

**TUGAS AKHIR**

**SIMULASI DEBIT SUNGAI PROGO DI OUTLET  
BENDUNG SAPON DENGAN MENGGUNAKAN  
MODEL SWAT  
(*STREAMFLOW SIMULATION OF PROGO RIVER AT  
SAPON WEIR OUTLET BY USING SWAT MODEL*)**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi  
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



**Rafizal Afif  
14511137**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PRENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA  
2019**

## TUGAS AKHIR

# SIMULASI DEBIT SUNGAI PROGO DI OUTLET BENDUNG SAPON DENGAN MENGGUNAKAN MODEL SWAT (*STREAMFLOW SIMULATION OF PROGO RIVER AT SAPON WEIR OUTLET BY USING SWAT MODEL*)

Disusun Oleh:



**Rafizal Afif**  
14511137

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk  
memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

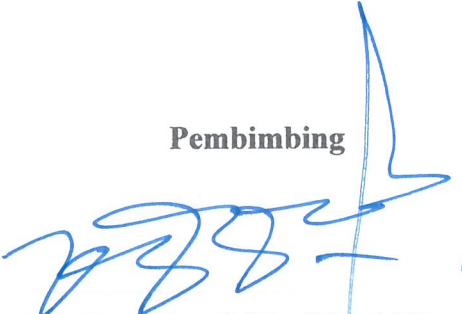
Diuji pada tanggal 27 Februari 2019

Oleh Dewan Penguji

Pembimbing

Penguji I

Penguji II

  
Pradipta Nandi W., S.T., M.Eng.  
NIK: 135111102

  
Dinia Anggraheni, S.T., M.T.  
NIK: 165110105

  
Dwi Astuti Wahyu Wulan P., S.T., M.T.  
NIK: 155111301

Mengesahkan,



Ketua Program Studi Teknik Sipil

  
Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, M.T.  
NIK: 885110101

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundangundangan yang berlaku.

Yogyakarta, 28 Februari 2019

Yang membuat pernyataan,



Rafizal Afif

(14511137)

## **DEDIKASI**

Tugas Besar Ini saya dedikasikan Kepada Almarhum Bapak saya Bapak Agus Irianto yang telah memberikan segalanya buat hidup saya.

Serta ibu saya tercinta Andria Siswanti yang selalu ada dalam setiap saat di hidup saya.

## KATA PENGANTAR

*Alhamdulillahirabbil'alamiin*, puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan Rahmat, Taufik serta Hidayah-Nya Shalawat beserta salam selalu terlimpah curahkan kepada junjungan Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat serta pengikut beliau hingga *yaumul akhir*. Dengan ini, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhrit yang berjudul *Simulasi Debit Sungai Progo di Outlet Bendung Sapon dengan Menggunakan Model SWAT*. Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Prodi Sarjana Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia Yogyakarta.

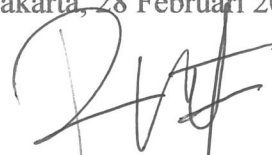
Dalam penyusunan Tugas Akhir ini banyak hambatan yang dihadapi penulis, namun berkat saran, kritik, serta dorongan semangat dari berbagai pihak, alhamdulillah Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Berkaitan dengan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Ibu Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, M.T., selaku Ketua Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perancangan Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
2. Bapak Pradipta Nandi Wardhana, S.T., M.Eng., selaku pembimbing Tugas Akhir ini yang telah memberikan kritik dan saran untuk Tugas Akhir ini. Juga telah banyak meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberikan bimbingan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Dinia Anggraheni, S.T., M.Eng. selaku penguji yang telah memberikan saran yang membangun untuk Tugas Akhir ini.
4. Ibu Dwi Astuti Wahyu Wulan Pratiwi, S.T., M.T. selaku penguji yang telah memberikan saran yang membangun untuk Tugas Akhir ini.
5. Kedua orang tua penulis tercinta yang telah memberikan dukungan secara moril dan materiil serta tak henti-hentinya memanjatkan doa untuk kelancaran dan kesuksesan penulis.

6. Teman-teman Teknik Sipil UII 2014 yang membantu dalam segala hal berkaitan dengan Tugas Akhir ini.
7. Penghuni Asrama Putra Lingga yang senantiasa memberi dukungan secara moril.
8. Teman-teman Kelas b yang telah membantu penulis dalam menjalani perkuliahan
9. Teman-teman Kp magang LRT Jabodebek Barra, Rio, Oza, dan Bowok yang telah memberikan pengalaman berharga kepada penulis.
10. Teman-teman seperjuangan Dhaifan perbowo, Muhammad iqbal ikromi dan Lanny kusumawijaya yang telah membantu penulis selama pengerjaan tugas akhir ini.
11. Teman-teman grup reptil family Basuki, Loki, Gea, Agung, Etek, Ayat, Endy, Fuanda, Gilang, Mima, Indro, Risang, Samsudin, Sandy dan Zaki yang sudah menjadi keluarga baru bagi penulis.
12. Teman-teman yang tidak dapat disebutkan satu persatu

Dengan ini, Penulis berharap agar Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi berbagai pihak yang membacanya.

Yogyakarta, 28 Februari 2019



Rafizal Afif

14511137

## DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Halaman Pengesahan	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
DEDIKASI	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xv
ABSTRAK	xix
<i>ABSTRACT</i>	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Peneliltian	4
1.5 Batasan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Tinjauan Umum	6
2.2 Penelitian Terdahulu	6
2.3 Keaslian Penelitian	13
BAB III LANDASAN TEORI	17
3.1 Hidrologi	17
3.1.1 Curah Hujan	18
3.1.2 <i>Weather Generator</i> (WGEN)	19
3.2 Daerah Aliran Sungai (DAS)	25
3.3 Penggunaan Lahan	26

3.4	Geographic Information System (GIS)	27
3.4.1	<i>Digital Elevation Model</i> (DEM)	29
3.4.2	Citra Landsat	32
3.4.3	Klasifikasi Multispektral	33
3.5	Soil and Water Assessment Tool ( <i>SWAT</i> )	34
3.5.1	Neraca Air	35
3.5.2	<i>Runoff</i>	37
3.5.3	Evapotranspirasi	39
3.5.4	Perkolasi	40
3.5.5	<i>Ground Water</i>	41
3.5.6	Fase Routing	42
3.6	Parameter Statistik	43
BAB IV METODE PENELITIAN		45
4.1	Lokasi Penelitian	45
4.2	Data Penelitian	45
4.3	Tahapan Penelitian	46
4.3.1	Pengolahan Data Spasial Derah Aliran Sungai Progo	48
4.3.2	Pengolahan Data Klimatologi Daerah Aliran Sungai Progo	57
4.3.3	Ketersediaan data	60
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN		63
5.1	Delineasi DAS Progo Berdasarkan Outlet Bendung Sapon	63
5.2	Pembentukan Hidrological Response Unit (HRU)	68
5.2.1	Klasifikasi Tata Guna Lahan	68
5.2.2	Klasifikasi Jenis Tanah	70
5.2.3	Klasifikasi Kemiringan Lahan	72
5.2.4	Penentuan Batas Data dan Pembentukan HRU	74
5.3	Pembentukan Data Klimatologi DAS Progo	76
5.3.1	<i>Input File Weather Generator Data</i>	76
5.3.2	<i>Input File Data Parameter Klimatologi</i>	77
5.4	Simulasi Soil Water Aseessment Tools (SWAT)	79
5.5	Output Simulasi Soil Water Aseessment Tools (SWAT)	80
5.5.1	Kalibrasi Hasil Simulasi	80



5.5.2	Validasi Data Hasil Simulasi Model SWAT	82
BAB VI	KESIMPULAN DAN SARAN	103
6.1	Kesimpulan	103
6.2	Saran	104
	DAFTAR PUSTAKA	106

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Nilai Statistik Hasil Penelitian Analisis Debit Sungai Dengan Menggunakan Model SWAT Pada DAS Cipasauran, Banten	8
Tabel 2. 2 Perbedaan dengan Penelitian Terdahulun	13
Tabel 3. 1 Format <i>Weather Geneator Data</i> (WGEN)20	
Tabel 3. 2 Karakteristik PALSAR	31
Tabel 3. 3 Aplikasi Kanal-kanal Landsat MSS dan ETM	33
Tabel 3. 4 Nilai CN Berdasarkan <i>Soil Conservation Service</i> (SCS)	38
Tabel 3. 5 Kriteria nilai Nash-Sutcliffe (NS)	44
Tabel 4. 1 Persentase Luas Kemiringan Daerah Aliran Sungai Progo	50
Tabel 4. 2 Kombinasi <i>Band</i> Landsat	51
Tabel 4. 3 Persentase Tata Guna Lahan Daerah Aliran Sungai Progo	54
Tabel 4. 4 Persentase Jenis Tanah FAO Daerah Aliran Sungai Progo	56
Tabel 4. 5 Variable Data Tanah <i>Food Agriculture Organization</i> (FAO)	56
Tabel 4. 6 Hasil Pembentukan <i>Weather Generator Data</i> (WGEN) Bulan Januari- Juni	58
Tabel 4. 7 Hasil Pembentukan <i>Weather Generator Data</i> (WGEN) Bulan Juli- Desember	58
Tabel 4. 8 Keterangan Lokasi Stasiun Curah Hujan	60
Tabel 4. 9 Ketersedian Stasiun Curah Hujan, Stasiun Klimatologi dan Stasiun Duga Air DAS Progo	61
Tabel 5. 1 Rekapituasi Hasil Pembentukan Sub-DAS Progo 67	
Tabel 5. 2 Rekapituasi Hasil Klasifikasi Data <i>Landuse</i>	69
Tabel 5. 3 Luasan Hasil Klasifikasi Data <i>Landuse</i> DAS Progo	69
Tabel 5. 4 Luasan Hasil Klasifikasi Jenis Tanah FAO DAS Progo	72
Tabel 5. 5 Luasan Hasil Klasifikasi Kemiringan Lahan DAS Progo	74
Tabel 5. 6 Rekapituasi Hasil Pembentukan Sub-DAS Progo	75
Tabel 5. 7 Rekapituasi Stasiun Klimatogi	78

Tabel 5. 8 Parameter Yang Digunakan Dalam Kalibrasi	81
Tabel 5. 9 Hasil Kalibrasi Menggunakan Metode SUFI2	81
Tabel 5. 10 Perhitungan $R^2$ Debit 15 Harian DAS Progo Pada Tahun 2013	86
Tabel 5. 11 Perhitungan NS Debit 15 Harian DAS Progo Pada Tahun 2013	87
Tabel 5. 12 Perhitungan $R^2$ Debit 15 Harian DAS Progo Pada Tahun 2014	89
Tabel 5. 13 Perhitungan NS Debit 15 Harian DAS Progo Pada Tahun 2014	89
Tabel 5. 14 Perhitungan $R^2$ Debit 15 Harian DAS Progo Pada Tahun 2015	91
Tabel 5. 15 Perhitungan NS Debit 15 Harian DAS Progo Pada Tahun 2015	92
Tabel 5. 16 Perhitungan $R^2$ Debit Bulanan DAS Progo Pada Tahun 2013	95
Tabel 5. 17 Perhitungan NS Debit Bulanan DAS Progo Pada Tahun 2013	95
Tabel 5. 18 Perhitungan $R^2$ Debit Bulanan DAS Progo Pada Tahun 2014	97
Tabel 5. 19 Perhitungan NS Debit Bulanan DAS Progo Pada Tahun 2014	98
Tabel 5. 20 Perhitungan $R^2$ Debit Bulanan DAS Progo Pada Tahun 2015	99
Tabel 5. 21 Perhitungan NS Debit Bulanan DAS Progo Pada Tahun 2015	100

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Peta Daerah Aliran Sungai Progo	2
Gambar 2. 1 Grafik Kalibrasi Debit Bulanan DAS Cipasauran	7
Gambar 2. 2 Grafik Hubungan Debit Hasil Simulasi dan Debit Hasil Observasi	10
Gambar 3. 1 Siklus Hidrologi	18
Gambar 3. 2 Skema Daerah Aliran Sungai	25
Gambar 3. 3 Permukaan Bumi dan Layer Pada Data Vektor	28
Gambar 3. 4 Permukaan Bumi dan Layer Pada Data Raster	29
Gambar 3. 5 Skema Model SWAT Program Arc-SWAT	35
Gambar 3. 6 Representasi Fase Lahan Pada Siklus Hidrologi Dalam Model SWAT	36
Gambar 3. 7 Grafik Hubungan <i>Runoff</i> Terhadap Curah Hujan	37
Gambar 3. 8 Tampungan Prisma dan Tampungan Baji	42
Gambar 4. 1 Bagan Alir Tugas Akhir	47
Gambar 4. 2 Analisis Data <i>Digital Elevation Model</i>	48
Gambar 4. 3 Peta Kemiringan Daerah Aliran Sungai Progo	49
Gambar 4. 4 Proses <i>Composite Band</i>	51
Gambar 4. 5 Visualisai kombinasi band/kanal Landsat (R=6,G=5,B=4)	52
Gambar 4. 6 Peta Tata Guna Lahan Daerah Aliran Sungai Progo	53
Gambar 4. 7 Proses <i>Conversion Polygon to Raster</i>	54
Gambar 4. 8 Peta Jenis Tanah FAO Daerah Aliran Sungan Progo	55
Gambar 4. 9 Stasiun Curah Hujan dan Klimatologi DAS Progo	59
Gambar 5. 1 Tampilan Jendela Project Setup SWAT Model	64
Gambar 5. 2 Tampilan Jendela <i>Watershead delineation</i>	64
Gambar 5. 3 Aliran sungai Progo	65
Gambar 5. 4 Pembentukan DAS dan Sub DAS Progo	66
Gambar 5. 5 Tampilan Jendela <i>Land Use/Soil/Slope Definition</i>	68
Gambar 5. 6 Hasil Klasifikasi Tata Guna Lahan DAS Progo	70

Gambar 5. 7 Hasil Pengklasifikasian Jenis Tanah FAO	71
Gambar 5. 8 Tampilan Input Variabel Data Jenis Tanah FAO	72
Gambar 5. 9 Hasil Pengklasifikasian Kemiringan Lahan	73
Gambar 5. 10 Tampilan Jendela Penentuan Batas Data ( <i>HRU Thresholds</i> )	74
Gambar 5. 11 Tampilan Jendela Proses <i>Input</i> data WGEN	77
Gambar 5. 12 Tampilan <i>Setup and Run SWAT Model Simulation</i>	79
Gambar 5. 13 Perbandingan Debit Simulasi Harian Terkalibrasi Dengan Debit Observasi Tahun 2013	83
Gambar 5. 14 Perbandingan Debit Simulasi Harian Terkalibrasi Dengan Debit Observasi Tahun 2014	84
Gambar 5. 15 Perbandingan Debit Simulasi Harian Terkalibrasi Dengan Debit Observasi Tahun 2015	85
Gambar 5. 16 Perbandingan Simulasi Debit 15 Harian Terkalibrasi Dengan Debit Observasi Tahun 2013	88
Gambar 5. 17 Perbandingan simulasi Debit 15 Harian Terkalibrasi dengan debit Observasi Tahun 2014	91
Gambar 5. 18 Perbandingan Simulasi Debit 15 Harian Terkalibrasi Dengan Debit Observasi Tahun 2015	93
Gambar 5. 19 Fluktuasi debit 15 harian Sungai Progo selama periode simulasi	94
Gambar 5. 20 Perbandingan simulasi Debit Bulanan Terkalibrasi dengan debit Observasi Tahun 2013	97
Gambar 5. 21 Perbandingan simulasi Debit Bulanan Terkalibrasi dengan debit Observasi Tahun 2014	99
Gambar 5. 22 Perbandingan simulasi Debit Bulanan Terkalibrasi dengan debit Observasi Tahun 2015	101
Gambar 5. 23 Fluktuasi debit Bulanan Sungai Progo selama periode simulasi	102

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Besaran Variable Pada Setiap Jenis Tanah DAS Progo
Lampiran 2	Data Curah Hujan Stasiun Badran
Lampiran 3	Data Curah Hujan Stasiun Caturanom
Lampiran 4	Data Curah Hujan Stasiun Mendut
Lampiran 5	Data Curah Hujan Stasiun Brosot
Lampiran 6	Data Curah Hujan Stasiun Gembongan
Lampiran 7	Data Curah Hujan Stasiun Godean
Lampiran 8	Data Curah Hujan Stasiun Kalibawang
Lampiran 9	Data Curah Hujan Stasiun Kalijoho
Lampiran 10	Data Curah Hujan Stasiun Kenteng
Lampiran 11	Data Curah Hujan Stasiun Pajangan
Lampiran 12	Data Curah Hujan Stasiun Sanden
Lampiran 13	Data Curah Hujan Stasiun Sapon
Lampiran 14	Data Curah Hujan Stasiun Seyengan
Lampiran 15	Data Klimatologi Stasiun Tegal
Lampiran 16	Data Debit Sapon Tahun 2015
Lampiran 17	Data Hasil Pembentukan <i>Hidrological Response Unit</i>
Lampiran 18	Data Debit Hasil Simulasi
Lampiran 19	Perhitungan Parameter Statistik $R^2$
Lampiran 20	Perhitungan Efisiensi Model NS

## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

SWAT	= <i>Soil Water Assessment Tools</i>
ARS	= <i>Agricultural Research Service</i>
USDA	= <i>United States Department of Agriculture</i>
$R^2$	= Koefisien Korelasi
NS	= Nilai Efisiensi Model Nash Sutcliffe
A	= Standart deviasi
3D	= 3 Dimensi
ALOS	= <i>Advanced Land Observing Satellite</i>
PALSAR	= <i>Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar</i>
MSS	= <i>Multispectral Scanner</i>
ETM	= <i>Enhanced Thematic Mapper</i>
$SW_t$	= Kandungan akhir air tanah (mm)
$SW_o$	= Kandungan air tanah awal pada hari ke-i (mm)
$R_{day}$	= Jumlah presipitasi pada hari ke-i (mm)
$Q_{surf}$	= Jumlah <i>surface runoff</i> pada hari ke-i (mm)
$E_a$	= Jumlah evapotranspirasi pada hari ke-i (mm)
$W_{seep}$	= Jumlah air yang memasuki <i>vadose zone</i> pada profil tanah hari ke-i (mm)
$Q_{gw}$	= Jumlah air yang kembali pada hari ke-i (mm)
S	= Retention parameter (mm)
CN	= <i>Soil conservation service curve number</i>
$\lambda$	= Fluks panas laten penguapan ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )
E	= Evaporasi ( $\text{mm d}^{-1}$ )
$\Delta$	= Slope dari kurva tekanan uap jenuh dan suhu udara ( $de/dT$ ) ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
$H_{net}$	= Radiasi netto ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )
G	= Fluks panas laten permukaan tanah ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )

$\rho_{air}$	= Massa jenis udara ( $\text{kg m}^{-3}$ )
$cp$	= Kalor spesifik pada tekanan tetap ( $\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )
$e_z^o$	= Tekanan uap air jenuh pada ketinggian z (kPa)
$e_z$	= Tekanan uap air pada ketinggian z (kPa)
$\gamma$	= Konstanta psikometrik ( $\text{kPa }^\circ\text{C}^{-1}$ )
$r_c$	= Resistensi pada kanopi ( $\text{s m}^{-1}$ )
$r_a$	= Tahanan difusi pada lapisan udara (resistensi aerodinamis) ( $\text{s m}^{-1}$ )
$E_o$	= Potensi evapotranspirasi ( $\text{mm d}^{-1}$ )
$\alpha_{pet}$	= 1.28 (koefisien)
$H_o$	= Radiasi luar bumi ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ )
$T_{mx}$	= Suhu udara maximum untuk hari tertentu ( $^\circ\text{C}$ )
$T_{mn}$	= Suhu udara minimum untuk hari tertentu ( $^\circ\text{C}$ )
$T_{av}$	= Suhu udara maximum untuk hari tertentu ( $^\circ\text{C}$ )
$W_{perc.ly}$	= Jumlah air meresap ke lapisan tanah dibawahnya pada hari tertentu ( $\text{mm H}_2\text{O}$ )
$SW_{ly.excess}$	= Volume air yang dapat dialirkan di lapisan tanah pada hari tertentu ( $\text{mm H}_2\text{O}$ )
$\Delta t$	= Panjang dari selang waktu (jam)
$TT_{perc}$	= Waktu perjalanan untuk perlokasi (jam)
$Q_m$	= Debit aliran sungai observasi ( $\text{m}^3/\text{detik}$ )
$Q_{m.avr}$	= Rata-rata debit aliran sungai observasi ( $\text{m}^3/\text{detik}$ )
$Q_s$	= Debit aliran sungai model ( $\text{m}^3/\text{detik}$ )
$Q_{s.avr}$	= Rata-rata debit aliran sungai model ( $\text{m}^3/\text{detik}$ )
SNAM	= Jenis Tanan
NLAYERS	= Jumlah Lapisan Tanah
HYDGRP	= Grup Hidrologi Tanah
SOL_ZMX	= Kedalaman Efektif (mm)
ANION_EXCL	= Fraksi Prositas ( <i>void space</i> )
SOL_CRK	= Volume retakan potensial atau maksimum dari profil tanah



TEXTURE	= Tektur tanah
SOL_Z	= Ketebalan lapisan tanah (mm)
SOL_BD	= Bulk Density dalam $\text{g/cm}^3$
SOLAWC	= Kapasitas air yang tersedia dari lapisan tanah ( $\text{mm H}_2\text{O} / \text{mm tanah}$ )
SOL_K	= Konduktivitas hidrolik jenuh ( $\text{mm} / \text{jam}$ )
SOL_CBN	= Kandungan karbon organik (% berat tanah)
CLAY	= <i>Clay content</i> (% berat tanah)
SILT	= <i>Silt content</i> (% berat tanah)
SAND	= <i>Sand content</i> (% berat tanah)
ROCK	= <i>Rock content</i> (% berat tanah)
WLATITUDE	= Koordinat lintang stasiun iklim
WLONGITUDE	= Koordinat bujur stasiun iklim
WLEV	= Elevasi stasiun iklim (m)
RAIN_YRS	= Jumlah tahun data klimatologi yang digunakan
TMPMX	= Rata-rata temperatur maksimum harian dalam satu bulan pencatatan ( $^{\circ}\text{C}$ )
TMPMN	= Rata-rata temperatur minimum harian dalam satu bulan pencatatan ( $^{\circ}\text{C}$ )
TMPSTMTDMX	= Standar deviasi temperatur maksimum harian dalam satu bulan pencatatan ( $^{\circ}\text{C}$ )
TMPSTMTDMN	= Standar deviasi temperatur minimum harian dalam satu bulan pencatatan ( $^{\circ}\text{C}$ )
PCPMM	= Curah hujan rata-rata harian dalam satu bulan pencatatan (mm)
PCPPSTD	= Standar deviasi curah hujan harian dalam satu bulan pencatatan (mm)
PCPSKW	= Koefisien Skew curah hujan harian dalam satu bulan pencatatan (mm)
PR-W1	= Kemungkinan hari basah setelah hari kering dalam satu bulan pencatatan

PR-W2	= Kemungkinan hari basah setelah hari basah dalam satu bulan pencatatan
PCPD	= Rata-rata jumlah hari hujan dalam satu bulan pencatatan
SOLARAV	= Rata-rata radiasi matahari harian dalam satu bulan pencatatan (MJ/m <sup>2</sup> /hari)
DEWPT	= Rata-rata kelembapan harian dalam satu bulan pencatatan
WINDAV	= Rata-rata kecepatan angin harian dalam satu bulan pencatatan (m/s)
ARGRL	= <i>Agricultural Land</i>
PAST	= <i>Pasture</i>
URHD	= <i>Residential High Density</i>
WATR	= <i>Water</i>
FRST	= <i>Forest</i>
HRU	= <i>Hidrological Response Unit</i>

## ABSTRAK

Pertumbuhan penduduk yang mencapai angka 1,17% pada provinsi D.I.Y dan 0,78% pada provinsi Jawa Tengah mengakibatkan peningkatan keperluan air baku di DAS Progo. Oleh karena itu diperlukan informasi mengenai analisis debit Sungai Progo. Analisis debit sungai dapat dilakukan dengan berbagai cara salah satunya dengan permodelan suatu DAS. Salah satu permodelan hidrologi yang dapat digunakan adalah model SWAT. Model SWAT digunakan karena dapat memperhitungkan parameter klimatolgi dan kondisi DAS. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui debit harian, debit 15 harian, debit bulanan dan performa model SWAT dalam memodelkan suatu DAS.

Penelitian ini akan menganalisa debit Sungai Progo dengan *outlet* Bendung Sapon menggunakan model *soil water asesment tools* (SWAT) dengan periode simulasi selama tiga tahun, yakni tahun 2013 sampai 2015. Data mengenai kondisi DAS yang digunakan sebagai data masukan adalah berupa data karakteristik tanah, data tata guna lahan, data kemiringan lahan, data iklim, dan data pengukuran debit. Proses simulasi model SWAT dilakukan melalui empat tahapan yaitu deliniasi DAS, pembentukan *hydrological response unit* (HRU), pengolahan data dan simulasi model serta pengujian hasil simulasi berdasarkan parameter statistik  $R^2$  dan efisiensi model NS.

Dari hasil simulasi ini diketahui bahwa perbandingan hasil debit simulasi dan debit observasi lapangan menunjukkan angka korelasi yang baik. Dimana hasil validasi mulai tahun 2013 hingga 2015 pada debit hariannya memiliki nilai  $R^2$  secara berturut-turut adalah 0,82;0,83;0,95 dan untuk nilai NS secara berturut-turut adalah 0,34;0,26;0,32. Hasil validasi debit 15 hariannya memiliki nilai  $R^2$  secara berturut-turut adalah 0,88;0,96;0,99 dan untuk nilai NS secara berturut-turut adalah 0,61;0,55;0,52. Hasil validasi debit bulannya memiliki nilai  $R^2$  secara berturut-turut adalah 0,89;0,95;0,99 dan untuk nilai NS secara berturut-turut adalah 0,55;0,65;0,39.

**Kata kunci:** Analisis debit, daerah aliran Sungai Progo, model SWAT, validasi

## **ABSTRACT**

*Population growth reached 1,17% in Special Region of Yogyakarta and 0,78 % in Central Java caused an increased in the need for raw water in Progo watershed. Therefore, informations were needed regarding the analyze of Progo River discharge. Analyze of river discharge could be done in various ways, one of them was watershed modeling. One of hydrology model that could be used was SWAT model. SWAT model was used because it can calculate climatological parameters and watershed condition. This research aims to determine the daily discharge, quarter monthly discharge, monthly discharge, and performance of SWAT model to modeling a watershed.*

*This research will be analyze the water discharge in Progo River with Sapon Weir outlet using Soil Water Assessment Tools (SWAT) with simulation period for 3 years, between 2013 till 2015. Data on watershed condition that used as input data is included soil characteristic data, land use data, land slope data, climate data, and water discharge measurement data. The SWAT simulation process is carried out through four stages, they are watershed delineation, formation of a hydrological response unit, data processing, and model simulation with simulation testing result based on  $R^2$  statistic parameter and NS model efficiency.*

*From the result of this simulation, it is known that the comparison of the result between water discharge simulation and field observation shows good correlation value. For the validation result since 2013 until 2015 in daily water discharge have  $R^2$  values in consecutive are 0,82;0,83;0,95 and the NS values in consecutive are 0,34;0,26;0,32. The validation result of quarter monthly water discharge have  $R^2$  values in consecutive are 0,88;0,96;0,99 and the NS values in consecutive are 0,61;0,55;0,52. The validation result of monthly water discharge have  $R^2$  values in consecutive are 0,89;0,95;0,99 and NS values in consecutive are 0,55;0,65;0,39.*

**Keywords** : *Water discharge analyze, Progo River watershed, SWAT model, Validation*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

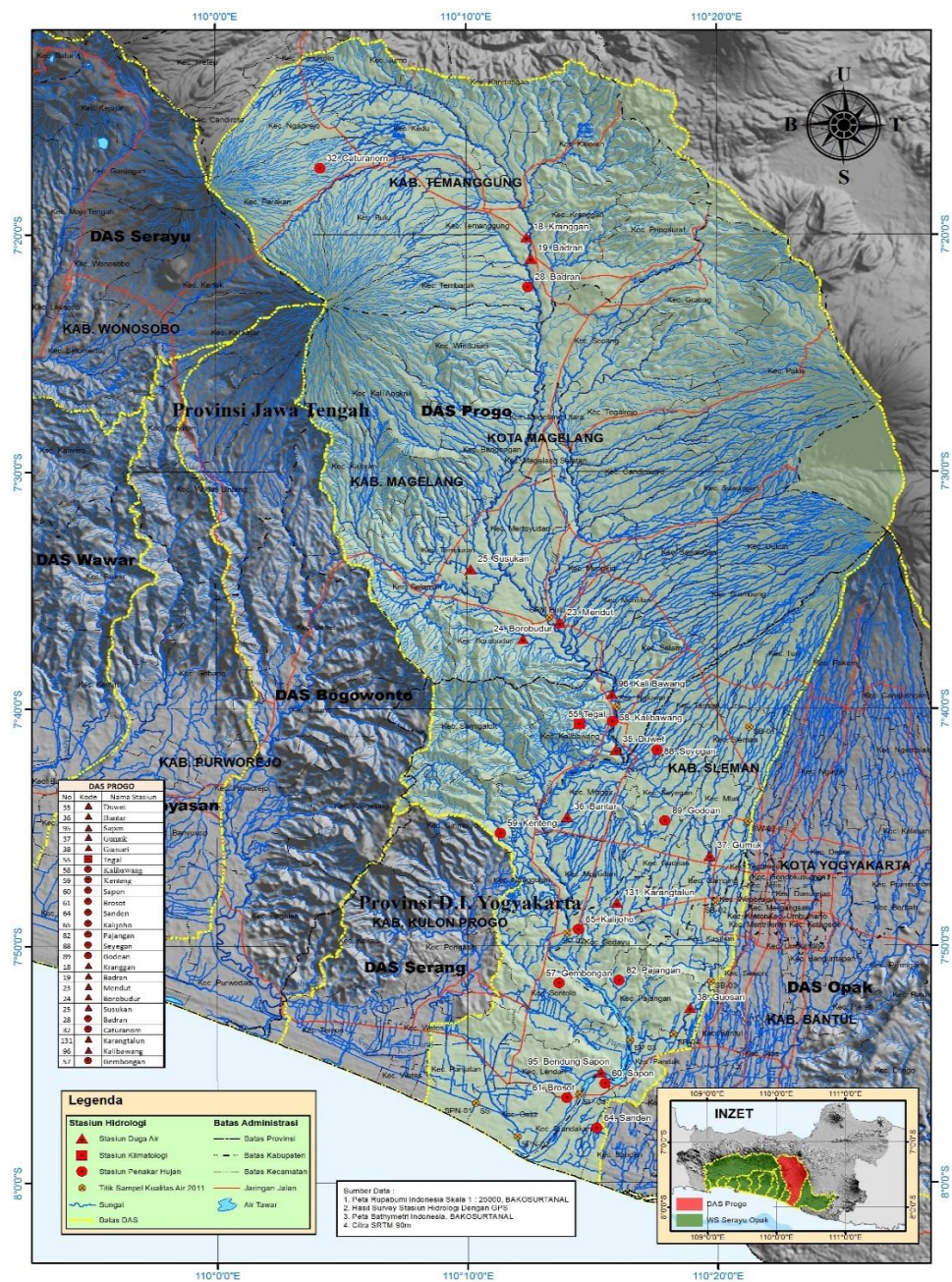
Pertumbuhan penduduk merupakan suatu hal yang patut untuk diperhatikan. Meningkatnya jumlah penduduk memberikan peningkatan terhadap perkembangan ekonomi dan industri pada suatu wilayah. Perkembangan ekonomi dan industri ini memiliki andil besar dalam pertumbuhan penggunaan lahan pada suatu wilayah, yang pada umumnya kurang memperhatikan faktor konservasi tanah dan air dalam pengelolaannya. Pertumbuhan penggunaan lahan juga mempengaruhi siklus hidrologi yang terjadi di DAS pada suatu wilayah.

Daerah aliran sungai adalah suatu wilayah daratan yang merupakan satu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya. Daerah aliran sungai berfungsi menampung, menyimpan, dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan ke danau, sungai serta laut secara alami. Daerah aliran sungai memiliki fungsi hidrologis yang berkaitan dengan penyediaan air, sebagai daerah tangkapan hujan dan mengalirkannya ke *outlet*.

Sungai Progo merupakan salah satu sungai besar yang melintasi Daerah Istimewa Yogyakarta yang alirannya melewati Provinsi Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta. Sungai Progo memiliki panjang aliran  $\pm 140$  km dan luas daerah aliran sungai  $\pm 246,42$  ha. Hulu utama Sungai Progo adalah Gunung Sindoro yang kemudian bermuara di Pantai Trisik pesisir selatan Jawa menuju Samudera Hindia. Terdapat beberapa anak sungai yang mengalir ke Sungai Progo, yaitu Sungai Krasak, Sungai Bedog, Sungai Tangsi, Sungai Tingal, serta Sungai Elo.

Menurut data yang dipublikasi oleh BPS (2018) pertumbuhan penduduk Daerah Istimewa Yogyakarta dari tahun 2010-2017 mencapai angka 1,17% dan pertumbuhan penduduk Provinsi Jawa Tengah tahun 2010-2017 mencapai angka 0,78%. Pertumbuhan penduduk ini mengakibatkan peningkatan keperluan air baku di DAS Progo. Sebagai DAS yang digunakan untuk memenuhi keperluan air baku,

diperlukan informasi mengenai ketersediaan air dengan melakukan analisis debit sungai. Informasi mengenai ketersediaan air merupakan informasi yang penting untuk melakukan pengembangan sumber daya air. Analisis debit sungai dapat dilakukan dengan berbagai cara dan salah satunya adalah dengan melakukan permodelan suatu DAS. Peta Daerah Aliran Sungai Progo dapat dilihat pada Gambar 1.1



**Gambar 1. 1 Peta Daerah Aliran Sungai Progo**  
(Sumber : BBWS Serayu Opak)

Terdapat berbagai macam model hidrologi yang dapat digunakan untuk memperhitungkan dan mengkaji kondisi hidrologi dan perubahan tata guna lahan suatu wilayah. Salah satu model hidrologi tersebut adalah *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT). Model SWAT adalah model hidrologi yang dikembangkan untuk memprediksi pengaruh pengelolaan lahan terhadap air, sedimen, muatan pestisida, dan kimia hasil pertanian. Model SWAT dikembangkan oleh *Agricultural Research Service* (ARS) dari USDA. Model SWAT merupakan model yang terintegrasi di dalam ArcGIS dan merupakan perangkat lunak yang bersifat terbuka (*open source*), sehingga telah digunakan dan dikembangkan secara luas diberbagai negara. Dengan menggunakan data yang representatif dan sesuai dengan kebutuhan, model SWAT dapat digunakan untuk melakukan analisis debit sungai suatu DAS.

### **1.2 Rumusan Masalah**

Berikut rumusan masalah dalam penulisan Tugas Akhir ini.

1. Bagaimanakah hubungan antara debit harian hasil simulasi Sungai Progo yang dihasilkan dari permodelan SWAT dengan debit observasi DAS Progo di *outlet* bendung Sapon?
2. Bagaimanakah hubungan antara debit 15 harian hasil simulasi Sungai Progo yang dihasilkan dari permodelan SWAT dengan debit observasi DAS Progo di *outlet* bendung Sapon?
3. Bagaimanakah hubungan antara debit bulanan hasil simulasi Sungai Progo yang dihasilkan dari permodelan SWAT dengan debit observasi DAS Progo di *outlet* bendung Sapon?
4. Bagaimana performa model SWAT dalam memodelkan debit harian, debit 15 harian, dan debit bulanan Sungai Progo?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

1. Mengetahui hubungan antara debit harian hasil simulasi Sungai Progo yang dihasilkan dari permodelan SWAT dengan debit observasi DAS Progo di *outlet* bendung Sapon

2. Mengetahui hubungan antara debit 15 harian hasil simulasi Sungai Progo yang dihasilkan dari permodelan SWAT dengan debit observasi DAS Progo di *outlet* bendung Sapon
3. Mengetahui hubungan antara debit bulanan hasil simulasi Sungai Progo yang dihasilkan dari permodelan SWAT dengan debit observasi DAS Progo di *outlet* bendung Sapon
4. Mengetahui performa model SWAT dalam memodelkan debit harian, debit 15 harian, dan debit bulanan Sungai Progo

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat memperkirakan debit harian, debit 15 harian dan debit bulanan DAS Progo dengan *outlet* di Bendung Sapon dan mengetahui performa model swat dalam memodelkan aliran DAS progo dengan *outlet* Bendung Sapon.

#### **1.5 Batasan Penelitian**

Batasan masalah digunakan agar penelitian ini dapat lebih terarah dan terfokus pada tujuan dan manfaat yang akan dicapai. Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Daerah aliran sungai yang akan digunakan sebagai penelitian ini adalah DAS Progo dengan *outlet* berada di Bendung Sapon.
2. Data iklim yang digunakan menggunakan data 13 stasiun curah hujan dan 1 stasiun klimatologi yaitu stasiun curah hujan Badran, stasiun curah hujan Brosot, stasiun curah hujan Caturanom, stasiun curah hujan Gembongan, curah hujan Godean, curah hujan Kalibawang, curah hujan Kalijoho, curah hujan Kenteng, curah hujan Mendut, stasiun curah hujan Pajangan, curah hujan Sanden, curah hujan Sapon, curah hujan Seyengan, dan stasiun klimatologi Tegal selama tahun 2013-2015.
3. Data debit observasi yang digunakan menggunakan data debit stasiun AWLR Sapon selama tahun 2013-2015.
4. Data peta tata guna lahan menggunakan data hasil analisis citra Landsat 8 OLI yang diterbitkan oleh *United Stated Geological Surve (USGS)*.



5. Data peta kemiringan menggunakan data hasil analisis DEM ALOS PALSAR yang diterbitkan oleh *Alaska satelit facility* (ASF).
6. Data peta jenis tanah menggunakan peta jenis tanah yang diterbitkan oleh *food and agriculture organization* (FAO).
7. Model hidrologi yang digunakan adalah *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT)
8. Pemrograman komputer yang digunakan adalah program ArcSWAT tahun 2012.
9. Periode simulasi dilakukan sesuai dengan ketersediaan data yang tersedia yakni 3 tahun dimulai dari tahun 2013-2015.
10. Kalibrasi model dilakukan selama 1 tahun diawal periode simulasi yakni pada tahun 2013.
11. Kalibrasi model SWAT menggunakan 7 parameter data yaitu parameter faktor alfa aliran dasar, parameter masa jeda air tanah, parameter kelandaian minimal dari akuifer dangkal, parameter koefisien evaporasi, parameter batas kedalaman air di akuifer dangkal, parameter konsuksitifitas hidrolik pada saluran utama, dan parameter nilai kekasaran manning saluran.
12. Kalibrasi model SWAT Menggunakan metode SUFI2.
13. Validasi data menggunakan 2 parameter statistik yakni parameter  $R^2$  dan NS.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Tinjauan Umum**

Perubahan tata guna lahan yang relatif luas pada kawasan DAS dapat menyebabkan terganggunya siklus hidrologi. Siklus hidrologi secara alamiah dapat diartikan sebagai gerakan air di permukaan bumi, yaitu perjalanan air dari permukaan laut ke atmosfer kemudian ke permukaan tanah dan kembali lagi ke laut yang berlangsung terus menerus dan tidak pernah berhenti. Air tersebut akan tertahan sementara di sungai, danau, waduk, dan dalam tanah sehingga dapat dimanfaatkan oleh manusia atau makhluk hidup lainnya.

Oleh karena itu untuk mengetahui perubahan debit yang terjadi di DAS Progo dilakukan simulasi debit Sungai Progo di *outlet* Bendung Sapon dengan model SWAT. Simulasi debit Sungai Progo ini berfungsi untuk mengetahui hubungan antara debit harian, debit 15 harian, dan debit bulanan Sungai Progo dan tata guna lahan yang terjadi di DAS Progo, serta mengetahui performa model SWAT dalam memodelkan debit Sungai Progo. Model SWAT digunakan karena model ini mengakomodasi parameter iklim dan tata guna lahan sebagai input permodelan.

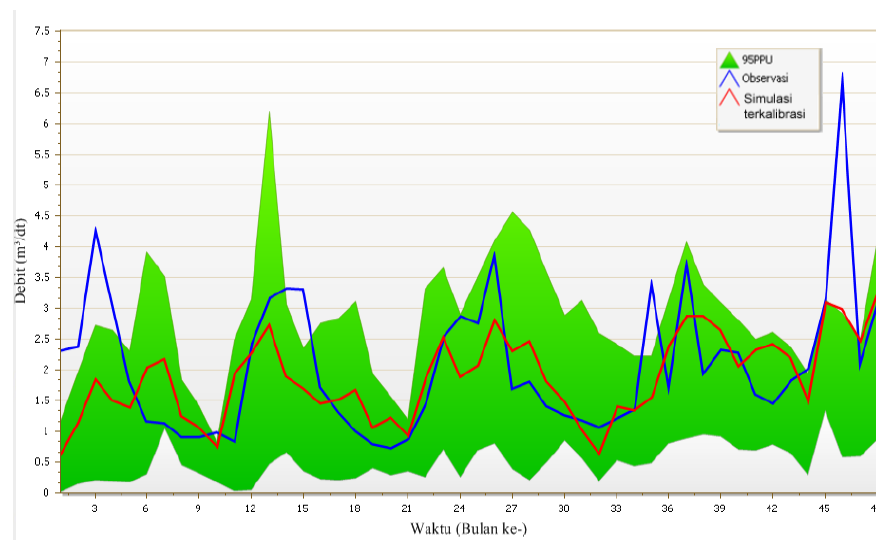
#### **2.2 Penelitian Terdahulu**

Penulisan tugas akhir mengenai analisis debit sungai dengan menggunakan model SWAT di DAS Progo ini mengacu pada penelitian yang sudah ada terlebih dahulu yang berkaitan dengan penelitian ini, penelitian tersebut diantaranya adalah sebagai berikut.

1. Analisis Debit Sungai dengan Menggunakan Model SWAT di DAS Cipasauran, Banten oleh Maulana Ibrahim Rau (2012).

Permintaan jumlah air baku untuk kawasan non industri dan sektor industri di wilayah kota Cilegon terus meningkat. Hal ini menyebabkan terjadi kekurangan air baku sehingga PT Krakatau Tirta Industri harus menambah pengambilan air di DAS Cipasauran. Untuk itu diperlukan informasi

mengenai hubungan antara ketersediaan air dengan debit sungai. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan informasi mengenai hubungan antara ketersediaan air baku dengan debit sungai. Pada penelitian ini analisis SWAT dilakukan dengan MWSWAT 1.7, pada simulasi ini dilakukan 4 proses, diantaranya adalah proses deliniasi DAS, pembentukan *hydrological response unit* (HRU), pengelolaan data dan simulasi SWAT, dan proses visualisasi. Pada pelaksanaan penelitian, digunakan *threshold* sebesar 0,5 km<sup>2</sup>, sehingga terbentuk DAS dengan total luas 38,87 km<sup>2</sup>, dan diperoleh 1616 HRU. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, hasil kalibrasi harian dan bulanan menunjukkan bahwa 84% dan 83% data observasi berpotongan dengan luasan grafik 95PPU, dengan nilai *p-factor* harian dan bulanan sebesar 0,84 dan 0,83. Grafik hasil kalibrasi debit bulanan DAS Cipasauran dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 2. 1 Grafik Kalibrasi Debit Bulanan DAS Cipasauran**

Sumber : (Maulana Ibrahim Rau, 2012)

Dengan demikian model hasil kalibrasi dikatakan valid, meskipun  $R^2$  dan nilai NS yang didapat kurang baik. Dengan menggunakan model SWAT yang telah divalidasi, diperoleh nilai debit harian DAS Cipasauran yang berkisar dari 0-3,309 m<sup>3</sup>/detik, sedangkan nilai debit bulanan DAS Cipasauran berkisar dari 0,648-3,266 m<sup>3</sup>/detik. Dengan demikian kebutuhan air baku harian dan bulanan dapat terpenuhi sebesar 98,22% dan 100%. Nilai  $R^2$  (koefisien korelasi

pearson) dan nilai NS (model efisiensi Nash-Sutcliffe ) dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

**Tabel 2. 1 Nilai Statistik Hasil Penelitian Analisis Debit Sungai Dengan Menggunakan Model SWAT Pada DAS Cipasauran, Banten**

Variable	Simulasi		Kalibrasi dan validasi	
	Harian	Bulanan	Harian	Bulanan
<i>p-factor</i>	-	-	0,84	0,83
<i>r-factor</i>	-	-	2,43	2,04
R <sup>2</sup>	0,0004	0,045	0,07	0,28
NS	-0,204	-0,909	0,03	0,25

Sumber : (Maulana Ibrahim Rau, 2012)

2. Penggunaan Model Hidrologi SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) dalam Pengelolaan DAS Cisadane oleh Edy Junaidi (2011).

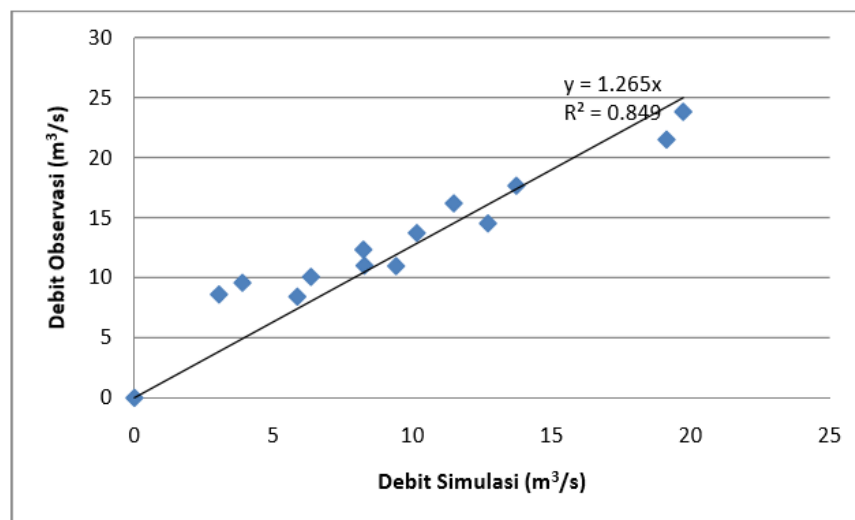
Kegiatan pengelolaan DAS adalah kegiatan yang berupaya untuk memelihara dan meningkatkan kualitas DAS di Indonesia agar DAS tersebut dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan. Namun kenyataannya dilapangan menunjukkan bahwa kondisi DAS di Indonesia semakin memburuk. Gambaran kondisi DAS yang semakin memburuk dapat diamati berdasarkan jumlah DAS prioritas yang semakin bertambah dari tahun ke tahun. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sub DAS dan penggunaan lahan yang menyebabkan permasalahan di DAS Cisadane, serta mengevaluasi implementasi perencanaan pengelolaan DAS Cisadane. Pada penelitian ini permodelan SWAT dilakukan menggunakan program MW-SWAT. Penggunaan model SWAT pada penelitian ini disesuaikan dengan fase pengelolaan DAS yaitu fase identifikasi masalah, fase perencanaan, fase implementasi, dan fase evaluasi. Pengidentifikasi masing-masing fase didasarkan pada keluaran model. Pada fase identifikasi masalah dilakukan identifikasi pada sub DAS dan unit lahan yang menyebabkan permasalahan. Pada fase perencanaan dilakukan perencanaaan pengelolaan DAS Cisadane yang merupakan rencana dari tiga instansi (rencana RLKT DAS Cisadane yang disusun oleh BPDAS Citarum-Ciliwung tahun 2002, rencana tata ruang DAS Cisadane oleh Bappeda Bogor dan Tangerang, rencana tata ruang DAS

Cisadane dalam mengatasi banjir oleh BBP DAS Ciliwung-Cisadane) dengan melakukan evaluasi berdasarkan analisis identifikasi sub DAS dan unit lahan yang berpotensi menyebabkan permasalahan. Pada fase implementasi dilakukan dengan melakukan skenario pada model apabila seluruh perencanaan pengelolaan DAS Cisadane telah dilaksanakan. Pada fase evaluasi yaitu melakukan evaluasi dari implementasi perencanaan yang telah dilakukan terhadap kinerja DAS sehingga dapat ditentukan perencanaan dan pengelolaan yang terbaik berdasarkan penilaian kinerja DAS. Dari hasil analisis SWAT, ada tiga sub DAS yang dikategorikan sebagai sub DAS yang berpotensi menyebabkan masalah air dan penggunaan lahan pada DAS Cisadane, yaitu sub DAS Cisadane Hilir 2, sub DAS Cisadane Tengah 2 dan Sub DAS Cisadane Hulu 8. Sub DAS yang menjadi penyumbang *peak flow* terbesar adalah sub DAS Cianten Hilir 3 dan Sub DAS Cianten Hulu 3. Sedangkan sub DAS sebagai penghasil sedimentasi terbesar berturut-turut adalah sub DAS Ciampea, sub DAS Cihideung dan sub DAS Cinangneng. Evaluasi perencanaan pengelolaan DAS dengan penerapan skenario gabungan, untuk kriteria tata air menunjukkan hasil baik, tetapi untuk kriteria penggunaan lahan masih termasuk kriteria buruk. Model SWAT dapat digunakan untuk mengidentifikasi sub DAS dan unit lahan yang berpotensi menyebabkan masalah pada DAS dan mengevaluasi beberapa alternatif perencanaan pengelolaan DAS. Penggunaan model SWAT dapat menentukan pengelolaan DAS terbaik.

3. Analisis Debit Aliran Sungai Sub DAS Ciliwung Hulu Menggunakan MW-SWAT oleh Mohamad Hamdan (2010).

Kawasan DAS Ciliwung Hulu berfungsi sebagai daerah pelindung dan penyangga wilayah DAS. Oleh sebab itu perubahan tata guna lahan pada DAS Ciliwung Hulu dapat mempengaruhi siklus hidrologi yang terjadi. Kegiatan yang bersifat merubah tipe maupun jenis penggunaan lahan dapat memperbesar dan memperkecil debit sungai. Konservasi lahan dengan memperluas permukaan kedap air menyebabkan berkurangnya infiltrasi, menurunkan pengisian air bawah tanah dan meningkatkan aliran permukaan.

Penelitian ini bertujuan menganalisis debit aliran air sungai di sub DAS Ciliwung Hulu dan membandingkan debit aliran sungai hasil simulasi dengan data hasil observasi. Penelitian ini menggunakan model SWAT dengan bantuan *software* MW-SWAT. Model SWAT diawali dengan melaukan proses deliniasi DAS, pembentukan HRU, pemasukan data iklim, kalibrasi dan validasi. Dari penelitian didapat HRU yang terbentuk oleh model dengan menggunakan *threshold by percentage* (dimana untuk *landuse* menggunakan *threshold* 20%, untuk jenis tanah menggunakan *threshold* 10%, dan kemiringan lereng menggunakan *threshold* 5%) maka terbentuk sebanyak 254 HRU dalam 37 *sub-basin*, dan Katulampa berada pada *sub-basin* 37. Uji validasi model terhadap ketersediaan air bulanan mempunyai nilai efisiensi Nash Sutcliffe (NS) sebesar 0,46 dan koefisien korelasi ( $R^2$ ) sebesar 0,85, dan nilai standar deviasi ( $\alpha$ ) antara debit ukur dan simulasi sebesar 3,57. Grafik hubungan antara debit hasil simulasi dan debit hasil observasi dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut.



**Gambar 2. 2 Grafik Hubungan Debit Hasil Simulasi dan Debit Hasil Observasi**

Sumber : (Mohammad Hamdan, tahun 2010)

Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa SWAT sangat baik untuk memprediksi ketersediaan air bulanan walaupun indeks tersebut sedikit lebih rendah dibandingkan yang dikemukakan oleh Fohrer dan Frede pada tahun 2002 yakni 0,66.

4. Pengembangan Modul Padi Sawah untuk Analisis Hasil Air Menggunakan Program *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT) oleh Eri Stiyanto (2015). Laju pertumbuhan penduduk dan meningkatnya kebutuhan sosial ekonomi membutuhkan lahan dan ruang sehingga dapat menurunkan kualitas dan kuantitas sumberdaya air. Untuk mengkuantifikasi penurunan kualitas dan kuantitas sumberdaya air tersebut diperlukan analisis hidrologi. Oleh karena itu digunakan model SWAT sebagai model hidrologi yang digunakan untuk menganalisis pengaruh manajemen lahan terhadap debit, sedimentasi, dan kualitas air di suatu DAS. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan modul padi sawah pada program SWAT untuk memprediksi ketersediaan air yang sesuai dengan kondisi sawah di Indonesia dengan mengambil kasus di Sub-DAS Cisadane Hulu. Analisis dilakukan dengan proses dealiniasi DAS dengan peta DEM. Proses pembentukan tata guna lahan dan jenis tanah menggunakan format TIFF disesuaikan dengan *data base* MW-SWAT. Data iklim menggunakan *file weather generator* berdasarkan data iklim tahun 2004 dan 2014. Simulasi SWAT swah dilakukan dalam tiga kondisi yakni metode original SCS, modul *pothole*, dan modul sawah. Tiga kondisi ini dilakukan dalam masukan data yang sama. Penelitian ini menunjukkan bahwa modul sawah yang disusun memberikan hasil prediksi debit yang baik, yang ditunjukkan dengan nilai determinasi ( $R^2$ ) dan *Nash-Sutcliffe efficiency* (NS) yang relatif tinggi. Nilai  $R^2$  untuk data harian dan untuk data bulanan pada modul sawah masing-masing 0,59 dan 0,757. Nilai ini lebih baik dibandingkan dengan nilai pada modul original, yaitu sebesar 0,537 untuk harian dan 0,707 untuk bulanan. Demikian juga untuk nilai NS, nilai NS untuk data harian dan untuk data bulanan pada modul sawah masing-masing 0,477 dan 0,613. Nilai ini lebih baik dibandingkan nilai pada modul original, yaitu sebesar 0,427 untuk harian dan 0,563.
5. Analisis Debit Air dan Air Tanah Dangkal Daerah Aliran Sungai (DAS) Prumpung, Kabupaten Tuban oleh Riyan Niagara (2016). Perubahan lahan atau alih fungsi lahan akan memicu konflik sosial dan permasalahan lingkungan khususnya perubahan kawasan tangkapan air dan

dapat menyebabkan perubahan aliran permukaan khususnya ketersediaan air DAS Prumpung, yang merupakan DAS terbesar di wilayah Kabupaten Tuban. Oleh karena itu diperlukan analisis mengenai ketersediaan air DAS Perumpung yang terintegrasi dalam beberapa aspek hidrologi. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi penggunaan lahan DAS Prumpung, mengetahui ketersediaan air daerah aliran Sungai Prumpung terkait hubungannya dengan curah hujan dan debit air dengan SWAT (*Soil and Water Assessment Tools*), memberikan masukan dalam mempengaruhi kebijakan Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Tuban. Analisis debit menggunakan model SWAT dilakukan dalam 3 tahapan, yakni analisis perubahan penggunaan lahan DAS Perumpung, analisis aliran air tanah DAS Perumpung dan Skenario Konservasi DAS Prumpung. Model SWAT telah mengenerasikan 27 HRU (*Hydrological Response Unit*) yang menggambarkan kondisi spasial keseluruhan batas air. Model hidrologi SWAT menggunakan 12 parameter yang teridentifikasi dan memiliki nilai dengan kategori sangat baik *The Nash-Sutcliffe Efisiensi* (NS) 0,77 dan koefisien korelasi 0,79. Berdasarkan hasil observasi hasil penggunaan lahan kondisi eksisting menunjukkan bahwa debit air minimum adalah 0,338 m<sup>3</sup>/s hingga maksimum 5,945 m<sup>3</sup>/s dengan ketersediaan air tanah maksimum sampai 3,070 mm pada Juli-September 2014. Sedangkan kondisi RTRW menunjukkan bahwa debit air minimum adalah 0,151 m<sup>3</sup>/s hingga maksimum 4,842 m<sup>3</sup>/s dengan ketersediaan air tanah maksimum adalah 3,140 mm. Tidak ada perubahan yang signifikan dari debit air dan aliran air tanah berdasarkan kondisi eksisting, kondisi RTRW dan skenario konservasi di DAS Prumpung, Kabupaten Tuban. Sebuah rencana pengelolaan air dalam pemanfaatan curah hujan yang tinggi di musim hujan akan memberikan kontribusi dalam kebutuhan pasokan air/permintaan yang sesuai pada musim kemarau.



### 2.3 Keaslian Penelitian

Perbedaan penelitian pada tugas akhir ini dengan penelitian-penelitian sebelumnya yaitu penelitian ini menganalisis debit sungai dengan menggunakan model SWAT dan DAS yang ditinjau adalah DAS Progo dengan *outlet* terletak di Bendung Sapon. Penelitian debit sungai pada DAS Progo dengan outlet di Bendung Sapon menggunakan model SWAT belum pernah dilakukan, sehingga penelitian ini dapat dipertanggungjawabkan keasliannya. Perbedaan penelitian yang akan dilakukan dengan penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

**Tabel 2. 2 Perbedaan dengan Penelitian Terdahulun**

Variabel Tinjau	Penelitian Terdahulu					Penelitian Yang Kini Dilakukan
<b>Peneliti</b>	Ibrahim Rau (2010)	Edy Junaidi (2011)	Mohammad Hamdan (2010)	Eri Styanto (2015)	Riyan Niagara (2016)	Rafizal Afif (2019)
<b>Judul</b>	Analisis Debit Sungai dengan Menggunakan Model SWAT di DAS Cipasauran, Banten oleh Maulana Ibrahim Rau	Penggunaan Model Hidrologi SWAT (Soil and Water Assessment Tool) dalam Pengelolaan DAS Cisadane	Analisis Debit Aliran Sungai Sub DAS Ciliwung Hulu Menggunakan MW-SWAT. Oleh Mohamad Hamdan	Pengembangan Modul Padi Sawah untuk Analisis Hasil Air Menggunakan Program <i>Soil and Water Assessment Tools</i> (SWAT)	Analisis Debit Air dan Air Tanah Dangkal Daerah Aliran Sungai (DAS) Prumpung, Kabupaten Tuban. Oleh Riyan Niagara	Simulasi debit sungai Progo di outlet Bendung Sapon dengan menggunakan model SWAT

**Lanjutan Tabel 2.2 Perbedaan dengan Penelitian Terdahulu**

<b>Variabel Tinjau</b>	<b>Penelitian Terdahulu</b>					<b>Penelitian Yang Kini Dilakukan</b>
<b>Tujuan Penelitian</b>	Memberikan informasi mengenai hubungan antara ketersediaan air baku dengan debit sungai	Mengidentifikasi sub DAS dan penggunaan lahan yang menyebabkan permasalahan di DAS Cisadane, serta mengevaluasi implementasi perencanaan pengelolaan DAS Cisadane	Menganalisis debit aliran air sungai di sub DAS Ciliwung Hulu dan membandingkan debit aliran sungai hasil simulasi dengan data hasil observasi.	Mengembangkan modul padi sawah pada program Soil and Water Assessment Tools (SWAT) dan untuk memprediksi ketersediaan air yang sesuai dengan kondisi sawah di Indonesia dengan mengambil kasus di Sub-DAS Cisadane Hulu	Mengidentifikasi penggunaan lahan DAS Prumpung, mengetahui ketersediaan air daerah aliran Sungai Prumpung terkait hubungannya dengan curah hujan dan debit air dengan SWAT (Soil and Water Assessment Tools), memberikan masukan dalam mempengaruhi kebijakan Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Tuban	Mengetahui hubungan debit simulasi dengan debit observasi dan mengetahui performa model SWAT dalam memodelkan debit Sungai Progo.

Lanjutan Tabel 2.2 Perbedaan dengan Penelitian Terdahulu

Variabel Tinjau	Penelitian Terdahulu					Penelitian Yang Kini Dilakukan
<p><b>Metode Penelitian</b></p>	<p>Pada penelitian ini analisis SWAT dilakukan dengan MWSWAT 1.7, pada simulasi ini dilakukan 4 proses, diantaranya adalah proses delineasi DAS, pembentukan <i>hydrological response unit</i> (HRU), pengelolaan data dan simulasi SWAT, dan proses visualisasi</p>	<p>Pada penelitian ini permodelan SWAT dilakukan menggunakan program MW-SWAT. Penggunaan model SWAT pada penelitian ini disesuaikan dengan fase pengelolaan DAS yaitu fase identifikasi masalah, fase perencanaan, fase implementasi, dan fase evaluasi</p>	<p>Penelitian ini menggunakan model SWAT dengan bantuan <i>software</i> MW-SWAT. Model SWAT diawali dengan melakuan proses deliniasi DAS, pembentukan HRU, pemasukan data iklim, kalibrasi dan validasi. Dari penelitian didapat HRU yang terbentuk oleh model dengan menggunakan <i>threshold by percentage</i> (dimana untuk <i>landuse</i> menggunakan <i>threshold</i> 20%, untuk jenis tanah menggunakan <i>threshold</i> 10%, dan kemiringan lereng menggunakan <i>threshold</i> 5%).</p>	<p>Simulasi SWAT swah dilakukan dalam tiga kondisi yakni metode original SCS, modul <i>pothole</i>, dan modul sawah. Tiga kondisi ini dilakukan dalam masukan data yang sama</p>	<p>Analisis debit menggunakan model SWAT dilakukan dalam 3 tahapan, yakni analisis perubahan penggunaan lahan DAS Perumpung, analisis aliran air tanah DAS Perumpung dan Skenario Konservasi DAS Prumpung</p>	<p>Pada penelitian ini analisis SWAT dilakukan dengan Program ArcSWAT tahun 2012.</p>

Lanjutan Tabel 2.2 Perbedaan dengan Penelitian Terdahulu

Variabel Tinjau	Penelitian Terdahulu					Penelitian Yang Kini Dilakukan
Lokasi	DAS Cipasauran	DAS Cisadane	DAS Ciliwung Hulu	Sub-DAS Cisadane Hulu	DAS Perumpung	DAS Progo
<b>Hasil</b>	Hasil kalibrasi harian dan bulanan menunjukkan bahwa 84% dan 83% data observasi berpotongan dengan luasan grafik 95PPU, dengan nilai p-factor harian dan bulanan sebesar 0,84 dan 0,83. Dengan demikian model hasil kalibrasi dikatakan valid, meskipun R2 dan nilai NS yang didapat kurang baik. Dengan menggunakan model SWAT yang telah divalidasi, diperoleh nilai debit harian DAS Cipasauran yang berkisar dari 0-3,309 m3/detik, sedangkan nilai debit bulanan DAS Cipasauran berkisar dari 0,648-3,266 m3/detik	Evaluasi perencanaan pengelolaan DAS dengan penerapan skenario gabungan, untuk kriteria tata air menunjukkan hasil baik, tetapi untuk kriteria penggunaan lahan masih termasuk kriteria buruk. Model SWAT dapat digunakan untuk mengidentifikasi sub DAS dan unit lahan yang berpotensi menyebabkan masalah pada DAS dan mengevaluasi beberapa alternatif perencanaan pengelolaan DAS. Penggunaan model SWAT dapat menentukan pengelolaan DAS terbaik	Terbentuk sebanyak 254 HRU dalam 37 sub-basin, dan Katulampa berada pada sub-basin 37. Uji validasi model terhadap ketersediaan air bulanan mempunyai nilai efisiensi Nash Sutcliffe (NS) sebesar 0,46 dan koefisien korelasi (R2) sebesar 0,85, dan nilai standar deviasi ( $\alpha$ ) antara debit ukur dan simulasi sebesar 3,57	Nilai R2 untuk data harian dan untuk data bulanan pada modul sawah 0,59 dan 0,757. Nilai ini lebih baik dibandingkan dengan nilai pada modul original, yaitu sebesar 0,537 untuk harian dan 0,707 untuk bulanan. Demikian juga untuk nilai NS, nilai NS untuk data harian dan untuk data bulanan pada modul sawah 0,477 dan 0,613. Nilai ini lebih baik dibandingkan nilai pada modul original, yaitu sebesar 0,427 untuk harian dan 0,563	The Nash-Sutcliffe Efisiensi (NS) 0,77 dan koefisien korelasi 0,79. Debit air minimum adalah 0,338 m3/s hingga maksimum 5,945 m3/s dengan ketersediaan air tanah maksimum sampai 3,070 mm pada Juli-September 2014. Sedangkan kondisi RTRW menunjukkan bahwa debit air minimum adalah 0,151 m3/s hingga maksimum 4,842 m3/s dengan ketersediaan air tanah maksimum adalah 3,140 mm.	Dimana hasil validasi mulai tahun 2013 hingga 2015 pada debit hariannya memiliki nilai R <sup>2</sup> secara berturut-turut adalah 0,82;0,83;0,95 dan untuk nilai NS secara berturut-turut adalah 0,34;0,26;0,32. Hasil validasi debit 15 hariannya memiliki nilai R <sup>2</sup> secara berturut-turut adalah 0,88;0,96;0,99 dan untuk nilai NS secara berturut-turut adalah 0,61;0,55;0,52. Hasil validasi debit bulannya memiliki nilai R <sup>2</sup> secara berturut-turut adalah 0,89;0,95;0,99 dan untuk nilai NS secara berturut-turut adalah 0,55;0,65;0,39.

## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1 Hidrologi**

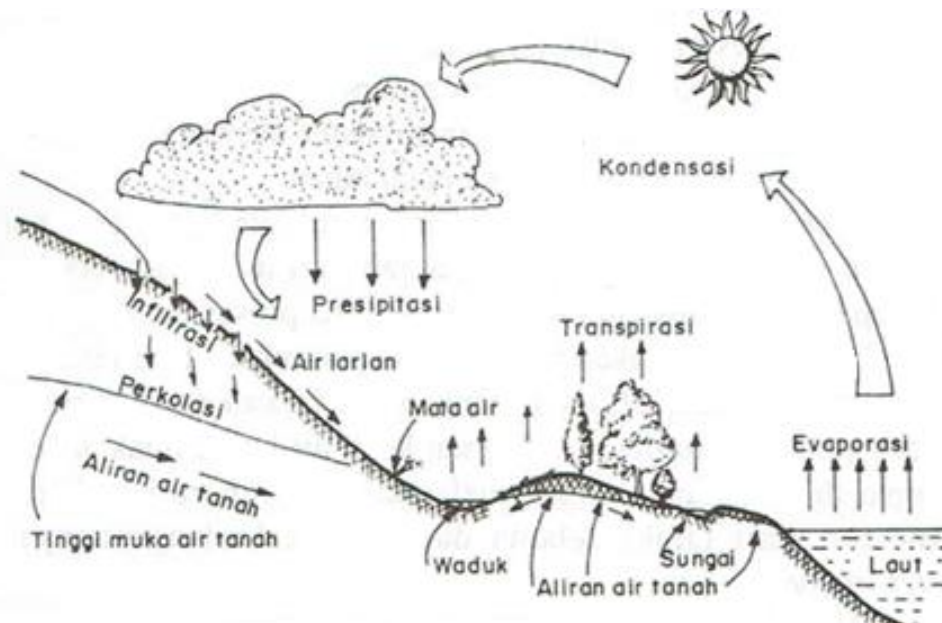
Menurut Asdak (2002) air adalah sebuah sumber yang secara alami mengikuti siklus hidrologi, yang pada dasarnya merupakan proses yang berkesinambungan dengan tanpa awal dan akhir yang dapat digambarkan sebagai sebuah sistem. Siklus hidrologi adalah sirkulasi air yang tidak pernah berhenti dan di dalamnya terdapat proses-proses hidrologi yang berjalan terus menerus dan kontinyu. Air yang berada di lautan, sungai, danau, dan permukaan bumi, mengalami penguapan yang disebabkan oleh panas matahari. Proses penguapan ini disebut dengan evaporasi. Evaporasi mengubah air dari bentuk cair menjadi air dalam wujud gas sehingga memungkinkan air untuk menguap ke permukaan bumi.

Menurut Asdak (2002) penguapan air bukan hanya terjadi pada air yang berada di lautan, sungai, danau, dan permukaan bumi, tetapi juga bisa berlangsung di jaringan makhluk hidup, seperti hewan dan tumbuhan. Penguapan seperti ini disebut dengan transpirasi. Sama halnya dengan evaporasi, pada proses transpirasi air juga berubah wujud dari cair menjadi gas yang terjadi dalam jaringan makhluk hidup dan akan naik menuju atmosfer. Akan tetapi jumlah air yang mengalami transpirasi tidak sebesar jumlah air yang mengalami evaporasi. Penguapan yang terjadi melalui kedua proses ini dapat juga disebut dengan evapotranspirasi. Evapotranspirasi adalah penguapan air keseluruhan yang terjadi akibat proses evaporasi dan proses transpirasi.

Asdak (2002) mengatakan air yang mengalami proses evapotranspirasi akan naik ke atmosfer kemudian mengalami proses perubahan wujud kembali menjadi partikel-partikel es, perubahan wujud ini terjadi akibat penurunan suhu yang sangat rendah pada ketinggian tertentu. Proses perubahan wujud air ini disebut dengan kondensasi. Kemudian air akan mengalami presipitasi dan akan jatuh sebagai hujan.

Dalam perjalanannya menuju bumi sebagian dari hujan akan mengalami proses evaporasi kembali dan kembali menguap ke atmosfer.

Asdak (2002) mengatakan ketika air hujan mencapai permukaan bumi, sebagian akan tertahan oleh tumbuh-tumbuhan dan sebagian lagi akan jatuh langsung ke permukaan tanah. Air tertahan pada permukaan daun menetes lolos sampai ke permukaan yang tidak kedap (*trough fall*) atau mengalir ke bawah melalui batang daun yang akhirnya sampai ke permukaan tanah (*stem flow*). Sebagian air yang tertahan pada tumbuhan akan menguap kembali ke atmosfer. Air yang mencapai permukaan tanah sebagian masuk ke dalam tanah melalui permukaan (*infiltration*), mengalir sebagai aliran bawah permukaan (*subsurface flow*), dan mengalir menjadi aliran permukaan (*surface runoff*). Sebagian air yang sampai dan mengalir di permukaan bumi akan kembali ke atmosfer melalui evaporasi. Gambar siklus hidrologi dapat dilihat pada Gambar 3.1.



**Gambar 3. 1 Siklus Hidrologi**

(Sumber : Chay Asdak, 2002)

### 3.1.1 Curah Hujan

Menurut Triatmojo (2008) hujan adalah turunnya air dari atmosfer ke permukaan bumi yang bentuk dan jumlahnya dipengaruhi oleh faktor klimatologi

seperti angin, temperatur dan tekanan atmosfer. Jumlah air hujan yang jatuh di permukaan bumi dapat diukur dengan menggunakan alat penakar hujan. Distribusi hujan dalam ruang dapat diketahui dengan mengukur hujan di beberapa lokasi pada daerah yang ditinjau, sedangkan distribusi waktu dapat diketahui dengan mengukur hujan sepanjang waktu.

Hujan berasal dari proses presipitasi atau turunnya air dari atmosfer ke permukaan bumi. Hujan berasal dari uap air di atmosfer sehingga bentuk dan jumlahnya dipengaruhi oleh faktor klimatologi yang ada. Hujan diawali dengan proses pembentukan uap air. Uap air tersebut naik ke atmosfer sehingga mendingin dan terjadi kondensasi menjadi butir-butir air dan kristal-kristal es yang akhirnya jatuh dan disebut sebagai hujan. Hujan merupakan sumber dari semua air yang mengalir di permukaan bumi, baik yang mengalir di atas permukaan maupun yang mengalir di bawah permukaan bumi (Triatmojo, 2008).

Hujan merupakan faktor terpenting dalam analisis hidrologi. Intensitas hujan yang tinggi pada suatu kawasan dapat mengakibatkan terjadinya genangan yang diakibatkan kurangnya kemampuan suatu daerah dalam mengalirkan air. Sebaliknya tidak ada hujan untuk jangka waktu lama dapat berakibat mengecilnya aliran sungai dan turunnya air waduk dan danau (Triatmojo, 2008).

Analisis data hujan dilakukan untuk mendapatkan besaran curah hujan dengan data hujan yang diperoleh dari beberapa stasiun pengukuran pada waktu yang sama. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menganalisis data curah hujan adalah metode *Thiessen* (Triatmojo, 2008).

### 3.1.2 *Weather Generator* (WGEN)

*Weather Generator Data* (WGEN) adalah suatu data yang berisikan data-data statistik yang diperlukan untuk menghasilkan data iklim harian yang representatif dan dapat menggambarkan kondisi sebenarnya dari suatu DAS yang akan disimulasikan. Untuk membuat WGEN diperlukan data klimatologi. Data klimatologi yang dibutuhkan adalah data temperatur maksimum dan minimum, kelembapan relatif, radiasi matahari, curah hujan dan kecepatan angin (Neitsch dkk. 2009). Data-data klimatologi ini disiapkan dalam format data yang dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut.

**Tabel 3. 1 Format Weather Geneator Data (WGEN)**

<b>Nama Variable</b>	<b>Definisi</b>
TITLE	Nama stasiun iklim yang digunakan
WLATITUDE	Koordinat lintang stasiun iklim
WLONGITUDE	Koordinat bujur stasiun iklim
WLEV	Elevasi stasiun iklim (m)
RAIN_YRS	Jumlah tahun data klimatologi yang digunakan
TMPMX	Rata-rata temperatur maksimum harian dalam satu bulan pencatatan (C°)
TMPMN	Rata-rata temperatur minimum harian dalam satu bulan pencatatan (C°)
TMPSTMTDMX	Standar deviasi temperatur maksimum harian dalam satu bulan pencatatan (C°)
TMPSTMTDMN	Standar deviasi temperatur minimum harian dalam satu bulan pencatatan (C°)
PCPMM	Curah hujan rata-rata harian dalam satu bulan pencatatan (mm)
PCPPSTD	Standar deviasi curah hujan harian dalam satu bulan pencatatan (mm)
PCPSKW	Koefisien Skew curah hujan harian dalam satu bulan pencatatan (mm)
PR-W1	Kemungkinan hari basah setelah hari kering dalam satu bulan pencatatan
PR-W2	Kemungkinan hari basah setelah hari basah dalam satu bulan pencatatan
PCPD	Rata-rata jumlah hari hujan dalam satu bulan pencatatan
SOLARAV	Rata-rata radiasimatahari harian dalam satu bulan pencatatan (MJ/m <sup>2</sup> /hari)
DEWPT	Rata-rata kelembapan harian dalam satu bulan pencatatan
WNDVAV	Rata-rata kecepatan angin harian dalam satu bulan pencatatan (m/s)

Sumber : SWAT *Theoretical Documentation*, (2009)

1. Temperatur maksimum (TMPMX)

Perhitungan tempertur maksimum rata-rata dalam satu bulan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$TMPMX = \frac{\sum_{d=1}^N Tmx}{N} \quad (3.1)$$

Dengan :

TMPMX = Rata-rata temperatur maksimum harian dalam satu bulan pencatatan (C°)



$T_{mx}$  = Temperatur maksimum harian dalam satu bulan pencatatan  
(C°)

$N$  = Jumlah hari pencatatan data

## 2. Temperatur minimum (TMPMN)

Perhitungan temperatur minimum rata-rata dalam satu bulan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$TMPMN = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mn}}{N} \quad (3.2)$$

Dengan :

TMPMN = Rata-rata temperatur minimum harian dalam satu bulan pencatatan (C°)

$T_{mn}$  = Temperatur minimum harian dalam satu bulan pencatatan (C°)

$N$  = Jumlah hari pencatatan data

## 3. Standar deviasi temperatur maksimum (TMPSTMTDMX)

Perhitungan standart deviasi temperatur maksimum dalam satu bulan dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$TMPSTMTDMX = \sqrt{\frac{\sum_{d=1}^N (T_{mx} - TMPMX)^2}{N-1}} \quad (3.3)$$

Dengan :

TMPSTMTDMX = Standart deviasi temperatur maksimum harian dalam satu bulan pencatatan

TMPMX = Rata-rata temperatur maksimum harian dalam satu bulan pencatatan (C°)

$T_{mx}$  = Temperatur maksimum harian dalam satu bulan pencatatan (C°)

$N$  = Jumlah hari pencatatan data

## 4. Standar deviasi temperatur minimum (TMPSTMTDMN)

Perhitungan standart deviasi temperatur minimum dalam satu bulan dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$TMPSTMTDMN = \sqrt{\frac{\sum_{d=1}^N (T_{mn} - TMPMN)^2}{N-1}} \quad (3.4)$$

Dengan :

TMPSTMTDMN = Standart deviasi temperatur minimum

TMPMN = Rata-rata temperatur minimum harian dalam satu bulan pencatatan (C°)

Tmn = Temperatur minimum harian dalam satu bulan pencatatan (C°)

N = Jumlah hari pencatatan data

#### 5. Curah Hujan Rata-rata (PCPMM)

Perhitungan curah hujan rata-rata dalam satu bulan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$PCPMM = \frac{\sum_{d=1}^N Pcp}{N} \quad (3.5)$$

Dengan :

PCPMM = Rata-rata curah hujan harian dalam satu bulan pencatatan (mm)

Tmx = Curah hujan harian dalam satu bulan pencatatan (mm)

N = Jumlah hari pencatatan data

#### 6. Standar deviasi Curah Hujan Harian (PCPSTD)

Standart deviasi curah hujan harian dalam satu bulan dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$PCPSTD = \sqrt{\frac{\sum_{d=1}^N (Pcp - PCPMM)^2}{N-1}} \quad (3.6)$$

Dengan :

PCPSTD = Standart deviasi curah hujan harian dalam satu bulan pencatatan

PCPMM = Rata-rata curah hujan harian dalam satu bulan pencatatan (mm)

Pcp = Curah hujan harian dalam satu bulan pencatatan (mm)

N = Jumlah hari pencatatan data

#### 7. Koefisien Skew Curah Hujan Harian (PCPSKW)

Koefisien skew curah hujan harian dalam satu bulan pencatatan dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$PCPSKW = \frac{\sum_{d=1}^N (Pcp - PCPMM)^3}{(N-1)(N-2)(PCPSTD)^3} \quad (3.7)$$

Dengan :

PCPSKW = Koefisien skew curah hujan harian dalam satu bulan pencatatan

PCPSTD = Standart deviasi curah hujan harian dalam satu bulan pencatatan

PCPMM = Rata-rata curah hujan harian dalam satu bulan pencatatan (mm)

Pcp = Curah hujan harian dalam satu bulan pencatatan (mm)

N = Jumlah hari pencatatan data

#### 8. Kemungkinan hari basah setelah hari kering (PR-W1)

Kemungkinan hari basah setelah hari kering dalam satu bulan pencatatan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$PR - W1 = \frac{\text{hari}_{wet}}{\text{hari}_{dry}} \quad (3.8)$$

Dengan :

PR-W1 = Kemungkinan hari basah setelah hari kering dalam satu bulan pencatatan

$\text{hari}_{wet}$  = Jumlah hari basah yang diikuti hari kering

$\text{hari}_{dry}$  = jumlah hari kering selama periode pencatatan

#### 9. Kemungkinan hari basah setelah hari basah (PR-W2)

Kemungkinan hari basah setelah hari basah dalam satu bulan pencatatan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$PR - W2 = \frac{\text{hari}_{wet}}{\text{hari}_{wet}} \quad (3.9)$$

Dengan :

PR-W1 = Kemungkinan hari basah setelah hari basah dalam satu bulan pencatatan

$\text{hari}_{wet}$  = Jumlah hari basah yang diikuti hari basah

$\text{hari}_{wet}$  = jumlah hari basah selama periode pencatatan

10. Rata-rata jumlah hari hujan (PCPD)

Rata-rata jumlah hari hujan dalam satu bulan pencatatan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$PCPD = \frac{\text{hari}_{\text{basah}}}{\text{tahun}} \quad (3.10)$$

Dengan :

PCPD = Rata-rata jumlah hari hujan

$\text{hari}_{\text{basah}}$  = Jumlah hari basah dalam satu bulan pencatatan

$Tahun$  = Jumlah tahun pencatatan data

11. Rata-rata radiasi matahari (SOLARAV)

Rata-rata radiasi matahari harian dalam satu bulan pencatatan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$SOLARAV = \frac{\sum_{d=1}^N \text{Solar}}{N} \quad (3.11)$$

Dengan :

SOLARAV = Rata-rata radiasi matahari harian dalam satu bulan pencatatan  
(MJ/m<sup>2</sup>/hari)

Solar = Radiasi matahari relatif harian dalam satu bulan pencatatan  
(MJ/m<sup>2</sup>/hari)

N = Jumlah hari pencatatan data

12. Rata-rata kelembaban relatif (DEWPT)

Rata-rata kelembaban relatif harian dalam satu bulan pencatatan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$DEWPT = \frac{\sum_{d=1}^N Rh}{N} \quad (3.12)$$

Dengan :

DEWPT = Rata-rata kelembaban relatif harian dalam satu bulan pencatatan

Rh = Kelembaban relatif harian dalam satu bulan pencatatan

N = Jumlah hari pencatatan data

13. Rata-rata kecepatan angin (WINDAV)

Rata-rata kecepatan angin harian dalam satu bulan pencatatan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$W\text{NDAV} = \frac{\sum_{d=1}^N \text{Wind}}{N} \quad (3.13)$$

Dengan :

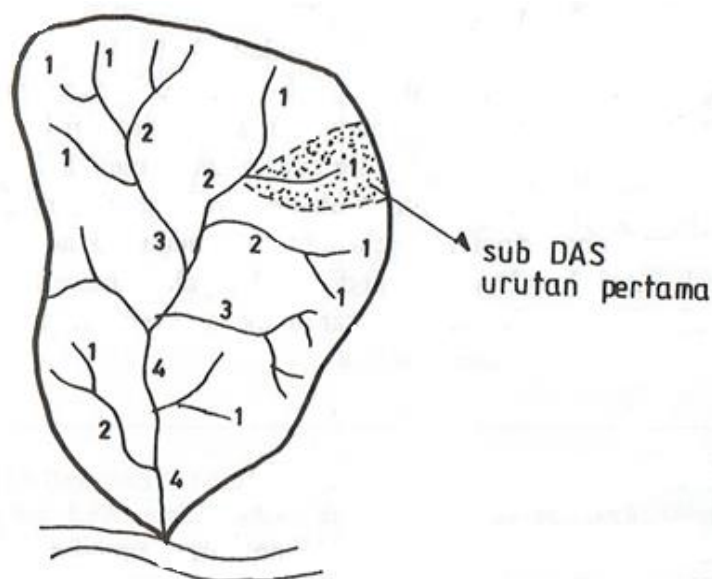
W\text{NDAV} = Rata-rata kecepatan angin harian dalam satu bulan pencatatan (m/s)

Wind = Kecepatan harian dalam satu bulan pencatatan (m/s)

N = Jumlah hari pencatatan data

### 3.2 Daerah Aliran Sungai (DAS)

Menurut Triatmojo (2008) Daerah aliran sungai adalah daerah yang dibatasi oleh punggung-punggung gunung/pegunungan dimana air yang jatuh di daerah tersebut akan mengalir menuju sungai utama pada suatu titik/stasiun yang ditinjau. Batas alami DAS merupakan hasil dari proses geomorfologi dan hidrologi. Daerah aliran sungai menerima, menampung, dan mengalirkan air hujan yang diterima menuju laut, sungai atau danau. Gambar wilayah daerah aliran sungai dapat dilihat pada Gambar 3.2.



**Gambar 3. 2 Skema Daerah Aliran Sungai**

(Sumber : Chay Asdak, 2002)

Menurut Asdak (2002) daerah aliran sungai dapat terdiri dari beberapa sub DAS atau sub-sub DAS, hal ini menyebabkan luasan suatu DAS dapat bervariasi sesuai dengan banyaknya sub-sub DAS. Setiap DAS memiliki karakteristik yang

berbeda-beda sesuai dengan kondisi ekosistem yang hidup pada DAS tersebut. Karakteristik DAS inilah yang nanti dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan dan pengelolaan DAS.

Menurut Suripin (2004) karakteristik DAS akan berpengaruh terhadap besarnya aliran permukaan. Karakteristik DAS tersebut adalah luas, bentuk DAS, topografi, dan tata guna lahan. Semakin luas suatu DAS maka semakin besar pula aliran permukaannya. Bentuk DAS juga berpengaruh terhadap besarnya aliran permukaan. Semakin sempit suatu DAS maka semakin besar aliran permukaan yang mengalir, hal ini dikarenakan pada DAS dengan lebar yang besar aliran membutuhkan waktu yang lama untuk terkonsentrasi pada suatu titik. Topografi akan berpengaruh terhadap kemiringan lahan, volume aliran permukaan akan lebih besar pada DAS yang memiliki kemiringan yang curam dan saluran yang sempit bila dibandingkan dengan DAS yang memiliki kemiringan yang landai dan saluran yang lebar. Tata guna lahan dinyatakan dalam koefisien aliran permukaan yaitu perbandingan antara aliran permukaan dengan besar curah hujan, angka aliran permukaan berkisar antara 0-1.

### **3.3 Penggunaan Lahan**

Menurut Asdak (2002) dalam pemenuhan kebutuhan manusia terhadap lahan akan mempengaruhi sumber daya air yang tersedia. Penggunaan lahan merupakan campur tangan manusia terhadap kondisi lahan, baik secara menetap maupun berkala untuk memenuhi kebutuhan hidup baik material maupun spiritual. Penggunaan lahan dapat digolongkan atas dua golongan besar, yaitu penggunaan lahan pertanian dan non pertanian. Penggunaan lahan pertanian dibedakan secara garis besar ke dalam macam penggunaan lahan berdasarkan penyediaan air, contohnya adalah sawah, tegalan, kebun, ladang, dan hutan. Penggunaan lahan non pertanian dapat dibedakan menjadi penggunaan permukiman dan industri, contohnya adalah perkotaan, pedesaan, industri, jalan raya, rekreasi, dan sebagainya.

Meningkatnya jumlah penduduk disertai oleh kebutuhan akan peningkatan penyediaan kebutuhan pangan dan kebutuhan lainnya sehingga menyebabkan terjadinya berbagai kemungkinan penggunaan lahan. Perubahan penggunaan lahan

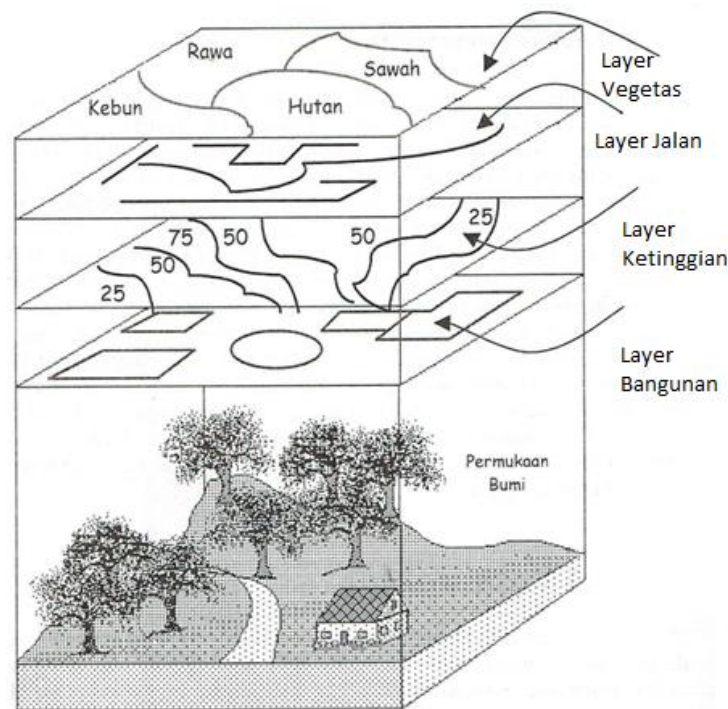
akan memberikan dampak secara tidak langsung ke dalam aliran permukaan dan debit sungai. Rasio antara debit maksimum dan minimum suatu sungai digunakan sebagai indikator apakah suatu DAS mengalami kerusakan atau tidak. Apabila fluktuasi debit maksimum dan minimum tinggi, berarti pada musim hujan akan terjadi hujan dengan intensitas yang tinggi sehingga menyebabkan meningkatnya aliran permukaan dan pada musim kemarau hujan turun dengan intensitas yang rendah. Dengan demikian dapat diartikan bahwa DAS mengalami kerusakan fungsi hidrologi, sehingga dapat dikatakan bahwa fungsi DAS telah terganggu serta terjadinya degradasi kualitas DAS (Asdak, 2002).

### **3.4 Geographic Information System (GIS)**

Menurut Prahasta (2001) *geographic information system* (GIS) atau sistem informasi geografis (SIG) adalah suatu sistem informasi berbasis komputer yang memberikan informasi terkait keruangan. Sistem informasi geografis (SIG) merupakan suatu sistem yang dirancang untuk mengumpulkan, menyimpan, menganalisis, dan menampilkan data yang berhubungan dengan geografis. Pada pelaksanaannya GIS digunakan untuk melakukan pengolahan peta digital yang memiliki sistem koordinat sendiri.

Sistem informasi geografis (SIG) memiliki dua model data yang berbeda, yaitu data vektor dan data raster. Model data vektor adalah data yang menampilkan, menempatkan, dan menyimpan data spasial dengan menggunakan titik-titik, garis-garis, kurva, atau poligon beserta atribut-atributnya yang bisa digunakan untuk menampilkan informasi pada peta. Titik bisa digunakan untuk menunjukkan rute suatu perjalanan atau menggambarkan *boundary*. Poligon bisa digunakan untuk menggambarkan sebuah danau atau sebuah negara pada peta dunia. Bentuk-bentuk dasar representasi data spasial ini didefinisikan oleh sistem koordinat kartesian dua dimensi (x,y). Di dalam model data spasial vektor, garis-garis atau kurva (busur atau *arcs*) merupakan sekumpulan titik-titik terurut yang dihubungkan. Sedangkan luasan atau poligon juga disimpan sebagai sekumpulan titik-titik, tetapi dengan catatan bahwa titik awal dan titik akhir poligon memiliki nilai koordinat yang sama (poligon tertutup sempurna) (Prahasta, 2001).

Data vektor tentu memiliki kelebihan dan kekurangan dalam memproyeksikan suatu data. Salah satu kelebihan data vektor adalah lebih akurat dalam menampilkan data dan terdapat relasi data dalam bentuk *database*. Sedangkan kekurangan data vektor adalah sulit untuk dilakukan *overlay* antar sesama data, serta algoritma datanya yang cukup kompleks (Prahasta, 2001). Gambar permukaan bumi pada data vektor dapat dilihat pada Gambar 3.3.



**Gambar 3. 3 Permukaan Bumi dan Layer Pada Data Vektor**  
(Sumber : Eddy Prahasta, 2001)

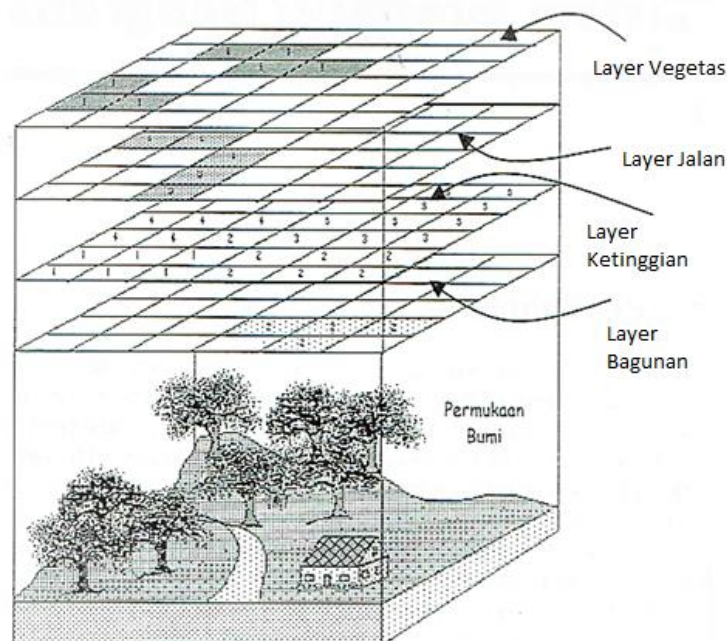
Model data raster menampilkan, menempatkan, dan menyimpan data spasial dengan menggunakan struktur matriks atau piksel-piksel yang membentuk grid. Setiap piksel atau sel ini memiliki atribut tersendiri, termasuk koordinatnya yang unik. Akurasi pada model data ini sangat bergantung pada resolusi atau ukuran pikselnya. Contoh model data raster adalah data hasil citra satelit maupun *digital elevation model* (DEM) (Prahasta, 2001).

Model data raster memberikan informasi spasial apa yang terjadi dimana saja dalam bentuk gambaran yang digeneralisir. Dengan model ini dunia nyata disajikan dengan elemen matriks atau sel-sel grid yang homogen. Pada model data



raster, matriks atau *array* diurutkan menurut koordinat kolom (x) dan barisnya (y) (Prahasta, 2001).

Dalam memproyeksikan suatu data model data raster tentu memiliki kekurangan dan kelebihan. Salah satu kelebihan dari data vektor adalah mudah dalam proses *overlay*. Sedangkan kekurangan model data raster adalah perlu dilakukan transformasi koordinat saat melakukan *overlay* (Prahasta, 2001). Gambar permukaan bumi pada model data raster dapat dilihat pada Gambar 3.4.



**Gambar 3. 4 Permukaan Bumi dan Layer Pada Data Raster**  
(Sumber : Eddy Prahasta, 2001)

#### 3.4.1 *Digital Elevation Model (DEM)*

*Digital elevation model (DEM)* merupakan bentuk penyajian ketinggian permukaan bumi secara digital. *Digital elevation model* dilihat dari distribusi titik yang mewakili bentuk permukaan bumi, dapat dibedakan dalam bentuk teratur, semi teratur, dan acak. Sedangkan dilihat dari teknik pengumpulan datanya dapat dibedakan dalam pengukuran secara langsung pada objek (terestris), pengukuran pada model objek (fotogrametris), dan dari sumber data peta analog (digitasi) (Prahasta, 2001).

*Digital elevation model (DEM)* didefinisikan sebagai pemodelan permukaan bumi ke dalam suatu model digital permukaan tanah tiga dimensi dari titik-titik

yang mewakili permukaan tanah yang terbentuk dari titik-titik yang memiliki nilai koordinat 3D (X, Y, Z). Permukaan tanah dimodelkan dengan memecah area menjadi bidang-bidang yang terhubung satu sama lain, dimana bidang-bidang tersebut terbentuk oleh titik-titik pembentuk DEM. Titik-titik tersebut dapat berupa titik *sample* permukaan tanah atau titik hasil *interpolasi* atau *ekstrapolasi* titik-titik *sample*. Titik-titik *sample* merupakan titik-titik yang didapat dari hasil *sampling* permukaan bumi, yaitu pekerjaan pengukuran atau pengambilan data ketinggian pada titik-titik yang dianggap dapat mewakili relief permukaan tanah. Data *sampling* titik-titik tersebut kemudian diolah hingga didapat koordinat titik-titik *sample* (Prahasta, 2001).

Kualitas suatu DEM dapat dilihat pada akurasi dan presisi dari titik-titik *sampling* tersebut. Akurasi adalah nilai ketinggian titik (Z) yang diberikan oleh DEM, berbanding dengan nilai sebenarnya yang dianggap benar. Sedangkan presisi bergantung pada jumlah dan sebaran titik-titik *sample* dan ketelitian titik *sample* sebagai masukan bagi pembentukan DEM dan juga metode interpolasi untuk mendapatkan ketinggian titik-titik pembentukan DEM. Titik-titik *sample* yang dipilih untuk digunakan harus dapat mewakili bentuk wilayah secara keseluruhan sesuai dengan kebutuhan aplikasi penggunaannya (Prahasta, 2001).

Salah satu metode untuk mendapatkan informasi DEM adalah dengan citra radar. Salah satu satelit yang membawa sensor radar adalah satelit ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*). Satelit ALOS adalah suatu satelit pengindraan jauh Jepang yang diutamakan untuk pengamatan daratan dengan menggunakan teknologi terdepan. Satelit ALOS diprogramkan untuk meneruskan dan meningkatkan fungsi satelit JERS-1 (*Japanese Earth Resource Satellite-1*) dan satelit ADEOS (*Advanced Earth Observing Satellite*). Satelit ALOS dilengkapi dengan tiga buah sensor pengindraan jarak jauh, terdiri dari dua buah sensor optik yaitu sensor PRISM (*Panchromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping*) dan sensor AVNIR-2 (*Advance Visible and Near Infrared Radiometer type-2*), serta sebuah sensor gelombang mikro atau radar yaitu PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*) (JAXA, 2018).

Misi utama satelit ALOS adalah untuk memberikan kontribusi terhadap aplikasi kartografi, pengamatan regional, pemantauan bencana alam, dan dalam rangka meningkatkan teknologi pengembangan pengamatan daratan. Salah satu sensor gelombang yang dimiliki oleh satelit ALOS adalah PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*). Sensor PALSAR merupakan sensor gelombang mikro aktif pada *L-band* (frekuensi-pusat 1270 MHz 23.6 cm) yang dikembangkan oleh JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*) yang bekerja sama dengan JAROS (*Japan Resource Observation Systems Organization*). Sensor PALSAR mempunyai kemampuan *off-nadir* dengan variable antara 10-51 derajat (sudut datang 8-60 derajat) yang menggunakan teknik *phased array* aktif dengan 80 modul-modul untuk mentransmisikan penerimaan (JAXA, 2018). Karakteristik PALSAR dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut.

**Tabel 3. 2 Karakteristik PALSAR**

Mode	Baik		Scan SAR	Polarimetrik (Mode eksperimental) * 1
Frekuensi Pusat	1270 MHz (L-band)			
Chirp Bandwidth	28MHz	14MHz	14MHz, 28MHz	14MHz
Polarisasi	HH atau VV	HH + HV atau VV + VH	HH atau VV	HH + HV + VH + VV
Sudut pandang kejadian	8 sampai 60deg.	8 sampai 60deg.	18 sampai 43deg.	8 sampai 30deg.
Resolusi Rentang	7 sampai 44m	14 sampai 88 m	100m	24 sampai 89m
			(tampilan multi)	
Pengamatan Swath	40 sampai 70km	40 sampai 70km	250 sampai 350km	20 sampai 65km
Panjang Bit	5 bit	5 bit	5 bit	3 atau 5bits
Data rate	240Mbps	240Mbps	120Mbps, 240Mbps	240Mbps

Lanjutan Tabel 3.2 Karakteristik PALSAR

Mode	Baik	Scan SAR	Polarimetrik (Mode eksperimental) * 1
NE sigma nol * 2	<-23dB (Lebar Swath 70km)	<-25dB	<-29dB
	<-25dB (Lebar Swath 60km)		
S / A * 2, * 3	> 16dB (Lebar Swath 70km)	> 21dB	> 19dB
	> 21dB (Lebar Swath 60km)		
Akurasi radiometrik	adegan: 1dB / orbit: 1,5 Db		

Sumber : Japan Aerospace Exploration Agency (2018)

#### 3.4.2 Citra Landsat

Landsat merupakan satelit sumberdaya bumi yang pada awalnya bernama ERTS-1 (*Earth Resoure Technology Satellite*) yang diluncurkan pertama kalinya tanggal 23 Juni 1972 yang mengorbit hingga 6 Januari 1978. Landsat 1, Landsat 2 dan Landsat 3 mempunyai dua sensor yaitu RBV (*Return Beam Vidicon*) dan MSS (*Multi Spectral Scanner*) sedangkan Landsat 4 dan Landsat 5 merupakan pengembangan sensor pada Landsat sebelumnya. Landsat 4 dan Landsat 5 membawa empat saluran MSS dan sensor TM (*Thematic Mapper*) 7 saluran. Pada tahun 1998 Amerika Serikat telah meluncurkan Landsat 7 yang membawa sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper plus*) yang terdiri atas delapan kanal yang dapat bermanfaat untuk mendeteksi objek-objek tertentu (NASA, 2018). Aplikasi kanal-kanal landsat MSS dan ETM dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Terdapat banyak aplikasi dari data Landsat ETM antara lain pemetaan penutupan lahan, pemetaan tanah, pemetaan geologi, pemetaan suhu, permukaan laut dan lain-lain. Untuk pemetaan penutupan lahan data Landsat ETM lebih dipilih, hal ini dikarenakan Landsat ETM memiliki band inframerah menengah. Data

Landsat merupakan salah satu yang paling banyak dipakai dalam pemetaan pada umumnya karena mempunyai cakupan yang sangat luas 180 km x 180 km dengan resolusi spasial 30 m (NASA, 2018).

**Tabel 3. 3 Aplikasi Kanal-kanal Landsat MSS dan ETM**

<b>Kanal</b>	<b>Panjang Gelombang LS-MSS (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Panjang Gelombang LS-ETM (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Aplikasi</b>
1		0,45-0,52	Pemetaan perairan pantai, membedakan tanah dan vegetasi, tanaman berdaun jarum dan berdaun gugur, membedakan tipe tanah.
2	0,5-0,6	0,52-0,60	Mendeteksi vegetasi sehat, mengestimasi konsentrasi sedimen air dan pemetaan air keruh
3	0,6-0,7	0,63-0,69	Membedakan spesies tanaman
4	0,7-0,8	0,76-0,90	Menentukan biomass, membedakan tutubuh air
5	0,8-1,1	1,55-1,75	Menentukan kelembaban vegetasi, membedakan salju dan awan
6		10,4-12,5	Pemetaan suhu
7		2,08-2,35	Pemetaan hidrothermal, eksplorasi mineral
8		0,50-0,90	Studi perkotaan

Sumber : NASA (2018)

### 3.4.3 Klasifikasi Multispektral

Menurut Sitanggang (2007) klasifikasi multispektral adalah algoritma yang dirancang untuk menyajikan informasi tematik dengan cara mengelompokkan fenomena berdasarkan satu kriteria yaitu nilai spektral. Klasifikasi multispektral diawali dengan menentukan nilai piksel tiap objek sebagai *sample*. Selanjutnya nilai

piksel dari tiap *sample* tersebut digunakan sebagai masukan dalam proses klasifikasi. Metode klasifikasi terbagi menjadi 2 yaitu metode klasifikasi terbimbing (*supervised*) dan metode klasifikasi tak terbimbing (*unsupervised*).

#### 1. Metode Klasifikasi Terbimbing (*Supervised*)

Pada metode *supervised* ini, analis terlebih dulu menetapkan beberapa *training area* (daerah contoh) pada citra sebagai kelas lahan tertentu. Penetapan ini berdasarkan pengetahuan analis terhadap wilayah dalam citra mengenai daerah-daerah tutupan lahan. Nilai-nilai piksel dalam daerah contoh kemudian digunakan oleh komputer sebagai kunci untuk mengenali piksel lain. Daerah yang memiliki nilai-nilai piksel sejenis akan dimasukkan ke dalam kelas lahan yang telah ditetapkan sebelumnya. Jadi dalam metode *supervised* ini analis mengidentifikasi kelas informasi terlebih dulu yang kemudian digunakan untuk menentukan kelas spektral yang mewakili kelas informasi tersebut (Sitanggang, 2007).

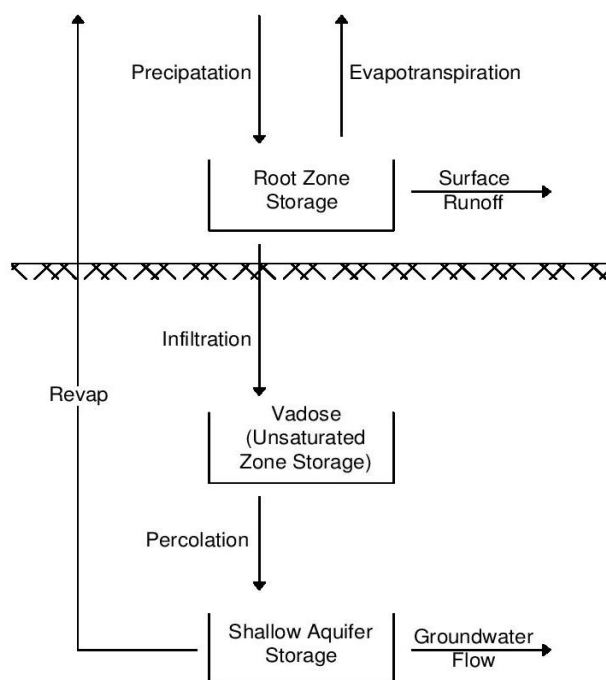
#### 2. Metode Klasifikasi Tak Terbimbing (*Unsupervised*)

Pada metode *unsupervised* ini merupakan kebalikkan dari metode *supervised*, dimana nilai-nilai piksel dikelompokkan terlebih dahulu oleh komputer ke dalam kelas-kelas spektral menggunakan algoritma klusterisasi. Dalam metode ini, analis akan menentukan jumlah kelas (*cluster*) yang akan dibuat. Kemudian setelah mendapatkan hasil, analis menetapkan kelas-kelas lahan terhadap kelas-kelas spektral yang telah dikelompokkan oleh komputer. Dari kelas-kelas (*cluster*) yang dihasilkan, analis bisa menggabungkan beberapa kelas yang dianggap memiliki informasi yang sama menjadi satu kelas. Misal *class 1*, *class 2* dan *class 3* masing-masing adalah sawah, perkebunan dan hutan maka analis bisa mengelompokkan kelas-kelas tersebut menjadi satu kelas, yaitu kelas vegetasi. Jadi pada metode *unsupervised* tidak sepenuhnya tanpa campur tangan manusia (Sitanggang, 2007).

### 3.5 Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

*Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) adalah model hidrologi yang dikembangkan oleh Dr. Jeff Arnold pada awal tahun 1990-an untuk *Agricultural Research Service* (ARS) dari USDA. *Soil Water Assessment Tool* (SWAT) dikembangkan untuk memprediksi pengaruh dari manajemen lahan pertanian terhadap ketersediaan air, sedimentasi, dan bahan kimia pada suatu DAS yang

kompleks dengan mempertimbangkan variasi jenis tanah, tata guna lahan, dan manajemen kondisi DAS dalam waktu yang lama (Neitsch dkk, 2009). Skema model SWAT dapat dilihat pada Gambar 3.5 berikut.



**Gambar 3. 5 Skema Model SWAT Program Arc-SWAT**

Model SWAT merupakan hasil gabungan dari beberapa model yang dikembangkan oleh ARS, seperti *Simulator for Water Resource in Rural Basin* (SWWRRB), *Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System* (CREAMS), *Groundwater Loading Effects on Agricultural Management System* (GREAMS), dan *Erosion Productivity Impact Calculator* (EPIC) (Neitsch dkk, 2009).

### 3.5.1 Neraca Air

Dalam memecahkan setiap permasalahan hidrologi, model SWAT menggunakan neraca air sebagai dasar permodelan. Permodelan hidrologi pada DAS dalam model SWAT terbagi menjadi dua bagian. Bagian pertama adalah fase lahan dalam siklus hidrologi, fase lahan mengatur jumlah air, sedimen, unsur hara dan pestisida dalam pengisian saluran utama ke setiap subbasin. Bagian kedua adalah fase air atau fase penelusuran siklus hidrologi yang dapat didefinisikan sebagai

pergerakan air, sedimentasi, dan lainnya melalui jaringan saluran DAS ke outlet (Neitsch dkk, 2009). Representasi fase tanah pada siklus hidrologi yang digunakan pada model SWAT dapat dilihat pada Gambar 3.6

Persamaan neraca air yang berlaku pada model SWAT adalah sebagai berikut.

$$SW_t = SW_o + \sum_{t=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (3.14)$$

Dengan :

$SW_t$  = Kandungan akhir air tanah (mm)

$SW_o$  = Kandungan air tanah awal pada hari ke-i (mm)

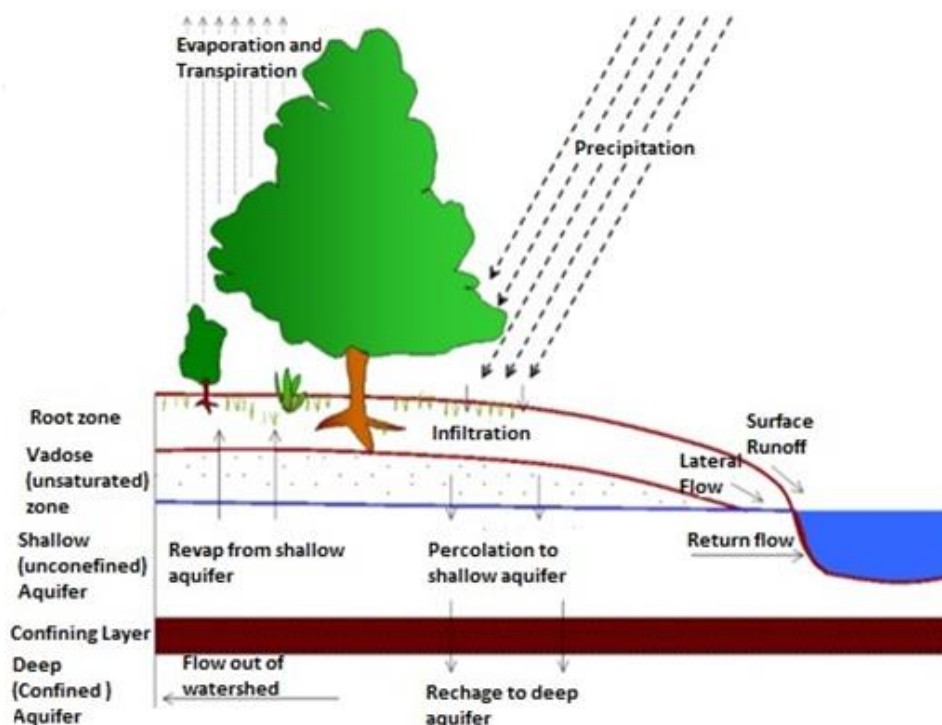
$R_{day}$  = Jumlah presipitasi pada hari ke-i (mm)

$Q_{surf}$  = Jumlah *surface runoff* pada hari ke-i (mm)

$E_a$  = Jumlah evapotranspirasi pada hari ke-i (mm)

$W_{seep}$  = Jumlah air yang memasuki *vadose zone* pada profil tanah hari ke-i (mm)

$Q_{gw}$  = Jumlah air yang kembali pada hari ke-i (mm)



**Gambar 3. 6 Representasi Fase Lahan Pada Siklus Hidrologi Dalam Model SWAT**

(Sumber : SWAT *Theoretical Documentation*, 2009)



### 3.5.2 Runoff

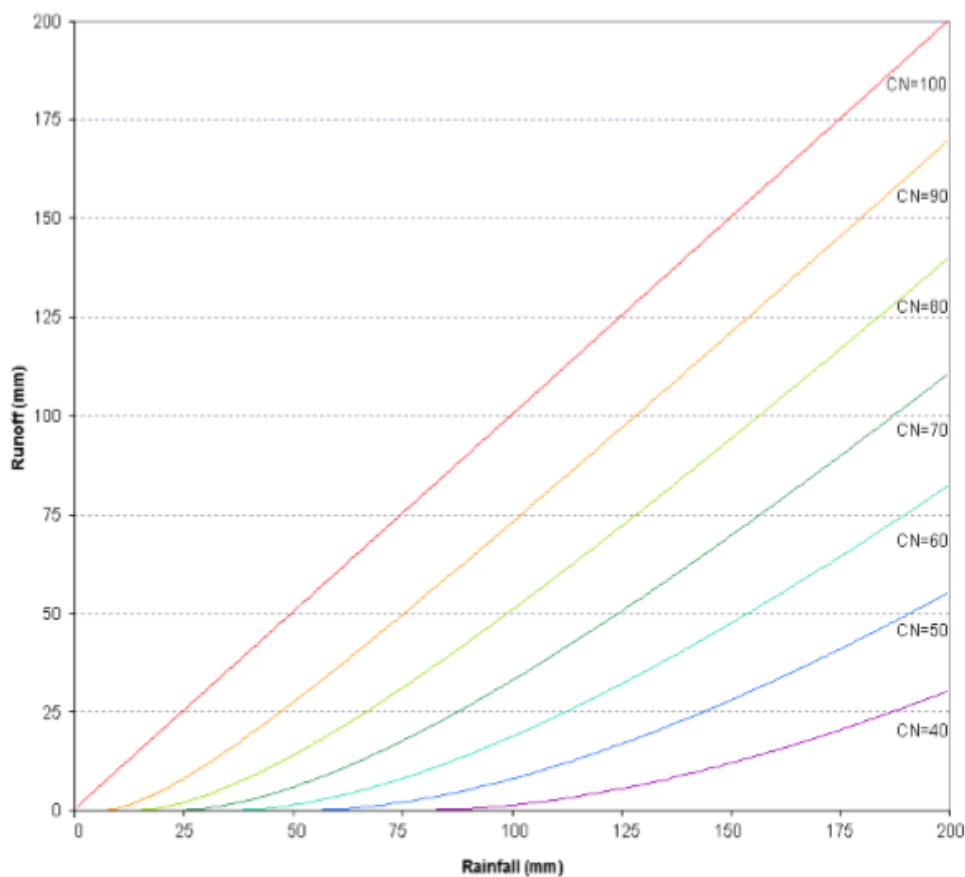
Dalam mengestimasi aliran permukaan ( $Q_{surf}$ ), SWAT menggunakan metode SCS *curve number* (CN). Berdasarkan volume aliran permukaan dan puncaknya, dilakukan simulasi pada setiap HRU (*Hydrology Response Units*). Nilai SCS *curve number* merupakan fungsi dari permeabilitas tanah, tata guna lahan, dan kondisi air tanah (Neitsch dkk, 2009). Hubungan antara *runoff* terhadap curah hujan dapat dilihat pada Gambar 3.7. Persamaan *soil conservation service curve number* adalah sebagai berikut.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad (3.15)$$

Dengan:

$R_{day}$  = Curah hujan per hari (mm)

S = Retention parameter (mm)



**Gambar 3. 7 Grafik Hubungan *Runoff* Terhadap Curah Hujan**  
(Sumber : SWAT *Theoretical Documentation*, 2009)

Parameter retensi ( $S$ ) bervariasi tergantung pada perubahan lahan, tata guna lahan, pengelolaan lahan, dan kemiringan lahan. Parameter retensi didefinisikan sebagai berikut.

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3.16)$$

Dengan:

$S$  = Parameter retensi (mm)

$CN$  = *Soil conservation service curve number*

Tabel nilai  $CN$  berdasarkan *Soil Conservation Service* (SCS) dapat dilihat pada tabel 3.4 berikut.

**Tabel 3. 4 Nilai CN Berdasarkan *Soil Conservation Service* (SCS)**

Tataguna Lahan	Keadaan Hidrologi	Kelompok Tanah			
		A	B	C	D
Padang Rumput terus menerus untuk tempat penggembalaan ternak	Buruk	68	79	86	89
	Cukup	49	69	79	84
	Baik	39	61	74	80
Padang Rumput terlindung dari ternak, untuk dipanen	-	30	58	71	78
Semak-semak rerumputan dengan tumbuhan semak-semaknya yang dominan	Buruk	48	67	77	83
	Cukup	35	56	70	79
	Baik	30	48	65	77
Tanaman kayu kombinasi rumput dan perkebunan	Buruk	57	73	82	86
	Cukup	43	65	76	79
	Baik	32	58	72	77
Tegakan hutan tidak rapat	Buruk	45	66	77	83
	Cukup	36	60	73	79
	Baik	30	55	70	77
Tanah pertanian	-	59	74	82	86

Sumber : SWAT *Theoretical Documentation* (2009)

### 3.5.3 Evapotranspirasi

Banyak metode yang telah dikembangkan untuk memperkirakan besarnya evapotranspirasi. Tiga dari banyak metode tersebut telah digunakan dalam SWAT, yaitu metode Penman-Monteith, metode Priestley-Taylor dan metode Hargreaves (Neitsch dkk, 2009).

Ketiga metode ini memiliki variasi yang berbeda dalam input data yang dibutuhkan. Metode Penman-Monteith membutuhkan data radiasi matahari, suhu udara, kelembaban relatif dan kecepatan angin. Metode Priestley-Taylor membutuhkan data radiasi matahari, suhu udara, dan kelembaban relatif. Sedangkan metode Hargreaves membutuhkan data suhu udara saja (Neitsch dkk, 2009).

Persamaan Penman-Monteith menggabungkan komponen yang memperhitungkan energi yang dibutuhkan untuk mempertahankan evaporasi, mekanisme kekuatan yang dibutuhkan untuk memindahkan uap air dan kondisi aerodinamis dan resistansi permukaan (Neitsch dkk, 2009). Persamaan Penman-Monteith adalah sebagai berikut.

$$\lambda E_t = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^o - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)} \quad (3.17)$$

Dengan:

$\lambda$  = Fluks panas laten penguapan ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )

$E$  = Evaporasi ( $\text{mm d}^{-1}$ )

$\Delta$  = Slope dari kurva tekanan uap jenuh dan suhu udara ( $de/dT$ ) ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$H_{net}$  = Radiasi netto ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )

$G$  = Fluks panas laten permukaan tanah ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )

$\rho_{air}$  = Massa jenis udara ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$c_p$  = Kalor spesifik pada tekanan tetap ( $\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$e_z^o$  = Tekanan uap air jenuh pada ketinggian  $z$  (kPa)

$e_z$  = Tekanan uap air pada ketinggian  $z$  (kPa)

$\gamma$  = Konstanta psikometrik ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$r_c$  = Resistensi pada kanopi ( $\text{s m}^{-1}$ )

$r_a$  = Tahanan difusi pada lapisan udara (resistensi aerodinamis) ( $\text{s m}^{-1}$ )

Priestley dan Taylor mengembangkan persamaan kombinasi yang disederhanakan untuk digunakan pada area permukaan yang basah. Persamaan untuk metode Priestley-Taylor adalah sebagai berikut.

$$\lambda E_o = \alpha_{pet} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (H_{net} - G) \quad (3.18)$$

Dengan:

$\lambda$  = Panas laten yang menguap (MJ kg<sup>-1</sup>)

$E_o$  = Potensi evapotranspirasi (mm d<sup>-1</sup>)

$\alpha_{pet}$  = 1.28 (koefisien)

$\Delta$  = Slope dari kurva tekanan uap jenuh dan suhu udara ( $de/dT$ ) (kPa °C<sup>-1</sup>)

$\gamma$  = Konstanta psikometrik (kPa °C<sup>-1</sup>)

$H_{net}$  = Radiasi netto (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)

$G$  = Fluks panas laten permukaan tanah (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)

Metode Hargreaves dikembangkan dan diperbaiki oleh Hargreaves dan Samani pada tahun 1982 serta 1985 dan yang digunakan pada SWAT diterbitkan pada tahun 1985. Persamaan Hargreaves adalah sebagai berikut.

$$\lambda E_o = 0,0023 \cdot H_o \cdot (T_{mx} - T_{mn})^{0,5} \cdot (\overline{T_{av}} + 17,8) \quad (3.19)$$

Dengan:

$\lambda$  = Panas laten yang menguap (MJ kg<sup>-1</sup>)

$E_o$  = Potensi evapotranspirasi (mm d<sup>-1</sup>)

$H_o$  = Radiasi luar bumi (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)

$T_{mx}$  = Suhu udara maximum untuk hari tertentu (°C)

$T_{mn}$  = Suhu udara minimum untuk hari tertentu (°C)

$\overline{T_{av}}$  = Suhu udara maximum untuk hari tertentu (°C)

#### 3.5.4 Perkolasi

Perkolasi dihitung untuk setiap lapisan tanah yang ada di profil. Air akan meresap jika kadar air melebihi kapasitas lapangan untuk lapisan tersebut sehingga lapisan di bawahnya tidak dalam kondisi jenuh (Neitsch dkk, 2009). Volume air yang tersedia untuk perlokasi ke dalam lapisan tanah dihitung dengan persamaan berikut.

$$SW_{ly.excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad \text{jika, } SW_{ly} \geq FC_{ly} \quad (3.20)$$

$$SW_{ly.excess} = 0 \quad \text{jika, } SW_{ly} \leq FC_{ly} \quad (3.21)$$

Dengan:

$SW_{ly.excess}$  = Volume air yang dapat dialirkan di lapisan tanah pada hari tertentu  
(mm H<sub>2</sub>O)

$SW_{ly}$  = Kadar air dari lapisan tanah pada hari tertentu (mm H<sub>2</sub>O)

$FC_{ly}$  = Kadar air dari lapisan tanah pada kapasitas lapang (mm H<sub>2</sub>O)

Jumlah air bergerak dari satu lapisan ke lapisan dibawahnya dihitung dengan menggunakan metode *storage routing*. Persamaan yang digunakan untuk menghitung jumlah air yang merembes ke lapisan berikutnya adalah sebagai berikut.

$$W_{perc.ly} = SW_{ly.excess} (1 - \exp[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}]) \quad (3.22)$$

Dengan:

$W_{perc.ly}$  = Jumlah air meresap ke lapisan tanah dibawahnya pada hari tertentu  
(mm H<sub>2</sub>O)

$SW_{ly.excess}$  = Volume air yang dapat dialirkan di lapisan tanah pada hari tertentu  
(mm H<sub>2</sub>O)

$\Delta t$  = Panjang dari selang waktu (jam)

$TT_{perc}$  = Waktu perjalanan untuk perlokasi (jam)

### 3.5.5 Ground Water

Akuifer dangkal memberikan kontribusi aliran dasar ke saluran utama untuk mencapai subbasin. Aliran dasar (*base flow*) yang akan masuk sebagai debit jika jumlah air yang disimpan dalam akuifer dangkal melebihi nilai ambang batas yang ditentukan (Neitsch dkk, 2009). Persamaan respon aliran air tanah pada kontribusi *steady* untuk mengisi debit adalah sebagai berikut.

$$Q_{gw} = \frac{8000K_{sat}}{L_{gw}} h_{wtbl} \quad (3.23)$$

Dengan:

$Q_{gw}$  = Aliran air tanah (*base flow*) (mm H<sub>2</sub>O)

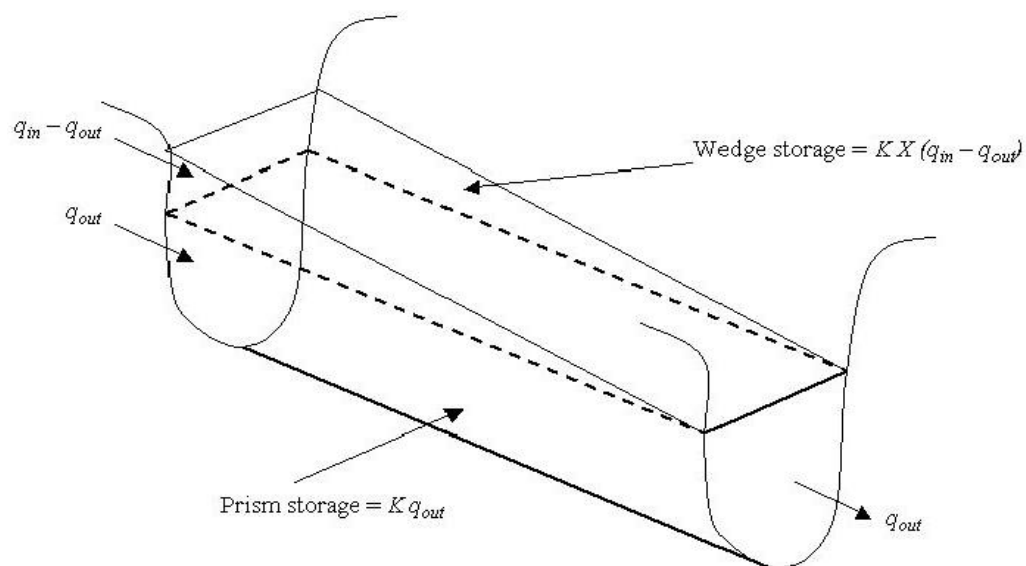
$K_{sat}$  = Konduktivitas hidrolik dari akuifer (mm/hari)

$L_{gw}$  = Jarak dari punggung bukit atau subbasin sistem air tanah ke saluran utama  
(m)

$h_{wtbl}$  = Tinggi muka air tanah (m)

### 3.5.6 Fase Routing

Model SWAT menggunakan persamaan Manning untuk menentukan laju dan kecepatan aliran. Air dialirkan melalui jaringan saluran menggunakan metode routing. Metode routing yang digunakan pada model SWAT salah satunya adalah metode routing Muskingum. Metode ini memodelkan volume tampungan banjir di alur sungai, yang merupakan tampungan prisma dan tampungan baji. Pada saat banjir datang, aliran masuk lebih besar dari aliran keluar sehingga terbentuk tampungan baji. Sebaliknya pada waktu resesi aliran keluar lebih besar dari aliran masuk sehingga tampungan prisma terbentuk (Neitsch dkk, 2009). Tampungan prisma dan tampungan baji dapat dilihat pada Gambar 3.8 berikut.



**Gambar 3. 8 Tampungan Prisma dan Tampungan Baji**

(Sumber : SWAT *Theoretical Documentation*, 2009)

Luas penampang aliran diasumsikan berbanding lurus dengan debit untuk segmen jangkauan tertentu. Dengan menggunakan asumsi ini, volume penyimpanan perisma dapat dinyatakan sebagai fungsi debit,  $K \cdot q_{out}$ , dimana K adalah koefisien tampungan terhadap debit dan memiliki dimensi waktu. Volume penyimpanan baji dapat dinyatakan  $K \cdot X \cdot (q_{in} - q_{out})$ , dimana X adalah faktor

pembobot yang bervariasi antara 0-0,5. Tampungan total adalah jumlah dari tampungan prisma dan tampungan baji (Neitsch dkk, 2009). Sehingga persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut.

$$V_{storage} = K \cdot q_{out} + K \cdot X \cdot (q_{in} - q_{out}) \quad (3.24)$$

Dengan :

$V_{storage}$  = Volume Tampungan ( $m^3$  H<sub>2</sub>O)

$K$  = Koefisien Tampungan, perkiraan waktu perjalanan air ke sungai (s)

$q_{out}$  = Aliran keluar ( $m^3/s$ )

$q_{in}$  = Aliran masuk ( $m^3/s$ )

$X$  = Faktor pembobot, yang bervariasi antara 0 dan 0,5

### 3.6 Parameter Statistik

Menurut Junaidi (2011) parameter statistik yang digunakan untuk memverifikasi hasil analisis debit adalah koefisien korelasi Pearson ( $R^2$ ) dan model efisiensi Nash-Sutcliffe (NS). Verifikasi data hasil analisis debit bertujuan agar *output* model yang dihasilkan hasilnya mendekati dengan *output* dari DAS prototipe yang diuji.

Penggunaan model pada suatu DAS harus melalui proses verifikasi terlebih dahulu hal ini disebabkan masing-masing DAS mempunyai karakteristik yang berbeda. Model dianggap valid apabila model tersebut dapat mendekati keadaan sebenarnya yang dapat diukur dengan standard deviasi rendah dan efisiensi model tinggi (Junaidi, 2011). Persamaan korelasi Pearson ( $R^2$ ) dan model efisiensi Nash-Sutcliffe (NS) dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$R^2 = \left( \frac{\sum_i (Q_{m,i} - Q_{m.avr})(Q_{s,i} - Q_{s.avr})}{[\sum_i (Q_{m,i} - Q_{m.avr})^2 \sum_i (Q_{s,i} - Q_{s.avr})^2]^{0.5}} \right)^2 \quad (3.24)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)^2}{\sum_i (Q_{m,i} - Q_{m.avr})^2} \quad (3.25)$$

Dengan :

$R^2$  = Koefisien korelasi

NS = Model efisiensi Nash-Sutcliffe

$Q_m$  = Debit aliran sungai observasi ( $m^3/detik$ )

$Q_{m.avr}$  = Rata-rata debit aliran sungai observasi ( $m^3/detik$ )

$Q_s$  = Debit aliran sungai model ( $m^3/detik$ )

$Q_{s,avr}$  = Rata-rata debit aliran sungai model ( $m^3/detik$ )

Junaidi (2011) mengatakan nilai  $R^2$  berkisar antara 0 sampai dengan 1, nilai  $R^2$  mendekati 1 menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang erat antara data simulasi dengan data observasi. Model efisiensi Nash-Sutcliffe (NS) merupakan suatu model statistik yang menunjukkan besar pengaruh dari hubungan data simulasi dan data observasi. Nilai NS berkisar antara 0 dan 1, yang mana nilai NS mendekati 1 menunjukkan bahwa performa dari model yang digunakan sangat baik. Kriteria nilai statistik NS dapat dilihat pada Tabel 3.5 Berikut.

**Tabel 3. 5 Kriteria nilai Nash-Sutcliffe (NS)**

<b>Kriteria</b>	<b>NS</b>
Sangat Baik	$0,75 < NS < 1,00$
Memuaskan	$0,36 < NS < 0,75$
Kurang Memuaskan	$NS < 0,36$

Sumber : Junaidi (2011)



## **BAB IV METODE PENELITIAN**

### **4.1 Lokasi Penelitian**

Objek penelitian ini adalah DAS Progo dengan *outlet* di Bendung Sapon, yang secara administratif terletak di Provinsi Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta. Luas DAS Progo  $\pm 2.462 \text{ km}^2$ , dengan panjang sungai utamanya  $\pm 138 \text{ km}$ . DAS Progo melewati enam (6) kabupaten di Provinsi Jawa Tengah dan empat (4) kabupaten di Daerah Istimewa Yogyakarta. Gambar DAS Progo dapat dilihat pada Gambar 1.1 di atas.

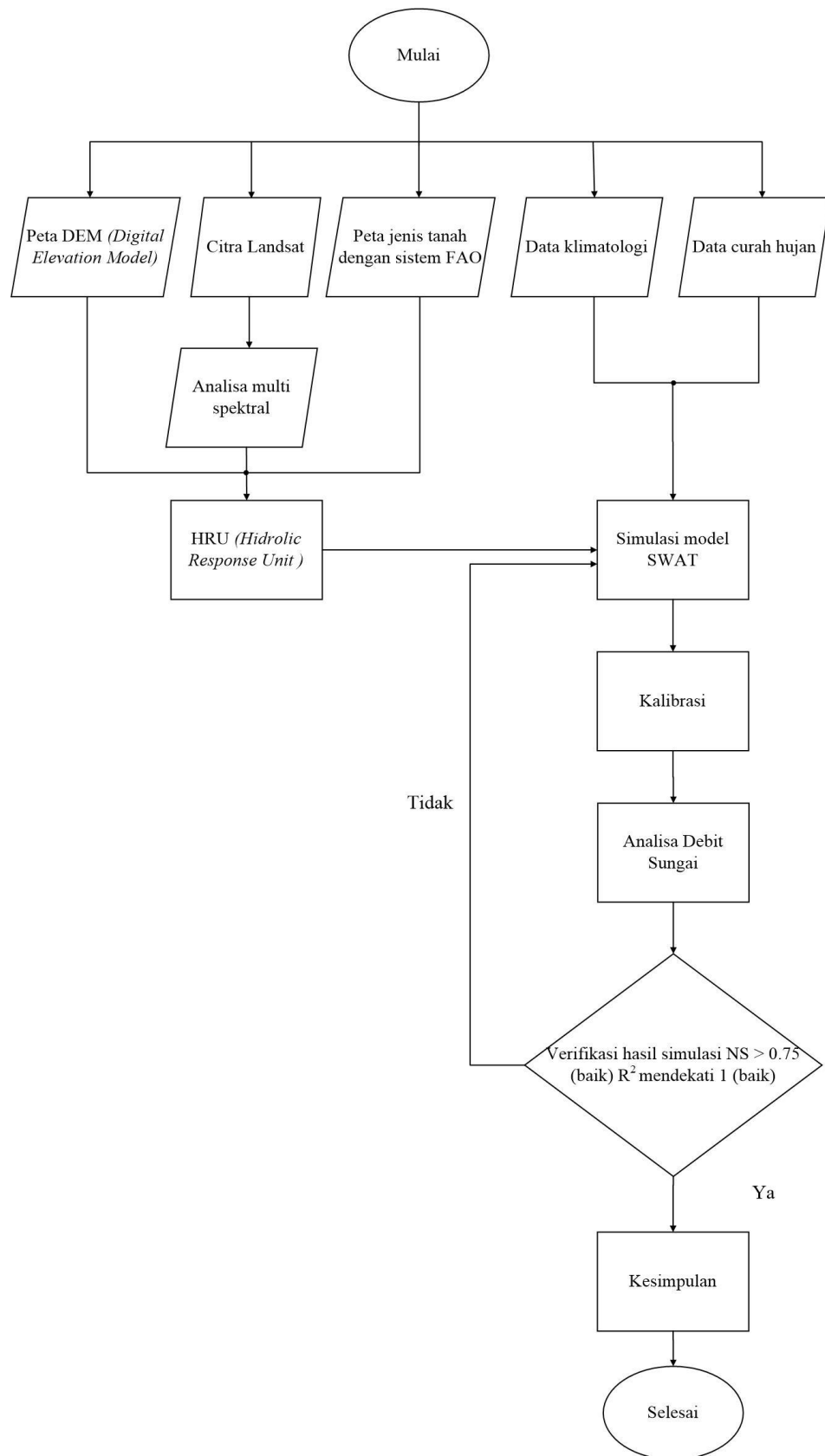
### **4.2 Data Penelitian**

Untuk melakukan suatu permodelan maka dibutuhkan beberapa data yang sesuai dengan kondisi lapangan. Data-data tersebut adalah sebagai berikut.

1. Data klimatologi di DAS Progo menggunakan stasiun klimatologi Tegal pada tahun 2013-2015.
2. Data curah hujan di DAS Progo menggunakan 13 stasiun curah hujan dan 1 stasiun klimatologi yakni stasiun curah hujan Badran, stasiun curah hujan Brosot, stasiun curah hujan Caturanom, stasiun curah hujan Gembongan, curah hujan Godean, curah hujan Kalibawang, curah hujan Kalijoho, curah hujan Kenteng, curah hujan Mendut, stasiun curah hujan Pajangan, curah hujan Sanden, curah hujan Sapon, curah hujan Seyengan dan stasiun klimatologi Tegal. Data curah hujan digunakan pada tahun 2013-2015.
3. Data pengukuran debit Sungai Progo di stasiun duga air Bendung Sapon pada tahun 2013-2015.
4. Peta topografi DAS Progo dengan menggunakan DEM (*Digital Elevation Model*) ALOS PALSAR yang diterbitkan oleh ASF.
5. Peta tata guna lahan dengan menggunakan citra Landsat yang diterbitkan oleh USGS.
6. Peta jenis tanah dengan sistem FAO (*Food Agriculture Organization of United Nations*)

### **4.3 Tahapan Penelitian**

Tahapan penelitian ini dilakukan sesuai dengan bagan alir berikut



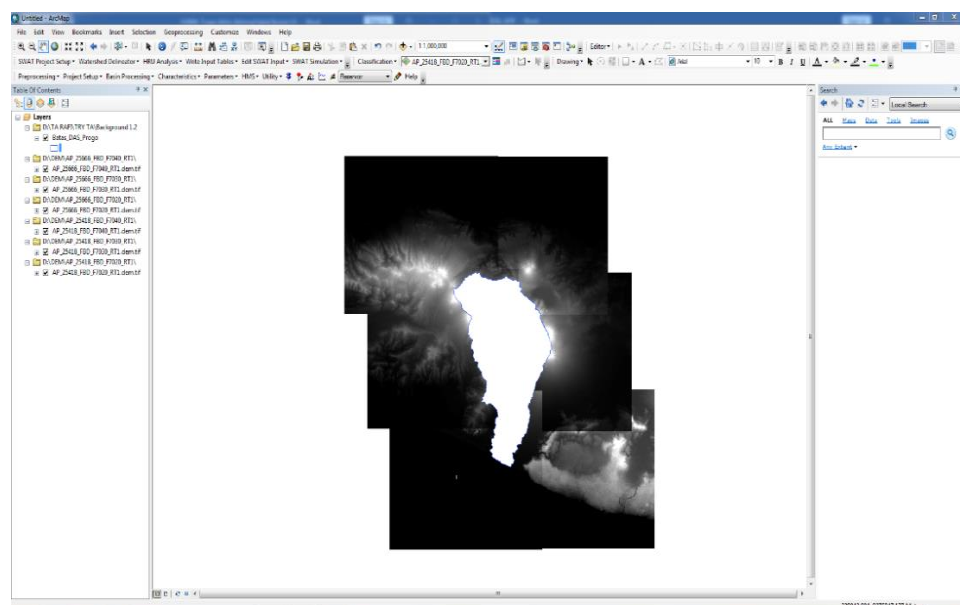
**Gambar 4. 1 Bagan Alir Tugas Akhir**

#### 4.3.1 Pengolahan Data Spasial Daerah Aliran Sungai Progo

Langkah awal untuk memulai simulasi adalah dengan mempersiapkan semua data yang dibutuhkan dalam simulasi. Salah satu data yang dibutuhkan dalam melakukan simulasi adalah data spasial. Data spasial yang dibutuhkan dalam simulasi terbagi menjadi tiga yaitu peta DEM, peta tata guna lahan, dan peta jenis tanah. Data spasial yang dibutuhkan dalam analisis ini adalah sebagai berikut.

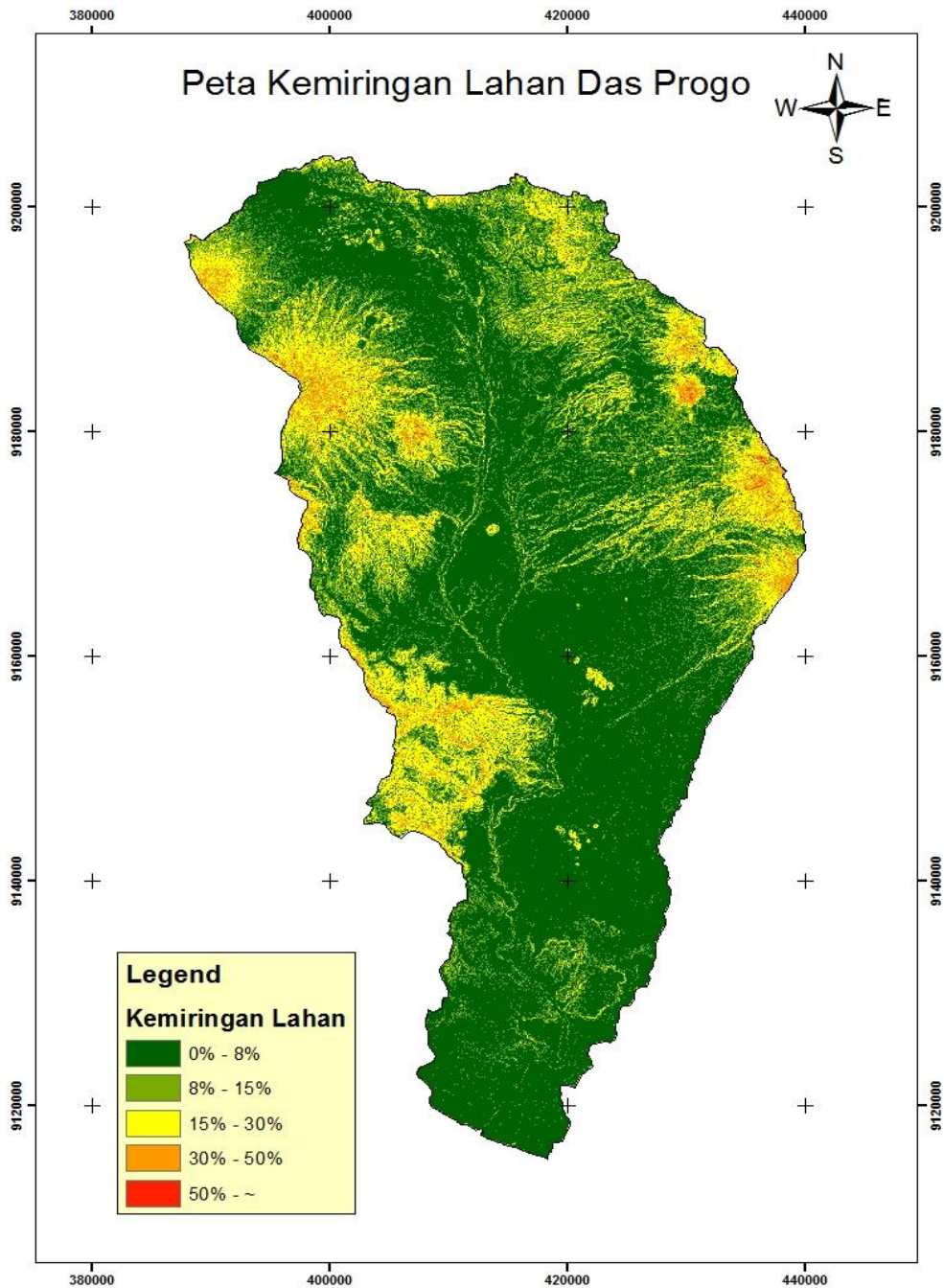
##### 1. Peta *Digital Elevation Model* (DEM)

Untuk melakukan simulasi SWAT pada suatu DAS, dibutuhkan data topografi yang dapat menggambarkan kondisi topografi dari DAS yang akan dilakukan simulasi. Data topografi dalam analisis ini menggunakan peta *Digital Elevation Model* ALOS PALSAR. Peta DEM ALOS PALSAR ini diterbitkan oleh *Alaska Satelit Facility* yang dapat diakses secara global. ALOS PALSAR merupakan hasil kerja sama antara *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) dan *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA). Data DEM untuk kawasan DAS Progo terbagi menjadi 6 bagian yang harus disatukan menjadi satu kesatuan data melalui proses *marge raster dataset* menggunakan program ArcGIS. Proses *marge raster dataset* di ArcGIS dapat dilihat pada Gambar 4.2.



**Gambar 4. 2 Analisis Data *Digital Elevation Model***

Setelah data DEM menjadi satu kesatuan, dilakukan pemotongan data sesuai dengan batas DAS Progo yang ada. Selanjutnya dilakukan penggambaran peta kemiringan yang nanti akan digunakan dalam melakukan simulasi. Hasil analisis peta DEM ALOS PALSAR dapat dilihat pada Gambar 4.3.



**Gambar 4. 3 Peta Kemiringan Daerah Aliran Sungai Progo**

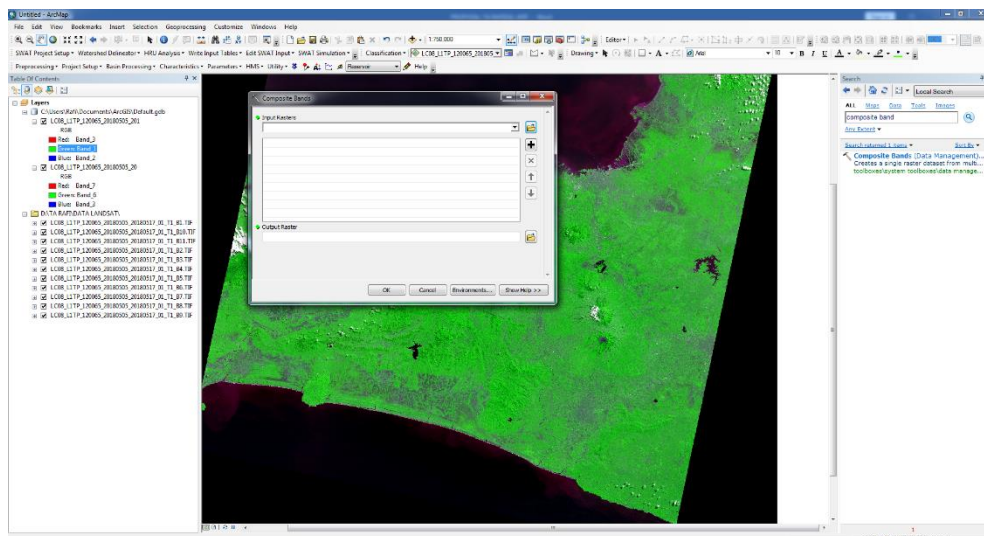
Dari hasil analisis data dihasilkan peta kemiringan DAS Progo dengan 5 pembagian kelas kemiringan lahan, 0-8% (landai), 8%-15% (bergelombang), 15%-30% (miring), 30%-50% (curam), dan >50% (sangat curam). Presentase luasan kemiringan daerah aliran Sungai Progo dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut.

**Tabel 4. 1 Persentanse Luas Kemiringan Daerah Aliran Sungai Progo**

No	Kemiringan	Luas (Km <sup>2</sup> )	Persentase (%)
1	0% - 8%	1.516,322	61,588
2	8% - 15%	504,847	20,505
3	15% - 35%	365,494	14,845
4	35% - 50%	73,013	2,965
5	> 50%	2,349	0,095
Jumlah		2.462,024	100

## 2. Peta Tata Guna Lahan

Pada simulasi yang dilakukan dibutuhkan peta tata guna lahan untuk menggambarkan kondisi tata guna lahan yang ada di DAS Progo. Peta tata guna lahan dalam analisis ini menggunakan citra Landsat 8 OLI yang diterbitkan oleh *United States Geological Survey* (USGS). Data Landsat 8 OLI memiliki 11 *band* yang harus disatukan menjadi satu kesatuan data raster. Untuk menyatukan 11 *band* Landsat tersebut dilakukan proses *composite band* menggunakan program ArcGIS. Pada proses *composite band* semua *band* akan menjadi satu kesatuan dan digambarkan dalam 3 warna dasar R (*red*), G (*green*), dan B (*blue*). Kombinasi *band* dalam 3 warna dasar inilah yang akan menjadi dasar analisis tata guna lahan pada DAS Progo. Setiap kombinasi *band* dapat menghasilkan warna yang berbeda-beda yang disesuaikan dengan tujuan analisis. Perbedaan warna ini yang nantinya juga akan membantu kita dalam melakukan analisis tata guna lahan. Setelah data masing-masing *band* Landsat digabungkan menjadi satu data raster yang kompleks, dilanjutkan dengan melakukan pemotongan Peta Landsat sesuai dengan batas DAS Progo. Proses *composite band* menggunakan program ArcGIS dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut.



**Gambar 4. 4 Proses Composite Band**

Pada analisis peta tata guna lahan ini, digunakan kombinasi *band* dasar R (*red*), G (*green*), dan B (*blue*) sebesar 6,5, dan 4. Dimana kombinasi ini digunakan untuk mengetahui vegetasi yang ada pada peta landsat yang akan dianalisis. Kombinasi *band* landsat dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut.

**Tabel 4. 2 Kombinasi Band Landsat**

Aplikasi	Kombinasi Band		
	R	G	B
<i>Natural Color</i>	4	3	2
<i>False Color (Vegetation)</i>	7	6	4
<i>Color Infrared (Vegetation)</i>	5	4	3
<i>Agriculture</i>	6	5	2
<i>Atmospheric Penetration</i>	7	6	5
<i>Healthy Vegetation</i>	5	6	2
<i>Land/Water</i>	5	6	4
<i>Natural With Atmospheric Removal</i>	7	5	3
<i>Shortwave Infrared</i>	7	5	4
<i>Vegetation Analysis</i>	6	5	4

Sumber : USDA (2018)

Dalam analisis ini klasifikasi tata guna lahan dilakukan dengan metode terbimbing (*supervised clasification*), dimana hasil visualisasi berdasarkan kombinasi *band* dilakukan evaluasi secara langsung dengan pengamatan di

lapangan. Hasil kombinasi *band* Landsat dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut.

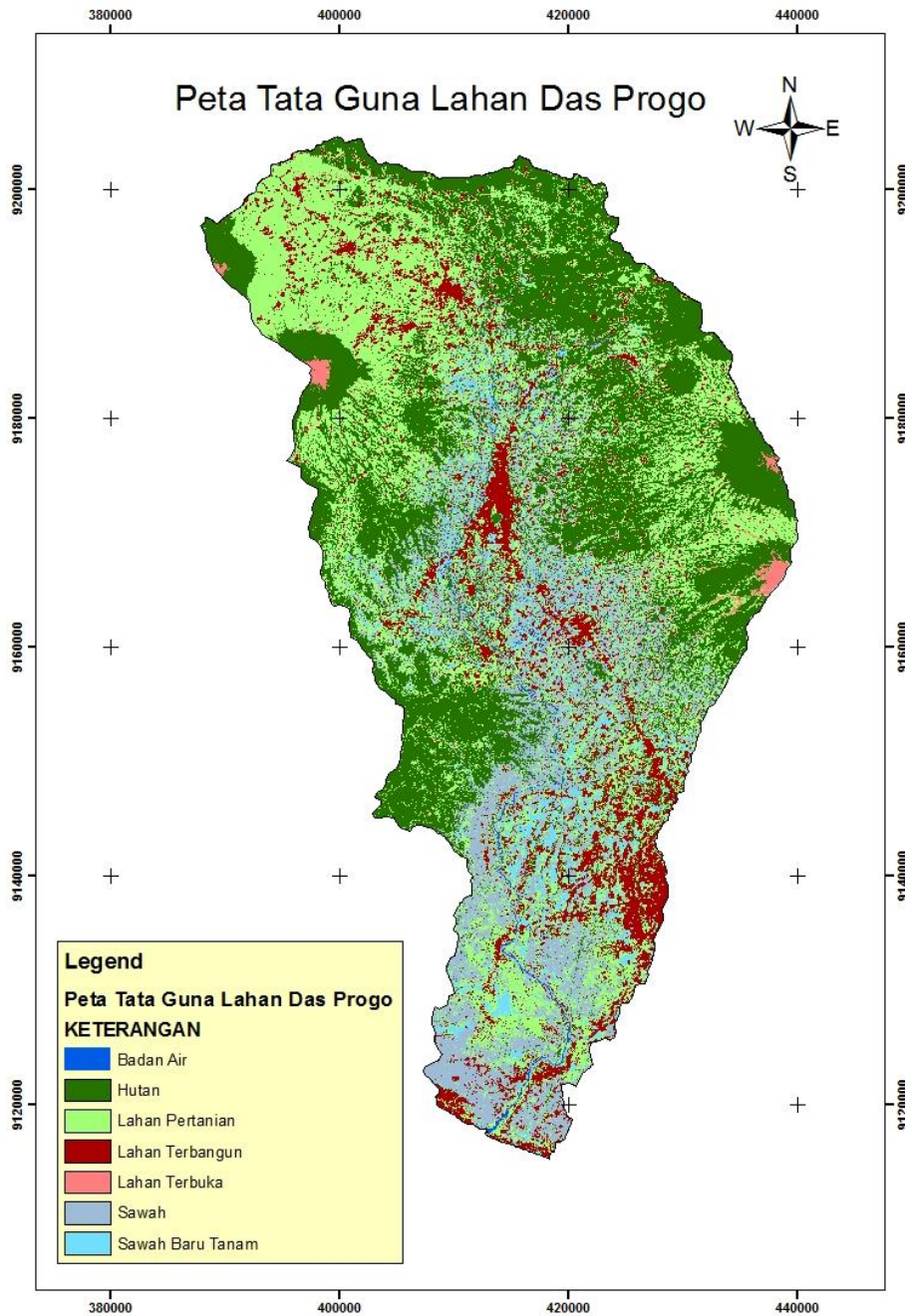


**Gambar 4. 5 Visualisasi kombinasi band/kanal Landsat (R=6,G=5,B=4)**

Data tata guna lahan dalam analisis ini dibagi dalam 7 jenis, diantaranya adalah badan air, hutan, lahan pertanian, lahan terbangun, lahan terbuka, sawah, dan sawah baru tanam. Klasifikasi jenis tata guna lahan ini dilakukan dengan melihat perbedaan warna yang dihasilkan oleh kombinasi *band* Landsat (R=6,G=5,B=4) yang telah dibentuk. Kemudian perbedaan warna yang terlihat pada kombinasi *band* Landsat diklasifikasikan menjadi masing-



masing kelas tata guna lahan yang telah ditentukan. Hasil analisis peta tataguna lahan DAS Progo dapat dilihat pada Gambar 4.6. Presentase luasan tata guna lahan DAS Progo dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut.



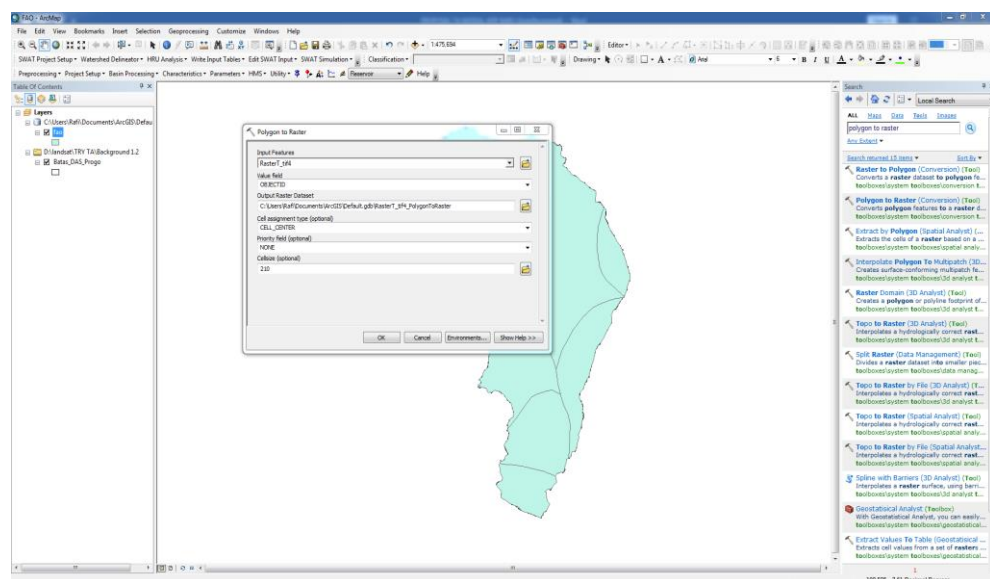
**Gambar 4. 6 Peta Tata Guna Lahan Daerah Aliran Sungai Progo**

**Tabel 4. 3 Persentase Tata Guna Lahan Daerah Aliran Sungai Progo**

No	Keterangan	Luas (Km <sup>2</sup> )	Persentase (%)
1	Badan Air	11,36	0,46
2	Hutan	833,59	33,86
3	Lahan Pertanian	812,453	33
4	Lahan Terbangun	288,697	11,73
5	Lahan Terbuka	26,24	1,07
6	Sawah	382,907	15,55
7	Sawah Baru Tanam	106,716	4,33
Jumlah		2.461,969	100

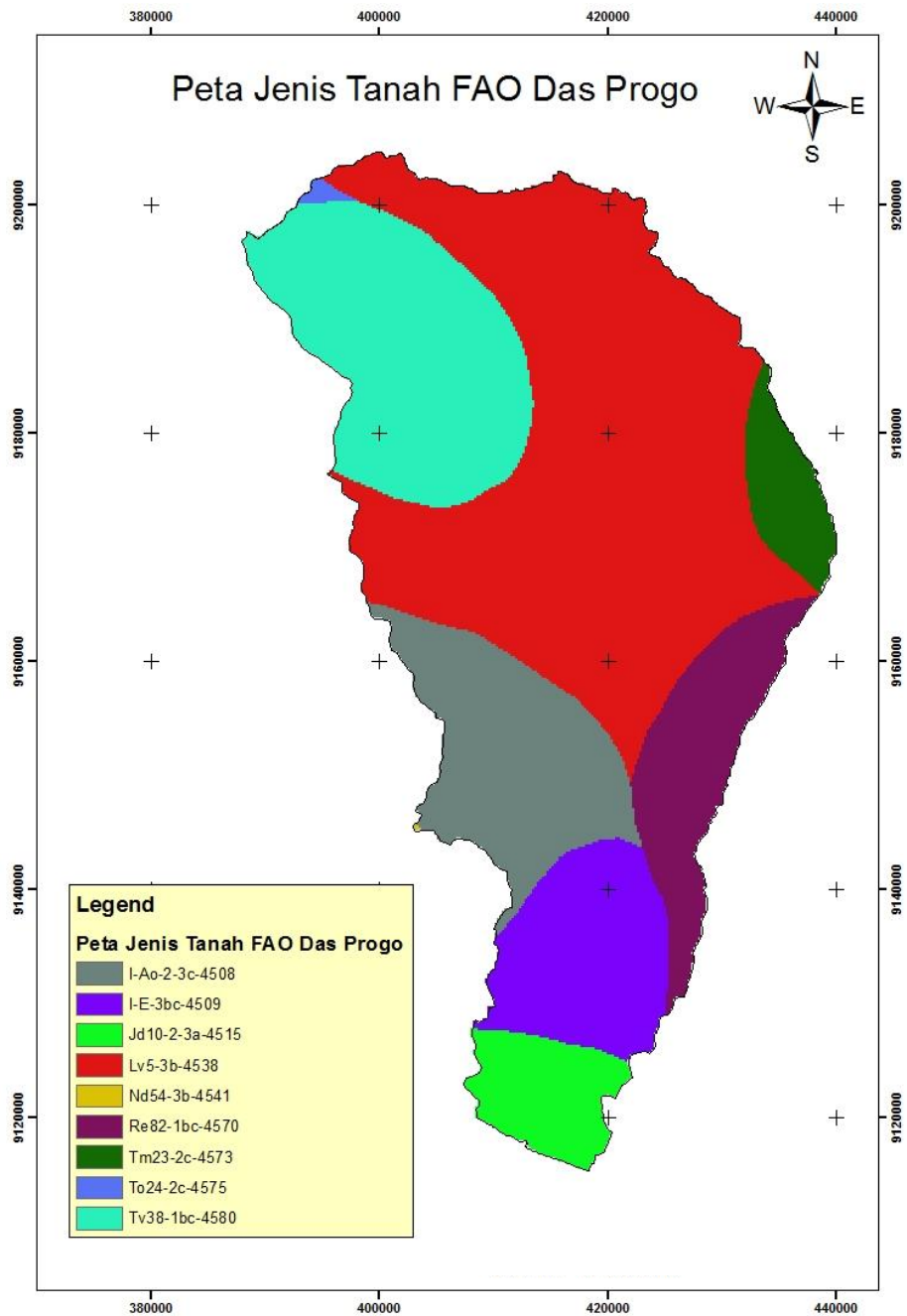
### 3. Peta Jenis Tanah

Peta jenis tanah dalam simulasi ini dibutuhkan untuk menggambarkan kondisi tanah dan jenis tanah yang ada di DAS Progo. Peta jenis tanah pada simulasi ini menggunakan peta jenis tanah yang diterbitkan oleh *Food and Agriculture Organization* (FAO). Peta jenis tanah ini dapat diakses secara global dan gratis di situs resmi milik FAO. Peta jenis tanah ini memiliki model data vektor yang harus diubah terlebih dahulu menjadi model data raster. Proses perubahan model data ini dilakukan menggunakan *tools* yang ada di program ArcGIS yaitu *polygon to raster*. Proses *conversion polygon to raster* dapat dilihat pada Gambar 4.7 berikut.



**Gambar 4. 7 Proses Conversion Polygon to Raster**

Peta jenis tanah FAO memiliki 4.932 jenis tanah berbeda yang tersebar di seluruh dunia. Pada DAS Progo sendiri terdapat 9 jenis tanah berbeda. Peta jenis tanah FAO dapat dilihat pada Gambar 4.8. Presentase jenis tanah FAO DAS Progo dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut.



**Gambar 4. 8 Peta Jenis Tanah FAO Daerah Aliran Sungai Progo**

**Tabel 4. 4 Persentase Jenis Tanah FAO Daerah Aliran Sungai Progo**

No	Keterangan	Luas (Km <sup>2</sup> )	Persentase (%)
1	I-Ao-2-3c-4508	303,21	12,32
2	I-E-3bc-4509	232,14	9,43
3	Jd10-2-3a-4515	117,06	4,75
4	Lv5-3b-4538	1085,75	44,10
5	Nd54-3b-4541	0,26	0,01
6	Re82-1bc-4570	201,97	8,20
7	Tm23-2c-4573	85,06	3,46
8	To24-2c-4575	5,92	0,24
9	Tv38-1bc-4580	430,55	17,49
Jumlah		2.461,929	100

Pada simulasi ini dibutuhkan beberapa masukan data jenis tanah. masukan data jenis tanah ini didapatkan dari *database* yang dipublikasikan oleh FAO. Masukan jenis tanah yang dibutuhkan untuk menjalankan simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut.

**Tabel 4. 5 Variable Data Tanah Food Agriculture Organization (FAO)**

Nama Variabel	Definisi
SNAM	Jenis Tanah
NLAYERS	Jumlah lapisan tanah
HYDGRP	Grup hidrologi tanah
SOL_ZMX	Kedalaman efektif (mm)
ANION_EXCL	Fraksi porositas (void space)
SOL_CRK	Volume retakan potensial atau maksimum dari profil tanah
TEXTURE	Tektur tanah
SOL_Z	Ketebalan lapisan tanah (mm)
SOL_BD	Bulk Density dalam g/cm <sup>3</sup>
SOL_AWC	Kapasitas air yang tersedia dari lapisan tanah (mm H <sub>2</sub> O / mm tanah)
SOL_K	Konduktivitas hidrolis jenuh (mm / jam)
SOL_CBN	Kandungan karbon organik (% berat tanah)
CLAY	<i>Clay content</i> (% berat tanah)
SILT	<i>Silt content</i> (% berat tanah)
SAND	<i>Sand content</i> (% berat tanah)
ROCK	<i>Rock content</i> (% berat tanah)

Setiap jenis tanah FAO memiliki besaran variabel yang berbeda-beda berdasarkan data yang ada. Besaran variabel yang ada pada jenis tanah FAO dapat dilihat pada Lampiran 1 untuk semua jenis tanah yaitu I-Ao-2-3c-4508, jenis tanah I-E-3bc-4509, jenis tanah Jd10-2-3a-4515, jenis tanah Lv5-3b-4538, jenis tanah Nd54-3b-4541, jenis tanah Re82-1bc-4570, jenis tanah Tm23-2c-4573, jenis tanah To24-2c-4575, jenis tanah Tv38-1bc-4580.

#### 4.3.2 Pengolahan Data Klimatologi Daerah Aliran Sungai Progo

Dalam rangka melakukan permodelan SWAT dibutuhkan data klimatologi yang ada di DAS Progo. Data klimatologi yang dibutuhkan dalam simulasi SWAT adalah data curah hujan harian (mm), temperatur udara maksimum dan minimum harian ( $^{\circ}\text{C}$ ), radiasi sinar matahari harian ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{hari}$ ), kelembaban relatif udara (%), dan data kecepatan angin (m/s). Data-data tersebut diperoleh dari stasiun klimatologi instansi-instansi terkait yang berada di daerah aliran Sungai Progo. Data-data tersebut disiapkan dalam 6 kategori *file* yaitu *file* WGEN (*Weather Generator Data*), *file* PCP (curah hujan), TMP (temperatur), SLR (radiasi sinar matahari), HMD (kelembaban relatif), dan WND (kecepatan angin). Terdapat 13 stasiun curah hujan dan 1 stasiun klimatologi yang tersebar di kawasan DAS Progo. Stasiun-stasiun ini terbagi dalam pengawasan 2 instansi pemerintahan yaitu PSDA Yogyakarta dan PSDA Jawa Tengah.

*Weather Generator Data* (WGEN) adalah suatu data yang berisikan data-data statistik yang diperlukan untuk menghasilkan data iklim harian yang representatif dan dapat menggambarkan kondisi sebenarnya dari suatu DAS yang akan disimulasikan. Data Stasiun klimatologi yang digunakan untuk membentuk WGEN adalah data stasiun klimatologi Tegal dengan data yang digunakan pada tahun 2013-2015. Data yang digunakan untuk membentuk WGEN adalah sebanyak 1095 hari dalam 3 tahun data yang digunakan selama tahun 2013-2015. Hasil pembentukan WGEN bulan Januari sampai Juni dan bulan Juli sampai Desember dapat dilihat berturut-turut pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 berikut.

**Tabel 4. 6 Hasil Pembentukan *Weather Generator Data (WGEN)* Bulan Januari-Juni**

Nama Variable	BULAN					
	JAN	FEB	MAR	APRIL	MEI	JUNI
TITLE	Tegal					
WLATITUDE	-7,68261					
WLONGLITUDE	110,2555					
WLEV	-					
RAIN_YRS	3					
TMPMX	25,64	25,26	26,25	26,28	25,8	24,8
TMPMN	24,93	24,59	25,49	25,61	25,01	24,09
TMPSTMTDMX	1,13	1,11	1,27	1,51	1,61	2,37
TMPSTMTDMN	1,22	1,01	1,25	1,41	1,77	2,33
PCPMM	401,67	404	297,33	365,67	43	8,67
PCPPSTD	15,97	23,2	16,37	21,83	8,94	2,44
PCPSKW	1,65	2,46	2,44	2,52	8,34	9,26
PR-W1	0,78	0,42	0,39	0,57	0,05	0,01
PR-W2	0,73	0,7	0,52	0,34	0,17	0,5
PCPD	22	17,67	14	13,67	2	0,67
SOLARAV	54,06	57,12	59,87	57,01	55,88	54,6
DEWPT	0,94	0,91	0,9	0,9	0,9	0,88
WNDVAV	0,46	0,46	0,48	0,44	0,44	0,46

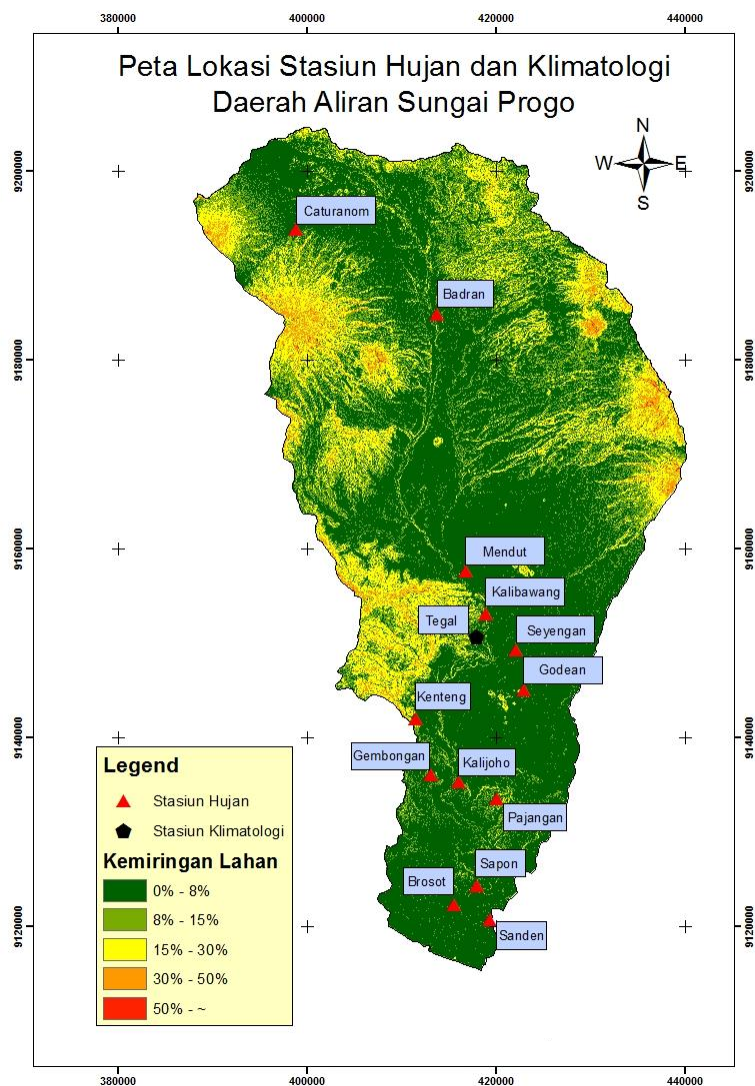
**Tabel 4. 7 Hasil Pembentukan *Weather Generator Data (WGEN)* Bulan Juli-Desember**

Nama Variable	BULAN					
	JULI	AGUS	SEP	OKT	NOV	DES
TITLE	Tegal					
WLATITUDE	-7,68261					
WLONGLITUDE	110,2555					
WLEV	-					
RAIN_YRS	3					
TMPMX	22,78	25,40	24,07	25,22	26,03	25,16
TMPMN	22,23	21,91	23,40	24,42	25,27	24,47
TMPSTMTDMX	1,82	3,52	1,47	1,73	1,66	1,29
TMPSTMTDMN	1,70	2,62	1,33	1,55	1,56	1,19
PCPMM	0,00	0,00	0,00	0,00	214,50	452,33
PCPPSTD	0,00	0,00	0,00	0,00	14,91	21,36
PCPSKW	0,00	0,00	0,00	0,00	2,98	2,16
PR-W1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,53

**Lanjutan Tabel 4.7 Hasil Pembentukan *Weather Generator Data* (WGEN)  
Bulan Juli-Desember**

Nama Variable	BULAN					
	JULI	AGUS	SEP	OKT	NOV	DES
PR-W2	0	0	0	0	0,65	0,61
PCPD	0	0	0	0	11,33	19
SOLARAV	61,47	74,41	80,06	84,97	68,81	56,99
DEWPT	0,88	0,84	0,88	0,82	0,77	0,9
WNAV	0,53	0,62	0,76	0,84	0,61	0,44

Stasiun Curah hujan dan stasiun klimatologi yang digunakan pada simulasi ini dapat dilihat pada Gambar 4.9. Daftar keterangan lokasi stasiun curah hujan dapat dilihat pada Tabel 4.8 Berikut.



**Gambar 4.9 Stasiun Curah Hujan dan Klimatologi DAS Progo**

**Tabel 4. 8 Keterangan Lokasi Stasiun Curah Hujan**

NO	Stasiun Curah Hujan	Kecamatan	Kabupaten	Provinsi	Koordinat	
					LS	BT
1	Badran	Kranggan	Temanggung	Jawa Tengah	-7,37384	110,2178
2	Brosot	Galuh	Kulon Progo	D.I.Y	-7,94022	110,2331
3	Caturanom	Parakan	Temanggung	Jawa Tengah	-7,29321	110,0831
4	Gembongan	Sentolo	Kulon Progo	D.I.Y	-7,85694	110,2114
5	Godean	Seyengan	Seleman	D.I.Y	-7,73425	110,3011
6	Kalibawang	Kalibawang	Kulon Progo	D.I.Y	-7,66184	110,264
7	Kalijoho	Sedayu	Bantul	D.I.Y	-7,82217	110,2375
8	Kenteng	Namggulan	Kulon Progo	D.I.Y	-7,76159	110,1967
9	Mendut	Mungkid	Magelang	Jawa Tengah	-7,62018	110,2454
10	Pajangan	Pajangan	Bantul	D.I.Y	-7,8391	110,2747
11	Sanden	Sanden	Bantul	D.I.Y	-7,95394	110,2677
12	Sapon	Ledah	Kulon Progo	D.I.Y	-7,92243	110,2551
13	Seyengan	Tempel	Seleman	D.I.Y	-7,69628	110,2935
14	Tegal	Kalibawang	Kulon Progo	D.I.Y	-7,68361	110,2555

#### 4.3.3 Ketersediaan data

Untuk melakukan suatu simulasi perlu dilakukan pengecekan terhadap ketersediaan data agar data yang tersedia bisa memenuhi kebutuhan masukan data yang diperlukan dalam melakukan simulasi. Simulasi SWAT membutuhkan masukan data berupa data spasial yaitu data peta DEM, data peta Landsat, data peta jenis tanah FAO. Serta data iklim yaitu data stasiun curah hujan dan data stasiun klimatologi. Dari dua jenis masukan data ini, ketersediaan data iklim perlu diperiksa terlebih dahulu. Hal ini dilakukan untuk mengetahui jumlah data yang tersedia dan menentukan periode simulasi yang akan dilaksanakan.



Untuk menentukan periode simulasi diperlukan pengecekan terhadap data iklim. Hal ini dikarenakan model SWAT membutuhkan masukkan data iklim yang kontinyu sepanjang tahun periode simulasi yang akan dilakukan. Model SWAT melakukan simulasi secara kontinyu dan berkesinambungan sehingga masukkan data yang dibutuhkan harus kontinyu sepanjang tahun periode simulasi dilakukan. Data iklim pada penelitian ini menggunakan data 13 stasiun curah hujan dan 1 stasiun klimatologi yang tersebar di kawasan DAS Progo. Selain data iklim dibutuhkan juga data debit observasi yang berada di DAS Progo. Stasiun duga air yang digunakan sebagai pengukur debit terletak di Bendung Sapon. Ketersediaan data debit Sungai Progo dibutuhkan untuk memvalidasi hasil model dalam melakukan simulasi. Ketersediaan data curah hujan, stasiun klimatologi dan stasiun duga air DAS Progo dapat dilihat pada Tabel 4.9 berikut.

**Tabel 4. 9 Ketersediaan Stasiun Curah Hujan, Stasiun Klimatologi dan Stasiun Duga Air DAS Progo**

NO	Stasiun	Tahun					
		2010	2011	2012	2013	2014	2015
Stasiun Curah Hujan							
1	Kalibawang		Tersedia		Tersedia	Tersedia	Tersedia
2	Kenteng	Tersedia	Tersedia		Tersedia	Tersedia	Tersedia
3	Sapon	Tersedia	Tersedia		Tersedia	Tersedia	Tersedia
4	Brosot	Tersedia	Tersedia		Tersedia	Tersedia	Tersedia
5	Sanden	Tersedia	Tersedia		Tersedia	Tersedia	Tersedia
6	Kalijoho	Tersedia	Tersedia		Tersedia	Tersedia	Tersedia
7	Pajangan		Tersedia		Tersedia	Tersedia	Tersedia
8	Seyengan		Tersedia		Tersedia	Tersedia	Tersedia
9	Godean				Tersedia	Tersedia	Tersedia
10	Badran				Tersedia	Tersedia	Tersedia
11	Caturanom				Tersedia	Tersedia	Tersedia
12	Gembongan				Tersedia	Tersedia	Tersedia
13	Mendut				Tersedia	Tersedia	Tersedia
Stasiun Klimatologi							
1	Tegal				Tersedia	Tersedia	Tersedia
Stasiun Duga Air							
1	Bendung Sapon				Tersedia	Tersedia	Tersedia

Dari hasil analisis ketersediaan data di atas, dapat dilihat bahwa stasiun curah hujan, stasiun klimatologi, dan stasiun duga air memiliki data yang lengkap dan kontinyu yaitu pada tahun 2013 sampai tahun 2015. Sehingga dapat disimpulkan periode simulasi yang dilakukan adalah selama tiga tahun dimulai 1 Januari 2013 sampai 31 Desember 2015.

## **BAB VI**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **6.1 Kesimpulan**

Analisis debit Sungai Progo dengan model SWAT dilakukan dalam 3 bagian simulasi yaitu simulasi debit harian, simulasi debit 15 harian, dan simulasi debit bulanan. Berdasarkan simulasi debit Sungai Progo dengan *outlet* Bendung Sapon menggunakan model SWAT dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Dari hasil validasi model SWAT terhadap debit harian Sungai Progo dengan *outlet* Bendung Sapon didapatkan hasil validasi pada tahun 2013 nilai  $R^2$  sebesar 0,82 dan nilai NS sebesar 0,34. Pada tahun 2014 nilai  $R^2$  sebesar 0,83 dan nilai NS sebesar 0,26. Pada tahun 2015 nilai  $R^2$  sebesar 0,95 dan nilai NS sebesar 0,32. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa terdapat hubungan yang erat antara debit harian hasil simulasi terkalibrasi dengan debit harian observasi. Hal ini ditunjukkan oleh besaran nilai parameter  $R^2$  yang mendekati 1 pada masing-masing tahun periode simulasi. Akan tetapi efisiensi model SWAT dalam memodelkan debit harian Sungai Progo dapat dikatakan kurang memuaskan. Hal ini didasari pada besaran nilai NS tiap tahun periode simulasi yang kurang dari 0,36
2. Dari hasil validasi model SWAT terhadap debit 15 harian Sungai Progo dengan *outlet* Bendung Sapon didapatkan hasil validasi pada tahun 2013 nilai  $R^2$  sebesar 0,88 dan nilai NS sebesar 0,61. Pada tahun 2014 nilai  $R^2$  sebesar 0,96 dan nilai NS sebesar 0,55. Pada tahun 2015 nilai  $R^2$  sebesar 0,99 dan nilai NS sebesar 0,52. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa debit 15 harian hasil simulasi memiliki hubungan yang erat dengan debit 15 harian hasil observasi. Hal ini ditunjukkan oleh nilai  $R^2$  untuk tiap tahun selama periode simulasi mendekati 1. Selain itu efisiensi model SWAT dalam memodelkan

debit 15 harian Sungai Progo dapat dikatakan memuaskan. Hal ini terlihat dari besaran nilai NS yang dihasilkan tiap tahun selama periode simulasi lebih besar dari 0,36.

3. Dari hasil validasi model SWAT terhadap debit bulanan Sungai Progo dengan *outlet* Bendung Sapon didapatkan hasil validasi pada tahun 2013 nilai  $R^2$  sebesar 0,89 dan NS sebesar 0,55. Pada tahun 2014 nilai  $R^2$  sebesar 0,95 dan nilai NS sebesar 0,65. Pada tahun 2015 nilai  $R^2$  sebesar 0,99 dan nilai NS sebesar 0,39. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa adanya hubungan yang erat antara debit bulanan simulasi terkalibrasi dengan debit observasi. Hal ini ditunjukkan oleh nilai  $R^2$  pada tiap tahun simulasi yang berada di atas nilai 0,85. Nilai efisiensi model NS juga menunjukkan hasil yang memuaskan. Dimana nilai NS untuk tiap tahun simulasi berada di atas 0,36.
4. Dari hasil validasi model terhadap debit harian, debit 15 harian, dan debit bulanan Sungai Progo dengan *outlet* Bendung Sapon dapat disimpulkan bahwa model SWAT sudah cukup baik dalam memodel nilai debit harian Sungai Progo. Hal ini terbukti dari nilai validasi  $R^2$  yang mendekati 1 untuk tiap tahun simulasi. Akan tetapi, efisiensi model SWAT dalam memodelkan debit harian Sungai Progo masih kurang memuaskan dimana nilai NS untuk validasi debit harian masih kurang dari 0,36. Sementara itu kemampuan model SWAT dalam memodelkan debit 15 harian dan debit bulanan Sungai Progo dapat dikategorikan memuaskan. Dimana hasil validasi debit 15 harian dan debit bulanan Sungai Progo nilai  $R^2$  untuk tiap tahun simulasi berada di atas angka 0,85 dan nilai NS berada di atas angka 0,36. Ini menunjukkan keberhasilan model SWAT dalam memodelkan debit 15 harian dan debit bulanan Sungai Progo.

## 6.2 Saran

Berdasarkan hasil dari simulasi yang dilakukan dalam penelitian ini terdapat beberapa hal yang dapat disarankan.

1. Perlu adanya penelitian dari badan instansi terkait terhadap karakteristik dan jenis tanah diseluruh Indonesia. Sehingga data karakteristik dan jenis tanah

yang digunakan dalam simulasi dapat menggambarkan kondisi sebenarnya dari wilayah Indonesia.

2. Perlu adanya penelitian terhadap karakteristik jenis tanaman dari badan instansi terkait agar pengolahan data tata guna lahan dapat lebih optimal.
3. Perlu adanya penelitian terhadap wilayah urban di Indonesia dari badan instansi terkait agar pengolahan data tata guna lahan dapat lebih optimal.
4. Untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal perlu dilakukan simulasi model dengan periode data yang lebih panjang.
5. Untuk mendapatkan nilai debit harian yang lebih baik lagi, perlu dilakukan kalibrasi yang lebih luas lagi terhadap parameter-parameter yang lain yang dimiliki oleh model SWAT. Sehingga hasil validasi debit harian dapat lebih baik lagi dan model SWAT dapat menggambarkan kondisi lapangan yang sebenarnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alaska Satellite Facility. 2011. *ALOS PALSAR Global Radar Imagery*. (<http://asf.alaska.edu/sar-data/palsar/>. Diakses pada 24 Januari 2019).
- Asdak, C. 2002. *Hidrologi Dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Gajah Mada University Press. Yogyakarta.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2003. *The Digital Soil Map of The World*. (<http://fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1026564/>. Diakses pada 24 Januari 2019).
- Hamdan, M. 2010. Analisis Debit Aliran sungai SUB DAS Ciliwung Hulu Menggunakan MW-SWAT. *Skripsi*. Departemen Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian. Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Junaidi, Edi. 2011. Penggunaan Model Hidrologi SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) Dalam Pengelolaan DAS Cisadane. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*. Vol.9 No.3 : 221-237. Bogor.
- National Aeronautics and Space Administration. 2008. *Landsat-8 Land Data Continuity Mission*. (<http://landsat.usgs.gov/landsat-8>. Diakses 24 Januari 2019).
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Srinivasan R, Haney EB, William JR. 2012. *Soil and Water Assessment Tool Documentation Version 2009*. Texas (US): Agricultural Research Service US.
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Srinivasan R, Haney EB, William JR. 2012. *Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation Version 2012*. Texas (US): Agricultural Research Service US.
- Niagara, R. 2016. Analisis Debit Air dan Aair Tanah Dangkal Daerah Aliran Sungai (DAS) Prumpung Kabupaten Tuban. *Tesis*. Sekolah Pascasarjana. Institut Pertanian Bogor. Bogor.

- Prahasta, E. 2001. *Konsep-konsep Dasar Sistem Informasi Geografis*. Informatika. Bandung.
- Rau, M.I. 2012. Analisis Debit Sungai Dengan Menggunakan Model SWAT Pada DAS Cipsauran Banten. *Skripsi*. Fakultas Teknologi Pertanian. Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Sitanggang, G. 2007 Sistem Pengindraan Jauh Satelit ALOS dan Analisa Pemanfaatan Data. *Jurnal Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional*. Vol.2 No.2. Jakarta.
- Stiyanto, E. 2015. Pengembangan Modul Padi Sawah untuk Analisis Hasil Air Menggunakan Program Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Tesis*. Sekolah Pascasarjana. Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Suripin. 2005. *Sistem Drainase Perkotaan Yang Berkelanjutan*. Adi. Yogyakarta.
- Triatmojo, B. 2008. *Hidrologi Terapan*. Beta Offset. Yogyakarta.

# LAMPIRAN