

PENELITIAN HIDROLOGI

di Sub DAS Cimande - Ciherang

Menggunakan Aplikasi Model SWAT

Yuli Suharnoto

Mei, 2024

Daftar Isi

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 | Latar Belakang | 1 |
| 1.2 | Lokasi Kegiatan | 1 |
| 1.3 | Tujuan | 1 |
| 2 | METODE | 3 |
| 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 | Kalibrasi, Analisis sensitivitas Model dan Validasi | 11 |
| 3 | KEADAAN UMUM | 13 |
| 3.1 | Lokasi Kajian | 13 |
| 3.2 | Iklim | 13 |
| 3.3 | Geologi | 16 |
| 3.4 | Hidrogeologi | 16 |
| 3.5 | Topografi | 17 |
| 3.5.1 | Satuan Perbukitan Vulkanik Sangat Curam | 18 |
| 3.5.2 | Satuan Perbukitan Vulkanik Agak Curam | 18 |
| 3.5.3 | Satuan Perbukitan Vulkanik Agak Landai | 19 |
| 3.6 | Tutupan lahan | 19 |
| 3.7 | Tanah | 21 |
| 3.8 | Demografi | 23 |
| 4 | PEMODELAN SWAT | 25 |
| 4.1 | Kalibrasi, uncertainty analysis, dan validasi model SWAT | 25 |
| 4.2 | Karakteristik Daerah Tangkapan Air | 31 |
| 4.3 | Hydrologic Response Unit (HRU) / Unit Respon Hidrologi (URH) | 31 |
| 5 | KONDISI HIDROLOGI LOKASI KAJIAN | 37 |
| 5.1 | Neraca Air SubDAS Cimande | 37 |
| 5.2 | Neraca air di recharge area sumber air Plant Ciherang | 43 |
| 5.2.1 | <i>Surface runoff</i> di recharge area | 43 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.2.2 | Groundwater recharging di recharge area | 46 |
| 6 | KESIMPULAN DAN REKOMENDASI | 53 |
| 6.1 | Kesimpulan | 53 |
| 6.2 | Rekomendasi | 54 |
| | Bibliografi | 54 |

Daftar Gambar

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Skema model hidrologi SWAT (sumber: modifikasi dari Neitsch <i>at al.</i> , 2005) | 4 |
| 3.1 | Lokasi kajian SWAT sumber air Aqua Plant Ciherang | 14 |
| 3.2 | Distribusi jumlah curah hujan (Kiri) dan hari hujan (Kanan) bulanan di lokasi kajian | 14 |
| 3.3 | Data seri curah hujan harian maksimum (mm) di lokasi kajian | 15 |
| 3.4 | Hutan dan belukar/semak yang mendominasi bagian tengah-hulu SubDAS Cimande (kiri); tutupan lahan yang dominan di bagian tengah hingga ke hilir SubDAS Cimande yang terdiri dari sawah tadah hujan, tegalan/ladang, dan kebun/perkebunan (kanan). | 20 |
| 3.5 | Dinamika tutupan lahan dari tahun 1990, 2009, dan 2017 di wilayah SubDAS Cimande (Atas) dan recharge area (Bawah) | 22 |
| 3.6 | Perubahan tutupan lahan di recharge area | 22 |
| 3.7 | Perubahan tutupan lahan di wilayah SubDAS Cimande | 23 |
| 4.1 | Wilayah analisa model SWAT dari lokasi kajian Plant Ciherang | 26 |
| 4.2 | Hasil perhitungan P-Value dan t-Stat untuk melihat sensitivitas parameter model hidrologi SWAT | 28 |
| 4.3 | Perbandingan time series bulanan hasil simulasi SWAT dan data observasi antara kalibrasi (2011-2014) dan validasi (2015-2017) | 29 |
| 4.4 | Perbandingan time series bulanan hasil simulasi SWAT dan data observasi antara kalibrasi (2011-2014) dan validasi (2015-2017) | 30 |
| 4.5 | Perbandingan time series harian hasil simulasi SWAT dan data observasi antara kalibrasi (2011-2014) dan validasi (2015-2017) | 30 |
| 4.6 | Hubungan hasil simulasi SWAT harian dan data observasi antara proses kalibrasi (2011-2014) dan validasi (2015-2017) | 31 |
| 5.1 | Diagram neraca air di SubDAS Cimande dari output model SWAT | 38 |
| 5.2 | Variasi bulanan evapotranspirasi di SubDAS Cimande | 38 |
| 5.3 | Variasi bulanan <i>surface runoff</i> di SubDAS Cimande | 39 |
| 5.4 | Variasi bulanan lateral flow di SubDAS Cimande | 40 |
| 5.5 | Variasi bulanan perkolasi di SubDAS Cimande | 40 |
| 5.6 | Variasi bulanan <i>Return flow</i> di SubDAS Cimande | 42 |
| 5.7 | Potensi volume komponen neraca air (juta m ³ /tahun) di SubDAS Cimande | 42 |
| 5.8 | Diagram neraca air di recharge area sumber air Plant Subang | 44 |
| 5.9 | Variasi bulanan potensi <i>surface runoff</i> di recharge area | 45 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.10 | Potensi volume <i>surface runoff</i> (juta m ³ /tahun) di recharge area dan proporsi berdasarkan tutupan/penggunaan lahan | 45 |
| 5.11 | Grafik hubungan curah hujan harian dengan <i>surface runoff</i> pada berbagai tutupan/penggunaan lahan | 46 |
| 5.12 | Potensi volume imbuhan air ke akuifer dangkal (juta m ³ /tahun) di recharge area dan proporsi berdasarkan tutupan/penggunaan lahan | 48 |
| 5.13 | Variasi bulanan potensi imbuhan air ke groundwater di recharge area . | 48 |
| 5.14 | Variasi tahunan potensi imbuhan air ke lapisan akuifer di recharge area | 49 |
| 5.15 | Variasi bulanan potensi imbuhan air tanah yang tersimpan dalam groundwater di recharge area | 49 |
| 5.16 | Posisi debit air antara imbuhan airtanah ke akuifer, SIPA Plant Ciherang dan pengambilan air aktual Plant Ciheran | 51 |

Daftar Tabel

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Data spasial yang digunakan pada kajian SWAT Ciherang | 10 |
| 2.2 | Data tabular yang digunakan pada kajian SWAT Ciherang | 11 |
| 3.1 | Wilayah SubDAS Cimande dan recharge area berdasarkan wilayah administrasi | 15 |
| 3.2 | Tipe produktivitas akuifer di SubDAS Cimande | 17 |
| 3.3 | Distribusi kelas ketinggian di SubDAS Cimande | 18 |
| 3.4 | Distribusi kelas kelerengan lahan di SubDAS Cimande | 18 |
| 3.5 | Jenis tutupan lahan berdasarkan status Kawasan hutan di SubDAS Cimande | 20 |
| 3.6 | Tipe dan luas tutupan lahan berdasarkan status Kawasan hutan di recharge area | 21 |
| 3.7 | Jenis tanah di SubDAS Cimande | 24 |
| 3.8 | Rekapitulasi jumlah penduduk Tahun 2017 di lokasi kajian | 24 |
| 4.1 | Parameter model yang dilakukan kalibrasi | 27 |
| 4.2 | Rekapitulasi parameter statistik untuk kalibrasi dan validasi model | 29 |
| 4.3 | Karakteristik setiap DTA dalam analisis SWAT SubDAS Cimande | 32 |
| 4.4 | Kombinasi tutupan lahan, jenis tanah dan kelas lereng di Sub DAS Cimande | 33 |
| 4.5 | Kombinasi tutupan lahan, jenis tanah dan kelas lereng di Sub DAS Cimande | 34 |
| 4.6 | Rekapitulasi luas (Ha) HRU di recharge area sumber air Plant Ciherang berdasarkan wilayah desa | 36 |
| 5.1 | Persamaan hubungan curah hujan harian dengan <i>surface runoff</i> pada berbagai tutupan/penggunaan lahan | 47 |
| 5.2 | Potensi imbuhanan air tanah yang tersimpan dalam groundwater pada berbagai kondisi strata vegetasi | 50 |

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 Ciherang 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 berada di daerah tangkapan air Sungai Cimande (bagian hulu DAS Cisadane). Wilayah administrasi berada di Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat. Secara garis besar berada di 2 kecamatan, yaitu Kecamatan Caringin (Desa Ciderum, Ciherang Pondok, Cimande Cimande Hilir, Lemah duhur, Pancawati dan Tangkil), dan Kecamatan Ciawi (Desa Bojong Murni dan Cileungsi).

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.

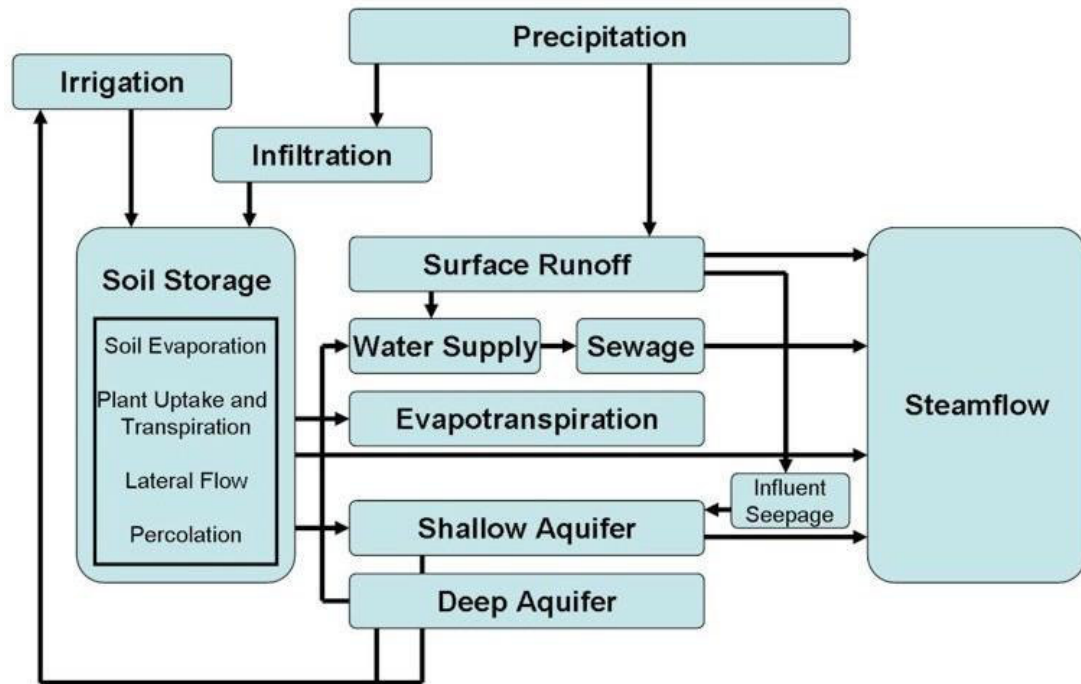
2 METODE

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 kelengkapan 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 H₂O)
- SW_{t-1} : Kandungan air tanah awal pada hari ke t-1
- $Rday_t$: Curah hujan harian pada hari ke-t (mm H₂O)
- $Qsurf_t$: Run off pada hari ke -t (mm H₂O)
- Ea_t : Evapotranspirasi aktual pada hari ke -t (mm H₂O)
- $Wseep_t$: Air yang keluar dari lapisan tanah (melalui perkolasi dan bypass flow) pada hari ke -t (mm H₂O)
- $QLat_t$: Total air yang mengalir secara lateral kembali ke sungai pada hari ke-t (mm H₂O)
- 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 H₂O)
- 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 H₂O)
- Qgw_t : Return flow / groundwater flow pada hari ke -t (mm H₂O)
- $Wrevap_t$: Evaporasi dari groundwater ke lapisan perakaran pada hari ke-t (mm H₂O)
- $Wpump_t$: Evapotranspirasi aktual pada hari ke -t (mm H₂O)
- 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 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 ⁻¹], |
| R_n | : | Radiasi netto [MJ m ⁻² d ⁻¹], |
| G | : | Soil heat flux density [MJ m ⁻² d ⁻¹], |
| T | : | Suhu udara rata-rata di 2 m [°C], |
| U_2 | : | Kecepatan angin di 2 m [m s ⁻¹], |
| e_s | : | Tekanan uap air jenuh [kPa], |
| e_a | : | Tekanan uap air aktual [kPa], |
| $e_s - e_a$ | : | Defisit tekanan uap air jenuh [kPa], |
| Δ | : | Slope kurva tekanan uap air [kPa °C ⁻¹], |
| γ | : | Konstanta Psychrometric [kPa °C ⁻¹]. |

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:

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

Di mana :

- q_{peak} : laju limpasan permukaan maksimum (m^3/s)
- α_{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 (α_{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)
- ϕ_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 (δ_{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 ($w_{rchrg,i}$) sebagai berikut:

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

dimana δ_{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* (α_{gw}). Prosedur untuk menghitung *groundwater flow* sebagai berikut:

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

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

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: β_{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 (http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp) |
| 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 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 |

2.3 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 2011-2014 (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).

3 KEADAAN UMUM

3.1 Lokasi Kajian

Lokasi kajian berada di sebelah Sungai Ciherang, merupakan anak Sungai Cimande. Sungai Cimande bermuara di Sungai Cisadane bagian hulu. Berdasarkan aliran sungai ini, lokasi kajian berada di SubDAS Cimande (bagian dari DAS Cisadane bagian hulu). Berdasarkan letak geografis, SubDAS Cimande berada pada koordinat $6^{\circ}41'0.8'' - 6^{\circ}46'6.4''$ LS dan $106^{\circ}49'12.5'' - 106^{\circ}56'18.7''$ BT. Bagian hulu SubDAS Cimande adalah Gunung Pangrango. Luas SubDAS Cimande sekitar 3495.45 ha. Studi isotop menunjukkan bahwa daerah resapan (*recharge area*) dari 3 sumur bor Aqua Plant Ciherang berada di bagian hulu SubDAS Cimande, berada pada elevasi sekitar 710–910 m dpl. Luas daerah resapan tersebut sekitar 745 ha (sekitar 21.3% wilayah SubDAS Cimande), Gbr.3.1

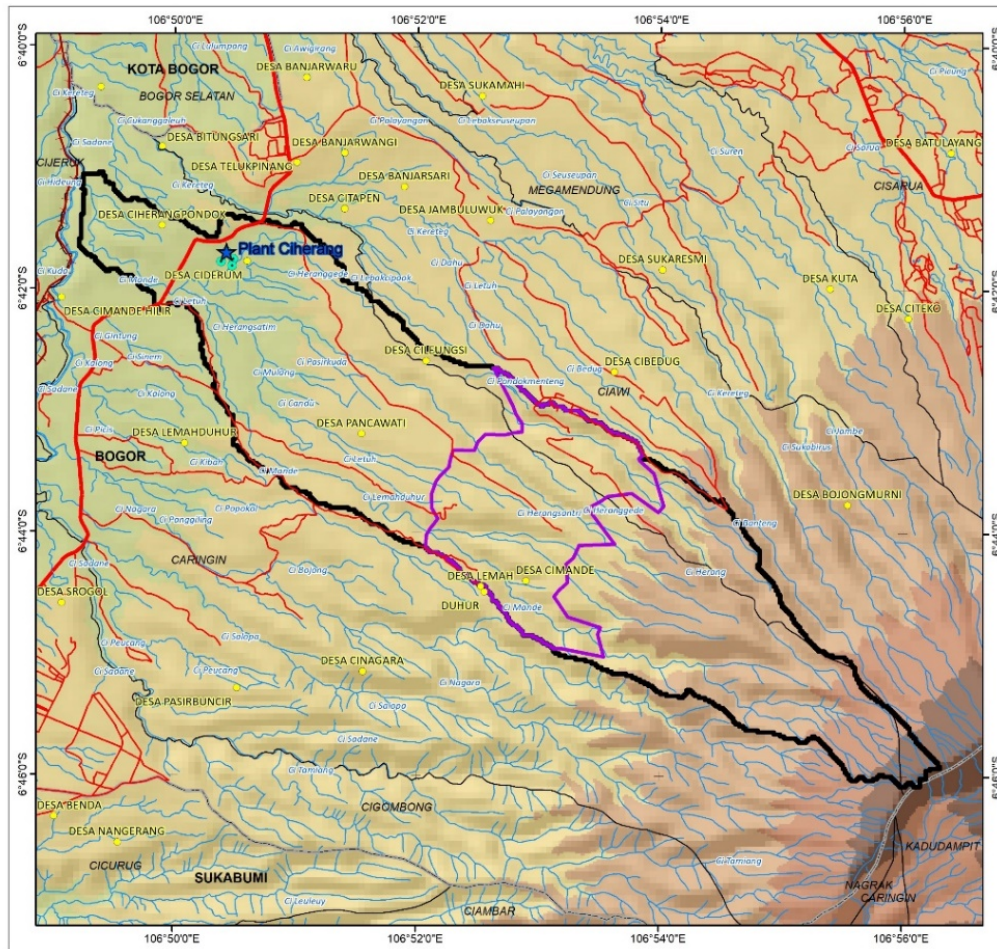
Berdasarkan batas wilayah administrasi¹, SubDAS Cimande berada di Kabupaten Bogor, terletak di 7 desa di Kecamatan Caringin dan 2 desa di Kecamatan Ciawi (Tabel 3.1). Wilayah desa yang paling luas adalah Desa Pancawati (34.8%; 1,216 ha) dan Desa Cimande (27.9%; 975 ha), wilayah desa lainnya hanya sebagian kecil tersebar di SubDAS Cimande. Untuk wilayah recharge area sumber air Aqua Plant Ciherang, sebagian besar berada di Desa Pancawati (33.7%; 251.2 ha), Desa Cimande (27.9%; 208 ha), dan Desa Cileungsi (25.7%, 191.3 ha). Sisanya, hanya sebagian kecil tersebar di Desa Lemah duhur dan Tangkil.

3.2 Iklim

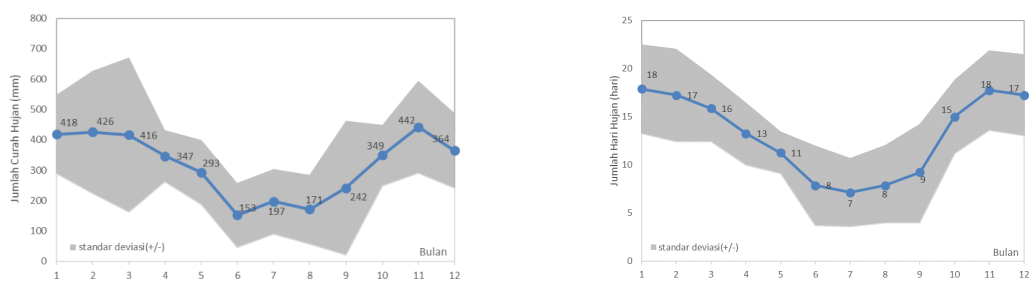
Jumlah curah hujan² Tahun 2010-2017 di lokasi kajian sangat variatif, berkisar antara 1700 – 5000 mm (rata-rata 3380 mm) dengan jumlah hari hujan berkisar 110-200 hari (rata-rata 158 hari hujan). Pola Monsunal mempengaruhi pola distribusi curah hujan di wilayah kajian (Gbr.3.2). Musim kemarau berlangsung pada Bulan Mei – Oktober (puncak pada Agustus) dan musim hujan berlangsung pada Bulan November-April. Jumlah curah hujan bulanan sepanjang tahun lebih dari 100 mm, artinya pada musim kemarau juga relative basah. Dalam rentang waktu 2010-2017, curah hujan harian maksimum paling tinggi pada tahun 2010 (145 mm), selanjutnya Tahun 2012 (141 mm) dan Tahun 2016 (116 mm), Gbr.3.3.

¹Peta batas administrasi dari Rupa Bumi Indonesia (RBI) BIG Skala 1:25000 update Tahun 2013

²Lokasi pengukuran pos CH di Pasir Jaya (Lokasi 6.729LS, 106.797 BT, 508 m dpl) tahun 2010-2017 (8 tahun), data harian.



Gambar 3.1: Lokasi kajian SWAT sumber air Aqua Plant Ciherang

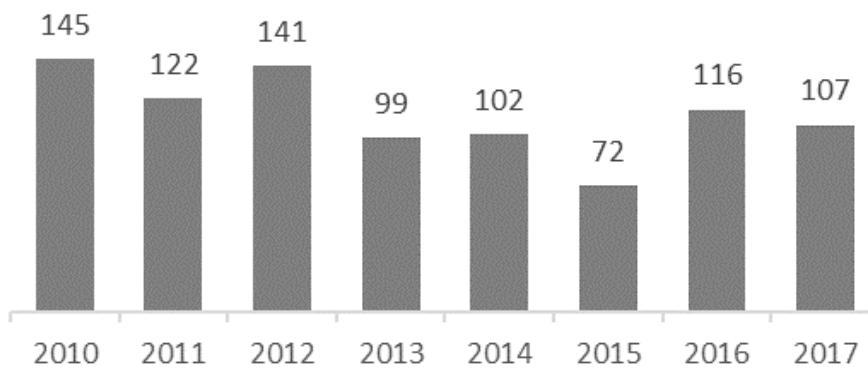


Gambar 3.2: Distribusi jumlah curah hujan (Kiri) dan hari hujan (Kanan) bulanan di lokasi kajian

Tabel 3.1: Wilayah SubDAS Cimande dan recharge area berdasarkan wilayah administrasi

| Wilayah SubDAS Cimande | | | |
|------------------------|-----------------|--------|------|
| Kecamatan | Desa | Jumlah | |
| | | (Ha) | (%) |
| Caringin | Ciderum | 283 | 8.1 |
| | Ciherang Pondok | 219 | 6.3 |
| | Cimande | 975 | 27.9 |
| | Cimande Hilir | 38 | 1.1 |
| | Lemah duhur | 185 | 5.3 |
| | Pancawati | 1,216 | 34.8 |
| | Tangkil | 93 | 2.7 |
| Ciawi | Bojong murni | 8 | 0.2 |
| | Cileungsi | 479 | 13.7 |
| Jumlah | | 3,495 | 100 |

| Wilayah Recharge Area | | | |
|-----------------------|-------------|--------|-------|
| Kecamatan | Desa | Jumlah | |
| | | (Ha) | (%) |
| Caringin | Cimande | 208.0 | 27.9 |
| | Lemah duhur | 40.1 | 5.4 |
| | Pancawati | 251.2 | 33.7 |
| | Tangkil | 54.5 | 7.3 |
| Ciawi | Cileungsi | 191.3 | 25.7 |
| Jumlah | | 745.0 | 100.0 |



Gambar 3.3: Data seri curah hujan harian maksimum (mm) di lokasi kajian

3.3 Geologi

Berdasarkan peta geologi lembar Bogor (A.C. Efendi, Kusnama, dan B. Hermanto; 1998), lokasi kajian berada pada formasi Batuan Gunung-api Gunung Pangrango (*Qvpo*), Peta terlampir. Batuan tertua yang tersingkap di wilayah ini terdiri atas tufa berbatu apung yang tersusun oleh litologi berupa lahar dan lava basal andesit. Aktivitas tektonik di daerah ini dimulai pada Awal Tersier, diikuti oleh aktivitas tektonik *Plio-Pleistosen*. Aktivitas yang mengaktifkan kembali produk tektonik periode awal Tersier, membentuk sesar-sesar yang berarah umum timurlaut – baratdaya dan baratlaut – tenggara. Rekahan-rekahan yang terbentuk menjadi zona lemah bagi kemunculan batuan-batuan vulkanik muda berumur Kuartar.

Kondisi geologi wilayah studi dibentuk oleh perselingan antara material-material vulkanik yang lepas-lepas ataupun masif dengan breksi vulkanik (tipe gunung-api strato). Perkiraan batuan penyusun adalah batuan hasil gunung-api dari Gunung Pangrango dan Gunung Salak, yang terdiri atas perselingan piroklastik kasar hingga halus berupa tuf berbutir halus, tuf berbutir menengah, tuf berbutir kasar, lapili, breksi *matriks supported*, breksi berkomponen kerakal (Unpad, 2010).

3.4 Hidrogeologi

Berdasarkan peta hidrogeologi lembar Bogor (Muertianto, 2006), sekitar 72% dari lokasi kajian adalah akuifer dengan aliran airtanah melalui ruang antar butir dan setempat melalui rekahan. Sisanya adalah akuifer produktivitas rendah dan airtanah langka (Tabel 3.2). Aliran airtanah di akuifer melalui ruang antar butir (akuifer primer) mempunyai debit yang lebih kecil daripada akuifer sistem rekahan (akuifer sekunder). Akuifer primer dalam lokasi kajian terbagi 2, yaitu yang memiliki produktivitas tinggi (luah sumur lebih dari 25 liter/detik) dan produktivitas sedang (luah sumur 5-25 liter/detik). Akuifer primer dengan produktivitas tinggi hanya sebagian kecil tersebar dalam lokasi kajian (7%) sedangkan yang produktivitas sedang tersebar sekitar 28% dari lokasi kajian. Akuifer sekunder tergolong akuifer yang produktif, tersebar sekitar 37% dalam lokasi kajian.

Lokasi akuifer dengan aliran melalui ruang antar butir dan rekahan penyebarannya melampar di bagian barat laut Gunung Pangrango. Secara hidrogeologi, akuifer tersebut termasuk sistem akuifer endapan gunung api muda (vulkanik), yang terdiri atas lapisan akuifer tufa berbutir kasar, lapili, breksi laharik, breksi vulkanik, dan lava vesikuler. Tebal lapisan berkisar antara 2 hingga 77 m. Kapasitas jenis sumur dapat mencapai 329.18 m/hari, keterusan dapat mencapai lebih besar dari 659 m³/hari. Muka Air tanah statis bervariasi mulai dari 40 m di bawah muka tanah hingga 1.3 m di atas muka tanah setempat.

Hasil kajian hidrogeologi awal (Unpad, 2010) menunjukkan bahwa:

- Kedalaman muka air tanah di lahan dengan elevasi kurang dari 500 m dpl berkisar 0.6-3.6 m dengan rata-rata 2.14 m dari permukaan tanah. Sementara di

Tabel 3.2: Tipe produktivitas akuifer di SubDAS Cimande

| Kategori | Luas (ha) | Luas (%) |
|--|-----------|----------|
| Akuifer (bercelah/besarang) dengan produktivitas rendah dan daerah air tanah langka | | |
| Daerah air tanah langka | 981 | 28 |
| Akuifer dengan aliran melalui celahan dan ruang antar butir | | |
| Akuifer dengan produktivitas tinggi dan penyebaran terbatas | 260 | 7 |
| Akuifer dengan produktivitas sedang dan penyebaran terbatas | 963 | 28 |
| Setempat akuifer produktif | 1.291 | 37 |
| Total | 3.495 | 100 |

area-area dengan elevasi > 500 m dpl, kedalaman muka air tanah berkisar antara 9.35-15 m dari permukaan tanah dengan kedalaman rata-rata 10.76 meter. Umumnya, penyebaran kedalaman muka air tanah merata mengikuti kontur permukaan dengan arah aliran tenggara–barat laut.

- Hubungan antara air tanah dangkal dengan air permukaan di lokasi kajian secara umum bersifat effluent, yaitu terjadi pengaliran airtanah ke dalam badan sungai. Beberapa mata air di wilayah ini merupakan inlet dari sungai-sungai yang melintasi lokasi kajian.
- Keberadaan mata air di lokasi kajian tersebar secara merata muncul pada elevasi 1,068.5 m dpl sampai dengan elevasi 456 m dpl. Mata air yang paling banyak muncul terdapat pada elevasi sekitar 600 m dpl, tepat pada tekuk lereng antara morfologi lereng dengan kaki Gunung Pangrango. Hampir semua mata air yang ditemukan menempati unit hidrogeologi yang didominasi oleh breksi vulkanik grain supported dengan tipe mata air berupa rekahan dan kontak litologi.

3.5 Topografi

Berdasarkan data topografi³, lokasi kajian terletak di ketinggian 375 2, 441 m dpl (Tabel 3.3). Kelas ketinggian yang dominan adalah 500 1 000 m dpl (56% dari luas SubDAS Cimande). Area-area tersebut terdapat di Desa Pancawati, Cimande, Lemah duhur, dan Desa Tangkil, Kecamatan Caringin, serta Desa Cileungsi, Kecamatan Ciawi. Secara umum, profil elevasi berangsur-angsur menurun dari tenggara ke arah barat laut. Peta elevasi terlampir.

³Data Digital Elevation Model (DEM) SRTM resolusi 30 meter

Tabel 3.3: Distribusi kelas ketinggian di SubDAS Cimande

| Kelas Ketinggian (m dpl) | Luas | |
|-----------------------------|-------|-----|
| | (ha) | (%) |
| 375-500 | 665 | 19 |
| 500-1,000 | 1,969 | 56 |
| 1,000-1,500 | 682 | 20 |
| 1,500-2,000 | 138 | 4 |
| 2,000-2,441 | 40 | 1 |
| Total | 3,495 | 100 |

Tabel 3.4: Distribusi kelas kelerengan lahan di SubDAS Cimande

| Kelas Lereng (%) | Luas (ha) | Luas (%) |
|------------------|-----------|----------|
| 0-8 | 554 | 16 |
| 8-15 | 619 | 18 |
| 15-25 | 542 | 15 |
| 20-40 | 495 | 14 |
| > 40 | 1,283 | 37 |
| Total | 3,495 | 100 |

Hasil analisa spasial dari data topografi menunjukkan bahwa kelerengan lahan di lokasi kajian cukup bervariasi, mulai dari datar (kelerengan 0-8%) hingga sangat terjal (> 40%). Berdasarkan proporsi areanya, kelerengan lahan > 40% mendominasi lokasi kajian dengan luas 1,283 ha. Sementara kelas lereng yang lain tersebar merata dengan luas berkisar 400-600 ha (Tabel 3.4). Peta kelerengan lahan terlampir.

Berdasarkan kondisi topografi dan litologi penyusunnya, lokasi kajian terbagi menjadi 3 satuan geomorfologi, sebagai berikut:

3.5.1 Satuan Perbukitan Vulkanik Sangat Curam

Satuan geomorfologi perbukitan vulkanik sangat curam merupakan puncak gunungapi Pangrango. Aspek morfografi satuan geomorfologi perbukitan vulkanik sangat curam, terletak pada bentuk perbukitan sangat curam dengan pola pengaliran sungai sub-dendritik, paralel, dan subparalel dengan bentuk lembah V tajam. Aspek morfometri pada satuan ini berupa kerapatan kontur rapat dengan kemiringan lereng 28° - 46° (55% - 100%), yang menunjukkan kelas lereng sangat curam sampai curam, ketinggian 550 - 1600 mdpl.

3.5.2 Satuan Perbukitan Vulkanik Agak Curam

Satuan geomorfologi perbukitan vulkanik curam terletak memanjang dari barat Daya hingga timurlaut serta dibagian baratlaut lokasi kajian, menyebar hingga ke bagian

tengah. Secara morfografi, satuan ini terletak pada bentuk lahan berupa perbukitan tinggi dengan pola pengaliran sungai sub-dendritik, paralel, dan sub-paralel, dan bentuk lembah V tajam sampai U. Aspek morfometri pada satuan ini berupa ketinggian 500 – 550 mdpl, kerapatan kontur renggang hingga rapat, kemiringan lereng berkisar 10° - 28° (20% - 55%).

3.5.3 Satuan Perbukitan Vulkanik Agak Landai

Satuan geomorfologi ini penyebaran memanjang dari bagian barat hingga ke arah utara. Aspek morfografi berupa bentuk lahan pegunungan dengan pola pengaliran sungai subdendritik, paralel, dan subparalel, bentuk lembah sungai berbentuk U tumpul. Aspek morfometri berupa kerapatan kontur rapat dengan kemiringan lereng sekitar 8°-10° (14% - 20%) yang menunjukkan kelas lereng agak landai, mempunyai ketinggian 430 to (numerical range) 500 m dpl. Satuan geomorfologi ini dikontrol oleh endapan vulkanik. Daerah yang termasuk dalam satuan ini dimanfaatkan sebagai perkebunan, persawahan, dan permukiman.

3.6 Tutupan lahan

Hasil Analisa tutupan lahan⁴, terdapat 6 jenis tutupan lahan di lokasi kajian (Gbr.3.4). Jenis tutupan hutan merupakan tutupan lahan yang dominan, melingkupi wilayah 35.4% lokasi kajian (1,239 ha). Area tersebut terletak di bagian hulu SubDAS Cimannde atau di lereng Gunung Pangrango, berada dalam Kawasan Hutan (status Taman Nasional Gede-Pangrango⁵). Selanjutnya, ladang/tegalan sekitar 26.3% (922 ha) dan kebun/hutan rakyat masyarakat sekitar 12.9% (453 ha). Area yang berada di bagian tengah hingga hilir lokasi kajian memiliki jenis tutupan lahan berupa sawah, tegalan/ladang, kebun/perkebunan, dan pemukiman (Gbr.3.4). Peta tutupan lahan di lokasi kajian dan sekitarnya terlampir. Berdasarkan status kawasan hutan, sekitar 40.3% (1,409 ha) lokasi kajian berada dalam kawasan hutan, statusnya adalah hutan konservasi (Taman Nasional Gunung Gede Pangrango). Kondisi tutupan lahan di kawasan hutan ini sekitar 78.6% masih berhutan (1,107 ha), sisanya adalah lahan tegalan/ladang masyarakat, kebun/hutan rakyat dan semak/belukar.

Ada 5 jenis tutupan lahan di recharge area (Tabel 3.6). Lahan berhutan hanya 18% dalam recharge area (135 ha). Jenis tutupan lahan yang dominan adalah belukar/semak (35%) dan tegalan/ladang (28%). Lahan pemukiman dalam recharge are hanya 16 ha (2%). Seluruh lahan berhutan ini berada dalam kawasan TNGP. Kawasan TNGP meliputi 56% dari wilayah recharge area sumber air Plant Ciherang (415 ha). Sekitar 35% Kawasan TNGP yang berada dalam recharge area adalah lahan berhutan, sisanya adalah lahan tegalan/ladang masyarakat, belukar/semak, dan kebun/hutan rakyat.

⁴Berdasarkan peta Rupa Bumi Indonesia (BIG) dan citra SPOT tahun 2017

⁵Peta status kawasan hutan berdasarkan SK Menhut No. S.276/Menhut-VII/2010

Tabel 3.5: Jenis tutupan lahan berdasarkan status Kawasan hutan di SubDAS Cimande

| Jenis Tutupan / penggunaan Lahan | SubDAS Cimande | | Luas | |
|--|----------------------------|------------------------------|-------|-------|
| | Diluar Kawasan Hutan | Kawasan TNGP ^a | (Ha) | (%) |
| Belukar/Semak | 127 | 209 | 335 | 9.6 |
| Hutan | 132 | 1,107 | 1,239 | 35.4 |
| Kebun/Agroforestri | 381 | 72 | 453 | 12.9 |
| Pemukiman | 337 | 0 | 337 | 9.6 |
| Sawah | 209 | 0 | 209 | 6.0 |
| Tegalan/Ladang | 901 | 21 | 922 | 26.3 |
| Jumlah | 2087 | 1,409 | 3,495 | 100.0 |

^aTNGP: Taman Nasional Gede Pangrango



Gambar 3.4: Hutan dan belukar/semak yang mendominasi bagian tengah-hulu SubDAS Cimande (kiri); tutupan lahan yang dominan di bagian tengah hingga ke hilir SubDAS Cimande yang terdiri dari sawah tadah hujan, tegalan/ladang, dan kebun/perkebunan (kanan).

Tabel 3.6: Tipe dan luas tutupan lahan berdasarkan status Kawasan hutan di recharge area

| Jenis Tutupan / penggunaan Lahan | Recharge Area | | Jumlah | |
|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|--------|-----|
| | Diluar Kawasan Hutan | Kawasan TNGP ^a | (Ha) | (%) |
| Belukar/Semak | 68 | 194 | 262 | 35 |
| Hutan | 0 | 135 | 135 | 18 |
| Kebun/hutan rakyat | 55 | 68 | 123 | 17 |
| Pemukiman | 16 | 0 | 16 | 2 |
| Tegalan/Ladang | 190 | 19 | 209 | 28 |
| Jumlah (Ha) | 330 | 415 | 745 | 100 |
| Jumlah (%) | 44 | 56 | 100 | |

^aTNGP: Taman Nasional Gede Pangrango

Isu perubahan tutupan lahan di lokasi kajian menjadi sangat penting karena ada konversi penggunaan lahan kebun teh Pancawati di awal-awal reformasi (Tahun 1998). Kebun teh Pancawati sekarang menjadi hutan pinus di kompleks vila santamonica, ladang/tagal sayur masyarakat. Perubahan tutupan lahan ini akan berdampak pada karakteristik hidrologi lokasi kajian (permukaan ataupun di bawah permukaan).

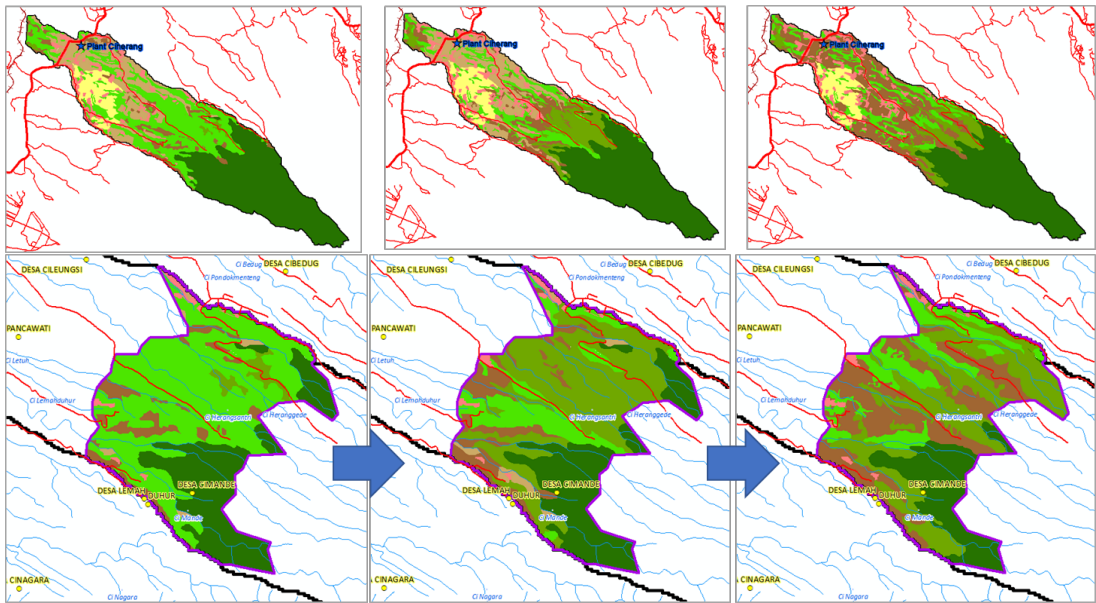
Periode analisa perubahan tutupan lahan dibagi 3, sebelum reformasi, setelah reformasi, kondisi sekarang. Tutupan lahan sebelum reformasi diwakili data citra satelit Tahun 1990 (Landsat 5). Tutupan lahan setelah reformasi diwakili data citra satelit Tahun 2009 (SPOT5). Kondisi sekarang (tahun 2017) menggunakan citra satelit SPOT6. Hasil interpretasi tutupan lahan di lokasi kajian disajikan Gbr.3.5.

Hasil analisa perubahan tutupan lahan menunjukkan bahwa pada periode 1990-2009, terjadi konversi lahan kebun teh / kebun campuran menjadi belukar/semak yang sangat signifikan di recharge area (konversi kebun the Pancawati). Selain itu juga terjadi peningkatan lahan pemukiman di luar recharge area (wilayah SubDAS Cimande bagian tengah-hilir). Sedangkan pada periode 2009 – 2017, terjadi konversi lahan hutan dan belukar/semak menjadi lahan tegalan/ladang terutama di recharge area. Konversi pertanian lahan basah subsisten (sawah tadah hujan) menjadi pertanian lahan kering tegal sayur intensif di luar recharge area. Seperti disajikan **Gbr.3.6** dan Gbr.3.7.

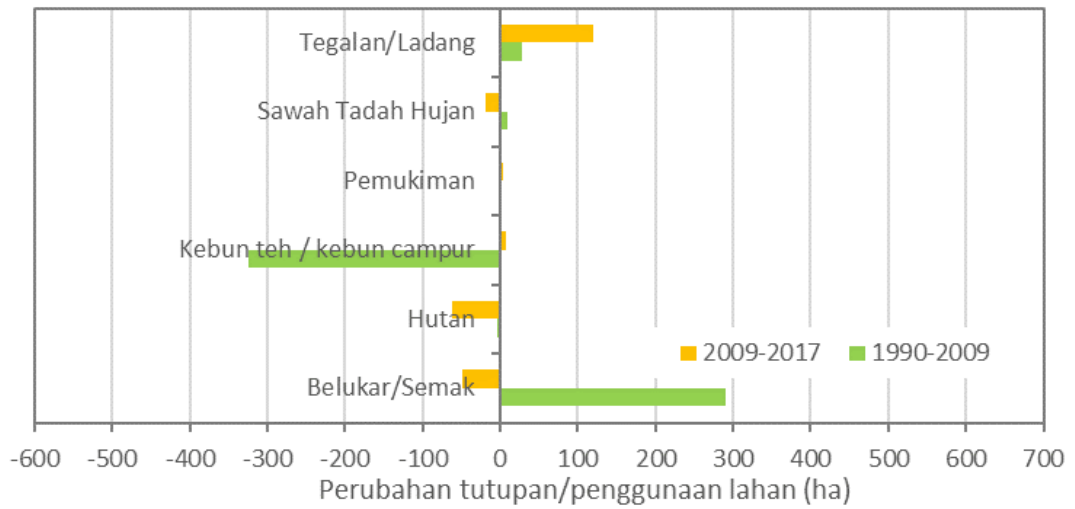
3.7 Tanah

Berdasarkan peta jenis tanah (LPT, Bogor), jenis tanah di lokasi kajian terbagi menjadi empat (Tabel 3.7), yaitu *Latosol* Coklat Tua Kemerahan; *Latosol* Coklat; Kompleks *Regosol* Kelabu dan *Litosol*; dan Asosiasi *Andosol* Coklat dan *Regosol* Coklat. Penjelasan sebagai berikut:

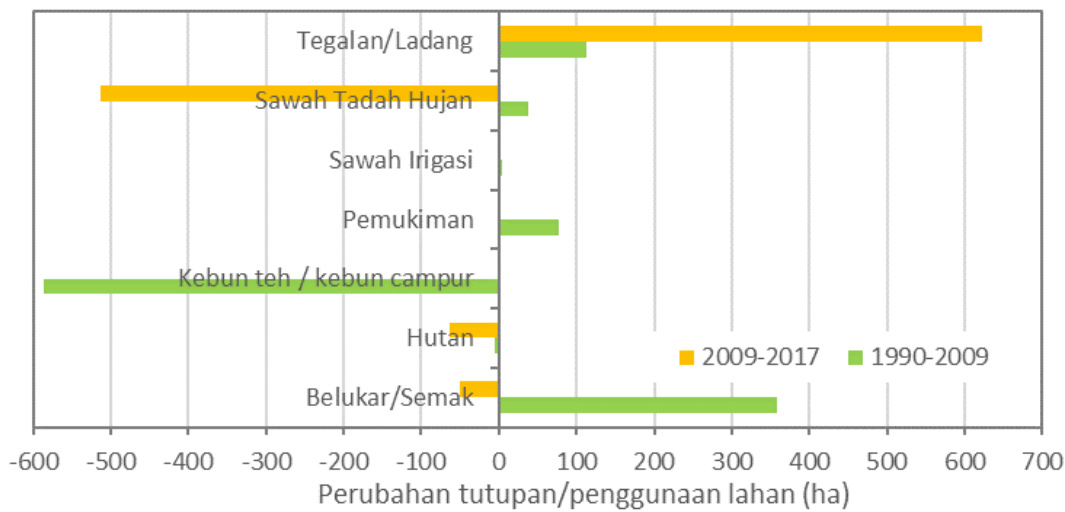
- Jenis tanah *Latosol* coklat tua kemerahan tersebar di bagian tengah hingga ke



Gambar 3.5: Dinamika tutupan lahan dari tahun 1990, 2009, dan 2017 di wilayah SubDAS Cimande (Atas) dan recharge area (Bawah)



Gambar 3.6: Perubahan tutupan lahan di recharge area



Gambar 3.7: Perubahan tutupan lahan di wilayah SubDAS Cimande

hilir (14%). Jenis tanah tersebut merupakan tanah hasil pelapukan abu vulkanik dari gunung berapi Gunung Pangrango dan Gunung Salak.

- Jenis tanah *Latosol* coklat melingkupi 69% lokasi kajian. Jenis tanah tersebut merupakan tanah yang telah mengalami pelapukan lanjut dengan kandungan bahan organik, mineral primer dan unsur hara rendah, bereaksi masam (pH 4.5-5.5), terjadi akumulasi seskuioksida.
- Tanah *regosol* yang terdapat di bagian hulu SubDAS Cimande berasosiasi dengan tanah *andosol* (17%) dan sebagian kecil (< 1%) dengan tanah *Litosol*. Tanah *regosol* merupakan tanah muda yang berkembang dari bahan induk lepas (*unconsolidated*) yang bukan dari bahan endapan aluvial, dengan perkembangan profil tanah lemah atau tanpa perkembangan profil tanah, tekstur tanah sedang hingga kasar. Adapun tanah *andosol* merupakan tanah yang memiliki kandungan bahan organik tinggi, remah dan porous, licin (*smearly*) dan reaksi tanah antara 4.5-6.5. Horison bawah permukaan berwarna coklat sampai coklat kekuningan dan kadang dijumpai padas tipis akibat semenasi silika.

3.8 Demografi

Penduduk Desa Ciderum dan Pancawati paling banyak di lokasi kajian dan sekitarnya (BPS Bogor, 2018). Namun dari tingkat kepadatan penduduk, Desa Cimande Hilir dan Desa Ciderum relatif lebih tinggi dibanding desa-desa yang lain (Tabel 3.8). Diperkirakan jumlah penduduk Tahun 2017 di SubDAS Cimande sekitar 11,872 jiwa. Laju pertumbuhan penduduk di Kec.Ciawi relatif lebih tinggi dari pada laju pertum-

Tabel 3.7: Jenis tanah di SubDAS Cimande

| Jenis Tanah | Luas (ha) | Luas (%) |
|--|-----------|----------|
| <i>Latosol</i> Coklat Tua Kemerahan | 476 | 14 |
| <i>Latosol</i> Coklat | 2,420 | 69 |
| Kompleks <i>Regosol</i> Kelabu dan <i>Litosol</i> | 1 | 0.04 |
| Asosiasi <i>Andosol</i> Coklat dan <i>Regosol</i> Coklat | 598 | 17 |
| Jumlah | 3,495 | 100 |

Tabel 3.8: Rekapitulasi jumlah penduduk Tahun 2017 di lokasi kajian

| Kecamatan | Nama Desa | Jumlah penduduk (jiwa) | Kepadatan (jiwa/km ²) |
|-----------|-----------------|------------------------|-----------------------------------|
| Cimande | Ciderum | 16,372 | 5,069 |
| | Ciherang Pondok | 13,214 | 3,095 |
| | Cimande | 6,623 | 1,876 |
| | Cimande Hilir | 9,574 | 5,260 |
| | Lemah duhur | 12,754 | 1,878 |
| | Pancawati | 16,363 | 1,677 |
| | Tangkil | 9,171 | 979 |
| Ciawi | Bojong murni | 5,658 | 3,536 |
| | Cileungsi | 8,346 | 1,191 |

Sumber: BPS Bogor, 2018

buhan penduduk di Kec. Caringin. Pada periode tahun 2010-2016, laju pertumbuhan penduduk di Kec. Ciawi adalah 1.89% sedangkan di Kec.Caringin adalah 1.38%.

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 Cisadane ini, tidak ada lokasi PDH yang terdekat dengan lokasi kajian. Karena itu dipilih lokasi PDH yang lebih ke hilir wilayah studi dimana datanya dapat digunakan untuk kalibrasi model, yaitu PDH yang berada di Kp. Genteng, Bogor Selatan, Kota Bogor. PDH Genteng dikelola oleh BBWS (Balai Besar Wilayah Sungai) Ciliwung-Cisadane, dibawah Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). Data yang tercatat pada PDH Genteng ini adalah data debit harian untuk periode pengamatan yang relatif cukup panjang.

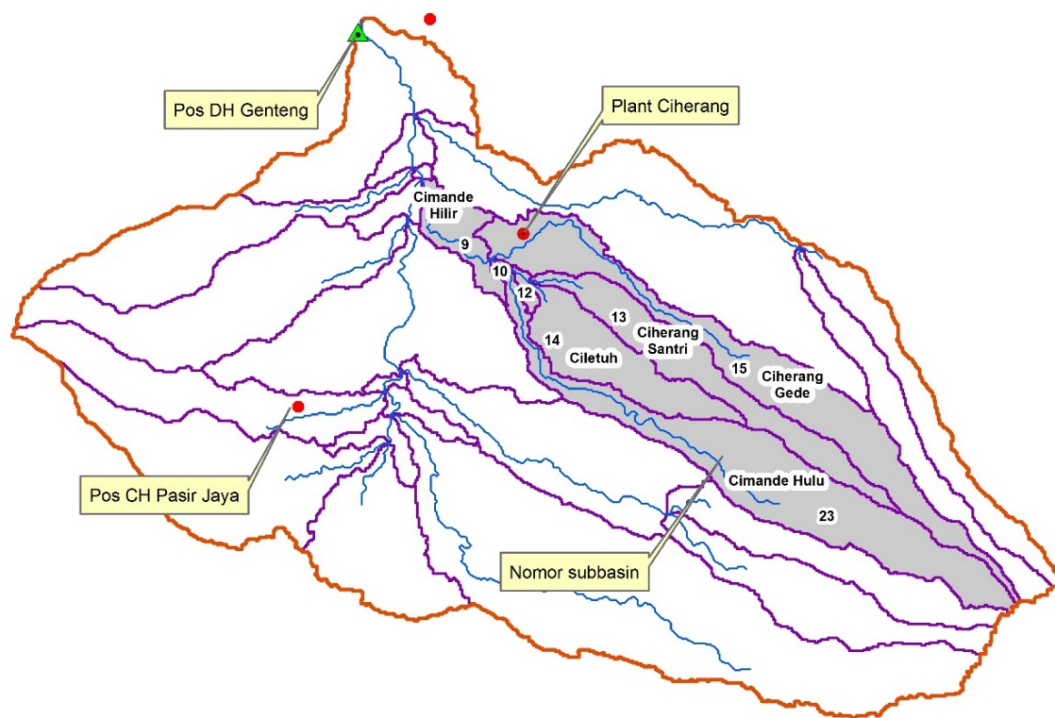
Luas wilayah yang dicakup model SWAT sekitar 18,188 ha; terbagi dalam 27 Daerah Tangkapan Air (DTA). Jika kita fokus pada analisa di SubDAS Cimande maka DTA yang menjadi fokus meliputi DTA No 9, 10, 12, 13, 14, 15 dan 23 (lihat Gbr.4.1). Metode *downscaling* digunakan untuk mendapatkan neraca air di SubDAS Cimande.

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 95PPU¹ (P-factor). Dari kisaran parameter yang diberikan akan menghasilkan output yang berada dalam selang kepercayaan 95%. Hasil analisis ketidakpastian model SWAT di lokasi kajian ini menunjukkan nilai P-factor sekitar 0.78, artinya sekitar 78% hasil output model berada dalam kisaran 95PPU.

Ada 14 parameter model SWAT yang akan dilakukan kalibrasi, seperti disajikan pada Tabel 4.1. Parameter ini tidak bisa diperoleh dengan melakukan pengukuran di lapangan, sehingga sangat susah diketahui nilainya. Secara statistik hal ini bisa dilakukan dengan melakukan optimasi nilai parameter tersebut dalam proses kalibrasi sehingga diperoleh nilai error atau bias antara data pengukuran lapangan dengan hasil simulasi model SWAT sekecil mungkin. Pada nilai error yang terendah ini akan diperoleh *fitted value* untuk parameter-parameter tersebut.

¹95PPU merupakan kepanjangan dari 95% *prediction uncertainty*



Gambar 4.1: Wilayah analisa model SWAT dari lokasi kajian Plant Ciherang

Tabel 4.1: Parameter model yang dilakukan kalibrasi

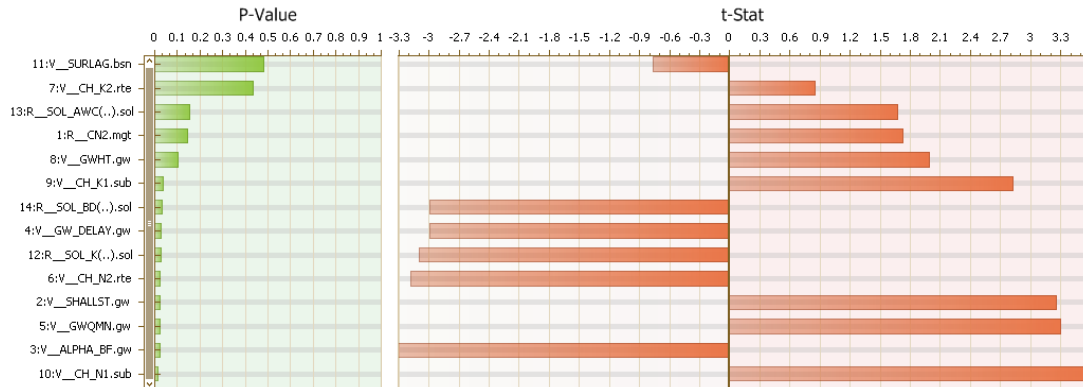
| NO | Note ² | Parameter | Grup | Keterangan | Fitted Value | Intervensi ³ |
|----|-------------------|-----------|------|---|--------------|-------------------------|
| 1 | V | SHALLST | gw | Inisial kedalaman air di <i>aquifer</i> dangkal (mm) | 43961 | Tidak bisa |
| 2 | V | ALPHA_BF | gw | Faktor 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 <i>aquifer</i> 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 hidrolis efektif di sungai utama (mm/jam) | 9 | Tidak bisa |
| 8 | V | CH_K1 | sub | Konduktivitas hidrolis 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 hidrolis 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 ³) | 0.056 | Tidak bisa |
| 14 | R | CN2 | mgt | SCS runoff Curve number (unitless) | -14 | Bisa |

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 pada Gbr.4.2.

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

²R=relative, V=replace; metode yang digunakan saat kalibrasi menggunakan SWAT CUP

³Bisa-tidaknya dilakukan intervensi dalam hal pengelolaan melalui kegiatan konservasi



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

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

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

Sementara sisanya (5 parameter) tergolong sedang, yaitu GWHT, CN2, SOL_AWC, CH_N2 dan SURLAG.

Dari sejumlah parameter tersebut, yang bisa dilakukan intervensi melalui kegiatan konservasi 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).

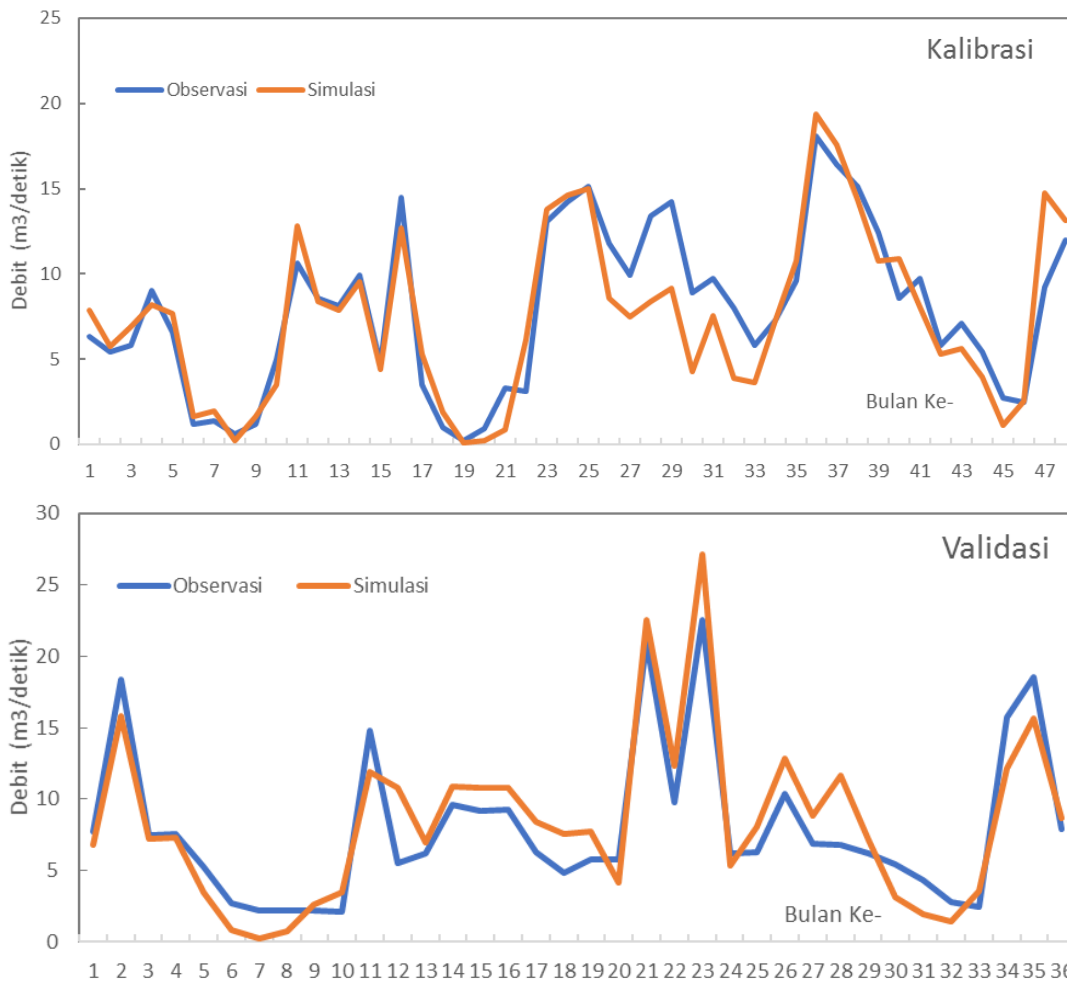
Parameter statistik yang digunakan dalam kalibrasi dan validasi ini adalah koefisien determinasi (R^2) dan Koefisien Nash Sutcliffe (NSE), Tabel 4.2. Moriasi et al. (2007) telah membuat kriteria kelayakan model SWAT sehingga bisa diterima berdasarkan nilai R^2 dan NSE dari proses kalibrasi dan validasi. Model SWAT dikatakan bagus jika nilai R^2 dan NSE sekitar 0.6 – 0.75, Jika lebih dari 0.75 sangat bagus.

Untuk studi ini, nilai R^2 dan NSE dari proses kalibrasi lebih dari 0.75 (sangat bagus) dengan menggunakan data bulanan, sedangkan dengan data harian menunjukkan cukup bagus karena data yang digunakan relatif banyak. Untuk hasil validasi dengan data bulanan, nilai R^2 dan NSE relatif lebih tinggi dibandingkan hasil kalibrasi. Namun, jika menggunakan data harian, nilai R^2 hasil validasi lebih rendah.

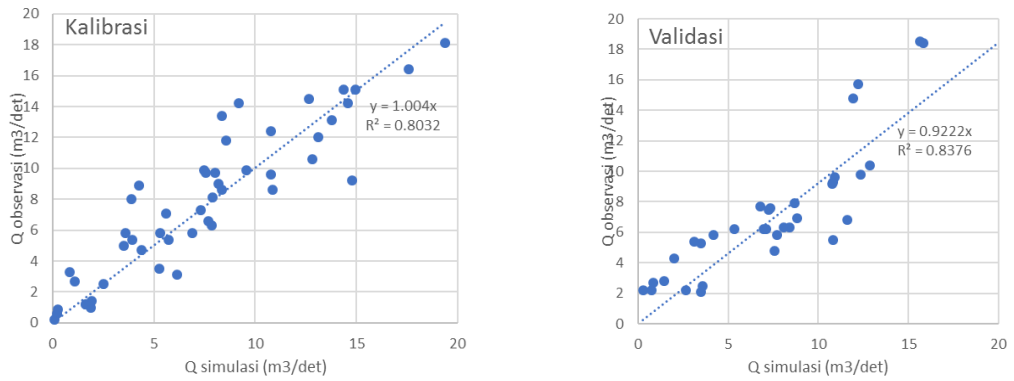
Perbandingan hidrograf antara data observasi dan output model SWAT ditunjukkan pada Gbr.4.3 hingga Gbr.4.6.

Tabel 4.2: Rekapitulasi parameter statistik untuk kalibrasi dan validasi model

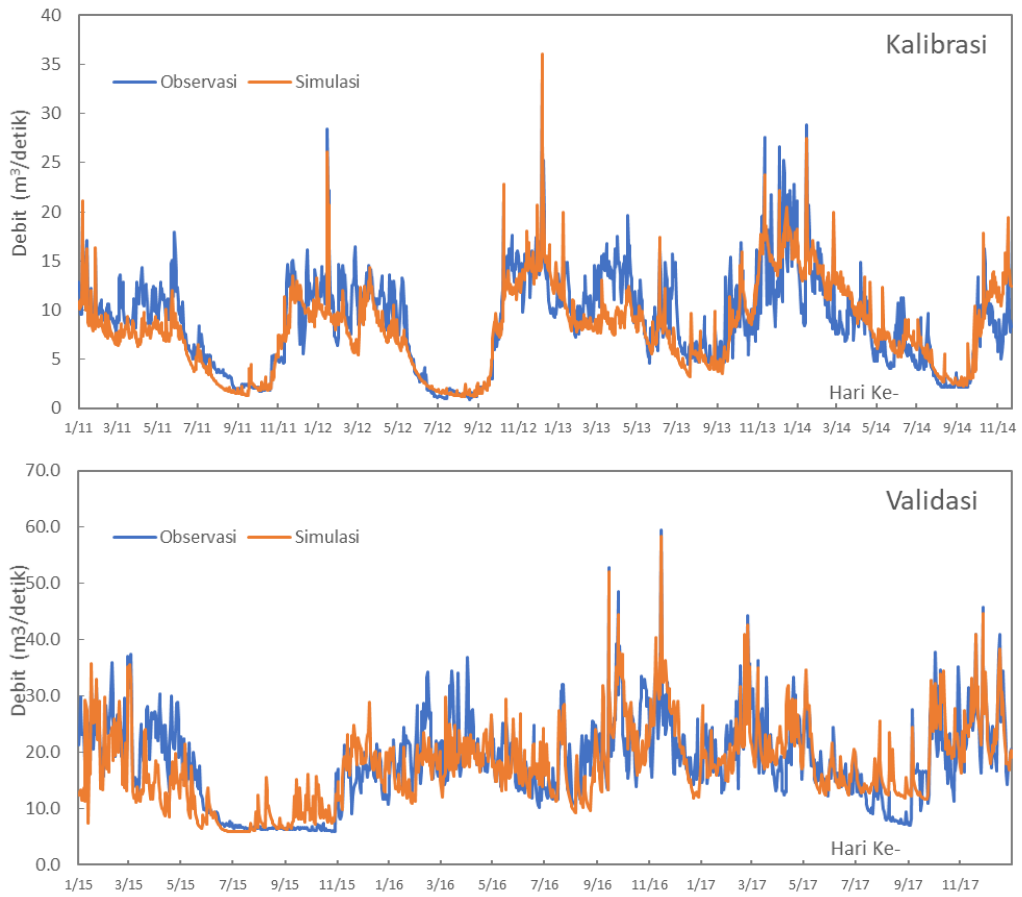
| Parameter Statistik | Bulanan | | Harian | |
|---|-----------|----------|-----------|----------|
| | Kalibrasi | Validasi | Kalibrasi | Validasi |
| Koefesien Determinasi (R ²) | 0.80 | 0.84 | 0.76 | 0.53 |
| Koefesien Nash Sutcliffe (NSE) | 0.82 | 0.84 | 0.62 | 0.50 |



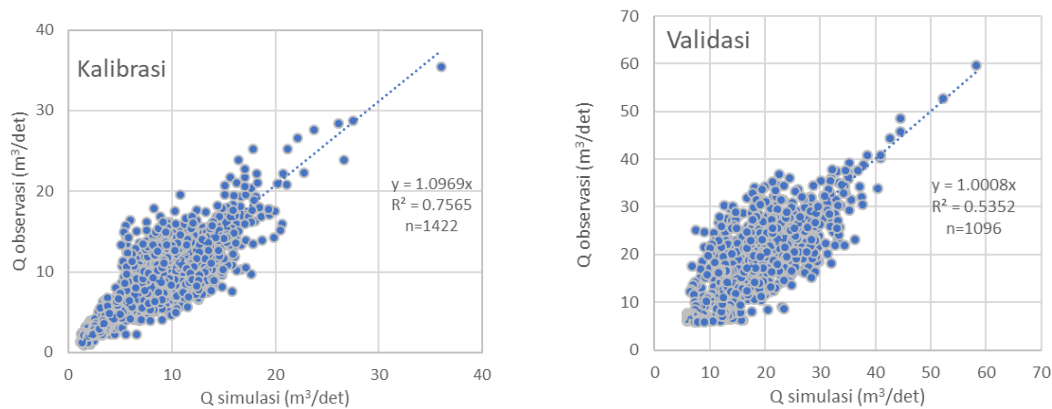
Gambar 4.3: Perbandingan time series bulanan hasil simulasi SWAT dan data observasi antara kalibrasi (2011-2014) dan validasi (2015-2017)



Gambar 4.4: Perbandingan time series bulanan hasil simulasi SWAT dan data observasi antara kalibrasi (2011-2014) dan validasi (2015-2017)



Gambar 4.5: Perbandingan time series harian hasil simulasi SWAT dan data observasi antara kalibrasi (2011-2014) dan validasi (2015-2017)



Gambar 4.6: Hubungan hasil simulasi SWAT harian dan data observasi antara proses kalibrasi (2011-2014) dan validasi (2015-2017)

4.2 Karakteristik Daerah Tangkapan Air

Hasil deliniasi batas SubDAS menghasilkan 7 DTA (Gbr.4.1) di wilayah Plant Ciherang (SubDAS Cimande). Semakin besar nomor DTA, lokasinya semakin berada di hulu. Outlet lokasi kajian (Sungai Cimande Hilir) berada di DTA nomor 9. Karakteristik morfologi setiap DTA seperti rata-rata slope di lahan (**Slo1**) dan alur sungai (**Cs1**) dalam persen (%), panjang alur sungai dalam meter (**Len1**), panjang lereng dalam meter (**Sll**), elevasi rata-rata dalam m dpl (**Elev**), elevasi minimum dalam m dpl (**ElevMin**) dan maksimum dalam m dpl (**ElevMax**), dan luas dalam ha (**Area**); disajikan pada Tabel 4.3 di halaman 32. Karakteristik ini akan menjadi parameter di setiap DTA dalam analisis SWAT. Jumlah DTA yang terbentuk ini akan menentukan banyaknya variasi HRU⁴.

4.3 Hydrologic Response Unit (HRU) / Unit Respon Hidrologi (URH)

Model SWAT adalah model hidrologi dalam skala DAS yang mampu menyimulasikan proses hidrologi dan kualitas air. Hal ini memerlukan efisiensi dalam perhitungan dengan tetap mempertahankan variasi informasi lanskap DAS, yaitu dengan menggunakan konsep *Hydrologic Response Units* (HRU) atau unit respon hidrologi (URH) sebagai dasar perhitungan dalam simulasi. Setiap URH homogen secara fisik, memiliki data input yang sama (Li et al., 1977). Dalam SWAT, URH didefinisikan sebagai kombinasi unik dari tutupan lahan, jenis tanah, dan kelas lereng. Meskipun konsep URH ini tidak mempertimbangkan konektivitas hidrologi antar URH, namun ini adalah cara

⁴HRU kepanjangan dari Hydrologic Response Unit atau unit respon hidrologi (URH)

Tabel 4.3: Karakteristik setiap DTA dalam analisis SWAT SubDAS Cimande

| DTA | Nama | Area | Slo1 | Len1 | Sll | Csl | Elev | Elev- Min | Elev- Max |
|-----|-----------------|--------|-------|----------|-------|-------|---------|--------------|--------------|
| | | (ha) | (%) | (m) | (m) | (m) | (m dpl) | | |
| 9 | Cimande Hilir | 210.6 | 15.18 | 4287.19 | 24.38 | 2.12 | 451.6 | 386 | 501 |
| 10 | Cimande Tengah | 13.2 | 11.10 | 751.50 | 61.00 | 3.30 | 444.0 | 430 | 459 |
| 12 | Ciletuh Hilir | 28.4 | 6.19 | 1217.66 | 60.96 | 2.79 | 460.4 | 442 | 479 |
| 13 | Ciherang Santri | 551.3 | 32.90 | 10416.00 | 15.20 | 8.70 | 744.5 | 452 | 1364 |
| 14 | Ciletuh Hulu | 492.3 | 14.30 | 6648.91 | 24.38 | 6.39 | 591.2 | 455 | 883 |
| 15 | Ciherang Gede | 1029.9 | 34.84 | 16842.71 | 15.24 | 11.80 | 841.4 | 431 | 2419 |
| 23 | Cimande Hulu | 1168.1 | 46.29 | 16262.17 | 15.24 | 11.71 | 1006.0 | 440 | 2361 |

^aLokasi setiap nomor DTA mengacu pada **Gbr.4.1** (halaman 26)

yang efektif untuk menyederhanakan representasi lanskap dan proses simulasi dalam pemodelan DAS (Gassman et al., 2007; Her et al., 2015).

Luas wilayah Sub DAS Cimande dalam analisis SWAT ini sekitar 3,495.7 Ha; terbagi dalam 7 subbasin; 8 jenis tutupan lahan; 3 jenis tanah dan 5 jenis kelas lereng. Jumlah URH yang terbentuk sekitar 215 unit (*threshold* masing-masing tutupan lahan, jenis tanah dan kelas lereng adalah nol (0)). Jika URH ini tidak memasukan subbasin (hanya kombinasi tutupan lahan, jenis tanah dan kelas lereng), maka jumlah URH yang terbentuk sekitar 67 unit, (Tabel 4.6).

Jenis tutupan lahan yang dominan adalah pertanian lahan kering / ladang (26.3%), hutan (35.4%) yang berada dalam kawasan taman nasional, dan kebun/Hutan rakyat masyarakat (12.5%). Lahan pemukiman tersebar sekitar 9.6% dari wilayah kajian. Untuk sebaran jenis tanah, yang paling dominan adalah jenis tanah *Latosol* coklat (68.8%). Untuk sebaran kelas lereng, yang dominan adalah kelas lereng 8-15% (27.1%) dan kelas lereng lebih dari 40% (23.4%).

Khusus untuk recharge area, ada 89 jenis URH yang terbentuk tersebar di 4 DTA (Tabel 4.3) dan 5 desa (Tabel 4.6). Berdasarkan wilayah DTA, URH yang paling luas adalah Hutan di lereng lebih dari 40% yang berada di DTA Cimande Hulu (102.6 ha; 14.4%), selanjutnya Belukar/Semak di lereng lebih dari 40% di DTA Ciherang Gede (75.8 ha; 10.3%) dan Belukar/Semak di lereng lebih dari 40% di DTA Ciherang Santri (60 ha; 8.1%).

Berdasarkan wilayah desa, URH yang paling luas adalah Hutan di lereng lebih dari

Tabel 4.4: Kombinasi tutupan lahan, jenis tanah dan kelas lereng di Sub DAS Cimande

| Jenis tutupan lahan | Jenis Tanah | Kelas Lereng (%) | | | | | Jumlah (Ha) |
|--|--|------------------|-------|-------|-------|--------|-------------|
| | | 0-8 | 8-15 | 15-25 | 25-40 | >40 | |
| Ladang (AGRL) | <i>Latosol</i> Coklat | 123.7 | 211.1 | 128.0 | 98.1 | 63.9 | 624.8 |
| | <i>Latosol</i> Coklat Tua Kemerahan | 77.5 | 72.2 | 25.9 | 6.5 | 0.4 | 182.5 |
| AGRL Total (ha) | | 201.3 | 283.3 | 153.9 | 104.6 | 64.3 | 807.3 |
| Hutan (FRSE) | Asosiasi <i>Andosol</i> Coklat dan <i>Regosol</i> Coklat | 3.4 | 10.5 | 37.2 | 88.3 | 449.8 | 589.2 |
| | <i>Latosol</i> Coklat | 9.3 | 34.5 | 82.6 | 119.6 | 462.3 | 708.3 |
| FRSE Total (ha) | | 12.7 | 45.0 | 119.8 | 207.9 | 912.0 | 1297.5 |
| Kebun campuran/ Hutan rakyat (FRST) | Asosiasi <i>Andosol</i> Coklat dan <i>Regosol</i> Coklat | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.1 | - | 0.8 |
| | <i>Latosol</i> Coklat | 21.3 | 96.5 | 110.4 | 75.7 | 51.9 | 355.9 |
| | <i>Latosol</i> Coklat Tua Kemerahan | 14.3 | 22.7 | 26.3 | 14.8 | 1.9 | 80.0 |
| FRST Total (ha) | | 35.8 | 119.3 | 137.1 | 90.6 | 53.8 | 436.7 |
| Sawah (RICE) | <i>Latosol</i> Coklat | 46.9 | 62.9 | 26.5 | 4.8 | 0.4 | 141.5 |
| | <i>Latosol</i> Coklat Tua Kemerahan | 52.9 | 27.2 | 4.0 | 0.2 | - | 84.2 |
| RICE Total | | 99.8 | 90.1 | 30.5 | 5.0 | 0.4 | 225.7 |
| Semak/Belukar (RNGB) | <i>Latosol</i> Coklat | 6.4 | 26.5 | 58.2 | 76.2 | 191.1 | 358.5 |
| | <i>Latosol</i> Coklat Tua Kemerahan | 1.5 | 2.7 | 10.0 | 12.0 | 2.3 | 28.5 |
| RNGB Total | | 7.9 | 29.2 | 68.3 | 88.2 | 193.4 | 386.9 |
| Pemukiman (URHD) | <i>Latosol</i> Coklat | 69.4 | 95.3 | 42.5 | 7.8 | 1.3 | 216.4 |
| | <i>Latosol</i> Coklat Tua Kemerahan | 53.3 | 50.0 | 20.6 | 2.3 | - | 126.1 |
| URHD Total | | 122.7 | 145.3 | 63.0 | 10.1 | 1.3 | 342.5 |
| Tubuh air (WATR) | <i>Latosol</i> Coklat Tua Kemerahan | - | - | 0.1 | - | - | 0.1 |
| WATR Total | | - | - | 0.1 | - | - | 0.1 |
| Jumlah Total | | 480.2 | 712.2 | 572.7 | 506.4 | 1225.3 | 3495.7 |

Tabel 4.5: Kombinasi tutupan lahan, jenis tanah dan kelas lereng di Sub DAS Cimande

| Jenis tutupan lahan | Jenis Tanah | Kelas Lereng (%) | | | | | Jumlah (Ha) |
|-------------------------------------|--|------------------|-------|-------|-------|--------|-------------|
| | | 0-8 | 8-15 | 15-25 | 25-40 | >40 | |
| Ladang (AGRL) | <i>Latosol</i> Coklat | 123.7 | 211.1 | 128.0 | 98.1 | 63.9 | 624.8 |
| | <i>Latosol</i> Coklat Tua Kemerahan | 77.5 | 72.2 | 25.9 | 6.5 | 0.4 | 182.5 |
| AGRL Total (ha) | | 201.3 | 283.3 | 153.9 | 104.6 | 64.3 | 807.3 |
| Hutan (FRSE) | Asosiasi <i>Andosol</i> Coklat dan <i>Regosol</i> Coklat | 3.4 | 10.5 | 37.2 | 88.3 | 449.8 | 589.2 |
| | <i>Latosol</i> Coklat | 9.3 | 34.5 | 82.6 | 119.6 | 462.3 | 708.3 |
| FRSE Total (ha) | | 12.7 | 45.0 | 119.8 | 207.9 | 912.0 | 1297.5 |
| Kebun campuran/ Hutan rakyat (FRST) | Asosiasi <i>Andosol</i> Coklat dan <i>Regosol</i> Coklat | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.1 | - | 0.8 |
| | <i>Latosol</i> Coklat | 21.3 | 96.5 | 110.4 | 75.7 | 51.9 | 355.9 |
| | <i>Latosol</i> Coklat Tua Kemerahan | 14.3 | 22.7 | 26.3 | 14.8 | 1.9 | 80.0 |
| FRST Total (ha) | | 35.8 | 119.3 | 137.1 | 90.6 | 53.8 | 436.7 |
| Sawah (RICE) | <i>Latosol</i> Coklat | 46.9 | 62.9 | 26.5 | 4.8 | 0.4 | 141.5 |
| | <i>Latosol</i> Coklat Tua Kemerahan | 52.9 | 27.2 | 4.0 | 0.2 | - | 84.2 |
| RICE Total | | 99.8 | 90.1 | 30.5 | 5.0 | 0.4 | 225.7 |
| Semak/Belukar (RNGB) | <i>Latosol</i> Coklat | 6.4 | 26.5 | 58.2 | 76.2 | 191.1 | 358.5 |
| | <i>Latosol</i> Coklat Tua Kemerahan | 1.5 | 2.7 | 10.0 | 12.0 | 2.3 | 28.5 |
| RNGB Total | | 7.9 | 29.2 | 68.3 | 88.2 | 193.4 | 386.9 |
| Pemukiman (URHD) | <i>Latosol</i> Coklat | 69.4 | 95.3 | 42.5 | 7.8 | 1.3 | 216.4 |
| | <i>Latosol</i> Coklat Tua Kemerahan | 53.3 | 50.0 | 20.6 | 2.3 | - | 126.1 |
| URHD Total | | 122.7 | 145.3 | 63.0 | 10.1 | 1.3 | 342.5 |
| Tubuh air (WATR) | <i>Latosol</i> Coklat Tua Kemerahan | - | - | 0.1 | - | - | 0.1 |
| WATR Total | | - | - | 0.1 | - | - | 0.1 |
| Jumlah Total | | 480.2 | 712.2 | 572.7 | 506.4 | 1225.3 | 3495.7 |

40% yang berada di Desa Pancawati (73.52 ha; 10.0%) dan di Desa Cimande (72.44 ha; 9.8%). Selanjutnya adalah Belukar/Semak di lereng lebih dari 40% yang berada di Desa Cileungsi (62.4 ha; 8.5%).

Tabel 4.6: Rekapitulasi luas (Ha) HRU di recharge area sumber air Plant Ciherang berdasarkan wilayah desa

| Kec. | Desa | Jenis tutupan lahan | Kode SWAT | Kelas Lereng (%) | | | | | Jumlah (Ha) | |
|---------------------|-------------------|---------------------|-----------|------------------|------|-------|-------|-------|-------------|-------|
| | | | | 0-8 | 8-15 | 15-25 | 25-40 | >40 | | |
| Caringin | Cimande | Tegalan/Ladang | AGRL | 2.4 | 3.8 | 6.3 | 4.6 | 13.0 | 30.1 | |
| | | Hutan | FRSE | 3.1 | 7.9 | 13.3 | 20.6 | 72.4 | 117.3 | |
| | | Kebun/Hutan rakyat | FRST | 0.9 | 4.5 | 6.0 | 5.9 | 5.5 | 22.8 | |
| | | Belukar/Semak | RNGB | 0.8 | 1.8 | 4.1 | 4.8 | 27.3 | 38.8 | |
| | | Pemukiman | URHD | | 0.0 | 0.1 | 0.0 | | 0.1 | |
| | Cimande Total | | | | 7.2 | 18.0 | 29.7 | 36.0 | 118.3 | 209.1 |
| | Lemah Duhur | Tegalan/Ladang | AGRL | 0.9 | 1.8 | 4.9 | 8.9 | 12.3 | 28.8 | |
| | | Hutan | FRSE | | | 0.1 | 0.0 | | 0.1 | |
| | | Belukar/Semak | RNGB | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.3 | 8.8 | 9.2 | |
| | | Pemukiman | URHD | | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.6 | 1.3 | |
| | Lemah Duhur Total | | | | 0.9 | 2.0 | 5.4 | 9.4 | 21.7 | 39.3 |
| | Pancawati | Tegalan/Ladang | AGRL | 3.0 | 6.1 | 7.7 | 7.5 | 4.5 | 28.7 | |
| | | Hutan | FRSE | | 0.4 | 1.0 | 1.5 | 6.5 | 9.3 | |
| | | Kebun/Hutan rakyat | FRST | 5.5 | 18.9 | 23.4 | 11.1 | 0.6 | 59.4 | |
| | | Belukar/Semak | RNGB | 3.0 | 13.8 | 28.0 | 30.6 | 73.5 | 149.0 | |
| | | Pemukiman | URHD | 1.4 | 2.3 | 0.6 | 0.3 | | 4.7 | |
| | Pancawati Total | | | | 12.9 | 41.5 | 60.7 | 50.9 | 85.1 | 251.0 |
| | Tangkil | Tegalan/Ladang | AGRL | 0.1 | 0.7 | 0.8 | 1.1 | 1.3 | 4.0 | |
| | | Hutan | FRSE | 0.4 | 1.0 | 1.7 | 4.2 | 30.2 | 37.4 | |
| | | Kebun/Hutan rakyat | FRST | | 0.1 | 0.6 | 1.4 | 0.1 | 2.2 | |
| Pemukiman | | RNGB | 0.1 | 0.4 | 0.9 | 1.8 | 7.0 | 10.3 | | |
| Tangkil Total | | | | 0.7 | 2.2 | 4.0 | 8.5 | 38.6 | 53.9 | |
| Kec. Caringin Total | | | | 21.6 | 63.6 | 99.8 | 104.7 | 263.6 | 553.3 | |
| Ciawi | Cileungsi | Tegalan/Ladang | AGRL | 1.3 | 1.8 | 0.7 | 2.9 | 3.9 | 10.6 | |
| | | Hutan | FRSE | 0.7 | 1.3 | 2.6 | 4.4 | 26.3 | 35.2 | |
| | | Kebun/Hutan rakyat | FRST | 2.2 | 8.1 | 6.8 | 4.6 | 5.7 | 27.4 | |
| | | Belukar/Semak | RNGB | 1.2 | 5.6 | 13.5 | 21.4 | 62.4 | 104.1 | |
| | Pemukiman | URHD | 1.4 | 3.2 | 1.4 | 1.0 | 0.2 | 7.1 | | |
| Cileungsi Total | | | | 6.8 | 19.9 | 25.0 | 34.2 | 98.5 | 184.3 | |
| Kec. Ciawi Total | | | | 6.8 | 19.9 | 25.0 | 34.2 | 98.5 | 184.3 | |
| Jumlah Total | | | | 28.3 | 83.5 | 124.8 | 138.9 | 362.1 | 737.6 | |

5 KONDISI HIDROLOGI LOKASI KAJIAN

5.1 Neraca Air SubDAS Cimande

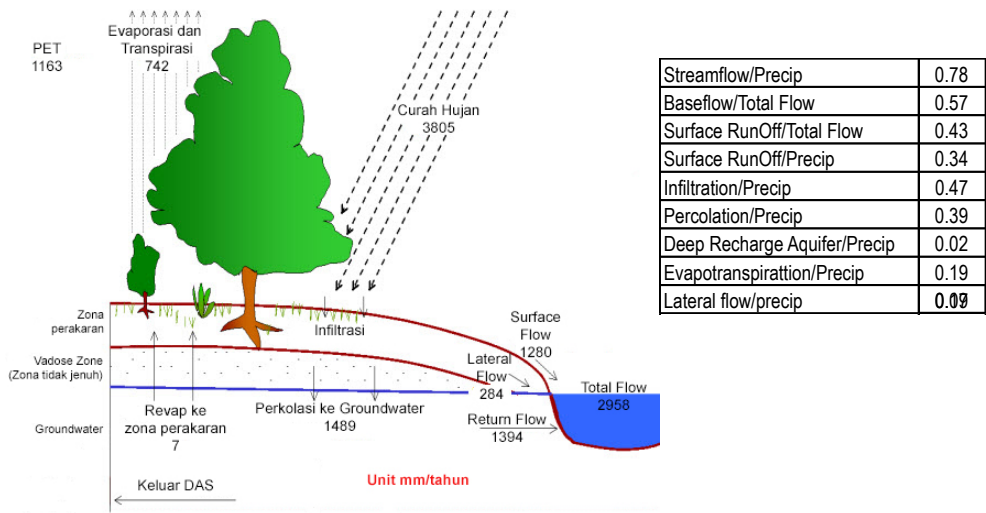
Salah satu output SWAT adalah perhitungan neraca air. Pengetahuan mengenai neraca air sangat penting terutama dalam membantu merencanakan pengelolaan DAS dan sebagai dasar pengetahuan dalam melakukan kegiatan konservasi air dalam rangka mendukung keberlangsungan sumber daya air tanah. Diagram neraca air wilayah SubDAS Cimande ditunjukkan Gbr.5.1. Curah hujan merupakan komponen masukan (input) dalam konsep neraca air. Komponen keluaran (output) adalah penguapan (evapotranspirasi), *surface runoff* / limpasan permukaan, *lateral flow*, perkolasi ke groundwater, *return flow/groundwater flow*, dan penguapan kembali dari akuifer dangkal ke zona perakaran (*revap*).

Rata-rata tahunan¹ jumlah curah hujan di SubDAS Cimande sebesar 3805 mm/tahun (133.01 juta m³/tahun). *surface runoff*, *lateral flow*, dan *groundwater flow* merupakan komponen aliran sungai (*stream flow*). Jumlah total aliran Sungai Cimande sekitar 2,958 mm/tahun (78% dari jumlah curah hujan). *Lateral flow* dan *groundwater flow* merupakan komponen aliran dasar (*baseflow*) dari aliran sungai. Besarnya aliran dasar Sungai Cimande sekitar 1,678 mm/tahun (57% dari total aliran Sungai Cimande).

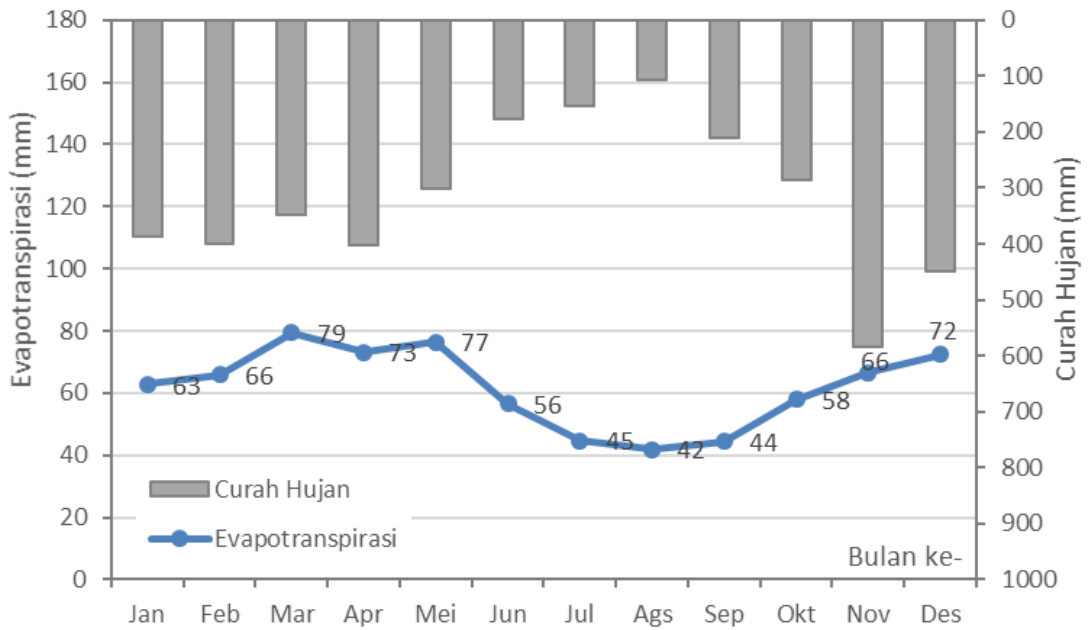
Air yang hilang melalui penguapan ada 2 proses, yaitu dari tubuh air & tanah (evaporasi) dan vegetasi (transpirasi). Total penguapan tersebut disebut evapotranspirasi, nilai sebesar 742 mm/tahun (25.93 juta m³/tahun). Jumlah evapotranspirasi hanya 63.8% dari besarnya evapotranspirasi potensial (maksimum), atau sekitar 19% 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 bulan maret sekitar 79 mm dan paling rendah pada puncak musim kemarau (Agustus-September) sekitar 42-45 mm, Gbr.5.2

surface runoff merupakan limpasan air dari permukaan tanah, dipengaruhi oleh kondisi tutupan/penggunaan lahan dan tanah. Tanah yang bertekstur kasar potensi *surface runoff* rendah. Air yang berasal dari *surface runoff* akan keluar dari SubDAS Cimande masuk aliran sungai. Besarnya *surface runoff* berbanding lurus dengan besarnya curah hujan. Jumlah *surface runoff* sebesar 1280 mm/tahun (44.74 juta m³/tahun). Jumlah *surface runoff* sekitar 34% dari jumlah curah hujan (komponen

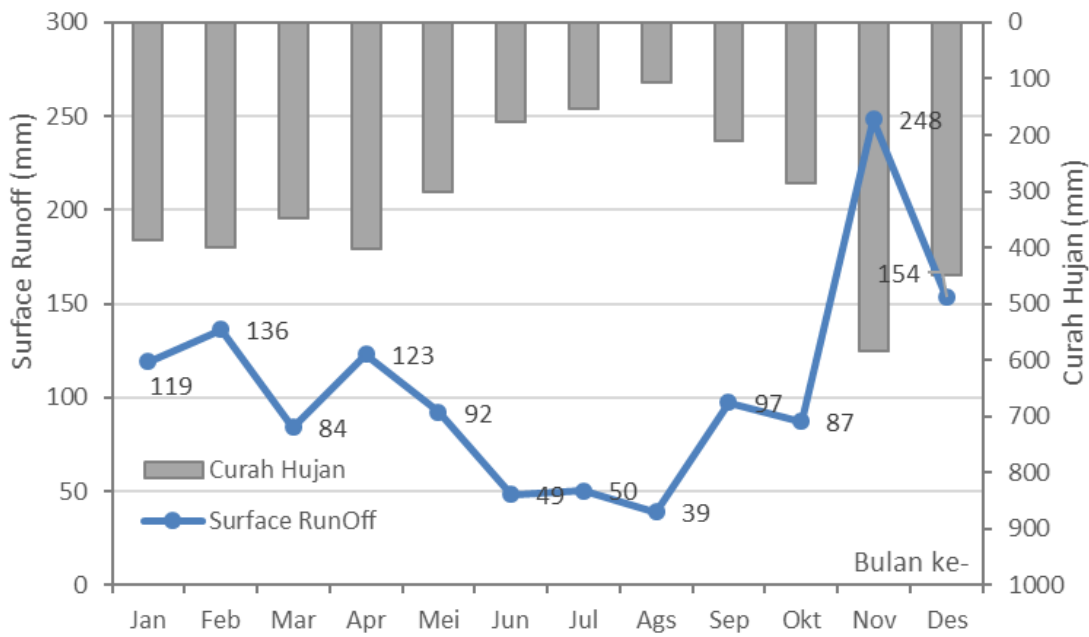
¹Periode simulasi SWAT Tahun 2010 – 2017 (8 tahun)



Gambar 5.1: Diagram neraca air di SubDAS Cimande dari output model SWAT



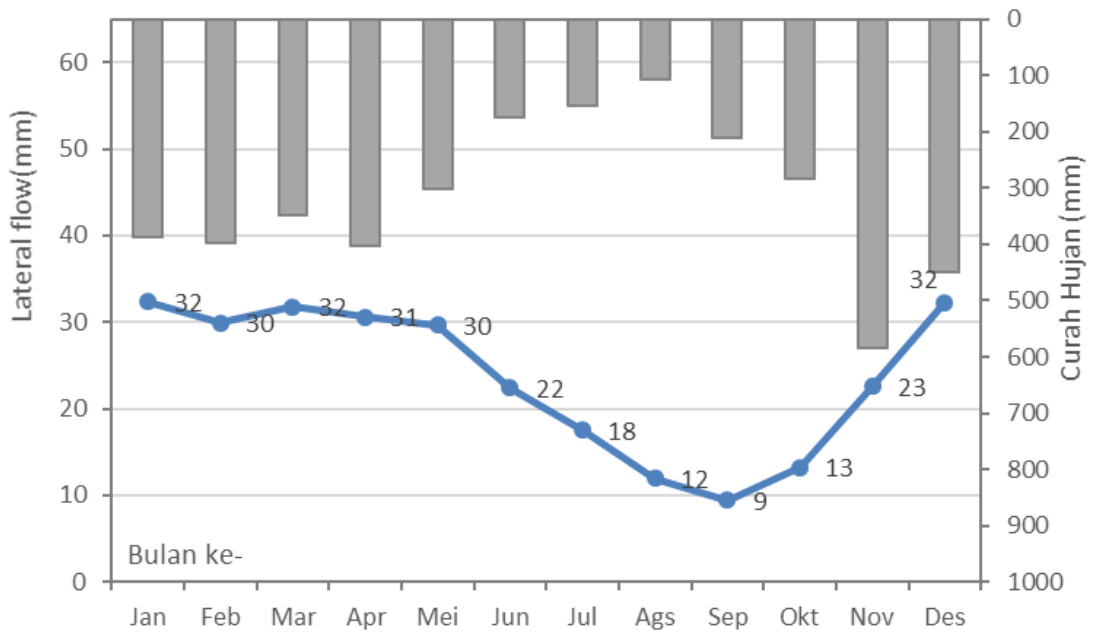
Gambar 5.2: Variasi bulanan evapotranspirasi di SubDAS Cimande



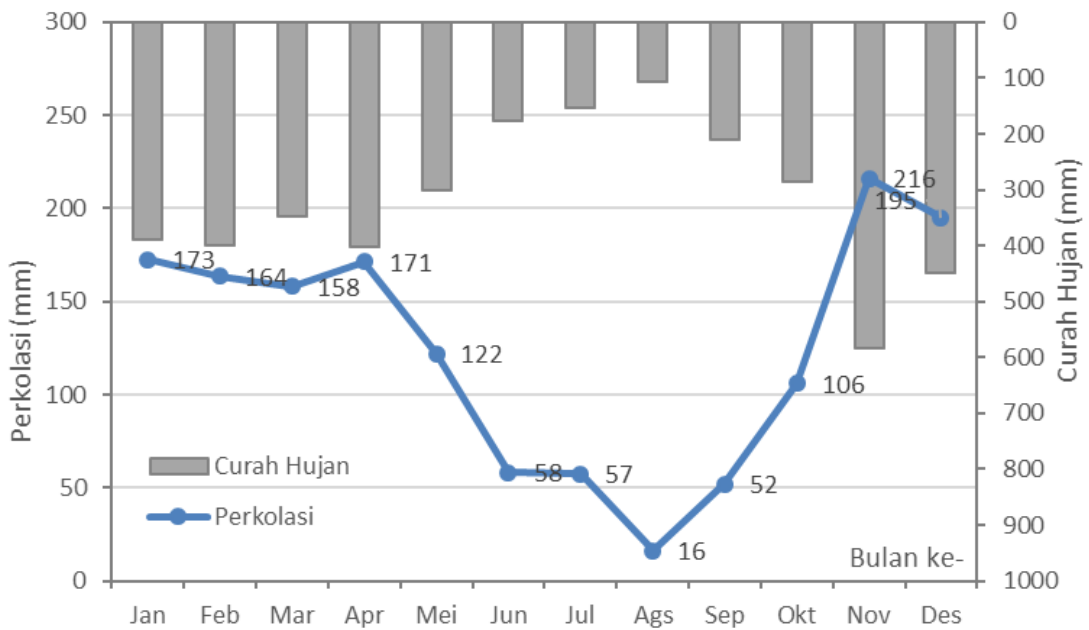
Gambar 5.3: Variasi bulanan *surface runoff* di SubDAS Cimande

neraca air yang paling besar). Jika dibandingkan dengan total aliran Sungai Cimande, besarnya *surface runoff* sekitar 43%. Jumlah *surface runoff* tertinggi terjadi pada bulan November (puncak musim hujan, 248 mm). Limpasan terendah terjadi pada bulan Agustus yang merupakan puncak musim kemarau (39 mm), **Gbr.5.3**.

Curah hujan yang meresap ke dalam tanah zona perakaran (infiltrasi) merupakan selisih antara curah hujan dengan *surface runoff*. Air yang berada di tanah pada daerah yang berlereng sebagian akan mengalir ke daerah yang lebih rendah secara lateral (*lateral flow*), sebagian lagi akan tersimpan sebagai air tanah. Jumlah air yang tersimpan dalam tanah (zona perakaran) sebesar 10 mm/tahun (0.36 juta m³/tahun). *Lateral flow* berkontribusi terhadap aliran sungai, merupakan komponen dari baseflow yang paing kecil. Jumlah *lateral flow* biasanya berbanding lurus dengan jumlah curah hujan pada musim hujan. Pada musim kemarau ada faktor lain yang menyebabkan adanya *delay* (lag) sehingga *lateral flow* terendah tidak terjadi pada jumlah curah hujan terendah. Persentase jumlah *lateral flow* terhadap curah hujan relative lebih kecil, hanya 7% (284 mm/tahun atau 9.92 juta m³/tahun). Jumlah *lateral flow* bulanan berkisar antara 9-32 mm. Puncak *lateral flow* pada Maret-April dan terendah pada September, **Gbr.5.4**.



Gambar 5.4: Variasi bulanan lateral flow di SubDAS Cimande



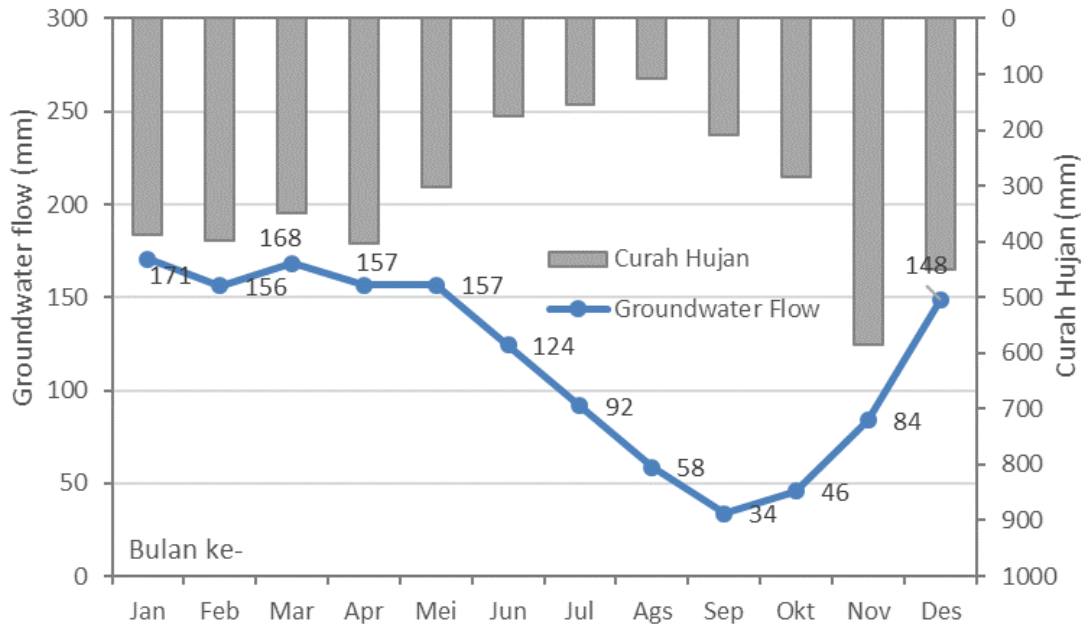
Gambar 5.5: Variasi bulanan perkolasi di SubDAS Cimande

Perkolasi merupakan pergerakan air secara vertikal dari zona perakaran ke akuifer (groundwater) karena pengaruh gravitasi. Faktor utama yang mempengaruhi perkolasi adalah permeabilitas tanah. Permeabilitas tanah merupakan parameter fisik tanah yang menentukan kemampuan meresapkan air tanah. Parameter ini dipengaruhi oleh tekstur tanah, kerapatan tanah, dan ukuran ruang pori tanah. Jumlah air perkolasi di SubDAS Cimande sekitar 1,489 mm/tahun (52.05 juta m^3 /tahun). Jika dibandingkan dengan jumlah curah hujan, jumlah air perkolasi hanya 39%. Besarnya jumlah air perkolasi sebanding dengan besarnya jumlah curah hujan (**Gbr.5.5**). Jumlah air perkolasi paling tinggi pada puncak musim hujan (November), sebesar 216 mm. Jumlah air perkolasi paling rendah pada puncak musim kemarau (Agustus), sebesar 16 mm.

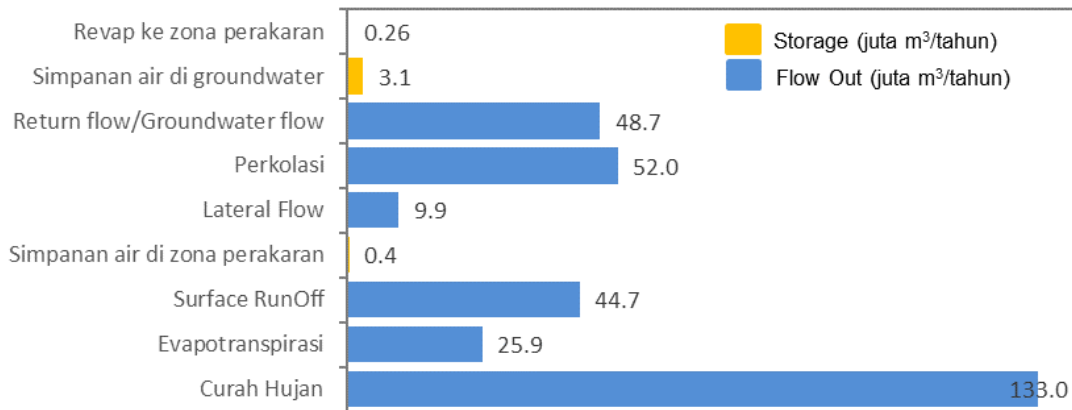
Air dari zona perakaran masuk ke akuifer (groundwater) melalui perkolasi. Dalam lapisan akuifer ini ada bagian air yang tersimpan sebagai groundwater; ada bagian yang menguap kembali melalui zona perakaran (revap); dan *return flow* ke sungai sebagai *groundwater flow*. Bagian air yang menguap kembali ke zona perakaran hanya sebagian kecil (7 mm/tahun atau 0.26 juta m^3 /tahun), sekitar 0.18% dari jumlah curah hujan. Bagian air yang tersimpan sebagai groundwater sekitar 88 mm (3.1 juta m^3 /tahun), sekitar 2.3% dari jumlah curah hujan.

Return flow merupakan pergerakan air secara lateral pada lapisan akuifer dangkal (*groundwater flow*). *Return flow* berkontribusi terhadap total aliran Sungai Cimande, merupakan komponen baseflow. Jumlah *return flow* sekitar 1,394 mm/tahun atau 48.72 juta m^3 /tahun. Jika dibandingkan dengan jumlah curah hujan, hanya sekitar 36.6%. *Return flow* atau *groundwater flow* merupakan komponen *baseflow* dari aliran Sungai Cimande 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 (168 mm). Begitu juga pada musim kemarau, jumlah *return flow* yang paling rendah (34 mm) bergeser 1 bulan dari puncak musim kemarau (September); Gbr.5.6 pada halaman 42.

Ringkasan potensi jumlah volume komponen neraca air di SubDAS Cimande ditunjukkan Gbr.5.7 pada halaman 42. Jumlah air yang masuk ke SubDAS Cimande sebagai curah hujan sekitar 133.01 juta m^3 /tahun, akan hilang ke atmosfer melalui evapotranspirasi sebesar 25.93 juta m^3 /tahun, selanjutnya hilang sebagai *surface runoff* masuk ke sungai 44.74 juta m^3 /tahun. Dari air yang meresap ke dalam tanah, sekitar 0.36 juta m^3 /tahun tersimpan dalam zona perakaran sebagai cadangan air tanah; 9.92 juta m^3 /tahun hilang sebagai *lateral flow* masuk ke sungai; dan 52.05 juta m^3 /tahun masuk ke lapisan akuifer melalui perkolasi. Dari air yang masuk ke dalam akuifer tersebut, sekitar 3.1 juta m^3 /tahun akan tersimpan sebagai *groundwater*; sekitar 48.72 juta m^3 /tahun akan hilang sebagai *return flow* / *groundwater flow* masuk ke sungai; dan menguap kembali melalui zona perakaran sekitar 0.26 juta m^3 /tahun.



Gambar 5.6: Variasi bulanan *Return flow* di SubDAS Cimande



Gambar 5.7: Potensi volume komponen neraca air (juta m³/tahun) di SubDAS Cimande

5.2 Neraca air di recharge area sumber air Plant Ciherang

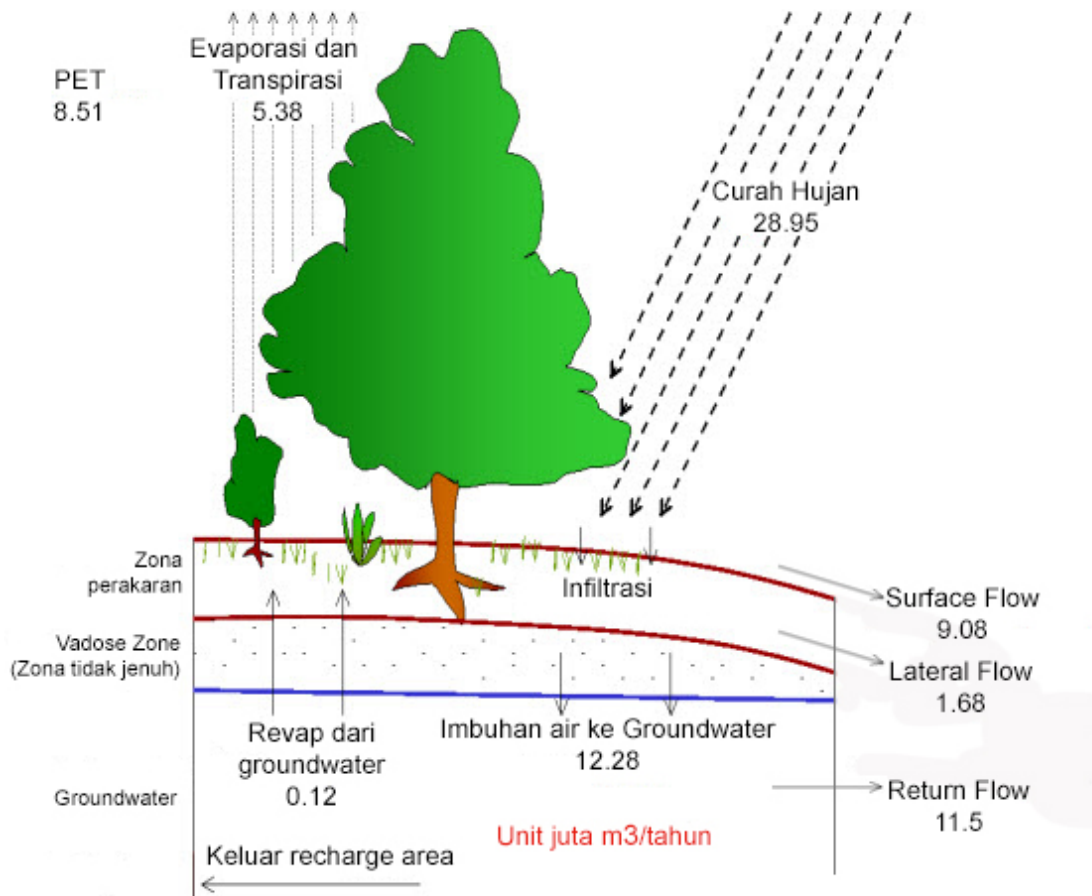
Luas recharge area sumber air Plant Ciherang adalah 745 ha, sekitar 21.3% dari luas SubDAS Cimande. Diagram neraca air di recharge area sumber air Plant Ciherang ditunjukkan Gbr.5.8 pada halaman 44. Volume air hujan yang masuk ke recharge area sumber area Plant Ciherang sekitar 28.95 juta m^3 /tahun, hilang ke atmosfer melalui evapotranspirasi sebesar 5.48 juta m^3 /tahun, selanjutnya hilang sebagai *surface runoff* keluar recharge area sebesar 9.08 juta m^3 /tahun. Dari air yang meresap ke dalam tanah, sekitar 0.53 juta m^3 /tahun tersimpan sebagai airtanah di zona perakaran, 1.68 juta m^3 /tahun hilang sebagai lateral flow keluar recharge area; dan 12.28 juta m^3 /tahun masuk ke groundwater melalui perkolasi. Dari air yang masuk ke groundwater tersebut, sekitar 11.5 juta m^3 /tahun akan hilang sebagai *return flow / groundwater flow* masuk ke sungai; sekitar 0.12 juta m^3 akan menguap kembali ke zona perakaran dan sekitar 0.66 juta m^3 /tahun akan tersimpan di groundwater.

5.2.1 *Surface runoff* di recharge area

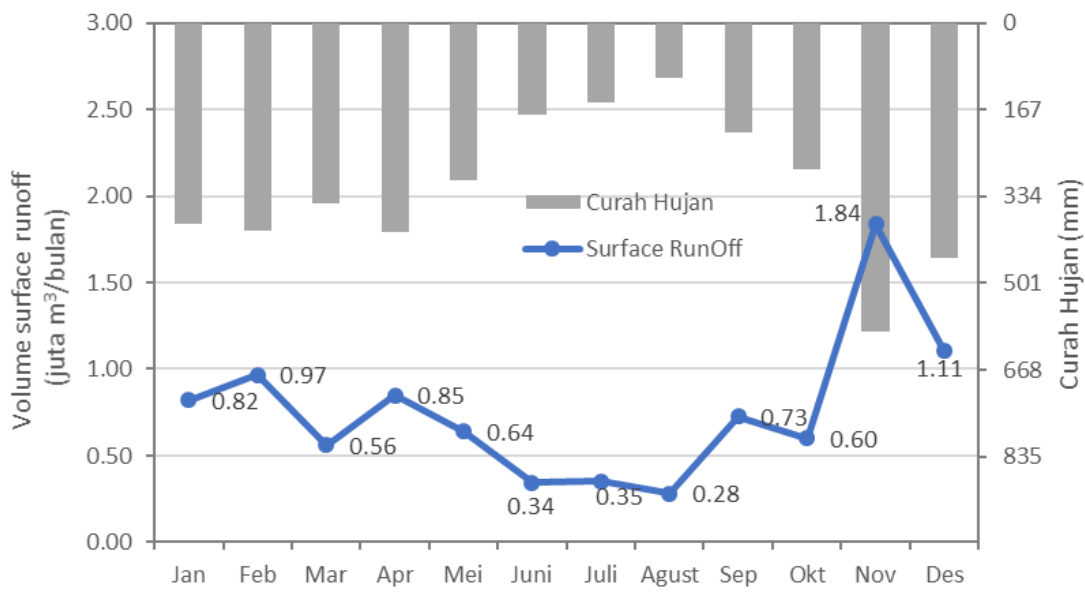
Rata-rata jumlah *surface runoff* di recharge area sekitar 1,219 mm/tahun (9.08 juta m^3 /tahun), sekitar 32% dari jumlah curah hujan. Jumlah *surface runoff* ini dipengaruhi oleh komposisi tutupan/penggunaan lahan, dan jenis tanah. Ada 5 jenis tutupan / penggunaan lahan di recharge area, yang dominan adalah Belukar/Semak (35%) dan Tegalan/Ladang masyarakat (28%). Lahan berhutan sekitar 18% (135 ha) dan lahan Pemukiman hanya 2% (16 ha). Untuk jenis tanah di recharge area hanya 1 jenis, yaitu *Latosol* coklat. Tekstur tanah tergolong lempung hingga berliat (SHG C/SHG D). Kombinasi ini menghasilkan karakteristik hidrologi permukaan spesifik yang menentukan besarnya *surface runoff*.

Untuk distribusi bulanan, besarnya *surface runoff* di recharge area berkisar antara 0.28 – 1.84 juta m^3 /bulan. *surface runoff* paling tinggi pada puncak musim hujan (November), sebesar 1.84 juta m^3 /bulan. Sedangkan paling rendah pada puncak musim kemarau (Agustus), sebesar 0.28 juta m^3 /bulan (**Gbr.5.9** pada halaman 45).

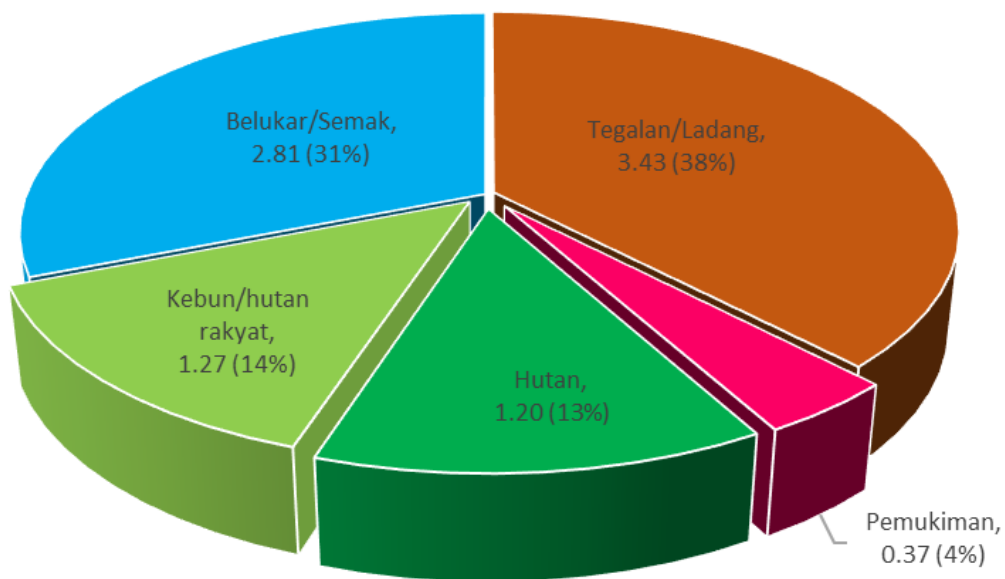
Kontribusi *surface runoff* paling besar di recharge area berasal dari Tegalan/Ladang sayur (3.43 juta m^3 /tahun) dan Belukar/Semak (2.81 juta m^3 /tahun). *surface runoff* berasal dari lahan pemukiman sekitar 0.37 juta m^3 /tahun (4% dari total *surface runoff* recharge area), Gbr.5.10 pada halaman 45. Jumlah air hujan yang menjadi *surface runoff* ini akan hilang dari recharge area masuk ke aliran Sungai Cimande, Ciletuh, Ciherang Santri dan Ciherang Gede. Namun, dengan menerapkan teknik konservasi air yang sederhana potensi air yang hilang ini dapat diresapkan kembali ke dalam tanah.



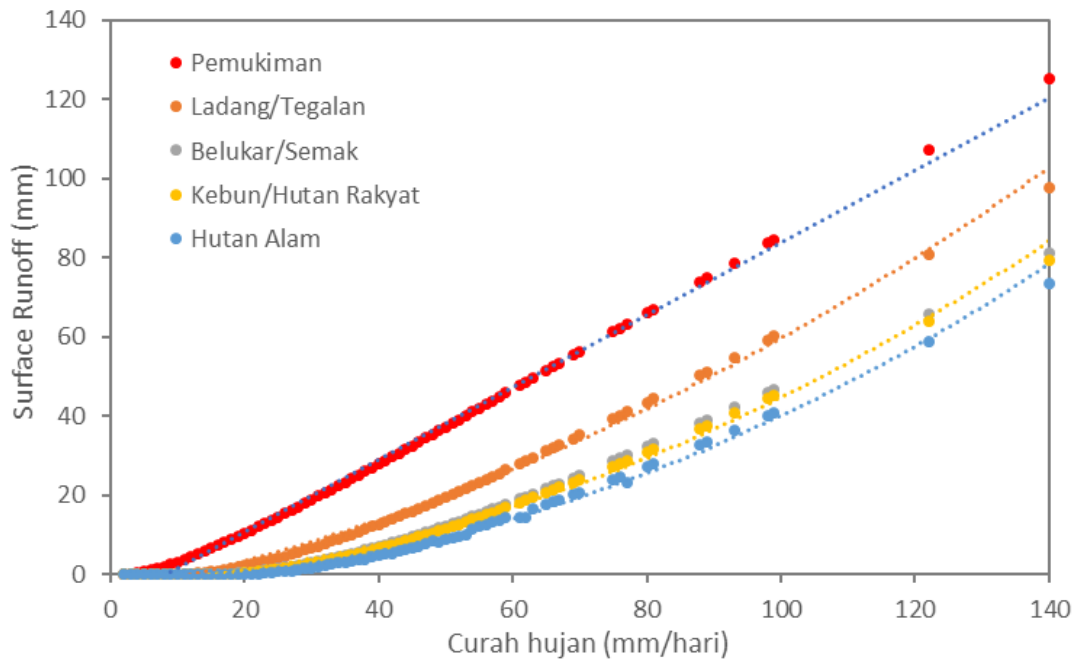
Gambar 5.8: Diagram neraca air di recharge area sumber air Plant Subang



Gambar 5.9: Variasi bulanan potensi *surface runoff* di recharge area



Gambar 5.10: Potensi volume *surface runoff* (juta m³/tahun) di recharge area dan proporsi berdasarkan tutupan/penggunaan lahan



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

Gbr.5.11 menunjukkan jumlah *surface runoff* dari lahan bervegetasi (hutan alam, semak/belukar, kebun / hutan rakyat) lebih rendah dibandingkan lahan terbuka (tegalan/ladang) dan lahan pemukiman. Hasil analisa harian menunjukkan bahwa rata-rata nilai rasio *surface runoff* terhadap curah hujan dari lahan hutan alam sebesar 55.6% dari curah hujan. Nilai rasio *surface runoff* terhadap curah hujan dari lahan pemukiman jauh lebih besar (92.3% dari curah hujan). Artinya, potensi air hujan yang diresapkan ke dalam tanah lebih banyak di lahan hutan (bervegetasi permanen) dibandingkan lahan pemukiman.

5.2.2 Groundwater recharging di recharge area

Recharge area sumber air Plant Ciherang memiliki potensi jumlah air hujan efektif yang bisa diresapkan ke dalam zona perakaran sekitar 2596 mm/tahun (68% dari jumlah curah hujan). Curah hujan efektif merupakan jumlah curah hujan yang diterima di lahan dikurangi dengan *surface runoff*. Jumlah curah hujan efektif tersebut yang berpotensi bisa diresapkan ke dalam tanah. Rata-rata imbuhan airtanah masuk ke groundwater sekitar 1649 mm (sekitar 63.5% dari jumlah air hujan efektif) atau 12.28 juta m³/tahun atau 389.5 liter/detik.

Komposisi imbuhan airtanah ke groundwater tersebut paling besar berasal dari lahan Belukar/Semak (37%), sekitar 4.58 juta m³/tahun. Jumlah air dari lahan kebun/hutan rakyat sekitar 2.28 juta m³/tahun (19%). Kebun/hutan rakyat masyarakat

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

| Tutupan lahan / Penggunaan lahan | Persamaan limpasan permukaan (mm) ^a | Koefesien determinasi (R^2) ^b | min. RO ^c |
|----------------------------------|--|--|----------------------|
| Pemukiman | $0.9226X - 7.9165$ | 0.9976 | 9 |
| Ladang / Tegalan | $0.0023X^2 + 0.4473X - 8.114$ | 0.9984 | 13 |
| Belukar /Semak | $0.0026X^2 + 0.285X - 7.9068$ | 0.9986 | 23 |
| Kebun /Agroforestri | $0.0028X^2 + 0.1951X - 7.0933$ | 0.9975 | 26 |
| Hutan | $0.0033X^2 + 0.1379X - 5.666$ | 0.9976 | 26 |

^acurah hujan harian (mm)

^bAnalisa output model SWAT

^cCurah hujan minimum terjadinya Run Off (mm/hari)

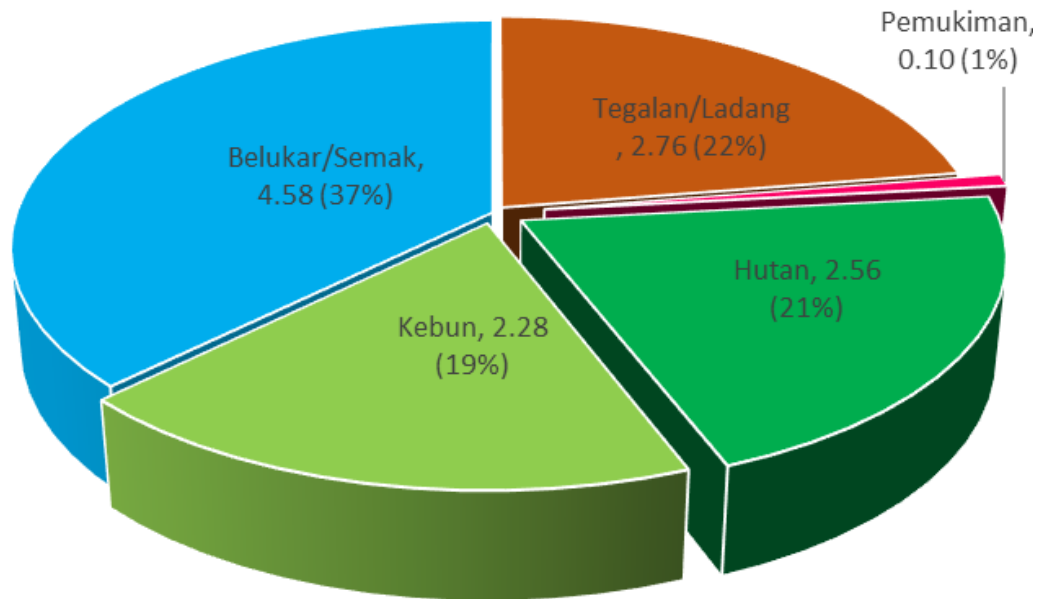
berupa kebun pala, cengkeh, kebun buah dan hutan tanaman rakyat (sengon dan jabor). Imbuhan airtanah dari lahan Hutan sekitar 2.56 juta m³/tahun (21%), hanya sebagian kecil dari lahan pemukiman (1%) sebesar 0.1 juta m³/tahun, Gbr.??.

Imbuhan airtanah bulanan ke groundwater di recharge area bervariasi antara 0.3-1.6 juta m³/bulan. Imbuhan airtanah paling tinggi pada Bulan Desember sebesar 1.6 juta m³ (49.2 liter/detik), dan paling rendah pada Bulan September sebesar 0.3 juta m³ (9.8 liter/detik), Gbr.5.13 pada halaman 48.

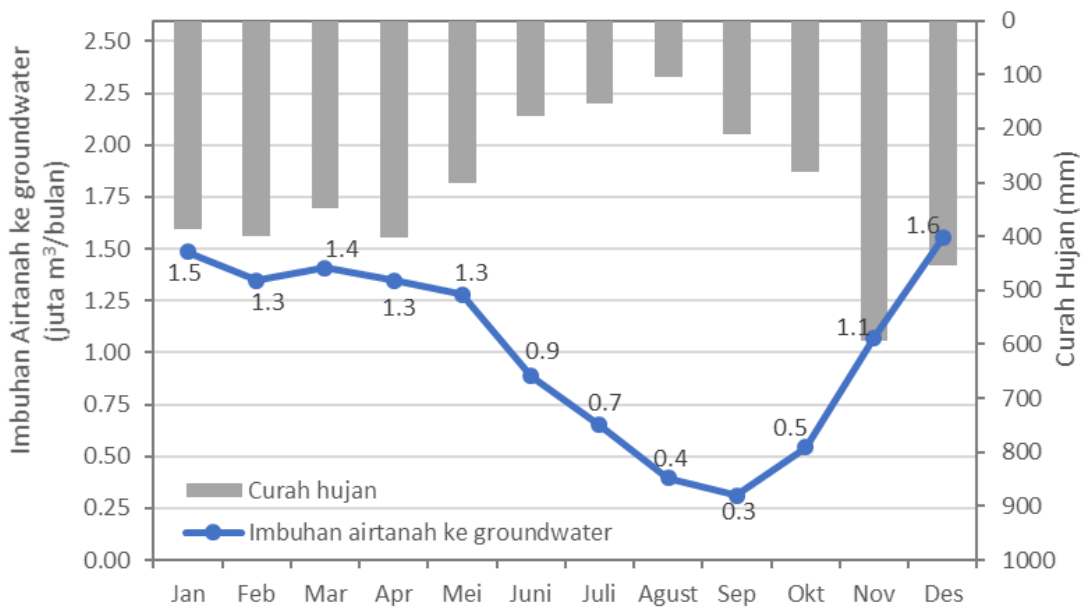
Gbr.5.14 pada halaman 49 menunjukkan time series potensi imbuhan airtanah yang masuk ke lapisan akuifer. Dalam rentang waktu 2011 hingga 2017, imbuhan airtanah paling rendah pada Tahun 2015 sekitar 9.15 juta m³ (290.3 liter/detik). Pada tahun ini terjadi El Nino, periode dimana curah hujan berkurang sangat signifikan (tahun kering). Imbuhan airtanah paling tinggi pada Tahun 2016, sebesar 17.30 juta m³ (548.4 liter/detik). Besarnya air yang dapat diimbuhkan ke dalam lapisan akuifer sebanding dengan jumlah curah hujannya. Semakin besar curah hujan, semakin besar potensi air yang bisa di masukan ke dalam akuifer (groundwater). Jumlah curah hujan yang paling tinggi pada Tahun 2016.

Dari air yang masuk ke groundwater tersebut, sebagian besar akan hilang sebagai *return flow / groundwater flow* masuk ke sungai; sebagian kecil akan menguap kembali (revap) ke zona perakaran dan sisanya akan tersimpan di groundwater. Rata-rata jumlah *groundwater flow* yang berkontribusi terhadap aliran sungai sebesar 11.5 juta m³/tahun (364.6 liter/detik), jumlah revap ke zona perakaran hanya 0.12 juta m³/tahun (3.9 liter/detik) dan sisanya tersimpan sebagai groundwater sebesar 0.66 juta m³/tahun (21 liter/detik). Artinya, dari air yang masuk ke lapisan akuifer hanya 5.39% yang tersimpan sebagai cadangan air dalam groundwater.

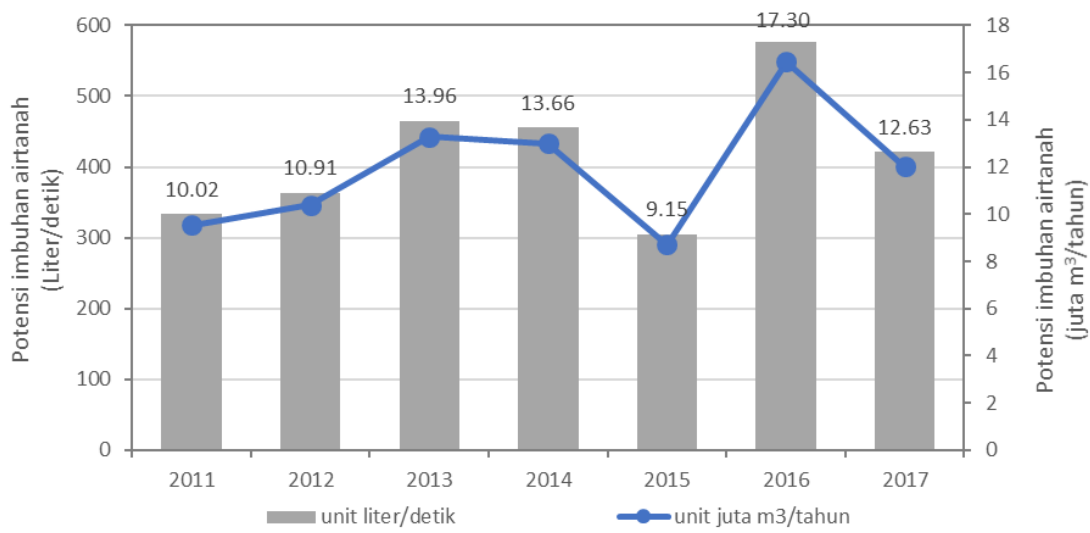
Neraca air dalam groundwater ditunjukkan Gbr.5.15 pada halaman 49. Kondisi gro-



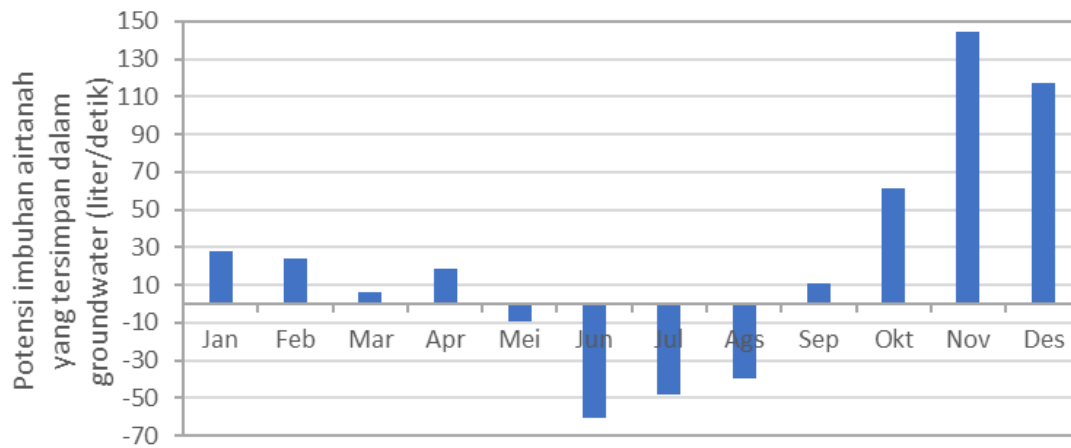
Gambar 5.12: Potensi volume imbuhan air ke akuifer dangkal (juta m³/tahun) di recharge area dan proporsi berdasarkan tutupan/penggunaan lahan



Gambar 5.13: Variasi bulanan potensi imbuhan air ke groundwater di recharge area



Gambar 5.14: Variasi tahunan potensi imbuhan air ke lapisan akuifer di recharge area



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

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

| Asosiasi Strata Vegetasi | Potensi Groundwater Recharging ² | | Keterangan: Perkembangan pohon |
|--------------------------|---|------------------|--------------------------------------|
| | (m ³ /ha/tahun) | (liter/detik/ha) | |
| Hutan alam | 19,001 | 0.603 | >10 tahun |
| Kebun/hutan rakyat | 18,512 | 0.587 | 5-10 tahun |
| Belukar/Semak | 17,473 | 0.554 | 3-4 tahun |
| Ladang/tegalan | 13,197 | 0.418 | 0-2 tahun |

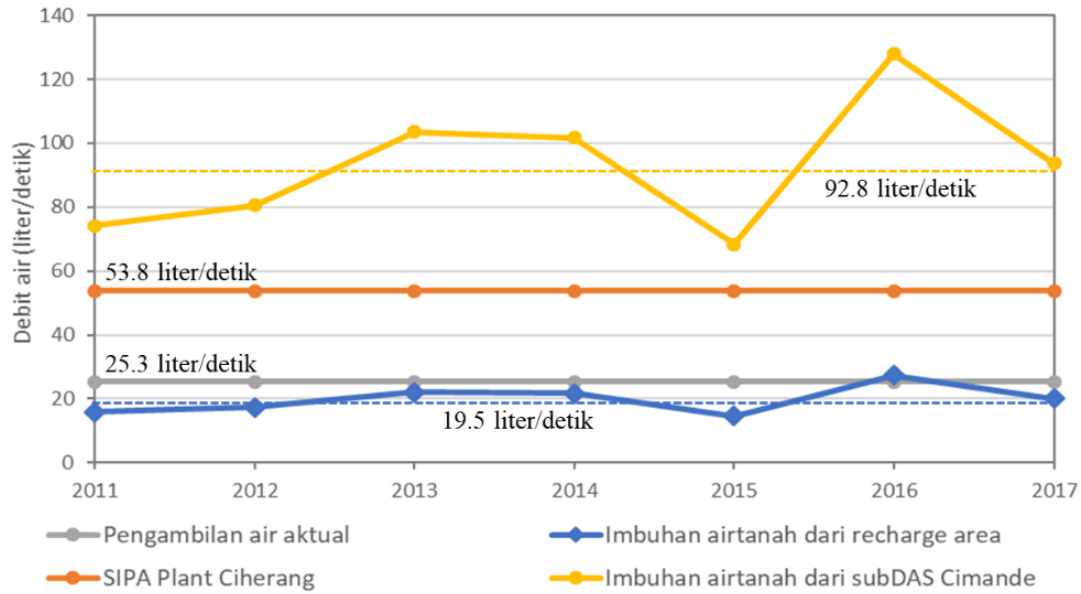
undwater selama musim hujan dalam keadaan surplus, artinya terjadi penambahan cadangan air dalam groundwater. Rata-rata imbuhan airtanah setiap bulan yang tersimpan dalam groundwater bervariasi, berkisar antara 6-144.7 liter/detik. Imbuhan airtanah paling tinggi pada awal musim hujan (Bulan November-Desember), lebih dari 100 liter/detik (0.31-0.37 juta m³/bulan). Kondisi groundwater selama musim kemarau dalam keadaan defisit, mulai dari Bulan Mei-Agustus. Defisit paling besar pada Bulan Juni sebesar 60.8 liter/detik (157,589 m³/bulan). Pada kondisi ini ditunjukkan dengan kedalaman muka air sumur warga Pancawati yang semakin turun (makin dalam).

Hasil simulasi model SWAT menunjukkan bahwa jenis tutupan/penggunaan lahan mempengaruhi besarnya imbuhan air tanah ke groundwater. Rasio imbuhan air tanah terhadap curah hujan akan semakin besar dengan meningkatnya strata vegetasi. Rasio imbuhan air tanah terhadap curah hujan pada kondisi tutupan/penggunaan lahan berupa tegalan/ladang, sekitar 34.8%. Dengan meningkatnya strata vegetasi menjadi Belukar/Semak, rasio imbuhan air tanah meningkat menjadi 46%. Selanjutnya pada strata vegetasi kebun/hutan rakyat rasio imbuhan air tanah meningkat menjadi 48.8%. Pada strata hutan, rasio imbuhan air tanah meningkat menjadi 50.1%. Kondisi seperti hutan inilah, yang diharapkan dalam kegiatan konservasi berbasis vegetatif. Potensi imbuhanan air tanah yang tersimpan dalam groundwater pada berbagai kondisi strata vegetasi disajikan **Tabel 6.2**. Potensi imbuhan airtanah yang tersimpan dalam akuifer sekitar 5% dari potensi groundwater recharging-nya.

Gbr.5.16 pada halaman 51 menunjukkan posisi debit air antara imbuhan airtanah ke groundwater (hasil model SWAT), SIPA Plant Ciherang dan pengambilan air aktual oleh Plant Ciherang. Plant Ciherang mengambil airtanah lebih rendah dari SIPA yang diberikan. Rata-rata jumlah air yang diambil Plant Ciherang sekitar 25.3³ liter/detik sedangkan SIPA sekitar 53.8 liter/detik. Rata-rata imbuhan airtanah ke groundwater secara alami dari recharge area di SubDAS Cimande hanya 19.5 liter/detik, lebih rendah dari jumlah air yang diambil oleh Plant Ciherang. Hal ini menunjukkan ada potensi defisit di dalam storage groundwater yang berkontribusi terhadap sumber air

²hasil simulasi model SWAT

³Rata-rata pengambilan air Plant Ciherang pada tahun 2017-2018



Gambar 5.16: Posisi debit air antara imbuhan airtanah ke akuifer, SIPA Plant Ciherang dan pengambilan air aktual Plant Ciheran

Plant Ciherang. Jika melihat wilayah yang lebih luas (SubDAS Cimande), imbuhan airtanah jauh lebih besar (rata-rata 92.8 liter/detik). Pengambilan air oleh Plant Ciherang tidak menyebabkan storage groundwater defisit.

6 KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

6.1 Kesimpulan

1. Model SWAT yang dibangun di DAS Cimande 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 0.5 (bagus).
2. Neraca air di SubDAS Cimande: jumlah curah hujan sekitar 133.01 juta m^3 /tahun, jumlah evapotranspirasi sebesar 25.93 juta m^3 /tahun, jumlah *surface runoff* yang masuk ke sungai 44.74 juta m^3 /tahun. Dari air yang meresap ke dalam tanah, sekitar 0.36 juta m^3 /tahun tersimpan dalam zona perakaran; 9.92 juta m^3 /tahun masuk ke sungai sebagai lateral flow; dan 52.05 juta m^3 /tahun masuk ke lapisan akuifer melalui perkolasi. Dari air yang masuk ke dalam akuifer tersebut, sekitar 3.1 juta m^3 /tahun akan tersimpan sebagai *groundwater*; sekitar 48.72 juta m^3 /tahun akan hilang sebagai *return flow / groundwater flow* masuk ke sungai; dan menguap kembali melalui zona perakaran sekitar 0.26 juta m^3 /tahun.
3. Rata-rata jumlah *surface runoff* di wilayah *recharge area* sekitar 1,219 mm/tahun (9.08 juta m^3 /tahun), sekitar 32% dari jumlah curah hujan. Kontribusi *surface runoff* paling besar di *recharge area* berasal dari Tegalan atau Ladang sayur, sekitar 38% (3.43 juta m^3 /tahun) dan 31% dari lahan Belukar/Semak (2.81 juta m^3 /tahun). Kontribusi paling rendah berasal dari lahan pemukiman, sekitar 0.37 juta m^3 /tahun (4%). Kontribusi dari lahan kebun sekitar 1.27 juta m^3 /tahun (14%) dan hutan sekitar 1.2 juta m^3 /tahun (13%).
4. Rata-rata imbuhan airtanah masuk ke groundwater di wilayah *recharge area* sekitar 1649 mm (sekitar 63.5% dari jumlah air hujan efektif) atau 12.28 juta m^3 /tahun atau 389.5 liter/detik. Komposisi imbuhan airtanah ke groundwater tersebut paling besar berasal dari lahan Belukar/Semak (37%), sekitar 4.58 juta m^3 /tahun; selanjutnya dari lahan kebun/hutan rakyat sekitar 2.28 juta m^3 /tahun (19%); Imbuhan airtanah dari lahan Hutan sekitar 2.56 juta m^3 /tahun (21%), hanya sebagian kecil dari lahan pemukiman (1%) sebesar 0.1 juta m^3 /tahun.
5. Dari air yang masuk ke groundwater tersebut (wilayah *recharge area*), rata-rata jumlah *groundwater flow* yang berkontribusi terhadap aliran sungai sebesar 11.5 juta m^3 /tahun (364.6 liter/detik), jumlah revap ke zona perakaran hanya 0.12

juta m^3 /tahun (3.9 liter/detik) dan sisanya tersimpan sebagai groundwater sebesar 0.66 juta m^3 /tahun (21 liter/detik). Artinya, dari air yang masuk ke lapisan akuifer hanya 5.39% yang tersimpan sebagai cadangan air dalam groundwater.

6.2 Rekomendasi

1. Pemeliharaan alur sungai di wilayah *recharge area* akan berpotensi mengimbuhkan air ke groundwater sebesar 102.3 liter/detik (5 liter/detik/km alur sungai). Selain itu juga dilakukan pemulihan riparian zone sebagai bagian dari upaya pengelolaan daerah aliran sungai (DAS). Dengan lebar buffer sungai sekitar 25 m dari tepi sungai, luas arahan penghijauan di riparian zone sekitar 33.1 ha. Arahan lokasi kegiatan ini tersebar di Desa Cileungsi (5.2 ha), Cimande (6.9 ha), Lemah duhur (2.9 ha), Pancawati (17 ha), dan Tangkil (1.1 ha). Kegiatan rehabilitasi dengan menanam pohon aren atau yang bernilai ekonomis sehingga mendukung kegiatan ekonomi masyarakat (gula merah)
2. Lahan bervegetasi yang masih baik kondisinya terdapat di *recharge area*. Luas arahan lahan bervegetasi untuk di pertahankan/ditingkatkan adalah 151.3 ha, sekitar 134.5 ha berada dalam Kawasan TNGP (hutan) dan sekitar 38.4 ha diluar Kawasan TNGP (kebun masyarakat / hutan rakyat). Untuk lahan diluar Kawasan TNGP bisa dikombinasikan dengan pembuatan rorak dan embung. Setiap 1 ha area penghijauan dibuat 10 rorak dan 1 embung mini dengan dimensi rorak $1 \times 2 \times 0.5$ m dan dimensi embung $2 \times 4 \times 1$ m. Dari lahan bervegetasi ini, berpotensi mengimbuh airtanah ke akuifer dalam sekitar $950 m^3$ /ha/tahun (0.03 liter/detik). Total potensi imbuhan airtanah melalui kegiatan ini 4.54 liter/detik.
3. Arahan lokasi kegiatan penghijauan adalah di dalam kawasan TNGP, yang jelas kepemilikan/pengelola lahannya (Balai TNGP). Luas arahan lokasi kegiatan penghijauan adalah 280.2 ha. Kondisi tutupan lahan sekarang di lokasi tersebut adalah belukar/semak, ladang/tegal sayur, dan kebun masyarakat. Jenis pohon yang disarankan untuk penghijaun ini adalah pohon yang berkayu keras dan berumur panjang, seperti pohon Pulai (*Alstonia scholaris*), Rasamala (*Altingia excelsa Noronha*), Puspa (*Schima wallichii*), Salam (*Syzygium polyanthum*), Janitri (*Elaeocarpus serratus*), dan mahoni (*Swietenia macrophylla King*).
4. 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.
5. Perlu mendidik anggota masyarakat sebagai kader lingkungan yang melakukan pemantauan dan pemeliharaan hasil kegiatan konservasi

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 Bogor, 2018a] BPS Bogor (2018a). *Kecamatan Caringin Dalam Angka Tahun 2018*. BPS.
- [BPS Bogor, 2018b] BPS Bogor (2018b). *Kecamatan Cileungsi Dalam Angka Tahun 2018*. 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., 2010a] Douglas-Mankin, K., Srinivasan, R., & Arnold, J. (2010a). Soil and water assessment tool (swat) model: Current developments and applications. *Transactions of the ASABE*, 53(5), 1423–1431.
- [Douglas-Mankin et al., 2010b] Douglas-Mankin, K. R., Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (2010b). 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., 2008a] Zhang, X., Srinivasan, R., & Van Liew, M. (2008a). Multi-site calibration of the swat model for hydrologic modeling. *Transactions of the ASABE*, 51(6), 2039–2049.
- [Zhang et al., 2008b] Zhang, X., Srinivasan, R., & Van Liew, M. (2008b). Multi-site calibration of the swat model for hydrologic modeling. *Transactions of the ASABE*, 51(6), 2039–2049.

