

**PEMODELAN SEDIMENTASI DI SUB DAS KEDUANG TAHUN 2022 - 2024: APLIKASI SOIL AND WATER ASSESMENT TOOL (SWAT)**

***(Sedimentation Modeling in the Keduang Sub-Watershed for 2022- 2024: Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT))***

Bandi Sasmito<sup>1\*</sup>, Bambang Darmo Yuwono<sup>1</sup>, Candrakanti Cahyaning Putri<sup>1</sup>, dan Smilya Sheren Reynalda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. H. Soedarto, S.H., Tembalang, Semarang, Jawa Tengah, 50275

\*Email: [bandisasmito@live.undip.ac.id](mailto:bandisasmito@live.undip.ac.id)

Diterima: 18 Juni 2025, Direvisi : 22 Oktober 2025, Disetujui : 4 November 2025

**ABSTRACT**

*The Gajah Mungkur Reservoir is a strategic infrastructure that plays a vital role in flood control and the irrigation water supply in Wonogiri and the surrounding areas. However, the reservoir's storage capacity continues to decline due to sedimentation from the surrounding watershed. It experiences an annual increase in sedimentation of approximately 3.2 million m<sup>3</sup>, with the Keduang Sub-watershed being the main contributor at 40%, or equivalent to 1.2 million m<sup>3</sup> per year. This study uses the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to provide a comprehensive overview of sedimentation and hydrological processes in the Keduang Sub-watershed that affect sedimentation during the 2022–2024 period. Data used in this study include Sentinel-2A satellite imagery, Digital Elevation Model (DEM), soil type maps, climate data, and river discharge data. These data are processed using QGIS 3.16 with the QSWAT3 plugin. Simulation results indicate that the SWAT model accurately represents hydrological and sedimentation dynamics, achieving the highest accuracy in 2024 with a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.956 and a Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) of 0.888. During the study period, the sedimentation rate significantly increased, reaching a peak sediment yield of 119,543.18 tons per hectare in 2023 and a maximum sediment accumulation of 86,030 tons at the outlet in 2024. The increase in sedimentation was triggered by landcover conversion for residential areas and reduced forest cover, which led to increased surface runoff and decreased infiltration.*

**Keywords:** *hydrology; watershed; landcover change; sedimentation; soil and water assessment tool*

## ABSTRAK

Waduk Gajah Mungkur merupakan infrastruktur strategis yang berperan penting dalam pengendalian banjir, dan penyediaan air irigasi di Wonogiri dan sekitarnya. Namun, kapasitas tampung waduk terus menurun akibat sedimentasi dari Daerah Aliran Sungai (DAS) dan lokasi sekitarnya. Waduk Gajah Mungkur mengalami peningkatan sedimentasi sebesar 3,2 juta m<sup>3</sup> per tahun dengan Sub DAS Keduang menjadi kontributor utama sebesar 40% atau setara 1,2 juta m<sup>3</sup> per tahun. Penelitian ini menggunakan *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai sedimentasi dan proses hidrologi di Sub DAS Keduang yang mempengaruhi proses sedimentasi selama periode 2022–2024. Data yang digunakan meliputi citra satelit Sentinel-2A, *Digital Elevation Model* (DEM), peta jenis tanah, data iklim, dan data debit sungai, yang diolah melalui QGIS 3.16 dengan *plugin* QSWAT3. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model SWAT mampu merepresentasikan dinamika hidrologi dan sedimentasi dengan akurasi tertinggi pada tahun 2024 dan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,956 dan *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) sebesar 0,888. Selama periode penelitian, laju sedimentasi meningkat signifikan, dengan *sediment yield* tertinggi sebesar 119.543,18 ton/ha pada tahun 2023 dan akumulasi sedimentasi tertinggi di *outlet* sebesar 86.030 ton pada tahun 2024. Peningkatan sedimentasi ini dipicu oleh alih fungsi lahan menjadi permukiman dan berkurangnya tutupan hutan, yang menyebabkan peningkatan limpasan permukaan dan penurunan infiltrasi.

**Kata kunci: hidrologi; daerah aliran sungai; alih fungsi lahan; sedimentasi; *soil and water assessment tool***

### I. PENDAHULUAN

Sedimentasi merupakan salah satu permasalahan penting dalam pengelolaan sumber daya air di Indonesia. Fenomena ini tidak hanya menyebabkan berkurangnya kapasitas tampung waduk (Asdak, 2010) tetapi juga memicu peningkatan risiko banjir di daerah hilir serta menurunkan efektivitas waduk dalam menyediakan air untuk irigasi dan pembangkit listrik tenaga air (Hasnawir, 2012; Wahidin, 2020). Salah satu contoh nyata adalah Waduk Gajah Mungkur yang memegang peran krusial sebagai penyedia pembangkit listrik tenaga air (PLTA), sumber irigasi untuk pertanian, destinasi pariwisata, dan pengembangan budidaya perikanan (Purnamasari *et al.*, 2021). Namun, manfaat multi-sektor ini

terancam oleh masalah serius pendangkalan yang disebabkan oleh tingginya laju sedimentasi yang masuk ke waduk, terutama dari Sub DAS Keduang (Hadi dan Wibowo, 2018). Ancaman ini telah diakui oleh pemerintah sebagai masalah yang memerlukan penanganan segera, seperti dengan pembangunan sabo dam untuk mengurangi laju sedimentasi (Kementerian PUPR, 2021). Tingkat sedimentasi di Waduk Gajah Mungkur sangat tinggi, mencapai sekitar 3,2 juta meter kubik per tahun (Hadi dan Wibowo, 2018). Kontributor utama sedimentasi tersebut adalah Sub DAS Keduang, yang menyumbang sekitar 40% dari total volume sedimen (Kementerian PUPR, 2021) Kondisi ini mempercepat

pendangkalan waduk dan berpotensi mengurangi umur teknis waduk yang dirancang untuk 100 tahun (Aisy *et al.*, 2023).

Sub DAS Keduang mengalami degradasi lahan yang signifikan, yang diperparah oleh perubahan penggunaan lahan dan aktivitas pertanian yang tidak terkendali, terutama pada lahan dengan kemiringan curam (Aisy *et al.*, 2023). Jika tidak segera ditangani, sedimentasi ini dapat menurunkan kapasitas tampung waduk dan mengurangi efektivitasnya dalam pengendalian banjir dan penyediaan air (Wahidin, 2020).

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk menganalisis sedimentasi dan kondisi hidrologi di suatu DAS adalah pemodelan *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). SWAT merupakan model berbasis fisik yang mampu mensimulasikan proses hidrologi, erosi, dan sedimentasi secara spasial dan temporal (Neitsch *et al.*, 2011). Model ini juga efektif untuk mengevaluasi dampak perubahan penggunaan lahan dan aktivitas manusia terhadap keseimbangan air dan sedimen di DAS (Lin *et al.*, 2020). Kinerja dan akurasi model SWAT itu sendiri dapat dioptimalkan melalui integrasi data meteorologi yang lebih komprehensif dan teknik penskalaan DAS (Polanco *et al.*, 2017). Kepercayaan terhadap hasil model SWAT telah divalidasi dalam berbagai penelitian, termasuk dengan menggunakan statistik Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) yang menunjukkan hasil yang memuaskan (Motovilov, 1999; Nash dan Sutcliffe, 1970). Aplikasi SWAT untuk prediksi umur waduk (reservoir lifespan) telah sukses dilakukan di berbagai belahan dunia, seperti untuk memprediksi laju

sedimentasi Waduk Nekemte di Ethiopia (Banti *et al.*, 2020) dan mengevaluasi efektivitas praktik konservasi di Waduk Adaena, Ghana (Kumi *et al.*, 2022). Di Indonesia, model ini juga telah diaplikasikan untuk kajian sedimentasi di Waduk Jatibarang (Herlambang *et al.*, 2021), analisis fungsi hidrologi dan sedimentasi di DAS Ngrancah (Ramadhan, 2020), dan Danau Tondano (Rombang *et al.*, 2022). Melihat keberhasilan aplikasi tersebut, penerapan model SWAT untuk mensimulasikan laju sedimentasi dan memprediksi umur guna Waduk Gajah Mungkur, dengan fokus pada kontributor utama yaitu Sub DAS Keduang, menjadi sangat penting dan mendesak untuk dilakukan. Hasil penelitian ini akan memberikan dasar ilmiah yang kuat bagi perencanaan strategis dan implementasi kebijakan konservasi yang tepat sasaran guna menyelamatkan fungsi strategis waduk.

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai sedimentasi dan proses hidrologi di Sub DAS Keduang yang mempengaruhi proses sedimentasi selama periode 2022–2024 menggunakan *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar perencanaan dan strategi mitigasi sedimentasi guna mendukung keberlanjutan fungsi Waduk Gajah Mungkur, Kabupaten Wonogiri, Provinsi Jawa Tengah.

## II. BAHAN DAN METODE

### A. Waktu dan Lokasi

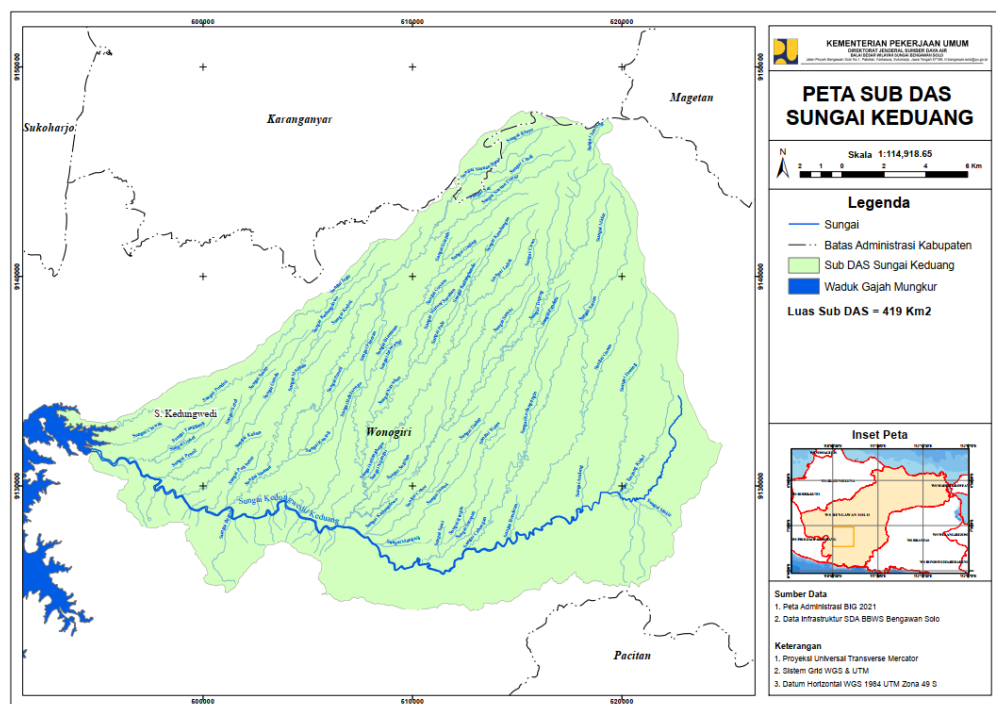
Penelitian ini dilakukan untuk periode tahun 2022 hingga 2024 di Sub Daerah

Aliran Sungai (Sub DAS) Keduang, yang merupakan bagian dari DAS Bengawan Solo yang terletak di Kabupaten Wonogiri, Provinsi Jawa Tengah, Indonesia. DAS ini dikenal sebagai sungai terpanjang di Jawa Tengah dengan luas wilayah sekitar ±16.100 km<sup>2</sup> dan panjang total sungai sekitar ±600 Km yang terletak di bagian tenggara Jawa Tengah. Lokasi geografis Sub DAS Keduang adalah 7°40' - 7°56' LS dan 110°56' - 111°10' BT. Sub DAS Keduang memiliki luas 419 km<sup>2</sup> dan secara administratif mencakup dua kabupaten,

yaitu Kabupaten Wonogiri dan Kabupaten Karanganyar. Gambar 1 adalah peta lokasi penelitian Sub DAS Keduang.

### B. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa data spasial dan data klimatologi yang dibutuhkan untuk menjalankan model SWAT, disajikan pada Tabel 1. Alat yang digunakan dalam pengolahan data dan pemodelan meliputi Perangkat Lunak QGIS (Quantum GIS) versi 3.16.16, dan Perangkat Lunak QSWAT3.



Gambar (Figure) 1. Lokasi Penelitian Sub DAS Keduang (*Keduang Sub-watershed Research Location*)  
Sumber (Source): Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo

Tabel (Table) 1. Data Penelitian (*Research data*)

No.	Data ( <i>data</i> )	Sumber ( <i>Source</i> )
1.	Data DEM resolusi spasial 8,23 m wilayah Sub DAS Keduang	DEMNAS
2.	Peta tutupan lahan tahun 2022-2024 skala 1 : 20.000	Citra Sentinel 2-A
3.	Data iklim tahun 2022-2024 di Wilayah Sub DAS Keduang	BBWS Bengawan Solo
4.	Peta administrasi wilayah Sub DAS Keduang skala 1:50.000	BBWS Bengawan Solo
5.	Data Debit Sungai Tahun 2022-2024 di aliran sungai <i>outlet</i> Sub DAS Keduang	BBWS Bengawan Solo
6.	Peta Jenis Tanah skala 1 : 150.000	BPDAS Solo

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (*Data processing 2025*)

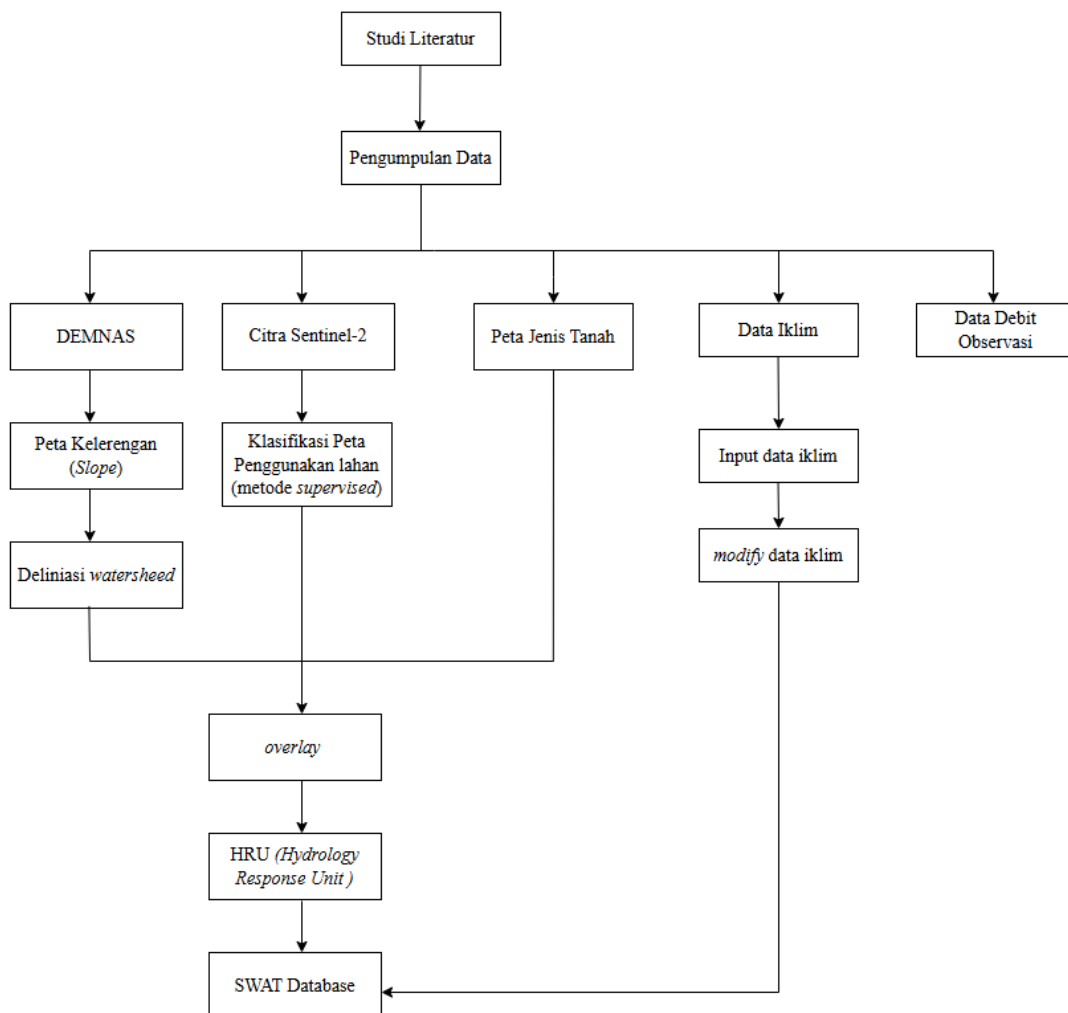
### C. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode pemodelan hidrologi dan sedimentasi berbasis *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) yang diintegrasikan dalam platform QSWAT3 pada perangkat lunak QGIS. Tahapan penelitian secara umum meliputi:

#### 1. Pengumpulan Data

Data yang digunakan terdiri dari DEM untuk mendapatkan informasi topografi bentuk wilayah DAS, citra satelit Sentinel-2 tahun 2022-2024

untuk memperoleh penggunaan lahan secara spasial dan temporal, peta jenis tanah untuk mengetahui karakteristik distribusi tanah yang mempengaruhi proses sedimentasi, data iklim harian, dan data debit sungai. Data iklim yang digunakan mencakup curah hujan, temperatur, kecepatan angin, kelembapan, dan radiasi matahari yang digunakan untuk mendapatkan hasil proses hidrologi (Neitsch *et al.*, 2011), seperti tersaji pada Gambar 2.



Gambar (Figure) 2. Diagram Alir Pengumpulan dan Pengolahan Data (Data Collection and Processing Flowchart)

Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)

Pengolahan data parameter dalam SWAT meliputi:

a. Pengolahan Data Penggunaan Lahan

Pengolahan data penggunaan lahan dilakukan untuk mendapatkan peta tutupan lahan yang akurat sebagai *input* utama dalam model SWAT. Proses ini diawali dengan tahapan *pre-processing* citra Sentinel-2 yang bertujuan memperbaiki kualitas data citra, seperti koreksi geometrik dan koreksi atmosferis. Setelah itu, dilakukan pembuatan *training sample* dengan cara memilih contoh piksel yang mewakili masing-masing kelas tutupan lahan, seperti sawah, hutan, pemukiman, perkebunan, sungai, dan lahan terbuka (Neitsch *et al.*, 2011). Klasifikasi citra dilakukan menggunakan algoritma *Random Forest*, yaitu metode berbasis *machine learning* yang memiliki tingkat akurasi tinggi dalam pengolahan citra. Hasil klasifikasi kemudian diuji akurasinya menggunakan matriks konfusi untuk mengetahui tingkat ketepatan klasifikasi dan nilai Kappa.

b. Pengolahan Data Topografi dan Jenis Tanah

Data topografi dan jenis tanah yang telah dikumpulkan kemudian diolah lebih lanjut untuk keperluan pemodelan. Data DEM digunakan untuk deliniasi Daerah Aliran Sungai (DAS), yang

mencakup penentuan batas DAS, identifikasi jaringan aliran, serta pembentukan sub-DAS. Selain itu, dilakukan analisis kemiringan lereng yang dibagi ke dalam beberapa kelas untuk melihat variasi tingkat kemiringan lereng yang mempengaruhi potensi erosi. Peta jenis tanah yang semula berbentuk vektor dikonversi ke dalam format raster agar dapat dibaca dan digunakan dalam sistem SWAT. Proses ini penting karena karakteristik tanah berpengaruh pada kemampuan tanah dalam menyerap air dan mengontrol laju limpasan permukaan.

c. Penyusunan Parameter SWAT

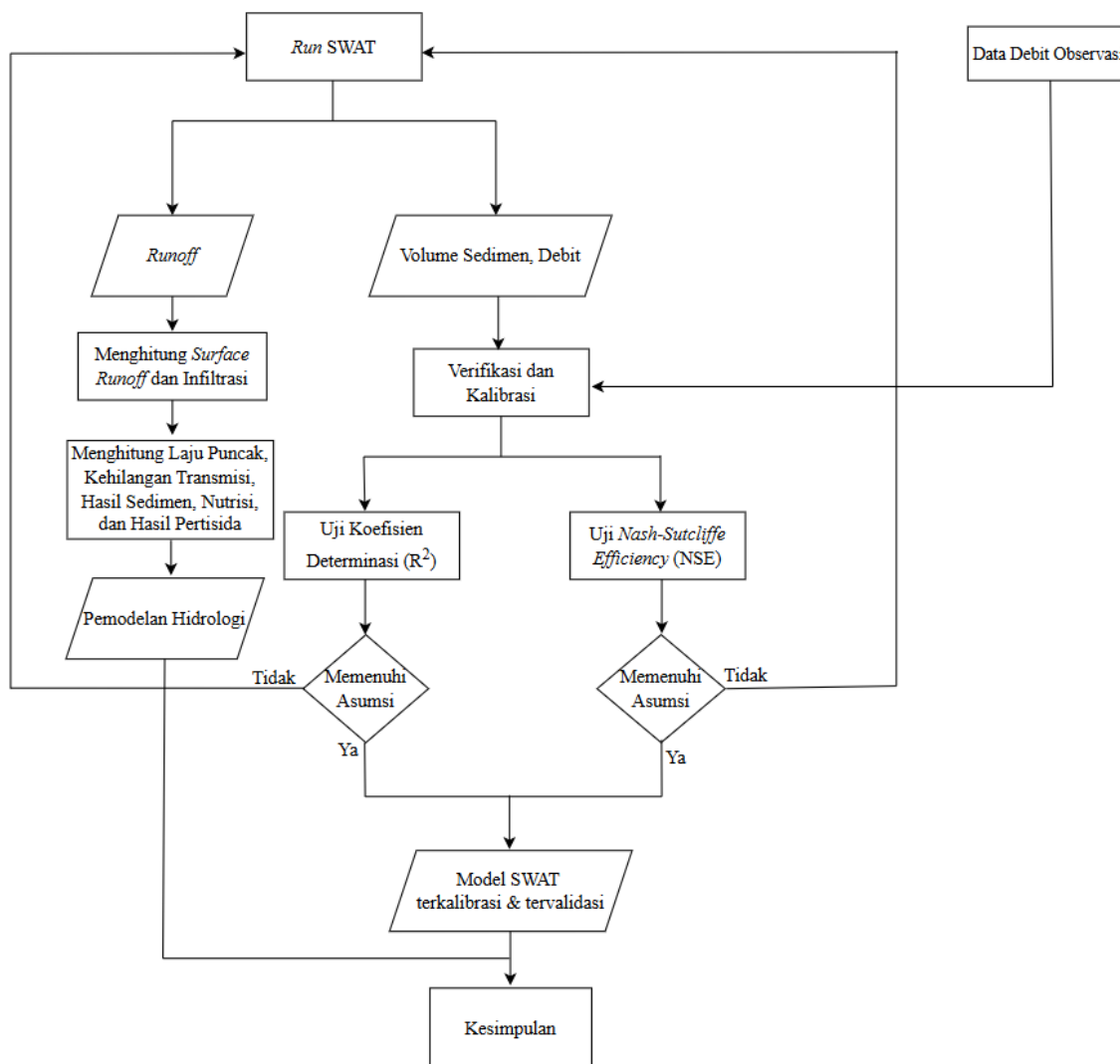
Langkah selanjutnya menyusun parameter SWAT dengan membentuk *Hydrologic Response Unit* (HRU). HRU merupakan kombinasi unik dari penggunaan lahan, jenis tanah, dan kelas kemiringan lereng yang merepresentasikan unit terkecil dalam pemodelan. Peta penggunaan lahan, jenis tanah, dan kemiringan lereng diintegrasikan untuk membentuk HRU yang menjadi dasar perhitungan debit dan sedimentasi di masing-masing sub-DAS. Data iklim harian yang telah dikonversi ke dalam format *.txt* lalu *input* ke dalam *data base* SWAT untuk memberikan informasi cuaca harian yang mempengaruhi proses hidrologi,

seperti presipitasi, evaporasi, dan aliran permukaan.

## 2. Simulasi Model SWAT

Model SWAT dijalankan untuk periode 2022–2024 dengan memanfaatkan seluruh data yang telah disiapkan (Gambar 3). Model ini digunakan untuk mensimulasikan debit aliran (*streamflow*), *sediment yield* (total sedimen yang terangkut hingga ke outlet sub-DAS), dan *sediment out*

(*load* sedimen yang keluar dari outlet utama DAS setelah mengalami proses deposisi dan transportasi di jaringan sungai). Hasil simulasi ini memberikan gambaran tentang kondisi hidrologi dan pola sedimentasi yang terjadi di Sub DAS Keduang selama periode penelitian. Simulasi yang dihasilkan menjadi analisis dan evaluasi performa model (Neitsch *et al.*, 2011).



Gambar (Figure) 3. Diagram Alir Pengolahan SWAT (SWAT Processing Flowchart)  
Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)

Rumus *sediment yield* :

$$Sed = 11,8 (Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{hru})^{0,56} \times K_{USLE} \times LS_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times CFR \quad (1)$$

Keterangan (*remarks*):

- Sed : Sediment *yield* (ton/ha/waktu)
- $Q_{surf}$  : Volume *limpasan* permukaan (mm H<sub>2</sub>O/hari)
- $q_{peak}$  : Laju *limpasan* puncak (m<sup>3</sup>/s)
- $area_{hru}$  : Luas HRU(ha)
- 11,8 : Faktor konversi satuan untuk menghasilkan *output* dalam ton
- 0,56 : Eksponen empiris yang digunakan untuk menghitung hubungan non-linear antara  $Q_{surf}$ ,  $q_{peak}$ ,  $area_{hru}$
- $K_{USLE}$  : Faktor erodibilitas tanah
- $LS_{USLE}$  : Faktor panjang dan kemiringan lereng
- $C_{USLE}$  : Faktor penggunaan lahan dan pengelolaan tanaman
- $P_{USLE}$  : Faktor praktik konservasi
- CFRG : Faktor fragmen kasar

Rumus *sediment out* :

$$sed_{out} = sed_{ch} \cdot \frac{V_{out}}{V_{ch}} \quad (2)$$

Keterangan (*remarks*):

- $sed_{out}$  : sedimen yang diangkut keluar dari suatu aliran (ton)
- $sed_{ch}$  : Jumlah sedimen tersuspensi di dalam suatu aliran (ton),
- $V_{out}$  : Volume aliran keluar dalam suatu waktu (m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O),
- $V_{ch}$  : Volume air di segmen aliran (m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O).

### 3. Validasi Model

Hasil simulasi debit dari model SWAT diverifikasi dengan data debit observasi menggunakan koefisien determinasi (R<sup>2</sup>) dan *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) untuk mengukur tingkat akurasi model. Uji koefisien Determinan merupakan suatu ukuran dalam analisis regresi yang menunjukkan besaran variabel independen yang mampu menjelaskan variabel dependen (Zaka dan Sutopo, 2017). R<sup>2</sup> mengukur seberapa baik

variabel independen dapat menjelaskan variasi dalam variabel dependen. Nilai R<sup>2</sup> berkisar antara 0 hingga 1, dimana nilai yang lebih tinggi dapat menunjukkan bahwa model regresi memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menjelaskan variasi data.

Rumus Koefisien Determinasi (R<sup>2</sup>):

$$R^2 = \frac{(x-\bar{x})^2 - (x-y)^2}{(x-\bar{x})^2} \quad (3)$$

Keterangan (*remarks*):

- $x$  = Data observasi
- $\bar{x}$  = Data observasi rata-rata
- $y$  = Data simulasi dari model

Uji *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) adalah metode yang digunakan untuk mengevaluasi efisiensi model dalam memprediksi data, khususnya dalam konteks hidrologi dan pengelolaan sumber daya air. NSE memberikan ukuran seberapa baik prediksi model mendekati nilai observasi aktual (Nash dan Sutcliffe, 1970). Uji NSE mengacu pada penelitian (Sujarwo *et al.*, 2020).

Rumus *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - Q_{sin,t})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (4)$$

Keterangan (*remarks*):

- $Q_{obs,t}$  : nilai observasi pada waktu t
- $Q_{sin,t}$  : nilai simulasi pada waktu t
- $\bar{Q}_{obs}$  : rata-rata nilai observasi

Kategori NSE dibagi menjadi tiga, antara lain NSE = 1 sebagai model sempurna yang sesuai dengan

observasi,  $NSE = 0$  sebagai model tidak lebih baik dari rata-rata observasi, dan  $NSE < 0$  sebagai model lebih buruk dari rata-rata observasi. Nilai efisiensi NSE dikelompokkan menjadi 3 kelas yang terdapat pada Tabel 2.

Tabel (Table) 2. Nilai Efisiensi NSE (*NSE value*)

Nilai NSE ( <i>NSE values</i> )	Kategori ( <i>Categories</i> )
$NSE > 0,75$	Sangat Memuaskan
$0,36 < NSE < 0,75$	Memuaskan
$NSE < 0,36$	Tidak Memuaskan

Sumber (Source): Motovilov, 1999

#### 4. Optimasi Hasil Pemodelan

Hasil simulasi yang sudah terbentuk akan dikalibrasi dengan parameter CN (*curve number*) untuk mendapatkan hasil pemodelan yang mendekati dengan hasil observasi. Menurut Neitsch (2011), nilai CN berpengaruh terhadap tiga parameter yaitu *landuse*, *slope*, dan *soil type* yang berperan penting dalam menentukan tingkat akurasi dan hasil keseluruhan pemodelan. Nilai *curve number* menjadi acuan dalam proses kalibrasi model yang dapat dilihat pada hasil pemodelan hidrologi. Nilai CN memiliki rentang dari 0 – 100. Apabila nilai CN semakin mendekati 100 maka pemodelan hidrologi lebih banyak berada proses *runoff*, sedangkan apabila mendekati 0 maka proses hidrologi lebih banyak terinfiltrasi.

#### 5. Analisis Data

Tahapan terakhir melakukan analisis hasil simulasi yang telah dikalibrasi dan divalidasi. Analisis difokuskan pada sebaran spasial sedimentasi di

wilayah Sub DAS, laju sedimentasi tahunan, serta evaluasi hubungan antara debit hasil simulasi dan debit observasi untuk mengukur performa model. Selain itu, dilakukan analisis keterkaitan antara *sediment yield* dan *sediment out* untuk mengetahui seberapa besar sedimen yang terangkut dari wilayah sub-DAS menuju *outlet* utama. Hasil analisis ini memberikan proses sedimentasi yang terjadi di Sub DAS Keduang selama periode tahun 2022-2024.

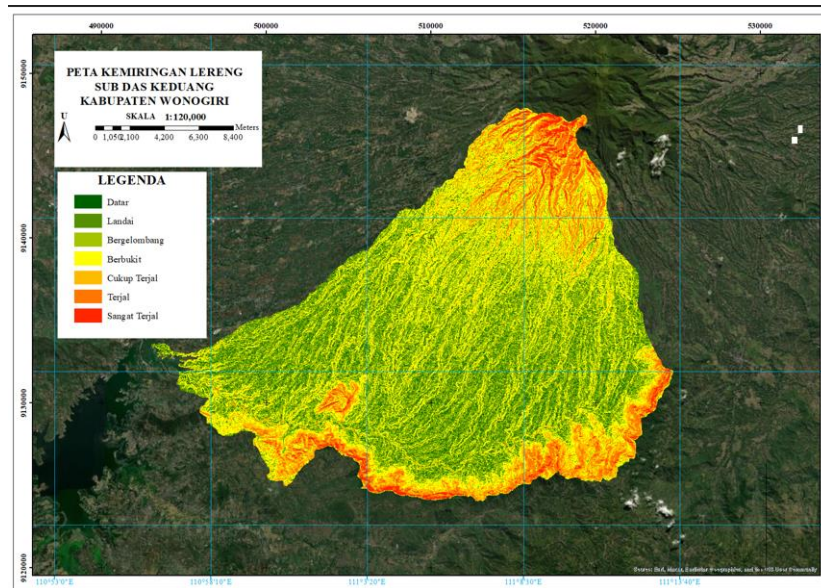
### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 1. Karakteristik Sub DAS Keduang

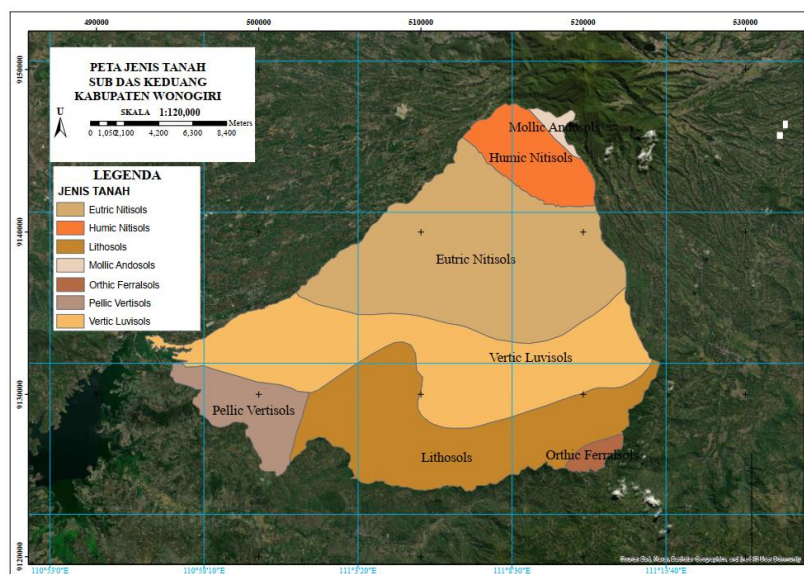
Sub DAS Keduang memiliki karakteristik kemiringan lereng yang mempengaruhi laju sedimentasi. Karakteristik kemiringan lereng di dominasi pada kelas agak miring dengan luas 12401,93 Ha, untuk kelas berbukit seluas 10808,03 Ha, kelas berombak seluas 8507,16 Ha, kelas cukup terjal seluas 4356,89 Ha, kelas terjal seluas 2857,05 Ha, kelas datar seluas 2,197,57 Ha, dan kelas sangat terjal seluas 742,05 Ha. Hasil peta kemiringan lereng divisualisasikan dengan gradasi warna yang merepresentasikan tingkat kemiringan lahan. Warna pada peta berkorelasi dengan kelas kemiringan, dimana area berwarna hijau cenderung mewakili kelas datar hingga agak miring, kuning mewakili kelas berbukit hingga cukup terjal, dan merah mengindikasikan kelas terjal hingga sangat terjal. Berdasarkan interpretasi visual dari peta kemiringan lereng pada Gambar 4, dapat diidentifikasi distribusi kelas kemiringan lereng di Sub DAS Keduang.

Karakteristik jenis tanah di wilayah Sub DAS Keduang didominasi oleh *eutric nitisols* sebesar 33,30% yang berpotensi baik untuk pertanian dan kehutanan karena drainase baik, struktur stabil, dan kesuburan sedang hingga tinggi. Luasan signifikan juga dimiliki *vertic luvisols* sebesar 28,87% dengan kandungan liat tinggi yang mempengaruhi air dan drainase, serta *lithosols* sebesar yang

merupakan area tanah tipis dan berbatu. Jenis tanah lain seperti *mollic andosols* dan *orthic ferralsols* memiliki luasan lebih kecil, namun keseluruhan keberagaman ini mencerminkan variasi karakteristik fisik dan kimia tanah yang perlu dipertimbangkan dalam pengelolaan lahan dan sumber daya alam di Sub DAS Keduang. Peta jenis tanah Sub DAS Keduang dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar (Figure) 4. Peta Kemiringan Lereng Sub DAS Keduang (Slope Map of Keduang Sub-watershed) Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)



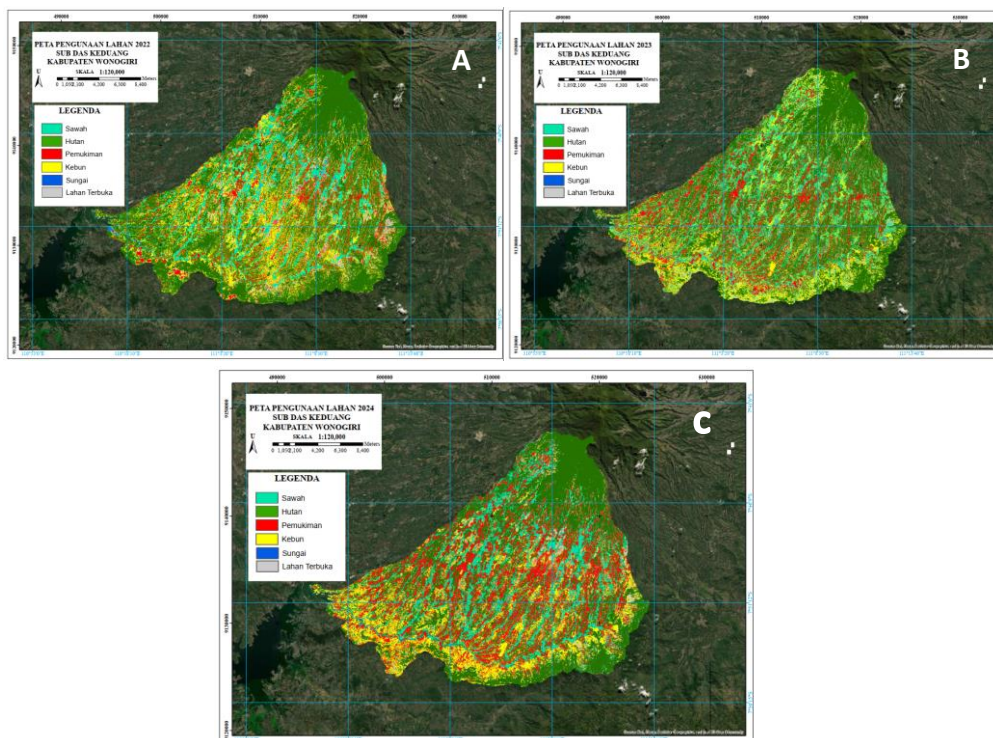
Gambar (Figure) 5. Peta Jenis Tanah Sub DAS Keduang (Soil Map of Keduang Sub-watershed) Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)

Perubahan penggunaan lahan memengaruhi karakteristik wilayah Sub DAS Keduang. Berdasarkan hasil klasifikasi citra tahun 2022 yang disesuaikan dengan klasifikasi resmi Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), tutupan lahan di wilayah ini didominasi oleh kelas vegetasi berkayu yang teridentifikasi sebagai hutan dengan luas sekitar 21.919,44 hektar. Kelas tersebut mencakup berbagai bentuk tutupan vegetasi seperti hutan rakyat dan kebun campuran yang memiliki karakteristik menyerupai hutan, sehingga luas totalnya lebih besar dibandingkan dengan data tutupan hutan resmi dari KLHK atau BPDAS Solo. Pada tahun 2023 mengalami peningkatan tutupan lahan yang pesat pada permukiman sebesar 7603,67 hektar dan penurunan pada luasan hutan menjadi

19670,38 hektar. Sedangkan pada tahun 2024 terjadi peningkatan tutupan lahan pada permukiman sebesar 9636,08 hektar dan penurunan pada hutan sebesar 17008,89 hektar. Hasil peta tutupan lahan tahun 2022-2024 di Sub DAS Keduang dapat dilihat pada Gambar 6.

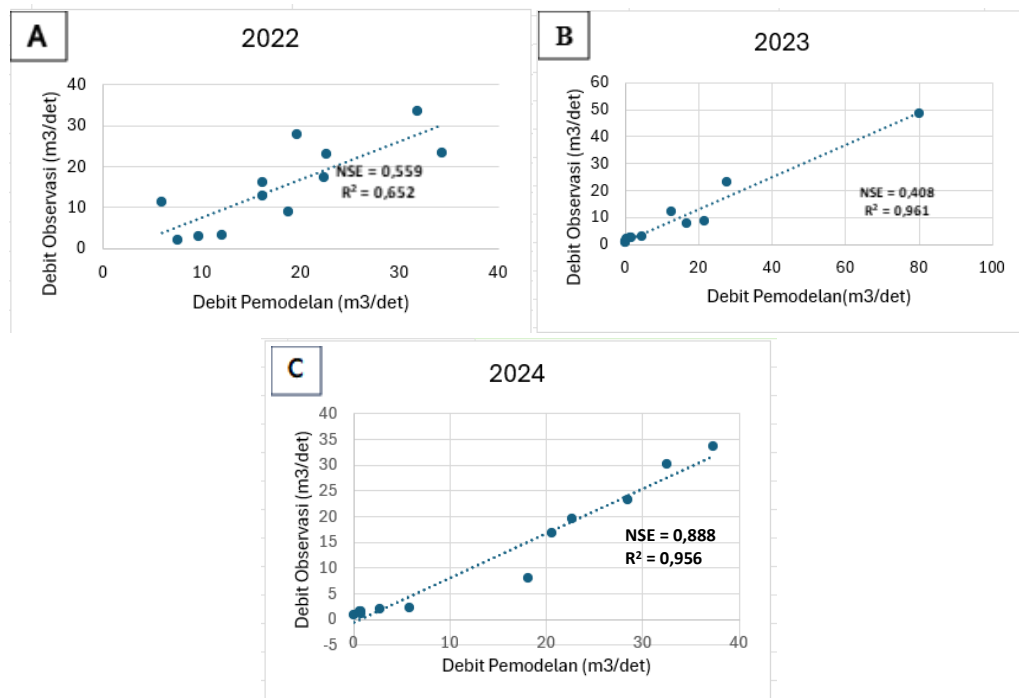
## 2. Hasil Validasi dan Verifikasi Model SWAT

Validasi dan verifikasi model dilakukan untuk memastikan kesesuaian hasil pemodelan SWAT dengan data debit observasi di lapangan. Evaluasi kinerja model dilakukan menggunakan dua parameter statistik yaitu koefisien determinasi ( $R^2$ ) dan *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE). Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai  $R^2$  dan NSE pada Gambar 7.



Gambar (Figure) 6. Peta Tutupan Lahan: (a) tahun 2022; (b) tahun 2023; dan (c) tahun 2024 (Landcover Maps: (a) year 2022; (b) year 2023; and (c) year 2024)

Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)



Gambar (Figure) 7. Hasil Uji R<sup>2</sup> dan NSE: (a) Tahun 2022; (b) Tahun 2023; dan (c) Tahun 2024 (R<sup>2</sup> and NSE Test Results: (a) year 2022; (b) year 2023; and (c) year 2024)

Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)

Hasil analisis menunjukkan bahwa kinerja model SWAT bervariasi setiap tahun. Pada 2022, nilai R<sup>2</sup> sebesar 0,652 dan NSE 0,559 menunjukkan hubungan linier yang cukup baik dengan akurasi moderat. Tahun 2023, R<sup>2</sup> meningkat menjadi 0,961, tetapi NSE menurun menjadi 0,408, mengindikasikan hubungan linier kuat namun akurasi prediksi menurun. Kinerja terbaik dicapai pada 2024 dengan R<sup>2</sup> sebesar 0,956 dan NSE 0,888, menunjukkan hubungan linier yang kuat dan akurasi tinggi. Variasi ini dipengaruhi oleh proses kalibrasi nilai *Curve Number* (CN), yang berpengaruh pada hasil pemodelan. Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Rombang (2022), menyatakan bahwa penggunaan R<sup>2</sup> dan NSE secara bersamaan penting karena masing-masing mengukur kekuatan hubungan linier dan tingkat akurasi model secara menyeluruh.

### 3. Hasil Optimasi Pemodelan

Pemodelan sedimentasi yang terbentuk dalam SWAT akan menghasilkan nilai *Curve Number* (CN). Nilai CN ini digunakan untuk mengoptimalkan hasil pemodelan. Hasil kalibrasi yang telah dilakukan terdapat perubahan nilai *curve number*. CN dalam perhitungan parameter retensi (S) mempengaruhi kemampuan tanah dan penutup lahan untuk menyerap air sebelum terjadi limpasan yang dipengaruhi oleh jenis tanah, penggunaan lahan, manajemen lahan, kemiringan, dan kadar air tanah. Sehingga, nilai CN berpengaruh terhadap tiga parameter yaitu *landuse*, *slope*, dan *soil type* yang berperan penting dalam menentukan tingkat akurasi dan hasil keseluruhan pemodelan. Tahap kalibrasi model dilakukan menggunakan data observasi debit bulanan dan hasil data simulasi model debit yang didapat dari

pemodelan SWAT. Pada tahun 2022 memiliki nilai CN sesudah kalibrasi sebesar 42,94 dimana sesuai dengan siklus hidrologi air lebih banyak terinfiltrasi ke dalam tanah. Sedangkan tahun 2023 dengan nilai CN sesudah kalibrasi 79,84 lebih banyak proses *surface runoff*, dan tahun 2024 memiliki nilai CN 80,33 sesuai dengan siklus hidrologi air yang lebih banyak pada proses *surface runoff*. Perubahan nilai CN ini menggunakan metode *trial and error* untuk mendapatkan hasil pemodelan yang sesuai. Perubahan nilai CN terdapat pada Tabel 3.

#### 4. Hasil Pemodelan Laju Sedimentasi

Laju sedimentasi (*sediment yield*) menunjukkan jumlah sedimen yang terangkut hingga ke outlet sub-DAS (Tatipata *et al.*, 2015). Hasil pemodelan *sediment yield* di Sub DAS Keduang selama tahun 2022-2024 terdapat pada Gambar 8 dan Gambar 9.

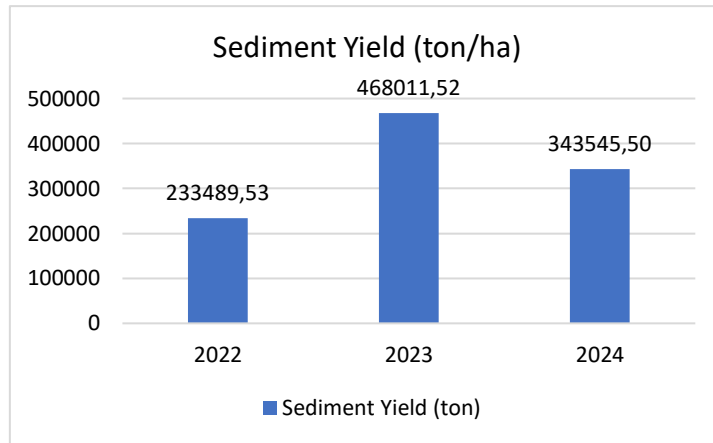
Hasil pemodelan menunjukkan bahwa laju sedimen di Sub DAS Keduang mengalami peningkatan selama periode 2022–2024, dengan puncaknya pada tahun 2023 sebesar 468.011,52 ton/ha. Peningkatan ini disebabkan oleh perubahan penggunaan lahan, khususnya perluasan area permukiman dan penurunan tutupan hutan yang

mengurangi kemampuan infiltrasi dan meningkatkan limpasan permukaan. Sebaliknya, laju sedimen terendah tercatat pada tahun 2022 sebesar 233.489,53 ton/ha, saat tutupan lahan masih didominasi oleh hutan yang mampu menahan limpasan dan menekan erosi. Penurunan *sediment yield* pada tahun 2024 dibandingkan tahun 2023 terutama dipengaruhi oleh perubahan data tutupan lahan. Dominannya pengaruh positif dari perubahan lain ditunjukkan oleh berkurangnya signifikan lahan terbuka yang memiliki kerentanan erosi sangat tinggi. Selain itu, peningkatan luas sawah memberikan kontribusi positif melalui peran vegetasinya dalam menahan butiran tanah dan memperlambat aliran permukaan, serta kemampuannya sebagai area resapan. Meskipun secara umum permukiman cenderung meningkatkan aliran permukaan akibat sifat permukaannya yang kedap air, peningkatan luas permukiman dalam simulasi ini diduga tidak cukup signifikan untuk mengimbangi pengaruh penurunan lahan terbuka dan penambahan sawah. Dengan demikian, perubahan komposit tutupan lahan ini secara keseluruhan berdampak pada penurunan potensi erosi dan *sediment yield*.

Tabel (Table) 3. Perubahan Nilai CN Optimasi Pemodelan (*Changes in CN Values Optimization Modeling*)

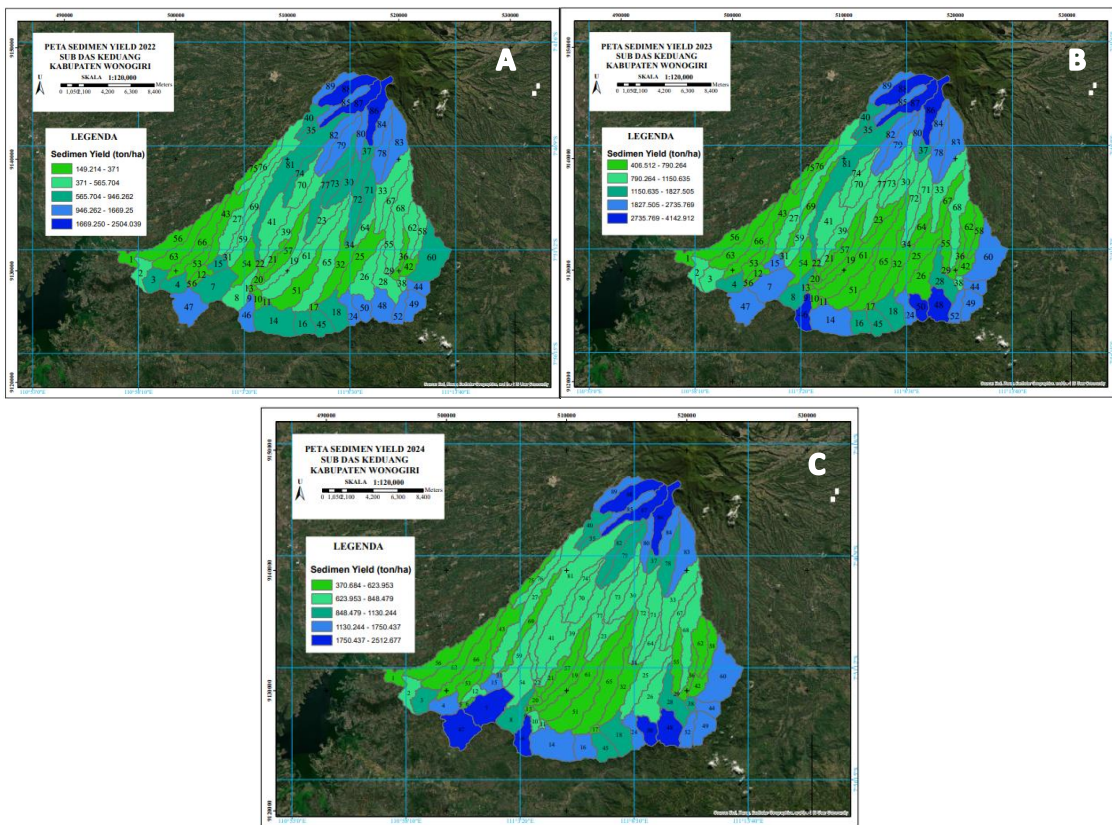
Tahun (year)	Nilai CN Sebelum Kalibrasi (CN Value Before Calibration)	Nilai CN Setelah Kalibrasi (CN Value After Calibration)
2022	79,32	42,94
2023	77,91	79,84
2024	80,33	80,33

Sumber (Source): Hasil analisis (*Analysis result*)



Gambar (Figure) 8. Grafik Hasil *Sediment Yield* Sub DAS Keduang (*Sediment Yield Graph of Keduang Sub-watershed*)

Sumber (Source): Hasil analisis (*Analysis result*)



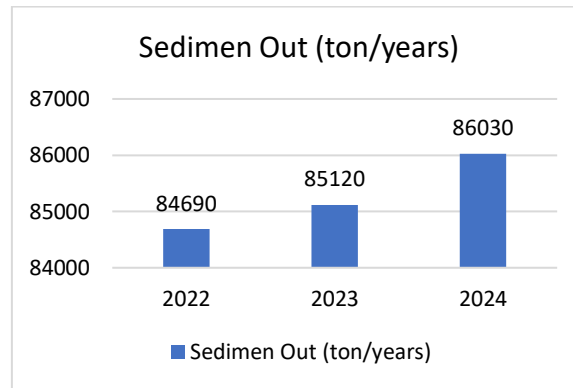
Gambar (Figure) 9. Peta *Sediment Yield* Sub DAS Keduang: (a) Tahun 2022; (b) Tahun 2023; dan (c) Tahun 2024 (*Sediment Yield Map of the Keduang Sub-DAS in (a) 2022; (b) 2023; and (c) 2024*)

Sumber (Source): Hasil analisis (*Analysis result*)

### 5. Hasil Pemodelan Sedimentasi di *Outlet*

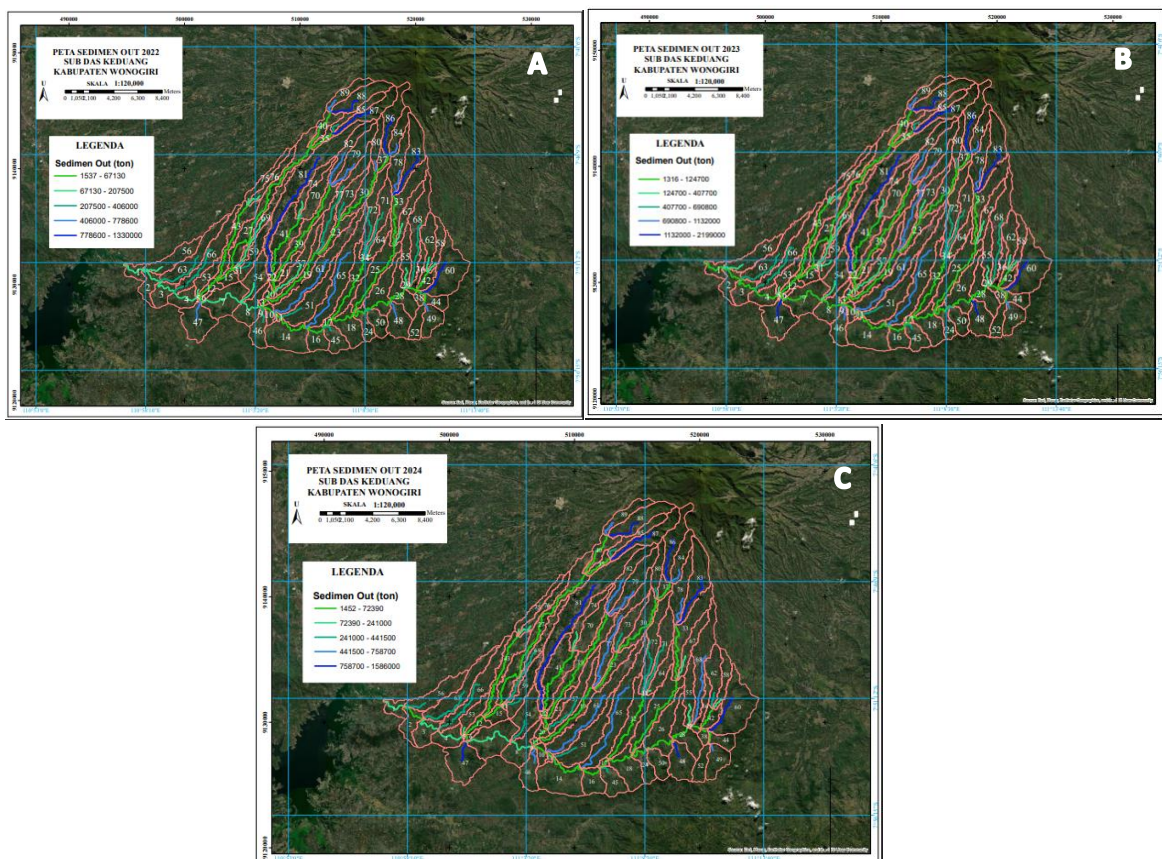
*Sediment out* menunjukkan jumlah sedimen yang keluar dari outlet utama DAS setelah mengalami proses deposisi dan

transportasi di jaringan sungai (Wijayanto, 2013). Hasil pemodelan *Sediment out* selama periode 2022-2024 terdapat pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar (Figure) 10. Grafik Hasil *Sediment Out* Sub DAS Keduang (*Sediment Out Result Graph for Keduang Sub-watershed*)

Sumber (Source): Hasil analisis (*Analysis result*)



Gambar (Figure) 11. Peta *Sediment Out* Sub DAS Keduang : (a) Tahun 2022; (b) Tahun 2023; dan (c) Tahun 2024 (*Sediment Out Map of the Keduang Sub-DAS in : (a) 2022; (b) 2023; and (c) 2024*)

Sumber (Source): Hasil analisis (*Analysis result*)

Hasil pemodelan sedimentasi di Sub DAS Keduang menunjukkan peningkatan dari tahun 2022 hingga 2024. Sedimentasi tertinggi terjadi pada tahun 2024 sebesar

86.030 ton, dipengaruhi oleh perluasan permukiman dan curah hujan tinggi yang meningkatkan pengangkutan sedimen ke *outlet*. Sedimentasi terendah tercatat pada

tahun 2022 sebesar 84.690 ton, disebabkan oleh dominasi tutupan hutan yang meningkatkan infiltrasi dan menurunkan ketahanan erosi lahan.

### 6. Hubungan Perubahan *Sediment Yield* Terhadap *Sediment Out*

Berdasarkan hasil pemodelan *sediment yield* dan *sediment out* dengan metode SWAT maka dapat diketahui perbandingan pola transportasi sedimen yang terjadi pada Sub DAS Keduang. Sebelumnya, perlu dilakukan konversi satuan *sediment yield* (ton/hektar) ke satuan massa dalam ton untuk menyesuaikan satuan *sediment out*, dengan cara mengalikan nilai *sediment yield* dengan luasan Sub DAS Keduang (hektar). Pada Tabel 4 dan Gambar 12 dapat dilihat perbandingan nilai antara

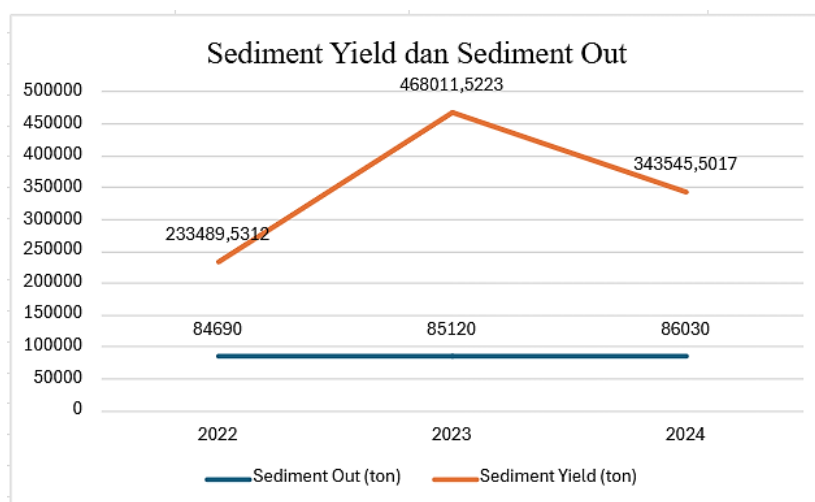
*sediment yield*, *sediment out*, presipitasi, dan hasil debit pemodelan.

Berdasarkan Gambar 12, terdapat perbedaan pola peningkatan sedimentasi antara *sediment yield* dan *sediment out* tahun 2022-2024. Pada hasil *sediment yield* terjadi peningkatan pesat pada tahun 2023 sedangkan *sediment out* terjadi peningkatan yang stabil dari tahun 2022 sampai 2024. Peningkatan *sediment yield* pada 2023 terjadi meskipun curah hujan dan debit menurun dibandingkan tahun 2022. Kondisi ini menunjukkan bahwa kenaikan suplai sedimen tidak semata-mata disebabkan oleh faktor hidrologis, melainkan oleh peningkatan erosi di hulu akibat perubahan penggunaan lahan dan menurunnya tutupan vegetasi.

Tabel (Table) 4. Hubungan *Sediment Yield* dan *Sediment Out* (Relationship between *Sediment Yield* and *Sediment Out*)

Tahun (Year)	<i>Sediment Yield</i> (ton)	<i>Sediment Out</i> (ton)	Presipitasi (Precipitation) (mm)	Debit Pemodelan (Modelling debit) (m <sup>3</sup> /detik)
2022	233489,53	84690	2700	18,04
2023	468011,52	85120	1862	14,31
2024	343545,50	86030	2343,5	14,30

Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)



Gambar 12. Pola Hubungan *Sediment Yield* dan *Sediment Out*

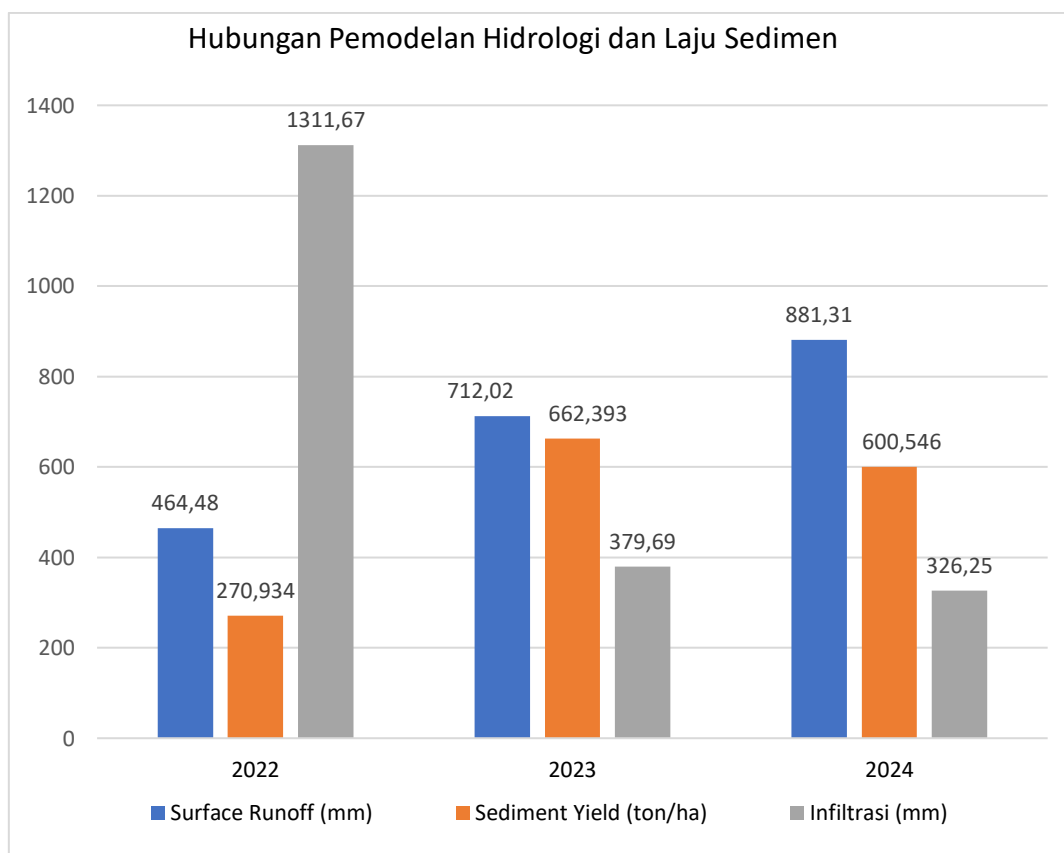
Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)

Hasil ini sejalan dengan temuan Neitsch *et al.* (2011) bahwa sediment yield pada SWAT sangat sensitif terhadap kondisi lahan dan faktor sumber sedimen, sementara sediment out lebih dipengaruhi oleh proses transportasi dan deposisi di sepanjang saluran. Perbedaan ini terjadi karena sedimen yang dihasilkan dari proses erosi dan masuk ke aliran sungai tidak seluruhnya mencapai outlet Sub DAS Keduang. Sebagian sedimen mengendap di lereng, saluran kecil, sawah, atau genangan lokal sebelum mencapai outlet. Sediment yield yang masuk ke dalam suatu aliran hingga berakhir di outlet Sub DAS Keduang sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran sungai yang membawa material sedimen.

Penurunan presipitasi curah hujan di tahun 2023 yang menyebabkan debit aliran menurun sehingga memengaruhi hasil sediment out di tahun 2023. Pada Tabel 4 terjadi penurunan presipitasi curah hujan di tahun 2023 sebesar 1862 mm yang menyebabkan debit aliran menurun sehingga memengaruhi hasil sedimen out di 2023.

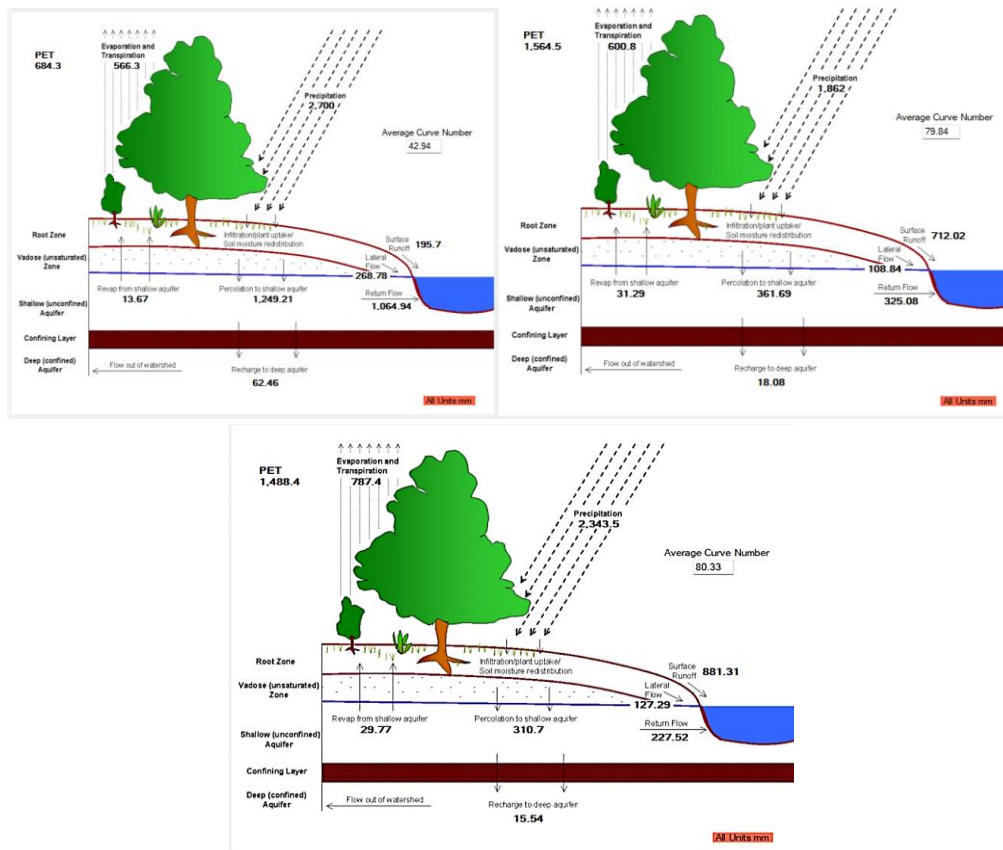
### 7. Hasil Pemodelan Hidrologi

Perubahan terjadi pada komponen neraca air terjadi selama periode penelitian. Hasil pemodelan hidrologi yang mencakup infiltrasi, *surface runoff*, dan penguapan terdapat pada Gambar 13 dan Gambar 14.



Gambar (Figure) 13. Grafik Hubungan Pemodelan Hidrologi dengan Sedimentasi (Graph of the Relationship between Hydrological Modeling and Sedimentation)

Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)



Gambar (Figure) 14. Hasil Pemodelan Hidrologi Sub DAS Keduang pada : (a) Tahun 2022; (b) Tahun 2023; dan (c) Tahun 2024 (Results of the Keduang Sub-watershed Hydrological Modeling in : (a) 2022; (b) 2023; and (c) 2024)

Sumber (Source): Hasil analisis (Analysis result)

Hasil pemodelan hidrologi dengan laju sedimentasi di Sub DAS Keduang menunjukkan adanya keterkaitan antara komponen hidrologi dan tingkat sedimentasi. Pada tahun 2022, infiltrasi mendominasi dengan nilai tertinggi sebesar 1311,67 mm, disertai dengan limpasan permukaan yang rendah dan *sediment yield* terendah sebesar 270,934 ton/ha. Kondisi ini mencerminkan peran tutupan hutan yang efektif dalam menahan air dan mengurangi erosi. Pada tahun 2023 dan 2024, terjadi penurunan signifikan pada infiltrasi seiring dengan peningkatan luas permukiman, yang menyebabkan limpasan permukaan dan laju sedimentasi meningkat tajam. Tahun 2023 mencatat *sediment yield* tertinggi sebesar 662,393

ton/ha, sedangkan limpasan permukaan terus meningkat hingga mencapai 881,31 mm pada tahun 2024. Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sahar (2021), diketahui bahwa pengurangan kemampuan infiltrasi akibat perubahan tata guna lahan mendorong peningkatan limpasan yang secara langsung berkontribusi pada percepatan laju sedimentasi. Temuan ini menunjukkan pentingnya pengelolaan penggunaan lahan dan penerapan konservasi tanah untuk mengurangi dampak sedimentasi yang semakin besar di Sub DAS Keduang.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, model SWAT mampu memberikan gambaran

menyeluruh mengenai sedimentasi dan proses hidrologi di Sub DAS Keduang selama 2022–2024. Hasil menunjukkan sediment yield tertinggi terjadi pada 2023 sebesar 119.543,18 ton/ha dan terendah pada 2022 sebesar 59.639,72 ton/ha, sedangkan sediment out di outlet DAS menunjukkan adanya kenaikan dari 84.690 ton (2022) menjadi 86.030 ton (2024). Perbedaan keduanya dipengaruhi oleh morfologi DAS, penggunaan lahan, erodibilitas tanah, curah hujan, dan debit aliran. Verifikasi model menunjukkan kinerja terbaik pada 2024 ( $R^2 = 0,956$ ;  $NSE = 0,888$ ), menegaskan bahwa SWAT efektif dalam memodelkan dan memprediksi dinamika hidrologi dan sedimentasi. Perubahan penggunaan lahan terbukti berdampak langsung pada neraca air, dengan penurunan infiltrasi dan peningkatan limpasan permukaan yang mempercepat erosi dan pengangkutan sedimen. Temuan ini menegaskan pentingnya penerapan strategi konservasi tanah dan pengelolaan tata guna lahan yang berkelanjutan untuk mengendalikan sedimentasi dan menjaga fungsi Waduk Gajah Mungkur. Model SWAT efektif digunakan sebagai alat perencanaan dalam pengelolaan DAS di masa depan. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mensimulasikan berbagai skenario konservasi (seperti pembangunan sabo dam, perubahan pola tanam, atau restorasi lahan kritis) menggunakan model SWAT guna mengevaluasi efektivitasnya dalam mengurangi sedimentasi sebelum diimplementasikan di lapangan.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan rasa terima kasih seluruh rekan dan Laboraturium di Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, atas semua bantuan yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini.

## KONTRIBUSI

Kontribusi setiap penulis yakni: Bandi Sasmito (penulis pertama) menyusun literatur *review*, konseptualisasi, dan penulisan naskah; Bambang Darmo Yuwono (penulis kedua) analisis hidrologi dan interpretasi hasil; Candrakanti Cahyaning Putri (penulis ketiga) mengumpulkan data dan, analisis citra; Smilya Sheren Reynalda (penulis keempat) pemetaan dan penyunting naskah

## DAFTAR PUSTAKA

- Aisy, R., Sukmono, A., Firdaus, S.H., 2023. Analisis Perubahan Laju Erosi pada Sub DAS Keduang Tahun 2016-2021 dengan Metode Universal Soil Loss Equation (USLE). *J. Geod. Undip* 12(2), 111–120.
- Asdak, C., 2010. Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Banti, M., Asfaw, D., Mengistu, D., 2020. *Modeling Sediment Yield and Reservoir Sedimentation Using (SWAT) Model: A Case of (Nekemte) Watershed, Ethiopia*. *J. Eng. Res. Reports* 15, 1–13.
- Hadi, M.P., Wibowo, S.B., 2018. Pemodelan Spasial Erosi dan Sedimentasi pada (Sub DAS) Keduang Wonogiri dengan Menggunakan USLE dan ArcGIS. *J. Bumi Indones.* 7.

- Hasnawir, 2012. Mitigasi Bencana Sedimen: Teori dan Aplikasi. Balai Penelitian dan Pengembangan Kehutanan, Makassar.
- Herlambang, H.L., Putri, M.R., Santosa, B., Suwarno, D., 2021. Kajian Potensi Sedimentasi Pada Waduk Jatibarang dengan Pemodelan SWAT (Soil and Water Assesment Tool). J. Tek. Sipil Unika Soegijpranata Semarang.
- Kementerian PUPR, 2021. Menuju (Waduk Gajah Mungkur) Bebas Sedimen, (Kementerian PUPR) Bangun Sabo Dam di (Sub DAS) Keduang.
- Kumi, E.N., Anornu, G.K., Owusu, E.S., Agyapong, E., 2022. *Application of {SWAT} Model to Assess the Impact of Land Use and Best Management Practices on Reservoir Sedimentation in the {Adaena} Watershed, Ghana*. J. Water Clim. Chang. 13, 2091–2111.
- Lin, B., Chen, X., Yao, H., 2020. *Threshold of Sub-Watersheds for SWAT to Simulate Hillslope Sediment Generation and Its Spatial Variations*. Ecological Indicators.
- Motovilov, Y.G., 1999. *Validation of a Distributed Hydrological Model Against Spatial Observations*. *Agric. For. Meteorol.* 257–277. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00083-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00083-5)
- Nash, J.E., Sutcliffe, J. V, 1970. *River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles*. J. Hydrol.
- Neitsch, S.L., Jeff, A., Kiniry, J.R., Williams, R.J., 2011. *Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas Water Resources Institute, Texas.
- Polanco, E.I., Fleifle, A., Ludwig, R., Disse, M., 2017. *Improving SWAT Model Performance in the Upper Blue Nile River Basin Using Meteorological Data Integration and Catchment Scaling*. Hydrol. Earth Syst. Sci. 1–28.
- Purnamasari, R., Djaenudin, D., Muhlish, A., 2021. Dampak Pendangkalan {Waduk Gajah Mungkur} terhadap Kinerja {PLTA} dan Lingkungan Sekitar. J. Tek. Hidro 14, 1–10.
- Rombang, J., Kalangi, J., Rantung, M., 2022. Penggunaan Model SWAT Untuk Prediksi Erosi dan Sedimen di Area Tangkapan Air Danau Tondano. J. Ilm. Sains 144–150.
- Sahar, A.A., Hassan, M.A., Jasim, A., 2021. *Estimating the volume of sediments and assessing the water balance of the Badra Basin, Eastern Iraq, using Swat Model and Remote Sensing Data*. Iraqi Geol. J. 88–99.
- Sujarwo, M.W., Indarto, Mandala, M., 2020. Pemodelan Erosi dan Sedimentasi di DAS Bajulmati: Aplikasi Soil dan Water Assesment Tool (SWAT). J. Ilmu Lingkung. 18(2), 2018–227.
- Tatipata, W.H., Soekarno, I., Sabar, A., Legowo, S., 2015. Analisis Volume Sedimen yang Mengendap Setelah T-Tahun Waduk Beroperasi (Studi Kasus: Waduk Cirata). J. Tek. Sipil ITB 22(3), 235–242.
- Wahidin, W., 2020. Analisis Laju Sedimentasi dan Konservasi di Hulu Waduk Malahayu. Infratech Build. J. 1(02).
- Zaka, A.R., Sutopo, 2017. Analisis Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Kepuasan Pelanggan Pada LBB Antologi Semarang. Diponegoro Journal Of Management. DIPONEGORO J. Manag.