



Media Pengembangan Ilmu dan Profesi Kegeografian

<https://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/JG/index>



PREDIKSI DEBIT JANGKA PANJANG UNTUK SUNGAI BENGAWAN SOLO

Oleh: Widyastuti, MT; Taufik, M; Santikayasa, IP

Divisi Hidrometeorologi, Departemen Geofisika dan Meteorologi, FMIPA-IPB

Jl. Meranti Wing 19 level 4 Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

Abstract

Bengawan Solo river is the longest rivers in Java, and its watershed has been classified as one of the critical watersheds in Indonesia. This research aims to simulate a long-term discharge in Bengawan Solo, with specific objectives (i) to calibrate and to validate the Soil and Water Assessment Tools (SWAT) model for estimating monthly discharge, and (ii) to simulate monthly discharge over last century (1901-2016). In this research, SWAT model was fed with monthly climate data, land use, and soil characteristics. Based on the evaluation, the model statistically performed well to simulate the monthly discharge as shown by low percent bias (PBIAS: -2.30%) and RMSE-standard ratio (RSR: 0.44), and a high Kling-Gupta Efficiency (KGE: 0.87). Our findings show that March was experience having the highest discharge, whereas low discharge was found in August. Monthly streamflow characteristic of Bengawan Solo River for the high flow (Q5) is 198.00 mm/month, while the low flow (Q90) is 13.00 mm/month. Furthermore, information on hydrological characteristics of the river is valuable for integrated watershed management, in particular to anticipate the changing climate.

Keywords: *Monthly Streamflow, CRU, Hydrologic Response Unit, Calibration, SWAT*

Abstrak

Sungai Bengawan Solo merupakan sungai terpanjang di Pulau Jawa dimana daerah alirannya telah diklasifikasikan sebagai salah satu Daerah Aliran Sungai (DAS) kritis di Indonesia. Penelitian ini mencoba memprediksi debit jangka panjang Sungai Bengawan Solo, dengan tujuan khusus untuk (i) melakukan kalibrasi dan validasi model *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) dalam mengestimasi debit skala bulanan, dan (ii) mensimulasikan debit bulanan untuk periode 1901 – 2016. Penelitian ini, model SWAT menggunakan input data iklim bulanan, penggunaan lahan, dan karakteristik tanah. Berdasarkan hasil evaluasi, secara statistik model mampu mensimulasikan debit bulanan dengan baik ditunjukkan dengan nilai yang rendah dari percent bias (PBIAS: -2.30%) dan RMSE standard ratio (RSR: 0.44), dan nilai *Kling-Gupta Efficiency* yang tinggi (KGE: 0.87). Berdasarkan debit hasil simulasi, kami menemukan bahwa debit maksimum terjadi pada bulan Maret, sedangkan debit minimum terjadi pada bulan Agustus. Karakteristik debit bulanan Sungai Bengawan Solo untuk aliran tinggi (Q5) sebesar 198.00 mm/bulan, sedangkan aliran rendah (Q90) sebesar 13.00 mm/bulan. Informasi tentang karakteristik hidrologi sungai sangat penting untuk pengelolaan DAS terpadu, terutama untuk mengantisipasi iklim yang sering berubah.

Kata Kunci: *Debit Bulanan, CRU, Hydrologic Response Unit, Kalibrasi, SWAT*

1. PENDAHULUAN

Sungai Bengawan Solo merupakan sungai terpanjang (~600 km) di Pulau Jawa, yang terbentang dari provinsi Jawa Tengah hingga Jawa Timur. Daerah aliran sungai (DAS) Bengawan Solo memiliki curah hujan tahunan tinggi, yang memungkinkan aliran sungainya sebagai sumber air bagi usaha pengelolaan dan pengembangan sumber daya air (SDA) untuk memenuhi kebutuhan domestik, irigasi pertanian, transportasi dan kegiatan industri, dari kawasan hulu hingga hilir. Berdasarkan Keputusan Menteri Kehutanan No. 328/Menhut-II/2009, DAS Bengawan Solo menjadi salah satu dari 108 DAS kritis di Indonesia. Kondisi umum Sungai Bengawan Solo sebagaimana kondisi sungai-sungai di P. Jawa yaitu sering mengalami kekurangan pasokan air pada musim kemarau, tetapi kelebihan air yang berpotensi banjir pada musim penghujan.

Dinamika yang sangat besar pada debit sungai (antara musim penghujan dan musim kemarau) menarik untuk dikaji agar diperoleh informasi yang jelas dan menyeluruh untuk mitigasi dan adaptasi kejadian bencana hidrometeorologi (kekeringan/banjir) tersebut. Selama ini, studi tentang hidrologi sungai lebih terfokus dan terbatas pada aspek kemampuan model dalam memprediksi perilaku hidrologi sungai (Marhaento et al., 2017a, 2017b; Priyantoro and Limantara, 2017; Setyorini et al., 2017) pada periode pengamatan tertentu. Sedangkan informasi jangka panjang dari perilaku hidrologi sungai (seperti debit sungai) masih terbatas. Keterbatasan

informasi hidrologi sungai ini berusaha untuk dicarikan solusi pada penelitian ini dengan mengambil studi kasus pada Sungai Bengawan Solo. Informasi jangka panjang dari debit sungai sangat penting untuk strategi pengelolaan DAS yang berkelanjutan, mitigasi dan adaptasi perubahan iklim di DAS Bengawan Solo.

Jumlah penduduk yang tinggal di DAS Bengawan Solo mengalami peningkatan, dengan rerata laju pertumbuhan penduduk sebesar 0.49% per tahun pada tahun 1990 – 2006 (Menteri Pekerjaan Umum, 2010). Pertumbuhan penduduk merupakan salah satu faktor penyebab perubahan tata guna lahan, yang kemudian berpengaruh terhadap respon hidrologi suatu DAS (Dwarakish and Ganasri, 2015; Elfert and Bormann, 2010). Kerusakan DAS mengakibatkan peningkatan frekuensi kejadian hidrologi ekstrem berupa kekeringan maupun banjir. Sungai Bengawan Solo telah mengalami beberapa kali banjir besar pada rentang tahun 1966 – 2007, dengan frekuensi kejadian banjir yang semakin meningkat (Lasminto et al., 2016). Akan tetapi, studi mengenai kejadian ekstrem hidrologi untuk aliran Sungai Bengawan Solo kurang didukung oleh kelengkapan data debit aliran sungai untuk jangka panjang. Pemanfaatan model hidrologi merupakan langkah untuk memperoleh informasi debit secara lengkap.

Beberapa penelitian telah menerapkan model hidrologi untuk menganalisis kondisi aliran Sungai Bengawan Solo. Prastica et al., (2018) menggunakan model HEC-RAS untuk menganalisis banjir Sungai Bengawan Solo

di kota Bojonegoro. Sipayung et al., (2018) menggunakan model hidrologi *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) untuk menganalisis pengaruh perubahan iklim terhadap ketersediaan air Sungai Bengawan Solo berdasarkan data iklim *Conformal Cubic Atmospheric Model* (CCAM). Model SWAT merupakan gabungan beberapa model yang didesain untuk memprediksi besar debit aliran sungai dalam periode waktu yang lama pada DAS yang kompleks, dengan kondisi tanah, penggunaan lahan dan manajemen yang bervariasi (Santhi et al., 2008).

Model ini mampu digunakan untuk menganalisis dampak perubahan iklim dan perubahan penggunaan lahan terhadap proses hidrologi dalam satuan *hydrologic respon unit* (HRU). HRU merupakan wilayah dengan kombinasi jenis penggunaan lahan, manajemen, topografi dan karakteristik tanah yang sama. Proses hidrologi yang disimulasikan oleh SWAT pada level HRU meliputi aliran permukaan, infiltrasi, evapotranspirasi, *lateral flow*, saluran pembuangan air, sebaran air dalam profil tanah, aliran balik, dan penambahan simpanan air tanah oleh badan air, bendungan, atau saluran anak sungai (Amatya et al., 2013).

Penelitian ini mencoba untuk memprediksi debit jangka panjang untuk Sungai Bengawan Solo dengan tujuan (i) melakukan kalibrasi dan validasi model SWAT untuk mengestimasi debit bulanan dan (ii) mensimulasikan debit bulanan tahun 1901 – 2016.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dan kuantitatif dalam memberikan penilaian terhadap kemampuan model SWAT untuk mensimulasikan debit bulanan. Pendekatan kualitatif dilakukan dengan menganalisis perbandingan grafik debit hasil estimasi model dengan data debit observasi. Pendekatan kuantitatif dilakukan dengan menghitung nilai beberapa indikator statistik efektivitas model SWAT.

Penelitian ini menggunakan perangkat lunak ArcGIS 10.3 dengan *plugin* ArcSWAT 2012 (Srinivasan, 2012), dan R v.3.4.4 (R Core Team., 2016) dengan RStudio AGPL v3 untuk pengolahan data sekunder. Data sekunder penelitian ini terdiri dari data debit harian Sungai Bengawan Solo (pos Babat) tahun 1972 – 2010, data iklim bulanan spasial *Climate Research Unit* (CRU) resolusi $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (Harris et al., 2014), data *Digital Elevation Model* (DEM) resolusi 30 m, peta jaringan sungai Bengawan Solo, peta sebaran jenis tanah dari *Food and Agricultural Organization* (FAO), dan peta klasifikasi tutupan lahan Pulau Jawa tahun 2011.

Persiapan data input adalah penyesuaian format data spasial (data DEM, data tutupan lahan dan data sebaran jenis tanah) dan data titik (data iklim hasil ekstraksi data CRU) agar dapat terbaca oleh model SWAT. Penelitian ini menggunakan asumsi bahwa kondisi tutupan lahan dan karakteristik tanah pada wilayah kajian tidak mengalami perubahan selama periode simulasi. Sebelum melakukan proses kalibrasi,

langkah yang dilakukan adalah proses parameterisasi.

Parameter model SWAT yang diuji dalam penelitian ini sebanyak 7 dari 63 parameter yang termasuk dalam sub-pemodelan siklus hidrologi dan *channel water routing* (Arnold et al., 2012). Uji sensitivitas terhadap parameter dilakukan dengan menganalisis perubahan relatif debit akibat masing masing nilai awal parameter dikalikan dengan nilai tertentu (Qiang et al., 2010). Kalibrasi model dilakukan secara manual dengan mengubah - ubah nilai 7 parameter tersebut hingga memperoleh nilai indikator statistik yang terbaik. Indikator statistik yang digunakan meliputi *Percent BIAS* (PBIAS), *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), *Kling-Gupta Efficiency* (KGE), *Coefficient of Determination* (R^2), *Root Mean Square Error* (RMSE) *Standard-deviation Ratio* (RSR). Proses kalibrasi menggunakan data debit bulanan periode 1972 – 1991, sedangkan proses validasi periode 1992 – 2010.

Model SWAT yang telah dikalibrasi digunakan untuk menyimulasikan debit bulanan Sungai Bengawan Solo tahun 1901 – 2016. Debit hasil simulasi ini digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik debit bulanan yaitu nilai debit maksimum (Q_{max}), debit minimum (Q_{min}), debit rerata (Q_{mean}), debit ekstrem *high flow* (Q_5), dan debit ekstrem *low flow* (Q_{90}).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Delineasi DAS Bengawan Solo

Hasil delineasi model SWAT membagi DAS Bengawan Solo menjadi 6 sub-DAS berdasarkan jumlah titik *outlet*

(titik pengamatan) yang terdefinisi dalam model. Luas keseluruhan DAS Bengawan Solo sebesar 15261.059 km², sedangkan luas tiap subDAS bervariasi antara 118.08 km² hingga 5862.1 km². Kombinasi jumlah sub-DAS, data kemiringan lahan, penggunaan lahan dan jenis tanah pada wilayah kajian menghasilkan HRU sebanyak 689 HRU. Luasan HRU bervariasi antara 9.38×10^{-4} km² hingga 781.2 km², dengan rata – rata luasan sebesar 22.15 km².

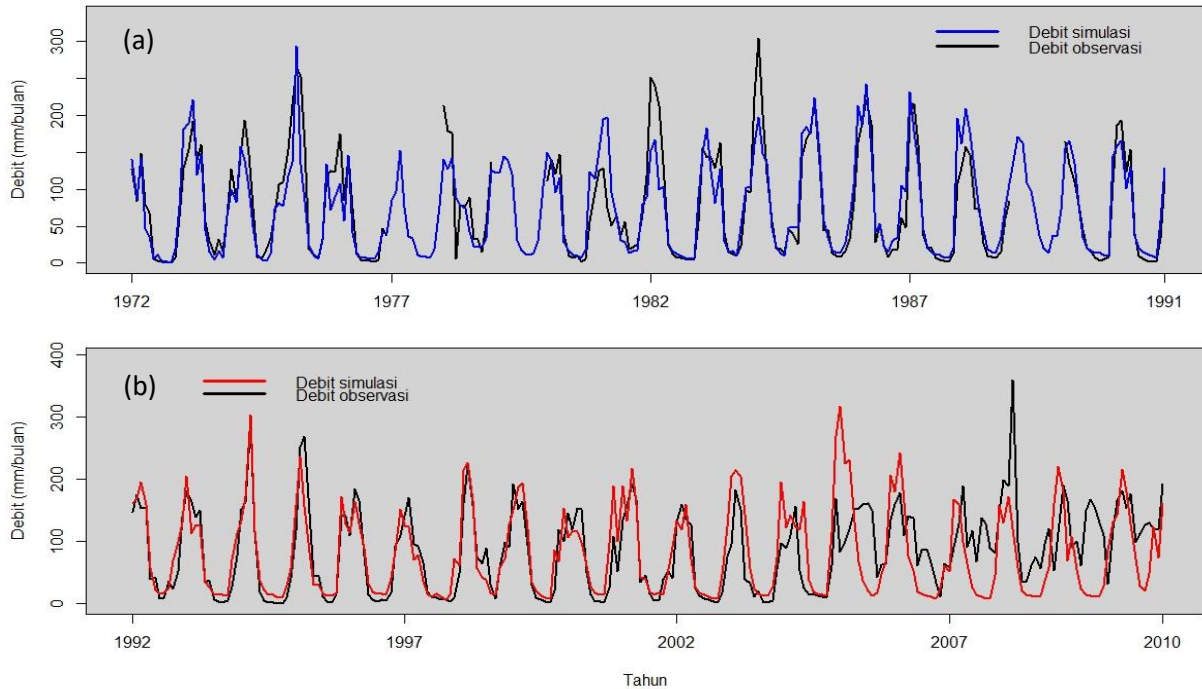
3.2. Kalibrasi dan Validasi Model SWAT

Kalibrasi model dilakukan untuk memperoleh nilai parameter yang sesuai dengan kondisi spesifik DAS Bengawan Solo dengan membandingkan data debit hasil simulasi dengan data debit akumulasi bulanan hasil observasi (Gambar 1a). Sejak iterasi model yang pertama, debit simulasi mampu mengikuti sebagian besar pola perubahan debit observasi, yang menunjukkan bahwa data iklim (curah hujan dan suhu) dari CRU mampu merepresentasikan kondisi nyata di wilayah kajian (Fadil et al., 2011).

Kemampuan model untuk menciptakan pola debit aliran sesuai dengan hidrograf digunakan sebagai indikator seberapa baik model SWAT mensimulasikan proses fisik di DAS, terutama mengenai konsistensi data input (tutupan lahan dan karakteristik tanah) dengan resolusi spasial tinggi yang mampu membantu model mendekati proses yang nyata terjadi (Meaurio et al., 2015). Hasil kalibrasi menunjukkan debit maksimum yang terjadi secara keseluruhan dapat disimulasikan dengan baik oleh model

SWAT. Debit simulasi cenderung memiliki nilai rata-rata yang lebih rendah dengan keragaman nilai (nilai standar deviasi) yang lebih rendah dari pada debit observasi (Tabel 1).

Berdasarkan grafik simulasi debit untuk proses validasi (Gambar 1b), terdapat debit hasil simulasi yang tidak mengikuti pola debit observasi. Pola debit simulasi sejak tahun 1992 mampu mengikuti pola de-



Gambar 1. Hasil Perbandingan Data Simulasi dengan Data Observasi Debit Akumulasi Bulanan di Sungai Bengawan Solo (a) Tahun 1972 – 1991 (Periode Kalibrasi) dan (b) Tahun 1992 – 2010 (Periode Validasi)

bit observasi, hingga pada tahun 2005 pola debit observasi mengalami perubahan. Debit observasi setelah tahun 2005 memiliki nilai minimum yang cenderung meningkat setiap tahun. Hal ini menunjukkan bahwa input model SWAT tidak mampu merepresentasikan perubahan kondisi aliran sungai yang terjadi.

Perubahan pola debit suatu aliran sungai dapat disebabkan oleh tindakan manusia, seperti pembangunan waduk dan bendungan. Pembangunan waduk dan

bendungan di aliran sungai mampu mengubah debit aliran pada variasi musiman, yaitu meningkatkan debit minimum pada musim kemarau dan menurunkan debit maksimum musim hujan (Zhang et al., 2012). Perubahan pola debit sungai Bengawan Solo yang terjadi mulai tahun 2005, disebabkan oleh pembangunan waduk di beberapa wilayah hulu dan saluran pengelak banjir (*flood way*) di wilayah hilir sebagai bagian dari *Comprehensive Development and Management*.

Tabel 1. Hasil Evaluasi Model SWAT untuk Mengestimasi Debit Bulanan

Indikator Statistik	Periode Kalibrasi (1972 - 1991)		Periode Validasi (1992 - 2010)	
	Observasi	Simulasi	Observasi	Simulasi
Rerata bulanan (mm/bulan)	77.12	74.22	85.54	81.76
St. Deviasi (mm/bulan)	70.98	63.63	67.30	70.49
PBIAS (%)	-2.30		-4.40	
NSE	0.80		0.34	
KGE	0.87		0.68	
R ²	0.80		0.48	
RSR	0.44		0.81	

Sumber: Hasil Analisis Data

Plan (CDMP) Bengawan Solo tahun 2001 (Menteri Pekerjaan Umum, 2010)

Indikator statistik untuk menunjukkan nilai kuantitatif kemampuan model SWAT dalam mensimulasikan debit bulanan Sungai Bengawan Solo dapat dilihat pada Tabel 1. Debit simulasi rata – rata memiliki nilai lebih rendah dari debit observasi. Menurut Moriasi et al., (2007), nilai PBIAS kurang dari $\pm 10\%$, NSE lebih dari 0.75 dan RSR kurang dari 0.50 pada hasil kalibrasi termasuk pada kategori sangat memuaskan. Nilai R² hasil kalibrasi lebih besar dari 0.50 menunjukkan bahwa hasil debit simulasi dapat diterima (Santhi et al., 2001), sedangkan nilai KGE lebih dari 0.70 termasuk pada kategori bagus (Pechlivanidis and Arheimer, 2015).

Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa hasil kalibrasi manual model SWAT mampu memberikan representasi yang bagus mengenai proses hidrologi yang terjadi di DAS Bengawan Solo. Indikator statistik pada tahap validasi

model secara umum menunjukkan penurunan kualitas model. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan nilai PBIAS dan RSR, serta penurunan nilai NSE, KGE dan R². Perubahan ini disebabkan oleh perbedaan pola antara debit observasi pada tahun 2005 – 2010 dengan debit hasil simulasi.

Nilai PBIAS termasuk pada kategori sangat bagus, nilai KGE termasuk pada kategori cukup bagus, sedangkan nilai NSE dan RSR termasuk dalam kategori tidak memuaskan (Moriasi et al., 2007; Pechlivanidis and Arheimer, 2015). Nilai R² kurang dari 0.50 menunjukkan bahwa hasil model kurang dapat diterima (Santhi et al., 2001). Berdasarkan nilai PBIAS yang diperoleh pada proses validasi, hasil simulasi model SWAT menghasilkan eror yang rendah sehingga mampu digunakan untuk mensimulasikan debit Sungai Bengawan Solo dalam jangka panjang.

Besar eror atau ketidakpastian (*uncertainty*) dalam pemodelan hidrologi yang telah dikalibrasi, disebabkan oleh

banyak faktor. Menurut Abbaspour et al., (2015), ketidakpastian dalam model SWAT dibedakan menjadi 3 jenis, antara lain ketidakpastian pada (i) konsep model, (ii) data input, dan (iii) nilai parameter. Ketidakpastian pada konsep model disebabkan oleh penyederhanaan konsep hidrologi yang nyata terjadi, sehingga terdapat beberapa proses yang sebenarnya terjadi namun tidak termasuk dalam pemodelan. Ketidakpastian pada data input disebabkan oleh penggunaan data iklim titik untuk pemodelan hidrologi yang semi-terdistribusi. Ketidakpastian pada nilai parameter disebabkan oleh pilihan kombinasi parameter yang dikalibrasi.

3.3 Analisis Sensitivitas dan Nilai

Parameter

Proses kalibrasi model menghasilkan nilai baru untuk beberapa parameter model. Berdasarkan hasil analisis sensitivitas model SWAT untuk DAS Bengawan Solo, terdapat 7 parameter sensitif terhadap perubahan debit aliran dari 12 parameter yang diuji (Tabel 2).

Parameter SOL_AWC teridentifikasi memiliki tingkat sensitivitas tertinggi terhadap nilai debit aliran sungai Bengawan Solo.

Parameter CH_K2 adalah nilai konduktivitas hidrolis efektif pada aliran sungai utama. Sungai utama Bengawan Solo teridentifikasi bersifat kurang signifikan dalam meloloskan air dengan karakteristik badan sungai sangat padat dan kandungan tanah liat atau lumpur yang tinggi (Arnold et al., 2012). Hal ini sesuai dengan kondisi sungai pada titik pengamatan Babat yang terletak pada bagian hilir sungai. Kondisi air berwarna coklat dengan aliran yang tenang.

Parameter CH_K1 merupakan konduktivitas hidrolis efektif pada aliran anak sungai. Aliran anak sungai Bengawan Solo teridentifikasi memiliki tingkat konduktivitas hidrolis yang tinggi (250 mm/jam). Hal ini disebabkan oleh kondisi DAS Bengawan Solo yang memiliki daerah hulu berupa

Tabel 2. Hasil parameterisasi model SWAT untuk DAS Bengawan Solo dan urutan sensitivitas tiap parameter

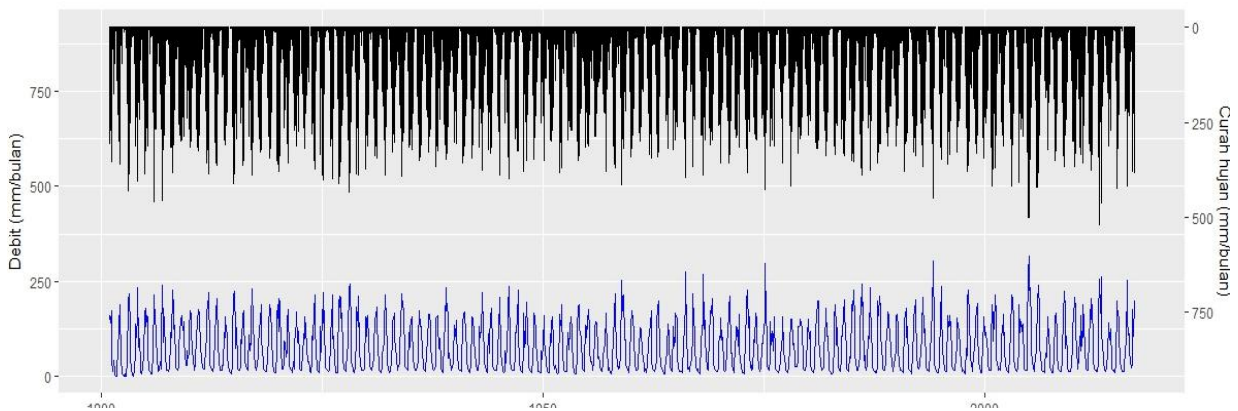
No	Parameter Model SWAT	Nilai Awal (Default)	Nilai Akhir (Fitted Value)	Urutan Sensitivitas
1	GW_REVAP.gw	0.02	0.2	3
2	ESCO.hru	0.95	0.01	6
3	CH_K2.rte	0	0.125	7
4	SOL_AWC.sol	nilai input	nilai input * 1.6	1
5	SOL_K.sol	nilai input	nilai input * 0.6	5
6	CH_N1.sub	0.014	0.025	4
7	CH_K1.sub	0	250	2

Sumber: Hasil Analisis Data

pegunungan, sehingga aliran air anak sungai cepat (pengaruh topografi) dengan karakteristik badan sungai berbatu dan berpasir. Parameter CH_K1 berkaitan erat dengan parameter CH_N1 (koefisien kekasaran *Manning* pada anak sungai), meskipun parameter ini kurang berpengaruh terhadap debit aliran Sungai Bengawan Solo. Daerah sekitar aliran anak sungai Bengawan Solo teridentifikasi berupa daerah aliran yang alami dengan

kajian dapat menghantarkan air tanah dengan baik. Sungai Bengawan Solo Hilir memiliki lapisan akuifer wilayah tersebut didominasi oleh formasi batu gamping (batu kapur) dan endapan alluvial sehingga memiliki potensi yang besar dalam penggunaan air tanah.

Parameter ESCO digunakan untuk menyesuaikan distribusi kedalaman untuk penguapan air dalam tanah sebagai efek dari kapiler tanah, pengerasan lapisan, dan



Gambar 2. Hasil *Plotting* Debit Akumulasi Bulanan Simulasi SWAT (Biru) dan Curah Hujan Rerata (Hitam) DAS Bengawan Solo Tahun 1901 – 2016

sedikit pohon, bebatuan dan semak (Arnold et al., 2012).

Parameter GW_REVAP merupakan koefisien *revap* air tanah, yaitu kemampuan tanah dalam memindahkan air tanah lapisan akuifer bawah untuk menggantikan air pada lapisan akuifer dangkal yang hilang akibat evaporasi atau penyerapan oleh akar tanaman. Parameter ini sangat signifikan untuk DAS yang memiliki lapisan jenuh yang tidak jauh dari permukaan tanah atau lapisan akar tanaman yang tumbuh. Sensitivitas parameter ini terhadap DAS Bengawan Solo menunjukkan bahwa diperkirakan secara umum lapisan jenuh pada wilayah

keretakan tanah. Penurunan nilai ESCO mengakibatkan lapisan tanah yang lebih dalam mampu mengkompensasi defisit air di lapisan yang lebih atas sehingga nilai evapotranspirasi tanah meningkat sedangkan nilai limpasan permukaan dan aliran dasar berkurang. Parameter ESCO teridentifikasi memiliki dampak yang lebih tinggi pada aliran dasar daripada limpasan permukaan (Jha, 2011). Parameter tanah lain yang berpengaruh terhadap model adalah SOL_AWC dan SOL_K. Nilai parameter SOL_AWC yang lebih tinggi berarti kapasitas tanah untuk menyimpan air lebih tinggi sehingga air yang tersedia untuk limpasan permukaan dan perkolasi lebih

sedikit. Perubahan nilai SOL_AWC akan lebih berpengaruh terhadap nilai aliran dasar dari pada limpasan permukaan (Jha, 2011). Parameter SOL_K merupakan nilai konduktivitas hidrolis jenuh, yaitu ukuran kuantitatif kemampuan tanah jenuh untuk meloloskan air ketika mengalami gradien hidrolis (perbedaan kandungan air). Peningkatan nilai SOL_K berarti air yang mengalami perkolasi akan semakin besar, sehingga berpengaruh pada peningkatan nilai aliran dasar.

3.4 Debit Historis Sungai Bengawan Solo

Model SWAT yang telah dikalibrasi digunakan untuk menyimulasikan debit akumulasi bulanan sungai Bengawan Solo tahun 1901 – 2016. Nilai debit bulanan simulasi dibandingkan dengan nilai rerata curah hujan CRU yang meliputi DAS Bengawan Solo (Gambar 2). Debit bulanan hasil simulasi cenderung memiliki pola yang sama dengan curah hujan rata-rata yang terjadi. Sebagian besar nilai curah hujan yang tinggi akan menghasilkan debit simulasi yang tinggi. Beberapa pola debit yang kurang sesuai dengan curah hujan rerata, disebabkan oleh perbedaan yang signifikan antara nilai rerata curah hujan DAS Bengawan Solo dengan nilai curah hujan spesifik yang digunakan perhitungan dalam tiap sub-DAS.

Debit akumulasi bulanan hasil simulasi model SWAT pada titik pengamatan Babat mengalami fluktuasi nilai antara bulan Januari sampai Desember, dengan nilai tertinggi pada bulan Maret (169.92 mm/bulan). Penurunan debit pada bulan April sampai September bersesuaian dengan musim kemarau yang terjadi di wilayah kajian. Rerata nilai debit minimum terjadi pada bulan Agustus (14.60 mm/bulan).

Berdasarkan debit akumulasi bulanan jangka panjang hasil simulasi model SWAT, karakteristik debit aliran sungai Bengawan Solo dapat diidentifikasi (Tabel 3).

Tabel 3. Karakteristik Debit Akumulasi Bulanan Sungai Bengawan Solo

No	Karakteristik Debit	Nilai (mm/bulan)
1	Qmax	316.18
2	Qmin	0.01
3	Qrerata	77.45
4	Q5	198.00
5	Q90	13.00

Sumber: Hasil Analisis Data

4. KESIMPULAN

Model SWAT dengan input data iklim bulanan dari CRU dapat digunakan untuk mensimulasikan debit bulanan jangka panjang Sungai Bengawan Solo. Debit hasil simulasi model memiliki nilai rerata lebih rendah dari pada debit observasi (*overestimate*). Hidrograf debit hasil simulasi model mampu mengikuti pola dari debit rerata pada tahun 1972 – 2004, sedangkan pola debit observasi pada tahun 2005 – 2010 cenderung berubah. Tingkat sensitivitas parameter yang berpengaruh terhadap debit Sungai Bengawan Solo dari yang paling sensitive adalah SOL_AWC.sol, CH_K1.sub, GW_REVAP.gw, CH_N1.sub, SOL_K.sol, ESCO.hru, dan CH_K2.rte. Data debit akumulasi bulanan jangka panjang Sungai Bengawan Solo dapat digunakan dalam analisis lanjutan mengenai karakteristik debit aliran sungai. Debit bulanan Sungai Bengawan Solo pada titik pengamatan Babat, secara umum bernilai

maksimum pada bulan Maret dan minimum pada bulan Agustus.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., Kløve, B., 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology* 524, 733–752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Amatya, M.D., G. Rossi, C., Saleh, A., Dai, Z., A. Youssef, M., G. Williams, R., D. Bosch, D., M. Chescheir, G., Sun, G., Wayne Skaggs, R., C. Trettin, C., D. Vance, E., E. Nettles, J., Tian, S., 2013. Review of Nitrogen Fate Models Applicable to Forest Landscapes in the Southern U.S. *Transactions of the ASABE* 56, 1731–1757. <https://doi.org/10.13031/trans.56.10096>
- Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., Haney, E.B., Neitsch, S.L., 2012. *Soil & Water Assessment Tool: Input/Output Documentation. Version 2012.*
- Dwarakish, G.S., Ganasri, B.P., 2015. Impact of land use change on hydrological systems: A review of current modeling approaches. *Cogent Geoscience* 1, 1115691. <https://doi.org/10.1080/23312041.2015.1115691>
- Elfert, S., Bormann, H., 2010. Simulated impact of past and possible future land use changes on the hydrological response of the Northern German lowland ‘Hunte’ catchment. *Journal of Hydrology* 383, 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.040>
- Fadil, A., Rhinane, H., Kaoukaya, A., Kharchaf, Y., Bachir, O.A., 2011. Hydrologic Modeling of the Bouregreg Watershed (Morocco) Using GIS and SWAT Model. *Journal of Geographic Information System* 03, 279–289. <https://doi.org/10.4236/jgis.2011.34024>
- Harris, I., Jones, P. d., Osborn, T. j., Lister, D. h., 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.* 34, 623–642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Jha, M.K., 2011. Evaluating Hydrologic Response of an Agricultural Watershed for Watershed Analysis. *Water* 3, 604–617. <https://doi.org/10.3390/w3020604>
- Lasminto, U., Lumantara, E., Widyastuti, H., 2016. FLOOD ASSESSMENT OF BENGAWAN SOLO RIVER 11, 8.
- Marhaento, H., Booij, M.J., Hoekstra, A.Y., 2017a. Attribution of changes in stream flow to land use change and climate change in a mesoscale tropical catchment in Java, Indonesia. *Hydrology Research* 48, 1143–1155. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.110>

- Marhaento, H., Booij, M.J., Rientjes, T.H.M., Hoekstra, A.Y., 2017b. Attribution of changes in the water balance of a tropical catchment to land use change using the SWAT model. *Hydrological Processes* 31, 2029–2040. <https://doi.org/10.1002/hyp.11167>
- Meaurio, M., Zabaleta, A., Uriarte, J.A., Srinivasan, R., Antiguédad, I., 2015. Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed. *Journal of Hydrology* 525, 326–334. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.050>
- Menteri Pekerjaan Umum, 2010. Keputusan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 266/KPTS/M/2010 tentang Pola Pengelolaan Sumber Daya Air (SDA) Wilayah Sungai Bengawan Solo.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Binger, 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, 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Pechlivanidis, I.G., Arheimer, B., 2015. Large-scale hydrological modelling by using modified PUB recommendations: the India-HYPE case. *Hydrology and Earth System Sciences* 19, 4559–4579. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4559-2015>
- Prastica, R.M.S., Maitri, C., Hermawan, A., Nugroho, P.C., Sutjiningsih, D., Anggraheni, E., 2018. Estimating design flood and HEC-RAS modelling approach for flood analysis in Bojonegoro city. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 316, 012042.
- Priyantoro, D., Limantara, L.M., 2017. Conformity evaluation of synthetic unit hydrograph (case study at upstream Brantas sub watershed, East Java Province of Indonesia). *Journal of Water and Land Development* 35. <https://doi.org/10.1515/jwld-2017-0082>
- Qiang, C., Si, G., Dayong, Q., Zuhao, Z., 2010. Analysis of SWAT 2005 Parameter Sensitivity with LH-OAT Method. *HKIE Transactions* 17, 1–7. <https://doi.org/10.1080/1023697X.2010.10668197>
- R Core Team., 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- 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 RWER BASIN WITH POINT AND NONPOINT SOURCES1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 37, 1169–1188. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x>

- Santhi, C., Kannan, N., Arnold, J.G., Di Luzio, M., 2008. Spatial Calibration and Temporal Validation of Flow for Regional Scale Hydrologic Modeling1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 44, 829–846. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00207.x>
- Setyorini, A., Khare, D., Pingale, S.M., 2017. Simulating the impact of land use/land cover change and climate variability on watershed hydrology in the Upper Brantas basin, Indonesia. Applied Geomatics 9, 191–204. <https://doi.org/10.1007/s12518-017-0193-z>
- Sipayung, S.B., Nurlatifah, A., Siswanto, B., 2018. Simulation and prediction the impact of climate change into water resources in Bengawan Solo watershed based on CCAM (Conformal Cubic Atmospheric Model) data. Journal of Physics: Conference Series 1022, 012042.
- Srinivasan, R., 2012. ArcSWAT: ArcGIS interface for SWAT.
- Zhang, W., Mu, S., Zhang, Y., Chen, K., 2012. Seasonal and interannual variations of flow discharge from Pearl River into sea. Water Science and Engineering 5, 399–409. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2012.04.004>