

Prosedur Kalibrasi dan Validasi Model SMAR untuk Mendeskripsikan Proses Hujan Aliran di Sub-DAS Rawatamtu

Indarto

Lab. Teknik Pengendalian dan Konservasi Lingkungan (TPKL), PS Teknik Pertanian, FTP – UNEJ
Jl. Kalimantan No. 37 Kampus Tegalboto, Jember, 68121, E-Mail: indarto.ftp@unej.ac.id

Abstrak

Model SMAR (Soil Moisture Accounting Rainfall Model) merupakan salah satu model hidrologi pada RRL (Rainfall Runoff Library) yang dapat digunakan untuk menghitung aliran permukaan (Run Off) dari suatu DAS. Data masukan utama untuk model adalah data hujan dan evapotranspirasi. Artikel ini membahas prosedur kalibrasi dan validasi model untuk mendeskripsikan proses hujan - aliran pada skala harian. Artikel juga memaparkan tentang manfaat user-interface dan visualisasi yang ada pada software (model) tersebut. Model dikalibrasi menggunakan data debit yang diperoleh dari sub-DAS Rawatamtu (Jawa Timur). Kombinasi dua metode (generic dan manual) digunakan selama proses kalibrasi dan validasi. Kalibrasi dilakukan pada separuh periode rekaman yang tersedia, sedangkan validasi dilakukan pada separuh periode yang ke dua. Hasil kalibrasi dan validasi dievaluasi menggunakan kriteria: Koefisien Nash-Sutcliffe, Koefisien korelasi (correlation coefficient) dan perbedaan Run Off (difference in Run Off). Kalibrasi dan validasi menggunakan metode generic maupun manual menunjukkan bahwa model mampu mereproduksi proses utama dari Hujan menjadi Aliran (debit terhitung) pada sub-DAS tersebut. Hasil juga menunjukkan bahwa performance model kurang optimal pada periode validasi, hal ini dikarenakan keterbatasan data yang digunakan. Data yang lebih lengkap diperlukan untuk mengevaluasi performance model.

Kata-kata Kunci: Model SMAR, prosedur, kalibrasi, dan validasi.

Abstract

The Soil Moisture Accounting Rainfall Model (SMAR) is one of Rainfall Runoff Library Models (RRL) used to calculate Run-Off from rainfall and evapotranspiration data. This article shows the procedure to calibrate the model. Furthermore, this article also show the benefit of software fitur and user interface. Model is calibrated and validated using discharge data obtained from Rawatamtu sub-Watershed (East Java). Two methodes (generic and manual) were exploited for the calibration and validation processes. The result was evaluated by using the criteria of: Nash-Sutcliffe Coefficient, Coefficient of Correlation and difference in run-off. Calibration is conducted at the first half of recording periods, while validation is conducted at the second half of recording periods. The result shows that both generic and manual method can describe Rainfall to Run-Off process of the watershed, during calibration periode. However, during validation period model performance is not satisfied, due to the limit of data used. More data is needed to evaluate the model performance.

Keywords: SMAR model, procedure, calibration, and validation.

1. Pendahuluan

SMAR (*Soil Moisture and Accounting*) adalah model hujan-aliran (*rainfall run-off*) untuk perhitungan neraca air pada skala harian. SMAR termasuk model konseptual global. Fokus utama adalah untuk memodkan proses hidrologi terkait dengan perubahan kadar lengas tanah (O'Connell et al, 1970; Kachroo, 1992; Tuteja and Cunnane, 1999). Model akan menghitung: aliran permukaan, debit air-tanah (*groundwater discharge*), evapotranspirasi dan kehilangan (*leakage*) dari profil tanah untuk seluruh wilayah DAS (Daerah Aliran Sungai) pada interval waktu harian. Model ini sudah

digunakan di Negara Asalnya. Makalah ini memaparkan hasil studi pendahuluan tentang prosedur kalibrasi dan validasi model SMAR di Indonesia, dengan mengambil contoh salah satu DAS di Jawa Timur. Fokus pembahasan lebih pada bagaimana prosedur kalibrasi dan validasi model tersebut dilakukan.

1.1 Deskripsi proses hidrologi

Model SMAR terdiri dari dua komponen utama: (1) Neraca Air dan (2) Penelurusan Aliran (**Gambar 1**). SMAR menggunakan input berupa data hujan dan evaporasi (hasil pengukuran panci evaporasi) untuk menghitung debit aliran sungai yang terjadi pada

suatu DAS. Selanjutnya, model dikalibrasi dengan data pengukuran debit pada outlet DAS.

Komponen Neraca air membagi kolom tanah menjadi lapisan-lapisan horizontal. Lapisan tersebut diasumsikan telah mengandung sejumlah lengas tanah (*soil moisture*), biasanya 25 mm ekuivalen-tebal-air pada kapasitas lapang. Evaporasi dari permukaan tanah dimodelkan dan diasumsikan akan mengurangi kadar air di dalam tanah secara eksponensial dari nilai kebutuhan evapotranspirasi potensial. Komponen penuluran aliran (*routing component*) mentransfer aliran-permukaan (*run-Off*) yang dihasilkan oleh komponen neraca air sampai Outlet DAS menggunakan persamaan Gamma dari Nash (1960).

Persamaan tersebut diselesaikan dengan persamaan differensial dalam suatu sistem input dan output tunggal. Selanjutnya, aliran air-bawah-tanah (*groundwater flow*) yang dihasilkan, dipropagasi melalui reservoir-linear tunggal yang selanjutnya memberi kontribusi ke aliran sungai pada outlet DAS. Model SMAR menggunakan (5) parameter untuk Neraca Air dan (4) parameter untuk Penelusuran Aliran. Aliran yang dihasilkan oleh permukaan tanah di dalam DAS (*landscape*) ditransfer ke outlet menggunakan model-reservoir-linear-bertingkat (*linear-cascade-model*) dari Nash (1960).

Penyelesaian umum untuk menyatakan hubungan antara satu satuan volum input dan output dinyatakan dalam **Persamaan (1)**:

$$h(t) = \frac{1}{t} \int_{t-1}^t \frac{1}{K\Gamma(n)} \exp\left(\frac{-\tau}{K}\right) \left(\frac{\tau}{K}\right)^{n-1} d\tau \quad (1)$$

dimana:

t = interval simulasi (d)

d = hari

τ = waktu (s) = detik

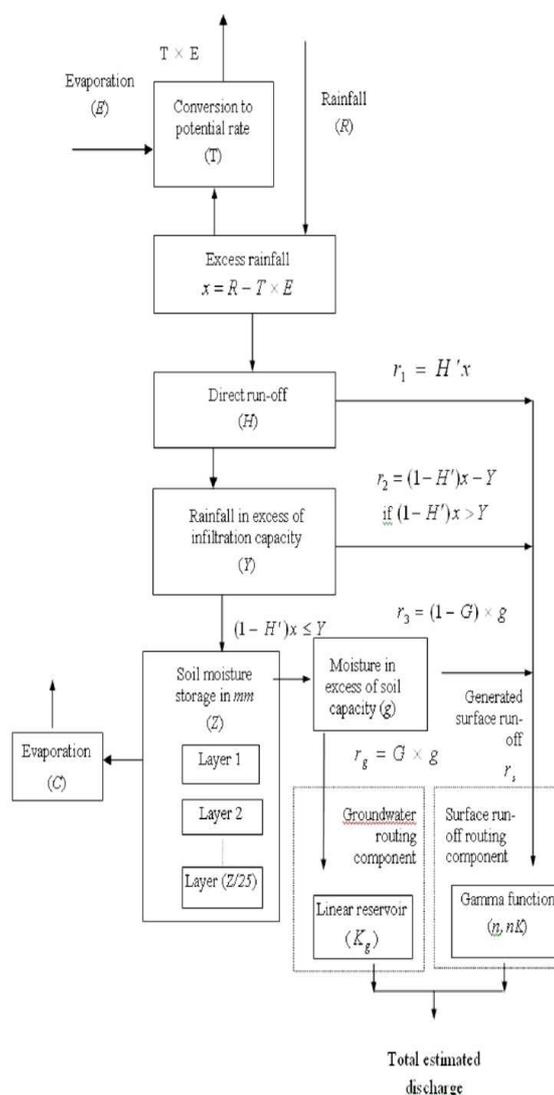
$K_1 = K_2 = \dots = K_n = K$ adalah koefisien penyimpanan dari sejumlah (n) *reservoir-linear* yang disusun secara bertingkat,

h(t) = ordinat dari fungsi respon pada hitungan ke (d^{-1}).

$\Gamma(n) = \int_0^\infty \exp(-\tau) \tau^{n-1} d\tau$ adalah fungsi gamma dari sistem (tidak berdimensi).

1.2 Komponen neraca air

Komponen neraca air menggunakan (5) parameter untuk mendeskripsikan gerakan air masuk dan ke luar pada kolom tanah di bawah kondisi tekanan atmosfer, yaitu: C, Z, H, Y dan T.



Gambar 1. Struktur moder SMAR (Sumber: Podger, 2004)

1. Parameter C (tidak-berdimensi) mengatur penguapan dari lapisan tanah. Evaporasi diasumsikan berubah sebagai fungsi eksponensial dari bentuk C^{-1} , dimana C bernilai antara 0 dan 1 dan (i) = 1,2,3,... menunjukkan urutan lapisan tanah. Oleh karena itu jika diberikan nilai evapotranspirasi potensial, lapisan pertama akan memenuhi kebutuhan ini pada laju potensial, lapisan ke dua pada laju C, lapisan ke tiga dengan laju C^2 , dan seterusnya. Hal ini akan menggambarkan pengurangan kadar lengas tanah secara eksponensial. Laju evapotranspirasi potensial dari lapisan atas pada hakekatnya mewakili evapotranspirasi dari reservoir intersepsi dan lapisan tanah bagian atas, dengan asumsi tidak ada hambatan oleh gaya kapilaritas tanah.
2. Parameter Z (mm), mewakili kapasitas penyimpanan lengas efektif (*effective moisture storage capacity*) dari tanah yang berkontribusi terhadap mekanisme pembentukan aliran. Tiap lapisan mengandung 25mm air pada kapasitas lapang.

3. Parameter H (tidak-berdimensi), digunakan untuk mengestimasi variabel H', bagian dari kelebihan hujan (*rainfall excess*) yang menjadi aliran, karena tanah telah jenuh (aliran ini sering disebut sebagai *Dunne run-off*). H' diperoleh dari nilai H, kelebihan hujan dan kejenuhan tanah. Kejenuhan tanah (*soil saturation*) didefinisikan sebagai perbandingan antara kadar lengas yang tersedia (dalam mm) pada waktu t (days) dan 125 mm. Nilai 125 mm, menggambarkan kadar air maksimum dari ke lima lapisan pertama.
4. Parameter Y (mm.d⁻¹) menggambarkan kapasitas infiltrasi tanah dan digunakan untuk mengestimasi aliran yang dihasilkan karena kapasitas infiltrasi tanah telah terlampaui (*Hortonian run-off*).
5. Parameter T (tidak-berdimensi), digunakan untuk menghitung evaporasi potensial dari panci evaporasi (E). Aliran permukaan dihitung dari kelebihan hujan (*excess rainfall*) sebagai: aliran karena tanah jenuh (*saturation-excess-runoff*) + aliran Horton + proporsi lengas tanah (1-G) yang melebihi kapasitas penyimpanan tanah (misalnya: *through flow*).

1.3 Penelusuran aliran secara lateral

Air tanah dan aliran permukaan yang dihasilkan dari komponen neraca-air, dialirkan untuk simulasi jeda waktu (*lag-time*) sejak kejadian hujan sampai aliran teramati pada outlet DAS. Persamaan yang digunakan untuk memodelkan komponen aliran secara lateral adalah sebagai berikut (Kachroo dan Liang, 1992).

a. Komponen aliran permukaan

Aliran permukaan yang dihasilkan (rs, dalam mm/hari) dan propagasi aliran (Q_T^r, mm/hari) dapat dicari nilai reratanya, menggunakan **Persamaan (2)** dan **(3)**, untuk merepresentasikan nilai harian.

$$r_s(t) = \frac{1}{t} \int_{\tau-t}^t r_s(\tau) d\tau \quad (2)$$

$$Q_T^r(t) = \frac{1}{t} \int_{\tau-t}^t Q_T^r(\tau) d\tau \quad (3)$$

Persamaan linear (4) merupakan persamaan sederhana yang menghu-bungkan antara input sebagai fungsi waktu (aliran yang dihasilkan) dan aliran yang ditranfer (*routed run-off*). Persamaan ini digunakan dalam pemodelan konseptual, sebagai komponen yang merepresentasikan proses penelusuran aliran.

$$Q_T^r(t) = \sum_{j=1}^m h(j) r_s(t-j+1) \quad (4)$$

dimana :

m = pulse response function (*d*).

b. Komponen aliran air-tanah

Persamaan kesetimbangan massa untuk aliran air bawah tanah dapat ditulis (5).

$$Q_T^{rech}(\tau) - Q_T^r = \frac{dS(\tau)}{dt} = DS(\tau) \quad (5)$$

Keterangan:

Q_T^{rech} = air tanah yang terisi ulang (mm/s),

Q_T^r = air tanah yang dilepaskan (mm/s),

τ = waktu (s),

S(τ) = simpanan air tanah,

D = d/dτ = operator diferensial (s⁻¹).

1.4 Aplikasi model

Model SMAR merupakan bagian dari satu paket program aplikasi yang disebut RRL (*rainfall runoff library*). RRL digunakan untuk membandingkan proses hidrologi pada tempat yang berbeda dan juga untuk mempelajari tentang model *hujan - aliran*.

RRL dilengkapi dengan: lima (5) model hujan aliran, delapan (8) metode optimisasi parameter, sepuluh (10) fungsi objektif dan tiga jenis transformasi data untuk proses kalibrasi. Model yang ada di dalam RRL, meliputi: (1) AWBM, (2) Sacramento, (3) SymHyd, (4) SMAR, dan (5) Tank. Delapan (8) metode optimasi yang ada pada RRL, meliputi: (1) *Uniform random sampling*; (2) *Pattern search*; (3) *Multi start pattern search*; (4) *Rosenbrock search*; (5) *Rosenbrock multi-start search*; (6) *Genetic algorithm*; (7) *Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)*; (8) *AWBM custom optimiser*.

Sepuluh (10) fungsi objektif yang dapat digunakan, yaitu: (1) *Nash-Sutcliffe criterion (Coefficient of efficiency)*, (2) *Sum of square errors*, (3) *Root mean square error (RMSE)*, (4) *Root mean square difference about bias*, (5) *Absolute value of bias*, (6) *Sum of square roots*, (7) *Sum of square of the difference of square root*, (8) *Sum of absolute difference of the log*. Ada tiga pilihan untuk kalibrasi berdasarkan dua fungsi objektif : (1) *Runoff difference*, dalam %, (2) *Flow duration curve*, (3) *Base flow method-2 (Boughton, Chapman and Maxwell)*.

Model-model RRL sudah *ditest* pada DAS dengan ukuran dari 10 km² sd 10000 km² (Podger, 2004).

2. Metodologi

2.1 Lokasi penelitian

Penelitian dilakukan di sub-DAS Rawatamtu. Secara administratif sub-DAS Rawatamtu meliputi wilayah Kabupaten Jember (92%) dan Kabupaten Bondowoso (8%) dengan luas sub-DAS sekitar 698 km².

Tabel 3. Karakteristik Sub-DAS

Bentuk DAS	Triangle melebar
Luas (km ²)	698
Range ketinggian (d.p.l) m	(40 - 3218)
Prosentase luas wilayah di atas ketinggian > 1000 m	> 50%
Bifurcation ratio	3,69

2.2 Data masukan

Input data untuk pemodelan berupa: data hujan, dan data debit diperoleh dari Dinas PU Pengairan Provinsi Jawa Timur. Data iklim (yang mencakup: kecepatan angin, kelembaban udara, suhu udara maksimum dan minimum, dan lama penyinaran matahari) diperoleh dari Stasiun Iklim di Kaliwining. Data diperoleh dari PUSLIT Kopi dan Kakao Indonesia, yang berada di Kaliwining – Jember. Data pendukung lain berupa peta

-peta digital dicopy dari database yang ada di laboratorium Teknik pengendalian dan Konservasi Lingkungan (lab TPKL), PS Teknik Pertanian, FTP UNEJ.

2.2.1 Data hujan

Data hujan harian dari tujuh stasiun hujan di wilayah sub-DAS Rawatamtu digunakan sebagai input model. Hujan wilayah dihitung berdasarkan nilai rerata aritmatik hujan-harian. Periode rekaman yang digunakan adalah dari tahun 1991 sampai dengan 2005.

2.2.2 Evapotranspirasi

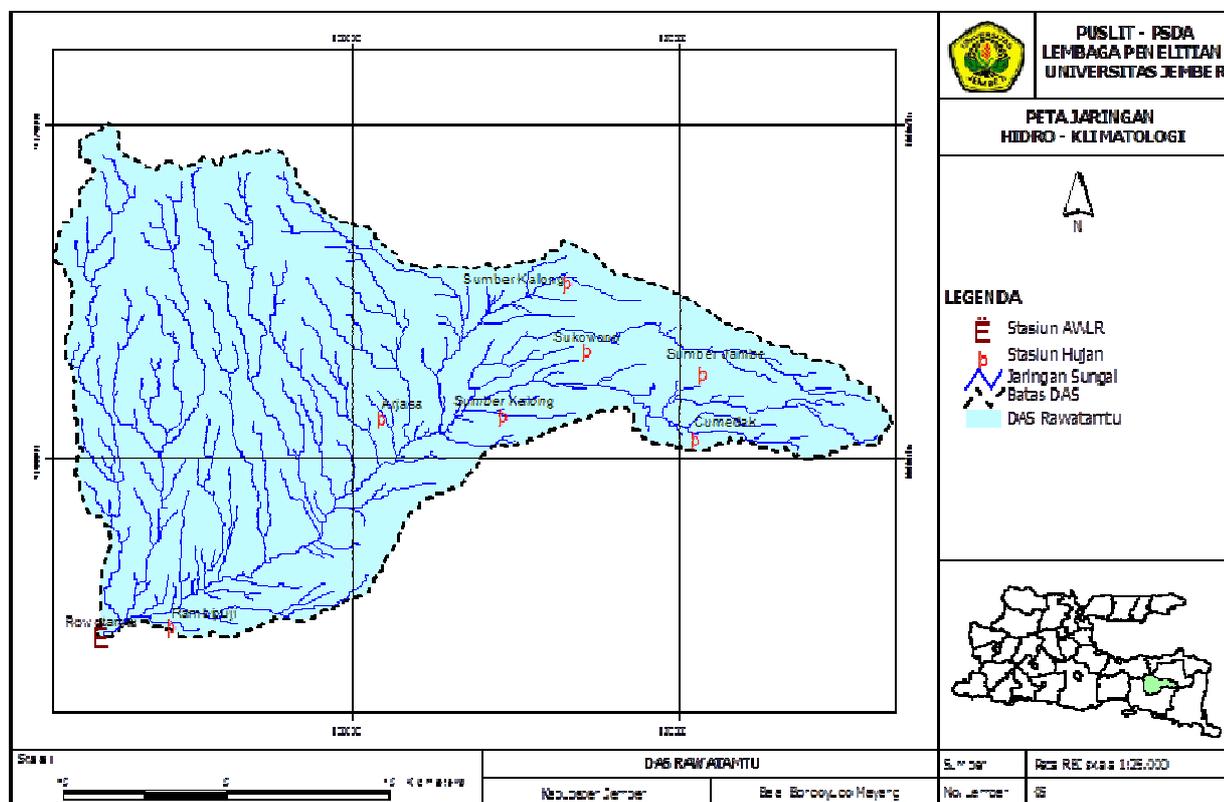
Nilai evapotranspirasi potensial (PET/Eto) dihitung dari data klimatologi yang diambil dari stasiun Kaliwining yang terletak di dalam sub-DAS. Input data berupa: kecepatan angin, lama penyinaran matahari, suhu dan kelembaban udara.

2.2.3 Data debit

Data debit diperoleh dari stasiun AWLR yang terpasang pada outlet ke dua Sub DAS, yaitu: stasiun AWLR di Rawatamtu. Periode rekaman data debit antara: 1991 sd 2005.

2.3 Tahap pemodelan

Tahap penelitian mencakup: (1) visualisasi data, (2) kalibrasi model, dan (3) Validasi model.



Gambar 2. Sub-DAS Rawatamtu

2.3.1 Visualisasi data

Data yang sudah terformat perlu ditampilkan terlebih dahulu untuk mengetahui apakah data sudah dapat diintegrasikan ke dalam model dengan baik. Visualisasi juga membantu kita untuk melihat apakah ada data yang kosong, atau salah penulisan (**Gambar 3**).

2.3.1 Pemilihan periode kalibrasi

Karena keterbatasan keseragaman data, maka untuk keperluan pemodelan digunakan rentang waktu antara 1990 sd 2005. Selanjutnya, dari periode dimana terdapat data rentang-waktu (hujan, debit, evaporasi) dibagi menjadi dua: periode untuk kalibrasi (1991-1995) dan periode untuk validasi, yaitu: (1996-2005).

2.3.2 Prosedur kalibrasi

a. Metode kalibrasi

Metode kalibrasi yang digunakan adalah kombinasi metode generic dan manual. Pada metode generic maka nilai parameter awal ditentukan oleh model. Sedangkan pada metode manual, nilai parameter awal model dapat ditentukan oleh user (pengguna) dengan mengentri suatu nilai ke dalam kolom yang telah disediakan.

b. Metode optimasi parameter

Optimasi nilai parameter dilakukan dengan metode: Genetic Algoritma. Fungsi objektif primer menggunakan *Nash-Sutcliffe-Criterion (coefficient of efficiency)* dan fungsi objektif sekunder menggunakan: *Run off Difference (%)*.

c. Visualisasi hasil

Visualisasi hasil dilakukan dengan membandingkan grafik hasil perhitungan dan pengukuran. Beberapa grafik yang dapat ditampilkan untuk menunjukkan hasil kalibrasi.

2.3.3 Prosedur validasi

Setting nilai parameter yang didapat selama periode kalibrasi, selanjutnya digunakan untuk validasi/verifikasi model pada periode rentang waktu 1996 sd 2005.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Visualisasi data

Setelah diimport ke dalam RRL, *data time-series (Hujan, Eto, dan Debit)* dapat divisualisasikan melalui fasilitas yang ada di RRL (**Gambar 4**). Visualisasi semacam ini diperlukan untuk mengetahui jika ada kesalahan format dalam integrasi data.

3.2 Hasil kalibrasi

Kalibrasi dengan setting parameter tersebut, menghasilkan nilai Coefficient Nash-Sutcliffe = 0,695. **Gambar (5)** memperlihatkan scatter-plot antara debit terhitung vs terukur, dalam (mm/hari). Lingkaran berbentuk elips dengan garis putus-putus menunjukkan lokasi titik-titik yang berkontribusi meningkatkan nilai Coefficient Nash. Semakin banyak titik-titik scatter-plot yang terletak di dalam elips, maka nilai Coefficient-Nash semakin tinggi.

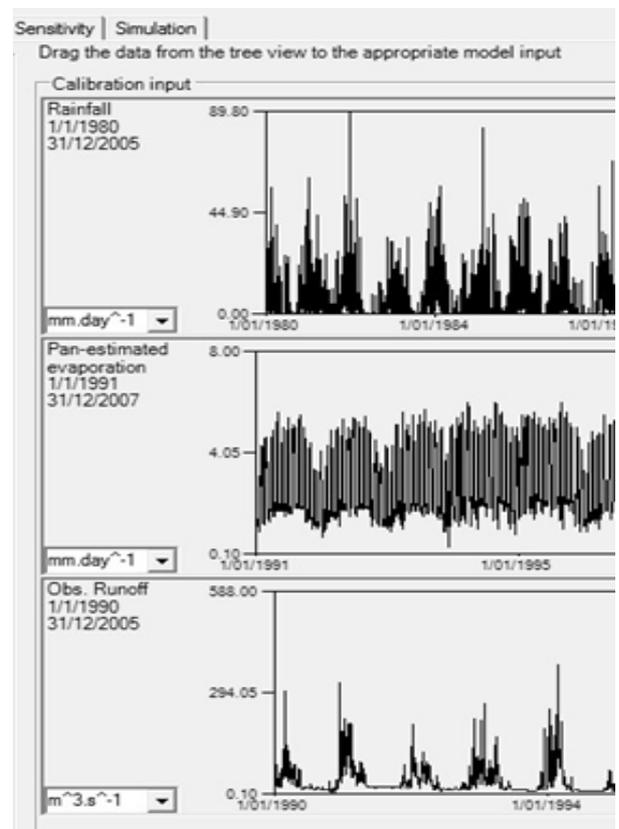
	A	B
1	01/01/90	50.4
2	02/01/90	78.7
3	03/01/90	89.6
4	04/01/90	37.2
5	05/01/90	34.8
6	06/01/90	35.6
7	07/01/90	37.2
8	08/01/90	21.6
9	09/01/90	53.2
10	10/01/90	28
11	11/01/90	17.6
12	12/01/90	14.2
13	13/01/1990	10.8
14	14/01/1990	25.9
15	15/01/1990	25.7
16	16/01/1990	20.1
17	17/01/1990	48.4
18	18/01/1990	41.4

19900101	50.4
19900102	78.7
19900103	89.6
19900104	37.2
19900105	34.8
19900106	35.6
19900107	37.2
19900108	21.6
19900109	53.2
19900110	28
19900111	17.6
19900112	14.2
19900113	10.8
19900114	25.9
19900115	25.7
19900116	20.1

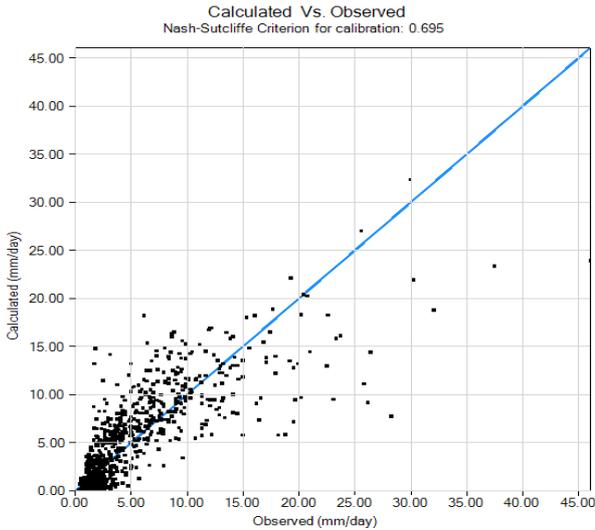
Format Excel

Format (*.prn/*.dat)

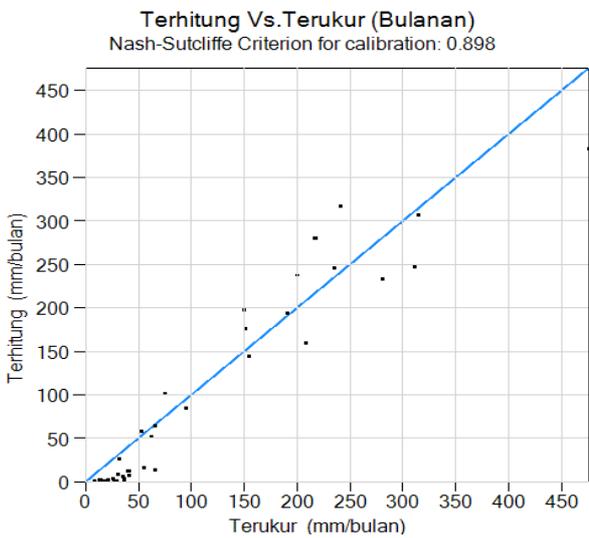
Gambar 3. Format data



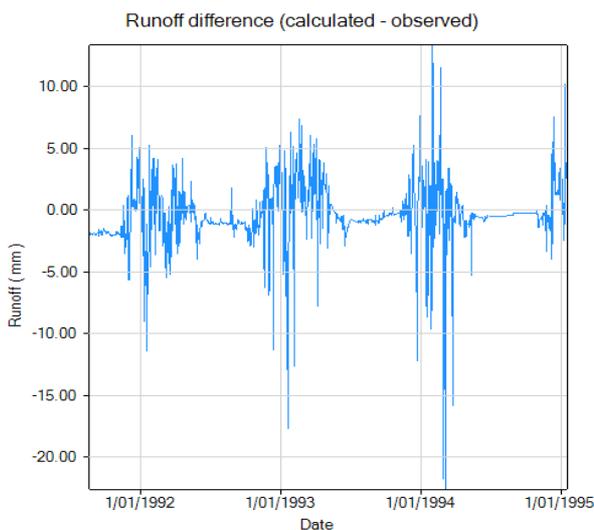
Gambar 4. Visualisasi data di dalam RRL



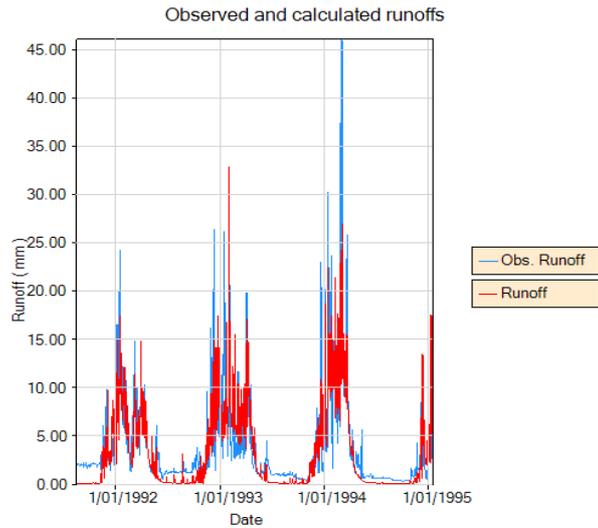
Gambar 5. Run off terukur vs terhitung



Gambar 6. Run off terhitung vs terukur bulanan



Gambar 7. Perbedaan Run-Off terukur vs terhitung



Gambar 8. Hidrograf Run-Off (terhitung) vs terukur (Obs.Runoff)

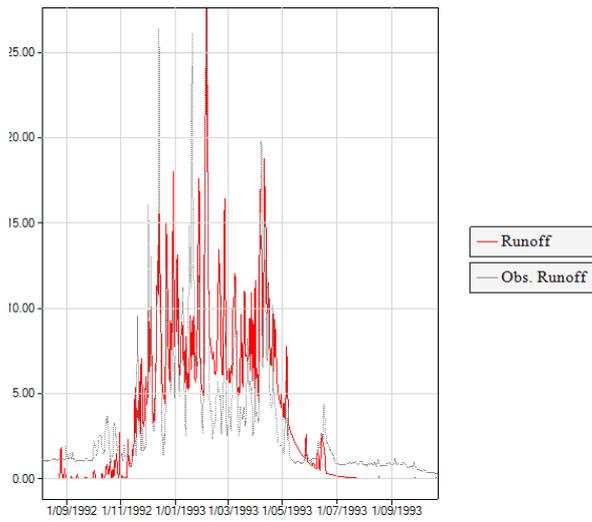
Hasil perbandingan secara grafis untuk periode bulanan (**Gambar 6**) menghasilkan *Coefficient Nash* = (0,89). Terlihat bahwa *scatter-plot* grafik Run off bulanan terkumpul di dalam elips dan dekat dengan garis kemiringan (*slope* = 1).

Hasil kalibrasi dapat juga dilihat dari kriteria fungsi objektif sekunder yaitu nilai perbedaan Run Off (*run off difference*). **Gambar (7)** menampilkan grafik perbedaan RunOff (terhitung – terukur) sepanjang periode kalibrasi. Wilayah di antara garis horizontal (titik-titik putus) menunjukkan perbedaan Run-Off di bawah 10%. Terlihat bahwa sepanjang periode kalibrasi hasil pemodelan menunjukkan perbedaan Run Off di bawah 10%, kecuali pada sebagian periode di tahun 1994. **Gambar (8)** memperlihatkan zoom perbedaan Run-Off terukur dan terhitung untuk periode tahunan (1992 sd 1995). **Gambar (9)** menggambarkan zoom yang sama untuk periode musim penghujan dan **Gambar (10)** memperlihatkan perbedaan Run Off terukur (*Obs. Run Off*) dan terhitung (*Run Off*) untuk periode musim kemarau.

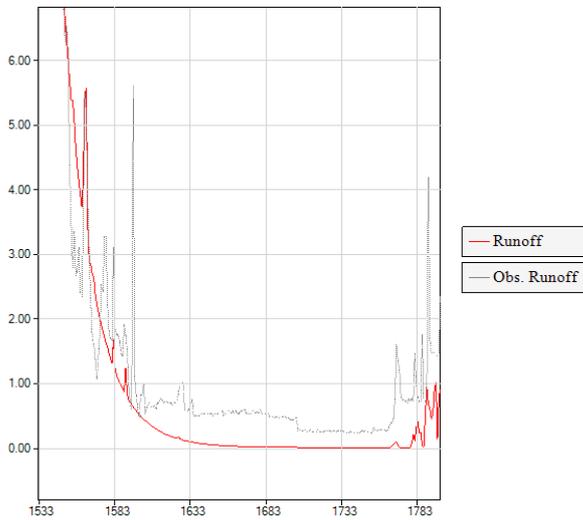
Gambar (11) memperlihatkan komponen Excess Rainfall yang diplotkan terhadap Run Off untuk periode yang sama. **Gambar (12)** menunjukkan perbandingan antara Runoff vs baseflow untuk periode yang sama. Ketepatan hasil kalibrasi juga dapat ditampilkan melalui perbandingan FDC (*Flow Duration Curve*) antara debit terhitung vs terukur (**Gambar 13**).

3.3 Nilai parameter

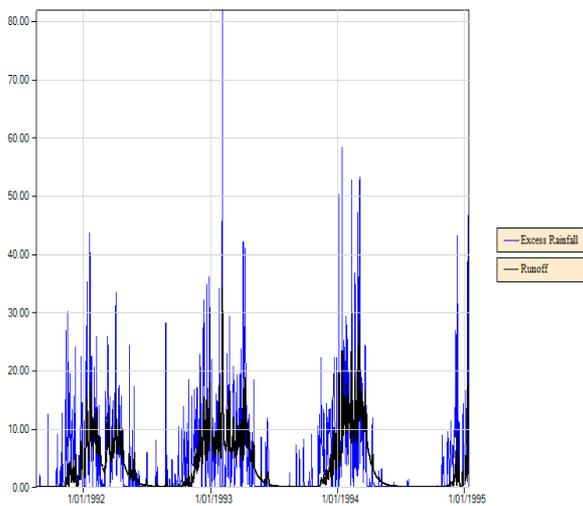
Kalibrasi tersebut di atas, menghasilkan setting nilai parameter, sebagaimana tercantum di dalam **Tabel (5)**. *Warm_Up* periode: 25 Agustus 1991 sd 23 May 1992. Kalibrasi dilakukan dari: 23 may 1992 sd 15 Desember 1995. Kalibrasi menghasilkan koefisien Nash = 0,65.



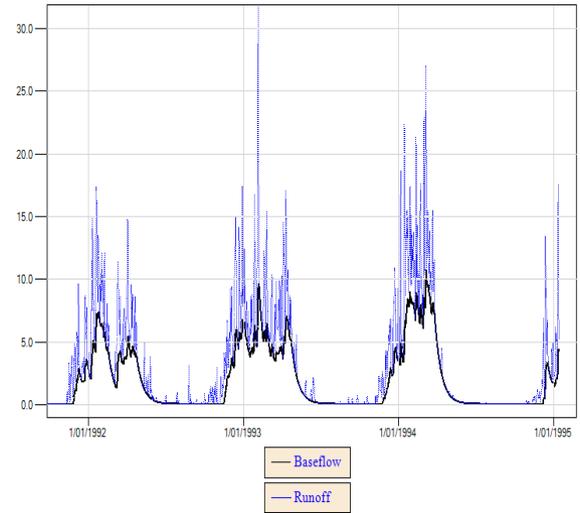
Gambar 9. Hidrograf Run-Off (terhitung) vs terukur
Zoom untuk musim penghujan



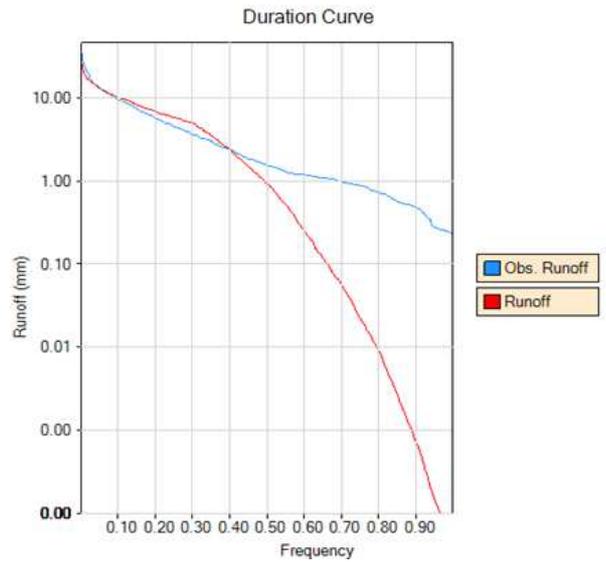
Gambar 10. Hidrograf Run-Off (terhitung) vs terukur (Obs.Run Off)



Gambar 11. Grafik perbandingan antara Excess rainfall vs Run Off



Gambar 12. Grafik Run Off vs Baseflow



Gambar 13. Perbandingan FDC antara debit terhitung vs terukur

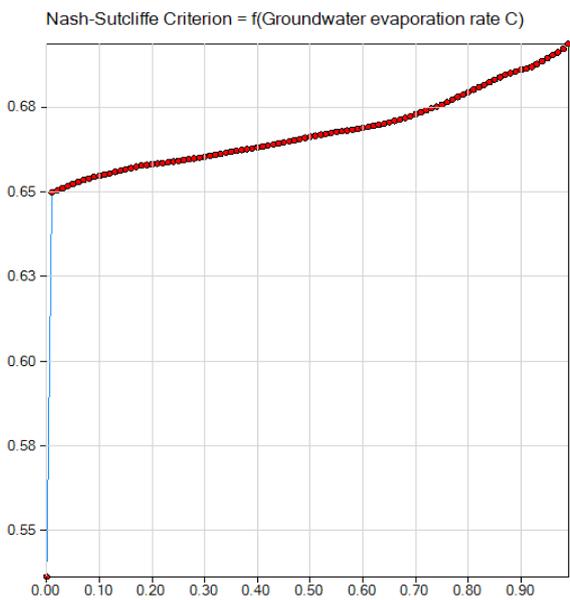
Tabel 5. Parameter hasil kalibrasi

Parameter	Sub-DAS Rawatamtu	Range Parameter
C	0,99	0 sd 1
G	0,91	0 sd 1
H	0,257	0 sd 1
Kg	0,043	0 sd 1
n	1	1 sd 6
Nk	1	0.01 sd 1
T	0,49	0 sd 1
Y	4745	0 sd 5000
Z	627	0 sd 5000

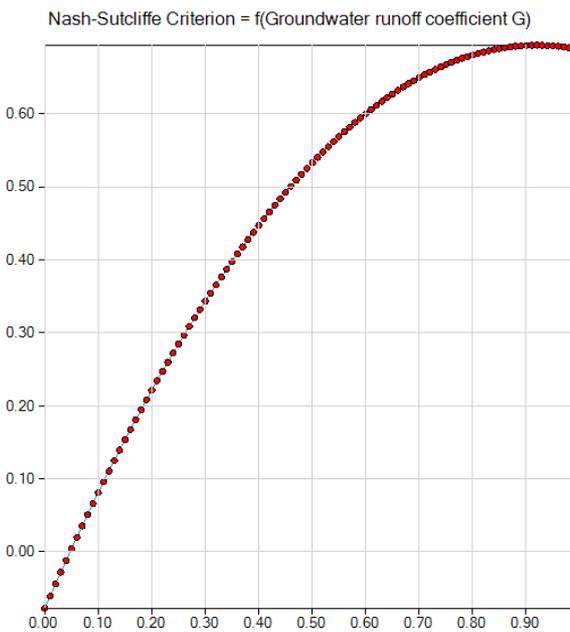
3.4 Analisa sensitivitas

Analisa sensitivitas diperlukan untuk mengetahui pengaruh nilai parameter terhadap fungsi objectif. Analisa dilakukan melalui menu “*Sensitivity*” pada layar RRL. Hasil analisa sensitivitas beberapa nilai parameter terhadap coefficient Nash ditampilkan dalam grafik berikut.

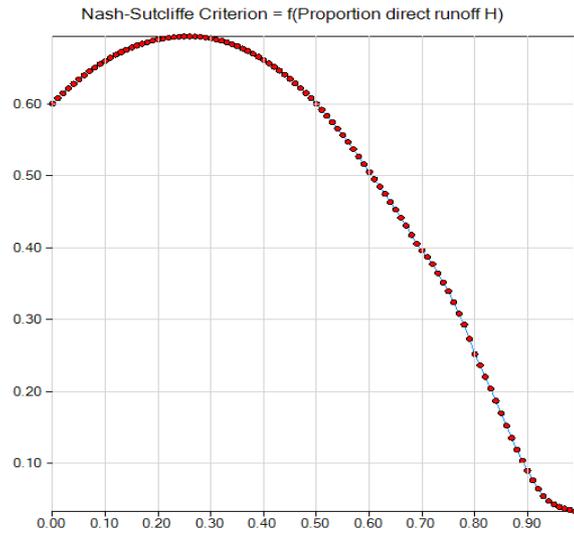
Sebagai contoh, pada **Gambar 14** menunjukkan bahwa nilai range untuk parameter C atau “*Groundwater evaporation rate*” adalah dari 0 sd 1 (**Gambar 19**). Semakin tinggi nilai parameter C akan meningkatkan nilai coefficient Nash. Selanjutnya parameter T atau “*Evaporation Conversion Parameter*” nilai default



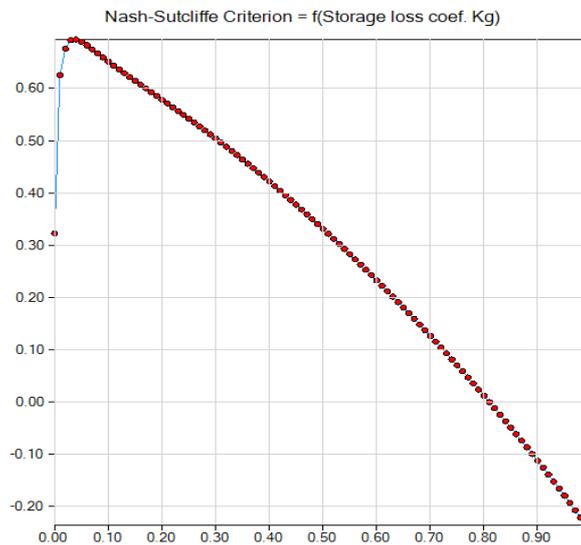
Gambar 14. Sensitivitas parameter C



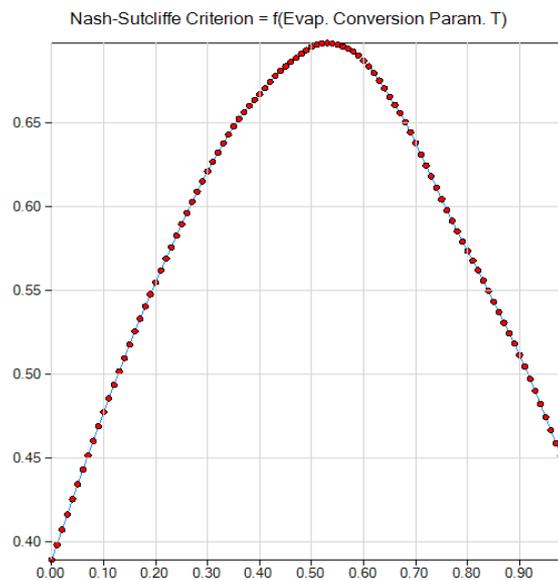
Gambar 15. Sensitivitas parameter H



Gambar 16. Sensitivitas parameter H



Gambar 17. Sensitivitas parameter Kg



Gambar 18. Sensitivitas parameter T

Model details				
Groundwater evaporation rate C	0.99	Min	0	Max 1 <input checked="" type="checkbox"/> Fixed
Groundwater runoff coefficient G	0.91	Min	0	Max 1 <input checked="" type="checkbox"/> Fixed
Proportion direct runoff H	0.257	Min	0	Max 1 <input checked="" type="checkbox"/> Fixed
Storage loss coef. Kg	0.0392	Min	0	Max 1 <input type="checkbox"/> Fixed
U.H. linear routing N	1	Min	1	Max 6 <input type="checkbox"/> Fixed
U.H. linear routing component NK = N x K	1	Min	0.01	Max 1 <input type="checkbox"/> Fixed
Evap. Conversion Param. T	0.49	Min	0	Max 1 <input type="checkbox"/> Fixed
Infiltration Rate Y	2823.5	Min	0	Max 5000 <input type="checkbox"/> Fixed
Soil Moisture total storage depth Z	470.5	Min	0	Max 5000 <input type="checkbox"/> Fixed

Gambar 19. Prosedur kalibrasi manual

parameter adalah dari 0 sd 1, tetapi nilai yang paling optimal memberikan kontribusi pada *Coefficient Nash* adalah sekitar (0,5) sd (0,6). Lain halnya dengan parameter H atau “*proportion of direct runoff*” (Gambar 16) dan parameter Kg atau “*storage loss coefficient*” (Gambar 17), meskipun nilai range parameter antara 0 sd 1, tetapi kedua parameter akan berkontribusi efektif terhadap hasil pemodelan, jika nilai nya kecil atau mendekati NOL.

3.5 Kalibrasi secara manual

Peningkatan hasil kalibrasi dapat dilakukan dengan prosedur kalibrasi manual, dalam hal ini beberapa nilai parameter yang nilai-nya sudah optimal dibuat konstan. Gambar (19) menampilkan contoh setting parameter untuk kalibrasi secara manual pada periode waktu yang sama. Dalam hal ini nilai parameter C, G, dan H dibuat konstan (*fixed*), sementara paramter lain dapat berubah nilai-nya. Kalibrasi manual tersebut menghasilkan nilai setting parameter lain, tercantum dalam Tabel (6).

Proses kalibrasi secara manual tersebut menghasilkan *Coefficient Nash* = 0,695; *Coeff correlation* = 0,844; *relatif difference* = -4,117%, dan *absolute difference* = -185,3.

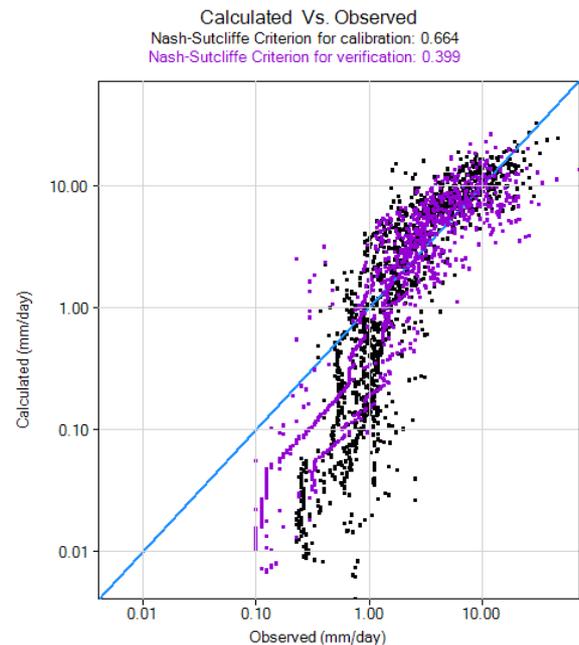
Tabel 6. Parameter hasil kalibrasi manual

Parameter	Sub-DAS Rawatamtu	Range nilai parameter
C	0,99	0 sd 1
G	0,91	0 sd 1
H	0,25	0 sd 1
Kg	0,03	0 sd 1
n	1	1 sd 6
Nk	0,93	0.01 sd 1
T	0,24	0 sd 1
Y	3450,9	0 sd 5000
Z	627,4	0 sd 5000

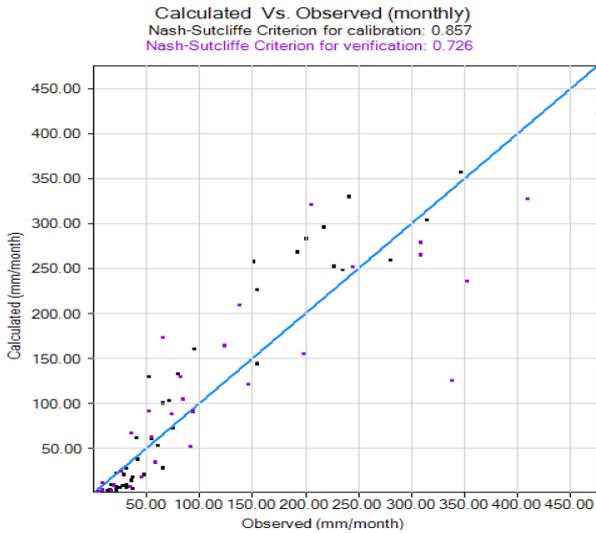
3.6 Hasil validasi

Periode validasi dilakukan antara : 1996 sd 1999 dan menghasilkan *Coefficient Nash* = 0,39 dan korelasi = 0,64. Gambar (20) menampilkan *scatter-plot* antara debit terukur (*observed*) dalam (mm/day) pada sumbu-x dan debit terhitung (*calculated*) dalam (mm/day) pada sumbu-y. Data debit sudah dikonversi secara otomatis oleh model ke dalam satuan (mm/day). Grafik tersebut dihasilkan dari proses kalibrasi (periode: 1991 sd 1995) dan validasi (periode: 1996 sd 1999). Proses kalibrasi dan validasi yang baik akan menghasilkan *coefficient nash* yang mendekati 1, dan titik-titik di dalam Gambar 20 akan terlihat mengumpul di sekitar garis-kemiringan (*slope*) Dapat dikatakan bahwa model cukup dapat menggambarkan proses hidrologi dari hujan menjadi aliran pada skala harian pada DAS tersebut, hal ini terlihat dari banyaknya titik-titik yang terkumpul di sekitar garis-kemiringan pada grafik tersebut. Namun demikian model belum dapat mereproduksi dengan baik semua proses hidrologi pada skala harian sepanjang periode panjang tersebut. Ada banyak faktor yang mempengaruhi: kualitas input data, struktur model, proses kalibrasi dan validasi. Pada kasus ini, data pengambilan air untuk irigasi dan keperluan lain tidak diperhitungkan dalam pemodelan. Data yang ada mungkin juga tidak cukup untuk menggambarkan proses hidrologi yang memang sangat kompleks atau Struktur model mungkin juga kurang pas untuk menggambarkan proses hidrologi di wilayah tropis.

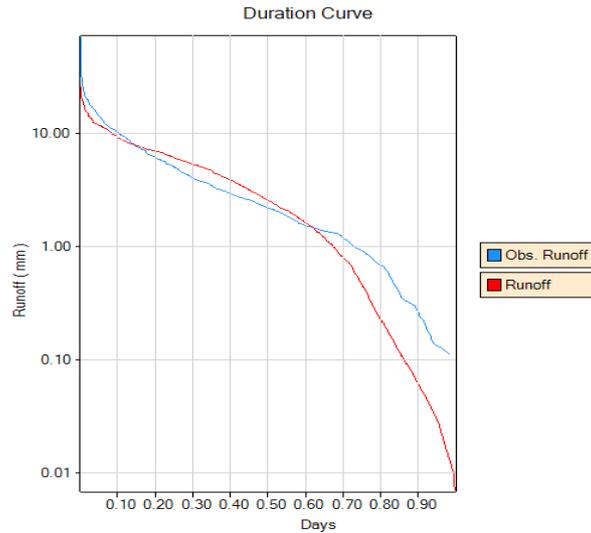
Gambar (21) menampilkan hal yang sama tetapi pada skala bulanan, sehingga debit terhitung (*calculated*) dalam (mm/month) dan debit terukur (*observed*) dalam (mm/month). Terlihat bahwa, koefisien *Nash-Sutcliffe*



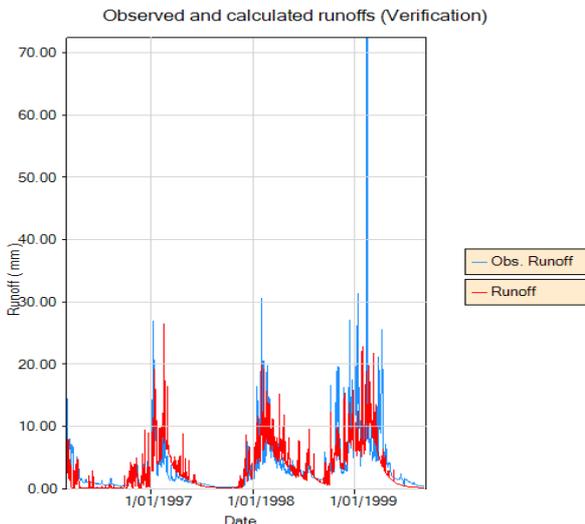
Gambar 20. Perbandingan kalibrasi vs validasi



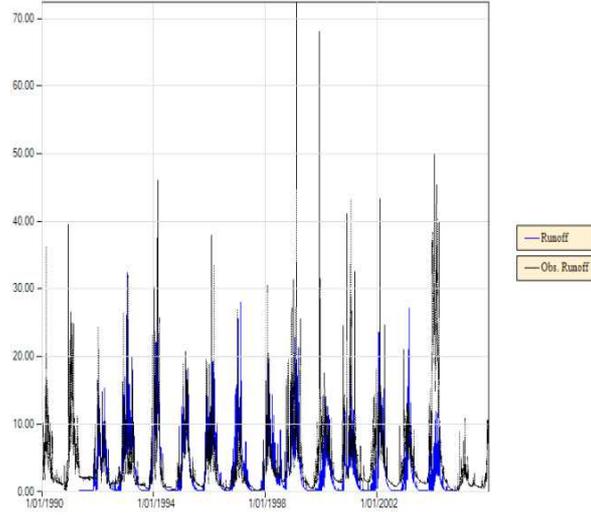
Gambar 21. Run Off terhitung vs terukur bulanan



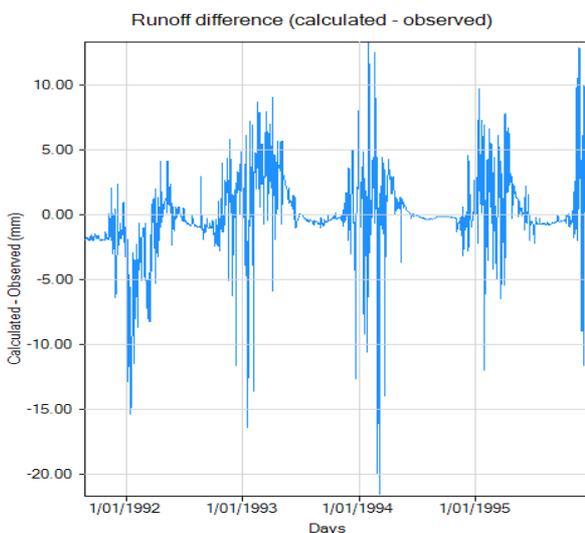
Gambar 24. Flow duration curve (FDC) periode validasi



Gambar 22. Run Off terhitung vs terukur



Gambar 25. Perbandingan Run Off terukur vs terhitung



Gambar 23. Perbedaan Run Off

untuk periode kalibrasi sekitar 0,86 dan untuk periode validasi (verifikasi) sekitar 0,73. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun model tidak dapat menggambarkan proses hidrologi pada skala harian dengan baik, tetapi model cukup memadai untuk memperkirakan proses hidrologi pada skala bulanan. Dalam hal ini, dapat dikatakan bahwa model dapat digunakan untuk mereproduksi dan menghitung debit pada skala bulanan.

Gambar (22) menunjukkan hal ini dimana naik turunnya debit dari musim kemarau ke musim penghujan dapat ditirukan dengan baik oleh model, tetapi kejadian debit besar (banjir) yang sesaat tidak dapat ditirukan oleh model. **Gambar (23)**, menunjukkan tingkat kesalahan model dalam menghitung debit harian, dalam hal ini yang dijadikan ukuran adalah selisih antara *run-off* terhitung dan terukur. Pada beberapa kejadian (misal: Th 1994) selisih dapat mencapai lebih dari 20%. Performan model juga dapat

dipresentasikan melalui grafik FDC. **Gambar 24** mengilustrasikan FDC untuk debit terukur dan terhitung pada periode validasi.

3.7 Simulasi

Simulasi dilakukan untuk periode 1991 sd 2004. Hasil perbandingan antara *Run-Off* terhitung vs terukur sepanjang periode ditunjukkan dalam **Gambar (25)**. Dapat dikatakan bahwa untuk periode panjang dan pada skala bulanan, musiman atau tahunan model dapat digunakan untuk merepresentasikan proses hidrologi di dalam DAS tersebut, tetapi model masih belum cukup mampu untuk mereproduksi kejadian banjir besar yang terjadi di dalam DAS.

4. Kesimpulan

1. Hasil kalibrasi dan validasi menunjukkan bahwa model SMAR pada prinsipnya dapat mereproduksi fluktuasi debit (naik dan turunnya debit) pada Sub-DAS Rawatamtu pada skala bulanan, musiman dan tahunan.
2. Baik proses kalibrasi maupun validasi menghasilkan koefisien Nash-Sutcliffe $> 0,60$ untuk skala bulanan. Namun demikian model masih belum dapat mereproduksi kejadian “banjir besar” yang terjadi di dalam DAS.
3. Penelitian lebih lanjut untuk mengkalibrasi model SMAR dapat dilakukan dengan menambah atau melengkapi data hasil pengukuran.

Daftar Pustaka

- Kachroo R.K., and Liang, 1992, River Flow Forecasting. Part 5. Applications of Conceptual Model. *Journal of Hydrology*. 133, 141 – 178.
- Nash J.E., 1960, A Unit Hydrograph Study with Particular reference to British Catchment, *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, 17, 249 – 282.
- O’Connell, P.E., Nash, J.E and Farrel, J.P., 1970, Riverflow Forecasting through Conceptual Models, part2. The Brosna Catchment at Ferbane. *Journal of Hydrology*. 10 : 317 – 329.
- Podger, Geoff, 2004, *Rainfall Run Off Library Versi 1.05 User Guide*, Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources; CRC for Catchment Hydrology.
- Tuteja, N.K. and O’Connor, C., 1999, *A Quasi Physical Snowmelt Run-off Modelling System for Small Catchment*, Hydrological Processes, 13 (12/13): 1961 – 1975.

