© 2026 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP
JURNAL ILMU LINGKUNGAN
Volume 24 Issue 6 (2026) : 1572-1583 *ISSN 1829-8907*

Analisis Dampak Perubahan Penggunaan Lahan terhadap Imbangan Air menggunakan Model SWAT+ gwflow di Sub DAS Elo, Kabupaten Magelang

Sri Ningsih[1,2*], Tjahyo Nugroho Adji[1], dan Langgeng Wahyu Santosa[1]

[1]Magister Ilmu Lingkungan (Minat Studi Magister Pengelolaan Lingkungan), Sekolah Pascasarjana, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia; email: sriningsih1991@mail.ugm.ac.id
[2]Kementerian Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Indonesia

ABSTRAK

Analisis imbangan air penting untuk memahami fungsi hidrologis Daerah Aliran Sungai (DAS) dalam mendukung pengelolaan lingkungan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan menganalisis dinamika imbangan air sebagai respon perubahan penggunaan lahan di Sub DAS Elo, Kabupaten Magelang, menggunakan model SWAT+ gwflow yang mengintegrasikan imbangan air permukaan dan air tanah. Analisis perubahan penggunaan lahan pada periode 2014-2024 menunjukkan peningkatan lahan pertanian kering dan pemukiman yang menggantikan pertanian lahan kering campur. Perluasan pertanian lahan kering dominan terjadi di hulu, sedangkan pemukiman berkembang di bagian tengah hingga hilir DAS. Analisa imbangan air yang disimulasikan menggunakan SWAT+ *gwflow* menunjukkan performa baik pada tahap kalibrasi (R^2 = 0,76 dan NSE = 0,70) dan tahap validasi (R^2 = 0,74 dan NSE = 0,72). Simulasi pada setiap skenario penggunaan lahan menunjukkan perubahan distribusi nilai komponen neraca air rata-rata tahunan yaitu peningkatan nilai *surface runoff* (+11 mm), penurunan *lateral flow* (-7,12 mm), serta penurunan perkolasi (-6,67 mm). Pada imbangan air tanah komponen *recharge* menurun, pertukaran air antara saluran dan sistem air tanah (swgw) menunjukkan peningkatan, air tanah dalam profil tanah (gwsoil) menurun dan perubahan simpanan air tanah (dvol) meningkat. Hasil analisis imbangan air dijalankan dengan model yang memiliki nilai ketidakpastian sehingga memiliki nilai *error* imbangan air permukaan sekitar 8,9 – 11,7 mm dan nilai *error* imbangan air tanah 0,09 – 0,1 mm. Hasil penelitian menunjukkan adanya perubahan respon komponen imbangan air terhadap skenario perubahan penggunaan lahan, baik pada komponen air permukaan maupun air tanah, sehingga pengendalian perubahan penggunaan lahan penting untuk menjaga keberlanjutan sumber daya air di Sub DAS Elo.

***Kata kunci*:** imbangan air, perubahan penggunaan lahan, Sub DAS Elo, SWAT+ gwflow

ABSTRACT

Water balance analysis is essential for understanding watershed hydrological functioning and supporting sustainable environmental management. This study examines water balance dynamics in response to land-use changes in the Elo Sub-watershed, Magelang Regency, Indonesia, using the SWAT+ gwflow model which integrates surface water and groundwater balances. Land-use change analysis over the 2014–2024 period revealed an increase in dryland agriculture and settlement areas, which replaced mixed dryland agriculture. Dryland agriculture expanded mainly in the upper watershed, while settlement areas expanded in the middle and lower reaches. SWAT+ gwflow performance was satisfactory during calibration (R^2 = 0.76 and NSE = 0.70) and validation (R^2 = 0.74 and NSE = 0.72). Simulations under different land-use scenarios indicated changes in the distribution of mean annual water balance components, including an increase in surface runoff (+11 mm), a decrease in lateral flow (−7.12 mm), and a decrease in percolation (−6.67 mm). Regarding the groundwater balance, recharge decreased, while water exchange between the stream network and the groundwater system (swgw) increased, groundwater transfer to the soil profile (gwsoil) decreased, and groundwater storage change (dvol) also varied between scenarios. The water balance analysis was subject to model uncertainty, with surface water balance residuals ranging from 8.9 to 11.7 mm and groundwater balance residuals ranging from 0.09 to 0.1 mm. These findings demonstrate that land-use change scenarios produce variations in water balance components in both the surface water and groundwater systems, highlighting the importance of sustainable land-use management to maintain water resource sustainability in the Elo Sub-watershed.

Keywords: water balance, land-use change, Sub DAS Elo, SWAT+ gwflow

Citation: Ningsih, S., Adji, T. N., dan Santosa, L. W. (2026). Analisis Dampak Perubahan Penggunaan Lahan terhadap Imbangan Air menggunakan Model SWAT+ gwflow di Sub DAS Elo Kabupaten Magelang. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(6), 1572-1583, doi:10.14710/jil.24.6.1572-1583

1. PENDAHULUAN

Perubahan penggunaan lahan merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi keseimbangan hidrologi di Daerah Aliran Sungai, melalui pengurangan evapotranspirasi dan kapasitas infiltrasi tanah, yang secara langsung memicu peningkatan limpasan permukaan sekaligus mengurangi pengisian ulang cadangan air tanah dalam siklus tahunan (Silva *et al*., 2024; Wang & Tan, 2025). Perubahan penggunaan lahan dapat disebabkan oleh tingginya kepadatan penduduk yang menimbulkan pusat kegiatan untuk pertumbuhan ekonomi kawasan (Chen *et al*., 2023). Odoh dan Nwokeabia (2024) menyatakan bahwa pertumbuhan akibat urbanisasi dan kegiatan pertanian sebagai faktor utama adanya perubahan penggunaan lahan, memicu penurunan area resapan air, peningkatan limpasan permukaan dan peningkatan resiko kontaminasi. Konversi lahan bervegetasi seperti hutan menjadi lahan pertanian, permukiman, maupun kegiatan antropogenik lainnya dapat menimbulkan dampak signifikan terhadap kondisi hidrologi, termasuk perubahan debit aliran, infiltrasi, dan ketersediaan air tanah (Sadath *et al*., 2023; Li *et al*., 2024a).

Sub DAS Elo yang terletak di Jawa Tengah, merupakan salah satu kawasan yang mengalami tekanan akibat intensifikasi penggunaan lahan. Potensi perubahan penggunaan lahan dipicu oleh keberadaan pusat Kota Magelang di bagian tengah – hilir DAS, dan juga oleh aktivitas pertanian dan pariwisata di bagian hulu DAS. Alih fungsi penggunaan lahan kawasan lindung di Sub DAS Elo mencapai 64,15%, diantaranya telah dikonversi menjadi kawasan pertanian dan perkebunan, sehingga memicu degradasi lahan dan menurunnya fungsi hidrologis DAS (Romadhona, 2015; Subkhannur, 2005). Kawasan Kota Magelang yang berada di bagian tengah sub DAS Elo, mengalami peningkatan luas sebesar 2,5 km^2 pada rentang tahun 2013-2023 (Prasetya dan Hamim, 2024). Bagian hilir sungai Elo yang berada di sekitar Kelurahan Wates Kota Magelang diketahui sering mengalami banjir terutama saat curah hujan tinggi, sebagai akibat padatnya permukiman perkotaan yang meningkatkan limpasan permukaan (Nugraheni, 2013). Kondisi ini menimbulkan tantangan dalam menjaga fungsi hidrologis DAS, yang sangat penting untuk mendukung keberlanjutan ekosistem dan kebutuhan masyarakat sekitar.

Kajian mengenai imbangan air menjadi penting sebagai indikasi dalam penilaian fungsi hidrologis DAS, karena fluktuasi pada komponen neraca air memberikan indikasi langsung mengenai kemampuan ekosistem dalam meregulasi aliran permukaan dan mempertahankan cadangan air tanah (Chen *et al*., 2024). Analisis imbangan air berbasis model hidrologi diperlukan untuk memetakan dinamika hidrologi DAS secara mendalam, sehingga mampu menyediakan basis data spasial yang akurat bagi perencanaan tata guna lahan yang berkelanjutan (Li *et al*., 2024b). Perkembangan terkini dalam kajian hidrologi menunjukkan bahwa model *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT+) telah banyak digunakan untuk menganalisis dampak perubahan penggunaan lahan terhadap tata air DAS (Dwivedi *et al*., 2024). Model ini mampu mensimulasikan proses hidrologi secara detail, termasuk interaksi antara curah hujan, aliran permukaan, infiltrasi, dan evapotranspirasi (Neitsch *et al*., 2011). Studi sebelumnya di Indonesia, seperti analisis imbangan air pada DAS Majalaya menunjukkan bahwa SWAT+ efektif dalam menganalisa proses hidrologi dalam DAS sehingga dapat mendukung upaya optimalisasi dan manajemen sumberdaya air (Kardhana *et al*., 2024).

Lebih lanjut, pengembangan SWAT+ dengan modul gwflow telah mempertimbangkan proses dalam komponen air tanah yang memungkinkan integrasi analisis air tanah dengan air permukaan, sehingga memberikan gambaran lebih realistis mengenai imbangan air di suatu DAS (Bailey *et al*., 2020; Yimer *et al*., 2023). Modul gwflow menyempurnakan perhitungan *baseflow* yang cenderung disederhanakan pada SWAT+, gwflow telah memperhitungkan recharge dari *Hydrological Response Unit* (HRU) SWAT+, aliran lateral dalam akuifer, Evapotranspirasi (ET) dari air tanah dangkal, pemompaan air tanah, interaksi air tanah–air permukaan melalui dasar sungai, dan *saturation excess flow* (Yimer *et al*., 2023). Pendekatan tersebut memberikan dasar yang lebih komprehensif untuk memahami dinamika neraca air dan menegaskan relevansi penggunaan SWAT+ gwflow untuk menganalisis kondisi hidrologi Sub DAS Elo.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis imbangan air di DAS Elo akibat perubahan penggunaan lahan dengan menggunakan model SWAT+ gwflow. Analisis ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai hubungan antara dinamika penggunaan lahan dan keseimbangan hidrologi, serta menjadi pertimbangan rekomendasi kebijakan pengelolaan DAS yang adaptif dan berkelanjutan. Signifikansi penelitian tidak hanya terletak pada kontribusi akademis dalam pengembangan ilmu hidrologi dan geografi, tetapi juga pada manfaat praktis bagi pengelolaan sumber daya air.

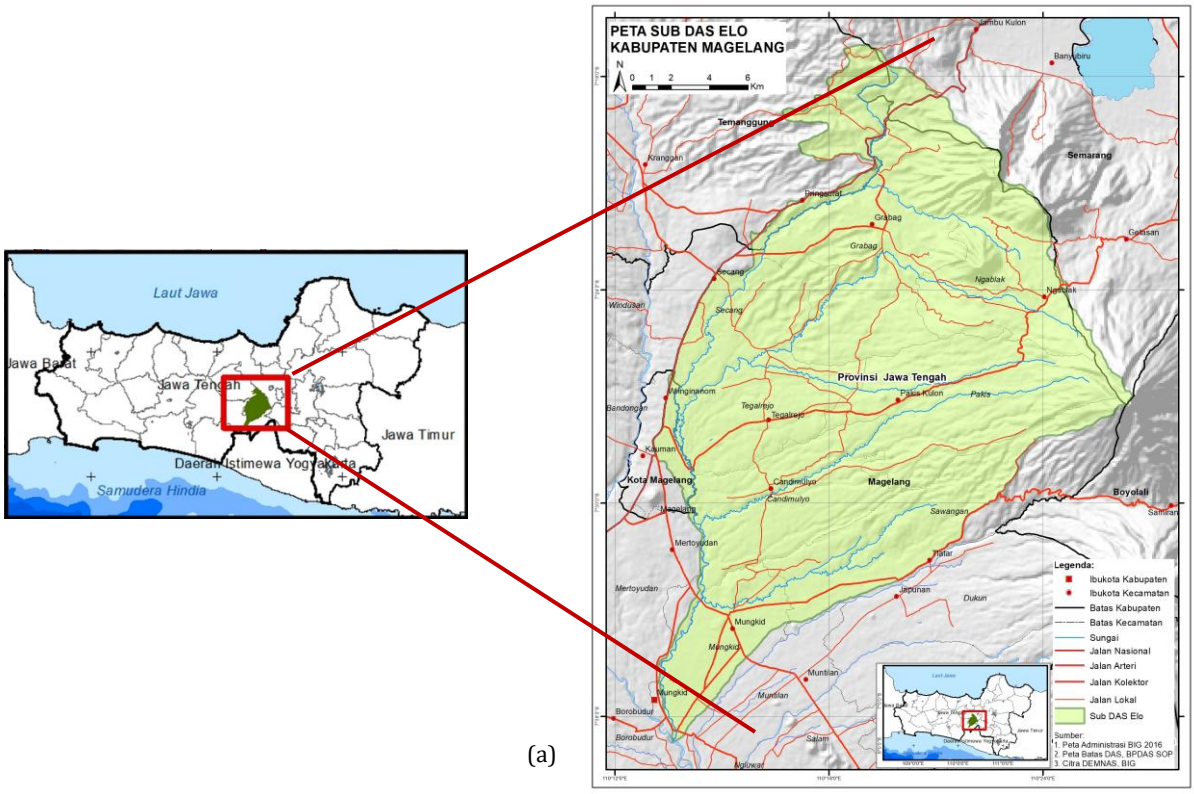
2. METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi penelitian

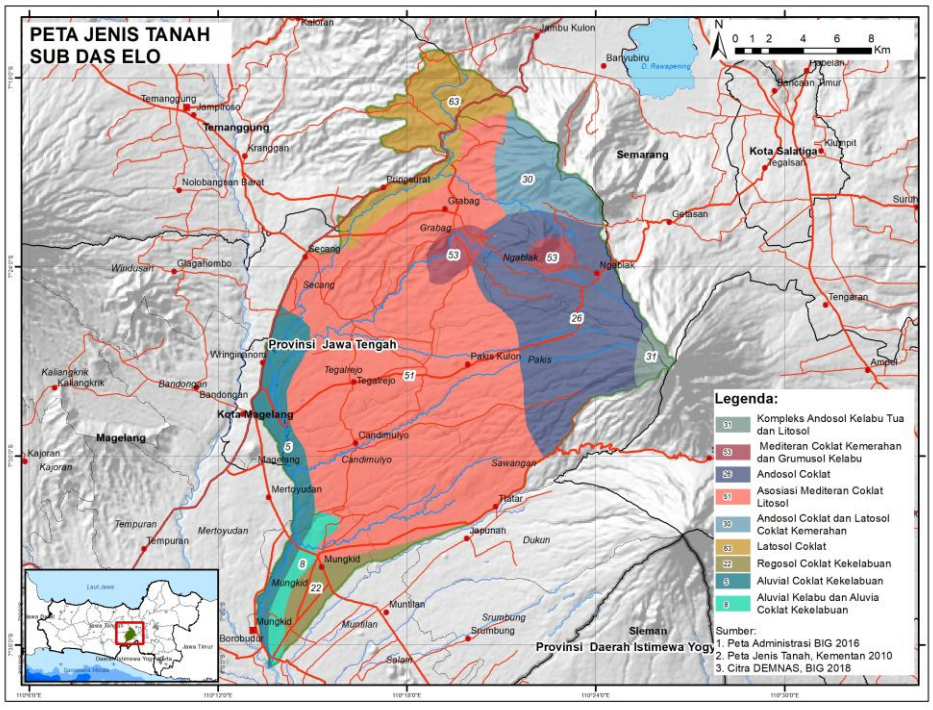
Daerah penelitian Sub DAS Elo secara administratif sebagian besar berada di wilayah Kabupaten Magelang Provinsi Jawa Tengah dengan luas sekitar 44.010 Ha (Gambar 1). Sub DAS Elo merupakan sebagian wilayah kawasan resapan air berdasarkan RTRW Kabupaten Magelang 2024-2044, berlokasi pada bentang lahan asal proses vulkanis sangat berpotensi menjadi kawasan resapan air, dan adanya potensi perubahan penggunaan lahan terutama oleh aktivitas pertanian, pariwisata dan urbanisasi. Secara geografis Sub DAS Elo berada pada 110°12’26” dan 110°26’15” Bujur Timur, dan antara 7°17’13” dan 7°46’40” Lintang Selatan. Secara

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

hidrologi Sub DAS Elo merupakan bagian dari DAS Progo yang memiliki hulu di lereng Gunung Sumbing dan Gunung Merbabu. Lokasi penelitian berada pada rentang ketinggian 250 hingga 3.150 mdpl, memiliki rata-rata kemiringan lereng 8-15%, dan rata-rata curah hujan tahunan 2.750-3.250 mm/tahun. Material penyusun litologi didominasi oleh material endapan volkanik muda, dengan jenis tanah yang dominan adalah tanah Andosol berasal dari material vulkanis Gunung Merbabu.

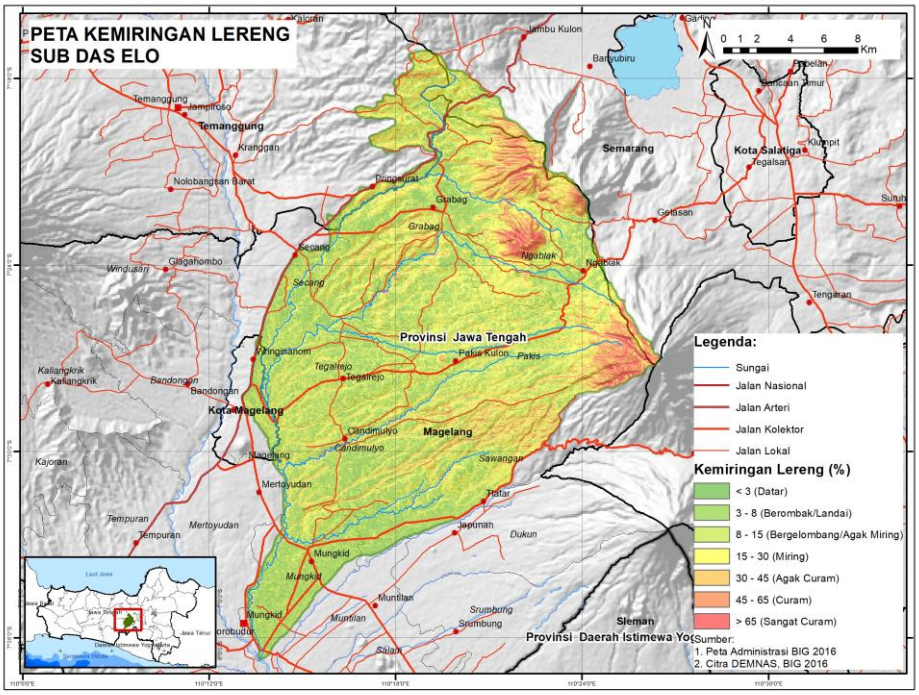


(a)



(b)

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP



(c)

Gambar 1. (a) Lokasi Penelitian; (b) Jenis Tanah; dan (c) Kemiringan Lereng Lokasi Penelitian Sub DAS Elo Kabupaten Magelang

2.2. Pengumpulan Data

Penelitian menggunakan sumber data Peta RBI skala 1:25.000, citra Landsat dan Sentinel 2-A untuk keperluan identifikasi jenis penggunaan lahan tahun 2014, 2019 dan 2024. Citra DEMNAS didapatkan dari Badan Informasi Geospasial, yang akan digunakan untuk identifikasi kemiringan lereng. Data ketebalan akuifer yang bersumber dari *http://data.isric.org* (Hengl *et al*., 2017) dan data permeabilitas akuifer bersumber dari *https://dataverse/scholarsportal.info* (Huscroft *et al*., 2018). Data debit sungai harian, data curah hujan harian dan data iklim rata-rata bulanan (suhu maksimum dan minimum, kelembaban relatif, lama penyinaran matahari dan kecepatan angin) periode 2013 – 2024 didapatkan dari Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Serayu Opak dan Dinas Pusdataru Provinsi Jawa Tengah. Selain itu, data karakteristik tanah didapatkan melalui pengamatan lapangan dan uji laboratorium pada setiap jenis tanah berdasarkan Peta Jenis Tanah dari Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertainian (BBSDLP, Kementerian Pertanian).

2.3. Analisis Perubahan Penggunaan Lahan

Peta penggunaan lahan di Sub DAS Elo disusun berdasarkan interpretasi secara visual terhadap citra penginderaan jauh pada tahun 2014, 2019 dan 2024. Klasifikasi setiap kelas tutupan lahan didasarkan pada kelompok piksel yang diidentifikasi memiliki kesamaan atau kemiripan warna, rona, bentuk, serta unsur interpretasi lainnya (Kosasih *et al*., 2019). Namun dikarenakan citra Landsat memiliki resolusi spasial 30 meter, sedangkan basis data peta RBI memiliki skala 1:25.000, sehingga dilakukan proses generalisasi data untuk menyeragamkan tingkat kedetilan spasial antar sumber data dan menghindari penyajian informasi yang melebihi resolusi data utama. Oleh karena itu, seluruh keluaran peta penggunaan lahan dalam penelitian ini disajikan pada skala 1:50.000.

Klasifikasi penggunaan lahan disusun dengan mengacu pada klasifikasi tutupan lahan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), kemudian disesuaikan dengan kebutuhan klasifikasi dari model SWAT+ serta kondisi lapangan. Hasil penyesuaian klasifikasi menghasilkan kelas penggunaan lahan yang digunakan dalam penelitian, terlampir pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi Penggunaan Lahan

No	Klasifikasi Penggunaan Lahan	Penamaan Model SWAT+	
1	Badan Air	*Water*	WATR
2	Belukar	*Range grasses*	RNGE
3	Hutan Lahan Kering Primer	*Evergreen Forest*	FRSE
4	Hutan Lahan Kering Sekunder	*Evergreen Forest*	FRSE
5	Hutan Tanaman	*Deciduous Forest*	FRSD
6	Pemukiman	*Residential Medium Density*	URMD
7	Perkebunan	*Mixed Forest*	FRST
8	Pertanian Lahan Kering	*Agricultural Land with Row Crops*	AGRL
9	Pertanian Lahan Kering Campur	*Close-grown agricultural land*	AGRR
10	Sawah	*Rice*	RICE
11	Tanah Terbuka	*Barren or sparsely vegetated land*	BCVG

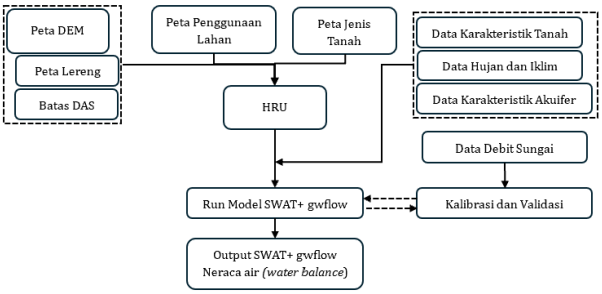
Akurasi klasifikasi penggunaan lahan dievaluasi menggunakan *confusion matrix*, dengan hasil menunjukkan *overall accuracy* sebesar 87,8% yang

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

menunjukkan tingkat kesesuaian antara hasil klasifikasi dengan data lapangan. Selanjutnya analisis perubahan penggunaan lahan antar waktu menggunakan grafik penambahan dan penurunan luas dalam tiap penggunaan lahan, disertai matriks transisi yang menggambarkan nilai perubahan dari setiap jenis penggunaan lahan (Adhiatama *et al*., 2020). Peta penggunaan lahan hasil klasifikasi selanjutnya digunakan sebagai salah satu input spasial dalam pembentukan *Hydrological Response Unit* (HRU) pada model SWAT+.

2.4. Model SWAT+ Gwflow

Soil and Water Assessment Tool (SWAT+) merupakan salah satu model hidrologi berbasis fisik yang menggunakan neraca air sebaagai konsep utama untuk mensimulasikan proses hidrologi dalam DAS (Neitsch *et al*., 2011). Pemodelan SWAT+ dalam penelitian ini menggunakan modul gwflow, di mana proses hidrologi di dalam DAS disimulasikan pada proses *surface* dan *subsurface*. Data yang digunakan serta tahap analisis dijelaskan pada Gambar 2.



Gambar 2. Tahap Analisis Model SWAT+ Gwflow

Model SWAT+ membagi DAS dalam unit sub basin dan lebih detil ke dalam satuan HRU, yaitu satuan lahan yang terdiri dari komponen lereng, penggunaan lahan dan jenis tanah. Sedangkan tambahan modul gwflow mendiskretisasikan DAS dalam *grid-grid* yang menggambarkan akuifer. Proses hidrologi *surface* dan *sub-surface* dalam DAS digambarkan dalam proses antara HRU dengan *grid* gwflow, yang memungkinkan pertukaran aliran lateral, aliran dasar (*baseflow*), dan kelembaban tanah secara dinamis (Yimer *et al*., 2023). Simulasi model SWAT+ dapat menghasilkan *output* pada berbagai tingkatan, seperti *sub basin*, HRU, akuifer, dan *channel* (sungai).

Secara umum, neraca air pada HRU dinyatakan sebagai keseimbangan antara presipitasi dan komponen keluaran air serta perubahan simpanan air tanah pada profil tanah. Analisis proses hidrologi yang diperhitungkan dalam model SWAT+ gwflow dapat dianalisis imbangan air pada skala DAS dan siklus airtanahnya. Berdasarkan penelitian oleh Yimer *et al*. (2023) disampaikan perhitungan imbangan air pada tingkat DAS menggunakan nilai *precipitation* (P), *surface runoff* (Surq), *lateral discharge* (Latq), *percolation* (Perc), *evapotranspiration* (ET) dan *groundwater transferred to soil* (gwsoilq) sebagai berikut:

Perubahan lengas tanah (sw_change) = P + gwsoilq – Surq – Latq – Perc – ET + error

Selain itu untuk imbangan airtanah diperhitungkan menggunakan nilai *recharge* (rech) yang setara dengan nilai Perc, *groundwater evapotranspiration* (gwet), *groundwater flow to streams* (gwsw), *stream seepage to groundwater* (swgw), *saturation excess flow* (satex), *groundwater transferred to soil* (gwsoil) dan *flow across the boundary of the ctahcment* (bound) sebagai berikut:

Perubahan cadangan airtanah (dvol) = rech – gwet - gwsw + swgw – satex – gwsoil – pump + bound + error

Pada penelitian ini keluaran yang digunakan untuk analisa adalah pada tingkat subbasin dan HRU yang menunjukkan ringkasan proses hidrologi water balance, terdiri dari beberapa komponen seperti presipitasi, evapotranspirasi, *runoff, recharge, soil water*, dan *lateral flow*. Sedangkan pada tingkat *channel* (sungai) dihasilkan nilai debit aliran sungai utama dalam komponen “flo out”.

2.5. Analisis Imbangan Air dengan Simulasi Model SWAT+ Gwflow

Analisis imbangan air menggunakan model SWAT+ gwflow dalam penelitian ini dilakukan secara temporal mempertimbangan perubahan penggunaan lahan yang dinamis (2014 dan 2024), sedangkan parameter lain (topografi, curah hujan, iklim, karakteristik akuifer dan jenis tanah) diperhitungkan sebagai nilai konstan. Simulasi dijalankan pada masing-masing tahun skenario penggunaan lahan 2014 dan 2024, dengan tahapan sebagai berikut:

2.5.1. Delineasi Batas DAS

Penentuan batas DAS menggunakan data DEMNAS diperlukan untuk menentukan arah aliran (*flow direction*), akumulasi aliran (*flow accumulation*) pendefinisian jaringan sungai dan delineasi batas DAS. Delineasi secara otomatis dengan titik outlet yang digunakan adalah titik lokasi stasiun pengukuran sungai (SPAS) Mendut Kabupaten Magelang, menghasilkan luasan DAS 44.010 Ha yang terbagi dalam 9 (Sembilan) sub-basin.

2.5.2. Pendefinisian HRU dan Grid Akuifer

HRU merupakan unit respon hidrologi dalam model SWAT+ yang dibentuk berdasarkan kombinasi karakteristik penggunaan lahan, jenis tanah, lereng dan kelas kemiringan lereng pada suatu wilayah. Berdasarkan hasil komposit diperoleh 2.827 unit HRU pada Sub DAS Elo. Selain pembentukan HRU untuk merepresentasikan respons hidrologi permukaan, penambahan modul gwflow membentuk grid untuk merepresentasikan sistem air tanah secara spasial. Sub DAS Elo didiskritisasi menjadi grid ukuran 200x200 meter sehingga terbentuk 23.842 unit grid pada 131 kolom dan 192 baris.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

2.5.3. Menjalankan Modul Gwflow

Modul gwflow dijalankan untuk menjalankan parameter hidrologi bawah permukaan ke dalam model. Dalam pengoperasiannya, modul gwflow merupakan subbagian dari SWAT+ sehingga masukan model SWAT+ juga menjadi masukan untuk pengaturan model gwflow. Data pertama yang perlu dimasukkan adalah data ketebalan akuifer (jarak vertikal dari permukaan tanah ke batuan dasar, yaitu ketebalan sedimen yang tidak terkonsolidasi) dengan resolusi 250 meter. Data kedua adalah permeabilitas material akuifer yang didapatkan untuk mengklasifikasikan akuifer ke dalam zona dengan nilai Konduktivitas Hidraulik (Kaqu) dan *Spesific Yield* (Sy) yang sesuai. Kemudian dilakukan modifikasi *initialization file* sesuai dengan kebutuhan *user* (Bailey *et al.,* 2020).

2.5.4. Keluaran Model SWAT+

Simulasi SWAT+ gwflow dapat dimulai dengan menggunakan SWAT+ Editor, yang dilakukan dalam periode bulanan dan tahunan untuk kurun waktu 2013-2024 dengan periode *warm-up* selama 2 tahun. Tingkatan output dan parameter yang digunakan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Tingkatan Output dan Parameter Keluaran Model SWAT+ Gwflow

No	Tingkat Output	Parameter	Periode	Keterangan
1	*Channel*	Flo Out	Bulanan	Analisis debit sungai pada tahap kalibrasi dan validasi model
2	*Basin*	*Water balance*: sw_change, P, gwsoil, Surq, Latq, Pr, ET	Tahunan	Analisis imbangan air permukaan DAS
3	*Basin*	*groundwater Balance*: dvol, rech, gwet, gwsw, swgw, satex, gwsoil, pump, bound	Tahunan	Analisis imbangan Air tanah pada DAS

2.5.5. Kalibrasi dan Validasi

Variabel yang dilakukan kalibrasi dan validasi dalam penelitian ini ialah simulasi debit aliran (*flo out*) yang dibandingkan dengan data debit aliran Sungai Elo yang terukur pada Stasiun Pemantauan Air Sungai (SPAS) Mendut Kabupaten Magelang. Perbandingan tersebut dilakukan pada tahun dengan ketersediaan data debit yang memadai yaitu pada tahun 2019 – 2021, sehingga periode kalibrasi dilakukan pada rentang waktu dua tahun (2019 – 2020) dan validasi pada rentang waktu satu tahun (2021). Periode validasi satu tahun digunakan karena keterbatasan ketersediaan data debit observasi yang kontinu dan memadai pada lokasi penelitian.

Validasi dan kalibrasi dilakukan pada parameter yang dipilih berdasarkan hasil analisis sensitivitas terhadap debit aliran. Analisis sensitivitas menggunakan SWAT+ *toolbox* menunjukkan parameter sensitive yaitu cn2, cn3_swf, latq_co, esco, can_max, surq_lag, perco, k dan awc. Parameter tersebut selanjutnya digunakan dalam proses kalibrasi dan validasi model.

Tabel 3. Parameter Proses Kalibrasi

No	Parameter	Tipe	Nilai Min	Nilai Max	Nilai Terbaik
1	cn2	*Percentage*	-30	30	-24,005
2	cn3_swf	*Replace*	0	1	0,848
3	latq_co	*Replace*	0	1	0,368
4	esco	*Percentage*	0	1	0,165
5	can_max	*Relative*	0	100	91,919
6	surq_lag	*Replace*	0,05	24	5,051
7	perco	*Percentage*	0	1	0,907
8	k	*Relative*	-100	100	36,232
9	awc	*Percentage*	0,01	1	0,841

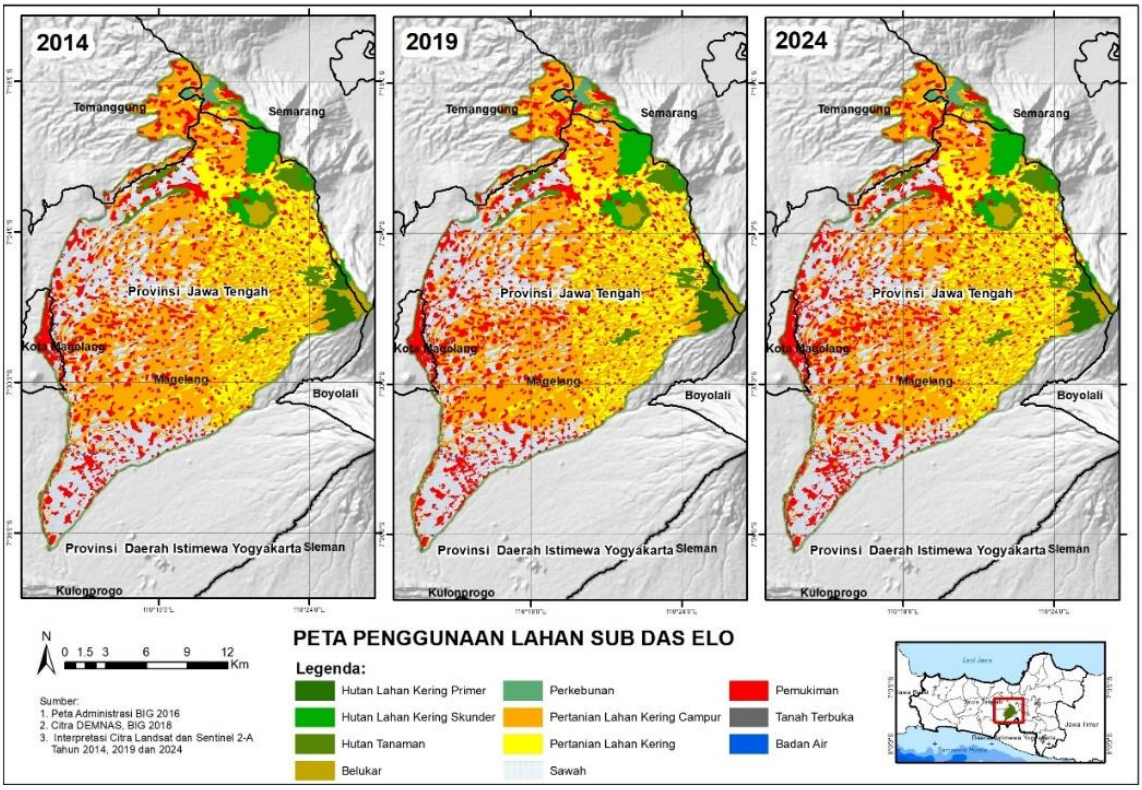
Metode kalibrasi secara otomatis juga dilakukan pada SWAT+ toolbox menggunakan algoritma *Calibration by Latin-hypercube Sampling Iterations* (CALSI). Kinerja model dievaluasi dengan membandingkan debit hasil simulasi dengan debit observasi menggunakan koefisien determinasi (R^2) dan Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE). Nilai R^2 digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian pola variasi debit hasil simulasi terhadap observasi, sedangkan NSE digunakan untuk mengevaluasi kemampuan model dalam merepresentasikan variasi debit observasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Perubahan Penggunaan Lahan Sub DAS Elo

Hasil interpretasi disusun melalui pengenalan objek penggunaan lahan dari citra penginderaan jauh Landsat dan Sentinel 2-A, serta dilakukan validasi menggunakan citra Google Earth Pro dan *ground-check* di lapangan. Hasilnya menunjukkan terdapat 11 (sebelas) kelas penggunaan lahan di Sub DAS Elo, sebagaimana disajikan Gambar 3.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP



Gambar 3. Peta Penggunaan Lahan 2014, 2019 dan 2024

Tabel 4. Luas Perubahan Penggunaan Lahan 2014, 2019 dan 2024

No	Jenis Penggunaan Lahan	Luas (Ha)			% Peningkatan / Penurunan		
		2014	2019	2024	2014 - 2019	2019 - 2024	2014 - 2024
1	Badan Air	104,62	104,62	104,62	0,0%	0,0%	0,0%
2	Belukar	560,83	565,44	571,47	0,8%	1,1%	1,9%
3	Hutan Lahan Kering Primer	672,88	667,14	655,80	-0,9%	-1,7%	-2,5%
4	Hutan Lahan Kering Skunder	1.253,14	1244,84	1243,49	-0,7%	-0,1%	-0,8%
5	Hutan Tanaman	1.259,39	1207,17	1192,93	-4,1%	-1,2%	-5,3%
6	Pemukiman	7.011,20	7868,40	8272,02	12,2%	5,1%	18,0%
7	Perkebunan	299,74	297,23	297,23	-0,8%	0,0%	-0,8%
8	Pertanian Lahan Kering	7.320,82	7863,73	7976,91	7,4%	1,4%	9,0%
9	Pertanian Lahan Kering Campur	16.306,10	15036,19	14630,35	-7,8%	-2,7%	-10,3%
10	Sawah	9.199,97	9092,98	8998,16	-1,2%	-1,0%	-2,2%
11	Tanah Terbuka	21,01	61,95	66,71	194,8%	7,7%	217,5%
	Total	**44.010**	**44.010**	**44.010**			

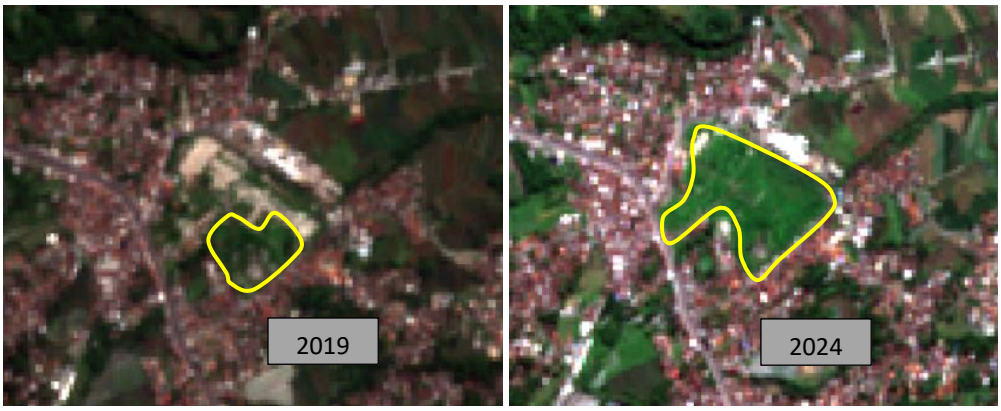
Dinamika kegiatan pengelolaan dan pemanfaatan lahan oleh manusia di kawasan DAS menyebabkan perubahan penggunaan lahan, menjadi faktor yang menyebabkan perubahan respon hidrologi dalam DAS. Berdasarkan analisis perubahan penggunaan lahan yang dilakukan secara multitemporal tahun 2014, 2019 dan 2024 menunjukkan bahwa pemanfaatan lahan sebagai lahan budidaya semakin meningkat pada rentang waktu 2014 - 2024. Secara detil perubahan penggunaan lahan disajikan pada Tabel 4.

Matriks perubahan penggunaan lahan menjadi jenis lainnya pada periode 2014 – 2024 disajikan pada Tabel 5, diketahui bahwa jenis penggunaan lahan yang mengalami banyak perubahan selama 2014-2024 adalah pertanian lahan kering campur (1.734 Ha), sawah (468 Ha) dan pertanian lahan kering (255 Ha). Adapun konversi yang terjadi sebagian besar adalah menjadi Pemukiman (1.272 Ha), Pertanian Lahan Kering (911 Ha), dan Sawah (267 Ha). Berdasarkan karakteristik perubahan tersebut, diketahui bahwa Sub DAS Elo sebagian besar merupakan kawasan pertanian berupa sawah dan pertanian lahan kering dengan luasan cenderung meningkat. Mata pencaharian utama sebagian besar masyarakatnya adalah petani, menyebabkan perubahan penggunaan lahan yang cenderung mengarah pada peningkatakan kegiatan budidaya pertanian. Peningkatan jumlah penduduk di Kabupaten Magelang sekitar 1,20% per tahun berdampak pada peningkatan kebutuhan lahan untuk permukiman dan infrastruktur.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Tabel 5. Matriks Perubahan Penggunaan Lahan 2014-2024

Penggunaan Lahan 2014	Penggunaan Lahan 2024 (Ha)											
	BA	Blk	HLKP	HLKS	HT	Pm	Pkb	PLK	PLKC	Sw	Tt	Total
BA	105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	105
Blk	0	561	0	0	0	0	0	0	0	0	0	561
HLKP	0	0	656	0	0	0	0	1	16	0	0	673
HLKS	0	0	0	1.243	0	3	0	6	0	0	0	1.253
HT	0	0	0	0	1.193	10	0	37	0	18	1	1.259
Pm	0	11	0	0	0	7.000	0	0	0	0	1	7.011
Pkb	0	0	0	0	0	1	297	1	0	0	1	300
PLK	0	0	0	0	0	215	0	7.066	33	0	7	7.321
PLKC	0	0	0	0	0	591	0	866	14.571	249	29	16.306
Sw	0	0	0	0	0	451	0	1	10	8.731	7	9.200
Tt	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	20	21
Total	105	571	656	1.243	1.193	8.272	297	7.977	14.630	8.998	67	44.010



Gambar 4. Contoh Perubahan Luas Lahan Terbuka (Citra Sentinel 2A, Kecamatan Blabak Kabupaten Magelang 7°33'10" LS dan 110°15'18" BT)

Perubahan penggunaan lahan terjadi merata di seluruh bagian Sub DAS Elo. Pada kawasan hulu yang berada di bagian atas lereng Gunung Merbabu sebagian besar perubahan penggunaan lahan yang terjadi adalah konversi menjadi kawasan pertanian lahan kering, sedangkan di bagian tengah-hilir Sub DAS sebagian besar jenis konversi perubahan penggunaan lahan menjadi pemukiman. Perubahan menjadi pertanian lahan kering sebagian besar berasal dari konversi pertanian lahan kering campur di sekitarnya, yang mengalami pembukaan lahan untuk kegiatan budiaya pertanian yang lebih intensif. Penambahan kawasan pemukiman bersumber dari konversi lahan sawah, pertanian lahan kering dan pertanian lahan kering campur. Konversi menjadi lahan pemukiman ini sebagian besar terjadi di kawasan sekitar pusat kota dan dekat dengan jalan utama, menandakan peningkatan kegiatan perdagangan dan jasa. Penambahan lahan terbuka disebabkan oleh pembukaan lahan menjadi lahan kosong yang belum dikelola, atau lahan yang kemudian digunakan sebagai lapangan atau area terbuka lainnya. Sebagai contoh adalah pendirian area sekolah dan pondok pesantren di Kecamatan Tegalrejo pada tahun 2014-2016 yang seiring waktu menambah area perdagangan dan pemukiman di sekitarnya. Terdapat penambahan tanah terbuka seluas 10 Ha di Kecamatan Blabak karena penutupan pabrik kertas pada tahun 2011-2014 sehingga bangunan pada area tersebut dikosongkan (Gambar 4).

Mengacu pada analisis terhadap perubahan penggunaan lahan tersebut, diketahui bahwa kecenderungan perubahan mengarah pada lahan dimanfaatkan baik untuk pertanian atau pemukiman. Hal tersebut mengakibatkan berkurangnya tutupan vegetasi atau menurunnya kerapatan vegetasi. Hal tersebut dapat memiliki pengaruh terhadap sistem hidrologi DAS, dimana proses hidrologi merupakan konsekuensi langsung dari alih fungsi lahan yang mengubah karakteristik fisik permukaan tanah (Nurrochman *et al*., 2018).

3.2. Imbangan Air Berdasarkan Dinamika Perubahan Penggunaan Lahan

Dinamika perubahan penggunaan lahan terhadap imbangan air dinilai berdasarkan kondisi perubahan penggunaan lahan dengan asumsi faktor lain bersifat konstan. Faktor yang bersifat konstan yaitu kondisi topografi/kelerengan, jenis tanah, hujan/ klimatologi dan hidrogeologi. Model SWAT+ dijalankan dengan skenario penggunaan lahan pada kondisi 2014 dan 2024.

Pemodelan SWAT+ dijalankan dengan input data hujan dan iklim dalam rentang waktu 2013 hingga 2024, sehingga simulasi dijalankan menggunakan data hujan bulanan dan iklim bulanan dalam kurun waktu 12 tahun. Di mana 2 tahun pertama (2013-2014) dijalankan sebagai periode *warm-up*, sedangkan simulasi proses hidrologi dijalankan menggunakan data kurun waktu 10 tahun (2015-2024). Tingkat performa model dilakukan dengan membandingkan data debit aliran (debit bulanan)

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

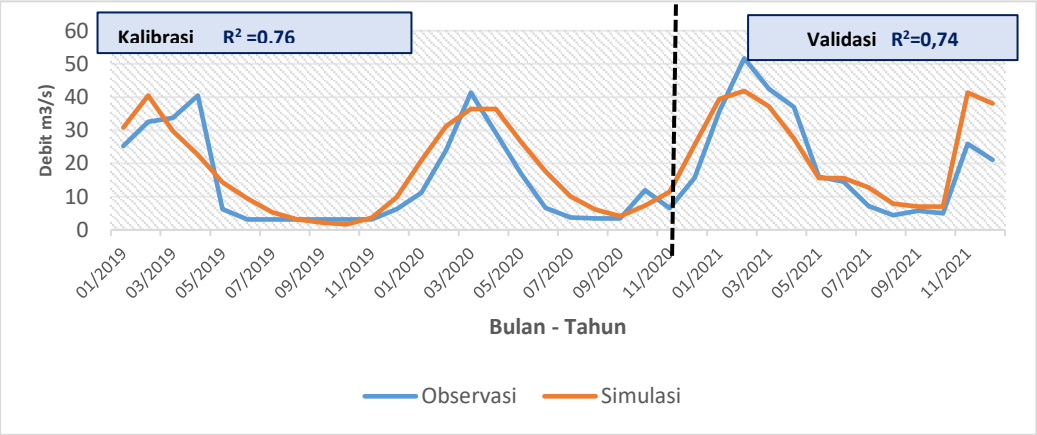
hasil pengukuran SPAS Mendut Magelang bersumber dari BBWS Serayu Opak, yang tersedia pada rentang tahun 2019 – 2021. Hasil simulasi menunjukkan nilai R^2 sebesar 0,65 dan nilai NSE sebesar 0,13, yang mana dalam klasifikasi Moriasi *et al.* (2015) termasuk kategori belum memuaskan. Oleh karena itu, parameter terkait perlu dilakukan kalibrasi agar model tidak *overestimate/ underestimate* terhadap data observasi.

Proses kalibrasi dilakukan untuk periode 2019-2020, nilai NSE meningkat menjadi 0,70 dan R^2 menjadi 0,76 menunjukkan bahwa proses kalibrasi meningkatkan akurasi model. Proses validasi dilakukan pada periode tahun 2021, menghasilkan nilai NSE 0,72 dan R^2 0,74. Proses validasi tersebut menunjukkan bahwa parameter hasil kalibrasi memiliki kekokohan dan mampu digunakan untuk simulasi pada periode yang berbeda. Secara detil grafik kalibrasi dan validasi debit aliran Sungai Elo disajikan pada Gambar 5.

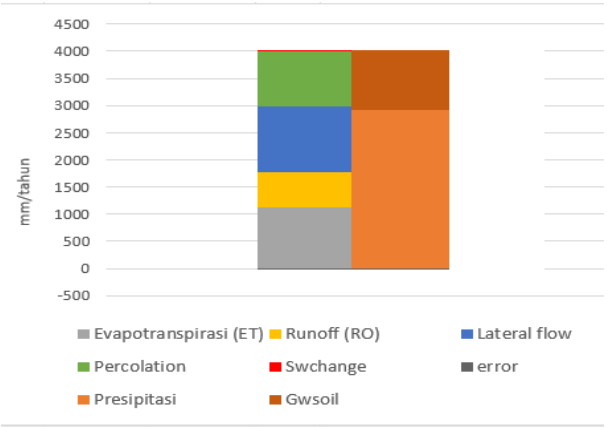
Pemodelan SWAT+ yang telah dilakukan kalibrasi parameter kemudian dijalankan untuk skenario penggunaan lahan 2014 dan 2024. Analisis proses hidrologi dalam model SWAT+ gwflow dapat dianalisis imbangan air permukaan dan imbangan air tanah pada skala DAS.

Imbangan air permukaan pada tingkat DAS pada skala waktu tahunan ditunjukkan pada Gambar 6., dimana nilai rata-rata presipitasi adalah 2.917 mm/tahun. Pada skenario penggunaan lahan 2024 dihasilkan nilai perubahan lengas tanah (sw_change) 4.52 mm terjadi karena nilai presipitasi 2.917 mm yang kemudian mengalami evapotranspirasi (1.121 mm) dan run off (655 mm), serta lateral flow (1.199 mm). Berdasarkan analisis *output* SWAT+ gwflow menunjukkan presentase evapotranspirasi sebesar 38%, presentase *wateryield* sebesar 27% dan presentase resapan sebesar 35%. Nilai tersebut sesuai dengan kajian oleh Santoso dan Anna (2002) yang menyatakan limpasan tahunan Sub DAS Elo adalah 660,72 mm atau sekitar 28% dari presipitasi.

Analisis temporal menunjukkan perubahan penggunaan lahan 2014 hingga 2024 yaitu peningkatan pemukiman 18% dan peningkatan pertanian lahan kering 9% seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Simulasi model SWAT+ gwflow pada kedua tahun skenario penggunaan lahan menunjukkan perubahan nilai komponen neraca air, seperti meningkatkan nilai *surface runoff* (1,7% atau +11 mm), menurunkan nilai *lateral flow* (-0,6% atau -7,12 mm), dan menurunkan nilai *percolation* (-0,7% atau -6,67 mm). Perubahan tersebut menunjukkan perubahan distribusi komponen neraca air sebagai respon terhadap perubahan penggunaan lahan.



Gambar 5. Grafik Kalibrasi dan Validasi Debit Aliran Rata-Rata Bulanan

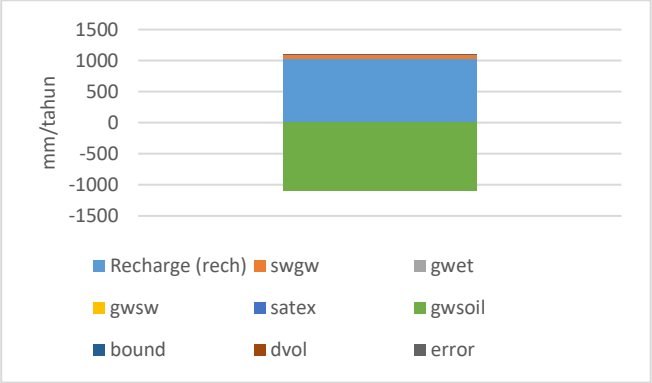


Gambar 6. Grafik Imbangan Air Permukaan

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Tabel 6. Nilai Imbangan Air Permukaan

	2014	2024
Presipitasi	2.917,66	2.917,66
Recharge (rech)	1.023,52	1.016,96
swgw	74,13	74,26
gwet	0,32	0,33
gwsw	0,02	0,02
satex	0,00	0,00
gwsoil	1.096,64	1.090,07
bound	0,00	0,00
dvol	0,64	0,70
error	0,09	0,10



Gambar 7. Grafik Imbangan Air Tanah

Tabel 6. Nilai Imbangan Air Tanah

	2014	2024
Presipitasi	2.917,66	2.917,66
Evapotransipirasi	1.122,95	1.121,89
Runoff (RO)	644,37	655,40
Lateral flow	1.206,73	1.199,60
Percolation	1.023,95	1.017,28
Gwsoil	1.096,62	1.090,01
Swchange	4,52	4,55
error	-11.76	-8.94

Simulasi model SWAT+ gwflow juga menunjukkan perubahan nilai *lateral flow* yang menurun pada skenario penggunaan lahan 2014 dan penggunaan lahan 2024. Hal tersebut mencerminkan kontribusi air tanah terhadap aliran sungai dan *resapan air* dalam sistem hidrologi (He *et al*., 2016). Fluktuasi *baseflow* menjadi indikator stabilitas pengisian kembali air tanah, penurunannya menjadi indikasi gangguan fungsi resapan akibat perubahan penggunaan lahan atau perubahan iklim (Adom & Kumi, 2020).

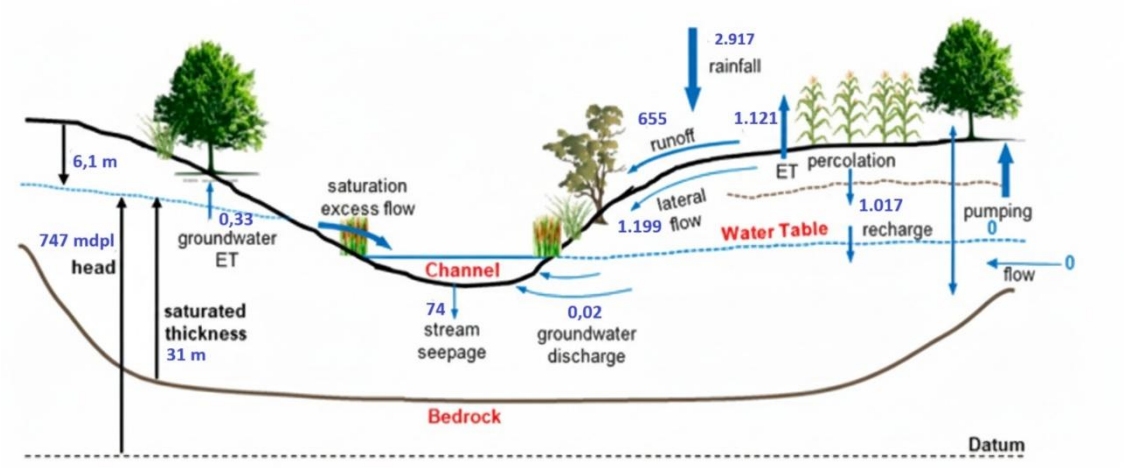
Imbangan air tanah pada tingkat DAS ditunjukkan pada Gambar 7, analisis multitemporal menunjukkan simulasi SWAT+ berdasarkan skenario penggunaan lahan tahun 2014 dan 2024 menghasilkan perubahan nilai komponen neraca air tanah antara kedua kondisi simulasi, yaitu nilai resapan air (rech) menurun, nilai air saluran masuk ke dalam air tanah (swgw) meningkat, air tanah dalam profil tanah (gwsoil) menurun, dan perubahan simpanan air tanah (dvol) meningkat.

Hasil analisis imbangan air tanah menunjukkan nilai rata-rata input resapan air 1.010-1.023 mm ditambah dengan nilai air dari sungai masuk ke dalam air tanah (swgw) sebesar 74 mm. Pertukaran air antara akuifer dan profil tanah mempengaruhi komponen neraca air sehingga terdapat nilai air dalam profil tanah (gwsoil) 1.090 mm, yang mengalami evapotranspirasi (gwet) 0,33 mm, mengisi air sungai (gwsw) 0,02 mm, dan sebagai perubahan cadangan air tanah (dvol) 0,7 mm.

Ilustrasi gabungan dari imbangan air DAS dengan imbangan air tanah untuk kondisi penggunaan lahan tahun 2024 disajikan pada Gambar 8., menunjukkan bahwa komponen *wateryield* didominasi oleh *surface runoff* dan *lateral flow*, sedangkan *saturation excess flow* bernilai nol dikarenakan penggunaan mekanisme gw-soil, dimana air tanah yang masuk ke lapisan tanah akan berkontribusi sebagai bagian dari evapotranspirasi, *runoff* dan *lateral flow*. Maka dalam hal ini *lateral flow* merupakan bagian dari air tanah yang mengalir ke dalam aliran sungai, dan dapat diperhitungkan sebagai komponen *baseflow*. Mekanisme ini menjadikan simulasi siklus air tanah lebih realistis karena karena air di lapisan tanah (baik yang berasal dari perkolasi atau dari pergerakan air tanah) akan dihitung dalam proses hidrologi yang sesuai (Yimer *et al.*, 2023).

Hal tersebut sesuai dengan analisis SWAT+ gwflow yang disimulasikan di Sub DAS Elo untuk kondisi penggunaan lahan tahun 2024. Nilai rata-rata hujan 2.917 mm, dengan *aquifer thickness* rata-rata 31 m, nilai *Hydraulic Conductivity* 0,26 - 25,6 m/hari dan *Spesific Yield* 0,20. Nilai resapan air 1.017 mm, perpindahan air ke profil tanah mempengaruhi *lateral flow* melalui proses perpindahan air menuju profil tanah gwsoil (1.090 mm), *sehingga lateral flow* menjadi 1.199 mm. Selain itu, gwsoil juga meningkatkan nilai evapotranspirasi dikarenakan banyaknya air yang tersimpan dalam lapisan tanah, nilai ET menjadi 1.121 mm dan *surface runoff* 655 mm, serta berperan dalam aliran groundwater discharge sebesar 0,02 mm.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP



Gambar 8. Ilustrasi Imbangan Air Permukaan dan Air Tanah Sub DAS Elo Tahun 2024

Hasil analisis menunjukkan nilai *error* imbangan air pada tingkat DAS adalah 8,9 – 11,7 mm sedangkan nilai *error* imbangan air tanah adalah 0,09 - 0,1 mm. Ketidakpastian dalam pemodelan SWAT+ dapat berasal dari penggunaan data akuifer global yang berskala spasial besar, sehingga tidak mampu merepresentasikan secara akurat variabilitas lokal ketebalan maupun permeabilitas batuan (Bressiani *et al*., 2015). Keterbatasan detail pada parameter bawah permukaan ini berpotensi menimbulkan bias dalam estimasi interaksi air tanah–permukaan, sehingga memengaruhi akurasi prediksi debit sungai serta proses resapan air pada tingkat Daerah Aliran Sungai (DAS) (Tuo *et al*., 2016). Yimer *et al* (2023) menyatakan bahwa model SWAT+ dengan mengaktifkan gwsoil pada modul gwflow memungkinkan proses yang lebih kompleks pada air tanah dan mendekati kenyataan. Dikarenakan interaksi air tanah-profil tanah, tanah menjadi lembab sepanjang tahun, yang mana juga berkontribusi pada *recharge* air tanah, kedua proses tersebut merupakan komponen dominan dalam imbangan air tanah.

4. Kesimpulan

Perubahan penggunaan lahan selama periode 2014–2024 di Sub DAS Elo, menunjukkan adanya perubahan respon hidrologi berdasarkan simulasi model SWAT+ gwflow. Perubahan komposisi penggunaan lahan yang didominasi pertanian lahan kering campur, sawah dan pertanian lahan kering menuju pemukiman serta bentuk penggunaan lain, diikuti oleh peningkatan *surface runoff* dan menurunnya *recharge* pada skenario yang dianalisis. Hasil simulasi ini mengindikasikan bahwa perubahan penggunaan lahan berkaitan dengan perubahan distribusi komponen neraca air di Sub DAS Elo. Namun, hasil tersebut perlu diinterpretasikan lebih lanjut dengan mempertimbangkan ketidakpastian model. Hasil tersebut dapat menjadi pertimbangan dalam upaya pengendalian perubahan penggunaan lahan untuk mendukung keberlanjutan sumber daya air di Sub DAS Elo.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena belum mengintegrasikan kondisi perubahan iklim, faktor sosial-ekonomi dan kebijakan tata ruang secara komprehensif. Penelitian berikutnya disarankan untuk menggunakan cakupan temporal yang lebih luas, pemanfaatan teknologi penginderaan jauh resolusi tinggi, serta pengembangan model hidrologi yang menilai dampak ekologis secara holistik, termasuk kualitas air, sedimentasi, dan erosi, agar pemahaman mengenai penggunaan lahan terhadap respon hidrologi menjadi lebih menyeluruh dan mendukung perumusan kebijakan pengelolaan DAS yang berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) atas dukungan pendanaan penelitian ini serta kepada Balai Besar Wilayah Sungai Serayu Opak (BBWS Serayu Opak) atas penyediaan data yang mendukung pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian hingga penyelesaian publikasi ini.

DAFTAR PUSTAKA

Adhiatama, R., Widiatmaka dan Lubis, I. (2020). Perubahan dan Prediksi Penggunaan/Penutupan Lahan di Kabupaten Lampung Selatan. *Journal of Natural Resources and Environmental Management*, 10(2), 234-246. http://dx.doi.org/10.29244/jpsl.10.2.234-246

Adom, M. T., & Kumi, M. (2020). Assessment of the impact of land use and land cover change on groundwater recharge and baseflow. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28, 100670. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100670

Bailey, R.T., Bieger, K., Arnold, J.G., Bosch, D.D. (2020). A New Physically-Based Spatially-Distributed Groundwater Flow Module for SWAT+. *Hydrology* 2020, 7, 75. https://doi.org/10.3390/hydrology7040075

Bressiani, D. A., Gassman, P. W., Fernandes, J. G., Garbossa, L. H. P., Srinivasan, R., Bonumá, N. B., & Mendiondo, E. M. (2015). Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and*

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Biological Engineering, 8(3), 9–35. https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20150803.1765

Chen, H., Wei, X., & Zhang, M. (2024). Long-term land use changes and their effects on water balance components in large-scale watersheds. *Agricultural Water Management*, 291, 108620. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108620

Chen, L., Yu, L., Yin, J., & Xi, M. (2023). Impact of Population Density on Spatial Differences in the Economic Growth of Urban Agglomerations: The Case of Guanzhong Plain Urban Agglomeration, China. *Sustainability*, 15(19), 14601. https://doi.org/10.3390/su151914601

Dwivedi, S., Kothari, M., Singh, P.K., Chhipa, B.G., dan Gupta, T. (2024). SWAT model applications in hydrology: A Systematic review. *International Journal of Advanced Biochemistry Research* 2024; SP-8 (7): 603-607

He, J. J., Cai, Q. H., & Wu, N. (2016). Response of baseflow to climate change and human activities in a typical river basin, China. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1–12. https://doi.org/10.1007/s12665-015-4813-y

Hengl, T., Mendes de Jesus, J. S., Heuvelink, G. B. M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotic, A., Wei, S., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B., Carvalho Ribeiro, E. D., Wheeler, I., Mantel, S., & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE*, *12*(2), Article e0169748. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748

Huscroft, J., Gleeson, T., Hartmann, J., & Börker, J. (2018). Compiling and mapping global permeability of the unconsolidated and consolidated Earth: GLobal Hydrogeology MaPS 2.0 (GLHYMPS 2.0). *Geophysical Research Letters*, 45, 1897–1904. https://doi.org/10.1002/2017GL075860

Kardhana, H., Lihawa, A. W. I., Rohmat, F. I. W., Wulandari, S., Harjupa, W., Adiprawita, W., Kardena, E., & Kusuma, M. S. B. (2024). Water balance analysis in the Majalaya watershed: Two-step calibration and application of the SWAT+ model for low-flow conditions. *Water*, 16(23), 3498. https://doi.org/10.3390/w16233498

Kosasih, D., Saleh, M.B., Prasetyo, L.B. (2019). Interpretasi Visual dan Digital untuk Klasifikasi Tutupan Lahan di Kabupaten Kuningan Jawa Barat. *Jurnal Ilmu Pertanian* Vol 24 (2): 101-108 doi: 10.18343/jipi.24.2.101

Li, H., Cai, Y., Min, M., Zhao, Z., & Si, B. (2024). To Investigate the Impact of Land Use Change on the Potential Groundwater Recharge on Hillslope With Deep Loess Deposits. *Land Degradation & Development*. https://doi.org/10.1002/ldr.5364

Li, X., Zhang, J., & Liu, Q. (2024). Assessing the impact of rapid land-use transformation on hydrological response in tropical river basins. *Journal of Hydrology*, 630, 130645. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130645

Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1609–1618. https://doi.org/10.13031/trans.58.11075

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Verison 2009*. Agricultural Research Service US.

Nugraheni, A.N. (2013). Analisis Kerentanan dan Bahaya Banjir Sungai Elo di Kelurahan Wates Kecamatan Magelang Utara Kota Magelang menggunakan Sistem Informasi Geografis. *Geo-educasia* Hal 420-438

Nurrochman, A. (2018). *Dampak Perubahan Tutupan Lahan Terhadap Sistem Hidrologi di Jakarta*. Universitas Indonesia.

Odoh, B.I., dan Nwokeabia, C.N. (2024). Impact of Land Use and Land Cover Changes on Groundwater Dynamics in Selected Local Government Areas of anambre State Nigeria. *International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications*, 6(2), 131-142.

Prasetya, A.P.D., dan Hadibasyir, H.Z. (2024). *Prediksi Spasial Perkembangan Lahan Terbangun di Kota Magelang Tahun 2031 menggunakan Algoritma CA-Markov*. Universitas Muhammadiyah Surakarta

Romadhona, A.B.W. (2015). Analisis Erosi pada Skenario Tata Guna Lahan menggunakan Metode USLE dan MUSLE (Studi Kasus Sub DAS Elo). *Skripsi.* Universitas Gadjah Mada: Yogyakarta

Sadath, P. V. R., Elango, L., Kartheeshwari, M. R., & Keerthan, L. (2023). Forecasting land use/cover changes and their influence on groundwater recharge in Chennai, India: Recommendations for sustainable urban development. *Urban Water Journal*. https://doi.org/10.1080/1573062x. 2023.2258858

Santoso, S.B., dan Anna, A.N. (2002). Integrasi Teknik Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografi untuk Menduga Debit Puncak Menggunakan karakteristik Lingkungan Fisik DAS di Wilayah Sub DAS Elo, Jawa Tengah. *Forum Geografi* Vol 16 No 1 2002: 92-104

Silva, R. M., Santos, C. A., & Singh, V. P. (2024). Impact of land use and land cover change on the water balance of tropical river basins using high-resolution modeling. *Journal of Environmental Management*, 352, 119985. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119985

Subkhannur. (2005). Kajian Aliran Rendah DAS Progo. *Tesis*. Teknik Sipil UGM: Yogyakarta

Tuo, Y., Duan, Z., Disse, M., & Chiogna, G. (2016). Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: A case study in the Adige river basin (Italy). *Science of The Total Environment*, 573, 66–82. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.034

Wang, L., & Tan, Q. (2025). Assessing the sensitivity of watershed water balance to land cover transformation under varying climatic conditions. *Science of The Total Environment*, 912, 169012. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.169012

Yimer, E.A., Bailey, R.T., Piepers, L.L., Nossent, J. & Van Griensven, A. (2023) Improved Representation of Groundwater Surface Water Interactions Using SWAT+gwflowand Modifications to the gwflow Module. *Water* 2023, 15, 3249. https://doi.org/10.3390/ w1518324

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP