

Evaluasi Model SWAT-MODFLOW dalam Simulasi Air tanah- Air Permukaan DAS Cisangkuy

Evaluation of SWAT-MODFLOW Model in Groundwater - Surface Water Simulation of the Cisangkuy River Basin

Abdullah Husna^{1,2}, Rusmawan Suwarman², Agus Mochamad Ramdhan²

¹Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, Badan Geologi, KESDM
Jalan Diponegoro 57, Bandung, Jawa Barat, Indonesia

²Magister Teknik Air Tanah ITB
Jalan Ganesha 10, Bandung, 40132, Indonesia

e-mail: husnagng@gmail.com

Naskah diterima 27 Mei 2021, selesai direvisi 18 Februari 2022, dan disetujui 4 April 2022

ABSTRAK

Pemahaman komprehensif mengenai interaksi hidrologi-hidrogeologi dapat dilakukan dengan pendekatan pemodelan numerik. Salah satu perangkat *coupled model* interaksi hidrologi-hidrogeologi adalah SWAT-MODFLOW. Penelitian ini ditujukan untuk mengevaluasi kemampuan SWAT-MODFLOW dan memahami interaksi hidrologi dan hidrogeologi dengan studi kasus wilayah Daerah Aliran Sungai Cisangkuy, Kabupaten Bandung. Hasil dari simulasi SWAT-MODFLOW dapat memperlihatkan pengaruh air permukaan pada kondisi air tanah di daerah penelitian dengan cukup representatif. Hasil ini ditunjukkan dengan nilai R^2 yang dapat diterima yaitu pada kisaran 0,52 hingga 0,67 dan fluktuasi muka air tanah sebesar 1 hingga 2 m sesuai dengan observasi di lapangan.

Kata kunci: Air tanah, Air Permukaan, Pemodelan, SWAT-MODFLOW

ABSTRACT

A comprehensive understanding of hydrological-hydrogeological interactions can be done with a numerical modeling approach. One of the coupled tools of the hydrological-hydrogeological interaction model is SWAT-MODFLOW. This research is intended to evaluate the ability of SWAT-MODFLOW and to understand the hydrological-hydrogeological interaction with a case study of the Cisangkuy River Basin, Bandung Regency. The results of the SWAT-MODFLOW simulation can show the influence of surface water on groundwater conditions in the study area quite well. This result is indicated by the value of $R^2 = 0,52$ to $0,67$ and ground water level fluctuations of 1 to 2 m according to observations in the field.

Keywords: Groundwater, Surface Water, Modeling, SWAT-MODFLOW

PENDAHULUAN

Model interaksi air tanah dan air permukaan sangat dibutuhkan oleh berbagai sektor dan menjadi sebuah tantangan baru pada ranah pemodelan sumber daya air (Irawan drr., 2014). Air tanah dan air permukaan memberikan dampak satu sama lain dari segi kuantitas dan kualitas (Fleckenstein drr., 2010; Zhang drr., 2015). Menganalisis interaksi air tanah dan air per-

mukaan secara spasial dan temporal biasanya dilakukan untuk pengaruh perubahan iklim pada luasan sungai dan ketersediaan air tanah (Wai-bel drr. 2013) serta pengambilan air tanah dan perubahan tata guna lahan (Bailey drr., 2016).

Adanya faktor-faktor alami dan antropogenik yang mempengaruhi sistem hidrologi daerah aliran sungai (DAS), maka dibutuhkan perangkat simulasi yang menggambarkan interaksi antara

air tanah dan air permukaan untuk memahami karakteristiknya dan memberikan gambaran pola resapan serta luahan dalam kerangka ruang dan waktu.

Pada penelitian sebelumnya Hutasoit dan Ramdhan (2009) melakukan simulasi numerik di DAS Cisangkuy, tetapi terdapat keterbatasan simulasi di mana sungai didefinisikan sebagai *constant head* padahal pada kenyataannya kondisi sungai berfluktuasi secara spasial dan temporal tergantung morfologi dan curah hujan. SWAT-MODFLOW merupakan model penggabungan simulasi air tanah dan air permukaan yang dikembangkan untuk memberikan kondisi batas air permukaan yang lebih dinamis terhadap kondisi air tanah dan sebaliknya (Bailey, 2016)

DAS Cisangkuy merupakan salah satu hulu sungai yang berperan signifikan dalam sistem hidrologi Sungai Citarum. Pertanian merupakan mata pencaharian utama di sekitar DAS Cisangkuy, oleh karena itu sumber daya air dari sungai ini berperan penting untuk memenuhi kebutuhan sektor pertanian dan perkebunan. Selain itu, aliran Sungai Cisangkuy juga digunakan untuk PLTA. Namun, sungai ini juga memberi kontribusi besar pada debit banjir di daerah hilirnya yaitu Banjarnegara. Banyaknya objek vital yang dilalui dan besarnya dampak dari luapan sungai ini maka pengelolaan yang baik mutlak diperlukan untuk menjaga kuantitas sungai ini. Pengelolaan yang baik adalah pengelolaan komprehensif yang di dalamnya termasuk mempertimbangkan aspek air tanah dan air permukaan.

Demikian pentingnya peran sungai ini baik dalam sistem hidrologi dan hidrogeologi Sungai Citarum maupun kebermanfaatannya terhadap kehidupan manusia di sekitarnya. Hal inilah yang menjadi motivasi untuk mempelajari interaksi hidrologi dan hidrogeologi di DAS Cisangkuy.

Dengan pertimbangan latar belakang di atas, studi ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan *coupled model* SWAT-MODFLOW dalam mensimulasikan hubungan air permukaan dan air tanah di DAS Cisangkuy.

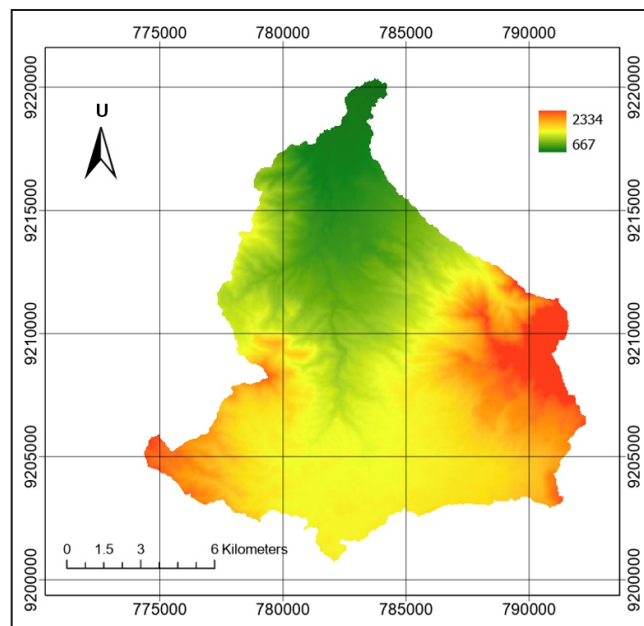
DAS Cisangkuy, Kabupaten Bandung, berada pada koordinat geografis 107° 28' 55" - 107° 39' 84" BT dan 6° 59' 24" - 7° 13' 51" LS dengan elevasi berkisar 667 hingga 2334 di atas muka air laut dengan lereng relatif landai hingga terjal serta memiliki morfologi lembahan yang diapit di antara dua gunung yaitu Gunung Tilu dan Gunung Puntang (Gambar 1). Daerah Hulu DAS Cisangkuy didominasi perkebunan, sementara bagian hilirnya didominasi sawah dan pemukiman. Aliran Sungai Cisangkuy dimanfaatkan masyarakat untuk irigasi dan pembangkit listrik. DAS Cisangkuy adalah wilayah yang didominasi dengan tata guna lahan sawah, pertanian, pemukiman, dan hutan.

Berdasarkan *Peta Geologi Lembar Garut - Pamungpeuk* (Alzwardi, 1992) dan pengamatan lapangan, sebagian besar litologi akuifer pada DAS Cisangkuy merupakan batuan vulkanik yang dihasilkan oleh letusan gunung api di sekitarnya (Gambar 2). Batuan vulkanik ini terdiri atas perselingan breksi vulkanik, tufa dan sisipan lava basal dengan arah persebaran mengikuti topografi yang lebih rendah. Akuifer ini disetarakan dengan Formasi Cibeureum berdasarkan kesamaan properti fisiknya (Hutasoit, 2009).

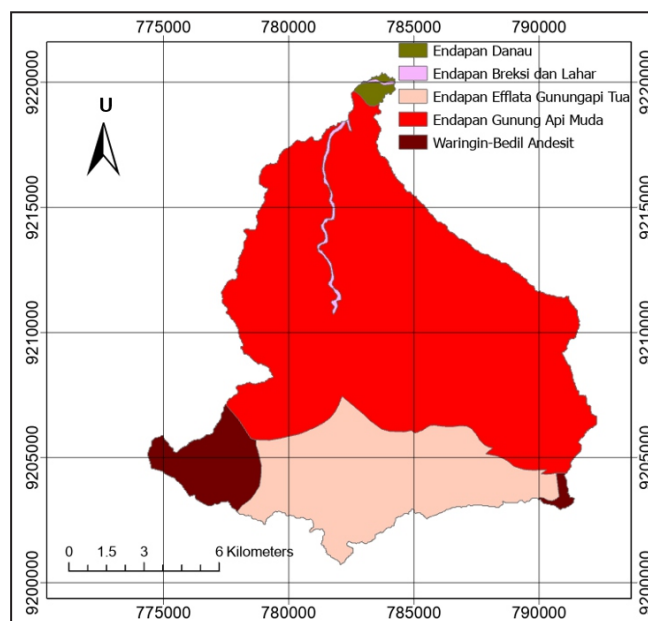
Secara regional daerah penelitian tersusun atas Formasi Cibeureum sebagai akuifer utama dan Formasi Kosambi sebagai akuitar. Formasi Cibeureum terdiri atas perulangan breksi dengan tuf, dengan tingkat konsolidasi rendah serta beberapa sisipan lava basal, dengan umur Plistosen Akhir - Holosen. Breksi dalam formasi ini adalah breksi vulkanik yang disusun oleh fragmen-fragmen skorja batuan beku andesit - basal dan batu apung (Koesoemadinata dan Hartono, 1981).

METODE PENELITIAN

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) adalah model hidrologi yang menggambarkan proses fisis, dan dikembangkan oleh *US Department of Agriculture* (Arnold drr., 1998). Pengembangannya ditujukan untuk mensimulasikan dampak dari



Gambar 1. Model elevasi daerah penelitian (SRTM-DEM).



Gambar 2. Geologi Regional Daerah Penelitian (Dimodifikasi dari Alzwak drr., 1992).

tata guna lahan dan perubahan iklim terhadap kuantitas dan kualitas air. SWAT mencakup proses hidrologi air permukaan seperti curah hujan, temperatur, aliran sungai, limpasan, kandungan air di tanah, evapotranspirasi aktual, dan resapan. SWAT menggabungkan berbagai proses seperti pergerakan air di tanah, sungai, karakteristik lahan, hujan, dan temperatur. SWAT dapat

memberikan gambaran proses pada lapisan tanah hingga kedalaman 2 m (Neitsch drr., 2009; Bailey drr., 2016)). Model SWAT menghitung kesetimbangan air dan kesetimbangan fisis lainnya pada setiap (*Hydrologic Response Unit*) HRU. HRU merupakan pembagian unit DAS yang didefinisikan berdasarkan jenis tanah, tata guna lahan, dan kemiringan lereng pada *subbasin*. Persamaan (1) merupakan persamaan

kesetimbangan air di setiap HRU ditunjukkan berikut (Neitsch dr., 2009):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \dots\dots\dots (1)$$

Pada Persamaan (1), SW_t menunjukkan soil water content akhir, SW_0 menunjukkan soil water content awal pada hari (i), t adalah waktu dalam hari, R_{day} adalah jumlah presipitasi pada hari (i), Q_{surf} menunjukkan limpasan permukaan, E_a menunjukkan evapotranspirasi, W_{seep} adalah air yang memasuki zona tak jenuh, dan Q_{gw} menunjukkan return flow. Pada persamaan kesetimbangan air ini, setiap parameter dihitung dalam mm H_2O yang dihitung untuk setiap hari (i). Data dari perhitungan HRU kemudian digunakan untuk perhitungan kesetimbangan air yang mencakup debit sungai ($Q_{surf} + Q_{gw}$) dan resapan air tanah (Arnold dr., 1998; Bailey dr., 2016). Resapan air tanah di swat di hitung rujuk ke (2) yaitu sebagai berikut:

$$w_{rchrg,i} = \left(1 - \exp\left[-\frac{1}{\delta_{gw}}\right]\right) \cdot W_{seep} + \exp\left[-\frac{1}{\delta_{gw}}\right] \cdot w_{rchrg,i-1} \dots (2)$$

Di mana W_{rchrg} adalah jumlah resapan yang masuk ke akuifer pada hari i (mm), δ_{gw} (hari) adalah *delay time* dan *drainage time* pada lapisan akifer tersebut, W_{seep} adalah air yang memasuki zona tak jenuh, dan $W_{rchrg,i-1}$ adalah jmlah resapan yang memasuki akuifer pada hari ke i-1.

Di sisi lain MODFLOW dapat mencakup proses air tanah pada zona jenuh dan luahan air tanah ke permukaan. SWAT mensimulasikan proses fisis yang mencakup tanah, tanaman, air di zona akar dan cuaca, sementara MODFLOW mencakup aliran air tanah tiga dimensi dan juga pemompaan. SWAT-MODFLOW bekerja dengan cara mengganti proses air tanah di SWAT dengan MODFLOW yang mampu memberikan gambaran simulasi air tanah yang lebih dinamis dan detail secara temporal (Kim dr., 2008; Guzman dr., 2015; Bailey dr., 2016).

Proses utama yang dilakukan model SWAT-MODFLOW adalah menyalurkan hasil perhitungan perkolasi dari SWAT pada setiap HRU ke *grid cell* MODFLOW.

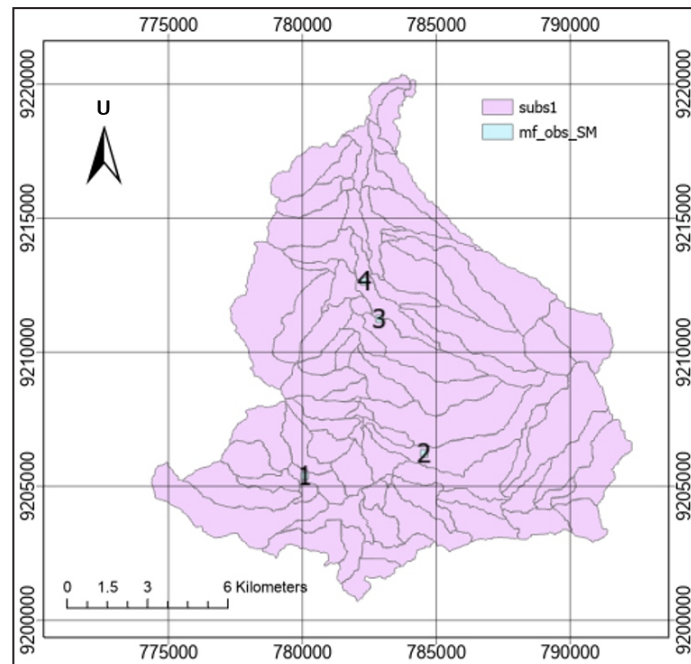
Pengintegrasian MODFLOW-NWT (Niswonger dr., 2011) dengan SWAT dilakukan pada dua variabel yaitu perkolasi dalam (air yang meninggalkan zona akar dianggap sebagai resapan) dan muka air sungai dari SWAT ke MODFLOW-NWT.

Perkolasi dalam yang disimulasikan SWAT dipetakan ke dalam *grid cell* yang berhimpitan dengan setiap grid MODFLOW yang dijadikan sebagai input resapan ke MODFLOW-NWT untuk menghitung muka air tanah.

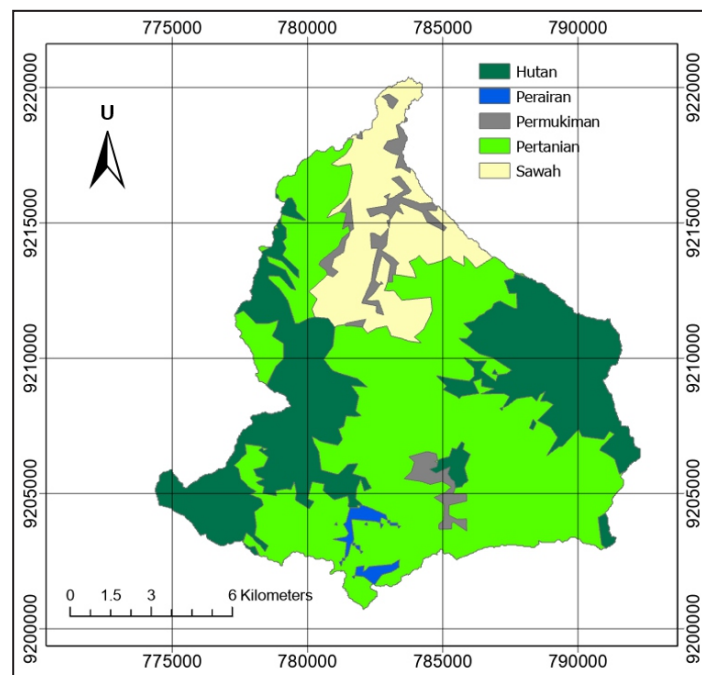
ArcSWAT 2012 digunakan untuk membangun model SWAT daerah penelitian karena kemampuannya untuk memvisualisasikan hasilnya di ArcMap. Data yang dibutuhkan dalam model SWAT ini adalah data elevasi, tata guna lahan, jenis tanah, dan klimatologi.

Data elevasi menggunakan data *Digital Elevation Model* (DEM) yang beresolusi 30 m yang berasal dari *NASA Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM). DEM ini digunakan untuk mendelineasi DAS ke dalam 103 *subbasin* (Gambar 3). Model menghitung arah dan akumulasi air permukaan dan tanah berdasarkan kemiringan, jaringan sungai, dan titik outlet yang telah ditentukan. Titik outlet ini disesuaikan dengan titik pemantauan Sungai Cisangkuy - Kamasan dengan data dari Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air (PUSAIR), Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), untuk keperluan verifikasi debit yang dihasilkan oleh model SWAT-MODFLOW.

Peta tata guna lahan hasil interpretasi gambar satelit landsat di lokasi penelitian pada tahun 2011 dengan metode Vitriana (2015) (Gambar 4) dan jenis tanah Tahun 2005 - 2006 dari Badan Geologi (Gambar 5). Menurut Undang-Undang Tata Ruang yang dibuat oleh Departemen Perumahan dan Prasarana Wilayah (Kimpraswil), kemiringan lereng dibagi menjadi lima kelas,



Gambar 3. Pembagian *subbasin* oleh ArcSWAT.

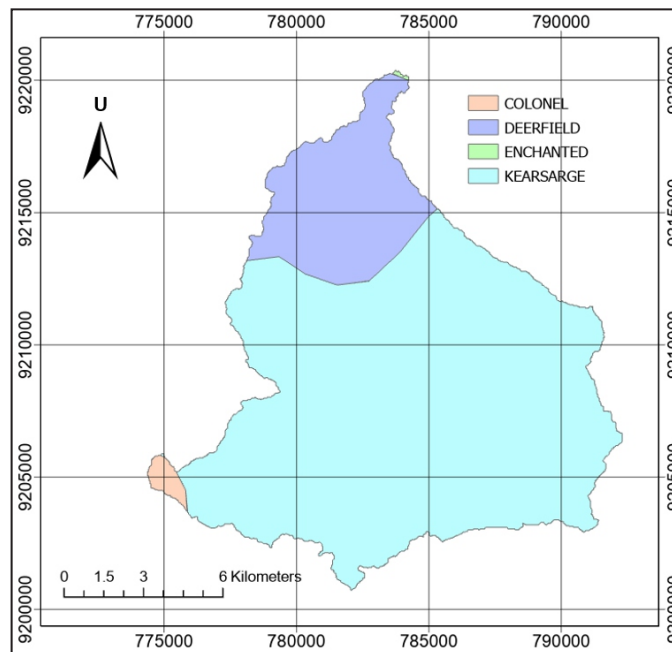


Gambar 4. Peta Tata Guna Lahan (Dimodifikasi dari Vitriana, 2015).

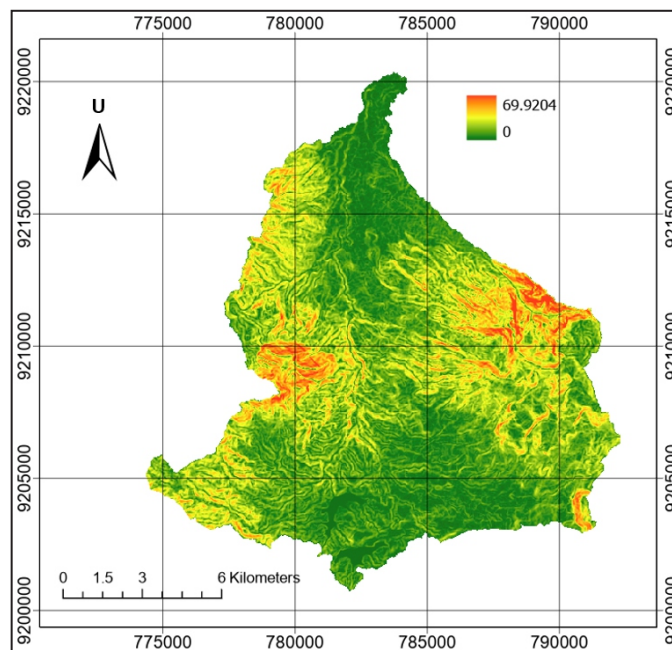
yaitu datar (0-8%), landai (8-15%), agak curam (15-25%), curam (25-40%) dan sangat curam (>40%) (Gambar 6).

Perhitungan SWAT dilakukan di tiap HRU. HRU adalah subbagian yang dikategorikan ber-

dasarkan kesamaan jenis tanah, jenis lahan, dan kemiringan lereng tetapi tidak dibedakan antar-*subbasin* (Bailey drr., 2016). Hasil perhitungan di tiap HRU dijumlahkan hingga tiap *subbasin*. Untuk penggunaan pada umumnya, *threshold land use* (20%), *Soil threshold* (10%), dan *slope*



Gambar 5. Peta Jenis Tanah (Dimodifikasi dari Badan Geologi, 2006).



Gambar 6. Peta Kemiringan Lereng (dalam derajat).

threshold (20%) (Winchell dr., 2007).

Tahap akhir dari pembangunan model SWAT adalah memasukkan data klimatologi harian pada model yang meliputi curah hujan, temperatur, kelembaban relatif, kecepatan angin, dan radiasi matahari untuk tahun 2002 hingga 2013 (12 tahun). Data curah hujan diambil dari data

pengamatan pada titik pengamatan Cileunca, yang didapatkan dari PUSAIR. Sementara data iklim lainnya diambil dari <https://global.weather.tamu> dengan *warm up* periode 3 tahun. Kalibrasi dilakukan pada tahun 2005-2009.

Penggabungan SWAT dan MODFLOW dilakukan melalui QSWATMOD (Park dr., 2019),

sebuah *Graphical User Interface* (GUI) untuk menggabungkan keduanya. Inti dari proses ini adalah mendisregasi HRU SWAT menjadi DHRU. Proses ini mengubah HRU menjadi polygon yang memiliki koordinat (Park dan Bailey, 2017). Setelah HRU terbagi sehingga dapat sesuai dengan koordinat *grid modflow*, QSWATMOD membuat file penghubung antara grid DHRU SWAT dengan grid MODFLOW agar bisa dilakukan transfer data untuk perhitungan.

Tahap selanjutnya adalah pembangunan model MODFLOW yang memasukkan data DEM lokasi penelitian dengan resolusi 30 m, ketebalan akuifer yaitu 100 m (Koesoemadinata dan Hartono, 1981), Konduktivitas hidrolik 4×10^{-5} m/detik (Hutasoit dan Ramdhan, 2009), *Specific Storage*: 4×10^{-5} /m (*dense sand*) (Domenico and Mifflin [1965] dalam Batu [1998]), *Specific Yield*: 0.21 (*tuff*) (Morris and Johnson 1967), K dari *River Bed material* 4×10^{-5} m/detik, dan *initial groundwater depth* 3.5 m berdasarkan pengamatan rata-rata kedalaman muka air tanah di lokasi penelitian. Kondisi batas yang digunakan pada model air tanah MODFLOW telah disediakan dari model SWAT sebelumnya, inilah keunggulan dari SWAT-MODFLOW di mana kondisi batas terintegrasi antara model SWAT dan MODFLOW yaitu berupa sungai, batas DAS, dan nilai resapan, sehingga memungkinkan menghasilkan model yang hasilnya saling berkaitan antara model air tanah dan model air permukaan. Setelah semua data dimasukkan dilakukan pengaturan untuk simulasi yang ingin dilakukan. Seperti lamanya waktu simulasi dan *output* yang diinginkan. Perlu diketahui bahwa kualitas hasil dari SWAT-MODFLOW sangat bergantung pada kualitas input masing-masing model SWAT dan MODFLOW.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Model SWAT - MODFLOW dari model DAS Cisangkuy dikalibrasi selama 5 tahun (2005 - 2009). Kalibrasi terhadap debit sungai di titik pengamatan Cisangkuy - Kamasan secara bu-

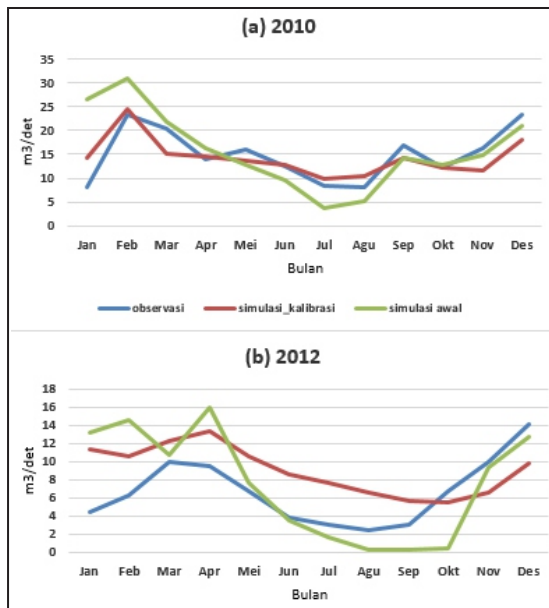
lanan. Untuk simulasi yang optimal dibutuhkan *warm-up periode* selama 3 tahun sehingga data yang digunakan total adalah 8 tahun dari tahun 2002 hingga tahun 2009 untuk kalibrasi. Penelitian ini mengkalibrasi 14 parameter yang dipilih mengikuti penelitian Kusumawardani (2017) tetapi penelitian ini memakai nilai yang berbeda dibandingkan penelitian sebelumnya (Tabel 1).

Tabel.1 Parameter yang digunakan untuk kalibrasi model pada penelitian ini diambil dari Kusumawardani, M. drr (2017)

Parameter_Name	Min Value	Max Value	Fitted Value
R_CN2.mgt	-0,5	0.5	-0,49
V_ALPHA_BF.gw	0	1	0,89
V_GW_DELAY.gw	0	450	76,5
V_GWQMN.gw	0	5000	1750
V_CH_K2.rte	0	500	265
V_CH_N2.rte	0	1	0,97
V_ESCO.hru	0	1	0,71
V_EPCO.hru	0	1	0,39
V_REVAPMN.gw	0	500	395
V_SURLAG.bsn	0	20	5,4
R_GW_REVAP.gw	0	0.2	0,094
V_RCHRG_DP.gw	0	1	0,95
V_SLSUBBSN.hru	0	150	64,5
V_SHALLST_N.gw	1000	2000	1890

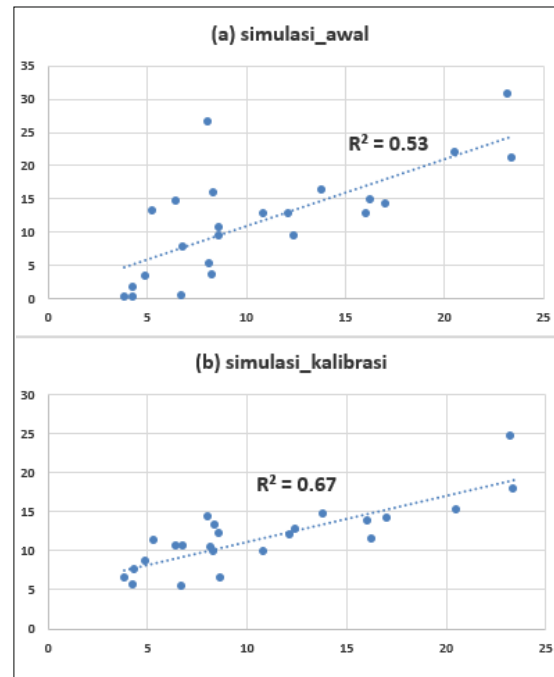
Setelah dikalibrasi model SWAT - MODFLOW disimulasikan dari tahun 2009 - 2013. Dikarenakan data observasi yang lengkap hanya ada pada tahun 2010 dan 2012, sehingga perbandingan simulasi terhadap observasi yang ditampilkan hanya pada tahun 2010 dan 2012. Hasil simulasi SWAT - MODFLOW dan hasil kalibrasi SWAT - MODFLOW ditunjukkan secara bulanan dibandingkan dengan nilai debit air pada titik pantau di ujung hilir DAS pada tahun 2010 dan 2012. Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan nilai debit model kalibrasi memiliki $R^2 = 0.67$, sementara nilai debit simulasi awal nilai $R^2 = 0.52$.

Nilai resapan pada DAS Cisangkuy hasil simulasi SWAT-MODFLOW umumnya dipengaruhi oleh tata guna lahan, kemiringan lereng, dan juga curah hujan. Dari Gambar 9 terlihat bahwa nilai resapan maksimal berada pada lereng landai dan tata guna lahan perkebunan sementara nilai resapan paling rendah berada pada lereng



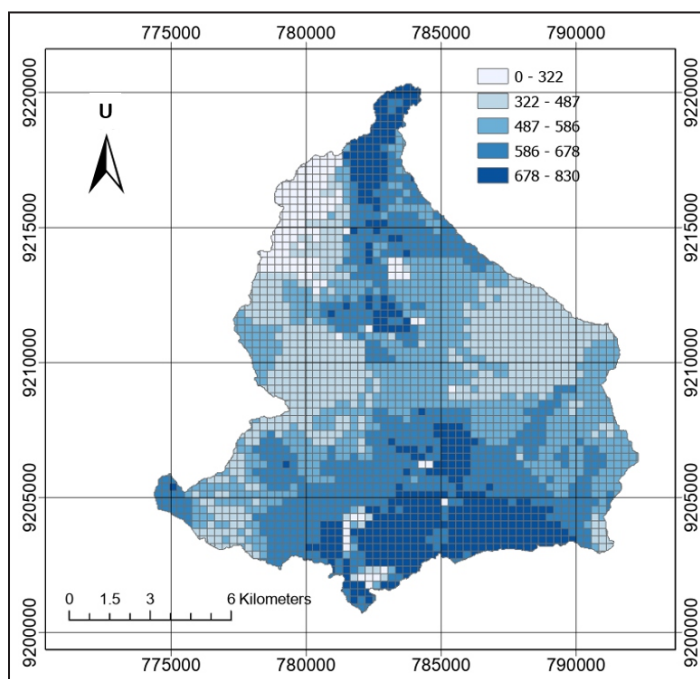
Gambar 7. Perbandingan debit hasil kalibrasi dan simulasi awal terhadap data observasi pada tahun 2010 (a) dan 2012 (b).

terjal dan tata guna lahan pemukiman atau lahan jenuh air. Hal ini disebabkan karena pada lereng terjal air lebih banyak menjadi limpasan, sementara pada daerah pemukiman dan lahan jenuh air adalah zona kedap air. Nilai resapan berkisar 0 - 957 mm/ bulan.



Gambar 8. Nilai R^2 untuk simulasi awal (a) dan simulasi kalibrasi (b).

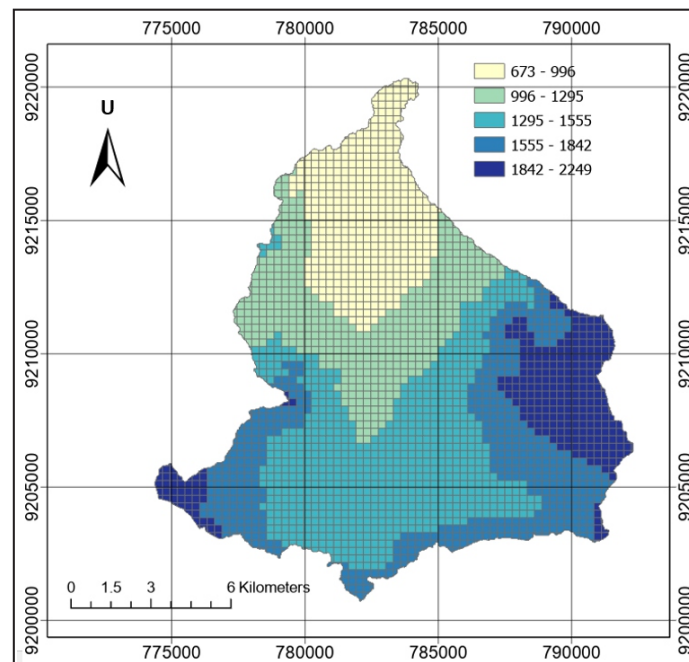
Muka air tanah yang disimulasikan SWAT-MOD-LOW secara *transient* sudah merepresentasikan kondisi di lapangan, di mana MAT koheren dengan keragaman elevasi permukaan (Gambar 10).



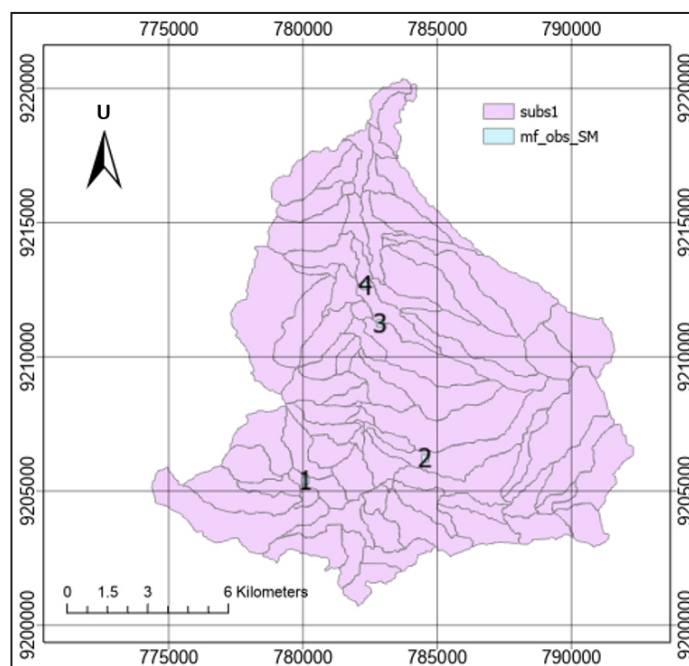
Gambar 9. Nilai Resapan (mm/ bulan) koheren dengan keragaman tata guna lahan dan kemiringan lereng.

SWAT-MODFLOW dapat memperlihatkan fluktuasi muka air tanah pada lokasi yang kita inginkan, pada penelitian ini ditunjukan pola fluktuasi di hulu dan hilir (Gambar 11). Pada gambar di bawah terlihat bahwa fluktuasi muka air tanah hasil simulasi SWAT-MODFLOW

sudah mendekati kedalaman muka air tanah hasil observasi lapangan. Dikarenakan berbagai keterbatasan, penelitian ini melakukan pengamatan muka air tanah lapangan satu kali. Fluktuasi muka air tanah dapat mengikuti fluktuasi perubahan curah hujan dari bulan ke bulan.

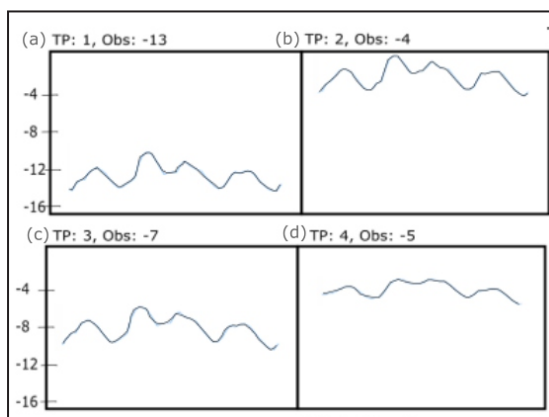


Gambar 10. Peta MAT DAS Cisangkuy (meter).



Gambar 11. Titik pengamatan fluktuasi muka air tanah.

Fluktuasi di hulu (Gambar 12 (a) dan (b)) maupun di hilir (Gambar 12 (c) dan (d)) pada lokasi-lokasi yang berdekatan dengan sungai memiliki fluktuasi seragam dengan besar fluktuasi 1-2 m. Secara keseluruhan fluktuasi muka air tanah sudah dapat mengikuti fluktuasi kondisi nyata di lapangan. Beberapa lokasi yang nilai muka air tanah simulasi dan observasinya jauh berbeda dapat diakibatkan ukuran *grid* yang terlalu besar, sehingga tidak dapat merepresentasikan kondisi di lapangan yang lebih dinamis topografi dan karakteristik akuifernya.



Gambar 12. Grafik fluktuasi kedalaman muka air tanah pada titik pantau (TP) di hulu (a) dan (b), hilir (c) dan (d) terhadap kedalaman MAT hasil observasi (Obs) hasil simulasi *transient* tahun 2009 - 2013.

KESIMPULAN

Pada umumnya fluktuasi muka air tanah DAS Cisangkuy yang disimulasikan melalui SWAT-MODFLOW relatif mengikuti tren fluktuasi curah hujan. SWAT-MODFLOW juga dapat memperlihatkan dampak dari tata guna lahan, morfologi, dan klimatologi terhadap nilai resapan dan luasan di daerah penelitian baik secara spasial maupun temporal. Hal yang paling mempengaruhi nilai resapan adalah morfologi dan tata guna lahan, sehingga terlihat resapan tertinggi berada pada morfologi landai dan tata guna lahan yang *permeable*. Input resapan secara spasial maupun temporal membantu pemodelan fluktuasi air tanah di daerah penelitian yang lebih representatif sesuai kondisi curah hujan. Kelemahan yang terjadi pada

model SWAT-MODFLOW ditentukan oleh faktor pemahaman pengguna akan pembangunan model konseptual dan keterbatasan input data permukaan. Pendefinisian beda elevasi muka air tanah dan muka air sungai pada setiap *grid cell* di MODFLOW masih terbatas berdasarkan peta DEM yang memiliki resolusi beragam, serta keberagaman nilai Konduktivitas hidrolik di lapangan belum mampu teramati secara keseluruhan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan terselesaikannya karya publikasi ini, penulis menyampaikan terimakasih kepada rekan-rekan dan dosen di Magister Teknik Air Tanah ITB, newton fund, dan beasiswa LPDP yang telah membantu dalam proses penulisan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbaspour, K. C., 2015. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs- A User Manual, Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), EAWAG. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf, Switzerland. User Manual, 100p. <https://doi.org/10.1007/s00402-009-1032-4>
- Alzwar, M., Akbar, N., dan Bachri, S., 1992. Peta Geologi Lembar Garut dan Pameungpeuk, Jawa Barat, Skala 1:100.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Bandung.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment Part 1: model development. Journal of American Water Resource Association, 34, 73-89. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.
- 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. Texas Water Resources Institute, TR-439
- Bailey, R. T., Wible, T. C., Arabi, M., Records, R. M., & Ditty, J., 2016. Assessing Regional-Scale Spatio-Temporal Patterns of Groundwater-Surface Water Interactions using a Coupled SWAT-MODFLOW model. (March). <https://doi.org/10.1002/hyp.10933>
- Bailey, R. T., Rathjens, H., Bieger, K., Chaubey, I., Arnold, J. G., 2017a. SWATMOD-Prep: Graphical user interface for preparing coupled SWAT-MODFLOW simulations. Journal of the American Water Resources Association, JAWRA-15-0204-P.
- Bejranonda, W., & Koch, M., 2013. Surface water and groundwater dynamic interaction models as guiding tools for optimal conjunctive water use policies in the central plain of Thailand. 2079–2086. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1007-y>
- Brunner, P., & Simmons, C. T., 2012. Hydro-GeoSphere : A Fully Integrated , Physically Based Hydrological Model. (2), 170–176.
- Chunn, D., Famarzi, M., Smerdon, B., & Alessi, D. S., 2019. Application of an Integrated SWAT – MODFLOW Model to Evaluate Potential Impacts of Climate Change and Water Withdrawals on Groundwater – Surface Water Interactions in. <https://doi.org/10.3390/w11010110>
- Domenico, P.A., Mifflin, M.D., 1965. Water from low-permeability sediments and land subsidence. Water Resour. Res. 1, 563–576.
- Fleckenstein, J., Zaps, D., Rüger, L. J., Lehmyer, L., Freiberg, F., Lang, P. M., & Irnich, D., 2010. Discrepancy between prevalence and perceived effectiveness of treatment methods in myofascial pain syndrome: Results of a cross-sectional, nationwide survey.
- Guzman, J. A., Moriasi, D. N., Gowda, P. H., Steiner, J. L., Starks, P. J., Arnold, J. G., Srinivasan, R., 2015. A model integration framework for linking SWAT and MODFLOW. Environmental Modelling & Software, Volume 73, 103-116.
- Hutasoit L.M., 2009. Groundwater condition of Bandung area, with and without artificial recharge: numerical simulation results (in Indonesian). Indo J Geosci 4:1777–1188
- Hutasoit, L.M. dan Ramdhan, A.M., 2009. Analisis data sumur pemboran air tanah di daerah Bandung dan sekitarnya. Geoaplika (dalam persiapan).
- Irawan, D. E., Silaen, H., Sumintadireja, P., Lubis, R. F., Brahmantyo, B., & Puradimaja, D. J., 2014. Groundwater – surface water interactions of Ciliwung River streams , segment Bogor – Jakarta , Indonesia. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3482-4>
- Johnson A.I., 1967. Specific yield – compilation of specific yields for various materials. US Geol Surv Water-Supply Paper 1662-D, 74pp
- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S., Arnold, J. G., 2008. Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. Journal of Hydrology (2008), 356, 1-16.
- Koesoemadinata, R.P. dan Hartono, D., 1981. Stratigraf dan Sedimentasi Daerah Bandung. Proceedings PIT X Ikatan Ahli Geologi Indonesia, Bandung, h.318 - 336.
- Kusumawardani, M., Yayat, H., Kukuh, M., 2017. Analisis respon hidrologi dan kualitas air das cisangkuy, Pascasarjan IPB.
- [NCEP] The National Centers for Environmental Prediction., 2015. Global Weather Database for SWAT. Texas (US): Agricultural Research Service US. Diunduh pada 18 November 2015 tersedia dari <http://globalweather.tamu.edu/>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., 2009. Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation, Version 2009. Texas Water Resources Institute, TR-406.
- Niswonger, R. G., Panday, S., Ibaraki, M., 2011. MODFLOW-NWT, A Newton formulation for MODFLOW-2005. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A37, 44pp
- Park, S., Bailey, R. T., 2017. SWAT-MODFLOW Tutorial – Documentation for preparing

- model simulations. Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University, 56pp.
- Park, S., Nielsen, A., Bailey, R. T., Trolle, D., & Bieger, K., 2019a. A QGIS-based graphical user interface for application and evaluation of SWAT-MODFLOW models. *Environmental Modelling and Software*, (November), 493-497. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.017>
- Riantini Virtriana, Irawan Sumarto, Albertus Deliar, Udjianna S Pasaribu, and Moh. Taufik., 2015. "Model of land cover change prediction in West Java using cellular automata-Markov chain (CA-MC)". *AIP Conference Proceedings* 1658, 060008 (2015). DOI: 10.1063/1.4915060
- Waibel M.S., Gannett M.W., Chang H, Hulbe C.L., 2013. Spatial variability of the response to climate change in regional groundwater systems-examples from simulations in the Deschutes Basin, Oregon. *J Hydrol* 486:187–201
- Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M., & Arnold, J., 2010. ArcSWAT interface for SWAT 2009: User's guide. Temple, Tex.: Blackland Research and Extension Center, Texas AgriLife Research, and USDA-ARS Grassland, Soil, and Water Research Laboratory
- Zhang, B., Song, X., Zhang, Y., & Wang, Z., 2015. The relationship between and evolution of surface water and groundwater in Songnen Plain, Northeast China. *Environmental Earth Sciences*, 8333–8343. DOI: 10.1007/s12665-014-3995-