

# **PENELITIAN HIDROLOGI**

di Sub DAS Cipunagara - Subang

Menggunakan Aplikasi Model SWAT

Yuli Suharnoto

Maret, 2024



# Daftar Isi

<b>1</b>	<b>PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1	Latar Belakang . . . . .	1
1.2	Lokasi Kegiatan . . . . .	1
1.3	Tujuan . . . . .	1
<b>2</b>	<b>METODE</b>	<b>3</b>
2.1	Model SWAT . . . . .	3
2.1.1	Evapotranspiration Potensial . . . . .	5
2.1.2	<i>Surface Run off</i> / Limpasan Permukaan ( <i>Qsurf</i> ) . . . . .	6
2.1.3	<i>Seepage</i> / Rembesan ( <i>Wseep</i> ) . . . . .	8
2.1.4	<i>Lateral Flow</i> ( <i>QLat</i> ) . . . . .	8
2.1.5	Return Flow atau Groundwater flow ( <i>Qgw</i> ) . . . . .	9
2.1.6	Penguapan dari groundwater ( <i>Wrevap</i> ) . . . . .	9
2.2	Alat dan Bahan . . . . .	10
2.3	Kegiatan Lapangan . . . . .	11
2.4	Kalibrasi, Analisis sensitivitas Model dan Validasi . . . . .	11
<b>3</b>	<b>KEADAAN UMUM ...</b>	<b>13</b>
3.1	Lokasi Wilayah Kajian . . . . .	13
3.1.1	Wilayah Hidrologi . . . . .	13
3.1.2	Wilayah Administrasi . . . . .	13
3.2	Iklim . . . . .	17
3.3	Geologi . . . . .	18
3.4	Hidrogeologi . . . . .	20
3.5	Topografi . . . . .	23
3.6	Jenis Tanah . . . . .	24
3.7	Tutupan lahan . . . . .	26
3.8	Jumlah Penduduk . . . . .	29
<b>4</b>	<b>PEMODELAN SWAT</b>	<b>31</b>
4.1	Kalibrasi, uncertainty analysis, dan validasi model SWAT . . . . .	31
4.2	Hydrologic Response Unit (HRU) / Unit Respon Hidrologi (URH) . . . . .	35
<b>5</b>	<b>KONDISI HIDROLOGI ...</b>	<b>45</b>
5.1	Neraca air SubDAS Cipunagara Hulu . . . . .	45
5.2	Neraca air di recharge area sumber air Plant Subang . . . . .	50
5.2.1	surface runoff di ... . . . . .	51
5.2.2	Groundwater recharging ... . . . . .	53

<b>6 KESIMPULAN DAN REKOMENDASI</b>	<b>59</b>
6.1 Kesimpulan . . . . .	59
6.2 Rekomendasi . . . . .	60
<b>Bibliografi</b>	<b>61</b>

# Daftar Gambar

2.1	Skema model hidrologi SWAT (sumber: modifikasi dari Neitsch <i>at al.</i> , 2005) . . . . .	4
3.1	Peta wilayah hidrologi (SubDAS Cipunagara Hulu) sumber air Plant Subang . . . . .	14
3.2	Peta SubDAS Cipunagara Hulu dalam liputan wilayah administrasi (Kab. Bandung Barat dan Kab. Subang) . . . . .	15
3.3	Proporsi wilayah kecamatan yang berada di SubDAS Cipunagara Hulu .	16
3.4	Proporsi wilayah desa di <i>recharge area</i> . . . . .	16
3.5	Distribusi bulanan jumlah curah hujan ( <i>kiri</i> ) dan hari hujan ( <i>kanan</i> ) di wilayah kajian . . . . .	17
3.6	Data seri curah hujan harian maksimum (mm) di wilayah kajian . . . .	18
3.7	Distribusi bulanan suhu-kelembaban udara (Kiri) dan radiasi surya-kecepatan angin (Kanan) di wilayah kajian . . . . .	18
3.8	Peta geologi di wilayah kajian (sumber: LAPI, 2010) . . . . .	21
3.9	Penampang melintang hidrogeologi di wilayah kajian (UNPAD, 2017) .	22
3.10	Sebaran kelas elevasi lahan di wilayah kajian . . . . .	23
3.11	Sebaran kelas lereng di wilayah kajian . . . . .	25
3.12	Peta jenis tanah di wilayah kajian . . . . .	26
3.13	Peta jenis tutupan lahan tahun 2017 di wilayah kajian . . . . .	28
3.14	Potensi sebaran penduduk di wilayah kajian dan sekitarnya Tahun 2017	30
4.1	Wilayah Analisa SWAT model dari lokasi kajian di Plant Subang . . . .	32
4.2	Hasil perhitungan P-Value dan t-Stat untuk melihat sensitivitas parameter model hidrologi SWAT . . . . .	34
4.3	Perbandingan time series harian hasil simulasi SWAT dan data observasi antara kalibrasi (2005-2010) dan validasi (2013-2016) . . . . .	35
4.4	Hubungan hasil simulasi harian SWAT dan data observasi antara proses kalibrasi (2005-2010) dan validasi (2013-2016) . . . . .	36
4.5	Perbandingan time series bulanan hasil simulasi SWAT dan data observasi antara kalibrasi (2005-2010) dan validasi (2013-2016) . . . . .	36
4.6	Hubungan hasil simulasi bulanan SWAT dan data observasi antara proses kalibrasi (2005-2010) dan validasi (2013-2016) . . . . .	37
5.1	Diagram Neraca air di SubDAS Cipunagara Hulu output model SWAT .	46
5.2	Variasi bulanan evapotranspirasi di SubDAS Cipunagara Hulu . . . . .	47
5.3	Variasi bulanan <i>surface runoff</i> di SubDAS Cipunagara Hulu . . . . .	48
5.4	Variasi bulanan <i>lateral flow</i> di SubDAS Cipunagara Hulu . . . . .	48

---

5.5	Variasi bulanan perkolasi di SubDAS Cipunagara Hulu . . . . .	49
5.6	Variasi bulanan <i>groundwater flow</i> di SubDAS Cipunagara Hulu . . . . .	50
5.7	Potensi volume komponen output Neraca air (juta m <sup>3</sup> /tahun) di SubDAS Cipunagara Hulu . . . . .	51
5.8	Diagram Neraca air di <i>recharge area</i> sumber air Plant Subang . . . . .	52
5.9	Potensi volume <i>surface runoff</i> (juta m <sup>3</sup> /tahun) di recharge dan proporsi berdasarkan tutupan/penggunaan lahan . . . . .	53
5.10	Variasi bulanan potensi <i>surface runoff</i> di <i>recharge area</i> . . . . .	54
5.11	Grafik hubungan curah hujan harian dengan <i>surface runoff</i> pada berbagai tutupan/penggunaan lahan . . . . .	54
5.12	Potensi volume imbuhan air ke shallow <i>aquifer</i> (juta m <sup>3</sup> /tahun) di <i>recharge area</i> dan proporsi berdasarkan tutupan/penggunaan lahan . . . . .	56
5.13	Variasi bulanan potensi imbuhan air ke shallow <i>aquifer</i> di <i>recharge area</i> . . . . .	56
5.14	Variasi tahunan potensi imbuhan air ke shallow <i>aquifer</i> di <i>recharge area</i> . . . . .	57
5.15	Variasi bulanan potensi imbuhan air tanah yang tersimpan dalam <i>groundwater</i> di <i>recharge area</i> . . . . .	58

# Daftar Tabel

2.1	Data spasial yang digunakan pada kajian SWAT Ciherang . . . . .	10
2.2	Data tabular yang digunakan pada kajian SWAT Ciherang . . . . .	11
2.3	Kegiatan lapangan yang dilakukan pada kajian SWAT . . . . .	12
3.1	Luas kelas lereng di wilayah kajian . . . . .	24
3.2	Luas Jenis tanah di wilayah kajian . . . . .	27
3.3	Luas penutupan lahan di wilayah kajian . . . . .	27
3.4	Jumlah penduduk Tahun 2017 setiap desa di wilayah kajian dan sekitarnya (Sumber: BPS Kab. Subang Tahun 2017) . . . . .	29
3.4	Jumlah penduduk Tahun 2017 setiap desa di wilayah kajian dan sekitarnya (Sumber: BPS Kab. Subang Tahun 2017) . . . . .	30
4.1	Parameter model SWAT yang dilakukan kalibrasi . . . . .	33
4.2	Rekapitulasi parameter statistik untuk kalibrasi dan validasi model . . .	35
4.3	Kombinasi tutupan lahan, jenis tanah dan kelas lereng di Sub DAS Cimande . . . . .	37
4.3	Kombinasi tutupan lahan, jenis tanah dan kelas lereng di Sub DAS Cimande . . . . .	38
4.3	Kombinasi tutupan lahan, jenis tanah dan kelas lereng di Sub DAS Cimande . . . . .	39
4.3	Kombinasi tutupan lahan, jenis tanah dan kelas lereng di Sub DAS Cimande . . . . .	40
4.4	Liputan HRU yang dominan di wilayah recharge area sumber air Plant Subang . . . . .	42
4.5	Rekapitulasi luas (Ha) HRU di recharge area sumber air Plant Ciherang berdasarkan wilayah desa . . . . .	43
5.1	Persamaan hubungan curah hujan harian dengan <i>surface runoff</i> pada berbagai tutupan/penggunaan lahan . . . . .	55
5.2	Potensi imbuhanan air tanah yang tersimpan dalam groundwater pada berbagai kondisi strata vegetasi . . . . .	58





# 1 PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Keberlanjutan ketersediaan air baku di dalam tanah memerlukan berbagai upaya konservasi air. Tujuan konservasi air tersebut adalah meresapkan air ke dalam tanah secara maksimal dan terukur sehingga jumlah air air yang dipompa dari dalam tanah relatif seimbang dengan air yang imbuhkan ke dalam tanah (*water-balances*). Masalah yang umum dihadapi pada saat ini adalah belum adanya alat atau model yang bisa mengukur secara ilmiah berapa jumlah air yang masuk ke dalam tanah.

Pengembangan model hidrologi di sub Daerah Aliran Sungai Cipunagara sangat penting agar bisa menentukan strategi konservasi yang efektif, efisien, tajam, dan terukur. Strategi konservasi ini juga diperlukan untuk referensi pada proses sidang amdal.

## 1.2 Lokasi Kegiatan

Daerah tangkapan air untuk untuk studi ini berada di bagian hulu DAS Cipunagara. Wilayah administrasi berada di Kabupaten Subang (yang berbatasan dengan Kabupaten Bandung Barat), Jawa Barat. Secara garis besar berada di 3 kecamatan, yaitu Kecamatan Ciater (Desa Pasir Banceuy, Sanca, Cibitung, Cibeusi, Nagrak, dan Palasari), Kecamatan Kasomalang (Desa Pasanggrahan, Kasomalang Wetan, dan Tenjolaya), dan Kecamatan Cisalak (Desa Darmaga dan Cupunagara).

## 1.3 Tujuan

**Tujuan kegiatan umum** adalah terbangunnya sebuah model yang bisa mengukur secara ilmiah jumlah air yang masuk kedalam tanah sebagai dampak dari upaya konservasi.



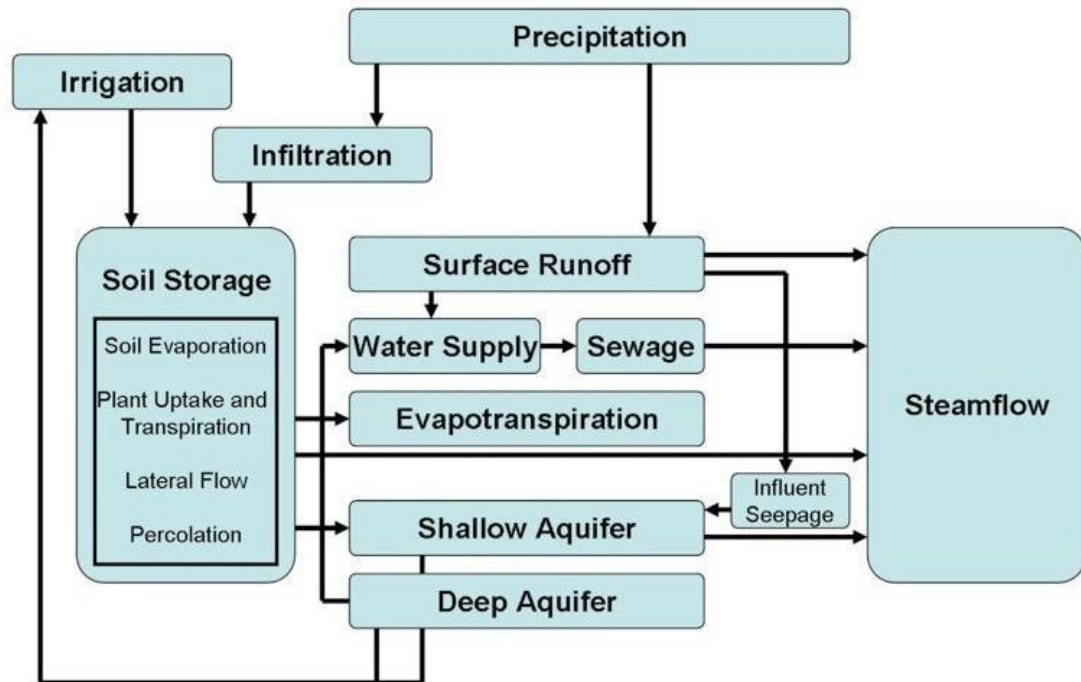
## 2 METODE

### 2.1 Model SWAT

Model hidrologi yang digunakan dalam kegiatan ini adalah SWAT. Neitsch *at al.* (2005) menjelaskan secara rinci mengenai SWAT. SWAT akronim dari *Soil and Water Assessment Tool*. Lebih dari 30 tahun SWAT dikembangkan oleh USDA-ARS (*United State Departemen of Agricultural-Agricultural Research Services*). SWAT merupakan gabungan antara model CREAMS (*Chemicals Run off and Erosion from Agricultural Management Systems*), GLEAMS (*Groundwater Loading Effects on Agricultural Management System*), EPIC (*Environmental Impact Policy Climate*) dan SWRRB (*Simulation for Water Resouces in Rural Basins*). Model SWAT terus berkembang dengan bergabungnya model QUAL2K, yaitu model kinematik untuk distribusi dan transportasi pencemaran air.

SWAT dikembangkan sebagai alat bantu untuk memprediksi dan mengevaluasi dampak dari praktek-praktek pengelolaan lahan, pemanfaatan ruang dan sumberdaya alam suatu DAS terhadap kualitas dan kuantitas air dan tanah. Alat bantu ini mempunyai karakteristik sebagai berikut :

- Berbasis pada proses-proses fisis; hal ini berarti model bersifat mekanistik (process base). Model menjelaskan hubungan antara peubah input dan output sebagai proses fisik. SWAT membutuhkan informasi spesifik tentang cuaca, sifat tanah, topografi, vegetasi, dan praktek pengelolaan lahan yang terjadi di DAS. Proses fisik yang terkait dengan aliran air, gerakan sedimen, pertumbuhan tanaman, siklus nutrisi, aliran bahan pencemar dll secara langsung dimodelkan oleh SWAT.
- SWAT dapat digunakan untuk mempelajari dan memahami proses-proses yang spesifik seperti transportasi limpasan permukaan, erosi dan hasil sedimen, bakteri dan bahan pencemar
- Berbasis *point* dan *non point source* untuk analisis pencemaran air sungai (dalam penentuan total maximum daily load).
- SWAT dirancang sebagai *semi distributed model*, suatu sistem aplikasi perangkat lunak komputer yang efisien dengan menggabungkan data spasial dan numerik dalam suatu sistem basis data spasial. *Graphical User Interface* (GUI) SWAT menjadi *plug in* berbagai aplikasi GIS seperti ArcView, ArcGIS, MapWindow, dsb.



Gambar 2.1: Skema model hidrologi SWAT (sumber: modifikasi dari Neitsch *et al.*, 2005)

- SWAT dirancang sebagai sebuah sistem alat bantu pengambilan keputusan sehingga dapat digunakan untuk membuat strategi pengelolaan DAS yang tepat, efisien dan efektif.
- Memungkinkan pengguna untuk mempelajari dampak kejadian perubahan iklim (curah hujan dan suhu) dan aplikasi teknis pengelolaan lahan terhadap ketersediaan air, erosi dan pencemaran sungai dalam konteks relasi hulu-hilir dalam suatu DAS.

Model SWAT, dalam proses simulasinya berbasiskan daerah tangkapan air dengan unit terkecilnya adalah HRU (*Hydrological Response Unit*). HRU bersifat unik sebagai hasil overlay dari data keleregan lahan, tutupan lahan dan jenis tanah. Secara sederhana skema proses-proses hidrologi seperti aliran air dari atmosfer (presipitasi, evapotranspirasi), dari vegetasi (transpirasi), dari lahan (run off, infiltrasi, perkolasi, evaporasi, seepage) dan di sungai (*streamflow*, *baseflow*) disimulasi SWAT (Gbr.2.1).

Konsep dasar yang diperhitungkan dalam SWAT model adalah neraca air (Neitsch *et al.*, 2002; Luzio *et al.*, 2004). SWAT memperhitungkan neraca air di zona perakaran & vadose zone dan di lapisan akuifer (groundwater). Persamaan neraca air di lapisan perakaran dan vadose zone dirumuskan sebagai berikut:

$$SW_t = SW_{t-1} + Rday_t - (Qsurf_t + Ea_t + Wseep_t + QLat_t) \quad (2.1)$$

Di mana :

- $SW_t$  : Kandungan air tanah pada hari ke-t (mm H<sub>2</sub>O)
- $SW_{t-1}$  : Kandungan air tanah awal pada hari ke t-1
- $Rday_t$  : Curah hujan harian pada hari ke-t (mm H<sub>2</sub>O)
- $Qsurf_t$  : Run off pada hari ke -t (mm H<sub>2</sub>O)
- $Ea_t$  : Evapotranspirasi aktual pada hari ke -t (mm H<sub>2</sub>O)
- $Wseep_t$  : Air yang keluar dari lapisan tanah (melalui perkolasi dan bypass flow) pada hari ke -t (mm H<sub>2</sub>O)
- $QLat_t$  : Total air yang mengalir secara lateral kembali ke sungai pada hari ke-t (mm H<sub>2</sub>O)
- $t$  : Waktu dalam hari

Persamaan neraca air di lapisan akuifer (groundwater) dirumuskan sebagai berikut:

$$GW_t = GW_{t-1} + Wseep_t - (Qgw_t + Wrevap_t + Wpump_t) \quad (2.2)$$

Di mana :

- $GW_t$  : Kandungan air tanah pada hari ke-t (mm H<sub>2</sub>O)
- $GW_{t-1}$  : Kandungan air tanah awal pada hari ke t-1
- $Wseep_t$  : Air yang keluar dari lapisan tanah (melalui perkolasi dan bypass flow) pada hari ke -t (mm H<sub>2</sub>O)
- $Qgw_t$  : Return flow / groundwater flow pada hari ke -t (mm H<sub>2</sub>O)
- $Wrevap_t$  : Evaporasi dari groundwater ke lapisan perakaran pada hari ke-t (mm H<sub>2</sub>O)
- $Wpump_t$  : Evapotranspirasi aktual pada hari ke -t (mm H<sub>2</sub>O)
- $t$  : Waktu dalam hari

### 2.1.1 Evapotranspiration Potensial

Perhitungan Evapotranspiration Potensial menggunakan formula Penman-Monteith-FAO (FAO,1998). Evapotranspirasi potensial merupakan evaporasi maksimum dari Sebuah lahan dengan tanaman hipotetik dengan tinggi tanaman diasumsikan 0.12 m, resistansi permukaan tetap  $70 \text{ m s}^{-1}$  dan Albedo 0.23; dengan formula sebagai berikut :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)} \quad (2.3)$$

Di mana,

$ET_0$	:	Evapotranspirasi potensial [mm d <sup>-1</sup> ],
$R_n$	:	Radiasi netto [MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ],
$G$	:	Soil heat flux density [MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ],
$T$	:	Suhu udara rata-rata di 2 m [°C],
$U_2$	:	Kecepatan angin di 2 m [m s <sup>-1</sup> ],
$e_s$	:	Tekanan uap air jenuh [kPa],
$e_a$	:	Tekanan uap air aktual [kPa],
$e_s - e_a$	:	Defisit tekanan uap air jenuh [kPa],
$\Delta$	:	Slope kurva tekanan uap air [kPa °C <sup>-1</sup> ],
$\gamma$	:	Konstanta Psychrometric [kPa °C <sup>-1</sup> ].

### 2.1.2 Surface Run off / Limpasan Permukaan (Qsurf)

Untuk menghitung potensi air permukaan dari run off atau limpasan permukaan menggunakan metode SCS (SCS, 1972; Rallison dan Miller, 1981). Metode ini dikembangkan untuk menghitung jumlah run off pada tutupan lahan dan jenis tanah yang bervariasi. Persamaan run off dengan metode SCS seperti di bawah ini, dimana abstraksi awal ( $I_a$ ) sebesar  $0.2S$ . Limpasan permukaan akan terjadi jika curah hujan ( $R_{day}$ ) lebih besar dari  $I_a$ .

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} - 0.8S)} \quad (2.4)$$

Parameter retensi ( $S$ ) bervariasi tergantung jenis tanah, penutupan lahan, kelerengan, teknik pengelolaan lahan dan kandungan air tanah. Parameter retensi didefinisikan sebagai berikut:

$$S = 25.4 \left[ \frac{1000}{CN} - 10 \right] \quad (2.5)$$

Di mana,

$Q_{surf}$	:	limpasan permukaan (mm)
$R_{day}$	:	curah hujan pada satu hari (mm)
$I_a$	:	abstraksi awal termasuk simpanan permukaan, intersepsi tajuk dan infiltrasi sebelum terjadi aliran permukaan
$S$	:	parameter retensi (mm)
$CN$	:	SCS Curve Number

Limpasan permukaan maksimum (*peak run off*) dihitung dengan memodifikasi metode rasional (*rational method*) dengan persamaan sebagai berikut:

$$q_{peak} = \frac{(\alpha_{tc} \times Q_{surf} \times Area)}{(3.6 \times t_{conc})} \quad (2.6)$$

Di mana :

- $q_{peak}$  : laju limpasan permukaan maksimum ( $m^3/s$ )
- $\alpha_{tc}$  : fraksi curah hujan yang terjadi selama waktu konsentrasi
- $Q_{surf}$  : limpasan permukaan (mm)
- Area** : luas wilayah sub DAS ( $km^2$ )
- $t_{conc}$  : waktu konsentrasi pada sub DAS (jam)

Fraksi curah hujan selama waktu konsentrasi ( $\alpha_{tc}$ ) dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\alpha_{tc} = 1 - \exp(2 \times t_{conc.} \times \ln(1 - \alpha_{0.5})) \quad (2.7)$$

Di mana,

- $\alpha_{0.5}$  : fraksi hujan harian selama setengah jam-an intensitas curah hujan tertinggi
- $t_{conc}$  : Waktu konsentrasi

Prosedur untuk menghitung fraksi hujan harian yang jatuh selama setengah jam-an intensitas curah hujan tertinggi ( $\alpha_{0.5}$ ) disajikan dalam pembangkitan data hujan.

Waktu konsentrasi ( $t_{conc}$ ) adalah jumlah waktu aliran di lahan (*overland flow time* /  $t_{ov}$ ) dan waktu aliran di sungai (*channel flow time* /  $t_{ch}$ ):

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0.6} \times n^{0.6}}{18 \times slp^{0.3}} \quad \text{dan} \quad t_{ch} = \frac{0.62 \times L \times n^{0.75}}{Area^{0.125} \times slp_{ch}^{0.375}} \quad (2.8)$$

Di mana,

- $t_{ov}$  : waktu konsentrasi untuk aliran di lahan (jam)
- $t_{ch}$  : waktu konsentrasi untuk aliran di sungai (jam)
- $L_{slp}$  : panjang lereng sub DAS (m)
- $L$  : rata-rata panjang aliran sungai pada sub DAS (km)
- $slp$  : rata-rata lereng di lahan (m/m).
- $slp_{ch}$  : rata-rata lereng di sungai (m/m).
- $N$  : koefisien kekasaran manning

Pada saat waktu konsentrasi lebih dari 1 hari hal ini menyebabkan tidak semua limpasan permukaan pada hari tersebut akan masuk sungai utama, ada yang tertahan di lahan (mengalami *lag*). SWAT menghitung hal tersebut dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q_{surf} = \left( Q'_{surf} + Q_{(stor,i-1)} \right) \left[ 1 - \exp\left( \frac{surlag}{t_{conc}} \right) \right] \quad (2.9)$$

Di mana,

- $Q_{surf}$  : jumlah aliran permukaan yang mencapai sungai utama pada satu hari (mm)  
 $Q'_{surf}$  : jumlah aliran permukaan yang dibangkitkan dalam satu hari (mm)  
 $Q_{stor,i-1}$  : jumlah aliran permukaan yang tersimpan dari hari sebelumnya (mm)  
 surlag : koefisien jeda aliran permukaan  
 $t_{conc}$  : waktu konsentrasi pada sub DAS (jam)

### 2.1.3 Seepage / Rembesan (Wseep)

Seepage merupakan jumlah total airtanah yang bergerak secara vertical meninggalkan lapisan tanah melalui perkolasi dan crack flow / bypass flow. Dalam model SWAT, perkolasi dihitung di setiap lapisan tanah menggunakan analogi *tiping bucket*. Perkolasi akan terjadi jika kandungan airtanah ( $SW_{ly}$ ) pada lapisan tersebut melebihi kapasitas lapangnya ( $FC_{ly}$ ). Secara matematika, prosedur tersebut dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 SW_{ly} > FC_{ly} &\Rightarrow SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \\
 SW_{ly} \leq FC_{ly} &\Rightarrow SW_{ly,excess} = 0
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

Jumlah air yang diperkolasikan ke lapisan yang di bawahnya dihitung dengan metode *storage routing*. Persamaan yang digunakan untuk menghitung jumlah air yang diperkolasikan ke lapisan di bawahnya ( $w_{perc,ly}$ ) adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 w_{perc,ly} &= SW_{ly,excess} \left( 1 - \exp \left[ \frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \\
 TT_{perc} &= \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat,ly}}
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

di mana:

- $SW_{(ly,excess)}$  : Potensi jumlah air yang meninggalkan lapisan tanah ly (mm)  
 $SAT_{ly}$  : Jumlah air dalam kondisi jenuh pada lapisan tanah ly (mm)  
 $K_{(sat,ly)}$  : Konduktifitas hidrolik jenuh pada lapisan tanah ly (mm)  
 $TT_{perc}$  : Travel time untuk perkolasi (jam)

Bypass flow hanya terjadi di jenis tanah grumusol / vertisol yang memiliki kandungan liat cukup tinggi. Jenis tanah tersebut biasanya dipergunakan sebagai sawah. Pada saat kering tanah tersebut akan mengalami keretakan (crack). Pada saat terjadi hujan retak-retak di tanah tersebut akan terisi air dan akan meresap ke dalam tanah.

### 2.1.4 Lateral Flow (QLat)

Lateral flow signifikan di daerah berlereng yang memiliki konduktivitas hidrolik yang tinggi di lapisan permukaan dan di bawahnya terdapat lapisan permeable / semipermeable. Model SWAT menghitung lateral flow berdasarkan model yang dikembangkan oleh Sloan et. al. (1984). Jumlah lateral flow yang sampai di outlet main channel ( $QLat_t$ ) adalah sebagai berikut:



$$QLat'_t = 0.024 \left( \frac{2 \times SW_{ly,excess} \times K_{sat} \times SLP}{\phi_d \times L_{Hill}} \right)$$

$$QLat_t = \left( QLat'_t + QLat_{store,t-1} \right) \left( 1 - \exp \left( \left| \frac{-1}{TT_{lag}} \right| \right) \right) \quad (2.12)$$

Dimana:

- $TT_{lag}$  : lateral travel time (jam)
- $\phi_d$  : porositas di lapisan tanah yang dapat di drainase (mm/mm)
- SLP : kelerengan lahan (m/m)
- $L_{Hill}$  : panjang lereng (m)

### 2.1.5 Return Flow atau Groundwater flow (Qgw)

Air perkolasi dan bypass flow ( $w_{seep}$ ) dari lapisan tanah selanjutnya memasuki akuifer (groundwater storage). Air yang keluar dari profil tanah ini mengalami delay ( $\delta_{gw}$ ) ketika memasuki akuifer. Lamanya *delay* ini tergantung kepada tinggi *water table* dan karakteristik hidrolik formasi geologi di sekitar lapisan akuifer sehingga jumlah air yang keluar dari profil tanah dengan jumlah air yang memasuki *groundwater storage* berbeda. Venetis (1969) and Sangrey et al. (1984) telah merumuskan jumlah air yang masuk ke *groundwater storage* dari profil tanah ( $w_{rchrq,i}$ ) sebagai berikut:

$$w_{rchrq,i} = w_{rchrq,i-1} \times \exp \left[ \frac{1}{\delta_{gw}} \right] + w_{seep} \times \left( 1 - \exp \left[ \frac{1}{\delta_{gw}} \right] \right) \quad (2.13)$$

dimana  $\delta_{gw}$  merupakan delay time (hari) karena faktor karakteristik hidrolik formasi geologi di sekitar groundwater zone.

Air yang tertampung dalam *groundwater storage* (GW) akan memberikan kontribusi terhadap aliran sungai sebagai *return flow* / *groundwater flow* jika melebihi nilai ambang spesifik *groundwater storage* untuk mengalirkan *base flow* ( $GW_{thr,q}$ ). Besarnya *groundwater flow* ini sangat tergantung kepada faktor *baseflow recession constant* ( $\alpha_{gw}$ ). Prosedur untuk menghitung *groundwater flow* sebagai berikut:

$$GW > GW_{thr,q} \Rightarrow Qgw_i = Qgw_{i-1} \times \exp[-\alpha_{gw}] + W_{rchrq} \times (1 - \exp[-\alpha_{gw}])$$

$$GW \leq GW_{thr,q} \Rightarrow Qgw_i = 0 \quad (2.14)$$

### 2.1.6 Penguapan dari groundwater (Wrevap)

Penguapan dari groundwater adalah respon dari water defisiensi di zona perakaran dan vadose zone. Air bergerak ke lapisan tidak jenuh melalui pori-pori kapiler. Jumlah air maksimum yang menguap dari groundwater ( $W_{revap,max}$ ) dihitung oleh model SWAT dengan persamaan berikut:

$$W_{revap,max} = \beta_{rev} \times E_0 \quad (2.15)$$

dimana:  $\beta_{rev}$  : koefisien revap (nilai 0.02 to (numerical range) 0.2) dan  $E_0$ : evapotranspirasi potensial (mm)

Jumlah air aktual ( $W_{revap}$ ) yang menguap dari groundwater tergantung dari besarnya jumlah groundwater minimal untuk terjadinya revap ( $GW_{thr,revap}$ ). Kondisi yang memungkinkan terjadinya penguapan dari groundwater, sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 GW &\leq GW_{thr,revap} \\
 &\Rightarrow W_{revap} = 0 \\
 GW_{thr,revap} &< GW < (GW_{thr,revap} + W_{revap,max}) \\
 &\Rightarrow W_{revap} = W_{revap,max} - GW_{thr,revap} \\
 GW &\geq (GW_{thr,revap} + W_{revap,max}) \\
 &\Rightarrow W_{revap} = W_{revap,max} - GW_{thr,revap}
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

## 2.2 Alat dan Bahan

Pengembangan aplikasi model konservasi berbasis SWAT untuk perencanaan konservasi tanah dan air menggunakan data spasial dan non-spasial. Data spasial merupakan data berbasis lokasi yang terdiri dari dua jenis data, yaitu raster dan vektor (*line*, *point* dan *polygon*). Data spasial yang digunakan dalam kegiatan ini tersaji dalam tabel Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1: Data spasial yang digunakan pada kajian SWAT Ciherang

Data Spasial	Tipe Data	Resolusi Spasial	Sumber
Digital Elevation Model (DEM)	Raster	30 m	SRTM ( <a href="http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp">http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp</a> )
Batas administrasi	Polygon	1:25.000	Rupa Bumi Indonesia, BIG
Jaringan Sungai	Line	1:25.000	Rupa Bumi Indonesia, BIG
Lokasi stasiun hujan	Point	-	BBWS Ciliwung-Cisadane
SPAS di Sungai Cisadane	Point	-	BBWS Ciliwung-Cisadane
Tutupan Lahan Tahun 2016/2017	Polygon	1: 25.000	Citra SPOT Tahun 2017, Rupa Bumi Indonesia, BIG
Tanah	Polygon	1: 250.000	Balit Tanah, Bogor

Data non-spasial Tabel 2.2 (halaman på motstående sida) merupakan data tabular. Data tabular yang digunakan dalam kegiatan ini adalah sebagai berikut :

1. Data pengukuran debit sungai di sekitar wilayah kajian
2. Data iklim (curah hujan, suhu dan kelembaban udara, kecepatan angin, radiasi surya)

3. Data parameter fisik tanah hasil analisis laboratorium sampling tanah di sekitar wilayah kajian meliputi tekstur 3 fraksi, kapasitas air tersedia (*Available Water Capacity/ AWC*), permeabilitas tanah, *bulk density* (BD), Kapasitas lapang, titik layu permanen
4. Data pemanfaatan air oleh perusahaan-perusahaan di sekitar wilayah kajian.

Tabel 2.2: Data tabular yang digunakan pada kajian SWAT Ciherang

Data	Lokasi	Periode	Keterangan
Curah Hujan	Pasir Jaya	2010-2017	Data harian
Debit Sungai	Genteng (Cisadane)	2011-2017	Data harian

Peralatan yang digunakan dalam kegiatan ini terbagi menjadi 2 penggunaan, yaitu untuk kegiatan lapangan (pengumpulan data primer) dan untuk pengolahan & analisa data. Untuk kegiatan lapangan menggunakan GPS, kamera, sensor water level (WL16 Global Water), bor tanah, ring sample, dan meteran gulung. Untuk pengolahan & analisa data menggunakan ArcGIS 10.3, ArcSWAT 2012.10.3.19, SWATCUP V5.16, dan Microsoft Excel.

## 2.3 Kegiatan Lapangan

Kegiatan lapangan dilakukan untuk mendapatkan data primer terkait parameter-parameter yang akan digunakan dalam pengembangan model. Perincian indikator/parameter, kegiatan yang dilakukan dan peralatan yang digunakan disajikan pada **Tabel 2.3**.

## 2.4 Kalibrasi, Analisis sensitivitas Model dan Validasi

Dalam proses pengembangan model, periode data observasi dibagi menjadi 3 bagian, yaitu bagian untuk *warming up*, kalibrasi dan validasi. Output model yang digunakan dalam kalibrasi dan validasi adalah debit sungai sehingga diperlukan data observasi debit sungai harian. Untuk *warming up* model, menggunakan data debit sungai tahun 2010 (1 tahun). Untuk kalibrasi model menggunakan data tahun 20011-2014 (4 tahun). Untuk validasi model menggunakan data tahun 2015-2017 (3 tahun).

Proses kalibrasi dan analisis ketidakpastian model menggunakan *objective function* nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) dan Nash-Sutcliffe Efficiency (Nash dan Sutcliffe, 1970) dengan algoritma optimasi Sequential Uncertainty Fitting Ver.2 (SUFI2). (Abbaspour et al., 2004).

Tabel 2.3: Kegiatan lapangan yang dilakukan pada kajian SWAT

Indikator / Parameter	Kegiatan lapangan	Peralatan
Tinggi muka air sungai	Pemasangan sensor water level	WL16 Global Water
Kondisi cuaca (suhu dan kelembaban udara, hujan, kecepatan angin dan radiasi surya)	Pemasangan Automatic Weather Station (AWS)	AWS Vantage Pro2 Davis
Kondisi tutupan lahan	Ground cek lapangan kondisi tutupan lahan	Kamera, GPS
Penentuan karakteristik resapan air (laju peresapan air)	Membuat simulasi sumur resapan <sup>a</sup> dan diukur perubahan tinggi airnya menggunakan water level	WL16 Global Water
Water table	Pengukuran kedalaman muka air sumur gali masyarakat	Meteran gulung

<sup>a</sup>Kedalaman lubang resapan 1 m dengan diameter 8-10 cm

## 3 KEADAAN UMUM WILAYAH KAJIAN

### 3.1 Lokasi Wilayah Kajian

#### 3.1.1 Wilayah Hidrologi

Daerah tangkapan air (DTA) sumber air Plant Subang berada di bagian hulu DAS Cipunegara (SubDAS Cipunagara Hulu), **Gbr.3.1** (halaman 14). Luas DTA sekitar 10,278 ha. Batas daerah hulu merupakan barisan pegunungan dari Gn. Tangkuban Perahu hingga Gn. Bungkitunggul (Gn. Keramat, Gn. Pamayonan, Gn. Lingkung, Gn. Cikendung, dan Gn. Korsi). Aliran Sungai Cipunagara berasal dari Gn. Bungkitunggul (sebelah Selatan wilayah subDAS). Daerah hulu bagian barat (lereng Gn. Tangkuban Perahu) merupakan daerah tangkapan air Sungai Ci Pabelah (Anak Sungai Cipunagara).

*Recharge area* sumber air Plant Subang berada pada ketinggian<sup>1</sup> 489 – 800 m dpl, yang meliputi daerah penyangga dan daerah *recharge area* utama. Luas penyangga *recharge area* sekitar 624 ha dan *recharge area* utama sekitar 662 ha. Luas total *recharge area* 1,286 ha. *Recharge area* utama berada pada elevasi 670-798 m dpl. Sebagian besar *recharge area* sumber air Plant Subang merupakan bagian dari DTA Sungai Ci Pabelah. Sungai-sungai yang melintasi *recharge area* adalah Sungai Ci Pangasahan, Ci Cenang dan Ci Euyeub.

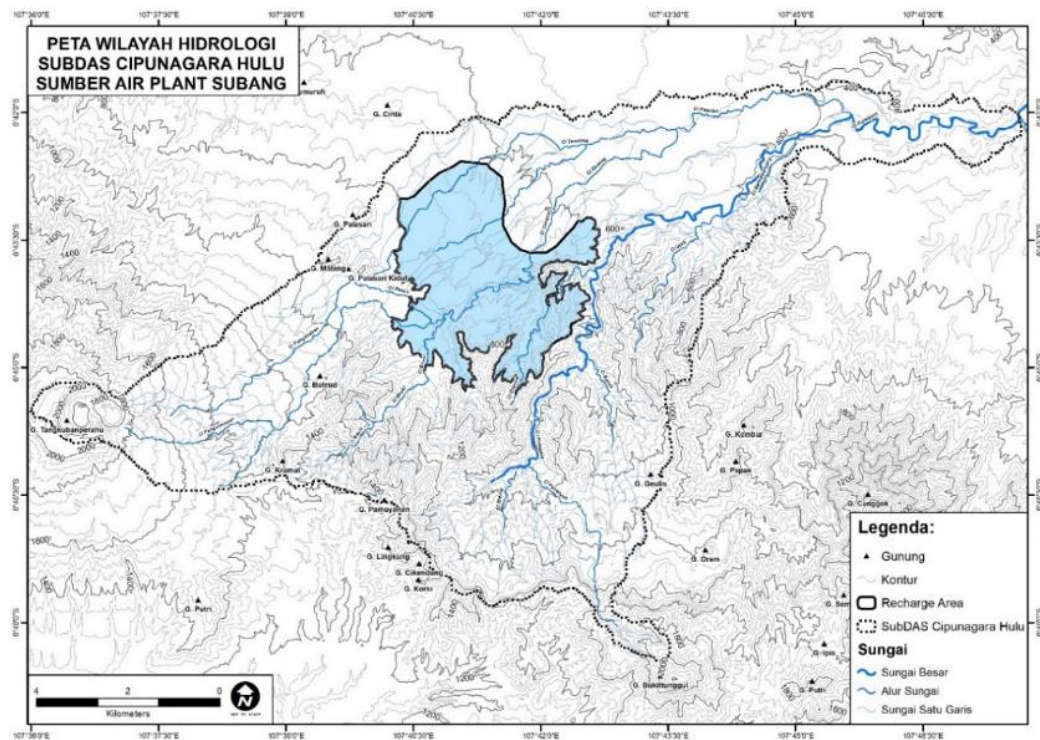
#### 3.1.2 Wilayah Administrasi

SubDAS Cipunagara Hulu berada dalam wilayah administrasi<sup>2</sup> Kabupaten Bandung Barat (2.1%) dan Subang (97.8%), **Gbr.3.2** (halaman 15). Wilayah Kabupaten Bandung Barat berbatasan langsung dengan SubDAS Cipunagara Hulu di bagian utara (Kecamatan Lembang). Ada 4 desa di Kecamatan Lembang yang masuk SubDAS Cipunagara Hulu, yaitu Cikahuripan (38.4 ha), Jayagiri (54.5 Ha), Sukajaya (20.6 Ha), dan Suntenjaya (97.1 Ha). Semua daerah ini berada dalam Kawasan Hutan yang dikelola oleh Perhutani.

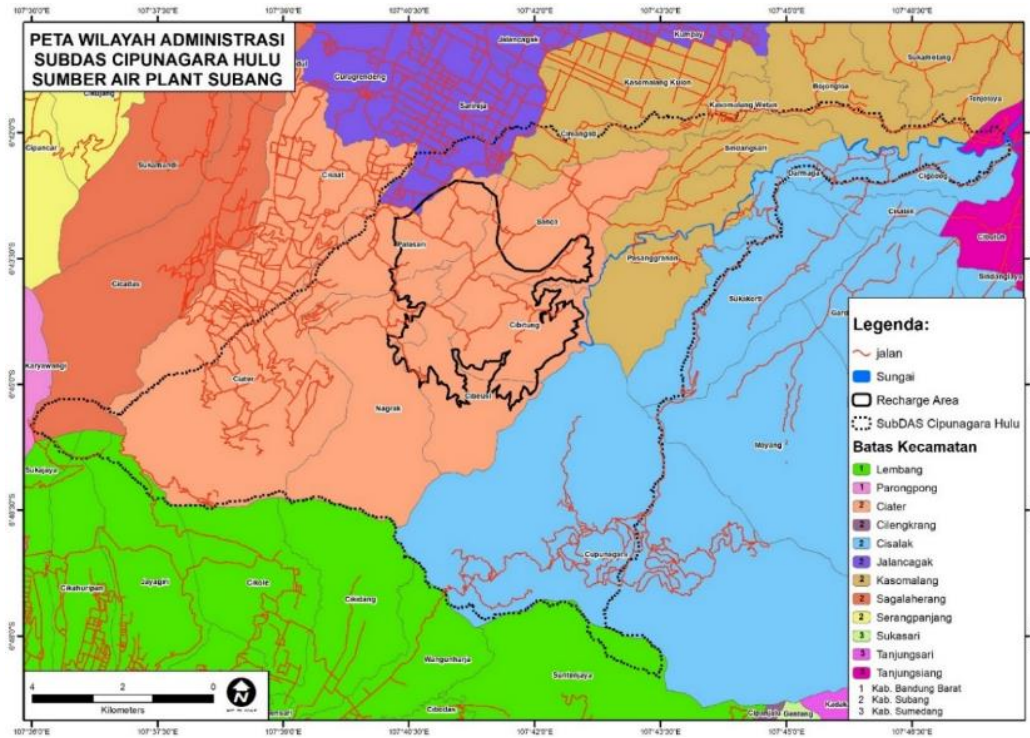
---

<sup>1</sup>Kajian Hidrogeologi UNPAD Tahun 2016-2017

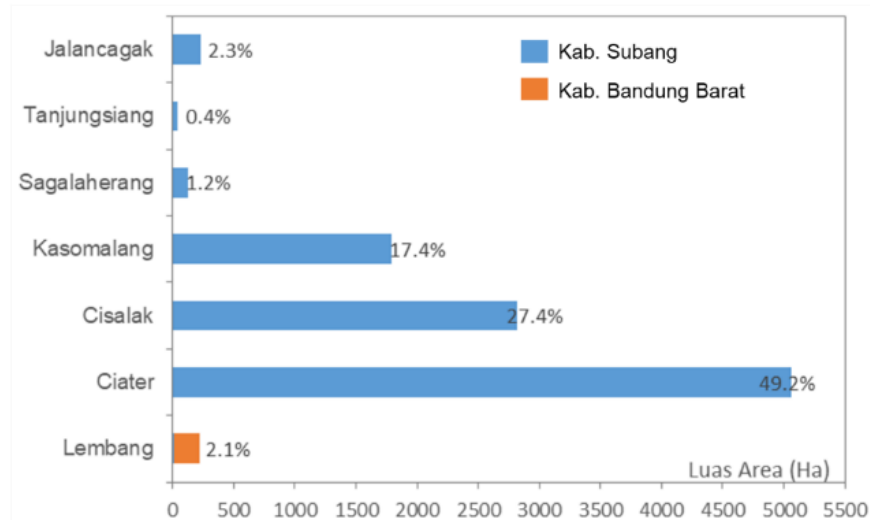
<sup>2</sup>Batas wilayah administrasi dari Badan Informasi Geospasial (BIG) Skala 1:25.000



Gambar 3.1: Peta wilayah hidrologi (SubDAS Cipunagara Hulu) sumber air Plant Subang

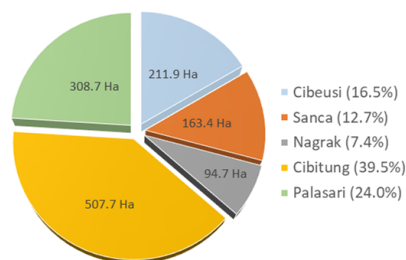


Gambar 3.2: Peta SubDAS Cipunagara Hulu dalam liputan wilayah administrasi (Kab. Bandung Barat dan Kab. Subang)



Gambar 3.3: Proporsi wilayah kecamatan yang berada di SubDAS Cipunagara Hulu

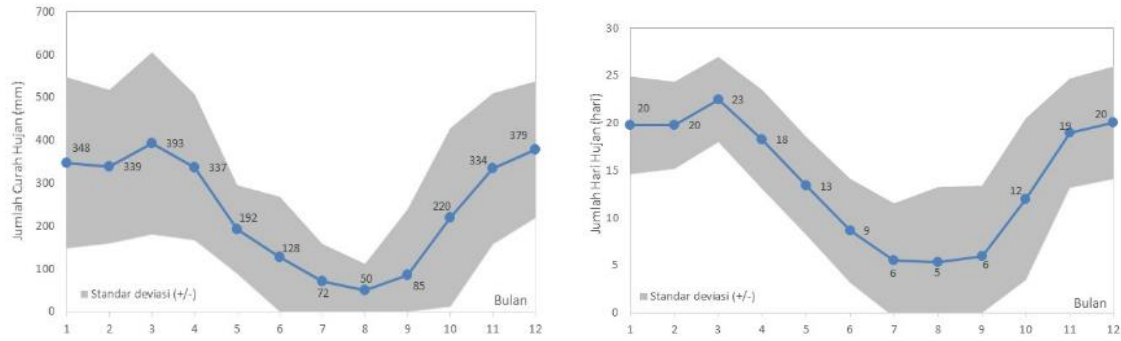
Untuk wilayah Kabupaten Subang, SubDAS Cipunagara Hulu meliputi 6 wilayah kecamatan (**Gbr.3.3**), yaitu Kecamatan Ciater, Cisalak, Kasomalang, Sagalaherang, Tanjungsiang dan Jalancagak. Sekitar 94.1% SubDAS Cipunagara Hulu berada dalam wilayah Kecamatan Ciater, Cisalak dan Kasomalang. Wilayah Kecamatan Ciater yang berada dalam SubDAS Cipunagara Hulu meliputi 8 desa, yaitu Desa Ciater, Cibeusi, Cibitung, Cisaat, Nagrak, Palasari, dan Sanca. Diantara desa-desa tersebut, yang paling luas adalah Desa Ciater (13.97%), Nagrak (10.51%), dan Sanca (7.37%). Wilayah Kecamatan Cisalak yang berada dalam SubDAS Cipunagara Hulu meliputi 4 desa, yaitu Desa Cupunagara, Cigadog, Darmaga, dan Sukakerti. Diantara desa-desa tersebut, yang paling luas adalah Desa Cupunagara (20.86%). Wilayah Kecamatan Kasomalang yang berada dalam SubDAS Cipunagara Hulu meliputi 7 desa, yaitu Desa Bojongloa, Cimanglid, Kasomalang Kulon, Kasomalang Wetan, Pasanggrihan, Sindangsari, dan Tenjolaya. Diantara desa-desa tersebut, yang paling luas adalah Desa Pasanggrihan (8.84%).



Gambar 3.4: Proporsi wilayah desa di *recharge area*

Daerah *recharge area* sumber air plant Subang berada di Kecamatan Ciater (**Gbr.3.4**); meliputi Desa Nagrak (7.4%), Cibeusi (16.5%), Cibitung (39.5%), Sanca (12.7%), dan Palasari (24.0%). *recharge area* sumber air plant Subang paling luas berada di Desa Cibitung (507.7 ha), selanjutnya Desa Palasari (308.7 ha). *Recharge area* utama berada di Desa Cibitung dan Desa Cibeusi saja.





Gambar 3.5: Distribusi bulanan jumlah curah hujan (*kiri*) dan hari hujan (*kanan*) di wilayah kajian

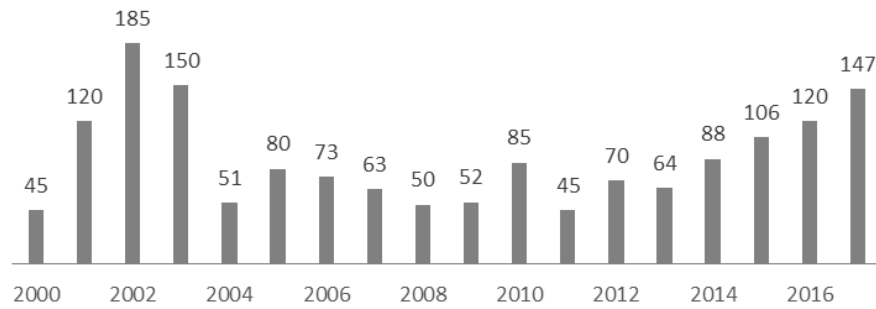
### 3.2 Iklim

Jumlah curah hujan<sup>3</sup> di wilayah kajian sangat variatif, berkisar antara 1500 – 4200 mm (rata-rata 2850 mm) dengan jumlah hari hujan berkisar 122-219 hari (rata-rata 170 hari hujan). Pola Monsunal mempengaruhi pola distribusi curah hujan di wilayah kajian (**Gbr.3.5**). Musim kemarau berlangsung pada Bulan Mei – Oktober (puncak pada Agustus) dan musim hujan berlangsung pada Bulan November-April. Jumlah curah hujan pada musim hujan relative tinggi (lebih dari 100 mm). Namun terdapat bulan-bulan pada musim kemarau dengan jumlah curah hujan kurang dari 60 mm (sifat kering). Rata-rata wilayah kajian mengalami 9 bulan basah dan 3 bulan kering. Dalam rentang waktu 2000-2017, curah hujan harian maksimum paling tinggi pada tahun 2002 (185 mm), selanjutnya Tahun 2017 (150 mm) dan Tahun 2003 (147 mm), **Gbr.3.6**.

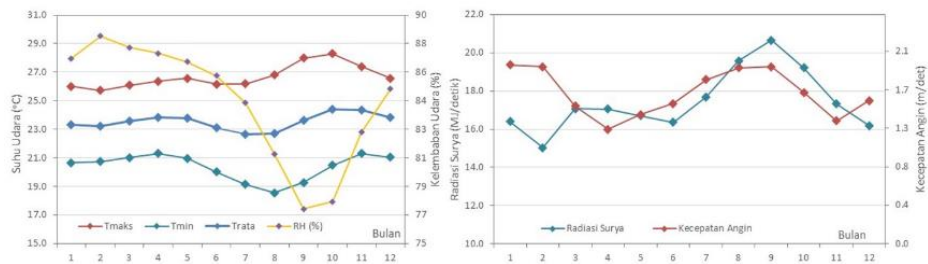
Wilayah kajian adalah daerah tropis sehingga variasi unsur-unsur iklim<sup>4</sup> yang lainnya relatif rendah (**Gbr.3.7**). Rata-rata suhu udara maksimum bulanan berkisar antara 28.3 – 25.7 °C dan suhu udara minimum berkisar antara 18.6-21.3 °C. Suhu udara maksimum paling tinggi terjadi pada Bulan September-Oktober dan suhu udara minimum paling rendah terjadi pada Bulan Agustus. Rata-rata kelembaban udara bulanan berkisar antara 77.3-88.6%. Pada musim kemarau kelembaban udara menurun secara bertahap, kelembaban udara paling rendah pada bulan September-Oktober. Pada musim hujan kelembaban udara lebih dari 85%. Radiasi surya berkisar antara 15-20.7 MJ/detik; pada musim kemarau radiasi surya meningkat secara bertahap dan tertinggi pada Bulan September karena tutupan awan mendung rendah. Rata-rata kecepatan angin bulanan berkisar antara 1.3-2 m/detik dengan standar deviasi sebesar 0.25 m/detik.

<sup>3</sup>Lokasi pengukuran pos CH di Cisalak-Pesanggrahan (Lokasi 6.7153 LS, 107.742 BT, 419 m dpl) tahun 2000-2017 (17 tahun), data harian.

<sup>4</sup>Downscaling dari data stasiun di lokasi pengukuran posCH Cisalak-Pesanggrahan



Gambar 3.6: Data seri curah hujan harian maksimum (mm) di wilayah kajian



Gambar 3.7: Distribusi bulanan suhu-kelembaban udara (Kiri) dan radiasi surya-kecepatan angin (Kanan) di wilayah kajian

### 3.3 Geologi

Silitonga (2003) telah memetakan formasi geologi di wilayah kajian. Wilayah kajian meliputi formasi geologi hasil gunungapi lebih tua (Qvb), hasil gunungapi tua tak teruraikan (Qvt), hasil gunungapi tua lava (Qvl), tuf berbatuapung (Qyt), lava (Qyl), tuf pasir (Qyd), kolumium (Qc), dan aluvium (Qa). Penjelasan sebagai berikut:

- Hasil gunungapi lebih tua (Qvb) terdiri atas breksi, lahar, dan tuf pasir berlapis-lapis. Satuan ini memiliki ketebalan mencapai 600 m, kemiringan relatif kecil, dan berumur Plistosen Bawah.
- Hasil gunungapi tua tak teruraikan (Qvt) terdiri atas breksi vulkanik, lahar, dan lava berselang-seling.
- Hasil gunungapi tua lava (Qvl) berupa basal, menunjukkan kekar lempeng dan kekar tiang, sebagian telah terpropilitasikan. Kedua kelompok batuan hasil gunungapi tua ini berumur Plistosen Tengah.
- Tuf berbatuapung (Qyt) terdiri atas pasir tufan, lapili, bom, lava berongga, dan kepingan-kepingan andesit-basal padat yang bersudut dengan banyak bongkahan dan pecahan batuapung. Satuan ini berasal dari G.Tangkubanparahu (erupsi "A"; van Bemmelen, 1934).

- Lava (Qyl) produk G.Tangkubanparahu (erupsi "B"; van Bemmelen, 1934)., banyak tersingkap di bagian hulu hingga hilir alur S.Cipabela, S.Cicenang, dan S. Cibeusi.
- Tuf pasir (Qyd) terdiri atas tuf, lahar, lapili dan lapisan-lapisan breksi. Tuf berasal dari G.Tangkubanparahu (erupsi "C"; van Bemmelen, 1934). Tuf pasir coklat, sangat sarang, mengandung kristal-kristal hornblenda yang sangat kasar. Lahar lapuk berwarna kemerah-merahan. Ketiga kelompok batuan ini merupakan produk letusan G.Tangkubanparahu pada Plistosen Akhir.
- Koluvium (Qc) terutama berasal dari reruntuhan hasil gunungapi tua (Qvu) yang banyak terjadi di wilayah perbukitan. Endapan ini terdiri atas bongkahan batuan beku berkomposisi andesit-basal, pasir tuf, dan lempung tuf.
- Endapan termuda di daerah penelitian adalah aluvium (Qa), terdiri atas material lepas berupa lempung, lanau, pasir, dan kerikil. Aluvium merupakan endapan sungai sekarang (modern). Koluvium dan aluvium dalam tatanan umur geologi termasuk dalam Holosen - Resen.

Batuan wilayah kajian dibedakan menjadi 8 satuan batuan vulkanik dan endapan (Gbr.3.8), yaitu sebagai berikut:

- Breksi vulkanik (Qvbx), Satuan ini terdiri atas lava di bagian atas dan breksi di bagian bawah. Lava banyak tersingkap di dasar dan dinding sungai. Komponen berupa batuan beku basal berstruktur scoria dan batuan beku andesit ukuran kerikil – kerakal, namun lebih dominan berukuran kerikil. Mataair muncul pada kontak litologi, yaitu batuan di atasnya adalah lava sheeting joint dan bagian bawah adalah breksi tuffaan. Satuan breksi vulkanik tersingkap secara lateral sekitar 5 km<sup>2</sup>, memanjang pada alur S.Cipunegara hulu ke arah hilir, diantaranya Desa sumber air **AQUA** di Desa Cipondoh, Desa Cimalingping, hilir S.Cipatat di Desa Pasanggrahan, dan muara S.Cipabela.
- Tuf (Qvt), Satuan tuf terdiri atas tuf, breksi, dan lava andesitis. Tuf pada umumnya menempati wilayah bagian atas dan banyak tersingkap di puncak dan lereng perbukitan. Lava andesit banyak tersingkap di tebing yang curam, dinding dan dasar sungai yang relatif sempit. Breksi pada umumnya tersingkap bersama dengan lava andesit dan selalu terletak di bagian bawah (Breksi dibagian bawah, lava andesit di bagian atas). Pada umumnya merupakan morfologi perbukitan curam dengan pola pengaliran dendrito-rektangular.
- Basal bertekstur kasar (Qvbc), terdiri atas lava basal dan breksi vulkanik. Hasil survei lapangan menunjukkan bahwa basal selalu berada di atas breksi. Secara lateral penyebaran satuan ini menyerupai lidah, menempati lembah sungai-sungai yang berpola pengaliran paralel. Satuan ini membentuk morfologi perbukitan berlereng landai, dari puncak kawah G.Tangkubanparahu hingga lembah S.Cipabela ke arah hilir.

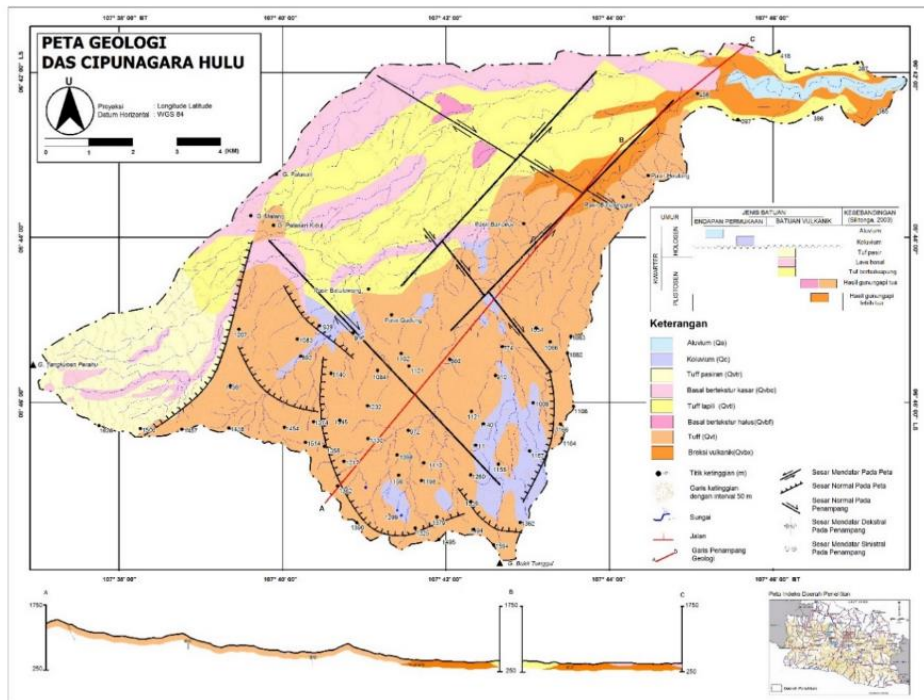
- Tuf lapili (Qvtl), Tuf lapili banyak tersingkap di bagian barat-utara DAS Cipunagara hulu. Satuan ini menempati lereng berkemiringan landai hingga daerah pedataran di bagian hilir S.Cipunagara hulu. Batuan ini memiliki porositas yang relatif tinggi dan di beberapa lokasi banyak mengandung air.
- Basal bertekstur halus (Qvbf) , merupakan lava basal dengan tekstur afanitik. Tersingkap di tekuk lereng sekitar Kampung Ciwarangga pada S.Cipatat dan S.Cipabela.
- Tuf pasiran (Qvtr), Tuf pasiran pada umumnya telah mengalami pelapukan yang intensif, warna segar kelabu kekuningan, warna lapuk coklat kemerahan, berbutir kasar, dapat di remas, menyudut – menyudut tanggung. Satuan ini banyak tersingkap di wilayah barat daya DAS Cipunagara hulu, di lereng G.Tangkubanparahu.
- Koluvium (Qc), merupakan material endapan yang terjadi di lereng-lereng perbukitan. Endapan ini terdiri atas material lepas berasal dari reruntuhan satuan tuf, yang terdiri atas bongkahan andesit-basal, pasir tuff, dan lempung tuff. Biasanya membentuk morfologi mirip kipas di lereng-lereng perbukitan. Sifat material yang lepas, menyebabkan endapan ini mampu menyimpan air dalam jumlah banyak, namun mudah longsor karena terletak di lereng perbukitan. Batuan ini banyak tersingkap di lereng lembah Cibadak bagian hulu, Pr.Citamiang, lereng lembah S.Cibeusi bagian hulu.
- Aluvium (Qa), terdiri atas material lepas berupa lempung, lanau, pasir, dan kerikil. Endapan ini biasanya terbentuk di daerah pedataran atau zona depresi.

### 3.4 Hidrogeologi

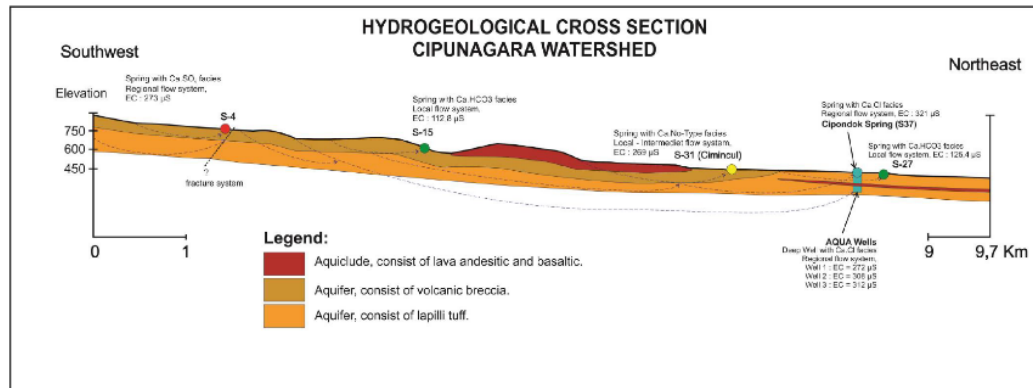
Cekungan air tanah di wilayah kajian masuk dalam cekungan Tangkubanparahu-Cijambe (Cekungan Ciater)<sup>5</sup>. Cekungan Ciater dimulai dari lereng G. Tangkubanparahu melandai ke arah utara, dan di bagian utara cekungan ini dibatasi oleh struktur geologi di perbukitan Ranggawulung. Cekungan ini memiliki dua daerah resapan utama yaitu di bagian tekuk lereng Gn. Tangkubanparahu, dan di lereng perbukitan Ranggawulung yang membujur berarah barat-timur. Batuan yang menempati cekungan ini adalah lava, batupasir tufaan, dan tufa pasiran (Silitonga, 2003). Secara hidrolika airtanah mengalir mengikuti kemiringan lapisan, sehingga air hujan yang turun di permukaan akan masuk ke dalam tanah dan mengikuti landaian kemiringan batuanya. Debit mataair pada cekungan ini bisa mencapai > 200 l/detik, seperti di Kasomalang, Bunihayu, curugrendeng, Cipancar dan Ciater (Mulyana, 2003). Berdasarkan peraturan<sup>6</sup>, airtanah bebas yang dapat digunakan setiap tahun adalah 413 juta m<sup>3</sup>/ tahun, dan airtanah tertekan yang dapat digunakan setiap tahun adalah 30 juta m<sup>3</sup>/tahun.

<sup>5</sup>Lampiran SK Menteri Energi dan Sumberdaya Mineral No. 716 K / 40 / MEM / 2003

<sup>6</sup>SK Menteri Energi dan Sumberdaya Mineral No. 716 K / 40 / MEM / 2003



Kuva 3.8: Peta geologi di wilayah kajian (sumber: LAPI, 2010)



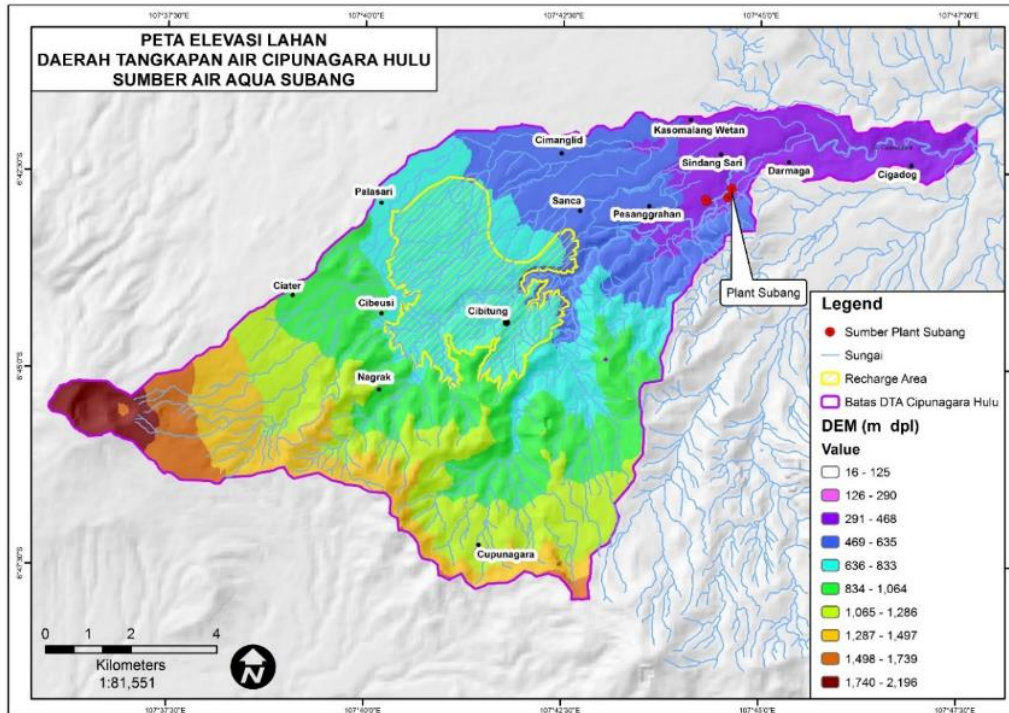
Gambar 3.9: Penampang melintang hidrogeologi di wilayah kajian (UNPAD, 2017)

Pada batuan vulkanik yang relatif keras (lava) yang berperan menyimpan airtanah adalah porositas sekunder. Porositas ini dapat terbentuk akibat intensifnya kekar yang terjadi pada batuan, misalnya lava terkekarkan. Berlimpahnya mataair di wilayah kajian ini menunjukkan sistem airtanah yang relatif dangkal. Mataair banyak ditemukan pada zona depresi atau sesar, kontak litologi yang berbeda, dan pada zona tekuk lereng. Kemunculan mataair juga dapat mengindikasikan adanya struktur geologi. Sebagian besar berasal dari resapan lokal atau *local recharge*, sebaliknya pada saat musim kering berasal dari elevasi yang relatif lebih tinggi dari elevasi mata air tersebut.

Hasil analisa hidrokimia (LAPI, 2010) menunjukkan bahwa system akuifer di wilayah kajian adalah tidak tertekan (*unconfined aquifer*). Ada 4 fasies airtanah yang berkembang di kawasan DAS Cipunagara. Keempat jenis fasies tersebut adalah Ca, Na-K, Cl; Ca, Na-K, Cl, HCO<sub>3</sub>; Ca, Na-K, HCO<sub>3</sub>; dan Ca, Cl, HCO<sub>3</sub>. Fasies Ca, Na-K, Cl berkembang pada satuan tuf dan breksi vulkanik. Fasies Ca, Na-K, Cl, HCO<sub>3</sub> berkembang pada satuan breksi vulkanik, merupakan sistem akifer bersistem rekahan. Fasies Ca, Na-K, HCO<sub>3</sub> berkembang pada satuan basal bertekstur kasar dan breksi vulkanik. Sedangkan sumber air AQUA di Desa Cipondoh merupakan fasies Ca, Cl, HCO<sub>3</sub>, berkembang pada satuan tuf, merupakan daerah zona sesar dan zona depresi sehingga terjadi percampuran air akifer tertekan dan air akifer bebas. UNPAD (2017) menekankan sumber air AQUA mengandung EC yang tinggi, ini menunjukkan sumber air AQUA memiliki waktu sirkulasi (*residence time*) yang panjang atau termasuk kedalam sistem aliran intermediate sampai regional

Berdasarkan hasil analisis isotop <sup>14</sup>C (UNPAD, 2017), secara umum air tanah dari sumber air AQUA sumur 1, sumur 2 dan sumur 3 berkisar antara 750 tahun BP hingga 950 tahun BP. Dalam terminologi *groundwater dating*, air tanah pada kisaran umur tersebut tergolong berumur muda dan untuk keberlangsungannya secara berkesinambungan sangat bergantung terhadap pasokan air hujan dari daerah resapan sehingga kelestarian daerah resapan perlu terjaga dengan baik.





Gambar 3.10: Sebaran kelas elevasi lahan di wilayah kajian

### 3.5 Topografi

Elevasi<sup>7</sup> wilayah kajian berkisar dari 291-2,054 m dpl. Elevasi paling rendah berada di sekitar outlet Sungai Cipunagara Hulu (Desa Cibuluh, Cigadog, Bojongloa, Tenjolaya). Elevasi paling tinggi berada di sekitar lereng Gn. Tangkuban Perahu (**Gbr.3.10**).

Berdasarkan kondisi geomorfologi, wilayah kajian dibagi 3 satuan geomorfologi, yaitu:

- Satuan geomorfologi perbukitan curam menempati wilayah SubDAS Cipunagara Hulu bagian selatan, tengah, hingga tenggara. Kemiringan lereng lebih dari 30%. Lembah sungai relatif dalam dan sempit. Tekstur pengaliran halus menunjukkan bahwa kerapatan pengaliran relatif tinggi. Kondisi ini mengindikasikan banyak mataair muncul di wilayah ini. Tekstur morfologi cenderung kasar menunjukkan bahwa wilayah ini tersusun oleh batuan yang relatif keras namun mudah ditembus oleh aliran air. Hal ini terkait dengan banyaknya retakan akibat pengaruh stuktur geologi yang cukup intensif.
- Satuan geomorfologi perbukitan landai menempati DAS Cipunagara bagian barat dan utara, memanjang dari barat daya hingga timur laut. Kemiringan lereng di

<sup>7</sup>Berdasarkan data digital elevation model (DEM) SRTM resolusi spatial 30m

Tabel 3.1: Luas kelas lereng di wilayah kajian

Kelas lereng (%)	Keterangan	Luas	
		(Ha)	(%)
0-8	Datar	2,075	20.2
8-15	Bergelombang	2,111	20.5
15-25	Agak curam	2,224	21.6
25-45	Curam	2,445	23.8
> 45	Sangat Curam	1,423	13.8
Total		10,278	100.0

Sumber: hasil analisa data DEM SRTM resolusi 30 meter

wilayah ini berkisar dari 7 s/d 15 %. Lembah tidak terlalu dalam dan hubungan antar lembah sungai relatif sejajar. Tekstur sungai halus menunjukkan kerapatan pengaliran relatif tinggi dengan segmen sungai relatif lebih panjang dibandingkan sungai-sungai yang berada pada satuan geomorfologi perbukitan curam. Kondisi ini mengindikasikan batuan yang menyusun kawasan ini relatif lebih halus dan lunak, kecuali di beberapa bagian.

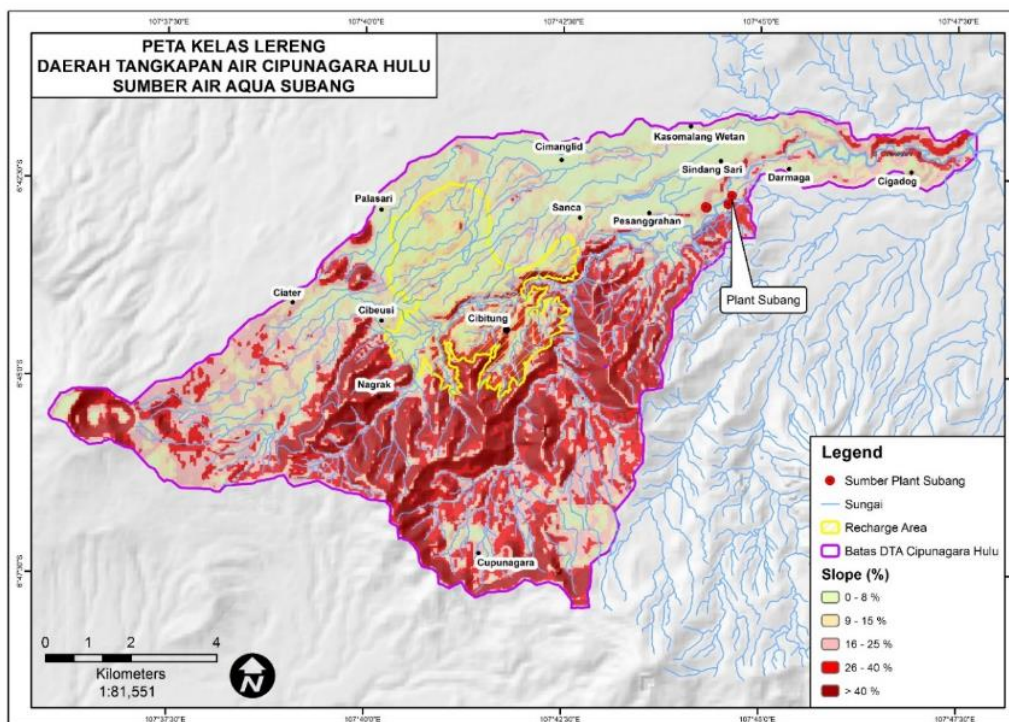
- Satuan geomorfologi pedataran menempati bagian hilir SubDAS Cipunagara Hulu. Kemiringan lereng rata-rata berkisar 2%, di beberapa lokasi bahkan kurang dari 2%. Sungai-sungai yang ada di wilayah ini menunjukkan pola anastomotik, yaitu bermeander, di beberapa lokasi saling menganyam, lembah sungai relatif lebar dan dangkal, merupakan kawasan limpah banjir. Energi kinetik air yang relatif menurun akibat rendahnya gradien sungai mengakibatkan erosi lateral lebih dominan dibanding erosi vertikal. Kondisi ini mengindikasikan bahwa wilayah tersebut tersusun oleh material yang relatif belum padu dan lunak.

Berdasarkan kelas lereng, wilayah kajian dibagi 5 kelas lereng; yaitu datar (0-8%), bergelombang (8-15%), agak curam (15-25%), curam (25-45%), dan sangat curam (lebih dari 45%). Semua kelas lereng hampir tersebar merata, kecuali kelas lereng sangat curam (Tabel 3.1 (halaman 24)). Kelas lereng curam dan sangat curam mendominasi wilayah kajian (47.6%). Kelas lereng ini banyak ditemukan di wilayah selatan wilayah kajian (termasuk wilayah *recharge area*), sekitar wilayah Desa Cupunagara, Cibitung dan Nagrak (**Gbr.3.11**).

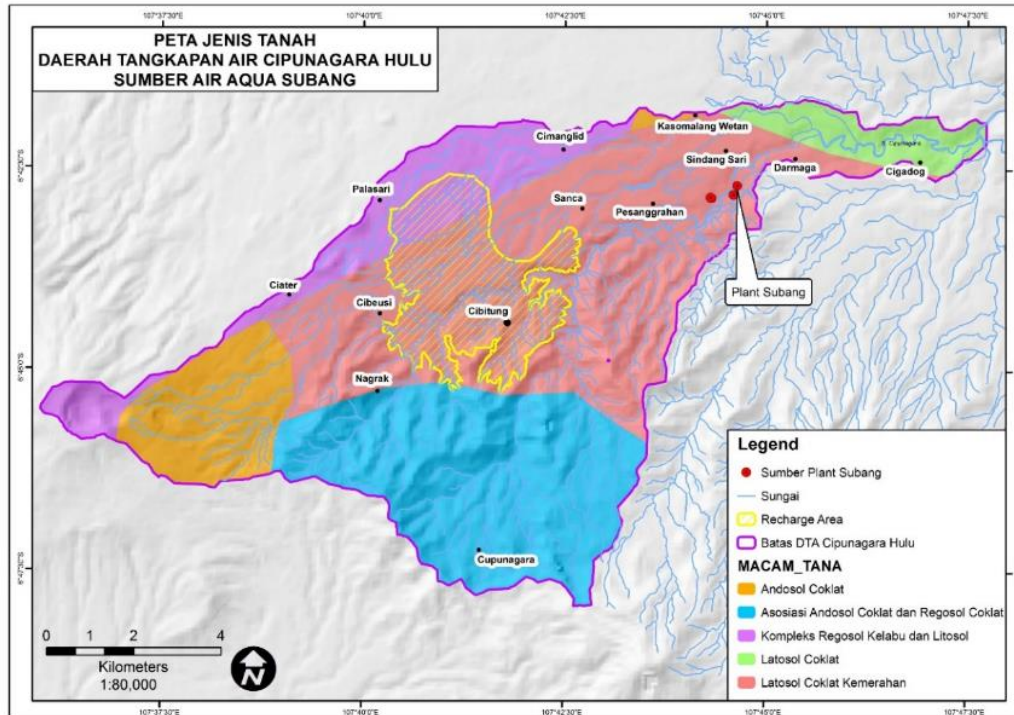
### 3.6 Jenis Tanah

Berdasarkan peta jenis tanah (**Gbr.3.12, Tabel 3.2**), terdapat 5 jenis tanah dalam wilayah kajian, yaitu asosiasi andosol coklat & regosol coklat, andosol coklat kekuningan, kompleks regosol kelabu & litosol, latosol coklat kemerahan, dan latosol coklat. Jenis tanah yang tersebar dominan adalah latosol coklat kemerahan (42%) di bagian tengah hingga hilir wilayah kajian (termasuk wilayah *recharge area*). Jenis tanah di bagian hulu sekitar Desa Cupunagara adalah Asosiasi andosol coklat & regosol coklat (39.7%)





Gambar 3.11: Sebaran kelas lereng di wilayah kajian



Gambar 3.12: Peta jenis tanah di wilayah kajian

dan sekitar lereng Gn. Tangkuban Perahu adalah kompleks regosol kelabu & litosol (6.2%) dan andosol coklat kekuningan (10.3%). Jenis tanah kompleks regosol kelabu & latosol memanjang disekitar batas utara wilayah kajian hingga disekitar Desa Manglid (meliputi bagian utara wilayah *recharge area*).

### 3.7 Tutupan lahan / Penggunaan Lahan

Berdasarkan peta tutupan lahan<sup>8</sup> Tahun 2017 diketahui bahwa di wilayah kajian terdapat 8 jenis tutupan/penggunaan lahan (Gbr.3.13 pada halaman 28); yaitu hutan tanaman (jenis tegakan berupa pohon pinus dalam kawasan Perhutani), kebun/agroforestri, semak/belukar, tanah terbuka/rumput, sawah, pertanian lahan kering, pemukiman dan tubuh air. Sebagian besar jenis kebun/perkebunan adalah kebun teh (PTPN 8) di Kecamatan Ciater (Desa Ciater dan Palasari) dan Cislak (Desa Cupunagara), selain itu adalah lahan perkebunan masyarakat (seperti alpukat, cengkeh dan pala) dan hutan tanaman rakyat (sengon) yang ditumpangsarikan dengan nanas. Lahan sawah adalah penggunaan lahan untuk pertanian lahan basah dengan irigasi

<sup>8</sup>Data RBI Skala 1:25000 yang dikoreksi dengan data Citra SPOT7 Tahun 2017 dan hasil survey lapangan

Tabel 3.2: Luas Jenis tanah di wilayah kajian

Jenis Tanah	Luas	
	(Ha)	(%)
Asosiasi Andosol Coklat dan Regosol Coklat	4,076	39.7
Andosol Coklat Kekuningan	1,061	10.3
Kompleks Regosol kelabu dan Litosol	633	6.2
Latosol Coklat Kemerahan	4,317	42.0
Latosol Coklat	190	1.8
Total	10,278	100.0

Tabel 3.3: Luas penutupan lahan di wilayah kajian

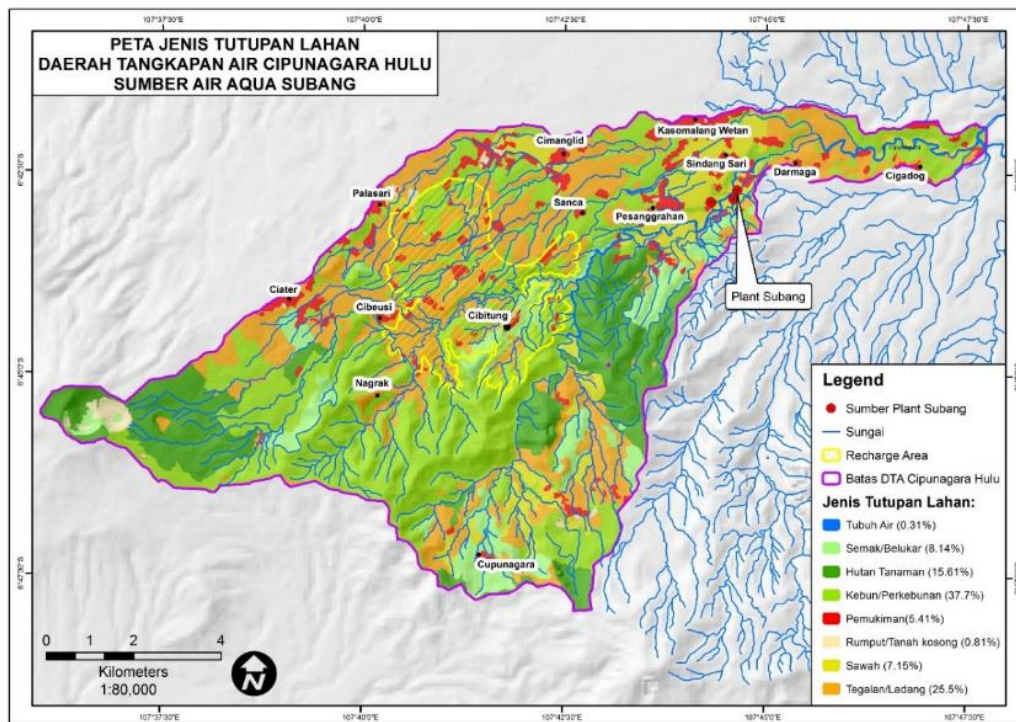
Tutupan Lahan	SubDAS Ciherang Hulu		Jumlah	
	Non recharge area	Recharge area	(Ha)	(%)
Hutan Pinus	1,603	0	1,603	15.6
Semak / Belukar	735	101	836	8.1
Kebun / Agroforestri	3,315	492	3,807	37.0
Pemukiman	481	81	562	5.5
Tanah terbuka / rumput	80	5	85	0.8
Badan air	35	0	35	0.3
Ladang / tegalan	2,022	594	2,616	25.5
Sawah	719	14	733	7.1
Jumlah	8,991	1,286	10,277	100.0

Sumber: Peta Rupa Bumi Indonesia dan SPOT7 tahun 2017

teknis atau semi teknis, sehingga penggunaannya relative lebih permanen. Sebagian besar sawah tadah hujan atau sawah non irigasi sudah berubah menjadi ladang/tegalan karena kesulitan sumber air. Ladang/tegalan yang ada adalah tanaman semusim (hortikultura), seperti tomat, cabe rawit, dan kacang panjang.

Dari delapan tipe penutupan lahan yang ada, terdapat 3 tipe tutupan lahan yang mendominasi wilayah kajian (**Tabel 3.3**), yaitu kebun/Agroforestri (37.0%), Ladang/tegalan (25.5%), dan Hutan pinus (15.6%). Ladang/tegalan cenderung tersebar merata di SubDAS Cipunagara Hulu, namun tutupan lahan bagian hulu cenderung didominasi oleh kebun teh dan hutan pinus. Sebagian besar wilayah kajian tertutup vegetasi (60.7%), selain itu adalah lahan pemukiman, sawah, tegalan/ladang. Lahan pemukiman cenderung tersebar tidak merata dari bagian tengah hingga hilir, mengelompok dan kerapatan cukup tinggi, dengan luas total sekitar 562 ha (5.5%).

Untuk tutupan lahan di daerah *recharge area* sumber air Plant Subang, lahan *agroforestry* masyarakat (492 ha / 38.2%) dan ladang/tegalan (594 ha / 46.2%) tersebar dominan. Lahan semak/belukar sekitar 101 ha (7.9%). Sebaran lahan pemukiman sekitar 81 ha (6.3%). Sebagian tanah terbuka adalah lapangan sepak bola.



Gambar 3.13: Peta jenis tutupan lahan tahun 2017 di wilayah kajian

### 3.8 Jumlah Penduduk

Sekitar 94.1% SubDAS Cipunagara Hulu berada dalam wilayah Kecamatan Ciater, Cisalak dan Kasomalang. Bagian hulu berada di wilayah Kecamatan Ciater dan sebagian Kecamatan Cisalak. Bagian hilir sebagian besar wilayah Kecamatan Kasomalang dan sebagian kecil wilayah Kecamatan Cisalak. Berdasarkan wilayah administrasi tersebut, diperkirakan jumlah penduduk<sup>9</sup> di SubDAS Cipunagara Hulu dan sekitarnya sekitar 81,192 jiwa (.). Sekitar 44.2% jumlah penduduk berada di kecamatan Kasomalang (35,876 jiwa), sekitar 36.9% berada di wilayah Kecamatan Ciater (29,978 jiwa), dan sisanya berada di wilayah Kecamatan Cisalak (15,338 jiwa). Sebaran penduduk dibagian hilir SubDAS Cipunagara Hulu relatif lebih padat dibandingkan bagian hulu (Gbr.3.14). Desa-desa di bagian hilir SubDAS Cipunagara yang memiliki kepadatan penduduk paling tinggi (lebih dari 2000 jiwa/km<sup>2</sup>) di Kecamatan Kasomalang adalah Desa Cimanglid, Kasomalang Kulon, Kasomalang Wetan, dan Sindangsari. Sedangkan di Kecamatan Kasomalang hanya Desa Dramaga. Dibagian hulu, Desa Palasari memiliki kepadatan penduduk yang relatif lebih tinggi dari lainnya (sekitar 1000 jiwa/km<sup>2</sup>).

Diperkirakan jumlah penduduk Tahun 2017 yang berada dalam *recharge area* sumber air Plant Subang sekitar 4095 jiwa. Paling banyak penduduk Desa Palasari (1,665 jiwa) dan Desa Cibitung (1,210 jiwa).

Tabel 3.4: Jumlah penduduk Tahun 2017 setiap desa di wilayah kajian dan sekitarnya (Sumber: BPS Kab. Subang Tahun 2017)

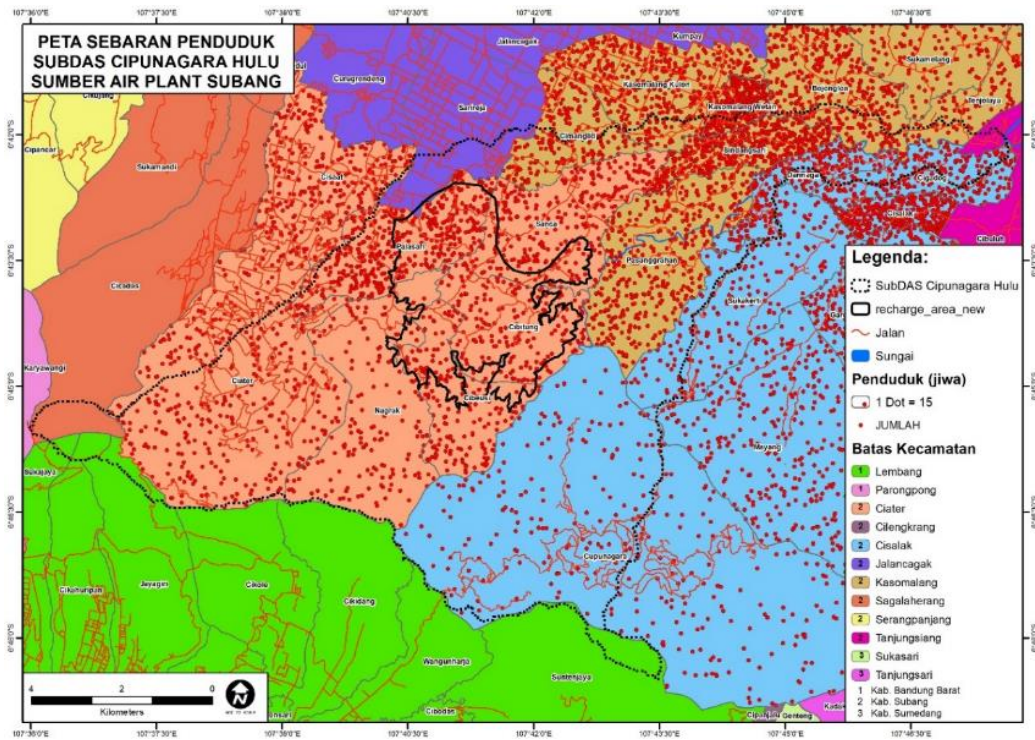
Kec.	Desa	Laki-laki	Perempuan	Total	Kepadatan
		(Jiwa)	(Jiwa)	(Jiwa)	(Jiwa/Km <sup>2</sup> )
Ciater	Ciater	2,908	2,838	5,746	572
	Cibeusi	1,376	1,519	2,895	795
	Cibitung	1,525	1,539	3,065	325
	Cisaat	2,261	2,190	4,451	637
	Nagrak	1,225	1,223	2,448	699
	Palasari	3,585	3,353	6,938	1,074
	Sanca	2,257	2,178	4,435	700
Jumlah		15,137	14,840	29,978	
Cisalak	Cigadog	1,900	1,871	3,771	873
	Cupunagara	2,481	2,480	4,961	955
	Darmaga	1,896	1,882	3,778	2,203
	Sukakerti	1,446	1,382	2,828	579
Jumlah		7,723	7,615	15,338	

<sup>9</sup>Data BPS Kab. Subang Tahun 2017 (Kecamatan Dalam Anagka)



Tabel 3.4: Jumlah penduduk Tahun 2017 setiap desa di wilayah kajian dan sekitarnya  
(Sumber: BPS Kab. Subang Tahun 2017)

Kec.	Desa	Laki-laki	Perempuan	Total	Kepadatan
		(Jiwa)	(Jiwa)	(Jiwa)	(Jiwa/Km <sup>2</sup> )
Kasomalang	Bojongloa	1,446	1,382	2,828	579
	Cimanglid	1,996	1,997	1,999	2,001
	Kasomalang Kulon	3,148	3,669	6,817	2,262
	Kasomalang Wetan	2,778	2,949	5,727	2,203
	Pasanggrahan	3,090	2,992	6,092	955
	Sindangsari	3,991	3,624	7,615	2,547
	Tenjolaya	2,468	2,330	4,798	413
Jumlah		18,917	18,943	35,876	
Jumlah total		41,777	41,398	81,192	



Gambar 3.14: Potensi sebaran penduduk di wilayah kajian dan sekitarnya Tahun 2017

## 4 PEMODELAN SWAT

Untuk proses kalibrasi, model SWAT memerlukan data debit sungai. Data debit sungai ini diperoleh dari PDH (pos duga tinggi muka air sungai). Untuk studi di Sungai Cipunagara ini, tidak ada PDH di lokasi kajian. Karena itu dipilih lokasi PDH yang terdekat, yaitu PDH yang berada di bagian hilir DAS Cipunagara, yaitu berada di Kec.Pusakanagara, Ds. Kiarasari, Kp. Kiarapayung, Kab. Subang. PDH Kiarapayung-Cipunagara milik BBWS Citarum, datanya tersedia harian dan cukup panjang. Luas wilayah analisa SWAT sekitar 94,525 ha, dibagi 8 subbasin. SubDAS Cipunagara Hulu di Subbasin no 7. Metode *downscaling* digunakan untuk menghitung Neraca air di SubDAS Cipunagara Hulu. Wilayah Analisa SWAT model dari lokasi kajian di Plant Subang ditunjukkan pada Gbr.4.1 pada halaman 32.

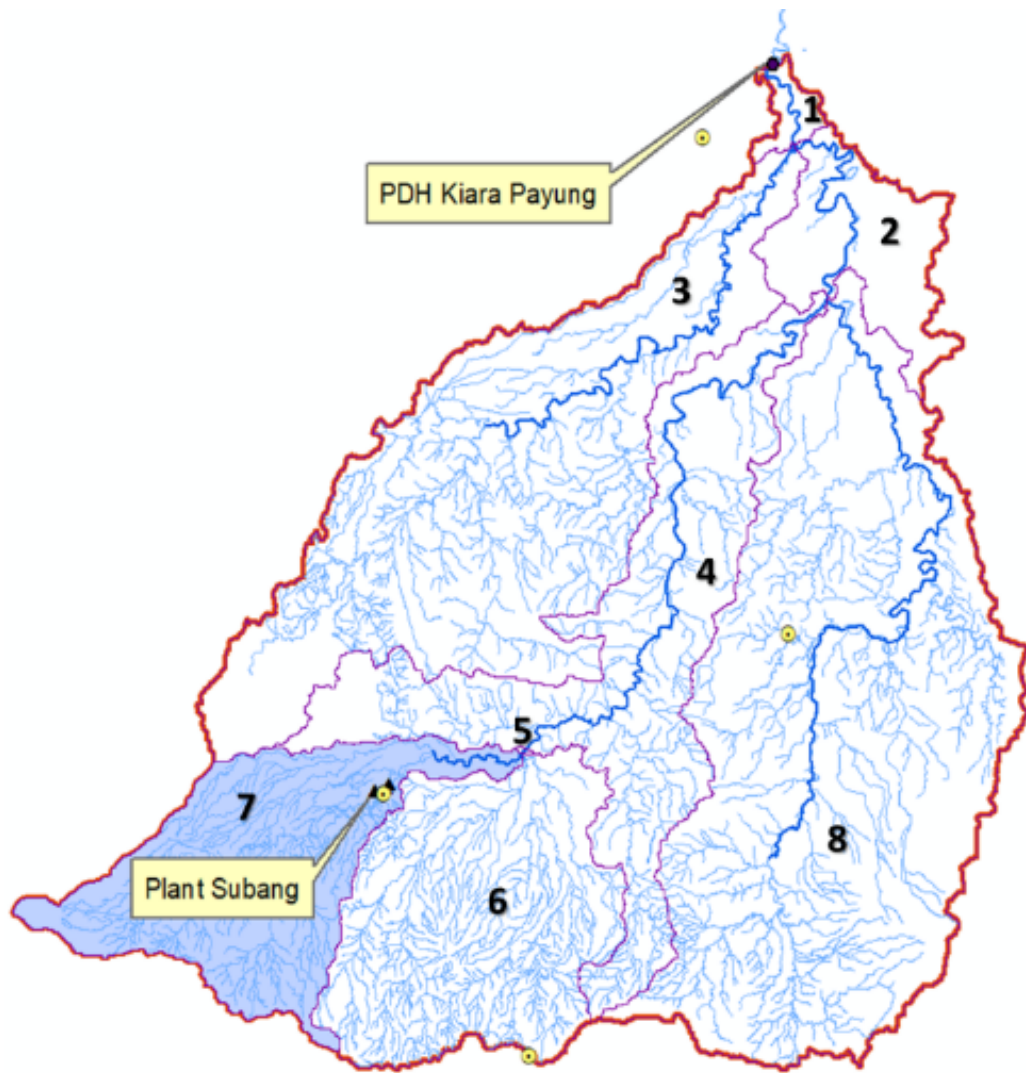
### 4.1 Kalibrasi, *uncertainty analysis*, dan validasi model SWAT

Data pengukuran lapangan yang digunakan untuk kalibrasi dan validasi model SWAT hanya debit sungai, tidak tersedia data hasil sedimen. Ukuran ketidakpastian (*uncertainty*) model ditunjukkan oleh nilai kisaran 95PPU (P-factor). Dari kisaran parameter kalibrasi yang diberikan akan menghasilkan output yang berada dalam selang kepercayaan 95%. Hasil analisis ketidakpastian model SWAT di DAS Cipunagara ini menunjukkan nilai P-factor sekitar 0.88, artinya sekitar 88% hasil output model berada dalam kisaran 95PPU.

Ada 14 parameter model SWAT yang dilakukan kalibrasi, (**Tabel 4.1**, halaman 33). Parameter ini tidak bisa diperoleh dengan melakukan pengukuran dilapangan, sehingga sangat sulit diketahui nilainya. Secara statistik hal ini bisa dilakukan dengan melakukan optimasi nilai parameter tersebut dalam proses kalibrasi sehingga diperoleh nilai error atau bias (sebagai *objective function*) antara data pengukuran lapangan dengan hasil simulasi model SWAT sekecil mungkin. *Objective function* yang digunakan adalah koefisien Nash Sutcliffe (NSE) atau koefisien determinasi ( $R^2$ ). Untuk nilai NSE atau  $R^2$  ini harus bernilai mendekati 1 (minimal 0.5). Pada kondisi ini akan diperoleh *fitted value* untuk parameter-parameter tersebut.

Setiap parameter yang dikalibrasi tersebut, memiliki tingkat sensitivitas yang berbeda-beda dalam perhitungan proses hidrologi. Perubahan kecil saja pada nilai parameter tersebut menyebabkan perubahan yang besar terhadap hasil akhir model (misalnya debit di sungai). Hal ini bisa di lihat dari Nilai P-Value atau t-stat (Abbaspour, 2011), seperti ditunjukkan di Gbr.4.2 pada halaman 34.

Parameter dikatakan sensitif jika P-Value mendekati nol (0). Parameter termasuk sangat sensitif (*most sensitive*) jika P-Value kurang dari 0.05, dan jika berada pada ki-



Gambar 4.1: Wilayah Analisa SWAT model dari lokasi kajian di Plant Subang

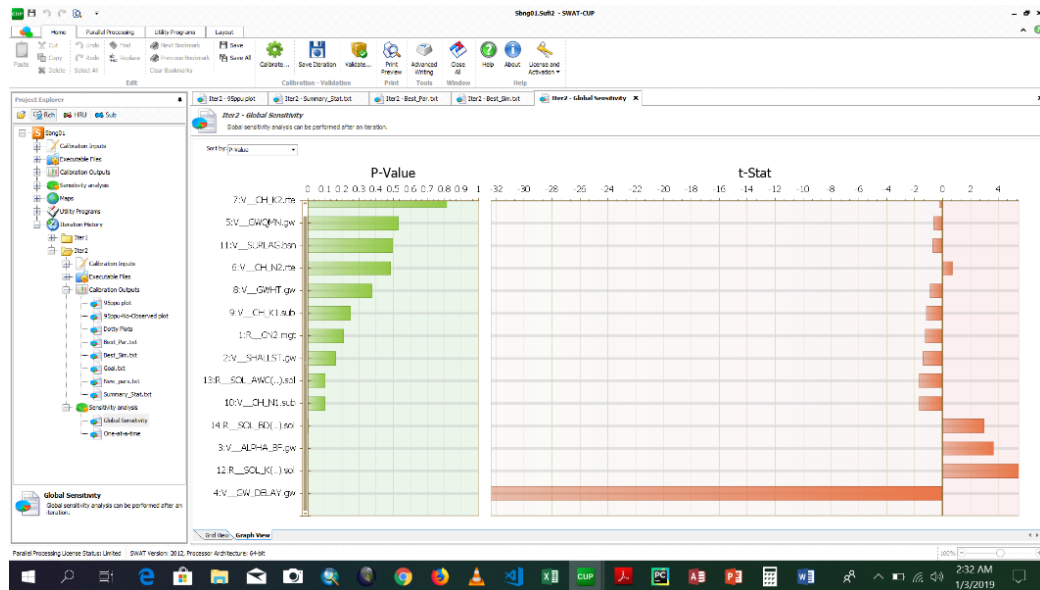


Tabel 4.1: Parameter model SWAT yang dilakukan kalibrasi

NO	Me- to- de <sup>a</sup>	Parameter	Grup	Keterangan	Fitted Va- lue	Keterangan Interven- si <sup>b</sup>
1	V	SHALLST	gw	Inisial kedalaman air di akuifer dangkal (mm)	43961	Tidak bisa
2	V	ALPHA_BF	gw	Faktor resesi aliran baseflow (hari)	0.304	Tidak bisa
3	V	GW_DELAY	gw	Waktu jeda aliran ground water (hari)	460	Tidak bisa
4	V	GWQMN	gw	Ambang batas ketinggian air di akuifer dangkal yang memungkinkan terjadi aliran groundwater (mm)	1.45	Tidak bisa
5	V	GWHT	gw	Inisial tinggi ground water (m)	44	Tidak bisa
6	V	CH_N2	rte	Koefesien manning di sungai utama	0.131	Bisa
7	V	CH_K2	rte	Konduktivitas hidrolik efektif di sungai utama (mm/jam)	9	Tidak bisa
8	V	CH_K1	sub	Konduktivitas hidrolik efektif di anak-anak sungai (mm/jam)	145	Tidak bisa
9	V	CH_N1	sub	Koefesien manning di anak-anak sungai	25	Bisa
10	V	SURLAG	bsn	Waktu jeda limpasan permukaan (jam)	14	Tidak bisa
11	R	SOL_K	sol	Konduktivitas hidrolik jenuh tanah (mm/jam)	19	Tidak bisa
12	R	SOL_AWC	sol	Kapasitas air tersedia dalam tanah (unitless)	- 0.077	Tidak bisa
13	R	SOL_BD	sol	Kerapatan jenis tanah (gram/cm <sup>3</sup> )	0.056	Tidak bisa
14	R	CN2	mgt	SCS runoff Curve number (unitless)	-14	Bisa

<sup>a</sup>R=relative, V=replace; metode yang digunakan saat kalibrasi menggunakan SWAT CUP

<sup>b</sup>Dalam hal pengelolaan melalui kegiatan konservasi



Gambar 4.2: Hasil perhitungan P-Value dan t-Stat untuk melihat sensitivitas parameter model hidrologi SWAT

saran  $0.05 \leq P - \text{Value} \leq 0.5$ , maka sensitivitas parameter tersebut tergolong sedang, sementara jika lebih dari 0.5 maka parameter tersebut termasuk tidak sensitif.

Diantara parameter yang dikalibrasi, terdapat 9 parameter yang sangat sensitif; yaitu:

- |             |             |
|-------------|-------------|
| 1. CH_N1    | 6. SOL_K    |
| 2. ALPHA_BF | 7. GW_DELAY |
| 3. GWQMN    | 8. SOL_BD   |
| 4. SHALST   | 9. CH_K1    |
| 5. CH_N2    |             |

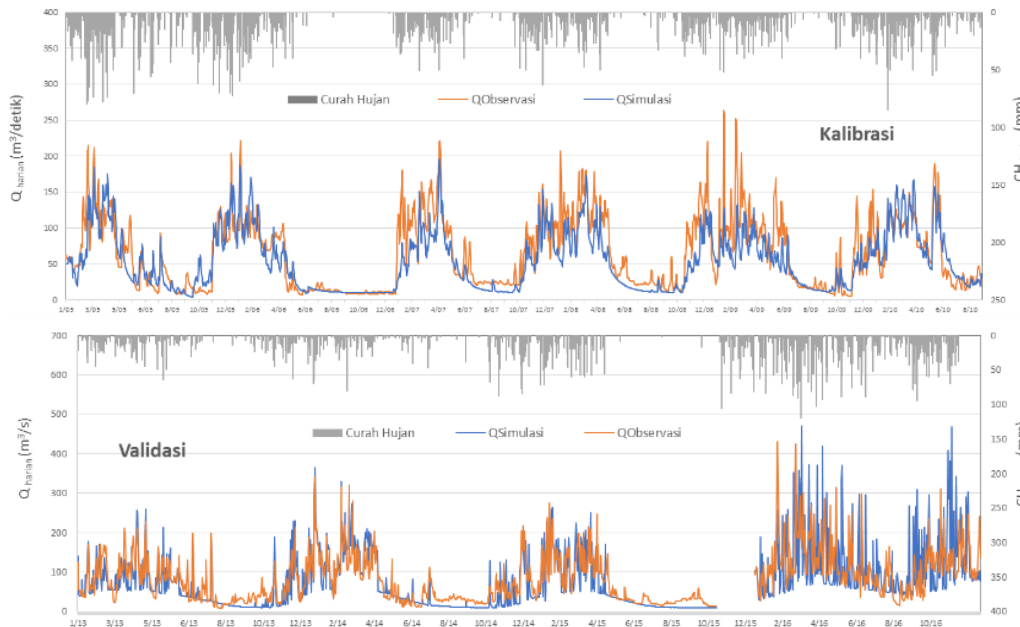
Sementara sisanya (5 parameter) tergolong sedang, yaitu GWHT, CN2, SOL\_AWC, CH\_N2 dan SURLAG.

Dari sejumlah parameter tersebut, yang bisa dilakukan intervensi adalah CN2, CH\_N1, dan CH\_N2. Mempertahankan lahan bervegetasi permanen, melakukan kegiatan penghijauan (penanaman pohon) atau membuat sumur resapan di lahan pemukiman adalah bentuk intervensi untuk menurunkan nilai CN2. Begitu juga mempertahankan batu-batu di sungai adalah bentuk intervensi mempertahankan nilai CH\_N1 (anak sungai) dan CH\_N2 (sungai utama).

Parameter statistik yang digunakan dalam kalibrasi dan validasi ini adalah Koefisien Determinasi ( $R^2$ ) dan Koefisien Nash Sutcliffe (NSE) sehingga bisa menetapkan secara ilmiah model SWAT bisa digunakan (**Tabel 4.2** pada halaman 35). Moriasi et al. (2007) telah membuat kriteria kelayakan model SWAT sehingga bisa diterima berdasarkan nilai  $R^2$  dan NSE dari proses kalibrasi dan validasi. Model SWAT dikatakan

Tabel 4.2: Rekapitulasi parameter statistik untuk kalibrasi dan validasi model

Parameter Statistik	Bulanan		Harian	
	Kalibrasi	Validasi	Kalibrasi	Validasi
Koefesien Determinasi ( $R^2$ )	0.83	0.83	0.67	0.63
Koefesien Nash Sutcliffe (NSE)	0.78	0.85	0.64	0.62



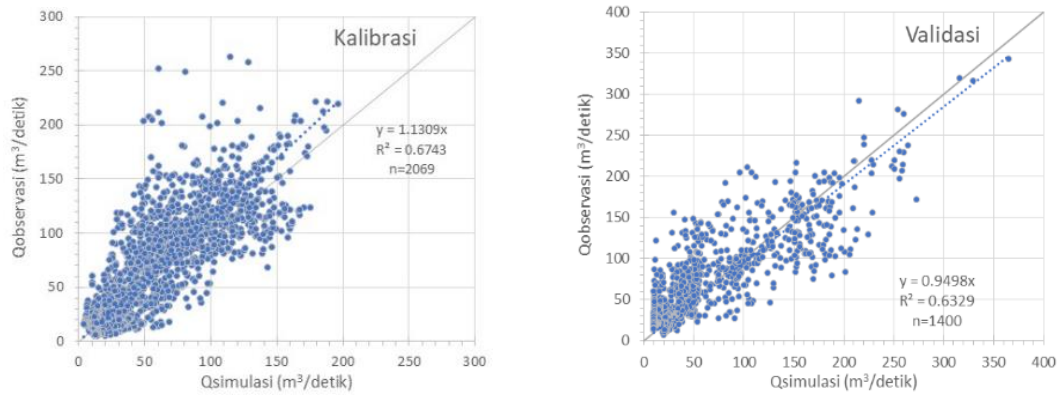
Gambar 4.3: Perbandingan time series harian hasil simulasi SWAT dan data observasi antara kalibrasi (2005-2010) dan validasi (2013-2016)

bagus jika nilai  $R^2$  dan NSE sekitar 0.6 – 0.75, Jika lebih dari 075 sangat bagus.

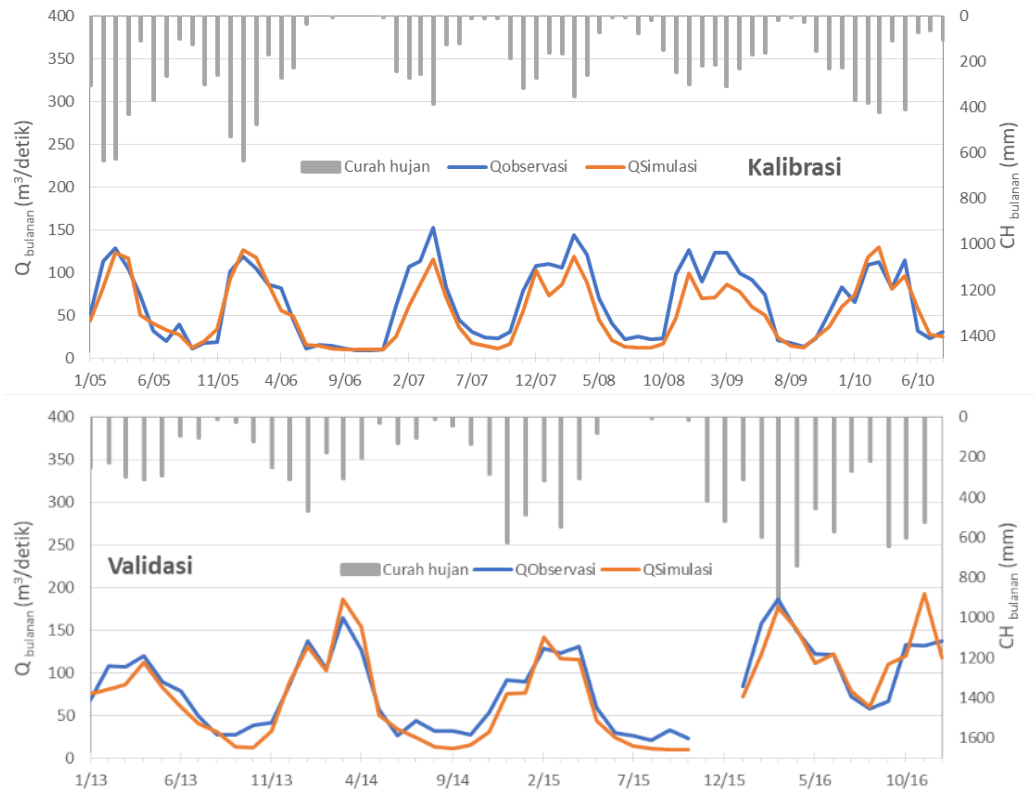
Perbandingan hidrograf antara data observasi dan output model SWAT dalam proses kalibrasi dan validasi ditunjukkan Gbr.4.3 pada halaman 35 hingga Gbr.4.6 pada halaman 37.

## 4.2 Hydrologic Response Unit (HRU) / Unit Respon Hidrologi (URH)

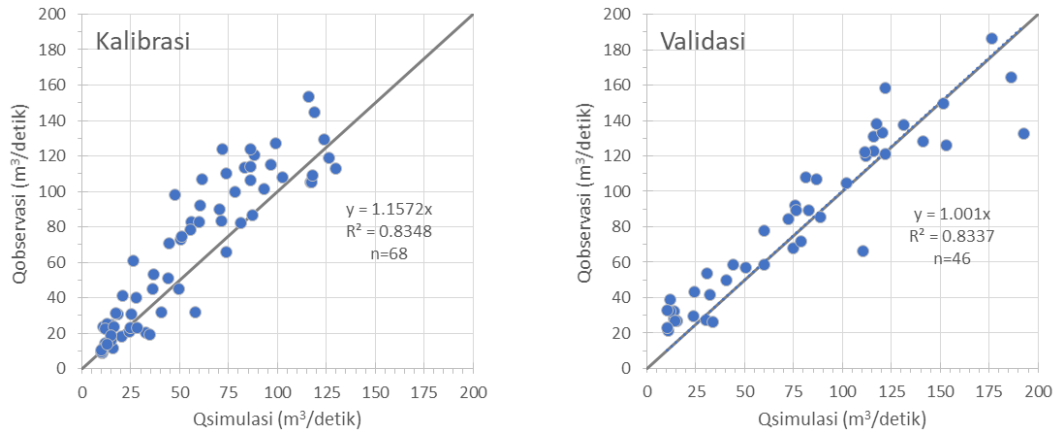
HRU / URH merupakan *unitbase* model SWAT melakukan simulasi hidrologi di lahan. HRU merupakan hasil kombinasi dari jenis tutupan lahan, jenis tanah dan kelas lereng. Setiap HRU memiliki atribut yang unik berbeda dengan HRU lainnya sehingga karakteristik hidrologinya juga berbeda. Dalam aplikasi model SWAT ini, wilayah kajian dengan luas 10,278 ha terbagi ke dalam 155 HRU. Rekapitulasi HRU



Gambar 4.4: Hubungan hasil simulasi harian SWAT dan data observasi antara proses kalibrasi (2005-2010) dan validasi (2013-2016)



Gambar 4.5: Perbandingan time series bulanan hasil simulasi SWAT dan data observasi antara kalibrasi (2005-2010) dan validasi (2013-2016)



Gambar 4.6: Hubungan hasil simulasi bulanan SWAT dan data observasi antara proses kalibrasi (2005-2010) dan validasi (2013-2016)

di wilayah kajian di sajikan dalam **Lampiran**.

HRU yang paling dominan di wilayah kajian adalah lahan kebun/*agroforestry* di tanah asosiasi andosol coklat dan regosol coklat pada lahan berlereng curam-sangat curam (lereng lebih dari 25%). Luas HRU ini mencapai 1,366 ha (13.3%). Selanjutnya adalah lahan kebun/*agroforestry* di tanah latosol coklat kemerahan pada lahan berlereng kurang dari 25% dengan luas 1,089 ha (10.6%). Selain itu terdapat pertanian lahan kering (ladang/tegalan) pada tanah latosol coklat kemerahan kelerengan kurang dari 25%, luas 1,384 ha (13.5%). Luas setiap HRU disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3: Kombinasi tutupan lahan, jenis tanah dan kelas lereng di Sub DAS Cimande

Jenis tutupan lahan	Kode Tanah	Jenis Tanah	Kelas Lereng (%)					Jumlah (Ha)
			0-8	8-15	15-25	25-40	>40	
Ladang (AGRL)	T3	Asosiasi Andosol Coklat dan Regosol Coklat	42	113	244	295	75	769
	T31	Andosol Coklat Kekuningan	4	48	91	20	3	166
	T35	Kompleks Regosol kelabu dan Litosol	58	63	2	0	0	123
	T37	Latosol Coklat Kemerahan	706	482	196	97	8	1,490

Tabel 4.3: Kombinasi tutupan lahan, jenis tanah dan kelas lereng di Sub DAS Cimande

Jenis tutupan lahan	Kode Tanah	Jenis Tanah	Kelas Lereng (%)					Jumlah (Ha)
			0-8	8-15	15-25	25-40	>40	
	T39	Latosol Coklat	22	28	17	1	0	67
AGRL Total (ha)			832	734	550	413	87	2,616
Kebun / Perkebunan(COTS)	T3	Asosiasi Andosol Coklat dan Regosol Coklat	60	133	299	695	671	1,858
	T31	Andosol Coklat Kekuningan	34	138	170	53	1	396
	T35	Kompleks Regosol kelabu dan Litosol	63	51	25	17	6	162
	T37	Latosol Coklat Kemerahan	349	437	303	175	34	1,298
	T39	Latosol Coklat	12	21	29	31	0	92
COTS Total (ha)			517	780	826	970	713	3,807
Rumput / Tanah terbuka (PAST)	T3	Asosiasi Andosol Coklat dan Regosol Coklat	2	2	3	0	0	7
	T31	Asosiasi Andosol Coklat dan Regosol Coklat	0	1	0	0	0	1
	T35	Kompleks Regosol kelabu dan Litosol	10	15	8	18	20	70
	T37	Latosol Coklat Kemerahan	4	2	0	0	0	7
PAST Total (ha)			15	20	12	18	20	85

Tabel 4.3: Kombinasi tutupan lahan, jenis tanah dan kelas lereng di Sub DAS Cimande

Jenis tutupan lahan	Kode Tanah	Jenis Tanah	Kelas Lereng (%)					Jumlah (Ha)
			0-8	8-15	15-25	25-40	>40	
Hutan Pinus (PINE)	T3	Asosiasi Andosol Coklat dan Regosol Coklat	11	30	90	278	278	687
	T31	Andosol Coklat Kekuningan	12	90	243	127	8	481
	T35	Kompleks Regosol kelabu dan Litosol	21	17	23	28	33	122
	T37	Latosol Coklat Kemerahan	3	34	50	135	91	313
PINE Total (ha)			99.8	90.1	30.5	5.0	0.4	225.7
Sawah (RICE)	T3	Asosiasi Andosol Coklat dan Regosol Coklat	20	32	108	69	11	241
	T35	Andosol Coklat Kekuningan	56	5	0	0	0	61
	T37	Kompleks Regosol kelabu dan Litosol	259	88	52	21	1	421
	T39	Latosol Coklat	2	2	4	3	0	11
RICE Total (ha)			337	127	164	93	12	733
Semak Belukar(RNGB)	T3	Asosiasi Andosol Coklat dan Regosol Coklat	4	27	99	206	128	464
Semak Belukar(RNGB)	T31	Andosol Coklat Kekuningan	0	6	5	2	1	13

Tabel 4.3: Kombinasi tutupan lahan, jenis tanah dan kelas lereng di Sub DAS Cimande

Jenis tutupan lahan	Kode Tanah	Jenis Tanah	Kelas Lereng (%)					Jumlah (Ha)
			0-8	8-15	15-25	25-40	>40	
	T35	Kompleks Regosol kelabu dan Litosol	4	3	2	3	17	28
	T37	Latosol Coklat Kemerahan	14	55	82	147	32	330
RNGB Total (ha)			23	90	188	357	177	836
Pemukiman (URML)	T3	Asosiasi Andosol Coklat dan Regosol Coklat	15	15	11	5	0	47
	T31	Andosol Coklat Kekuningan	1	2	1	0	0	4
	T35	Kompleks Regosol kelabu dan Litosol	36	26	4	0	0	66
	T37	Latosol Coklat Kemerahan	235	131	47	13	1	427
	T39	Latosol Coklat	3	6	7	2	0	17
URML Total (ha)			290	180	71	20	1	562
Tubuh air (WATR)	T3	Asosiasi Andosol Coklat dan Regosol Coklat	0	0	0	1	0	2
	T37	Latosol Coklat Kemerahan	12	6	5	6	2	31
	T39	Latosol Coklat	1	1	1	0	0	2
WATR Total (ha)			13	7	6	6	2	35
<b>Jumlah Total</b>			<b>2,075</b>	<b>2,111</b>	<b>2,224</b>	<b>2,445</b>	<b>1,423</b>	<b>10,278</b>

Untuk wilayah *recharge area*, ada 57 jenis HRU yang tersebar di 5 desa ( Tabel



4.5 pada halaman 43). Diantara HRU tersebut, terdapat 13 jenis HRU yang liputannya terhadap wilayah *recharge area* mencapai 81.4% ( **Tabel 4.4** pada halaman 42). Luasan setiap HRU sisanya terlalu kecil, relative kurang signifikan terhadap efek hidrologisnya jika terjadi perubahan. HRU yang dominan di wilayah *recharge area* adalah ladang/tegalan di tanah latosol coklat kemerahan pada kelerengan lahan kurang dari 15%, dengan luas 407.9 ha (31.6%) dan kebun/*agroforestry* di tanah latosol coklat kemerahan pada kelerengan 8-15% dengan luas 146.5 ha (11.39%).

HRU dominan yang berada di Desa Cibeusi dan Cibitung adalah hasil kombinasi dari jenis tutupan lahan ladang/tegalan dan kebun/Agroforestri di lereng kurang dari 25% dan jenis tanah Asosiasi andosol Coklat dan regosol Coklat dan latosol Coklat Kemerahan. Seperti halnya HRU di Desa Cibeusi dan Cibitung, HRU di Desa Nagrak dan Sanca hasil kombinasi dengan jenis tanah latosol Coklat Kemerahan. Sedangkan di Desa Palasari HRU dominan hasil kombinasi dengan jenis tanah Kompleks regosol kelabu dan litosol dan latosol Coklat Kemerahan.

Tabel 4.4: Liputan HRU yang dominan di wilayah recharge area sumber air Plant Subang

No	Jenis Tutupan Lahan		Jenis Tanah		Lereng		Area	
	Kode	Keterangan	Kode	Keterangan	Kelas	Rerata (%)	(Ha)	(%)
1	AGRL	Ladang /Tegalan	T37	Latosol Coklat Kemerahan	0-8	5.0	235.1	18.28
2	AGRL	Ladang /Tegalan	T37	Latosol Coklat Kemerahan	8-15	11.0	172.8	13.44
3	COTS	Kebun /Agroforestry	T37	Latosol Coklat Kemerahan	8-15	11.2	146.5	11.39
4	COTS	Kebun /Agroforestry	T37	Latosol Coklat Kemerahan	0-8	5.0	88.7	6.89
5	COTS	Kebun /Agroforestry	T37	Latosol Coklat Kemerahan	15-25	19.2	80.5	6.26
6	AGRL	Ladang /Tegalan	T37	Latosol Coklat Kemerahan	15-25	18.7	55.4	4.31
7	COTS	Kebun /Agroforestry	T3	Asosiasi Andosol Coklat dan Regosol Coklat	25-45	34.9	51.2	3.98
8	COTS	Kebun /Agroforestry	T37	Latosol Coklat Kemerahan	25-45	32.5	49.6	3.86
9	URML	Pemukiman	T37	Latosol Coklat Kemerahan	0-8	4.4	42.4	3.29
10	AGRL	Ladang /Tegalan	T3	Asosiasi Andosol Coklat dan Regosol Coklat	15-25	20.1	37.0	2.88
11	AGRL	Ladang /Tegalan	T3	Asosiasi Andosol Coklat dan Regosol Coklat	8-15	11.8	31.4	2.44
12	RNGB	Semak /Belukar	T37	Latosol Coklat Kemerahan	25-45	33.3	30.5	2.37
13	COTS	Kebun /Agroforestry	T3	Asosiasi Andosol Coklat dan Regosol Coklat	>45	58.1	26.6	2.07
Jumlah							1047.7	81.44

Tabel 4.5: Rekapitulasi luas (Ha) HRU di recharge area sumber air Plant Ciherang berdasarkan wilayah desa

Desa	Jenis tutupan lahan	Kode SWAT	T3					T35			T37					Jumlah (Ha)
			0-8	8-15	15-25	25-40	>40	0-8	8-15	15-25	0-8	8-15	15-25	25-40	>40	
Cibesi	Ladang /Tegalan	AGRL	15.2	19.6	22.6	11.6	1.4	0.0	0.0	0.0	23.9	33.7	10.9	4.9	0.1	143.9
	Agroforestry	COTS	0.4	1.1	6.2	24.4	13	0.0	0.0	0.0	1.0	3.7	0.7	2.7	1.7	54.9
	Rumput /Lahan terbuka	PAST	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.7	0.0	0.0	0.0	1.1
	Semak Belukar	RNGB	0.0	0.0	0.4	1.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9
	Pemukiman	URML	1.2	2.6	0.4	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	1.7	0.1	0.0	0.0	10.1
Cibesi Total (ha)			16.8	23.3	29.6	37.9	14.7	0.0	0.0	0.0	28.7	39.8	11.7	7.6	1.8	211.9
Cibitung	Ladang /Tegalan	AGRL	3.4	10.7	13.4	6.9	0.8	0.0	0.0	0.0	40.9	33.7	21.8	15.8	0.0	147.4
	Agroforestry	COTS	0.9	2.2	7.8	26.8	13.6	0.0	0.0	0.0	33.2	49.3	52.1	40.4	2.2	228.5
	Rumput /Lahan terbuka	PAST	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.7
	Sawah	RICE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Semak Belukar	RNGB	0.2	0.7	2.9	14.4	14.4	0.0	0.0	0.0	4.2	9.7	18.5	28.4	2.3	95.7
	Pemukiman	URML	0.7	0.9	1.2	0.9	0.1	0.0	0.0	0.0	19.2	5.4	4.7	2.4	0.0	35.5
Cibitung Total (ha)			5.2	14.5	25.3	49	28.9	0.0	0.0	0.0	98.1	98.2	97.1	87	4.5	507.8
Nagrak	Ladang /Tegalan	AGRL	0.1	1.0	1.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	24	21.9	2.4	0.2	0.0	50.8
	Agroforestry	COTS	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.8	22.1	5.9	0.4	0.0	38.4
	Pemukiman	URML	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	0.7	0.0	0.0	0.0	5.4
Nagrak Total (ha)			0.1	1.0	1.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	38.5	44.7	8.3	0.6	0.0	94.6

Keterangan: T3: Asosiasi Andosol Coklat dan Regosol Coklat; T35: Kompleks Regosol kelabu dan Litosol; T37: Latosol Coklat Kemerahan



# 5 KONDISI HIDROLOGI WILAYAH KAJIAN

## 5.1 Neraca air SubDAS Cipunagara Hulu

Salah satu output SWAT adalah perhitungan Neraca air. Pengetahuan mengenai Neraca air sangat penting dalam membantu merencanakan pengelolaan DAS. Salah satu kegiatan pengelolaan DAS adalah konservasi air dan tanah dalam rangka mendukung keberlangsungan sumber daya air tanah. Diagram Neraca air SubDAS Cipunagara Hulu ditunjukkan di Gbr.5.1, halaman 46). curah hujan merupakan komponen masukan (input) dalam konsep Neraca air. Komponen keluaran (output) adalah evapotranspirasi (penguapan), *surface runoff* (limpasan permukaan), *lateral flow*, *return flow* (*groundwater flow*), imbuhan air ke *groundwater* (*groundwater Recharging*) dan revap dari *groundwater* ke zona perakaran.

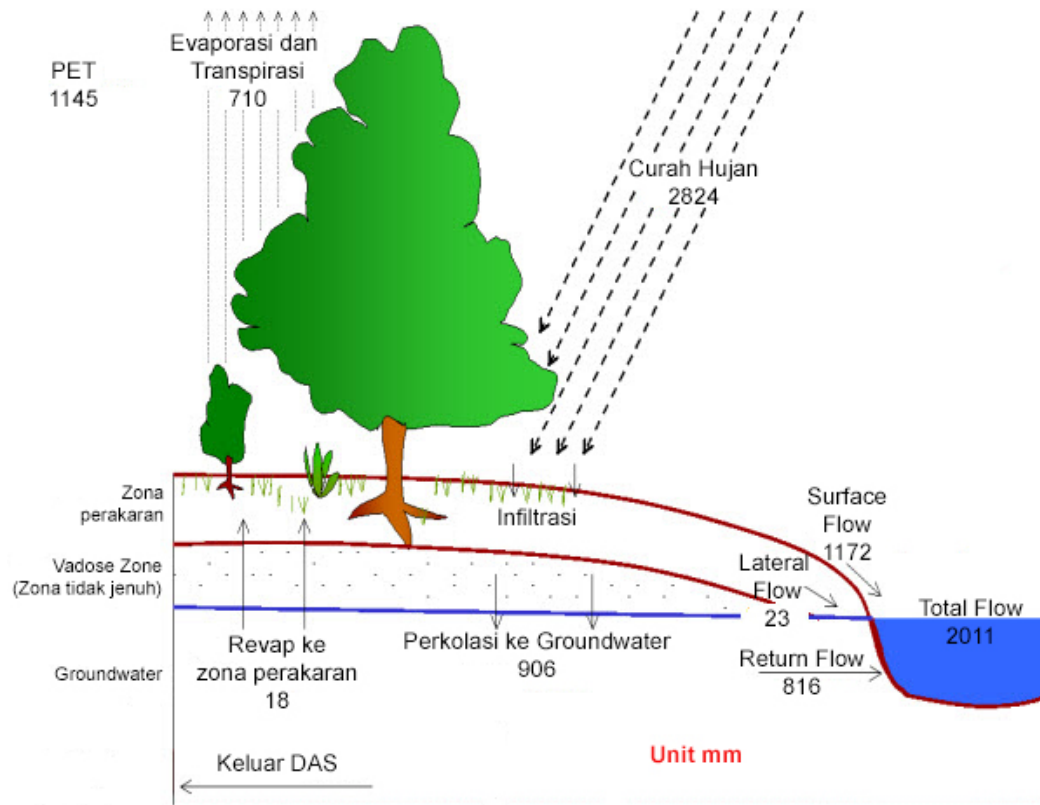
Rata-rata tahunan<sup>1</sup> jumlah curah hujan di SubDAS Cipunagara Hulu sebesar 2,824 mm/tahun (290.22 juta m<sup>3</sup>/tahun). *surface runoff*, *lateral flow*, dan *return flow* merupakan komponen aliran sungai (*stream flow*). Jumlah total aliran Sungai Cipunagara Hulu sekitar 2011 mm/tahun (71% dari jumlah curah hujan). *Lateral flow* dan *return flow* merupakan komponen aliran dasar (*baseflow*) dari aliran sungai. Besarnya aliran dasar Sungai Cipunagara Hulu sekitar 839 mm/tahun (42% dari total aliran Sungai Cipunagara Hulu).

Air yang hilang melalui penguapan ada 2 proses, yaitu dari tubuh air & tanah (evaporasi) dan vegetasi (transpirasi). Total penguapan tersebut disebut evapotranspirasi, nilai sebesar 710 mm/tahun (72.98 juta m<sup>3</sup>/tahun). Jumlah evapotranspirasi hanya 62% dari besarnya evapotranspirasi potensial (maksimum), atau sekitar 25% dari jumlah curah hujan. Pada musim hujan, jumlah air tersedia lebih banyak sehingga jumlah evapotranspirasi lebih besar dibandingkan pada musim kemarau. Jumlah evapotranspirasi bulanan paling tinggi pada akhir musim hujan sekitar 84 mm (8.6 juta m<sup>3</sup>/bulan) dan paling rendah pada puncak musim kemarau (Agustus-September) sekitar 37-38 mm (3.8 juta m<sup>3</sup>/bulan), Gbr.5.2 pada halaman 47.

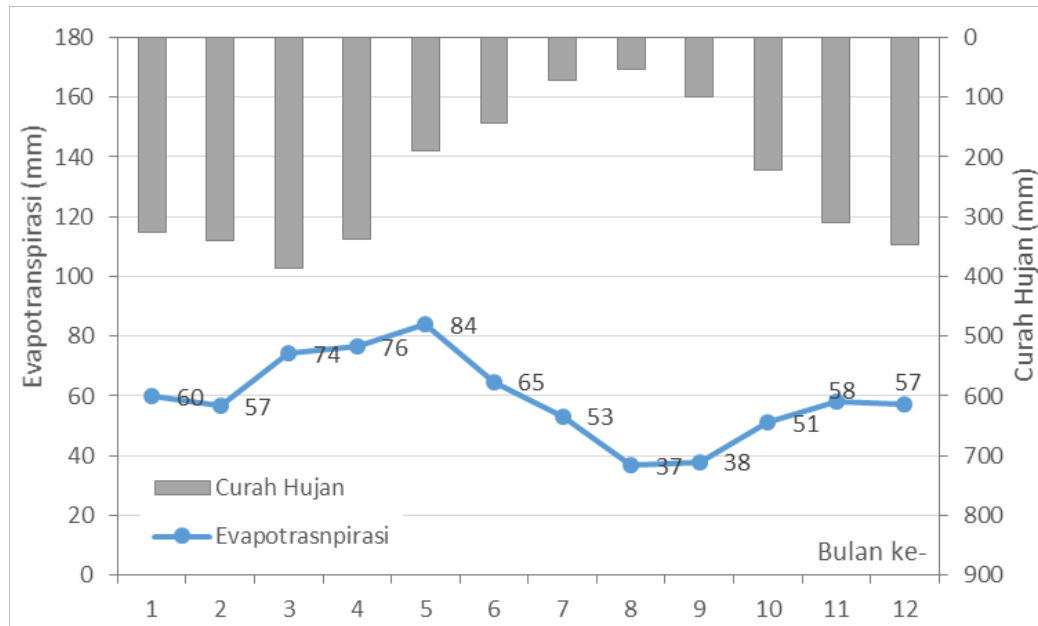
*Surface runoff* merupakan limpasan air di permukaan tanah, dipengaruhi oleh kondisi tutupan / penggunaan lahan dan tanah. Lahan terbangun memiliki potensi *surface runoff* yang tinggi. Tanah bertekstur kasar potensi *surface runoff* rendah. Air dari *surface runoff* akan keluar dari SubDAS Cipunagara Hulu masuk ke sungai. Jumlah

---

<sup>1</sup>Periode simulasi SWAT Tahun 2000 – 2017 (17 tahun)



Gambar 5.1: Diagram Neraca air di SubDAS Cipunagara Hulu output model SWAT

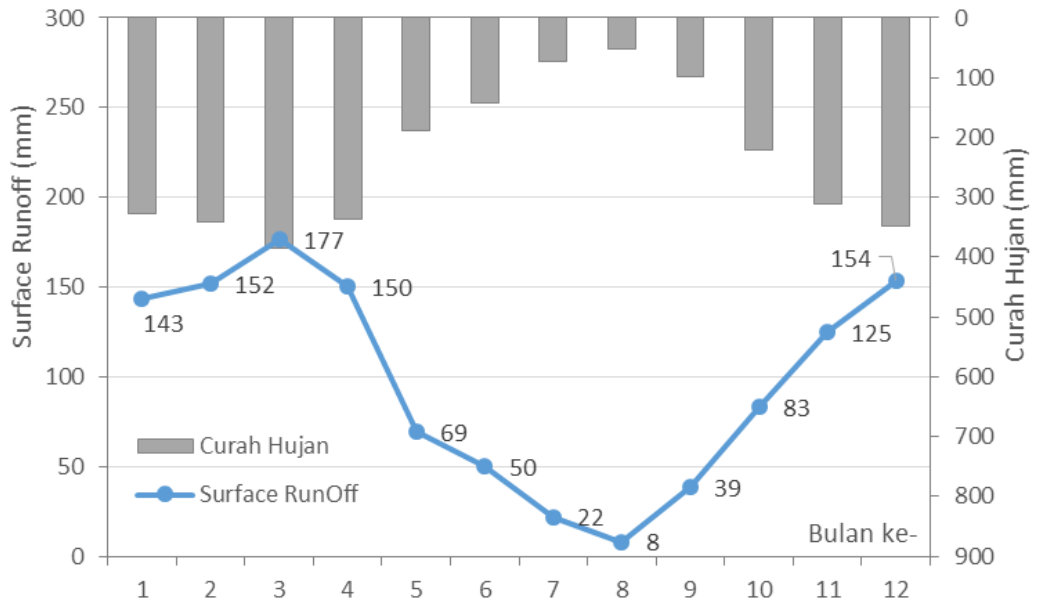


Gambar 5.2: Variasi bulanan evapotranspirasi di SubDAS Cipunagara Hulu

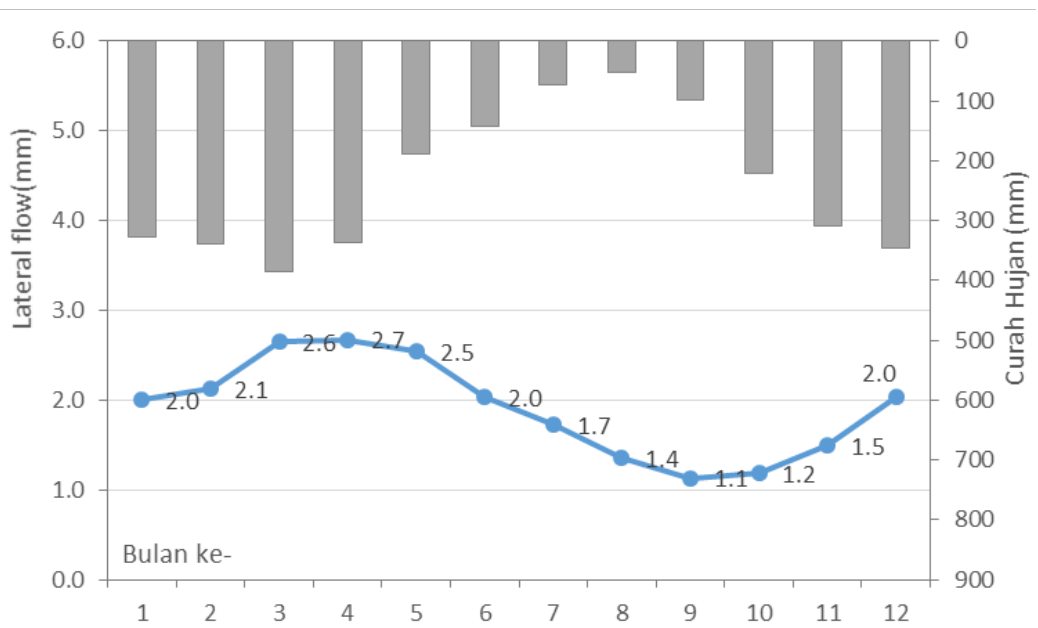
*surface runoff* sebesar 1,172 mm/tahun (120.42 juta  $m^3$ /tahun), sekitar 41% dari jumlah curah hujan. Kontribusi *surface runoff* terhadap total aliran Sungai Cipunagara Hulu, sebesar 58%. Jumlah *surface runoff* tertinggi terjadi pada bulan Maret (puncak musim hujan) sebesar 177 mm (18.2 juta  $m^3$ /bulan). Limpasan terendah terjadi pada bulan Agustus (puncak musim kemarau) sebesar 8 mm (0.8 juta  $m^3$ /bulan), **Gbr.5.3.** pada halaman 48.

Jumlah air yang meresap ke dalam tanah zona perakaran (infiltrasi) merupakan selisih antara curah hujan dengan *surface runoff*. Air yang berada di lahan yang berlereng sebagian akan mengalir ke daerah yang lebih rendah secara lateral (*lateral flow*), sebagian lagi akan tersimpan sebagai air tanah. Jumlah *lateral flow* sebesar 23 mm/tahun (2.36 juta  $m^3$ /tahun), hanya 1% dari curah hujan. Jumlah air yang tersimpan dalam tanah (zona perakaran) sebesar 13 mm/tahun (1.30 juta  $m^3$ /tahun). *Lateral flow* berkontribusi terhadap aliran sungai, (komponen dari baseflow). Pada musim kemarau, jumlah *lateral flow* terendah tidak terjadi pada jumlah curah hujan terendah. Solum tanah yang dalam berperan sebagai penyangga sehingga menyebabkan adanya *delay* (lag). Puncak *lateral flow* pada Maret-April dan terendah pada September-Oktober, **Gbr.5.4** pada halaman 48.

Perkolasi merupakan pergerakan air secara vertikal karena pengaruh gravitasi dari zona perakaran ke lapisan akuifer (*groundwater*) melalui lapisan tidak jenuh (*vadose*

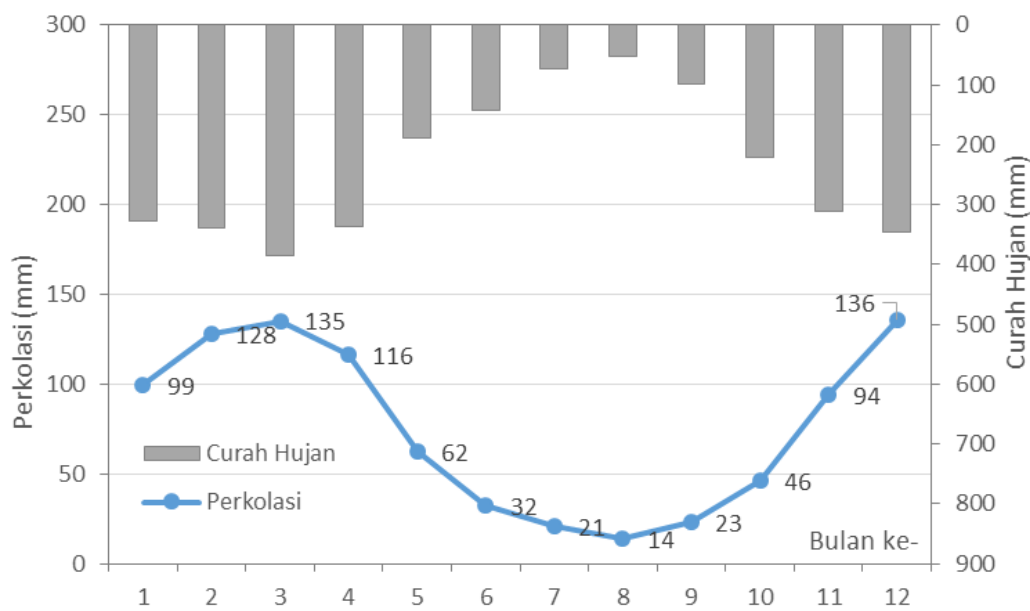


Gambar 5.3: Variasi bulanan *surface runoff* di SubDAS Cipunagara Hulu



Gambar 5.4: Variasi bulanan *lateral flow* di SubDAS Cipunagara Hulu



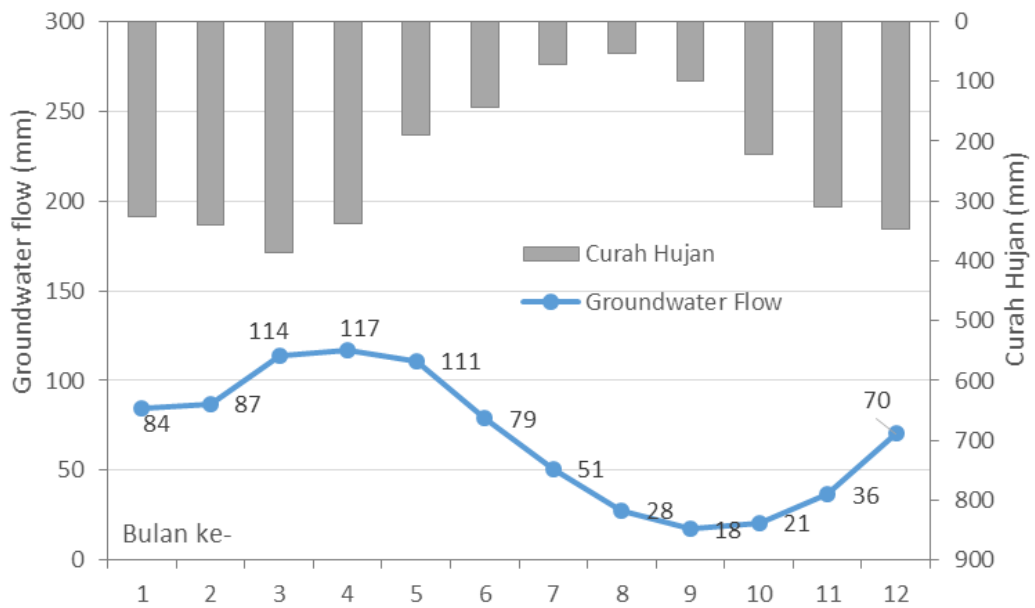


Gambar 5.5: Variasi bulanan perkolasi di SubDAS Cipunagara Hulu

zone). Faktor utama yang mempengaruhi perkolasi adalah permeabilitas tanah. Permeabilitas tanah menentukan kemampuan tanah dalam meloloskan air. Parameter ini dipengaruhi oleh tekstur, kerapatan, dan ukuran ruang pori tanah. Jumlah air perkolasi di SubDAS Cipunagara Hulu sekitar 906 mm/tahun (93.2 juta m<sup>3</sup>/tahun), sekitar 32% dari curah hujan. Jumlah air perkolasi paling tinggi Bulan Maret sebesar 135 mm (13.9 juta m<sup>3</sup>/bulan) dan terendah Agustus sebesar 14 mm ( Gbr.5.5 pada halaman 49).

Dalam lapisan akuifer, ada bagian air yang tersimpan sebagai *groundwater*; ada bagian yang menguap kembali ke zona perakaran (*re-veg*); dan *return flow* ke sungai sebagai *baseflow*. Bagian air yang menguap kembali ke zona perakaran hanya 18 mm/tahun (1.86 juta m<sup>3</sup>/tahun), sekitar 0.64% dari curah hujan. *Return flow* merupakan pergerakan air secara lateral pada lapisan akuifer (*groundwater flow*) menuju sungai. Jumlah *return flow* sekitar 816 mm/tahun (83.88 juta m<sup>3</sup>/tahun), sekitar 28.9% dari curah hujan. Bagian air yang tersimpan dalam lapisan akuifer sebagai cadangan sekitar 72 mm/tahun (7.41 juta m<sup>3</sup>/tahun).

*Return flow* atau *groundwater flow* merupakan komponen *baseflow* dari aliran Sungai Cipunagara Hulu yang paling besar. Pola aliran bulanan *return flow* atau *groundwater flow* hampir sama seperti pola *lateral flow*. Jumlah *return flow* berbanding lurus dengan jumlah curah hujan namun ada faktor lain yang menyebabkan adanya *delay* (lag) sekitar 20 hari. Jumlah *return flow* yang paling besar 117 mm (12 juta m<sup>3</sup>/bulan)



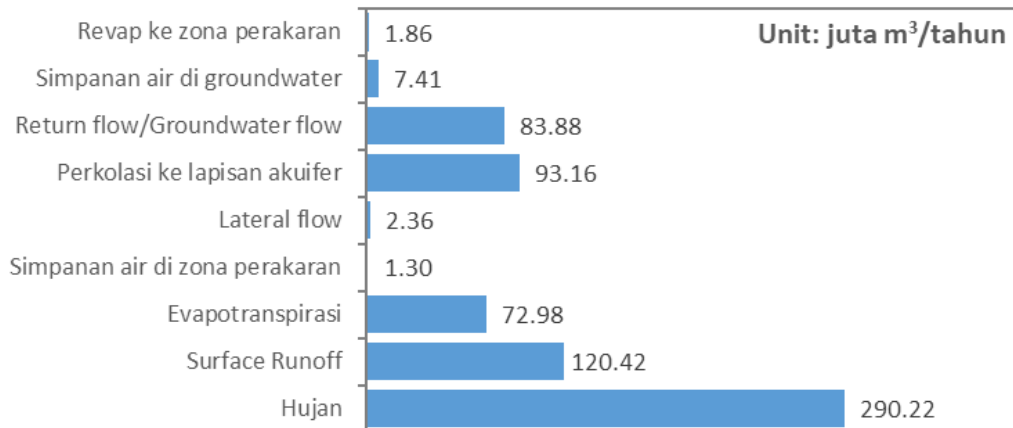
Gambar 5.6: Variasi bulanan *groundwater flow* di SubDAS Cipunagara Hulu

bergeser 1 bulan dari periode puncak hujan (April). Begitu juga pada musim kemarau, jumlah *return flow* yang paling rendah 18 mm (1.8 juta m<sup>3</sup>/bulan) bergeser 1 bulan dari puncak musim kemarau (September), Gbr.5.6 pada halaman 50.

Ringkasan potensi volume setiap komponen Neraca air di SubDAS Cipunagara Hulu ditunjukkan Gbr.5.7 pada halaman 51. Jumlah air yang masuk ke SubDAS Cipunagara Hulu sebagai curah hujan sekitar 290.22 juta m<sup>3</sup>/tahun, hilang ke atmosfer melalui evapotranspirasi sebesar 72.98 juta m<sup>3</sup>/tahun, selanjutnya hilang sebagai *surface runoff* masuk ke sungai 120.42 juta m<sup>3</sup>/tahun. Dari air yang meresap ke dalam tanah, sekitar 1.30 juta m<sup>3</sup>/tahun tersimpan dalam zona perakaran sebagai cadangan air tanah; 2.36 juta m<sup>3</sup>/tahun hilang sebagai lateral flow masuk ke sungai; dan 93.16 juta m<sup>3</sup>/tahun masuk ke *groundwater* melalui perkolasi. Dari air yang masuk ke *groundwater* tersebut, sekitar 83.88 juta m<sup>3</sup>/tahun akan hilang sebagai *return flow* / *groundwater flow* masuk ke sungai; sekitar 1.86 juta m<sup>3</sup> akan menguap kembali ke zona perakaran dan sekitar 7.41 juta m<sup>3</sup>/tahun akan tersimpan di *groundwater*.

## 5.2 Neraca air di *recharge area* sumber air Plant Subang

Luas *recharge area* sumber air Plant Subang adalah 1,286.45 ha, sekitar 12.5% dari luas SubDAS Cipunagara Hulu. Diagram Neraca air di *recharge area* sumber air Plant



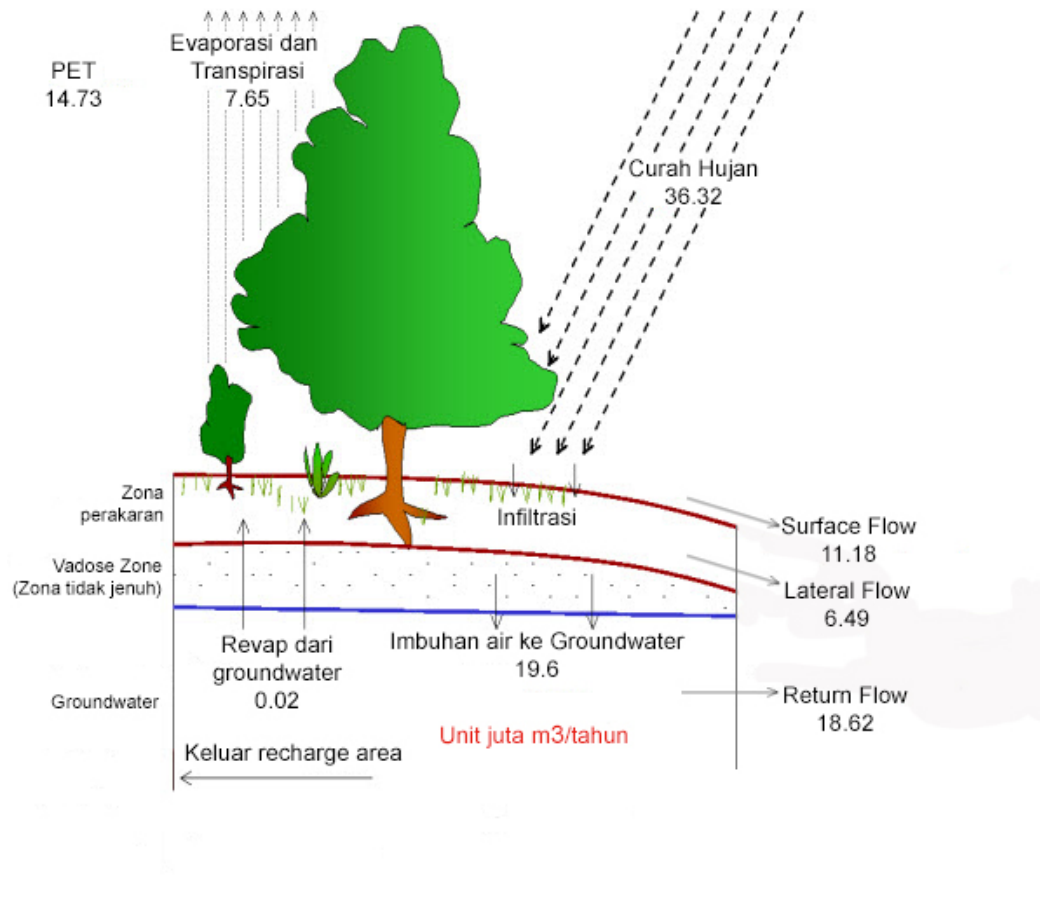
Gambar 5.7: Potensi volume komponen output Neraca air (juta m<sup>3</sup>/tahun) di SubDAS Cipunagara Hulu

Subang ditunjukkan Gbr.5.8 pada halaman 52. Volume air hujan yang masuk ke *recharge area* sumber area Plant Subang sekitar 36.32 juta m<sup>3</sup>/tahun, hilang ke atmosfer melalui evapotranspirasi sebesar 7.65 juta m<sup>3</sup>/tahun, selanjutnya hilang sebagai *surface runoff* keluar *recharge area* sebesar 11.18 juta m<sup>3</sup>/tahun. Dari air yang meresap ke dalam tanah, sekitar 0.11 juta m<sup>3</sup>/tahun tersimpan dalam zona perakaran sebagai cadangan air tanah; 6.49 juta m<sup>3</sup>/tahun hilang sebagai lateral flow keluar *recharge area*; dan 19.6 juta m<sup>3</sup>/tahun masuk ke *groundwater* melalui perkolasi. Dari air yang masuk ke *groundwater* tersebut, sekitar 18.62 juta m<sup>3</sup>/tahun akan hilang sebagai *return flow / groundwater flow* masuk ke sungai; sekitar 0.02 juta m<sup>3</sup> akan menguap kembali ke zona perakaran dan sekitar 0.97 juta m<sup>3</sup>/tahun akan tersimpan di *groundwater*.

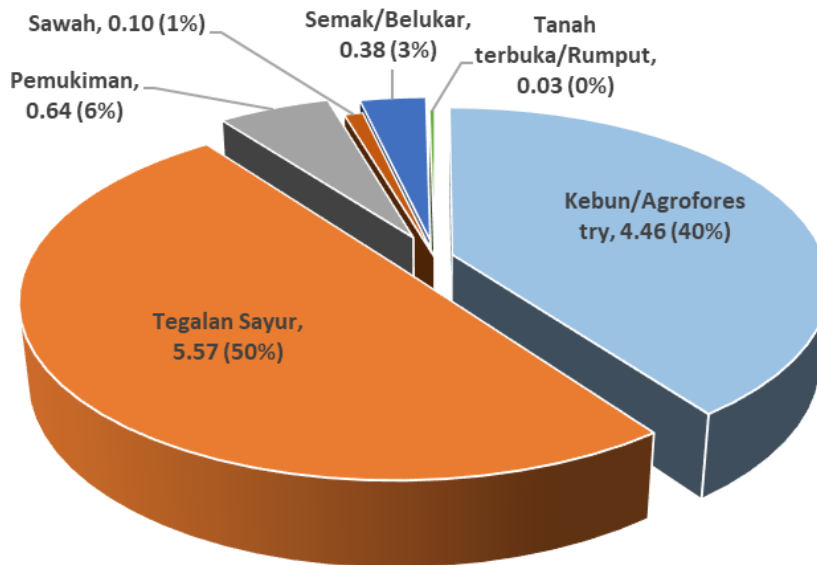
### 5.2.1 Surface runoff di recharge area

Rata-rata jumlah *surface runoff* di wilayah *recharge area* sekitar 869 mm/tahun (11.18 juta m<sup>3</sup>/tahun), sekitar 30.8% dari jumlah curah hujan. Jumlah *surface runoff* ini dipengaruhi oleh komposisi tutupan/penggunaan lahan, dan jenis tanah. Ada 5 jenis tutupan / penggunaan lahan di *recharge area*, yang dominan adalah ladang sayur (49.8%) dan kebun / *agroforestry* masyarakat (39.9%). Lahan pemukiman hanya 5.7% (81 ha). Selanjutnya, ada 3 jenis tanah; yang dominan latosol Coklat Kemerahan (78.9%) dan Asosiasi andosol Coklat dan regosol Coklat (19.3%). Tekstur tanah tergolong lempung hingga lempung berpasir (SHG B/SHG C). Kombinasi ini menghasilkan karakteristik hidrologi permukaan spesifik yang menentukan besarnya *surface runoff*.

Kontribusi *surface runoff* paling besar (50%) berasal dari ladang / tegalan sayur (5.57 juta m<sup>3</sup>/tahun) dan 40% dari kebun/*agroforestry* (4.46 juta m<sup>3</sup>/tahun). *surface runoff* berasal dari lahan pemukiman sekitar 0.64 juta m<sup>3</sup>/tahun. Jumlah *surface runoff* dari lahan sawah yang masih produktif sedikit sekali, sekitar 0.1 juta m<sup>3</sup>/tahun (1%). Tanah terbuka/rumput (lapangan bola), hanya sedikit sekali berkontribusi terhadap *surface runoff* di *recharge area* ( Gbr.5.9 pada halaman 53). Jumlah air hujan



Gambar 5.8: Diagram Neraca air di *recharge area* sumber air Plant Subang



Gambar 5.9: Potensi volume *surface runoff* (juta m<sup>3</sup>/tahun) di recharge dan proporsi berdasarkan tutupan/penggunaan lahan

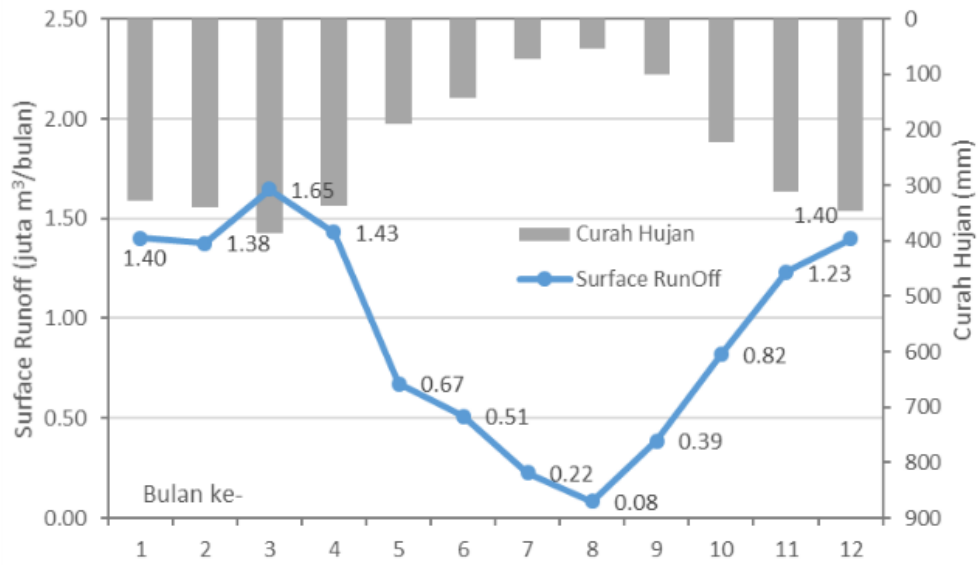
yang menjadi *surface runoff* ini akan hilang dari *recharge area* masuk ke aliran Sungai Ci Tamiang, Ci Cenang, Ci Pabelah dan Sungai Ci Euyeub / Cihonje. Namun, dengan menerapkan teknik konservasi air yang sederhana potensi air yang hilang ini dapat diresapkan kembali ke dalam tanah.

Untuk distribusi bulanan, volume *surface runoff* di *recharge area* berkisar antara 0.08 – 1.65 juta m<sup>3</sup>/bulan. *surface runoff* paling tinggi pada puncak musim hujan (Maret), sebesar 1.65 juta m<sup>3</sup>/bulan. Sedangkan paling rendah pada puncak musim kemarau (Agustus), sebesar 0.08 juta m<sup>3</sup>/bulan (Gbr.5.10 pada halaman 54). Nilai rasio *surface runoff* terhadap curah hujan pada musim hujan berkisar 31-33%. Pada musim kemarau nilai rasio-nya lebih variatif, berkisar 12-30%. Nilai rasio paling rendah pada puncak musim kemarau.

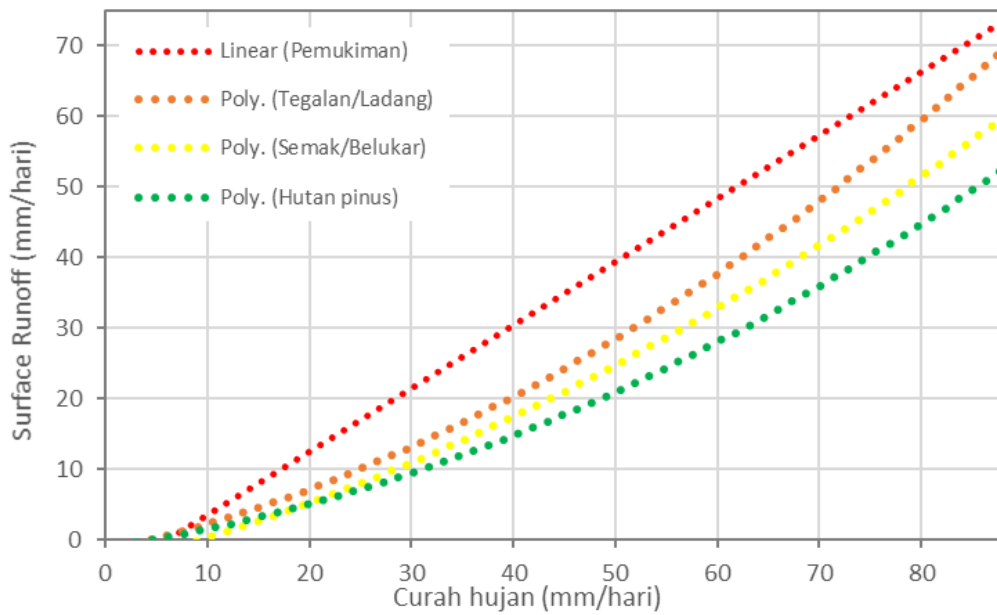
Gbr.5.11 pada halaman 54 menunjukkan jumlah *surface runoff* dari lahan bervegetasi (hutan, semak/belukar) lebih rendah dibandingkan lahan terbuka (tegalan/ladang) dan lahan pemukiman. Hasil analisa harian menunjukkan bahwa rata-rata nilai rasio *surface runoff* dari lahan hutan pinus sebesar 61.6% dari curah hujan. Nilai rasio *surface runoff* dari lahan pemukiman jauh lebih besar (89.6% dari curah hujan). Artinya, potensi air hujan yang diresapkan ke dalam tanah lebih banyak di lahan hutan dibandingkan lahan pemukiman.

### 5.2.2 Groundwater recharging di *recharge area*

*recharge area* sumber air Plant Subang memiliki potensi jumlah air hujan efektif yang bisa diresapkan ke dalam *aquifer* melalui zona perakaran sekitar 1,955 mm/tahun.



Gambar 5.10: Variasi bulanan potensi *surface runoff* di *recharge area*



Gambar 5.11: Grafik hubungan curah hujan harian dengan *surface runoff* pada berbagai tutupan/penggunaan lahan

Tabel 5.1: Persamaan hubungan curah hujan harian dengan *surface runoff* pada berbagai tutupan/penggunaan lahan

Tutupan lahan / Penggunaan lahan	Persamaan limpasan permukaan (mm) <sup>a</sup>	min. RO <sup>b</sup>	Koefesien determinasi ( $R^2$ ) <sup>c</sup>
Semak/ Belukar	$0.004X^2 + 0.3707X - 3.7463$	9	0.9810
Kebun/Agroforestry	$0.0053X^2 + 0.3358X - 1.6639$	5	0.9836
Hutan (pinus)	$0.0044X^2 + 0.2198X - 1.0498$	12	0.9914
Pemukiman	$0.8956X - 5.3884$	6	0.9867
Tegalan/ladang	$0.0054X^2 + 0.333X - 1.5918$	5	0.9858

<sup>a</sup>Curah hujan harian (mm)

<sup>b</sup>Curah hujan minimum terjadinya Run Off (mm/hari)

<sup>c</sup>Sumber: Analisa output model SWAT

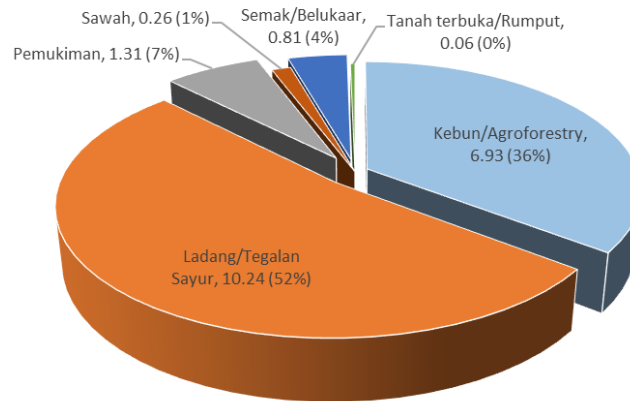
curah hujan efektif merupakan jumlah curah hujan yang diterima di lahan dikurangi dengan *surface runoff*. Jumlah curah hujan efektif tersebut yang berpotensi bisa direaksikan ke dalam tanah. Rata-rata jumlah air yang masuk ke *groundwater* di *recharge area* 1,524 mm/tahun. Dengan luas *recharge area* 1,286 ha, maka potensi jumlah volume air yang masuk ke *groundwater* adalah 19.6 juta m<sup>3</sup>/tahun (0.622 m<sup>3</sup>/detik)

Komposisi imbuhan air tanah tersebut paling besar berasal dari ladang / tegalan sayur (52%), sekitar 10.24 juta m<sup>3</sup>/tahun. Lahan bervegetasi yang ada di *recharge area* adalah kebun/*agroforestry*; seperti kebun pala, cengkeh, kebun buah dan hutan tanaman rakyat seperti sengon yang terdapat nanas di bawah tajuknya. Jumlah air yang berasal dari kebun/*agroforestry* masyarakat ini sekitar 6.93 juta m<sup>3</sup>/tahun (36%). Imbuhan air tanah yang berasal dari penutupan lahan pemukiman hanya sebagian kecil (7%) sebesar 1.31 juta m<sup>3</sup>/tahun (Gbr.5.12 pada halaman 56).

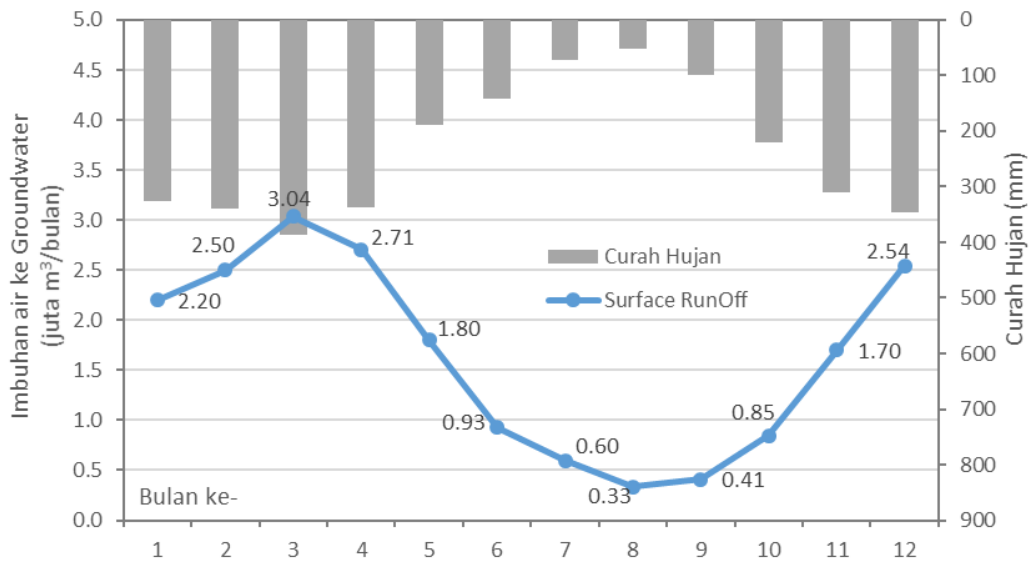
Distribusi imbuhan air tanah bulanan ke *groundwater* di *recharge area* berkisar antara 0.33-3.04 juta m<sup>3</sup>/bulan. Imbuhan air tanah paling tinggi pada Bulan Maret sebesar 3.04 juta m<sup>3</sup>, dan paling rendah pada Bulan Agustus sebesar 0.33 juta m<sup>3</sup>. Pengaruh dari pola curah hujan masih signifikan, Gbr.5.13 pada halaman 56.

Gbr.5.14 pada halaman 57 menunjukkan time series potensi imbuhan air tanah yang masuk ke *groundwater*. Dalam rentang waktu 2005 hingga 2017, imbuhan air tanah paling rendah pada tahun 2011 sekitar 7.7 juta m<sup>3</sup> (0.24 m<sup>3</sup>/detik). Imbuhan air tanah paling tinggi pada 2016, sebesar 54.5 juta m<sup>3</sup> (1.73 m<sup>3</sup>/detik). Besarnya air yang dapat diimbuhkan ke dalam *groundwater* sebanding dengan jumlah curah hujannya. Semakin besar curah hujan, semakin besar air yang bisa di masukan ke dalam *groundwater*. Jumlah curah hujan yang paling tinggi pada periode 2016.

Dari air yang masuk ke *groundwater* tersebut, sebagian besar akan hilang sebagai *return flow/ groundwater flow* masuk ke sungai; sebagian kecil akan menguap kem-

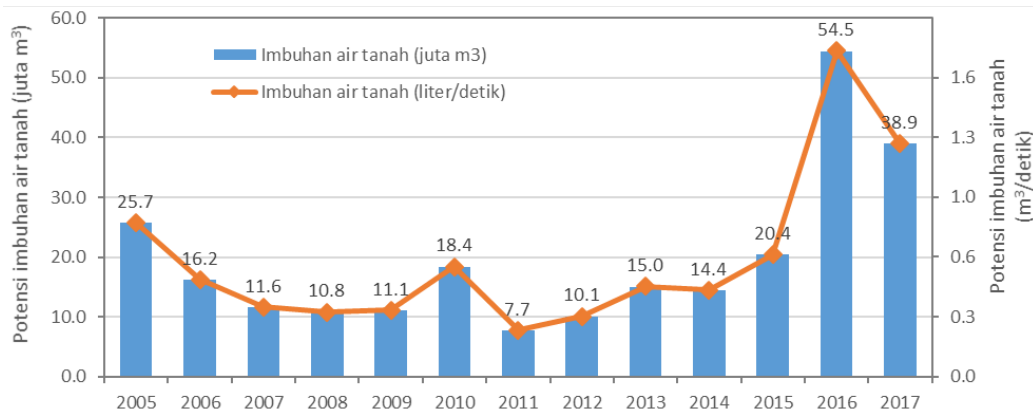


Gambar 5.12: Potensi volume imbuhan air ke shallow *aquifer* (juta m<sup>3</sup>/tahun) di *recharge area* dan proporsi berdasarkan tutupan/penggunaan lahan



Gambar 5.13: Variasi bulanan potensi imbuhan air ke shallow *aquifer* di *recharge area*



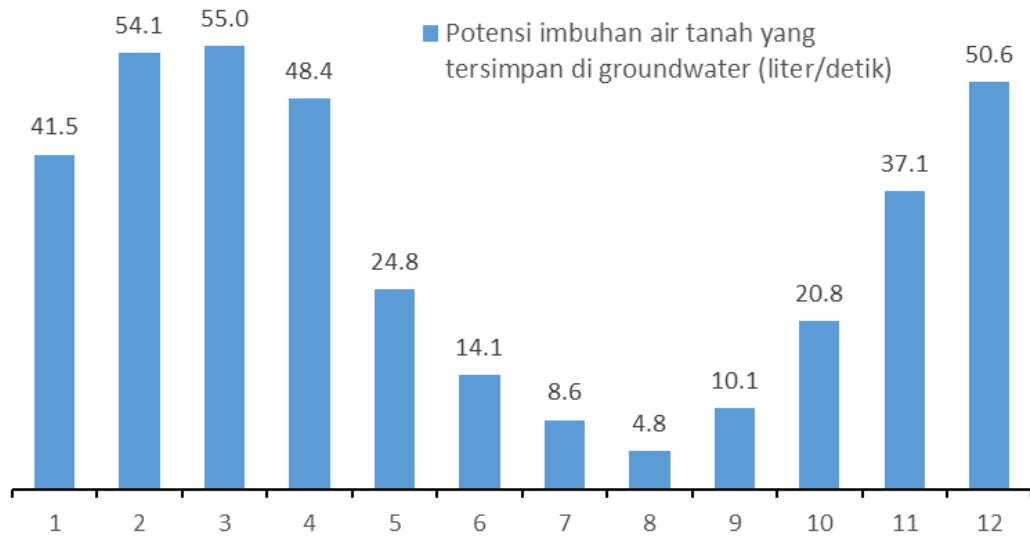


Gambar 5.14: Variasi tahunan potensi imbuhan air ke shallow *aquifer* di *recharge area*

balu (revap) ke zona perakaran dan sisanya akan tersimpan di *groundwater*. Rata-rata jumlah *groundwater flow* yang berkontribusi terhadap aliran sungai sebesar 18.62 juta m<sup>3</sup>/tahun (590.4 liter/detik), jumlah revap ke zona perakaran hanya 0.02 juta m<sup>3</sup>/tahun (0.6 liter/detik) dan sisanya tersimpan sebagai *groundwater* sebesar 0.97 juta m<sup>3</sup>/tahun (30.7 liter/detik). Artinya, dari air yang masuk ke *groundwater* hanya 4.95% yang tersimpan sebagai cadangan air dalam *groundwater*.

Imbuhan air tanah bulanan yang tersimpan dalam *groundwater* bervariasi, berkisar antara 4.8-55 liter/detik. Imbuhan air tanah paling tinggi pada puncak musim hujan (Bulan Maret) sebesar 55 liter/detik (147,305 m<sup>3</sup>/bulan), dan paling rendah pada Bulan Agustus sebesar 4.8 (12,892 m<sup>3</sup>/bulan), Gbr.5.15 pada halaman 58.

Hasil simulasi model SWAT menunjukkan bahwa jenis tutupan/penggunaan lahan mempengaruhi besarnya imbuhan air tanah. Rasio imbuhan air tanah terhadap curah hujan akan semakin besar dengan meningkatnya strata vegetasi. Rasio imbuhan air tanah terhadap curah hujan pada kondisi tanah terbuka/lahan berumput (tanpa vegetasi), sekitar 40.7%. Dengan meningkatnya strata vegetasi menjadi semak/belukar, rasio imbuhan air tanah meningkat menjadi 55.12%. Selanjutnya pada strata vegetasi kebun/*agroforestry* rasio imbuhan air tanah meningkat menjadi 64.89%. Pada strata hutan, rasio imbuhan air tanah meningkat menjadi 70.95%. Kondisi seperti hutan inilah, yang diharapkan dalam kegiatan konservasi berbasis vegetatif. Potensi imbuhan air tanah yang tersimpan dalam *groundwater* pada berbagai kondisi strata vegetasi disajikan pada Tabel 5.2 pada halaman 58.



Gambar 5.15: Variasi bulanan potensi imbunan air tanah yang tersimpan dalam *groundwater* di *recharge area*

Tabel 5.2: Potensi imbunan air tanah yang tersimpan dalam groundwater pada berbagai kondisi strata vegetasi

Asosiasi Strata Vegetasi	Potensi Groundwater Recharging <sup>a</sup>		Keterangan: Perkembangan pohon
	(m <sup>3</sup> /ha/tahun)	(liter/detik/ha)	
Rumput / Tanah terbuka	500	0.016	0-2 tahun
Semak / Belukar	697	0.022	3-4 tahun
Kebun / Agroforestri	750	0.024	5-6 tahun
Hutan (Pinus)	900	0.029	>6 tahun

<sup>a</sup>Sumber: Analisa output model SWAT

# 6 KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

## 6.1 Kesimpulan

1. Model SWAT yang dibangun di DAS Cipunagara dapat dipergunakan untuk evaluasi kegiatan konservasi di daerah *recharge area*. Hal ini ditunjukkan dengan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) dan NSE pada saat kalibrasi dan validasi lebih dari 0.75 (sangat bagus) yang menggunakan data bulanan sedangkan menggunakan data harian nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) dan NSE lebih dari 0.6 (bagus).
2. Dari 14 parameter hidrologi yang dikalibrasi, terdapat 8 parameter yang agak sensitif. Dari parameter tersebut, ada 3 parameter yang bisa dilakukan intervensi dengan melakukan kegiatan konservasi; yaitu CN2 (faktor tutupan lahan), CH\_N1 (kekasaran permukaan dasar anak sungai), dan CH\_N2 (kekasaran permukaan dasar anak sungai). CN2, CH\_N1 dan CH\_N2 tergolong parameter yang agak sensitif
3. Neraca air di SubDAS Cipunagara Hulu: jumlah curah hujan sekitar 290.22 juta  $m^3$ /tahun, jumlah evapotranspirasi sebesar 72.98 juta  $m^3$ /tahun, jumlah *surface runoff* yang masuk ke sungai 120.42 juta  $m^3$ /tahun. Dari air yang meresap ke dalam tanah, sekitar 1.30 juta  $m^3$ /tahun tersimpan dalam zona perakaran; 2.36 juta  $m^3$ /tahun masuk ke sungai sebagai lateral flow; dan 93.16 juta  $m^3$ /tahun masuk ke lapisan akuifer. Dari air yang masuk tersebut, sekitar 83.88 juta  $m^3$ /tahun masuk ke sungai sebagai *return flow / groundwater flow*; menguap kembali melalui zona perakaran sekitar 1.86 juta  $m^3$ , dan sekitar 7.41 juta  $m^3$ /tahun tersimpan dalam akuifer (*groundwater*)
4. Rata-rata jumlah *surface runoff* di wilayah *recharge area* sekitar 869 mm/tahun (11.2 juta  $m^3$ /tahun), sekitar 30.8% dari jumlah curah hujan. Kontribusi *surface runoff* paling besar berasal dari Tegalan sayur (5.57 juta  $m^3$ /tahun) dan kebun/*agroforestry* (4.46 juta  $m^3$ /tahun). *surface runoff* berasal dari lahan pemukiman sekitar 0.64 juta  $m^3$ /tahun (6% dari total luas *recharge area*). Jumlah *surface runoff* dari lahan sawah yang masih produktif sedikit sekali, sekitar 0.1 juta  $m^3$ /tahun (1%).
5. Rata-rata imbuhan air tanah ke *groundwater* di wilayah *recharge area* adalah 19.6 juta  $m^3$ /tahun (0.622  $m^3$ /detik). Komposisi imbuhan air tanah tersebut paling besar berasal dari ladang / tegalan sayur (52%), sekitar 10.24 juta  $m^3$ /tahun. Jumlah air yang berasal dari kebun/*agroforestry* masyarakat ini sekitar 6.93 juta  $m^3$ /tahun (36%). Imbuhan air tanah yang berasal dari penutupan lahan pemukiman hanya sebagian kecil (7%) sebesar 1.31 juta  $m^3$ /tahun.

## 6.2 Rekomendasi

1. Bentuk intervensi untuk menurunkan nilai CN2 adalah dengan mempertahankan lahan bervegetasi permanen, melakukan kegiatan penghijauan (penanaman pohon) atau membuat sumur resapan di lahan pemukiman adalah sehingga jumlah limpasan permukaan menurun dan peresapan air meningkat. Begitu juga mempertahankan batu-batu di sungai adalah bentuk intervensi mempertahankan nilai CH\_N1 (anak sungai) dan CH\_N2 (sungai utama) sehingga waktu lintasan air sungai semakin lama.
2. Arahkan lokasi pembangunan sumur resapan di *recharge area* sekitar 1,173 unit. Sejumlah sumur resapan tersebut dapat mengurangi air *surface runoff* dan meresapkannya kedalam tanah sebanyak 0.493 juta m<sup>3</sup>/tahun (15.6 liter/detik) atau 77.3% dari total runoff lahan pemukiman di *recharge area*. Jumlah sumur resapan paling banyak di Desa Cibitung (778 unit), Desa Palasari (507 unit) dan Desa Sanca (400 unit);
3. Pemeliharaan riparian zone sebagai bagian dari upaya pengelolaan daerah aliran sungai (DAS). Dengan lebar buffer sungai sekitar 25 m dari tepi sungai, luas daerah rehabilitasi/remediasi sungai ini ada sekitar 16.3 ha di inti *recharge area* dan 39.9 ha di penyangga riparian zone. Kegiatan rehabilitasi dengan menanam pohon aren yang mendukung kegiatan ekonomi masyarakat (gula merah)
4. Lahan yang masih terbuka selain di lahan pemukiman atau ladang/tegal, seperti lahan semak/belukar atau di lahan kebun/*agroforestry* yang masing sangat jarang (slope kurang dari 25%) dapat dilakukan kegiatan penghijauan, membuat rorak atau embung mini. Luas arahan kegiatan ini sekitar 92.7 ha di inti *recharge area* dan 31 ha di penyangga *recharge area*. Setiap 1 ha area penghijauan dibuat 10 rorak dan 1 embung mini dengan dimensi rorak yang dibuat misalnya 1x2x0.5 m dan dimensi embung 2x4x1m.
5. Daerah *recharge area* merupakan penyangga daerah wisata air panas Ciater. Desa Cibeusi dan Cibitung secara alami banyak curug yang bernilai eksotis. curug di *recharge area* Desa Cibeusi, diantaranya curug Nangka Bongkok, curug Ciangin, dan curug Mustika Pelangi. curug yang di Desa Cibitung, diantaranya curug Astra Dipa dan Sigay. Daerah ini bisa dikembang ekowisata berbasiskan pemberdayaan masyarakat
6. Kegiatan konservasi yang dilakukan harus berdasarkan perencanaan sehingga optimal, efektif dan tepat sasaran. Setelah kegiatan konservasi berjalan harus ada pemantauan dan pemeliharaan secara berkala agar output dari kegiatan konservasi tersebut berkelanjutan.
7. Perlu mengkader anggota masyarakat sebagai kader lingkungan yang melakukan pemantauan dan pemeliharaan hasil kegiatan konservasi

8. Perlu melakukan kajian lanjutan untuk penerapan imbal jasa lingkungan untuk mempertahankan lahan masyarakat berupa kebun/agroforestri yang masih bervegetasi baik.



## Bibliografi

- [Abbaspour et al., 2007] Abbaspour, K., Vejdani, M., & Haghghat, S. (2007). Swat-cup calibration and uncertainty programs for swat. In *Modsim 2007: international congress on modelling and simulation: land, water and environmental management: integrated systems for sustainability, Christchurch, New Zealand*.
- [Abbaspour et al., 2018] Abbaspour, K. C., Vaghefi, S. A., & Srinivasan, R. (2018). A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: a review of papers from the 2016 international swat conference.
- [Abbaspour et al., 2008] Abbaspour, K. C., Yang, J., Vejdani, M., & Haghghat, S. (2008). Swatcup: Calibration and uncertainty programs for swat. *4th Int. SWAT Conf. Proc.*
- [Abraham et al., 2007] Abraham, L. Z., Roehrig, J., & Chekol, D. A. (2007). Calibration and validation for swat hidrologic model for meki watershed, ethiopia. *Tropentag 2007 University of Kassel-Witzenhausen University of Göttingen*.
- [Arnold et al., 2010] Arnold, J., Allen, P., Volk, M., Williams, J., & Bosch, D. (2010). Assessment of different representations of spatial variability on swat model performance. *Transactions of the ASABE*, 53(5), 1433–1443.
- [Arnold et al., 2001] Arnold, J. G., Allen, P. M., & Morgan, D. S. (2001). Hydrologic model for design and constructed wetlands. *Wetlands*, 21(2), 167–178.
- [Arnold & Fohrer, 2005] Arnold, J. G. & Fohrer, N. (2005). Swat2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, 19(3), 563–572.
- [Arnold et al., 2012] Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R., Van Griensven, A., Van Liew, M. W., et al. (2012). Swat: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491–1508.
- [Arnold et al., 2000] Arnold, J. G., Muttiah, R. S., Srinivasan, R., & Allen, P. M. (2000). Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the upper mississippi river basin. *Journal of hydrology*, 227(1-4), 21–40.
- [Bai et al., 2016] Bai, P., Liu, X., Yang, T., Li, F., Liang, K., Hu, S., & Liu, C. (2016). Assessment of the influences of different potential evapotranspiration inputs on the performance of monthly hydrological models under different climatic conditions. *Journal of Hydrometeorology*, 17(8), 2259–2274.

- [Bekele & Nicklow, 2007] Bekele, E. G. & Nicklow, J. W. (2007). Multi-objective automatic calibration of swat using nsga-ii. *Journal of Hydrology*, 341(3), 165–176.
- [Benaman et al., 2005] Benaman, J., Shoemaker, C. A., & Haith, D. A. (2005). Calibration and validation of soil and water assessment tool on an agricultural watershed in upstate new york. *Journal of Hydrologic Engineering*, 10(5), 363–374.
- [Bosch et al., 2004] Bosch, D. D., Sheridan, J., Batten, H., & Arnold, J. (2004). Evaluation of the swat model on a coastal plain agricultural watershed. *Transactions of the ASAE*, 47(5), 1493.
- [Bosch et al., 2011] Bosch, N. S., Allan, J. D., Dolan, D. M., Han, H., & Richards, R. P. (2011). Application of the soil and water assessment tool for six watersheds of lake erie: Model parameterization and calibration. *Journal of Great Lakes Research*, 37(2), 263–271.
- [BPS Subang, 2018a] BPS Subang (2018a). *Kecamatan Ciater Dalam Angka Tahun 2017*. BPS.
- [BPS Subang, 2018b] BPS Subang (2018b). *Kecamatan Kasomalang Dalam Angka Tahun 2017*. BPS.
- [BPS Subang, 2018c] BPS Subang (2018c). *Kecamatan Kasomalang Dalam Angka Tahun 2017*. BPS.
- [Chen & Wu, 2012] Chen, J. & Wu, Y. (2012). Advancing representation of hydrologic processes in the soil and water assessment tool (swat) through integration of the topographic model (topmodel) features. *Journal of hydrology*, 420, 319–328.
- [Chhuon et al., 2016] Chhuon, K., Herrera, E., & Nadaoka, K. (2016). Application of integrated hydrologic and river basin management modeling for the optimal development of a multi-purpose reservoir project. *Water Resources Management*, 30(9), 3143–3157.
- [de Almeida Bressiani et al., 2015] de Almeida Bressiani, D., Gassman, P. W., Fernandes, J. G., Garbossa, L. H. P., Srinivasan, R., Bonumá, N. B., & Mendiondo, E. M. (2015). Review of soil and water assessment tool (swat) applications in brazil: challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(3), 9–35.
- [Di Luzio et al., 2002a] Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J., & Neitsch, S. (2002a). *ArcView interface for SWAT 2000*. Technical report, Texas Water Resources Institute.
- [Di Luzio et al., 2002b] Di Luzio, M., Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (2002b). Integration of watershed tools and swat model into basins 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 38(4), 1127–1141.



- [Di Luzio et al., 2004] Di Luzio, M., Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (2004). A gis-coupled hydrological model system for the watershed assessment of agricultural non-point and point sources of pollution. *Transactions in GIS*, 8(1), 113–136.
- [Douglas-Mankin et al., 2010] Douglas-Mankin, K., Srinivasan, R., & Arnold, J. (2010). Soil and water assessment tool (swat) model: Current developments and applications. *Transactions of the ASABE*, 53(5), 1423–1431.
- [Gassman et al., 2007] Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211–1250.
- [Harmel et al., 2006] Harmel, R., Cooper, R., Slade, R., Haney, R., & Arnold, J. (2006). Cumulative uncertainty in measured streamflow and water quality data for small watersheds. *Transactions of the ASABE*, 49(3), 689–701.
- [Haverkamp et al., 2005] Haverkamp, S., Fohrer, N., & Frede, H.-G. (2005). Assessment of the effect of land use patterns on hydrologic landscape functions: A comprehensive gis-based tool to minimize model uncertainty resulting from spatial aggregation. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(3), 715–727.
- [Huang et al., 2020] Huang, S., Shah, H., Naz, B. S., Shrestha, N., Mishra, V., Daggupati, P., Ghimire, U., & Vetter, T. (2020). Impacts of hydrological model calibration on projected hydrological changes under climate change a multi-model assessment in three large river basins. *Climatic Change*, 163(3), 1143–1164.
- [Jayakrishnan et al., 2005] Jayakrishnan, R., Srinivasan, R., Santhi, C., & Arnold, J. (2005). Advances in the application of the swat model for water resources management. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(3), 749–762.
- [Jha, 2011] Jha, M. K. (2011). Evaluating hydrologic response of an agricultural watershed for watershed analysis. *Water*, 3(2), 604–617.
- [Kalcic et al., 2015] Kalcic, M. M., Chaubey, I., & Frankenberger, J. (2015). Defining soil and water assessment tool (swat) hydrologic response units (hrus) by field boundaries. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(3), 69–80.
- [King et al., 1999] King, K. W., Arnold, J., & Bingner, R. (1999). Comparison of green-ampt and curve number methods on goodwin creek watershed using swat. *Transactions of the ASAE*, 42(4), 919.
- [LAPI, 2010] LAPI (2010). *Studi hidrogeologi di lokasi sumber air Aqua Subang-Jawa Barat. PT Tirta Investama (Report Project)*. Technical report, PT Tirta Investama.
- [Le Maitre et al., 1999] Le Maitre, D. C., Scott, D. F., & Colvin, C. (1999). Review of information on interactions between vegetation and groundwater.

- [Luan et al., 2018] Luan, X.-B., Wu, P.-T., Sun, S.-K., Li, X.-L., Wang, Y.-B., & Gao, X.-R. (2018). Impact of land use change on hydrologic processes in a large plain irrigation district. *Water Resources Management*, 32(9), 3203–3217.
- [Migliaccio & Srivastava, 2007] Migliaccio, K. W. & Srivastava, P. (2007). Hydrologic components of watershed-scale models. *Transactions of the ASABE*, 50(5), 1695–1703.
- [Moriassi et al., 2007] Moriassi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- [Mosbahi et al., 2013] Mosbahi, M., Benabdallah, S., & Boussema, M. R. (2013). Assessment of soil erosion risk using swat model. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(10), 4011–4019.
- [Nash & Sutcliffe, 1970] Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part i—a discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282–290.
- [Nicks, 1974] Nicks, A. (1974). Stochastic generation of the occurrence, pattern, and location of maximum amount of daily rainfall. In *Proc. symp. statistical hydrology* (pp. 154–171): USDA Washington, DC.
- [Noori & Kalin, 2016] Noori, N. & Kalin, L. (2016). Coupling swat and ann models for enhanced daily streamflow prediction. *Journal of Hydrology*, 533, 141–151.
- [Nyeko, 2015] Nyeko, M. (2015). Hydrologic modelling of data scarce basin with swat model: capabilities and limitations. *Water resources management*, 29(1), 81–94.
- [Olivera et al., 2006] Olivera, F., Valenzuela, M., Srinivasan, R., Choi, J., Cho, H., Koka, S., & Agrawal, A. (2006). Arcgis-swat: A geodata model and gis interface for swat 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 42(2), 295–309.
- [Pandey et al., 2020] Pandey, V. P., Dhaubanjari, S., Bharati, L., & Thapa, B. R. (2020). Spatio-temporal distribution of water availability in karnali-mohana basin, western nepal: Climate change impact assessment (part-b). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 29, 100691.
- [Papadaki et al., 2017] Papadaki, C., Soulis, K., Ntoanidis, L., Zogaris, S., Dercas, N., & Dimitriou, E. (2017). Comparative assessment of environmental flow estimation methods in a mediterranean mountain river. *Environmental management*, 60(2), 280–292.
- [Qi & Grunwald, 2005] Qi, C. & Grunwald, S. (2005). Gis-based hydrologic modeling in the sandusky watershed using swat. *Transactions of the ASAE*, 48(1), 169–180.

- [Rosbjerg & Madsen, 2006] Rosbjerg, D. & Madsen, H. (2006). Concepts of hydrologic modeling. *Encyclopedia of hydrological sciences*.
- [Sangrey et al., 1984] Sangrey, D. A., Harrop-Williams, K. O., & Klaiber, J. A. (1984). Predicting ground-water response to precipitation. *Journal of geotechnical engineering*, 110(7), 957–975.
- [Santhi et al., 2001] Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., & Hauck, L. M. (2001). Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1169–1188.
- [Santhi et al., 2005] Santhi, C., Muttiah, R., Arnold, J., & Srinivasan, R. (2005). A gis-based regional planning tool for irrigation demand assessment and savings using swat. *Transactions of the ASAE*, 48(1), 137–147.
- [Schuol & Abbaspour, 2006] Schuol, J. & Abbaspour, K. (2006). Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (swat) applied to west africa. *Advances in geosciences*, 9, 137–143.
- [Shi et al., 2011] Shi, P., Chen, C., Srinivasan, R., Zhang, X., Cai, T., Fang, X., Qu, S., Chen, X., & Li, Q. (2011). Evaluating the swat model for hydrological modeling in the xixian watershed and a comparison with the xaj model. *Water resources management*, 25(10), 2595–2612.
- [Shi et al., 2013] Shi, Y., Davis, K. J., Duffy, C. J., & Yu, X. (2013). Development of a coupled land surface hydrologic model and evaluation at a critical zone observatory. *Journal of Hydrometeorology*, 14(5), 1401–1420.
- [Silitonga, 2003] Silitonga, P. H. (2003). *Peta Geologi Lembar Bandung Djawa, Skala 1:100.000, Cetakan ke-3*. Technical report, PPPG, Bandung.
- [Sisay et al., 2017] Sisay, E., Halefom, A., Khare, D., Singh, L., & Worku, T. (2017). Hydrological modelling of ungauged urban watershed using swat model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(2), 693–702.
- [Sloan & Moore, 1984] Sloan, P. G. & Moore, I. D. (1984). Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research*, 20(12), 1815–1822.
- [Sohrabi et al., 2003] Sohrabi, T., Shirmohammadi, A., Chu, T., Montas, H., & Nejadhashemi, A. (2003). Uncertainty analysis of hydrologic and water quality predictions for a small watershed using swat2000. *Environmental Forensics*, 4(4), 229–238.
- [Spruill et al., 2000] Spruill, C. A., Workman, S. R., & Taraba, J. L. (2000). Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the swat model. *Transactions of the ASAE*, 43(6), 1431.

- [Srinivasan et al., 2010] Srinivasan, R., Zhang, X., & Arnold, J. (2010). Swat ungauged: hydrological budget and crop yield predictions in the upper mississippi river basin. *Transactions of the ASABE*, 53(5), 1533–1546.
- [Stehr et al., 2008] Stehr, A., Debels, P., Romero, F., & Alcayaga, H. (2008). Hydrological modelling with swat under conditions of limited data availability: evaluation of results from a chilean case study. *Hydrological sciences journal*, 53(3), 588–601.
- [Sutrisno, 1985] Sutrisno, S. (1985). *Peta Hidrogeologi Indonesia Lembar 11 Cirebon (Jawa)*. Technical report, Direktorat Geologi Tata Lingkungan, Bandung.
- [Tahmasebi Nasab et al., 2017] Tahmasebi Nasab, M., Singh, V., & Chu, X. (2017). Swat modeling for depression-dominated areas: how do depressions manipulate hydrologic modeling? *Water*, 9(1), 58.
- [Teshager et al., 2016] Teshager, A. D., Gassman, P. W., Secchi, S., Schoof, J. T., & Misgna, G. (2016). Modeling agricultural watersheds with the soil and water assessment tool (swat): Calibration and validation with a novel procedure for spatially explicit hrus. *Environmental management*, 57(4), 894–911.
- [Thampi et al., 2010] Thampi, S. G., Raneesh, K. Y., & Surya, T. (2010). Influence of scale on swat model calibration for streamflow in a river basin in the humid tropics. *Water resources management*, 24(15), 4567–4578.
- [UNPAD, 2017] UNPAD (2017). *Kajian Hidrogeologi lokasi sumber Air Aqua Subang di di SubDAS Cipunagara Hulu*. Technical report, PT Tirta Investama.
- [Van Liew & Garbrecht, 2003] Van Liew, M. W. & Garbrecht, J. (2003). Hydrologic simulation of the little washita river experimental watershed using swat 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 39(2), 413–426.
- [Van Liew et al., 2007] Van Liew, M. W., Veith, T. L., Bosch, D. D., & Arnold, J. G. (2007). Suitability of swat for the conservation effects assessment project: Comparison on usda agricultural research service watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(2), 173–189.
- [Veettil & Mishra, 2016] Veettil, A. V. & Mishra, A. K. (2016). Water security assessment using blue and green water footprint concepts. *Journal of Hydrology*, 542, 589–602.
- [Venetis, 1969] Venetis, C. (1969). A study on the recession of unconfined aquifers. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, 14(4), 119–125.
- [White & Chaubey, 2005] White, K. L. & Chaubey, I. (2005). Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable swat model 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41(5), 1077–1089.

- [Wu & Johnston, 2007] Wu, K. & Johnston, C. A. (2007). Hydrologic response to climatic variability in a great lakes watershed: A case study with the swat model. *Journal of Hydrology*, 337(1-2), 187–199.
- [Yu et al., 2011] Yu, M., Chen, X., Li, L., Bao, A., & De la Paix, M. J. (2011). Streamflow simulation by swat using different precipitation sources in large arid basins with scarce raingauges. *Water Resources Management*, 25(11), 2669–2681.
- [Zhang et al., 2013] Zhang, X., Izaurrealde, R. C., Arnold, J. G., Williams, J. R., & Srinivasan, R. (2013). Modifying the soil and water assessment tool to simulate cropland carbon flux: model development and initial evaluation. *Science of the Total Environment*, 463, 810–822.
- [Zhang et al., 2008] Zhang, X., Srinivasan, R., & Van Liew, M. (2008). Multi-site calibration of the swat model for hydrologic modeling. *Transactions of the ASABE*, 51(6), 2039–2049.

