di komputer pengguna, Flow Units adalah CFS (*cubic feet per second*). Ubah Flow Units ke CMS (*cubic meter per second*). Dengan pilihan CMS, maka SWMM akan memakai sistem satuan metrik. Gambar 1.3 menampilkan layar utama SWMM setelah pengaturan Flow Units menjadi CMS. Pengubahan sistem satuan ini dilakukan setiap membuat model aliran (*project*) baru.



Gambar 1.2 Layar utama SWMM ketika diaktifkan pertama kali setelah instalasi; Flow Units adalah CFS (*cubic feet per second*)



Gambar 1.3 Layar utama SWMM setelah Flow Units diubah menjadi CMS (*cubic meter per second*)

Cara pengaturan sistem satuan yang harus dilakukan setiap pembuatan *project* baru, tentu saja, tidak begitu praktis untuk dilakukan. SWMM menyediakan menu untuk pemakaian sistem satuan metrik sebagai sistem satuan *default*. Artinya, SWMM akan selalu memakai sistem satuan metrik untuk setiap *project* baru. Menu pengaturan ini ada di menu Project | Defaults. Menu ini sekaligus menyediakan pengaturan berbagai nilai parameter SWMM. Paragraf di bawah ini memaparkan beberapa nilai *default* parameter model yang dapat diatur untuk memudahkan pemakaian SWMM.

1.4 Kemampuan SWMM

SWMM merupakan model hidrologi, hidraulika, dan kualitas air. SWMM menerima data masukan berupa hujan di kawasan, mengubahnya menjadi aliran limpasan permukaan, dan melakukan penelusuran aliran di saluran. Dalam penelusuran aliran, SWMM dapat pula sekaligus menyimulasikan sebaran kualitas air. SWMM cocok terutama untuk keperluan simulasi aliran air di saluran drainase kota. SWMM tidak begitu "*handy*" untuk simulasi aliran di sungai. SWMM memiliki editor untuk mengolah data masukan, editor untuk melakukan hitungan (simulasi) hidrologi, hidraulika, dan kualitas air, serta editor untuk menampilkan hasil simulasi dalam bentuk tabel dan grafik.

Paragraf-paragraf di bawah ini menyajikan kemampuan SWMM dalam pemodelan hidraulika, hidrologi, dan kualitas air, yang dikutip dari situs resmi SWMM ([Storm Water Management Model \(SWMM\) | US EPA](https://www.epa.gov/swmm)).

Hydraulic Modeling

SWMM contains a flexible set of hydraulic modeling capabilities used to route runoff and external inflows through the drainage system network of

pipes, channels, storage/treatment units and diversion structures. These include the ability to do the following:

- *Handle drainage networks of unlimited size.*
- *Use a wide variety of standard closed and open conduit shapes as well as natural channels.*
- *Model special elements, such as storage/treatment units, flow dividers, pumps, weirs, and orifices.*
- *Apply external flows and water quality inputs from surface runoff, groundwater interflow, rainfall-dependent infiltration/inflow, dry weather sanitary flow, and user-defined inflows.*
- *Utilize either kinematic wave or full dynamic wave flow routing methods.*
- *Model various flow regimes, such as backwater, surcharging, reverse flow, and surface ponding. apply user-defined dynamic control rules to simulate the operation of pumps, orifice openings, and weir crest levels.*
- *Percolation of infiltrated water into groundwater layers.*
- *Interflow between groundwater and the drainage system.*
- *Nonlinear reservoir routing of overland flow. Runoff reduction via LID controls.*

Accounting for Hydrologic Processes

SWMM accounts for various hydrologic processes that produce runoff from urban areas, which include the following:

- *Runoff reduction via green infrastructure practices.*
- *Time-varying rainfall (precipitation) and evaporation of standing surface water.*
- *Snow accumulation and melting.*
- *Rainfall interception from depression storage.*
- *Infiltration of rainfall into unsaturated soil layers.*
- *Percolation of infiltrated water into groundwater layers Interflow between groundwater and the drainage system.*
- *Nonlinear reservoir routing of overland flow.*

Spatial variability in all of these processes is achieved by dividing a study area into a collection of smaller, homogeneous sub-catchment areas. Each of the areas contains its own fraction of pervious and impervious sub-areas. Overland flow can be routed between sub-areas, between sub-catchments, or between entry points of a drainage system.

Pollutant Load Estimation

SWMM can estimate the production of pollutant loads associated with stormwater runoff. The following processes can be modeled for any number of user-defined water quality constituents:

- *Dry-weather pollutant buildup over different land uses.*
- *Pollutant wash-off from specific land uses during storm events.*

- *Direct contribution of rainfall deposition. Reduction in dry-weather buildup due to street cleaning.*
- *Reduction in wash-off load due to best management practices (BMPs).*
- *Entry of dry weather sanitary flows and user-specified external inflows at any point in the drainage system.*
- *Routing of water quality constituents through the drainage system.*
- *Reduction in constituent concentration through treatment in storage units or by natural processes in pipes and channels.*

Tampak bahwa SWMM cukup mumpuni untuk melakukan simulasi aliran. Pengguna SWMM bahkan dapat memasukkan analisis perkiraan dampak perubahan cuaca dalam model aliran di saluran drainase. Fitur ini memerlukan sebuah *plugin*, yaitu SWMM-CAT (SWMM Climate Adjustment Tool).

Di bawah ini adalah beberapa contoh tipikal pemakaian/penerapan SWMM, yang dikutip dari situs resmi SWMM ([Storm Water Management Model \(SWMM\) | US EPA](https://www.epa.gov/swmm)).

Typical applications of SWMM:

- *Designing and sizing of drainage system components for flood control.*
- *Sizing detention facilities and their appurtenances for flood control and water quality protection.*
- *Mapping flood plains of natural channel systems—SWMM 5 is a FEMA-approved model for National Flood Insurance Program studies.*
- *Designing control strategies for minimizing combined sewer overflows.*
- *Evaluating the impact of inflow and infiltration on sanitary sewer overflows.*
- *Generating nonpoint source pollutant loadings for waste load allocation.*
- *Controlling site runoff using green infrastructure practices as low LID controls.*
- *Evaluating the effectiveness of best management practices and low impact development for reducing wet weather pollutant loadings.*

Dalam contoh pemakaian di atas, disebutkan tentang pengendalian aliran permukaan dengan memakai *green infrastructure practices* yang diwujudkan dalam LID (*low impact development*) *controls*. SWMM mampu memodelkan delapan jenis LID *controls* seperti diuraikan di bawah ini, yang dicuplik dari situs resmi SWMM ([Storm Water Management Model \(SWMM\) | US EPA](https://www.epa.gov/swmm)).

Rain Gardens

Rain gardens are depressed areas, planted with grasses, flowers, and other plants, that collect rain water from a roof, driveway, or street and allow it to infiltrate into the ground. More complex rain gardens are often referred to as bioretention cells.

Bioretention Cells (or Bioswales)

Bioretention cells are depressions containing vegetation grown in an engineered soil mixture placed above a gravel drainage bed that provide storage, infiltration, and evaporation of both direct rainfall and runoff captured from surrounding areas.

Vegetative Swales

Vegetative swales are channels or depressed areas with sloping sides covered with grass and other vegetation that slow down the conveyance of collected runoff and allow it more time to infiltrate the native soil beneath it.

Infiltration Trenches

Infiltration trenches are narrow ditches filled with gravel that intercept runoff from upslope impervious areas. They provide storage volume and additional time for captured runoff to infiltrate the native soil below

Green Roofs

Green roofs are a variation of a bioretention cells that have a soil layer atop a special drainage mat material that conveys excess percolated rainfall off of the roof. They contain vegetation that enable rainfall infiltration and evapotranspiration of stored water.

Rooftop (Downspout) Disconnection

This practice allows rooftop rainwater to discharge to pervious landscaped areas and lawns instead of directly into storm drains. It can be used to store stormwater (e.g., in a rain barrel) and/or allow stormwater to infiltrate into the soil (e.g., into a rain garden or lawn).

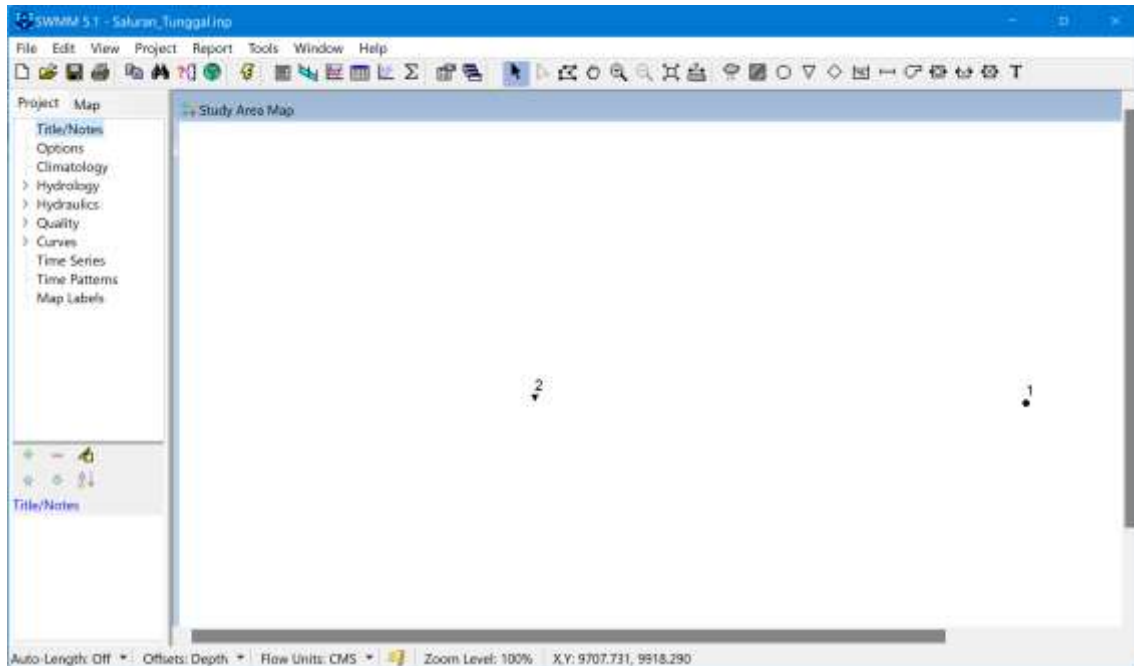
Rain Barrels or Cisterns (Rainwater Harvesting)

Rain barrels and cisterns are containers that collect roof runoff during storm events and can either release or re-use the rainwater during dry periods. Cisterns may be located above or below ground and have a greater storage capacity than a rain barrel.

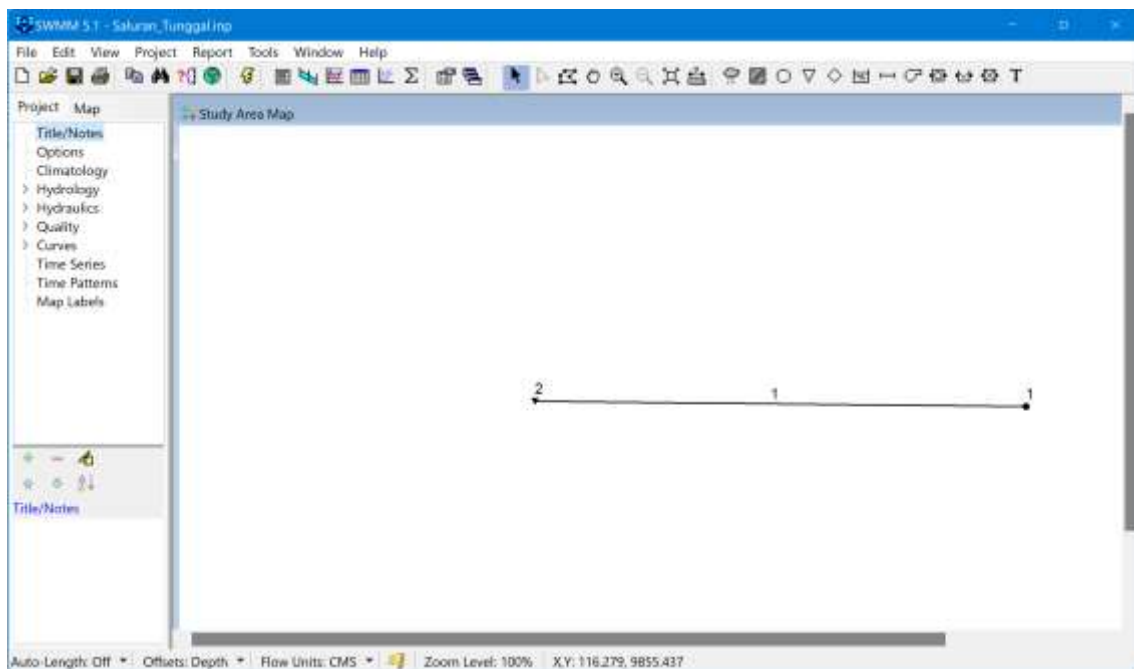
Continuous Permeable Pavement Systems

Permeable pavement allows rainfall to immediately pass through the pavement into the gravel storage layer below where it can infiltrate at natural rates into the site's native soil. In block paver systems, rainfall is captured in the open spaces between the blocks and conveyed to the storage zone and native soil below.

1.5 Pemodelan Aliran di Saluran Tunggal Sederhana



Gambar 1.4 Tampilan model saluran tunggal sederhana setelah pembuatan sebuah *junction* dan sebuah *outfall*



Gambar 1.5 Tampilan model saluran tunggal sederhana setelah pembuatan sebuah *junction*, sebuah *outfall*, dan sebuah *link*

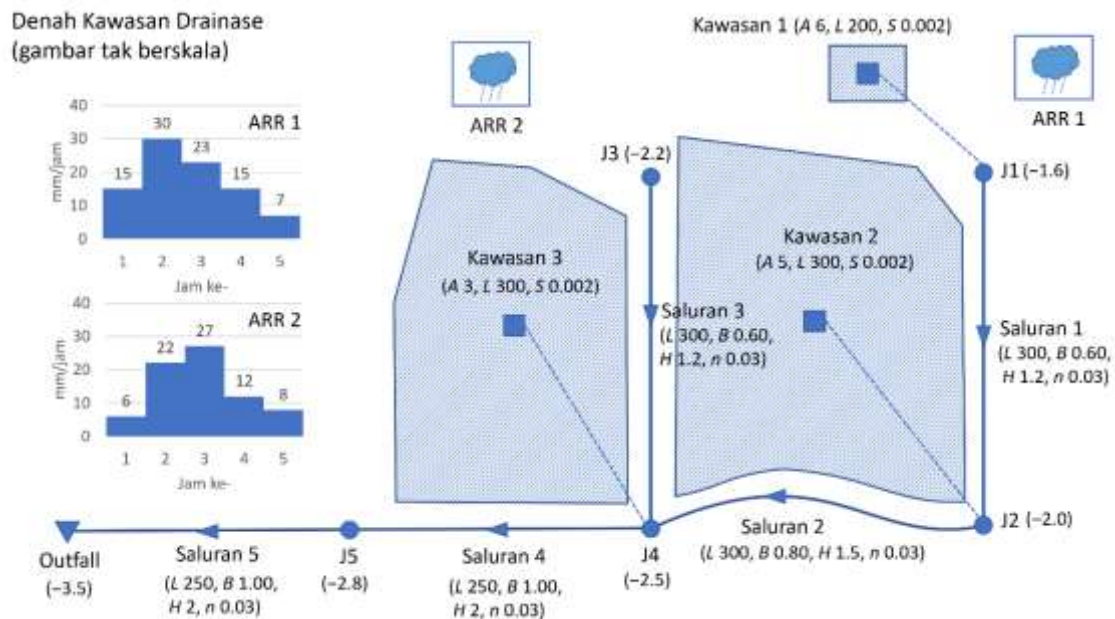
1.6 Pemodelan Drainase Kawasan

SWMM melakukan hitungan hidrologi dan hidraulika. SWMM melakukan transformasi hujan di kawasan tangkapan hujan (*subcatchment*) menjadi limpasan langsung di lahan. SWMM meneruskan limpasan langsung ini ke saluran (*conduit*) melalui sebuah *junction* dan kemudian melakukan hitungan hidraulika aliran di saluran. Hasil hitungan SWMM adalah debit aliran permukaan dari kawasan tangkapan hujan, profil muka air di saluran, dan profil kecepatan aliran di saluran.

Data yang dibutuhkan untuk analisis dan perancangan drainase kawasan adalah sebagai berikut:

- 1) peta topografi kawasan dan sekitarnya yang memiliki selang kontur lahan,
- 2) tata letak kawasan,
- 3) design ground level setiap bagian kawasan,
- 4) jenis tanah kawasan,
- 5) jenis perkerasan lahan setiap bagian kawasan,
- 6) klimatologi kawasan, terutama temperatur harian,
- 7) curah hujan.

Gambar 1.6 menampilkan denah kawasan hipotetik sebagai tempat contoh penerapan SWMM. Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3 menyajikan data teknis drainase kawasan hipotetik ini.



Gambar 1.6 Denah kawasan hipotetik untuk contoh penerapan SWMM

Tabel 1 Geometri saluran drainase kawasan hipotetik yang dipakai untuk contoh penerapan SWMM

Saluran	Panjang, L (m)	Lebar, B (m)	Kedalaman, H (m)	Koefisien Manning, n
Saluran 1	300	0.6	1.2	0.03
Saluran 2	300	0.8	1.5	0.03
Saluran 3	300	0.6	1.2	0.03
Saluran 4	250	1.0	2	0.03

Saluran 5	250	1.0	2	0.03
-----------	-----	-----	---	------

Tabel 2 Geometri junction dan outlet saluran drainase kawasan hipotetik yang dipakai untuk contoh penerapan SWMM

Titik hubung	Elevasi dasar (m GL)	Tinggi (m)
J1	-1.6	1.6
J2	-2.0	2.0
J3	-2.2	2.2
J4	-2.5	2.5
J5	-2.8	2.8
Outfall	-3.5	---

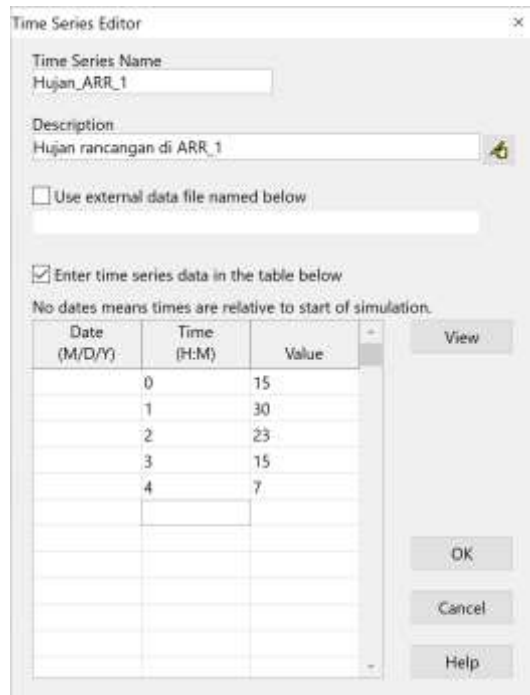
Tabel 3 Geometri kawasan tangkapan hujan kawasan permukiman hipotetik yang dipakai untuk contoh penerapan SWMM

Kawasan	Luas (ha)	Lebar (m)	Kemiringan
Kawasan 1	6	200	0.002
Kawasan 2	5	300	0.002
Kawasan 3	3	300	0.002

Langkah pertama pemodelan drainase kawasan permukiman hipotetik menggunakan SWMM adalah pemodelan jaringan hidrologi-hidraulika kawasan. Untuk memudahkan langkah ini, gambar skema kawasan drainase (Gambar 1.6) dipakai sebagai gambar latar belakang. Pilih menu View | Backdrop | Load. Pilih *file* gambar skema kawasan drainase. Di atas gambar latar belakang ini, tempatkan *rain gage* ARR_1 dan ARR_2. Garis bawah dipakai dalam nama komponen model sebagai ganti spasi karena SWMM tidak mengizinkan spasi dalam nama komponen model.

Tambahkan *subcatchments* (Kawasan_1, Kawasan_2, Kawasan_3), *junction nodes* (J1, J2, J3, J4, J5), dan *outfall node* (Outfall). Hubungkan *nodes* dengan *conduits links* (Saluran_1, Saluran_2, Saluran_3, Saluran_4, Saluran_5).

Langkah kedua pemodelan drainase kawasan permukiman hipotetik dengan SWMM adalah pemasukan data teknis *subcatchments*, *nodes*, dan *links* sesuai Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3. Data hujan di ARR_1 dan ARR_2 dimasukkan sebagai *timeseries* (Gambar 1.7). Data hujan ini berlaku di Kawasan_1. Masukkan data hujan di ARR_2 sebagai *time series*. Data hujan ini berlaku di Kawasan_2 dan Kawasan_3. Cara menghubungkan *time series* hujan ke kawasan adalah melalui *properties* setiap *subcatchment*.



Gambar 1.7 Time series curah hujan di stasiun ARR 1

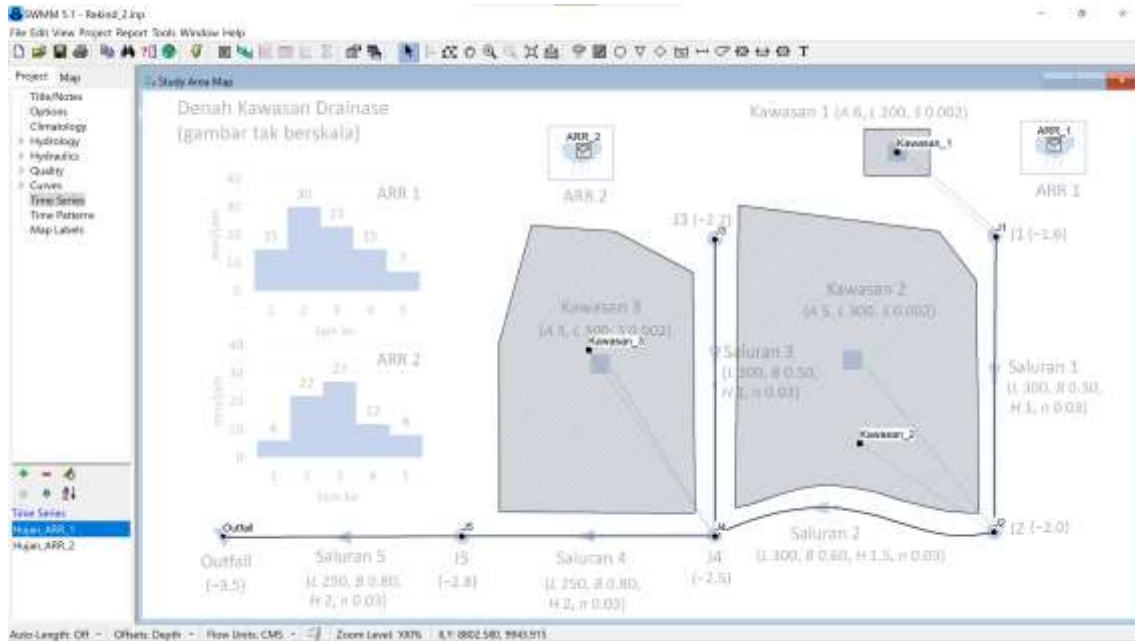
Buka jendela *Properties* Kawasan_1. Isikan data teknis Kawasan_1 ke *properties table* yang muncul (Gambar 1.8). Isikan pula data teknis Kawasan_2 (koneksi ke J2 dan ARR_2) dan Kawasan_3 (koneksi ke J4 dan ARR_2).

Property	Value
Name	Kawasan_1
X-Coordinate	9783.184
Y-Coordinate	8827.340
Description	
Tag	
Rain Gage	ARR_1
Outlet	J1
Area	6
Width	200
% Slope	0.2
% Imperv	75
N-Imperv	0.01
N-Perv	0.1
Dstore-Imperv	0.05
Dstore-Perv	0.05
%Zero-Imperv	25
Subarea Routing	OUTLET
Percent Routed	100
Infiltration Data	HORTON
Groundwater	NO
Snow Pack	
LID Controls	0
Land Uses	0
Initial Buildup	NONE
Curb Length	0
N-Perv Pattern	
Dstore Pattern	
Infil. Pattern	

User-assigned name of subcatchment

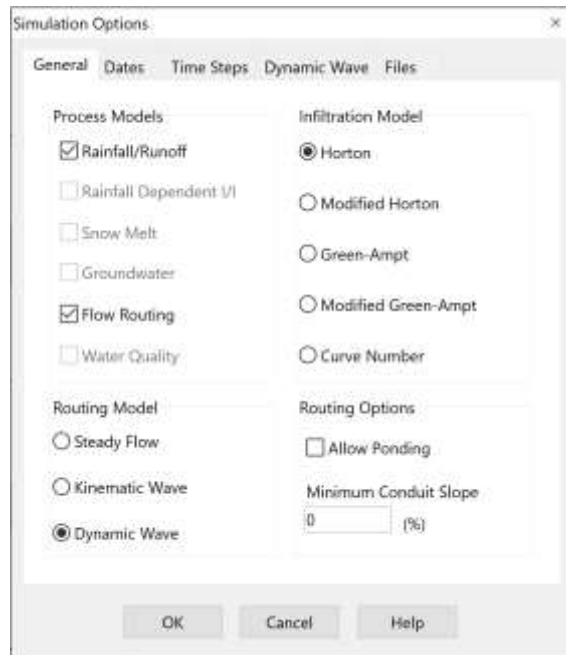
Gambar 1.8 Data teknis Kawasan 1 yang dimasukkan dalam SWMM

Setelah kedua langkah di atas, tampilan layar utama SWMM akan seperti Gambar 1.9. Gambar latar belakang dibuat kabur agar tidak menutupi gambar skema model kawasan drainase. Pengaburan gambar latar belakang dilakukan melalui menu View | Backdrop | Watermark.



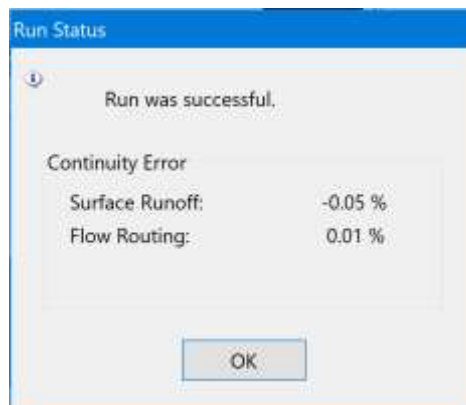
Gambar 1.9 Layar utama SWMM setelah pembuatan model jaringan drainase

Langkah ketiga pemodelan drainase kawasan permukiman hipotetik menggunakan SWMM adalah pengaturan parameter hitungan hidrologi dan hidraulika. Pengaturan meliputi antara lain waktu atau durasi simulasi, langkah hitungan (*time step*), metode hitungan kehilangan air, dan metode penelusuran aliran. Gambar 1.10 menampilkan salah satu layar editor pengaturan parameter hitungan. Peserta *training* akan dipandu oleh instruktur untuk mengatur parameter hitungan.



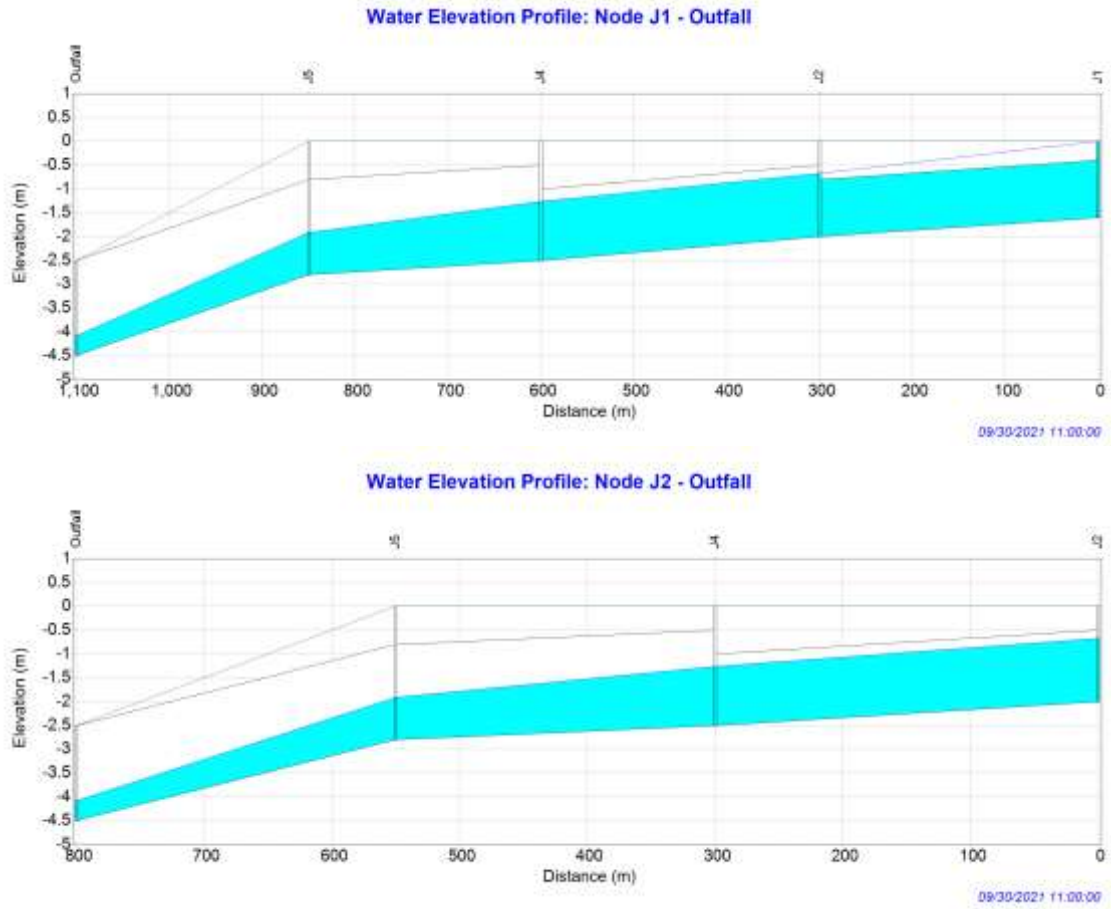
Gambar 1.10 Salah satu layar editor pengaturan parameter hitungan dalam SWMM

Langkah keempat pemodelan drainase kawasan permukiman hipotetik menggunakan SWMM adalah pelaksanaan hitungan. Pilih menu Project | Run Simulation dari layar utama SWMM. Ketika hitungan selesai dan sukses, maka layar Run Status akan tampak seperti Gambar 1.11.

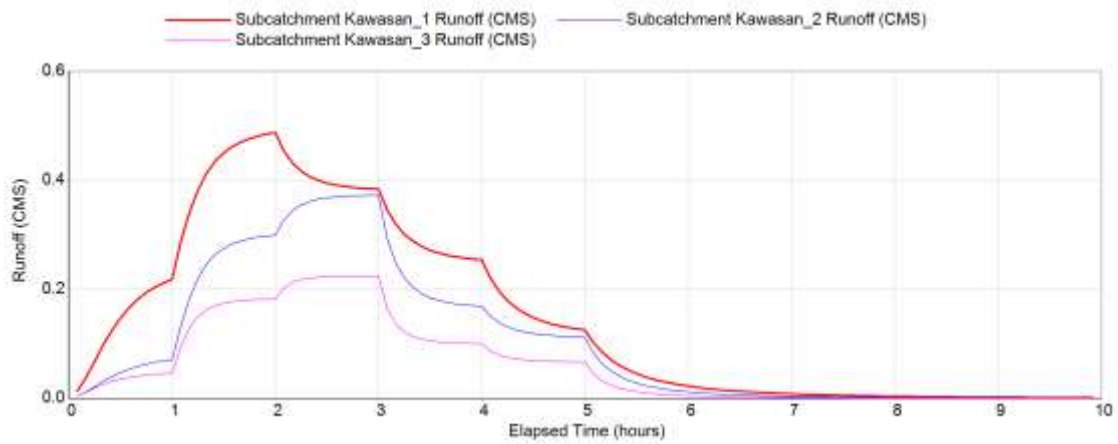


Gambar 1.11 Layar status hitungan SWMM yang menunjukkan bahwa hitungan berhasil

Langkah kelima pemodelan drainase kawasan permukiman hipotetik menggunakan SWMM adalah penampilan hasil hitungan. SWMM menampilkan hasil hitungan dalam bentuk grafik atau tabel. Gambar 1.12 dan Gambar 1.13 menampilkan contoh tampilan hasil hitungan SWMM dalam bentuk grafik. Gambar 1.14 menampilkan cuplikan tampilan tabel hasil hitungan SWMM.



Gambar 1.12 Profil muka air di saluran drainase kawasan hipotetik hasil hitungan SWMM



Gambar 1.13 Hidrograf debit aliran permukaan dari Kawasan_1, Kawasan_2, dan Kawasan_3 hasil hitungan SWMM



DaysHours	Precipitation (mm/hr)	Runoff (CMS)
00:05:00	15.00	0.01
00:10:00	15.00	0.04
00:15:00	15.00	0.07
00:20:00	15.00	0.10
00:25:00	15.00	0.12
00:30:00	15.00	0.15
00:35:00	15.00	0.17
00:40:00	15.00	0.18
00:45:00	15.00	0.19
00:50:00	15.00	0.20
00:55:00	15.00	0.21
01:00:00	30.00	0.22
01:05:00	30.00	0.29
01:10:00	30.00	0.34
01:15:00	30.00	0.38
01:20:00	30.00	0.41
01:25:00	30.00	0.43
01:30:00	30.00	0.45
01:35:00	30.00	0.46

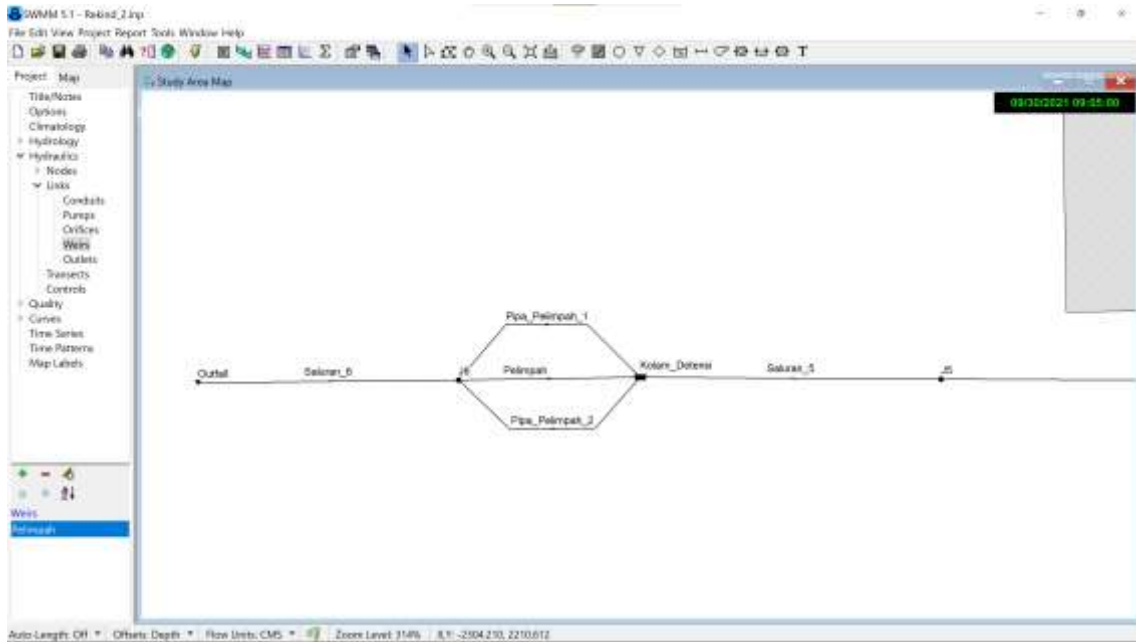
Gambar 1.14 Cuplikan tampilan hasil hitungan SWMM yang berupa tabel curah hujan dan aliran permukaan di Kawasan_1

Langkah keenam, terakhir, dalam simulasi aliran dengan SWMM adalah pembacaan hasil simulasi dengan cermat dan penginterpretasian hasil simulasi. Interpretasi hasil simulasi sangat penting dilakukan untuk memahami hasil simulasi dan mendapatkan simpulan yang benar dan tepat. Pemahaman yang baik terhadap hidrologi dan hidraulika sangat diperlukan untuk mendapatkan simpulan yang benar dan tepat.

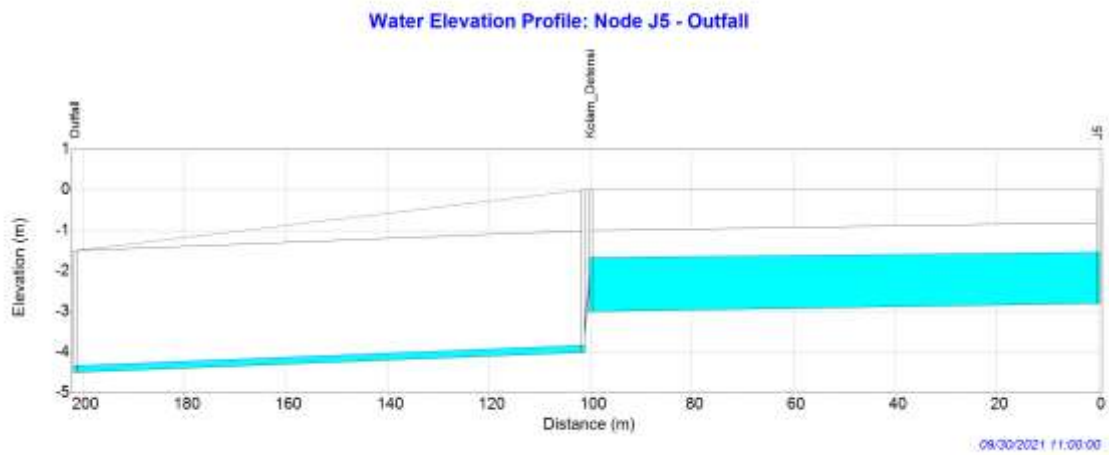
1.7 Kolam dan Pelimpah

SWMM dapat pula memodelkan kolam detensi dan pelimpah. Kolam detensi dan pelimpah menampung aliran permukaan untuk sementara waktu saja. Kolam detensi akan mereduksi debit aliran ke hilir. Kolam detensi ditempatkan di hilir *node* J5. Kolam detensi ini memiliki pelimpah yang terdiri dari dua bagian, yaitu dua buah lubang pipa berdiameter 0.30 meter dan sebuah peluap trapesium (lebar 1 meter, tinggi 1 meter, kemiringan sisi 1:1). Dalam SWMM, kolam detensi dimodelkan sebagai *Storage Unit*, lubang pipa sebagai *Orifice*, dan peluap sebagai *Weirs*. Untuk memfasilitasi pemodelan kolam detensi ini, sebuah *node* baru J6 ditambahkan sebelum *Outfall*. Gambar 1.15 menampilkan skema model di bagian kolam detensi. Instruktur akan memandu peserta *training* dalam memodelkan kolam detensi ini.

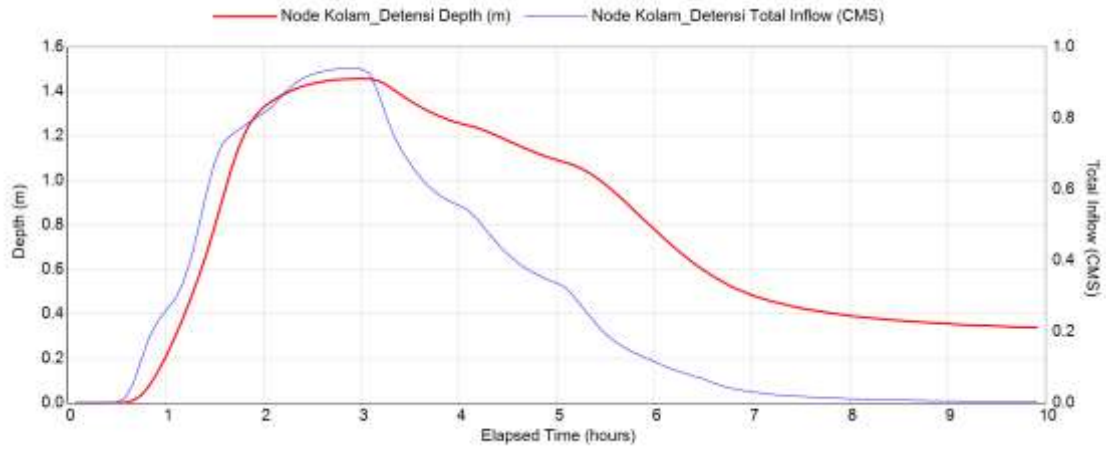
Gambar 1.16 dan Gambar 1.17 menampilkan profil muka air dan hidrograf di kolam detensi hasil hitungan SWMM.



Gambar 1.15 Skema model kolam detensi drainase kawasan hipotetik



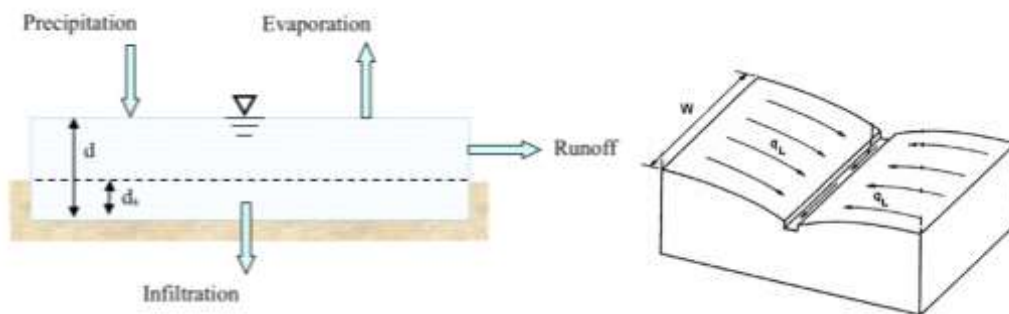
Gambar 1.16 Profil muka air di kolam detensi drainase kawasan hipotetik hasil hitungan SWMM



Gambar 1.17 Hidrograf debit inflow dan muka air di kolam detensi drainase kawasan hipotetik hasil hitungan SWMM

1.8 Fitur SWMM

Modul hidrologi SWMM mengubah hujan efektif (hujan dikurangi evaporasi, infiltrasi, dan abstraksi awal) menjadi aliran permukaan di setiap daerah tangkapan hujan (*catchment area*) yang dibagi menjadi sejumlah sub-kawasan dengan pertimbangan topografi kawasan, alur drainase, tutupan lahan, dan karakteristik tanah. Di setiap sub-kawasan tangkapan hujan, SWMM mentransformasikan hujan menjadi aliran permukaan dengan memakai konsep *nonlinear reservoir*. Aliran permukaan di sub-kawasan tangkapan hujan dimodelkan sebagai aliran di sebuah bidang persegi yang memiliki lebar W dan kemiringan S yang masuk ke sebuah saluran. Dengan konsep modelisasi seperti ini, maka sub-kawasan tangkapan hujan menerima hujan. Sebagian hujan hilang melalui evaporasi dan infiltrasi. Hujan efektif menggenangi di atas bidang sub-kawasan tangkapan hujan sedalam d . Genangan yang lebih tebal daripada tampungan depresi d_s berubah menjadi limpasan langsung q . Tampungan depresi merangkum abstraksi hujan seperti genangan permukaan, intersepsi oleh atap dan vegetasi, serta lengas tanah. Gambar 1.18 menampilkan representasi sub-kawasan tangkapan hujan dan responnya terhadap hujan.



Gambar 1.18. Representasi sub-kawasan tangkapan hujan sebagai nonlinear reservoir model dalam SWMM (gambar kiri) dan idealisasi sub-kawasan tangkapan hujan (gambar kanan) (Rossman and Hubert, 2016)

Dari prinsip konservasi massa, perubahan kedalaman genangan d terhadap waktu t adalah selisih laju *outflow* dan *inflow* di seluruh sub-kawasan tangkapan hujan, yang dinyatakan dalam persamaan matematis sebagai berikut:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q$$

Dalam persamaan di atas, i adalah curah hujan, e adalah evaporasi, f infiltrasi, dan q adalah debit aliran. Semua dihitung per satuan lebar dan dinyatakan dalam satuan meter per sekon (m/s). Aliran permukaan di sub-kawasan tangkapan hujan diidealisasikan sebagai aliran di sebuah saluran tampang persegi yang memiliki lebar W , kedalaman $d - d_s$, dan kemiringan S . Debit aliran permukaan dihitung dengan persamaan Manning:

$$Q = \frac{1}{n} R_x^{2/3} S^{1/2} A_x$$

Dalam persamaan di atas, n adalah koefisien kekasaran bidang permukaan sub-kawasan tangkapan hujan, S adalah kemiringan sub-kawasan tangkapan hujan, A_x adalah luas bidang persegi lebar W dan kedalaman $d - d_s$.

SWMM menyediakan pula cara hitungan limpasan langsung dengan metode yang berbeda dengan cara di atas, yaitu dengan metode koefisien limpasan langsung (metode rasional), metode *SCS curve number*, dan metode hidrograf satuan. Metode rasional banyak dipakai untuk menghitung debit limpasan langsung untuk kawasan yang tidak luas. Debit limpasan langsung merupakan fungsi intensitas hujan, luas kawasan, dan koefisien limpasan langsung yang bergantung kepada tata guna lahan.

$$Q = CIA$$

Dalam persamaan di atas, I adalah intensitas hujan (m/s) dan C adalah koefisien limpasan langsung. Persamaan ini dapat dipakai untuk menghitung limpasan langsung di kawasan yang tidak luas. Tabel 4 menyajikan beberapa nilai koefisien limpasan langsung.

Tabel 4. Koefisien limpasan langsung, C , dalam persamaan limpasan langsung Metode Rasional

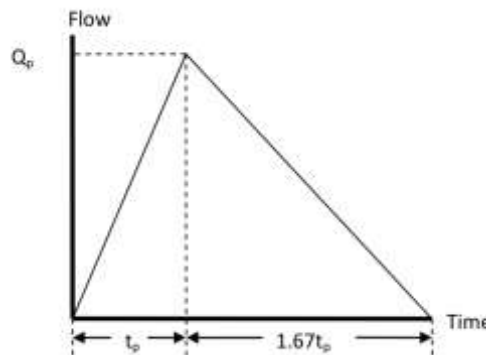
Bidang permukaan kawasan	Koefisien limpasan langsung, C
Atap tak tembus air	0.75-0.95
Runway lapis aspal	0.80-0.95
Runway lapis beton	0.70-0.90
Perkerasan makadam atau lapis batu	0.35-0.70
Tanah <i>impervious</i>	0.40-0.65
Tanah <i>impervious, turf</i>	0.30-0.55
Tanah agak <i>pervious</i>	0.15-0.40
Tanah agak <i>pervious, turf</i>	0.10-0.30
Tanah <i>pervious</i> sedang	0.05-0.20
Tanah <i>pervious, turf</i>	0.00-0.10

Metode *SCS Curve Number* menghitung debit limpasan langsung menurut persamaan di bawah ini.

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$
$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Dalam persamaan di atas, R adalah volume hujan kumulatif (mm), P adalah hujan kumulatif (mm), I_a adalah abstraksi awal (mm), S adalah kapasitas tampungan lengas tanah (mm), dan CN adalah *curve number*. Nilai CN merupakan fungsi tata guna lahan, jenis tanah (hidrologis), dan *antecedent moisture condition*. Nilai CN berkisar antara 0 s.d. 100.

Metode hidrograf satuan memanfaatkan hidrograf satuan untuk mengubah hujan menjadi limpasan langsung. Hidrograf satuan adalah fungsi linear untuk mengonversi *time series* hujan efektif menjadi hidrograf limpasan langsung. Hidrograf satuan dapat dibuat memakai pasangan data ukur hujan dan debit aliran (limpasan langsung). Dalam hal pasangan data seperti ini tidak ada, maka dapat dibuat hidrograf satuan sintetis. Beberapa contoh hidrograf satuan sintetis (HSS) antara lain HSS Snyder, HSS Clark, HSS SCS, HSS segitiga. Gambar 1.19 menyajikan contoh HSS SCS yang berbentuk segitiga.



Gambar 1.19. Hidrograf satuan sintetis SCS

Hujan yang ditransformasikan menjadi limpasan langsung adalah hujan efektif, yaitu hujan dikurangi evaporasi, infiltrasi, dan *initial abstraction*. Evaporasi diperoleh dari data pengukuran evaporasi atau didekati dengan persamaan empiris. Dalam SWMM, persamaan empiris yang dipakai untuk menghitung evaporasi adalah persamaan Hargreaves.

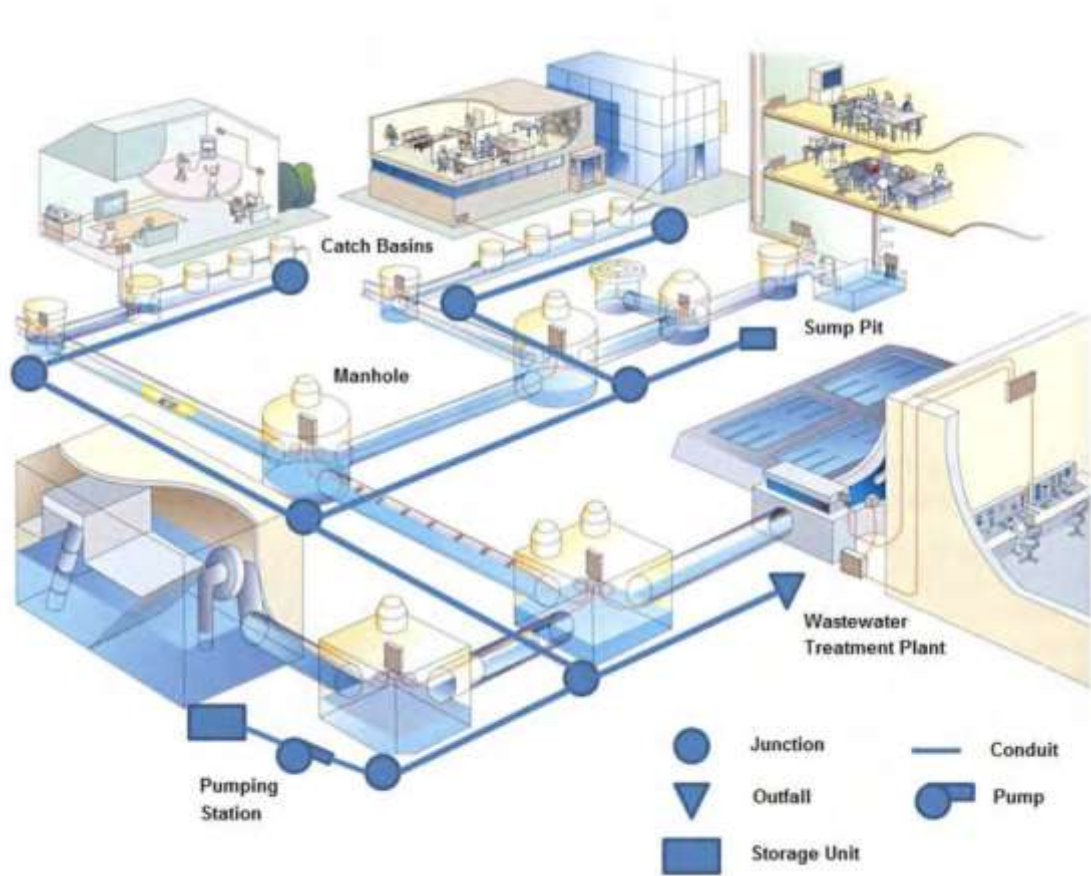
$$E = 0.0023(R_a/\lambda)T_r^{1/2}(T_a + 17.8)$$

$$R_a = 37.6d_r(w_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin w_s)$$

Dalam persamaan di atas, E adalah laju evaporasi (mm/day), R_a adalah radiasi ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$), T_r adalah selang temperatur rata-rata harian ($^{\circ}\text{C}$), T_a adalah temperatur rata-rata harian ($^{\circ}\text{C}$), 18λ adalah *latent heat of vaporation* (MJkg^{-1}).

SWMM menghitung infiltrasi dengan persamaan empiris. Persamaan yang disediakan untuk menghitung infiltrasi antara lain Horton, *modified* Horton, Green-Ampt, dan *Curve Number*. Pengguna SWMM dapat memilih salah satu di antaranya untuk mendapatkan nilai infiltrasi di kawasan drainase yang menjadi objek studi atau perancangan drainase.

Modul hidraulika SWMM memodelkan jaringan drainase sebagai *nodes-and-links network*. Gambar 1.20 menyajikan representasi jaring *nodes-and-links* dalam SWMM. Beban aliran dimasukkan di *node* tertentu yang kemudian oleh SWMM dialirkan sepanjang *links*, bertemu atau berpisah di *internal nodes* sambil mengisi dan mengosongkan tampungan di *node*, kemudian keluar dari sistem jaring drainase di *terminal nodes*. Ada berbagai jenis *nodes* dan *links*, yang masing-masing merepresentasikan saluran terbuka, pipa, pertemuan-percabangan, tampungan, gorong-gorong, bendung, *outfall*, dan sebagainya.



Gambar 1.20. Contoh representasi sistem drainase di sebuah kawasan dalam software SWMM

SWMM melakukan penelusuran aliran di jaringan drainase dengan memodelkan penjalaran gelombang banjir secara dinamis (*dynamic wave analysis*). SWMM menyelesaikan persamaan aliran satu dimensi di saluran terbuka, yang dikenal sebagai Persamaan Saint Venant, secara numeris. Persamaan Saint Venant terdiri dari persamaan kekekalan massa dan kekekalan momentum yang dituliskan dalam bentuk persamaan diferensial parsial sebagai berikut:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0$$

Dalam persamaan di atas, x adalah jarak (m), t adalah waktu (s), A adalah luas tampang lintang aliran (m^2), Q adalah debit aliran (m^3/s), $H = Z + Y$ adalah tinggi hidraulik (m), Z adalah elevasi dasar saluran (m), Y adalah kedalaman aliran (m), S_f adalah kemiringan garis energi, dan g adalah percepatan gravitasi (m/s^2).

Kemiringan garis energi S_f dikaitkan dengan persamaan Manning untuk aliran seragam dan permanen:

$$S_f = \frac{n^2 Q |U|}{AR^{4/3}}$$

Nilai koefisien kekasaran Manning bergantung pada kondisi permukaan bidang yang bersentuhan dengan aliran (bidang basah). Tabel 5 menyajikan beberapa nilai koefisien kekasaran Manning.

Tabel 5. Koefisien kekasaran Manning untuk berbagai jenis bidang permukaan saluran

Bidang permukaan saluran	Koefisien kekasaran, <i>n</i>
Saluran lapis beton	0.011-0.010
Saluran lapis aspal	0.013-0.017
<i>Rubble, riprap</i>	0.017-0.30
Saluran tanah, <i>sandy-silt</i>	0.020
<i>Clay</i>	0.020
<i>Soft sandstone</i>	0.020
<i>Clean gravely soil</i>	0.025
Saluran tanah, ada vegetasi	0.030-0.150

Daftar Acuan

Rossman, L.A. and Hubert, W.C., 2016, *Storm Water Management Model Reference Manual, Volume I – Hydrology (Revised)*, National Risk Management Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.