

Validasi Model Hidrologi SWAT di Daerah Tangkapan Air Waduk Mrica

Validation of the SWAT Hydrological Model on the Catchment Area of Mrica Reservoir

Lukman Hidayat¹, Putu Sudira², Sahid Susanto², Rachmad Jayadi³

¹Jurusan Teknologi Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu,
 Jl. WR. Supratman, Kandang Limun Bengkulu 38371, Indonesia

²Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada,
 Jl. Flora No. 1, Bulaksumur, Yogyakarta 5528, Indonesia

³Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada Jl. Grafika No. 2,
 Kampus UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia
 Email: lukman_hidayat@unib.ac.id

Submisi: 2 Juli 2015; Penerimaan: 22 Januari 2016

ABSTRAK

Indeks Penutupan Lahan (IPL) produksi yang telah melebihi 80 % dari total luas kawasan Hulu Daerah Tangkapan Air (DTA) waduk Mrica, mengindikasikan telah terjadinya alih fungsi lahan. Model hidrologi elementer dipandang sebagai alat ekstrapolasi yang dapat membantu untuk memahami kompleksitas pengelolaan kawasan Daerah Aliran Sungai (DAS) di antaranya alih fungsi lahan. *Soil Water Assessment Tool* (SWAT) adalah model hidrologi skala DAS berbasis fisik, deterministik, dan kontinyu yang dikembangkan oleh *USDA (United States of Department of Agriculture) Agricultural Research Service*. Model SWAT dikembangkan dari sejumlah model-model individu dalam periode lebih dari 30 tahun dan telah diaplikasikan pada beragam wilayah dalam rentang waktu yang cukup lebar. Penelitian ini bertujuan untuk mengaplikasikan model SWAT pada kawasan hulu DTA waduk Mrica. Metode yang digunakan yaitu menjalankan prosedur pemodelan SWAT melalui pendekatan sistem yaitu proses *Input Output* (IO). Luaran model berupa debit aliran, yang kemudian divalidasi dengan cara kalibrasi dan verifikasi menggunakan kriteria statistik dan grafis pada skala bulanan. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai $R^2 = 0,61$, $NSE = 0,61$, $PBIAS = -0,61\%$ dan $MB = -0,25$ untuk kalibrasi, dan $R^2 = 0,74$, $NSE = 0,73$, $PBIAS = -4,6\%$ dan $MB = -1,57$ untuk verifikasi. Nilai uji statistik tersebut menunjukkan bahwa model SWAT mempunyai tingkat presisi dan akurasi yang baik dalam pemodelan DAS. Nilai $NSE > 0,65$ mengindikasikan bahwa model SWAT yang diaplikasikan mempunyai tingkat akurasi mencapai derajat sangat baik. Tantangan yang dihadapi dalam pemodelan DAS ini yaitu ketersediaan dan kecukupan data, optimasi parameter, waktu dan sumberdaya komputer.

Kata kunci: Model hidrologi SWAT; proses *input-output*; DTA waduk Mrica; validasi

ABSTRACT

Land cover index production which has exceeded 80 % of the total area of the upstream catchment area of Mrica reservoirs, indicating the occurrence of land conversion. Elementary hydrological model is seen as an extrapolation tool that can help to understand the complexity of watershed management including land conversion. *Soil Water Assessment Tool* (SWAT) is a physically based, deterministic, continuous, watershed-scale hydrologic models was developed by the *USDA Agricultural Research Service*. SWAT was developed from numerous individual models within a period more than 30 years and has been applied on diverse area in a wide range. This study aims to apply the SWAT on the upstream region of Mrica reservoirs. The method used is running the SWAT modeling procedure through a systems approach that input output processes (IO). Output models in the form of flow rate, validated by means of calibration and

verification using statistical and graphical criteria on monthly scale. The results indicating that the value of $R^2 = 0.61$, $NSE = 0.61$, $PBIAS = -0.61\%$ and $MB = -0.25$ for calibration, and $R^2 = 0.74$, $NSE = 0.73$, $PBIAS = -4.06\%$ and $MB = -1.57R^2$ for verification. The value of the statistical test, showed that the model SWAT has good degree of precision and accuracy in watershed modelling. NSE values > 0.65 indicate that the SWAT model is applied has an accuracy of very good degree. Challenges faced in this watershed modelling is the availability and adequacy of data, parameter optimization, time and computer resources.

Keywords: Hydrological model SWAT; input-output process; Mrica reservoirs; validation

PENDAHULUAN

Upaya pemerintah Indonesia untuk menekan laju degradasi Daerah Aliran Sungai (DAS) karena alih fungsi kawasan hutan/konservasi menjadi area aktivitas usaha tani, khususnya di Jawa terus dilaksanakan. Sejak tahun 1970-an pemerintah Indonesia telah mengimplementasikan beberapa program rehabilitasi yang berhubungan dengan pengelolaan DAS/sumberdaya air, seperti reboisasi-penghijauan, tindakan-tindakan konservasi tanah, dan lainnya.

Alih fungsi lahan dari hutan menjadi lahan budidaya tanaman sayuran yang belum sepenuhnya mengikuti kaidah konservasi, semakin menambah laju sedimentasi yang masuk ke waduk Mrica. Total luas kawasan hulu Daerah Tangkapan Air (DTA) Mrica mencapai 101.027,25 Ha atau sekitar 1.010 km². Indek Penutupan Lahan (IPL) produksi telah melebihi 80 % dari total luas kawasan DAS. Pada sisi lain, IPL permanen yang tersisa sekitar 20 %, yang terdiri dari kawasan hutan, semak belukar, rawa, padang rumput, tubuh air, gedung dan pemukiman. Waduk Mrica dioperasikan sejak tahun 1989, laju sedimentasi mencapai 4,20 juta m³ per tahun dan diperkirakan akan penuh sedimen pada tahun 2021 (Mulyana dkk., 2011). Suatu keadaan yang jauh dari umur pakai waduk yang dirancang selama 60 tahun.

Fenomena perubahan dan alih fungsi lahan dan dampak yang ditimbulkan merupakan kejadian di alam yang perlu dipahami untuk menentukan tindakan yang perlu dilakukan di waktu yang akan datang. Kompleksitas kawasan DAS masih membutuhkan suatu inovasi pendekatan hidrologi untuk memperbaiki situasi, terutama untuk melestarikan sumberdaya air (Susanto dan Kaida, 1991). Model hidrologi elementer yang tersusun atas elemen hidrologi dasar seperti hujan, penguapan, resapan, simpanan, dan aliran dipandang sebagai alat ekstrapolasi yang dapat membantu memahami fenomena tersebut

Soil Water Assessment Tool (SWAT) adalah model hidrologi skala DAS berbasis fisik, deterministik, dan kontinyu, yang dikembangkan oleh USDA *Agricultural Research Service* (Arnold dkk., 1998; Neitsch dkk., 2004). Model SWAT dikembangkan dari sejumlah model-model individu dalam periode lebih dari 30 tahun dan telah diaplikasikan dan diuji pada beragam wilayah, karakter-

kondisi, skala waktu, praktek pengelolaan lahan dalam rentang waktu yang cukup lebar (Suryani dan Agus, 2005; Omani dkk., 2007; Ndomba dan Biharman, 2008; AAAE, 2009; Douglas-Mankin dkk., 2010; Mechram, 2010; Bakhtiar dkk., 2010; Xie dan Cui, 2011). SWAT menggunakan data iklim dan data spasial terdistribusi pada topografi, tanah, tutupan lahan, pengelolaan lahan, untuk menduga hasil air, sedimen terangkut, limbah pestisida dan lainnya. DAS yang dimodelkan dibagi secara spasial menjadi sub DAS-sub DAS menggunakan *Digital Elevation Model* (DEM). Lebih jauh, dibagi lagi menjadi *Hydrologic Response Units* (HRU's) yang terbentuk dari kombinasi tataguna lahan, jenis tanah dan kelerengan dalam seluruh sub DAS (Douglas-Mankin dkk., 2010).

Dalam operasionalnya, model SWAT dapat melakukan beberapa simulasi di antaranya praktek-praktek pengelolaan di lahan dan di saluran sungai. Beberapa simulasi antara lain perubahan tataguna lahan, praktek konservasi tanah dan air, dan keberadaan *pound* (bangunan pengendali sedimen terangkut) (Neitsch dkk., 2005; Williams dkk., 2008; Arnold dkk., 2010; Gassman dkk., 2007).

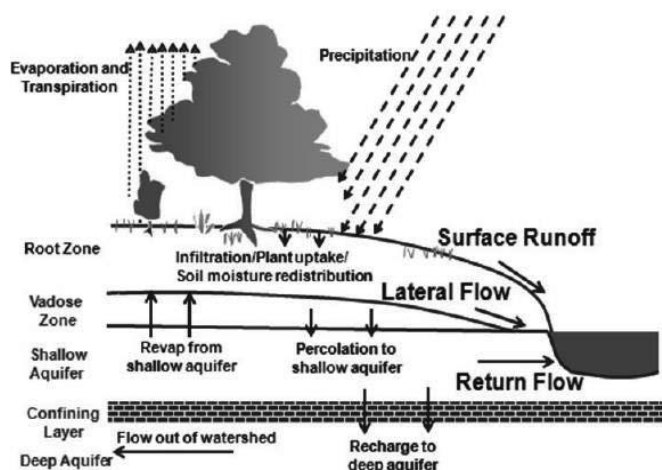
Siklus hidrologi, proses yang diperhitungkan dalam model SWAT yang terjadi di dalam DAS didasarkan kepada neraca air (Gambar 1). Persamaan matematis, komponen hidrologi neraca air yang berlaku pada model SWAT yaitu:

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{sep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

SW_t = kandungan lengas tanah pada akhir waktu t (mm)
 SW_0 = kandungan lengas tanah pada awal waktu i (mm)
 R_{day} = presipitasi/hujan harian pada waktu/hari i (mm)
 Q_{surf} = jumlah limpasan permukaan pada waktu/hari i, (mm)
 E_a = jumlah evapotranspirasi pada waktu/hari i (mm)
 W_{sep} = Jumlah air yang memasuki zona vadose pada profil tanah (perkolasi) pada Waktu/hari i (mm)
 Q_{gw} = Jumlah air, aliran balik/kembali (mm)
 i dan t = i = 1, t = menunjukkan waktu (hari)

Luaran utama model SWAT adalah kondisi hidrologi berupa nilai debit, erosi, dan sedimen terangkut. Nilai-nilai tersebut mencerminkan kondisi hidrologi terkait kinerja DAS seperti Koefisien Regim Sungai (KRS), *Sediment Delivery Ratio* (SDR), dan nilai *coefficient runoff* (C).

(4)



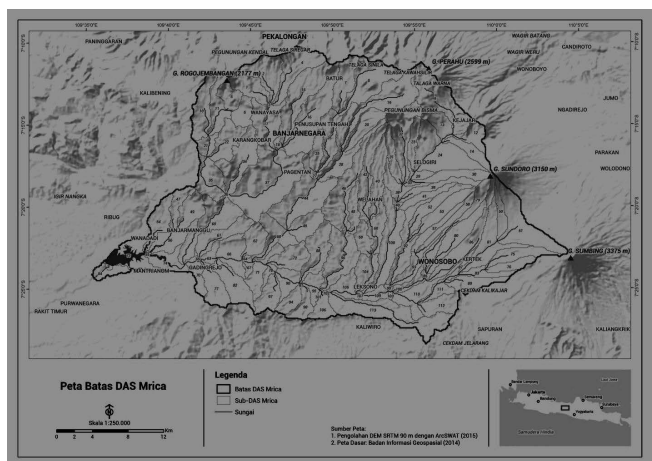
Gambar 1. Gambaran siklus hidrologi dalam model SWAT (Neitsch dkk., 2005)

Kinerja model diukur dengan cara validasi, yaitu kalibrasi dan verifikasi menggunakan kriteria statistik R^2 (*Coefficient of Determination*), E_f atau NSE (*Nash-Sutcliffe model Efficiency*) dan PBIAS (*percent bias*).

Tujuan penelitian ini yaitu melakukan validasi model SWAT dengan cara kalibrasi dan verifikasi model di kawasan hulu DTA waduk Mrica. Hasil penelitian diharapkan dapat menginformasikan karakter model SWAT. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan dan aplikasi model hidrologi spesifik untuk kawasan DAS yang karakternya menyerupai kawasan atau DTA hulu waduk Mrica.

METODE PENELITIAN

Pemodelan DAS menggunakan SWAT sebagai landasan metode penelitian ini. Pemodelan dilakukan dengan cara *running model* pada DTA kawasan hulu waduk Mrica



Gambar 2. Daerah Tangkapan Air (DTA) hulu waduk Mrica

meliputi area seluas 101.027,25 Ha sampai dengan waduk PB. Sudirman “Mrica”. Secara administratif mencakup beberapa kabupaten di Propinsi Jawa Tengah Kabupaten Wonosobo dan Banjarnegara cakupannya (6) meluas pada DTA waduk Mrica. Lokasinya terletak pada 7° LS dan 110° BT dan berada dalam satu sistem wilayah sungai Serayu-Bogowonto (Gambar 2).

Model diuji-validasi dengan cara kalibrasi dan verifikasi *output* di Stasiun Pengamatan Aliran Sungai (SPAS) yang berada dalam DTA kawasan hulu waduk Mrica. Input (masukan) untuk *weather generator* menggunakan data hujan dan iklim dari 6 stasiun hujan dan 2 stasiun iklim yang tersebar di kawasan hulu DTA Waduk Mrica.

Alat penelitian yang digunakan meliputi peralatan perangkat keras (komputer dan perlengkapannya), perangkat lunak (*software Arc SWAT 2005/2009 free licence*). Bahan penelitian mencakup data spasial (DEM, peta tataguna lahan, peta tanah, dan peta kelerengan). Bahan tersebut diperoleh dari berbagai sumber seperti: kerjasama Kementerian PU dan FTP-UGM (2010), peta RBI skala 1:25.000 (2000), dan Citra Radar SRTM 90 m (2012). Bahan yang lain yaitu data hujan dan iklim dalam periode rentang waktu 2004-2013 dan debit aliran sungai. Data tersebut diperoleh dari PT. Indo Power/ pengelola Waduk PB. Sudirman/Mrica dan BPSDA Serayu-Citanduy, Purwokerto-Jateng)

Tahap aplikasi pemodelan dilakukan sebagai berikut:

1. Persiapan, pada tahap ini semua alat dan bahan penelitian telah tersedia dan cukup untuk menjalankan pemodelan DAS. Data iklim dan data hujan disiapkan dalam database, mengikuti format yang telah diatur, sebagai masukan model.
2. Proses *input output*, menjalankan (*running*) model SWAT
 - a. *Watershed deliniation*, proses ini membentuk batasan atau mendefinisikan DAS yang dimodelkan. Prosesnya meliputi *set up DEM*, *stream* dan *watershed definition*
 - b. *HRU analysis*, aktivitas proses yang melakukan tumpang susun peta tataguna lahan, tanah dan kelerengan untuk membentuk atau mendefinisikan *Hydrologic Respon Units (HRU's)* dalam kawasan DAS yang dimodelkan.
 - c. *Write input tables*, proses ini berisi kegiatan pengisian nilai *input* masukan model diantaranya *weather definition*. Kegiatan ini sangat bermakna untuk kegiatan berikutnya. Jika prosesnya sukses, berjalan dengan baik, maka akan berlanjut ke tahap berikutnya.
 - d. *SWAT Simulation*, pada proses inilah *running model* dijalankan sehingga akan dapat dilihat

luaran pemodelan pada kawasan hulu DTA waduk Mrica.

3. Validasi, adalah proses dalam model yang bertujuan untuk menguji tingkat keberlakuan model terhadap luarannya atau disebut validasi *output*. Validasi dilakukan dengan cara kalibrasi dan verifikasi terhadap debit (m³/dtk) sebagai luaran model.

Validasi *output* melalui kalibrasi dan verifikasi merupakan proses iteratif dalam memperoleh nilai parameter model optimal, sehingga beberapa variabel pengendali model yang telah diverifikasi menghasilkan luaran berdasarkan kriteria yang ditetapkan. Proses tersebut bertujuan untuk menentukan tingkat presisi (ketelitian) dan akurasi (ketepatan) model dalam memprediksi luaran proses yang dijalankan terhadap luaran yang diamati menggunakan kriteria statistik dan grafis.

Kriteria statistik, yang digunakan, yaitu:

- a. R² (*coefficient of determination*), merupakan proporsi dari total varian dalam data yang diamati yang dapat dijelaskan oleh model. Nilainya berkisar antara 0,0 - 1,0. Nilai yang lebih tinggi bermakna model berkinerja lebih baik.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})(f_t - \bar{f})}{\left[\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{t=1}^T (f_t - \bar{f})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (2)$$

- b. NSE (*Nash-Sutcliffe Efficiency*), menunjukkan seberapa baik plot dari nilai observasi (terukur) dibandingkan dengan nilai prediksi-simulasi sesuai dengan garis 1:1, nilainya berkisar dari ∞ - ke 1. Semakin besar nilai NSE, bermakna kinerja model lebih baik.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (y_t - f_t)^2}{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2} \quad (3)$$

- c. PBIAS (*Percent Bias*), mengukur kecenderungan rata-rata dari data simulasi, apakah lebih besar atau lebih kecil terhadap pasangan data yang diamati. Nilai PBIAS yang kecil bermakna model berkinerja baik. Nilai positif menunjukkan bias yang terlalu rendah, sementara nilai negatif biasnya terlalu tinggi.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (y_t - f_t)^2}{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2} \quad (4)$$

- d. MB (*Mass Balance*), sangat membantu untuk memeriksa-menguji antara luaran hasil prediksi dan observasi berada dalamimbangan massa. Nilainya dapat positif atau negatif dan posisi seimbang nilainya mendekati 0.00.

$$MBIAS = \frac{\sum_{t=1}^T f_t - \sum_{t=1}^T y_t}{T} \quad (5)$$

y_t = observed-aktual data ke t

f_t = simulated-prediksi data ke t

\bar{y} = rata-rata observed-aktual data

\bar{f} = rata-rata simulated-prediksi data

t = 1, 2, ... T (jumlah data, 1 tahun= 365-366 hari)

Kriteria grafis, disajikan dalam bentuk gambar grafik seri waktu dan diagram pencar debit terukur (observasi) dan prediksi (luaran model). Proses kalibrasi dan verifikasi dilakukan untuk kurun waktu tahun 2004-2005 dan 2006-2007.

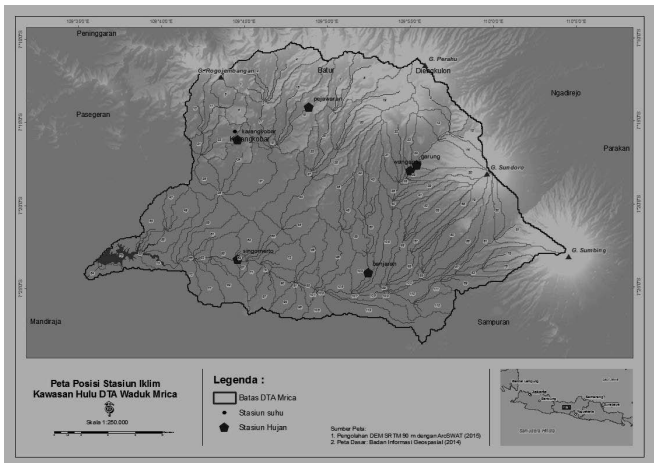
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, penggunaan model SWAT di DTA waduk Mrica difokuskan pada kegiatan validasi *output* berdasarkan karakter *input*-masukan *existing* (tataguna lahan, tanah, kelerengan, iklim dan curah hujan).

Tutupan-tataguna lahan di kawasan hulu DTA Waduk Mrica didominasi oleh IPL Produksi (kebun, tegalan/ladang dan sawah) yang telah mencapai 80 % lebih dari luas total kawasan. Sisanya berupa hutan, semak belukar, rawa, padang rumput, tubuh, gedung dan pemukiman. Hasil analisis HRU menunjukkan bahwa jenis tanah latosol mempunyai cakupan grumusol (6,14 %), regosol (3,33 %), dan tanah aluvial 1,98 %. Kelerengan kawasan ini bervariasi, kurang dari 8 % mencapai 20,10 %, 8 - 15 % mencapai 29,50 %, kelerengan 15% - 25 % mencapai 28,97 %, sementara 25 - 40 % mencapai 15,30 % dan sisanya 6,13 % kelerengannya ≥ 40 %.

Dalam kawasan tersebut tersebar beberapa stasiun pengamatan hujan dan klimatologi. Sejumlah 6 stasiun hujan dan 2 stasiun klimatologi digunakan sebagai *input*-masukan untuk *weather generator* model SWAT. Temperatur udara rata rata mencapai 14 °C - 26 °C dengan ketinggian tempat + 1.000 dpl, sementara curah hujan rata-rata 2.500-5.000 mm/tahun. Curah hujan dominan berkisar antara 3.500-4.000 mm/tahun.

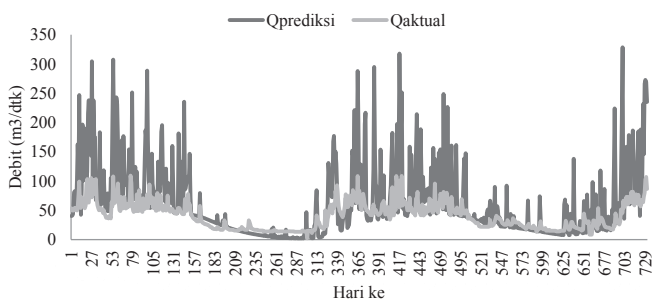
Pemodelan DAS dijalankan pada skala waktu harian dan bulanan, selama periode tahun 2004-2007 berdasarkan ketersediaan data pada 6 stasiun pengamatan hujan dan klimatologi yang tersebar dalam kawasan hulu DTA waduk Mrica. Kalibrasi dilakukan pada skala rerata bulanan dalam periode waktu tahun 2004-2005, sementara verifikasinya dilakukan pada kurun waktu tahun 2006-2007. Optimal parameter, verifikasi variabel pengendali model dilakukan secara manual "*trial and error*". Berdasarkan ketersediaan data dan titik SPAS dalam kawasan penelitian, kalibrasi dan verifikasi dilakukan pada SPAS Singomerto 7,38820 LS -



Gambar 3. Posisi stasiun iklim (suhu dan hujan) kawasan hulu DTA waduk Mrica

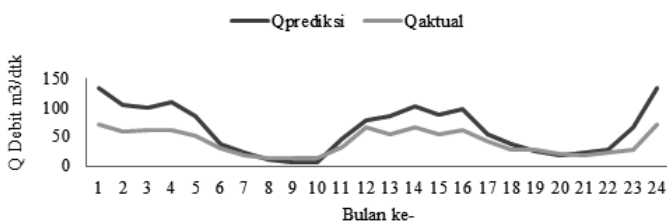
109, 742 BT, subdas 67 dengan luas area tangkapan yaitu: 665 km² (Gambar 3).

Proses verifikasi variabel pengendali model, dimulai dengan kegiatan optimalisasi menggunakan parameter awal. Luaran yang dihasilkan (skala harian dan bulanan) pada periode 2004-2005, disajikan pada Gambar 4 dan 5. Hasil validasi *output*-luaran pemodelan kawasan hulu DTA waduk Mrica, secara statistik maupun grafis disajikan dalam Gambar 6 dan 7.



R² = 0,517724, NSE = -4,31297, PBIAS = 53,9289, MB = 22,06357

Gambar 4. Grafik seri waktu kalibrasi Qprediksi vs Qaktual (Harian 2004-2005)



R² = 0,932018, NSE = -1,48876, PBIAS = 54,80396, MB = 22,3

Gambar 5. Grafik seri waktu kalibrasi Qprediksi vs Qaktual (bulanan 2004-2005)

Debit aliran air (Q) skala harian dan bulanan pada Gambar 4 dan 5 yang ditampilkan dalam bentuk grafik seri waktu dan ukuran statistiknya menunjukkan bahwa Q prediksi cenderung lebih tinggi dari Q aktual, kecuali pada aliran rendah cenderung sama. Sementara itu, parameter model SWAT dalam pemodelan DAS yang digunakan masih perlu dioptimasi dengan cara merubah, menaikkan atau menurunkan nilainya karena ukuran statistik yang ditampilkan terutama nilai NSE masih belum mencapai derajat *satisfactory*. Namun demikian debit aliran air yang ditampilkan tersebut, dengan ukuran statistik R² > 0,50 pada skala harian dan mencapai > 0,90 pada skala bulanan, mengindikasikan bahwa proses pemodelan berjalan dengan baik.

SWAT model mempunyai tidak kurang dari 25 parameter (Douglas-Mankin dkk., 2010). Parameter model yang dilakukan penyesuaian jumlahnya 7 dari parameter model yang ada. Parameter model yang dimaksud, disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Beberapa parameter model hidrologi SWAT yang dilakukan penyesuaian dalam proses validasi *output*

No.	Uraian	Parameter model	Nilai parameter
1	Bilangan kurva larian	CN2	53
2	Kapasitas air tanah tersedia	SOL_AWC	0,75
3	<i>Lateral flow travel time (days)</i>	Lat	180
4	Kompensasi evaporasi tanah	ESCO	0,05
5	Koefisien resap air tanah	GW_REVAP	0,15
6	Kedalaman air pada <i>shallow aquifer</i> yang mengakibatkan terjadinya evaporasi (mm)	REVAPMN	250 mm
7	Kedalaman air pada <i>shallow aquifer</i> yang mengakibatkan terjadinya aliran dasar (mm)	GWQMN	5 mm

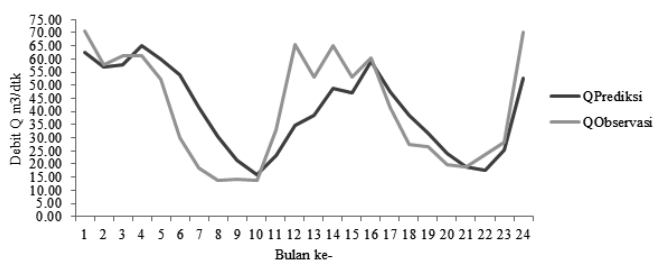
Sumber: Luaran validasi-optimasi parameter model (2014)

Gambar 4 dan 5, parameter yang disesuaikan yaitu bilangan kurva larian (CN2), dengan kisaran perubahan dari awal 48-92 menjadi 46-64. Kemudian, parameter tersebut disesuaikan kembali bersama parameter kapasitas air tanah tersedia (SOL_AWC), sehingga CN2 berada pada kisaran 35-53, sementara SOL_AWC dari awal 0,95 menjadi 0,30-0,75. Luaran model dari penyesuaian ini disajikan pada Gambar 4 dan 5. Selanjutnya parameter yang dihasilkan sebelumnya bersama dengan parameter *Lateral Flow Travel Time* (Lat) pada kisaran nilai 120-180 dan faktor kompensasi evaporasi tanah (ESCO) pada kisaran 0-1. Selanjutnya parameter model tersebut dilakukan penyesuaian kembali. Penyesuaian untuk optimasi parameter dilakukan secara bertahap menggunakan cara *trial and error*. Optimasi parameter berikutnya difokuskan pada parameter-parameter yang mengendalikan

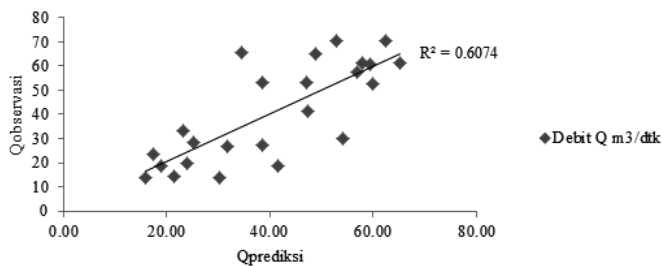
unit lahan, di antaranya parameter koefisien resap air tanah (GW_REVAP), kedalaman air pada *shallow aquifer* yang mengakibatkan terjadinya evaporasi (REVAPMN) dan kedalaman air pada *shallow aquifer* yang mengakibatkan terjadinya aliran dasar (GWQMN). Nilai GWQMN berkisar antara 0-500, GW_REVAP 0,02-0,2 dan REVAPMN 0-350. Optimasi parameter dihentikan jika telah memenuhi kriteria kinerja yang telah ditetapkan.

Rossi dkk. (2009) menyampaikan kisaran nilai NSE yang dapat digunakan sebagai acuan untuk menilai kinerja model SWAT dalam kegiatan kalibrasi dan verifikasi, Nilai NSE > 0,65 sebutannya *Very Good*, NSE 0,54 – 0,65 sebutannya *Adequate* dan NSE ≥ 0,50 sebutannya *Satisfactory*. Disamping nilai NSE, nilai R², PBIAS, dan RSR juga digunakan sebagai kriteria secara statistik dalam mengevaluasi kinerja atau tingkat akurasi kegiatan simulasi pemodelan DAS. Jika nilai NSE > 0,5, RSR ≤ 0,7 dan PBIAS ± 25 %, model berkinerja dengan sebutan *Satisfactory* dalam skala bulanan/erata bulanan (Somura dkk., 2009).

Luaran hasil kalibrasi dengan cara optimasi parameter menemukan bahwa hasil kalibrasi pada skala bulanan tahun 2004-2005 mempunyai derajat *Adequate* berdasarkan nilai NSE. Secara umum berdasarkan ukuran statistik model berkinerja *Satisfactory*. Capaian tersebut secara grafik seri waktu dan ukuran statistiknya, disajikan pada Gambar 6 dan 7.



Gambar 6. Grafik *time series* kalibrasi Qprediksi vs Qobservasi rerata bulanan 2004-2005



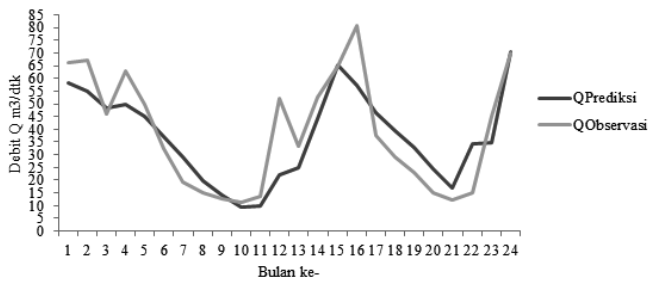
R² = 0.607375, NSE = 0,607164, PBIAS = -0.60974, MB = -0.25, RSR = 0,626767

Gambar 7. Diagram *scatter* kalibrasi Qprediksi vs Qobservasi rerata bulanan 2004-2005.

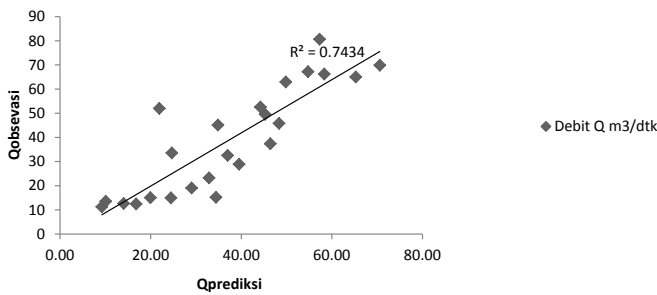
Untuk melihat kemantapan SWAT dalam melakukan proses pemodelan berdasarkan pada ukuran statistik kinerja yang telah ditetapkan, maka dilakukan kegiatan verifikasi model. Verifikasi dijalankan pada skala bulanan untuk tahun 2006-2007, menggunakan parameter model yang dihasilkan pada proses kalibrasi. Nilai debit aliran Qprediksi dan Qobservasi hasil verifikasi model berikut ketebalan Volume Qprediksi (Vol_Qpred) dan Vol_Qobs (Vol_Qobs) disajikan pada Tabel 2. Vol_Qpred dan Vol_Qobs merupakan perkalian antara Qprediksi dan Qobservasi dengan 2,592 x 10⁶ detik (1 bulan = 30 hari). Secara grafis hasil verifikasi disajikan pada Gambar 8 dan 9.

Tabel 2. Nilai debit aliran Qprediksi dan Qobservasi hasil verifikasi model

Bulan (1)	Qprediksi (m ³ /dt) (2)	Vol_Qpred (10 ⁶ m ³) (3)	Qobservasi (m ³ /dt) (4)	Vol_Qobs (10 ⁶ m ³) (5)
Januari'06	58,31	151,14	66,22	171,64
Februari	54,73	141,86	67,18	174,13
Maret	48,35	125,32	45,81	118,74
April	49,83	129,16	62,96	163,19
Mei	45,27	117,34	49,59	128,54
Juni	36,99	95,88	32,53	84,32
Juli	29,05	75,30	19,06	49,40
Agustus	19,95	51,71	15,06	39,04
September	14,04	36,39	12,65	32,79
Oktober	9,2	23,90	11,26	29,19
November	10,09	26,15	13,55	35,12
Desember	21,90	56,76	52,00	134,78
Jumlah (Σ)		1.030,92		1.160,88
Selisih [(Σ3-Σ5)/Σ5]			-11,20 %	
Januari'07	24,68	63,97	33,56	86,99
Februari	44,22	114,62	52,57	136,26
Maret	65,27	169,18	65,00	168,48
April	57,28	148,47	80,66	209,07
Mei	46,42	120,32	37,39	96,91
Juni	39,52	102,44	28,92	74,96
Juli	32,88	85,22	23,22	60,19
Agustus	24,48	63,45	14,94	38,72
September	16,78	43,49	12,45	32,27
Oktober	34,43	89,24	15,20	39,40
November	34,85	90,33	45,11	116,93
Desember	70,59	182,97	69,86	181,08
Jumlah (Σ)		1.273,71		1.241,26
Selisih [(Σ3-Σ5)/Σ5]			2,61 %	
Rerata	37,05			38,61



Gambar 8. Grafik *time series* verifikasi Qprediksi vs Qobservasi rerata bulanan 2006-2007



$R^2 = 0.74339$, $NSE = 0,731865$, $PBIAS = -4.06093 \%$, $MB = -1.57$, $RSR = 0.517818$

Gambar 9. Diagram *scatter* verifikasi Qprediksi vs Qobservasi rerata bulanan 2006-2007

Nilai debit rerata bulanan yang disajikan pada Tabel 2 menunjukkan bahwa debit prediksi dan observasi pada tahap verifikasi mempunyai kedekatan nilai, yaitu 37,05 m³/dtk dan 38,61 m³/dtk. Uji T untuk data berpasangan pada tahap kalibrasi dan observasi, menunjukkan bahwa nilai $T_{hitung} < T_{tabel (23,0.05)}$, sehingga dapat dinyatakan bahwa tidak ada beda antara nilai debit prediksi dan observasi. Secara grafis dan statistik, seperti yang disajikan pada Gambar 8 dan 9 mengindikasikan bahwa hasil debit rerata bulanan pada tahap verifikasi menggunakan parameter model hasil kalibrasi, telah mulai menunjukkan stabilitasnya, $R^2 > 0,65$, nilai $NSE \geq 0,50$, $PBIAS < \pm 25 \%$, $MB = -1.57$ dan $RSR \leq 0,70$.

Berdasarkan nilai acuan kinerja model yang telah ditetapkan dan nilai yang dihasilkan oleh model secara statistik, maka hasil kalibrasi dan verifikasi pemodelan DAS menggunakan model SWAT di kawasan Hulu DTA Waduk Mrica telah dapat mencapai sebutan *Satisfactory*. Capaian *Satisfactory* tersebut diperoleh untuk skala rerata bulanan pada periode kalibrasi tahun 2004-2005 dan verifikasi pada tahun 2006-2007. Jika berdasarkan nilai NSE, maka hasil verifikasi model secara statistik berkinerja sangat baik *very good*. Hal ini bermakna bahwa model SWAT telah dapat menirukan atau memproduksi kembali proses-proses hidrologi yang terjadi di kawasan hulu DTA waduk Mrica, dan hasil luarannya telah mencapai derajat *Satisfactory* dalam mendekati keadaan senyatanya.

KESIMPULAN DAN SARAN

Proses pemodelan telah dapat dijalankan dengan baik, sehingga model SWAT dapat menirukan atau memproduksi kembali proses-proses hidrologi yang terjadi di kawasan hulu DTA waduk Mrica. Berdasarkan uji T data berpasangan, nilai NSE, RSR dan PBIAS ditemukan bahwa tidak ada perbedaan antara nilai debit (Q) prediksi dan Observasi, sehingga pemodelan DAS berkinerja *satisfactory* dalam mendekati keadaan senyatanya. Nilai $NSE > 65 \%$ pada tahap verifikasi, mengindikasikan bahwa model SWAT dalam pemodelan DAS di kawasan hulu waduk Mrica berkinerja sangat baik.

Luaran model menunjukkan karakter bahwa Qprediksi cenderung lebih rendah dibanding dengan Qobservasi pada bulan-bulan awal dan akhir tahun. Sementara itu, di bulan-bulan pertengahan, Qprediksi cenderung lebih tinggi dibanding dengan Qobservasi.

Optimalisasi parameter, verifikasi variabel pengendali model SWAT, menemukan bahwa parameter yang berhubungan dengan air bawah permukaan "*subsurface water response*", di antaranya parameter koefisien resap air tanah (GW_REVAP), kedalaman air pada *shallow aquifer* yang mengakibatkan terjadinya evaporasi (REVAPMN) dan kedalaman air pada *shallow aquifer* yang mengakibatkan terjadinya aliran dasar (GWQMN), mempunyai peran yang sangat bermakna dalam mengendalikan kinerja model dalam kegiatan validasi *output*.

DAFTAR PUSTAKA

- AAAE. (2009) Special issue SWAT Southeast Asia modelling. *International Agricultural Engineering Journal*, *AAAE* **18**(1-2): 15-25.
- Arnold J.G., R. Srinivasan., Muttiah R. S., dan Williams, J.R. (1998). Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *J. American Water Resour. Assoc.* **34**(1): 73-89
- Arnold J.G., Allen, P.M., Volk, M., Williams, J.R. dan Bosch, D.D. (2010). Assessment of different representations of spatial variability on SWAT model performance. The ASABE SWAT 2010 Special Collection. *Transaction of The ASABE* **53**(5): 1433-1443.
- Bakhtiar, Hadihardaja, J. dan Hadihardaja, I.K. (2010). Determining the critical degree of reservoir lifetime for the saguling reservoir based on the sediment inflow simulation. *Jurnal Teknik Sipil* **17**(1): 47-62.
- Douglas-Mankin, K.R., Srinivasan, R. dan Arnold, J.G. (2010). Soil and water assessment tool (SWAT) model: current developments and applications. The ASABE

- SWAT 2010 Special Collection. *Transaction of The ASABE* **53**(5): 1423-1431.
- Mechram, S. (2010). *Prediksi Limpasan Permukaan, Erosi dan Sedimentasi Menggunakan Model AVSWAT 2000 (Studi Kasus di Sub DAS Bengawan Solo Hulu)*. Tesis. Program Pascasarjana Fakultas Teknologi Pertanian. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Mulyana, A.R., Singgih H., Soewarno dan Arif S. (2011). Pengendalian daya rusak air pada hulu DAS rawan aliran lumpur di kawasan dataran tinggi Dieng. *Proceeding Kolokium Hasil Litbang Sumberdaya Air. Puslitbang Sumberdaya Air, Balitbang, Kementerian PU. Bandung 23-24 Maret 2011*.
- Ndomba, P.M. dan Birhanu, B.Z. (2008). Problems and prospect of SWAT model applications in NILOTIC catchments: A review. *Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine* **1**: 41-51.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. dan Williams, J.R. (2004). *Soil and Water Assessment Tool Input / Output File Documentation*, Ver. 2005. Temple, Tex.: USD-ARS Grassland, Soil and Water Research Laboratory.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. dan Williams, J.R. (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical and Documentation, Version 2005*. Grassland, Soil and Water Research Laboratory-Agricultural Research Service 808 East Blackland Road-Temple, Texas 76502. Blackland Research Center-Texas Agricultural Experiment Station 720 East Blackland Road-Temple, Texas 76502.
- Omani, N., Tajrishy, M. dan Abrishamchi, A. (2007). Modelling of a river basin Using SWAT and GIS. *2nd International Conference on Managing Rivers in The 21st Century: Solutions Towards Sustainable Rivers Basins. Riverside Kuching, Sarawak, Malaysia. June 6-8, 2007*.
- Rossi, C.G., Sinivasan, R., Jirayoot, K., Le Due, T., Souvannabouth, P., Binh, N. dan Gassman, P.W. (2009). Hydrologic evaluation of the lower mekong river basin with the soil and water assessment tool model. *International Agricultural Engineering Journal, AAAE* **18**(1-2): 1-13.
- Somura, H., Takeda, I. dan Mori, Y. (2009). Sensitivity analysis of hydrologic and suspended sediment discharge in The Abashiri river basin, Hokkaido region Japan. *International Agricultural Engineering Journal, AAAE* **18**(1-2): 27-39.
- Suryani, E. dan Agus, F. (2005). Perubahan penggunaan lahan dan dampaknya terhadap karakteristik hidrologi: Suatu studi di DAS Cijalupang, Bandung, Jawa Barat. *Prosiding Multifungsi Pertanian*: 87-104. ISBN: 979-9474-42-6.
- Susanto, S. dan Kaida, Y. (1991). Tropical hydrology simulation model-1 for watershed management (1) model building. *Journal of Japan Society Hydrology and Water Resource* **4**(2): 43-53.
- Williams, J.R., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Gassman, P.W. dan Green, C.H. (2008). History of model development at Temple, Texas. *Hydrological Sciences Journal*. **53**(5): 948-960
- Xie, X. dan Cui, Y. (2011). Development and test of SWAT modelling hydrological process in irrigation with paddy rice. *Journal of Hydrology* **396**: 61-71.