

**KAJIAN KARAKTERISTIK HIDROLOGI DAERAH ALIRAN SUNGAI
DENGAN PENGGUNAAN LAHAN SAWIT
MENGGUNAKAN MODEL SWAT**

Tesis

Oleh

**ALIM YULIANTO
NPM 2425011011**



**MAGISTER TEKNIK SIPIL
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**KAJIAN KARAKTERISTIK HIDROLOGI DAERAH ALIRAN SUNGAI
DENGAN PENGGUNAAN LAHAN SAWIT
MENGGUNAKAN MODEL SWAT**

Oleh

ALIM YULIANTO

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK**

Pada

**Program Studi Magister Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**MAGISTER TEKNIK SIPIL
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

KAJIAN KARAKTERISTIK HIDROLOGI DAERAH ALIRAN SUNGAI DENGAN PENGGUNAAN LAHAN SAWIT MENGGUNAKAN MODEL SWAT

Oleh

ALIM YULIANTO

Karakteristik hidrologi Daerah Aliran Sungai (DAS) sangat dipengaruhi oleh perubahan penggunaan lahan, khususnya akibat perluasan perkebunan kelapa sawit yang terjadi di Kabupaten Kutai Timur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan lahan kelapa sawit terhadap *Surface Runoff*, Evapotranspirasi (ET), dan Tingkat Bahaya Rrosi (TBE) di DAS Makanyng Kecamatan Rantau Pulung, Kabupaten Kutai Timur dengan menggunakan model *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT). Analisis dilakukan dengan memanfaatkan data observasi lapangan, data spasial, data tanah, data tutupan lahan dan data iklim pada periode tahun 2010 sampai dengan tahun 2023 yang diolah melalui pemodelan berbasis QSWAT dan GIS.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa lahan kelapa sawit mendominasi penggunaan lahan sebesar 62,59% wilayah DAS atau seluas 7.738,51 ha. Hal ini menyebabkan peningkatan *surface runoff* sebesar 338,87–471,40 mm/tahun, penurunan nilai ET sebesar 452,98–459,50 mm/tahun, serta peningkatan Tingkat Bahaya Erosi (TBE) sebesar 65–403 ton/ha/tahun. Prakiraan laju erosi pada periode tahun 2025 sampai dengan tahun 2035 menunjukkan kecenderungan peningkatan intensitas erosi yang berkelanjutan. Temuan ini mengonfirmasi bahwa penggunaan lahan perkebunan kelapa sawit telah berdampak signifikan terhadap karakteristik hidrologi DAS dan meningkatkan risiko terjadinya degradasi lahan, sehingga diperlukan penerapan pengelolaan DAS yang baik dan berkelanjutan.

Kata kunci : das, model swat, kelapa sawit, surface runoff, erosi

ABSTRACT

A STUDY OF THE HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF A WATERSHED WITH OIL PALM LAND USE USING THE SWAT MODEL

By

ALIM YULIANTO

The hydrological dynamics of a watershed are strongly influenced by land-use changes, particularly the expansion of oil palm plantations that has occurred in East Kutai Regency. This study aims to analyze the effects of oil palm land use on surface runoff, evapotranspiration (ET), and erosion hazard level (EHL) in the Makanyng Watershed, Rantau Pulung District, East Kutai Regency, using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. The analysis utilized field observations, spatial data, soil data, land cover data, and climatic data from 2010 to 2023, processed through QSWAT and GIS-based modeling.

The results indicate that oil palm plantations dominate 62.59% of the watershed area, covering approximately 7,738.51 ha. This condition has led to an increase in surface runoff 338.87–471.40 mm/year, a decrease in ET values 452.98–459.50 mm/year, and an increase in erosion hazard levels 65–403 tons/ha/year. Projections for the 2025–2035 period show a continuing trend of increasing erosion intensity. These findings confirm that the expansion of oil palm plantations has significantly altered the watershed's hydrological balance and increased the risk of land degradation. Therefore, the implementation of sustainable watershed and land management practices is urgently needed.

Key words: watershed, swat model, oil palm, surface runoff, erosion.

Judul Tesis

**KAJIAN KARAKTERISTIK HIDROLOGI
DAERAH ALIRAN SUNGAI DENGAN
PENGGUNAAN LAHAN SAWIT
MENGGUNAKAN MODEL SWAT**

Nama Mahasiswa

: Alim Yulianto

Nomor Pokok Mahasiswa : 2425011011

Program Studi

: Magister Teknik Sipil

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Alim Yulianto
Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D
NIP 196705141993031002

Pembimbing II

Dyah Indriana
Prof. Dr. Ir. Dyah Indriana
Kusumastuti, S.T., M.Sc.
NIP 196912191995122001

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil

Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.
NIP. 19691030200031001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D.

Sekretaris

: Prof. Dr. Ir. Dyah Indriana
Kusumastuti, S.T., M.Sc.

Pengaji

Bukan Pembimbing : Dr. Ofik Taufik Purwadi, S.T.,M.T.

: Dr. Yuda Romdania, S.T.,M.T.

remak sahara

TOH

YR

2. Dekan Fakultas Teknik



: Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.
NIP. 19691030 200003 1001

3. Direktur Program Pascasarjana



: Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP. 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 23 Desember 2025

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN PENELITIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Alim Yulianto
NPM : 2425011011
Program Studi : Magister Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Judul Penelitian : Kajian Karakteristik Hidrologi Daerah Aliran Sungai Dengan Penggunaan Lahan Sawit Menggunakan Model SWAT

Dengan ini menyatakan bahwa penelitian yang saya lakukan dan laporan yang saya tulis adalah murni hasil karya saya sendiri, bukan hasil penjiplakan atau karya pihak lain, baik sebagian maupun seluruhnya. Segala sumber data, informasi, dan kutipan yang digunakan dalam penelitian ini telah dicantumkan secara jelas sesuai dengan kaidah penulisan ilmiah yang berlaku.

Apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran terhadap pernyataan ini, baik sebagian maupun seluruhnya, saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Universitas Lampung.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya dan penuh tanggung jawab untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 15 Januari 2026
Yang membuat pernyataan


Alim Yulianto

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Suka Maju, Kabupaten Lampung Barat, pada tanggal 17 Juli 2001 sebagai anak bungsu dari delapan bersaudara, putra dari Bapak Munirudin dan Ibu Mutongati. Pendidikan dasar ditempuh di SDN 3 Way Empulau Ulu dan lulus pada tahun 2013, kemudian melanjutkan ke MTsN 1 Lampung Barat dan lulus pada tahun 2016. Pendidikan menengah atas ditempuh di SMAN 1 Liwa Lampung Barat dan lulus pada tahun 2019. Kemudian melanjutkan pendidikan jenjang sarjana pada Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Lampung Tahun 2019 dan lulus dalam waktu tiga tahun enam bulan, tepatnya pada bulan April tahun 2023.

Pada tahun 2024, penulis melanjutkan pendidikan dan diterima sebagai mahasiswa Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Lampung. Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai kegiatan publikasi karya ilmiah salah satunya adalah publikasi karya ilmiah terindeks SINTA 3, dan penulis buku berjudul “Manajemen Terpadu Mangrove Dan Rekayasa Pesisir”. Penulis menyelesaikan pendidikan Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Lampung Pada Tahun 2025.

PERSEMBAHAN

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas limpahan rahmat, taufik, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan karya sederhana ini dengan penuh perjuangan dan pengorbanan. Setiap langkah yang ditempuh merupakan bukti nyata dari kasih sayang, doa, serta dukungan dari orang-orang tercinta yang senantiasa menjadi sumber kekuatan.

Dengan tulus dari hati yang paling dalam, karya ini penulis persembahkan kepada: Kedua orang tua tercinta, Bapak Munirudin dan Ibu Mutongati, sosok luar biasa yang dengan penuh kasih telah membentuk dan mendidik penulis hingga menjadi pribadi yang tegar dan berpendirian. Doa dan pengorbanan kalian adalah fondasi terkuat dalam setiap keberhasilan yang penulis raih. Walau Emak dan Bapak hanya menempuh pendidikan hingga sekolah dasar dan berasal dari keluarga sederhana, berkat doa dan kerja keras kalian, penulis kini dapat membuktikan diri sebagai Magister Teknik dalam keluarga kita.

Untuk saudara-saudaraku tercinta, terima kasih atas doa, semangat, dan nasihat yang tiada henti menguatkan langkah ini.

Untuk teman-teman seperjuangan, terima kasih telah menjadi bagian dari perjalanan luar biasa ini. Setiap canda, lelah, dan perjuangan bersama akan selalu menjadi kenangan yang tak tergantikan.

Dan yang tak kalah istimewa, dengan penuh cinta dan rasa syukur, penulis mempersembahkan karya ini kepada calon istri tercinta Reni Susilawati, yang telah menjadi sumber semangat, inspirasi, serta ketenangan hati di setiap langkah perjuangan. Terima kasih atas doa, dukungan, dan kesabaran yang tak ternilai. Semoga Allah meridhai perjalanan cinta dan kehidupan kita ke depan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas limpahan rahmat, taufik, serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis berjudul "Kajian Karakteristik Hidrologi Daerah Aliran Sungai Dengan Penggunaan Lahan Sawit Menggunakan Model SWAT."

Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Dalam proses penyusunan dan penulisan, penulis memperoleh dukungan, bimbingan, serta bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan tulus, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, yang selalu memberikan dukungan dan semangat mengejar cita-cita.
2. Bapak Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D., selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi dalam penyusunan penelitian ini.
3. Prof. Dr. Ir. Dyah Indriana Kusumastuti, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing II yang dengan sabar memberikan masukan, koreksi, dan bantuan hingga terselesaiannya tesis ini.
4. Bapak Dr. Ofik Taufik Purwadi, S.T.,M.T., selaku dosen penguji I yang telah memberikan masukan, kritik dan saran yang membangun dalam penelitian ini.

5. Dr. Yuda Romdania, S.T.,M.T., selaku dosen penguji II yang tak henti-hentinya mengingatkan, memberi saran, dan koreksi dalam penulisan penelitian ini.

Penulis juga menyampaikan rasa terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyusunan tesis ini. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa karya ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi penyempurnaan karya di masa mendatang. Semoga tesisini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, khususnya bagi masyarakat, mahasiswa, dan pihak akademisi Universitas Lampung.

Bandar Lampung, Januari 2026.

Alim Yulianto

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang dan Masalah	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat Penelitian	3
1.5. Batasan Masalah	4
1.6. Ruang Lingkup Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Penelitian Terdahulu	6
2.2. Karakteristik Hidrologi Daerah Aliran-Sungai (DAS)	11
2.3. Penggunaan Lahan	12
2.4. Tingkat Bahaya Erosi (TBE)	14
2.5. Limpasan Permukaan (<i>Surface Runoff</i>)	15
2.6. Kemiringan Lereng	16
2.7. Perubahan Pola Aliran Sungai	17
2.8. Quantum Geografi Informasi Sistem (QGIS)	18
2.9. Model <i>Soil and Water-Assessment Tool</i> (SWAT)	19
III. METODE PENELITIAN	21
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	21
3.2. Pelaksanaan Penelitian	22
3.2.1 Tahap Persiapan	24
3.2.2 Tahap Pengolahan	27
3.2.3 Tahap Analisis	44
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	53
4.1 Hasil	53
4.1.1 Dampak Lahan Sawit Terhadap Karakteristik Hidrologi DAS	53
4.1.2 Sedimentasi Hasil model SWAT	63
4.1.3 Prakiraan Erosi Tahun 2025 - 2035 Menggunakan Model SWAT	66

4.2 Pembahasan	69
4.2.1 Dampak Lahan Sawit Terdahap Karekteristik Hidrologi	69
4.2.2 Sedimentasi Hasil Pemodelan SWAT	82
4.2.3 Prakiraan Erosi Tahun 2025 - 2035 Menggunakan Model SWAT84	
V. KESIMPULAN DAN SARAN	89
DAFTAR PUSTAKA	91
LAMPIRAN	97

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Penelitian Terdahulu (<i>State Of The Art</i>)	6
2. Klasifikasi Penggunaan Lahan	13
3. Tingkat Bahaya Erosi (TBE)	15
4. Klasifikasi Kemiringan Lereng	16
5. Rencana Kegiatan	21
6. Data Primer	25
7. Data Sekunder	25
8. Perangkat Keras (<i>Hardware</i>)	26
9. Perangkat Lunak (<i>Software</i>)	27
10. Klasifikasi Penggunaan Lahan Hasil Model SWAT	70
11. Peningkatan <i>surface runoff</i> pada Sub-DAS 11	71
12. <i>Surface runoff</i> hasil model SWAT pada wilayah HRU	71
13. Nilai <i>Evapotranspirasi</i> (mm/tahun) Hasil Model SWAT	74
14. Nilai <i>Evapotranspirasi</i> (ET) Hasil Model SWAT	75
15. Besaran Erosi Tahunan Pada Wilayah HRU	78
16. Besaran Erosi Menggunakan Metode USLE	80
17. Besar Sedimen Masuk ke <i>Reach</i>	83
18. Besar Sedimen Keluar <i>Reach</i>	84
19. Tingkat Bahaya Erosi (TBE) Menggunakan Metode USLE	85
20. Tingkat Bahaya Erosi (TBE) Pada Unit HRU	87

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Perangkat lunak QGIS versi 3.44	19
2. Model SWAT versi 2.0.1	20
3. Peta lokasi penelitian pada DAS Makanyng, Kecamatan Rantau Pulung	22
4. Diagram alir penelitian	23
5. Citra drone hasil pemetaan di lapangan	28
6. Proses digitasi aliran sungai	29
7. Data <i>shapefile</i> sungai hasil digitasi	30
8. Penggabungan data DEM (<i>Merge</i>)	31
9. Proses pemotongan data DEM	31
10. Konversi format data tanah	32
11. Pengubahan data <i>vektor</i> ke data <i>raster</i>	33
12. Reklasifikasi pada data tutupan lahan	34
13. Pengubahan data <i>vektor</i> ke data <i>raster</i>	35
14. Parameter data kecepatan angin	36
15. Konversi data iklim exel ke format (.txt)	37
16. Input data DEM	39
17. Kalibrasi menggunakan data sungai hasil digitasi	40
18. Pemilihan <i>outlet</i> DAS	40
19. Input data tutupan lahan dan data tanah	41
20. Proses <i>filter by landuse</i>	42
21. Proses <i>weather stations</i>	43
22. Proses validasi pada Write SWAT <i>input tables</i>	44
23. Input tanggal pada proses <i>run</i> SWAT	45
24. Proses <i>running</i> model SWAT	46
25. Proses read SWAT <i>Output</i>	47

26. Analisis erosi pada pemodelan SWAT	49
27. Peta luas penggunaan lahan hasil model SWAT pada lokasi Penelitian	53
28. <i>Surface runoff</i> (mm/tahun) pada Sub-DAS 11	54
29. Peta <i>Surface runoff</i> (mm/tahun) pada DAS Makanyng hasil model SWAT	55
30. Peta <i>surface runoff</i> (mm/tahun) hasil model SWAT pada unit HRU	56
31. Peningkatan <i>surface runoff</i> (mm/tahun) pada Lokasi Penelitian	57
32. Peta <i>evapotranspirasi</i> (mm/tahun) hasil model SWAT pada unit HRU	58
33. Penurunan <i>evapotranspirasi</i> (mm/tahun) hasil pemodelan SWAT	59
34. Grafik erosi hasil model SWAT	60
35. Peta tingkat bahaya erosi pada wilayah total HRU	61
36. Peta erosi (ton/Ha/tahun) hasil model SWAT pada DAS Makanyng	62
37. Peta sedimen masuk (ton/tahun) hasil model SWAT pada DAS Makanyng	63
38. Peta sedimen keluar (ton/tahun) pada <i>reach</i> ton/tahun	65
39. Peta prakiraan erosi (ton/Ha/tahun) periode 2025 – 2035 hasil model SWAT pada DAS Makanyng	67
40. Peta prakiraan erosi (ton/Ha/tahun) menggunakan metode USLE periode 2025 – 2035 hasil model SWAT	68
41. Hubungan antara besarnya <i>surface runoff</i> (mm/tahun) dengan erosi (ton/Ha/tahun) pada DAS Makanyng	78

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang dan Masalah

Daerah Aliran Sungai (DAS) merupakan suatu sistem kompleks yang mempunyai struktur hierarki serta fungsi utuh terdiri dari sistem sumber daya air, suatu ekosistem, dan sistem sosial ekonomi (Cao et al., 2022). Daerah Aliran Sungai (DAS) berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem, mengatur aliran air, serta menyediakan sumber daya air bagi kebutuhan manusia di seluruh dunia (Han & Xu, 2022). Karakteristik hidrologi DAS, seperti debit sungai, *infiltrasi*, erosi, dan *surface runoff*, sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor alami dan buatan, salah satu faktor utama yang memengaruhi karakteristik hidrologi DAS adalah penggunaan lahan (Natnael et al., 2025; Budiyanto et al., 2015; Junaidi, 2015).

Penggunaan lahan pertanian yang signifikan di Kabupaten Kutai Timur adalah lahan perkebunan kelapa sawit. Perkebunan kelapa sawit berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir karena tingginya permintaan global akan minyak kelapa sawit sebagai bahan baku industri pangan, kosmetik, dan energi. Meskipun memiliki dampak ekonomi yang besar, tetapi ekspansi perkebunan sawit juga membawa dampak lingkungan yang signifikan, terutama terhadap karakteristik hidrologi DAS. Karakteristik hidrologi DAS tidak terlepas dari pengaruh penggunaan lahannya (Liu et al., 2025). Pada wilayah yang luasnya didominasi oleh perkebunan sawit, proses hidrologi seperti *infiltrasi*, *surface runoff*, dan *evapotranspirasi* cenderung mengalami perubahan yang signifikan. Perubahan ini mencerminkan adanya pengaruh langsung dari penggunaan lahan terhadap keseimbangan air pada DAS.

Ketika hutan digantikan oleh perkebunan sawit, penyerapan air tanah akan berkurang, sementara *surface runoff* dan erosi meningkat. Selain itu, berkurangnya hutan menyebabkan peningkatan risiko banjir serta penurunan kualitas air akibat peningkatan sedimentasi, seperti halnya yang terjadi pada daerah aliran sungai Makanyng bertepatan di Kecamatan Rantau Pulung, Kota Sangatta Kabupaten Kutai Timur. Kasus yang dialami mulai dari banjir saat terjadi hujan, kekurangan air sebagai penunjang kebutuhan perumahan, kualitas air kurang baik, serta aliran anak sungai yang mengering. Untuk memahami dampak penggunaan lahan sawit terhadap karakteristik hidrologi DAS di wilayah tersebut, diperlukan pendekatan yang komprehensif dan sistematis. Salah satu alat efektif untuk menganalisis perubahan tersebut adalah *Model Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), sebuah model fisik yang digunakan untuk mensimulasikan proses hidrologi dan kualitas air dalam DAS berdasarkan penggunaan lahan, iklim, serta praktik pengelolaan tanah (Natnael et al., 2025). Model ini memungkinkan untuk mengukur dan memprakiraan bagaimana penggunaan lahan sawit mempengaruhi berbagai karakteristik hidrologi, seperti aliran air, sedimentasi, dan erosi.

Kajian ini menjadi semakin penting mengingat potensi penggunaan lahan sawit yang terus berlanjut di Indonesia, khususnya di wilayah-wilayah yang memiliki sumber daya alam melimpah, sehingga dengan menggunakan model SWAT, studi ini akan memberikan wawasan mendalam tentang bagaimana penggunaan lahan sawit memengaruhi karakteristik hidrologi DAS dan memberikan rekomendasi untuk pengelolaan DAS yang berkelanjutan. Penelitian ini juga dapat memberikan landasan ilmiah bagi para pembuat kebijakan dalam merencanakan pengelolaan lahan dan sumber daya air yang lebih bijaksana di masa depan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, pertanyaan utama yang akan dianalisis dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana dampak penggunaan lahan sawit terhadap besarnya *surface runoff*, besarnya *evapotranspirasi* (ET) dan besarnya erosi di DAS Makanyng, Kecamatan Rantau Pulung, Kabupaten Kutai Timur?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan lahan sawit terhadap besaran sedimen yang dihasilkan oleh simulasi model *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) di DAS Makanyng?
3. Bagaimana prakiraan besar erosi akibat dampak penggunaan lahan sawit pada periode tahun 2025 - 2035 menggunakan model SWAT?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian adalah untuk memberikan jawaban atas rumusan masalah, tujuan tersebut dirinci dalam beberapa poin berikut:

1. Menganalisis dampak penggunaan lahan sawit terhadap besarnya *surface runoff*, besarnya *evapotranspirasi* (ET) dan besarnya erosi di DAS Makanyng, Kecamatan Rantau Pulung, Kabupaten Kutai Timur.
2. Menganalisis besaran sedimen pada DAS Makanyng, Kecamatan Rantau Pulung, Kabupaten Kutai Timur.
3. Memprakirakan besaran erosi sebagai dampak penggunaan lahan sawit yang akan terjadi pada DAS Makanyng, tahun 2025 – 2035.

1.4. Manfaat Penelitian

1. Penelitian ini memberikan informasi yang bermanfaat untuk pengelolaan DAS secara berkelanjutan.
2. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan metode analisis hidrologi berbasis model *Model Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) yang dapat diaplikasikan pada berbagai wilayah DAS lainnya.
3. Hasil kajian dapat digunakan sebagai dasar ilmiah untuk penyusunan kebijakan tata guna lahan yang mendukung kelestarian sumber daya air dan pencegahan degradasi lingkungan.

4. Penelitian ini diharapkan mampu meningkatkan pemahaman tentang pentingnya pengelolaan yang efektif guna menjaga keseimbangan ekosistem dan memastikan keberlanjutan sumber daya alam bagi generasi masa depan.

1.5. Batasan Masalah

Agar penelitian ini terarah dan hasil yang diperoleh lebih spesifik serta sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian difokuskan pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Makanyng, yang secara administratif berada di Kecamatan Rantau Pulung, Kabupaten Kutai Timur, Provinsi Kalimantan Timur.
2. Analisis perubahan karakteristik hidrologi hanya mencakup tiga komponen utama, yaitu *surface runoff* (limpasan permukaan), evapotranspirasi (ET), dan erosi tanah.
3. Model *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) digunakan sebagai pendekatan utama untuk mensimulasikan dan menganalisis perubahan karakteristik hidrologi akibat penggunaan lahan sawit.
4. Penggunaan lahan yang dikaji difokuskan pada konversi lahan menjadi perkebunan sawit, tanpa mempertimbangkan faktor lain seperti aktivitas pertambangan, pembangunan permukiman, atau perubahan infrastruktur.
5. Data yang digunakan dalam pemodelan mencakup data observasi lapangan, penggunaan lahan, data tanah, data iklim (curah hujan, suhu, kelembaban, radiasi matahari, dan kecepatan angin), serta data topografi (DEM).
6. Kajian ini tidak membahas aspek sosial-ekonomi, kebijakan tata ruang.

1.6. Ruang Lingkup Penelitian

Kajian respon perubahan karakteristik hidrologi Daerah Aliran Sungai (DAS) terhadap penggunaan lahan sawit dengan menggunakan model SWAT mencakup beberapa ruang lingkup penting, antara lain:

1. Identifikasi Karakteristik DAS yang mencakup pemetaan wilayah DAS yang akan dikaji, meliputi topografi, tipe tanah, tutupan lahan, dan penggunaan lahan yang ada, termasuk perkebunan sawit serta pengumpulan data hidrologi dasar seperti curah hujan
2. Pengaruh penggunaan lahan sawit mencakup analisis, serta identifikasi dampak dari penggunaan lahan sawit terhadap infiltrasi, surface runoff (*surface runoff*) dan tingkat bahaya erosi.
3. Model SWAT 2.0.1 sebagai alat simulasi mencakup penggunaan untuk mensimulasikan karakteristik hidrologi DAS berdasarkan perubahan penggunaan lahan terhadap DAS serta simulasi meliputi aliran sungai, sedimentasi, erosi tanah dan *surface runoff*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Penelitian dilaksanakan dengan mempertimbangkan hasil penelitian sebelumnya yang digunakan sebagai bahan kajian dan perbandingan. Beberapa studi yang dijadikan acuan dan pembanding dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Penelitian Terdahulu (*State Of The Art*)

Judul Penelitian	Penulis	Tujuan Penelitian	Hasil Utama	Kelebihan dan Kekurangan
<i>A Review of SWAT Model Application in Africa</i>	(Akoko., et al. 2021)	Mengkaji penerapan model SWAT di Afrika dalam konteks manajemen sumber daya air dan perubahan lahan	SWAT dapat memodelkan respons hidrologi terhadap variabel lingkungan di berbagai daerah aliran sungai di Afrika.	Memberikan ringkasan menyeluruh penggunaan SWAT, menyoroti kontribusi terhadap manajemen lingkungan. Keterbatasan pada ketersediaan dan kualitas data lokal, ketidakpastian dalam prakiraan model
Penggunaan <i>Soil and Water Assessment Tool</i> (SWAT) sebagai Alat Pendukung Keputusan Pengelolaan (DAS).	(Junaidi, 2015)	Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja DAS	Menghasilkan indikator kinerja DAS terbaik dengan nilai KRS	Penggunaan SWAT sebagai alat pengambil keputusan memberikan hasil yang komprehensif untuk memahami kondisi hidrologi DAS. Penelitian ini bergantung pada data yang tersedia dalam jangka waktu terbatas, sehingga hasil prakiraan dapat lebih optimal.

Tabel 1. Lanjutan

<i>Fields of Application of SWAT Hydrological Model—A Review</i>	(Janjic & Tadic 2023)	Mengkaji berbagai penerapan model SWAT dalam simulasi hidrologi dan evaluasi dampak lingkungan dalam DAS.	Model SWAT banyak digunakan untuk berbagai aplikasi, termasuk surface runoff, polusi sumber non-point, manajemen lahan, dan studi perubahan iklim di DAS.	Dapat mensimulasikan hidrologi jangka panjang, dengan kemampuan menangani berbagai skenario lahan dan kondisi iklim. Memerlukan data yang besar dan detail, yang terkadang sulit diakses, terutama di wilayah dengan ketersediaan data terbatas.
Dinamika Perubahan Penggunaan Lahan di Kecamatan Sirimau, Kota Ambon	(Laka et al., 2017)	Tujuan penelitian untuk menganalisis sejauh mana perubahan penggunaan lahan terjadi di Kecamatan Sirimau selama rentang waktu 2006-2016.	Perubahan penggunaan lahan utamanya terjadi pada konversi lahan hutan dan pertanian kering menjadi area permukiman.	Penelitian ini menggunakan metode SIG dan data spasial yang akurat, sehingga memberikan hasil yang jelas mengenai perubahan penggunaan lahan. Penelitian hanya berfokus pada data dua periode waktu (2006 dan 2016) yang terbatas, sehingga perubahan di antara tahun-tahun tersebut tidak terdeteksi.
Kajian Laju Sedimentasi di DAS Serayu Hulu Menggunakan Model SWAT	(Christianto et al., 2018)	Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi laju sedimentasi di Daerah Aliran Sungai (DAS) Serayu.	Penelitian ini menemukan bahwa laju sedimen di DAS Serayu Hulu bervariasi tergantung pada penggunaan lahan dan kemiringan wilayah.	Penggunaan model SWAT yang dikalibrasi dengan data lokal memberikan hasil yang akurat untuk memprakiraan laju sedimen. Hasil simulasi mungkin kurang akurat dalam jangka panjang karena bergantung pada data iklim dan penggunaan lahan saat ini.
Analisis Karakteristik Fisik dan Hidrologi Daerah	(Indraprasta et al., 2020)	Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa DAS Konto Hulu	Penelitian ini memberikan gambaran yang komprehensif mengenai karakteristik fisik dan hidrologi

Tabel 1. Lanjutan

Aliran Sungai (DAS) Konto Hulu di Kecamatan Pujon, Kabupaten Malang	fisik dan aspek hidrologi di Daerah Aliran Sungai (DAS) Konto Hulu.	memiliki topografi berbukit dan curah hujan yang tinggi, sehingga berpotensi meningkatkan risiko erosi dan surface runoff yang intensif.	DAS Konto Hulu, yang bermanfaat sebagai data dasar untuk pengelolaan DAS di wilayah tersebut. Pengamatan hidrologi yang terbatas pada periode tertentu mungkin tidak mewakili variasi aliran tahunan, sehingga hasil penelitian mungkin kurang akurat untuk jangka panjang
Penerapan Model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) untuk Menganalisis Debit Harian dan Surface runoff (Studi Kasus: Sub DAS Wakung, Pemalang, Jawa Tengah)	(Sakti, N.A., & Suprayogi 2018)	Penelitian ini bertujuan untuk menggunakan model SWAT dalam menganalisis debit harian dan surface runoff di Sub DAS Wakung, Pemalang, Jawa Tengah.	Temuan penelitian ini mengindikasikan bahwa model SWAT dapat memprakiraan debit harian dan surface runoff di Sub DAS Wakung dengan akurasi yang memadai setelah melalui proses kalibrasi. Penelitian ini memberikan wawasan praktis tentang faktor-faktor yang mempengaruhi debit harian dan limpasan, membantu dalam perencanaan pengelolaan DAS yang berkelanjutan di Sub DAS Wakung. Penelitian ini fokus pada simulasi debit harian dan limpasan tanpa mengeksplorasi skenario pengelolaan lahan yang berbeda untuk mengukur dampaknya terhadap surface runoff.
<i>A Comparison of Streamflow and Baseflow Responses to Land-Use Change and the Variation in Climate Parameters Using SWAT</i>	(Aboelno ur, M., et al. 2020)	Membandingkan respons aliran sungai dan baseflow terhadap perubahan lahan dan parameter iklim.	Aliran dasar menyumbang 55,3% dari aliran tahunan di Upper West Branch, terutama dipengaruhi urbanisasi dibandingkan perubahan iklim. Informasi berguna untuk pengelolaan sumber daya air di wilayah iklim yang berbeda. Hanya dua daerah sungai yang diperiksa.

Tabel 1. Lanjutan

<i>Assessment of Hydrologic Responses to Land Use and Land Cover Changes in Forest-Dominated Watershed Using SWAT Model</i>	(Ware., et al. 2024)	Mengevaluasi respons hidrologi terhadap perubahan LULC di DAS dominasi hutan.	Surface runoff permukaan meningkat karena perubahan LULC, dan recharge air tanah tinggi di sub-dasar dengan area pertanian dan hutan.	Hasil simulasi akurat untuk pengelolaan DAS di daerah dengan perubahan penggunaan lahan tinggi. Fokus utama pada hutan tanpa mempertimbangkan interaksi dengan zona perkotaan.
<i>Application s of the SWAT Model Spec ial Section: Overview and Insights</i>	(Gassman, P., et al. 2014)	Penelitian ini bertujuan untuk memberikan tinjauan umum aplikasi model SWAT yang digunakan di berbagai wilayah.	Menunjukkan keunggulan dalam memprakiraan respon hidrologi terhadap perubahan penggunaan lahan dan iklim di berbagai DAS	Artikel ini memberikan pemahaman yang menyeluruh tentang efektivitas dan fleksibilitas model SWAT dalam studi hidrologi. Walaupun banyak studi dikumpulkan, hasilnya mungkin tidak selalu dapat digeneralisasi karena variasi geografi, iklim, dan data masukan di setiap lokasi.
<i>Improvement of the Soil and Water Assessment Tool Model and Its Application in a Typical Glacial Surface runoff Watershed: A Case Study of the Qarqan River Basin, China</i>	(Ding et al., 2023)	Mengembangkan dan meningkatkan model SWAT dengan menambahkan modul gletser untuk simulasi aliran DAS yang bergantung pada pencairan gletser di DAS Qarqan, China.	Model SWAT yang ditingkatkan dengan modul gletser (SWAT-Gla) memberikan hasil yang lebih akurat dalam simulasi aliran, terutama pada periode puncak dan resesi, dibandingkan dengan model SWAT standar.	Model SWAT-Gla dapat menggambarkan proses aliran gletser secara lebih tepat, memberikan simulasi yang lebih akurat pada DAS yang tergantung pada pencairan es. Diperlukan data spesifik tentang pencairan gletser yang tidak selalu mudah diakses, dan model ini mungkin tidak seakurat pada DAS tanpa komponen aliran gletser.

Tabel 1. Lanjutan

<i>Assessing the Influence of a Bias Correction Method on Future Climate Scenarios Using SWAT as an Impact Model Indicator</i>	(Brighenti et al., 2023)	Mengevaluasi dampak metode koreksi bias pada skenario iklim masa depan menggunakan model SWAT di DAS Des Moines.	Koreksi bias meningkatkan akurasi prakiraan curah hujan.	Metode ini meningkatkan akurasi data historis dan memberikan pemahaman lebih baik tentang dampak koreksi bias pada prakiraan iklim masa depan. Hasil proyeksi iklim masa depan bisa sangat bergantung pada metode koreksi bias yang digunakan, sehingga dapat mempengaruhi interpretasi perubahan iklim yang diproyeksikan.
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Penelitian ini memiliki perbedaan mendasar dibandingkan dengan studi-studi terdahulu yang meneliti dampak perubahan Daerah Aliran Sungai (DAS) menggunakan model SWAT. Sebagian besar penelitian sebelumnya hanya menyoroti pengaruh umum alih fungsi lahan terhadap debit *surface runoff*, tanpa secara spesifik memfokuskan pada penggunaan lahan kelapa sawit. Di sisi lain, penelitian ini secara khusus menganalisis perubahan karakteristik hidrologi DAS yang disebabkan oleh ekspansi lahan kelapa sawit, yang memiliki implikasi hidrologis unik, seperti meningkatnya *surface runoff*.

Selain itu, penelitian ini menggunakan pendekatan pemodelan yang lebih komprehensif melalui model *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), yang memungkinkan simulasi skenario penggunaan lahan dan perhitungan kuantitatif terhadap perubahan karakteristik hidrologi DAS (seperti erosi, penyerapan air oleh tanah, dan *surface runoff*). Hal ini menjadi pembeda dibandingkan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya menggunakan metode statistik atau pengamatan lapangan terbatas. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan gambaran empiris, tetapi juga proyeksi dinamis terhadap dampak jangka panjang dari penggunaan lahan sawit terhadap sistem hidrologi DAS. Lebih jauh, studi ini mengisi kesenjangan dalam literatur sebelumnya dengan

menyajikan kajian yang secara khusus menelusuri sejauh mana populasi dan intensitas penggunaan lahan sawit memengaruhi karakteristik hidrologi DAS, terutama di wilayah konsesi perusahaan perkebunan. Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam perencanaan tata guna lahan dan pengelolaan sumber daya air yang lebih berkelanjutan.

2.2. Karakteristik Hidrologi Daerah Aliran Sungai (DAS)

Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah suatu sistem yang terdiri dari sungai beserta anak-anak sungainya, yang berperan dalam menampung, menyimpan, dan mengalirkan air (Kadir, 2019). Sungai juga merupakan bagian dari curah hujan yang menampung, menyimpan dan mengalir di atas permukaan tanah menuju danau, rawa, serta laut untuk titik akhirnya (Staddal, 2016). Daerah Aliran Sungai (DAS) memiliki luas, bentuk, ketinggian, tutupan lahan dan karakteristik hidrologi berbeda beda pada suatu DAS.

Karakteristik Daerah Aliran Sungai (DAS) mengacu pada berbagai elemen fisik, hidrologis, dan ekologis dari suatu area yang berfungsi untuk menampung, menyimpan, dan mengalirkan air hujan menuju sungai utama dan anak-anak sungainya. DAS adalah area geografis yang berperan penting dalam karakteristik hidrologi dan manajemen sumber daya air, beberapa aspek penting yang membentuk karakteristik DAS sebagai berikut :

1. Karakteristik fisik DAS yang meliputi luas wilayah daerah aliran sungai, bentuk daerah aliran sungai yaitu melebar atau menyempit, topografi sebagai bentuk ketinggian dan kemiringan sungai serta jaringan sungai sebagai pola distribusi anak sungai.
2. Karakteristik hidrologi DAS yang meliputi curah hujan untuk menentukan jumlah air yang masuk ke sistem hidrologi, *Infiltrasi* sebagai kemampuan tanah dalam menyerap air, yang mempengaruhi apakah air akan menjadi *surface runoff* atau tersimpan dalam tanah sebagai air tanah.

3. Karakteristik penggunaan lahan meliputi perubahan lahan yang sangat memengaruhi karakter hidrologi DAS menyebabkan penurunan *infiltrasi*, peningkatan *surface runoff*, dan erosi.

Sistem air di dalam DAS bekerja secara kompleks dan dinamis, melibatkan proses alamiah yang saling terhubung mulai dari hujan, *surface runoff*, *infiltrasi*, hingga penguapan kembali ke atmosfer. Ketika salah satu elemen sistem ini terganggu, misalnya akibat perubahan penggunaan lahan atau degradasi lingkungan maka keseimbangan karakteristik hidrologi pun akan ikut terganggu (Ertian et al., 2025; (Ertian et al., 2025)Permatasari, 2017) Akibatnya, distribusi dan ketersediaan air menjadi tidak stabil, yang dapat memicu peningkatan banjir, kekeringan, maupun penurunan kualitas air.

2.3. Penggunaan Lahan

Penggunaan lahan (*land use*) merujuk pada segala bentuk campur tangan manusia terhadap lahan untuk memenuhi berbagai kebutuhannya. (Laka et al., 2017). Perkembangan pembangunan yang pesat dan tingginya laju pertumbuhan penduduk menjadi faktor utama yang mendorong peningkatan kebutuhan akan penggunaan lahan (Nathania et al., 2017).

Menurut *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), penggunaan lahan didefinisikan sebagai sejumlah pengaturan, aktivitas, dan input yang dilakukan manusia pada tanah tertentu. Definisi ini menekankan bahwa penggunaan lahan bukan hanya tentang fungsi fisik lahan, tetapi juga mencakup bagaimana manusia mengelola dan memodifikasi lahan tersebut untuk memenuhi kebutuhan hidupnya. Berikut merupakan contoh Klasifikasi penggunaan lahan menurut FAO, dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Klasifikasi Penggunaan Lahan

No	SWAT_code	Crope_name	Keterangan
1	CRWO	Cropland/Woodland Mosaic	Mosaik Lahan Pertanian/Hutan
2	MIGS	Mixed Grassland/Shrubland	Lahan Rumput Campuran/Beludru
3	MIXC	Mixed Dryland/Cropl	Lahan Kering /Pertanian Campuran
4	SHRB	Shrubland	Semak belukar
5	CRGR	Cropland/Grassland Mosaic	Mosaik Lahan Pertanian/Beludru
6	URMD	Urban,Medium Density	Perkotaan, Kepadatan Sedang
7	GRAS	Grassland	Lahan Rumput
8	FODB	Deciduous Broadleaf Forest	Hutan Berdaun Lebar Gugur
9	FODN	Deciduous Needleleaf Forest	Hutan Berdaun Jarum Gugur
10	FOEB	Evergreen Broadleaf Forest	Hutan Berdaun Lebar Hijau
11	FOEN	Evergreen Needleleaf Forest	Hutan Berdaun Jarum Hijau
12	FOMI	Mixed Forest	Hutan Campuran
13	WEHB	Herbaceous Wetland	Lahan Basah Herbal
14	WEWO	Wooded Wetland	Lahan Basah Hutan
15	BSVG	Baren Or Sparsly Vegetated	Tanah Tandus
16	TUHB	Herbaceous Tundra	Tundra Herbal
17	TUWO	Wooded Tundra	Tundra Hutan
18	TUMI	Mixed Tundra	Tundra Campuran
19	TUBG	Bare Ground Tundra	Tundra Tanah Gugur
20	FRSE	Forest-Evergreen	Hutan-Hijau Sepajang
21	WETL	Wetlands-Mixed	Lahan Basah-Campuran
22	WETF	Wetlands-Forested	Lahan Basah-Hutan
23	WETN	Wetlands-Non-Forested	Lahan Basah-Non-Hutan
24	PAST	Pasture	Padang Rumput
25	SPAS	Summer Pasture	Padang Rumput Musim Panas
26	WPAS	Winter Pasture	Padang Rumput Musim Dingin
27	RNGE	Range-Grasses	Rumput Padang Rumput
28	WATR	Water	Air

Sumber (*Source*): FAO Africover (2008).

Dalam kajian tata guna lahan, setiap bentuk pemanfaatan ruang memiliki karakteristik dan fungsi yang berbeda. Untuk memahami variasi pemanfaatan tersebut, penggunaan lahan dapat dikelompokkan ke dalam beberapa kategori utama, antara lain (R.P Santun Sitorus, 2017):

1. Pertanian : meliputi sawah, ladang, dan perkebunan.
2. Permukiman : area yang digunakan untuk perumahan dan infrastruktur pendukung.

3. Industri dan Komersial : lahan yang digunakan untuk kegiatan industri, perdagangan, dan jasa.
4. Kehutanan : lahan yang dimanfaatkan untuk produksi kayu atau konservasi hutan.
5. Rekreasi dan Pariwisata : area yang digunakan untuk kegiatan rekreasi, seperti taman dan tempat wisata.
6. Konservasi : lahan yang dilindungi untuk menjaga keanekaragaman hayati dan fungsi ekosistem.

2.4. Tingkat Bahaya Erosi (TBE)

Erosi adalah proses pengikisan dan pemindahan tanah atau bagian-bagian tanah dari satu tempat ke tempat lain oleh pengaruh alam seperti air, angin, atau es. Erosi dapat terjadi secara alami maupun akibat aktivitas manusia (Seran, 2022). Proses ini merupakan bagian penting dari siklus geologi bumi, namun bila berlangsung secara berlebihan dan tidak terkendali, erosi dapat menyebabkan kerusakan serius terhadap ekosistem dan sumber daya alam, khususnya lahan produktif.

Bahaya erosi bukan hanya fenomena geologis, tetapi juga isu lingkungan dan sosial, jika tidak ditangani dengan baik, erosi dapat mempercepat degradasi lahan, memperparah perubahan iklim, dan mempengaruhi ketahanan pangan suatu wilayah. Tingkat Bahaya Erosi (TBE) adalah indikator penting dalam menilai kerentanan suatu lahan terhadap kehilangan tanah akibat proses erosi (Litbang & Alam, 2010).

Penilaian TBE biasanya dilakukan dengan menggunakan model SWAT untuk menghitung tingkat bahaya erosi. Hasil dari perhitungan ini kemudian diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori, mulai dari sangat ringan hingga sangat berat, untuk membantu dalam perencanaan konservasi tanah dan pengelolaan lahan yang berkelanjutan.

A. Klasifikasi Tingkat Bahaya Erosi

Tingkat Bahaya Erosi (TBE) merupakan suatu ukuran untuk menentukan sejauh mana suatu wilayah mengalami erosi tanah dan seberapa besar risiko kerusakan yang ditimbulkan akibat erosi tersebut. Klasifikasi ini menjadi penting dalam perencanaan konservasi tanah dan pengelolaan lahan, karena memungkinkan identifikasi area-area prioritas yang memerlukan penanganan segera.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Raco et al., 2022), Tingkat Bahaya Erosi (TBE) dikategorikan dalam beberapa kelas, dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Tingkat Bahaya Erosi (TBE)

No	Kelas TBE (Class Of Erosion Danger Level)	Kehilangan Tanah (Soil Loss) (ton/ha/th)	Keterangan (Remark)
1	I	< 15	Sangat ringan (<i>very Light</i>)
2	II	15 – 60	Ringan (<i>Light</i>)
3	III	60 – 180	Sedang (<i>Moderat</i>)
4	IV	180 – 480	Berat (<i>Heavy</i>)
5	V	>480	Sangat berat (<i>Very Heavy</i>)

Sumber (*Source*): Departemen Kehutanan (*Ministry of Forestry*) (1998)

2.5. Limpasan Permukaan (*Surface Runoff*)

Surface runoff merupakan bagian dari air hujan atau air dari mencairnya salju, irigasi, yang tidak terserap (*infiltrasi*) ke dalam tanah, melainkan mengalir di atas permukaan tanah menuju sungai, danau, atau badan air lainnya (Robin et al., 2021 ; Yana et al., 2020). *Surface runoff* juga merupakan bagian penting dari karakteristik hidrologi dan memainkan peran besar dalam erosi tanah, pengangkutan sedimen, serta sebagai faktor utama penyebab banjir dan limpasan di perkotaan jika drainase atau lahan tidak dikelola dengan baik. Besarnya nilai *surface runoff* dapat dihitung menggunakan persamaan koefisien limpasan permukaan (C) sebagai salah satu parameter penting dalam analisis. Nilai C diperoleh dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Machado et al., 2022 ; Javadinejad, 2022) :

Dimana ;

C : Koefisien Limpasan
 Vr : Volume Limpasan
 Vp : Volume Hujan

2.6. Kemiringan Lereng

Kemiringan lereng (*slope gradient*) adalah perbandingan antara tinggi perbedaan elevasi (*rise*) dengan jarak horizontal (*run*) pada suatu permukaan lahan (Setyanugraha et al., 2023). Dalam kajian geomorfologi dan hidrologi, kemiringan lereng merupakan salah satu faktor topografi yang sangat berpengaruh terhadap proses erosi, *surface runoff*, *infiltrasi*, hingga stabilitas tanah.

Semakin curam lereng, semakin tinggi kecepatan *surface runoff* sehingga potensi terjadinya erosi dan longsor juga meningkat. Sebaliknya, pada lereng yang landai, air hujan cenderung lebih mudah meresap ke dalam tanah, sehingga tingkat erosi lebih rendah (Kadir et al., 2020). Kemiringan lereng pada suatu wilayah umumnya dikelompokkan ke dalam beberapa kelas berdasarkan tingkat kecuramannya. Klasifikasi dilakukan untuk mempermudah analisis topografi serta penentuan arahan penggunaan lahan, konservasi tanah, dan pengelolaan daerah aliran sungai. Secara umum, kemiringan lereng dibagi menjadi lima kelas utama yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Klasifikasi Kemiringan Lereng.

No	Kelas Lereng	Kemiringan (%)	Kategori
1	I	0 – 8	Datar
2	II	8 – 15	Landai
3	III	15 – 25	Agak Curam
4	IV	25 – 45	Curam
5	V	> 45	Sangat Curam

Sumber (Source): SK Menteri Pertanian, No: 837/Kpts/Um/11/1980.

2.7. Perubahan Pola Aliran Sungai

Perubahan pola aliran sungai merujuk pada modifikasi dalam arah, bentuk, dan karakteristik aliran sungai, yang dapat terjadi akibat berbagai faktor, baik yang bersifat alami seperti erosi, sedimentasi, dan perubahan iklim, maupun yang disebabkan oleh aktivitas manusia, seperti pembangunan bendungan, pengalihan aliran air, serta perubahan tata guna lahan di daerah tangkapan air. Perubahan ini dapat mempengaruhi karakteristik hidrologi suatu daerah, termasuk potensi banjir, erosi, dan sedimentasi (Ardi, Putri, 2014).

A. Faktor Penyebab Perubahan Pola Aliran Sungai

1. Perubahan Penggunaan Lahan : Konversi lahan hutan menjadi lahan pertanian, permukiman, atau infrastruktur dapat meningkatkan *surface runoff* dan mengurangi *infiltrasi* air ke dalam tanah. Hal ini menyebabkan perubahan debit aliran sungai dan dapat mengubah pola alirannya.
2. Aktivitas Geologi dan Tektonik : Gempa bumi, pergeseran lempeng, atau aktivitas vulkanik dapat mengubah topografi dan struktur geologi suatu daerah, yang pada gilirannya mempengaruhi arah dan bentuk aliran sungai.
3. Proses Erosi dan Sedimentasi : Erosi tanah di daerah hulu sungai dapat menyebabkan penumpukan sedimen di hilir, mengubah kedalaman dan lebar sungai, serta mempengaruhi pola alirannya.
4. Perubahan Iklim : Perubahan pola curah hujan dan suhu akibat perubahan iklim dapat mempengaruhi volume dan kecepatan aliran sungai, yang dapat mengakibatkan perubahan dalam pola aliran.

B. Dampak Perubahan Pola Aliran Sungai

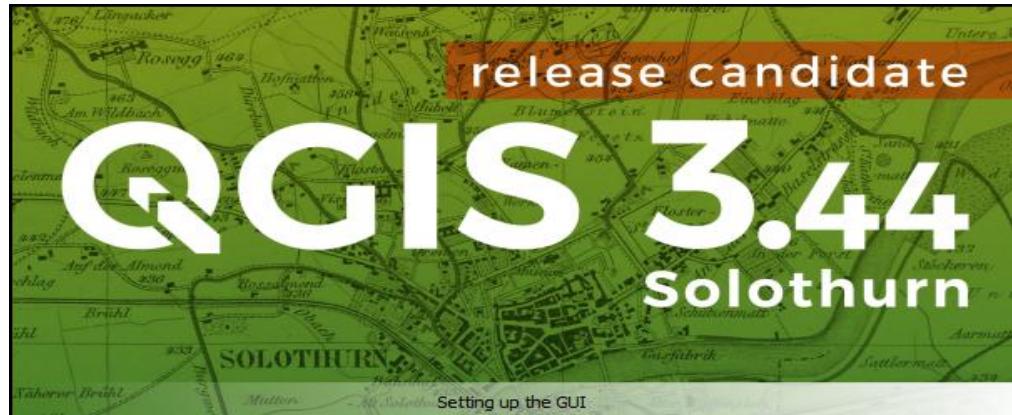
1. Peningkatan Risiko Banjir : Perubahan pola aliran dapat menyebabkan aliran air meluap ke daerah yang sebelumnya tidak terdampak, meningkatkan risiko banjir (Febriani & Ahyuni, 2023).

2. Kerusakan Ekosistem : Perubahan aliran dapat mengganggu habitat alami flora dan fauna di sekitar sungai, mengancam keanekaragaman hayati.
3. Gangguan pada Infrastruktur : Perubahan aliran dapat merusak infrastruktur seperti jembatan, jalan, dan bangunan yang berada di dekat sungai.

2.8. Quantum Geografi Informasi Sistem (QGIS)

Quantum Geografi Informasi Sistem (QGIS) adalah suatu *Software* berbasis Sistem informasi geografi yang dapat melakukan pengumpulan, pengolahan, pengembalian, trasformasi dan visualisai dari suatu data spasial bumi untuk kebutuhan tertentu (Sulistiyanto, 2021). QGIS mendukung berbagai jenis data spasial dan memungkinkan pengguna untuk melakukan pengolahan data, pemetaan, serta analisis spasial yang komprehensif.

Quantum GIS merupakan perangkat lunak Sistem Informasi Geografis (SIG) yang memungkinkan pengguna untuk mengintegrasikan berbagai jenis data spasial, memodifikasi peta, serta melakukan analisis geografis secara mendalam. Dalam konteks pengelolaan sumber daya alam, QGIS banyak digunakan untuk mengolah data spasial yang terhubung dengan plugin tambahan, salah satunya adalah sistem model *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). Integrasi antara QGIS dan SWAT sangat bermanfaat dalam pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS), karena mampu membantu dalam berbagai analisis hidrologi yang penting. Beberapa fungsi utama QGIS dalam studi DAS antara lain mencakup proses penentuan batas DAS, analisis tutupan lahan dan perubahan penggunaan lahan dari waktu ke waktu, analisis potensi erosi dan sedimentasi, pemodelan hidrologi serta jaringan drainase, hingga penyusunan database spasial DAS, tahapan ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Perangkat lunak QGIS versi 3.44.

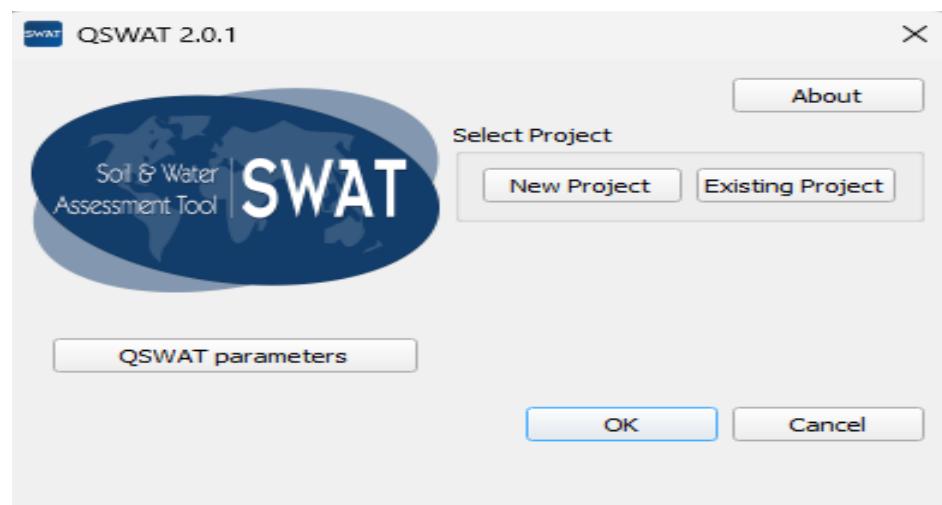
2.9. Model *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT)

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) adalah sebuah model yang dikembangkan oleh Dr. Jeff Arnold pada awal 1990-an untuk mendukung pengembangan *Agricultural Research Service* (ARS) dari USDA, sebuah lembaga pertanian milik Amerika Serikat. Model SWAT digunakan untuk menganalisis kondisi dan fungsi hidrologis suatu aliran sungai, serta dapat mensimulasikan karakteristik hidrologi di DAS (Ramadhan, 2021). Model SWAT juga merupakan model hidrologi yang mampu menganalisa laju sedimen (Christanto et al., 2018).

Model SWAT biasa digunakan dalam mensimulasikan suatu sistem berbasis proses fisik yang digunakan untuk memahami dampak penggunaan lahan dan praktik pengelolaan pada sumber daya air. SWAT secara langsung memodelkan beban air, sedimen, dan nutrisi dari wilayah daratan di suatu daerah aliran sungai (Miskewitz, 2012). Model ini dikembangkan untuk mensimulasikan proses-proses hidrologi dan penggunaan lahan, serta bersifat terintegrasi dan jangka panjang, artinya cocok untuk analisis skenario pengelolaan DAS dalam jangka waktu puluhan tahun, berbagai tujuan penggunaan SWAT seperti menganalisis *surface runoff* dan aliran dasar (*baseflow*), mengkaji erosi dan sedimentasi DAS, menilai pengaruh perubahan tutupan lahan dan penggunaan lahan terhadap kualitas dan kuantitas air, menilai dampak perubahan iklim terhadap sumber daya air, dan mendukung perencanaan konservasi tanah dan air. Manfaat penggunaan SWAT

dalam analisis hidrologi sungai, cocok untuk DAS besar hingga ribuan km², berbasis data fisik dan jangka panjang, dapat digunakan untuk skenario perubahan penggunaan lahan dan perubahan iklim, terintegrasi dengan ArcGIS dan QGIS.

Komponen data yang digunakan dalam menjalankan model SWAT cukup kompleks sesuai dengan kebutuhan *output* yang akan dikaji, komponen data utama dalam menjalankan model ini yaitu : data *Digital Elevation Model* (DEM) digunakan untuk menentukan batas DAS, menentukan arah dan akumulasi aliran serta menetapkan lokasi *outlet* sungai, data penggunaan lahan digunakan untuk menentukan penyerapan air, *surface runoff*, dan *evapotranspirasi*, data jenis tanah sebagai parameter penting dalam model SWAT menentukan tekstur, kapasitas lapang, permeabilitas, kedalaman efektif tanah, data Iklim (curah hujan, suhu (maks/min), kelembapan, kecepatan angin, radiasi matahari) digunakan dalam menilai pengaruh variasi iklim terhadap sumber daya air. Tampilan utama model SWAT yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Model SWAT versi 2.0.1

III. METODE PENELITIAN

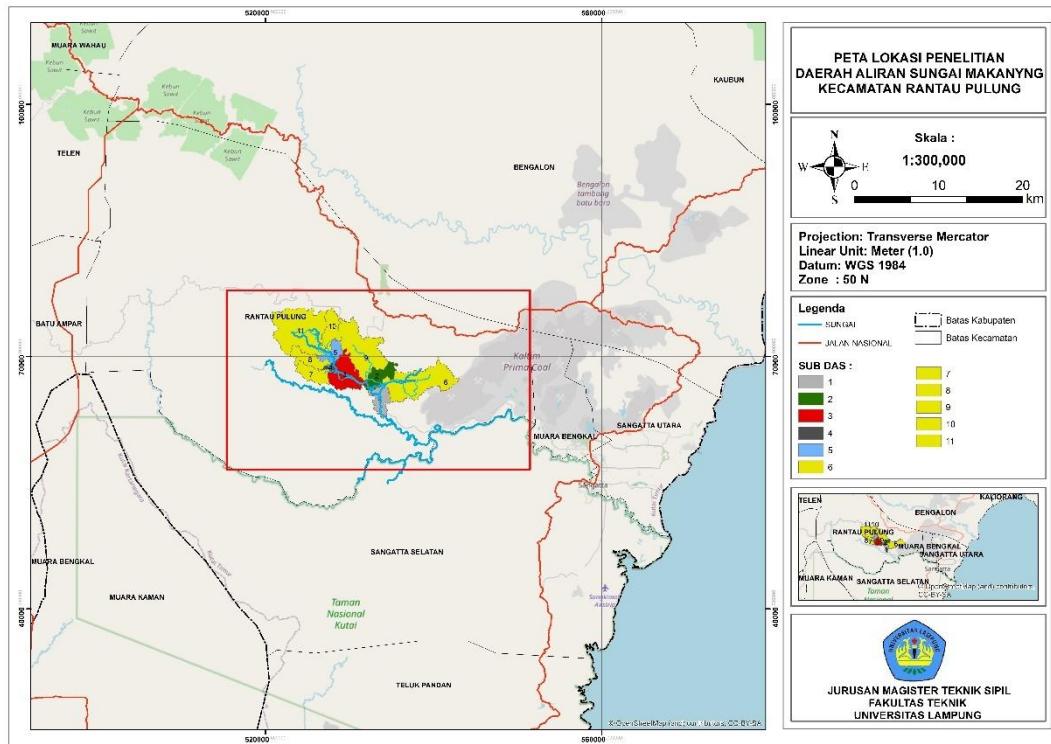
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam rentang waktu bulan Juni 2024 sampai dengan bulan Januari 2025, yang mencakup tahapan pengumpulan data, pengolahan data spasial, model menggunakan *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), serta analisis dan validasi hasil. Secara lebih rinci, penelitian ini dibagi ke dalam empat tahap, rencana kegiatan dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Rencana Kegiatan

NO	Kegiatan Penelitian	Pelaksanaan
1	Studi Pustaka	22 Juni – 20 Agustus 2024
2	Pengumpulan Data	26 Agustus – 22 Oktober 2024
		10 September 2024
3	Validasi Lapangan	17 Oktober 2024
		25 Oktober 2024
4	Pengolahan Data	November 2024 - 17 Januari 2025

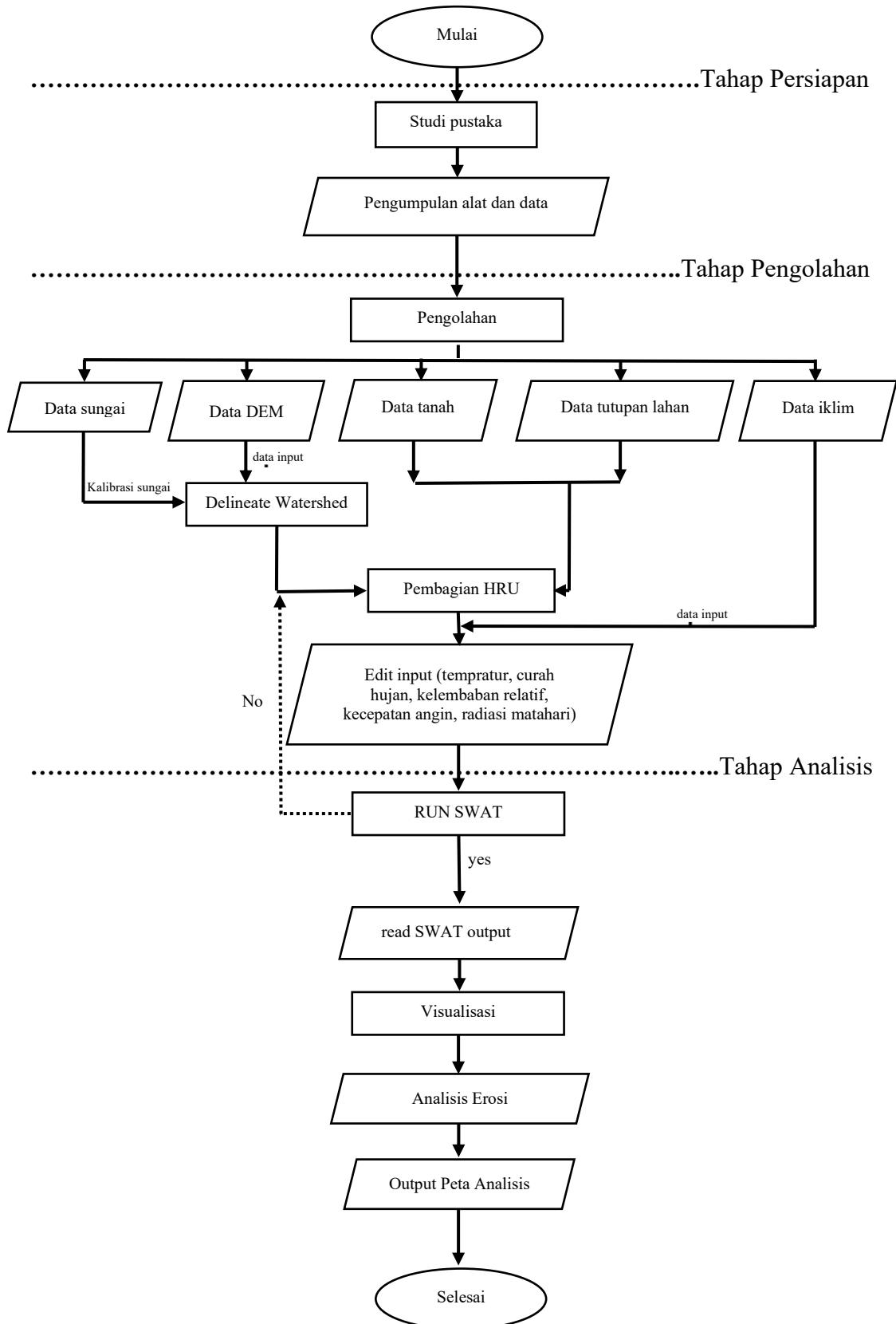
Lokasi penelitian berada di wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS) Makanyng, secara administratif terletak di Desa Mukti Jaya, Kecamatan Rantau Pulung Kabupaten Kutai Timur. Daerah Aliran Sungai (DAS) Makanyng dipilih sebagai lokasi studi karena memiliki karakteristik hidrologi dan penggunaan lahan yang beragam, serta mengalami perubahan signifikan akibat penggunaan lahan kelapa sawit. Pemilihan DAS Makanyng juga mempertimbangkan ketersediaan data spasial dan hidrologi yang memadai untuk kebutuhan pemodelan dalam model SWAT. Sehingga menjadi lokasi yang tepat dalam menilai dampak penggunaan lahan terhadap karakteristik hidrologi, *surface runoff*, *evapotranspirasi*, erosi, dan sedimen. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Peta lokasi penelitian pada DAS Makanyng, Kecamatan Rantau Pulung.

3.2. Pelaksanaan Penelitian

Proses penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan, yang secara lebih rinci disajikan dalam diagram alir, dapat dilihat pada Gambar 4, sebagai berikut.



Gambar 4. Diagram alir penelitian.

3.2.1 Tahap Persiapan

Tahap pertama dalam penelitian ini adalah tahap persiapan, yang meliputi beberapa proses utama, yaitu studi pustaka dan pengumpulan alat serta data.

1. Studi Pustaka

Studi pustaka merupakan proses awal yang harus dilaksanakan guna mendukung penelitian ini. Sumber informasi yang digunakan dalam studi pustaka ini berasal dari berbagai macam sumber, seperti jurnal, *website*, buku serta sumber-sumber relevan lainnya. Informasi yang diperoleh pada tahap ini berfungsi untuk mendukung penulisan latar belakang, tinjauan pustaka, metodologi penelitian serta kajian penelitian yang sejenis dengan penelitian ini

2. Pengumpulan Alat dan Data

Pengumpulan alat dan data dalam penelitian ini bertujuan untuk memperoleh informasi yang diperlukan dalam proses analisis karakteristik hidrologi Daerah Aliran Sungai (DAS) serta dalam proses pemodelan menggunakan perangkat lunak *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). Data yang dikumpulkan terdiri dari data primer dan sekunder, yang diperoleh melalui observasi lapangan, maupun dari sumber-sumber *website*, serta pengolahan data spasial dan klimatologis.

A. Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini, dibagi menjadi dua yaitu data primer dan data sekunder sebagai berikut:

1) Data Primer

Data primer dalam penelitian ini diperoleh secara langsung melalui kegiatan observasi dan pengukuran lapangan pada wilayah DAS yang menjadi lokasi studi. Pengumpulan data primer dilakukan untuk mendapatkan informasi aktual mengenai kondisi biofisik dan hidrologis DAS. Data ini digunakan sebagai bahan penting untuk kalibrasi dan validasi model SWAT, serta untuk melengkapi dan

mengonfirmasi data sekunder yang telah tersedia. Adapun jenis data primer yang dikumpulkan dapat dilihat pada Tabel 6 berikut :

Tabel 6. Data Primer

No	Data	Tujuan
1	Citra Drone	Kalibrasi data sungai dan validasi tutupan lahan
2	Umur dan kerapatan sawit (usia,luas areal tanam)	Menentukan nilai parameter tanaman (<i>crop parameters</i>) untuk SWAT
3	Pengamatan visualisasi kualitas air (warna, kejernihan,sedimen)	Melengkapi analisis dampak sawit terhadap siklus air
4	Koordinat dan elevasi lokal	Penyesuaian titik lokasi dan elevasi lokasi penelitian

2) Data Sekunder

Selain data primer, penelitian ini juga didukung oleh data sekunder yang diperoleh dari berbagai sumber terpercaya. Data sekunder digunakan sebagai input utama dalam pemodelan SWAT, serta untuk melengkapi informasi yang tidak dapat diperoleh secara langsung di lapangan. Data ini mencakup informasi klimatologis, hidrologis, spasial, serta peta-peta pendukung yang diperlukan dalam proses analisis dan pemetaan wilayah studi. Adapun jenis data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Data Sekunder

No	Data	Sumber
1	DEM	https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/unduh/demnas
2	Tutupan Lahan (Land Cover)	https://geoaccess.id/dataspasial/
3	Data Iklim (Tempratur,curah hujan, kelembaban relatif, kecepatan angin, radiasi matahari)	https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ https://swat.tamu.edu/data/
4	Data Jenis Tanah	https://data.apps.fao.org

B. Alat yang Digunakan

Dalam pelaksanaan penelitian ini, digunakan berbagai perangkat lunak (*software*) dan perangkat keras (*hardware*) untuk mendukung proses pengolahan data, analisis spasial, serta pemodelan hidrologi menggunakan SWAT. Perangkat

tersebut dipilih berdasarkan kebutuhan analisis serta kompatibilitasnya dengan metode dan format data yang digunakan.

1) Perangkat Keras (*Hardware*)

Dalam mendukung kegiatan observasi lapangan dan pengumpulan data primer, penelitian ini memanfaatkan berbagai alat bantu yang disesuaikan dengan kebutuhan teknis di lapangan. Alat-alat tersebut digunakan untuk memperoleh data yang akurat terkait kondisi fisik lahan, vegetasi, tanah, debit aliran, serta dokumentasi spasial. Penggunaan alat ini juga bertujuan untuk meningkatkan validitas hasil pengukuran dan efisiensi kerja lapangan. Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini, dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Perangkat Keras (*Hardware*)

No	Perangkat keras	Sumber
1	Drone DJI Phantom 4 PRO	Pengambilan foto udara
2	GPS Handheld	Pengambilan koordinat
3	Pita Ukur atau Meteran	Pengukuran dimensi dan kedalaman
4	Leptop Asus Core i7 8 th Gen, SSD 512, HDD 1 TB.	Penyimpanan, Pengolahan data, pembuatan laporan akhir.

2) Perangkat Lunak (*Software*)

Dalam penelitian ini, perangkat lunak berperan penting dalam membantu proses pengolahan data spasial, pemodelan hidrologi, serta analisis dampak perubahan penggunaan lahan terhadap karakteristik hidrologi Daerah Aliran Sungai (DAS). Penggunaan perangkat lunak yang tepat dan sesuai kebutuhan memungkinkan peneliti untuk melakukan simulasi, visualisasi, dan interpretasi data secara lebih akurat dan efisien. Adapun perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Perangkat Lunak (*Software*)

No	Perangkat Lunak	Fungsi
1	QGIS 3.44.0	Mengolah, menganalisis, dan memvisualisasikan data geospasial.
2	QSWAT 2.0.1	Pemodelan hidrologi, analisis resiko (banjir, erosi, kekeringan)
3	SWAT Editor 2012	Membuat, mengedit data spasial
4	Microsoft Excel 2010	Menganalisis, dan meringkas data hasil pengolahan QSWAT

3.2.2 Tahap Pengolahan

Tahap pengolahan data ini terdiri dari beberapa bagian, dimulai dengan pengolahan data dari Drone DJI Phantom 4 Pro menggunakan perangkat lunak untuk mengolah data foto udara menjadi orthophoto, melakukan pengolahan data DEM menggunakan perangkat lunak QGIS, diikuti dengan menjalankan program model SWAT untuk menganalisis dampak penggunaan lahan sawit terhadap karakteristik hidrologi DAS serta mensimulasikan skenario perubahan ke depan, berikut merupakan rincian pengolahan data hingga menjalankan program SWAT.

1. Pembuatan Data Aliran (*Stream Existing*)

Pada tahap ini, dilakukan proses identifikasi dan digitasi aliran sungai yang ada (*stream existing*) dengan menggunakan data citra udara hasil pemetaan drone. Citra drone yang memiliki resolusi tinggi memungkinkan identifikasi morfologi alur sungai secara lebih detail dan akurat, terutama pada wilayah-wilayah yang tidak terjangkau oleh pengukuran topografi, tahap pembuatan data aliran sungai diawali dengan pengambilan data citra menggunakan drone phantom 4 pro yang dilaksanakan saat observasi lapangan, langkah – langkah yang dilakukan sebagai berikut :

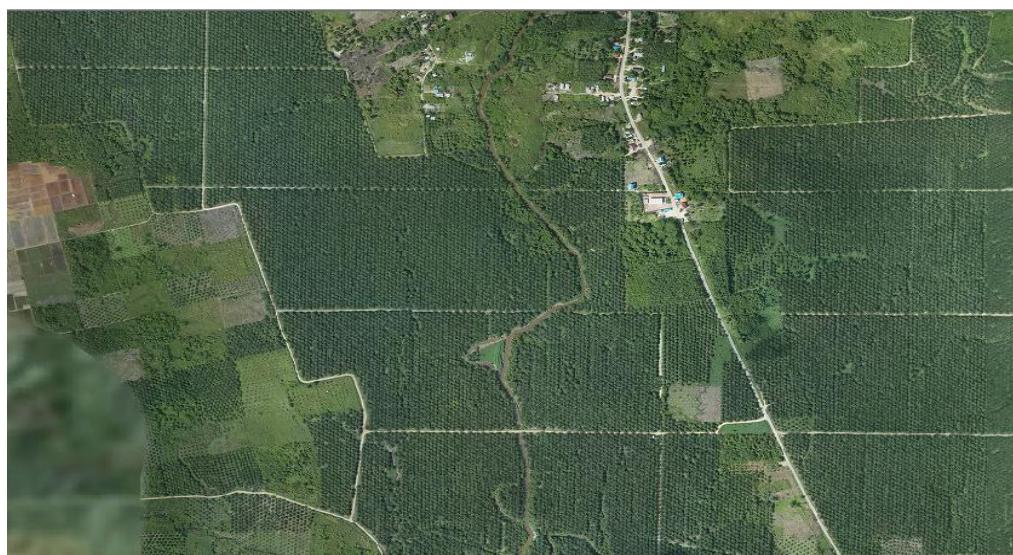
a) Akuisisi dan Pengolahan Data Citra Drone

Langkah awal dimulai dari akuisisi data citra menggunakan drone, yang dilakukan dengan metode pemotretan berulang (*overlapping*) menggunakan sensor kamera beresolusi tinggi. Data hasil terbang drone selanjutnya diproses menggunakan

perangkat lunak fotogrametri untuk menghasilkan produk turunan berupa *orthomosaic* yaitu citra udara georeferensi yang telah disusun ulang secara mosaik dan terkoreksi geometrik atau pengikatan terhadap referensi yang diambil dengan menggunakan GPS *Handheld* dengan akurasi 4 m.

b) Interpretasi Visual

Setelah citra drone *orthomosaic* tersedia, dilakukan interpretasi visual terhadap pola-pola aliran air permukaan. Aliran sungai atau saluran alami dapat diidentifikasi melalui perbedaan warna tanah, atau genangan air yang tampak pada citra, dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Citra drone hasil pemetaan di lapangan.

c) Digitasi Aliran Sungai

Hasil interpretasi kemudian digunakan sebagai dasar untuk melakukan digitasi manual terhadap aliran sungai menggunakan perangkat lunak QGIS. Pada tahap ini, alur sungai digambar dalam bentuk vektor *polyline*, yang mewakili geometri dan arah aliran aktual di lapangan. Digitasi dilakukan mengikuti morfologi permukaan dan mempertimbangkan arah lereng agar arah aliran yang direpresentasikan sesuai dengan kenyataan, dapat dilihat pada Gambar 6.



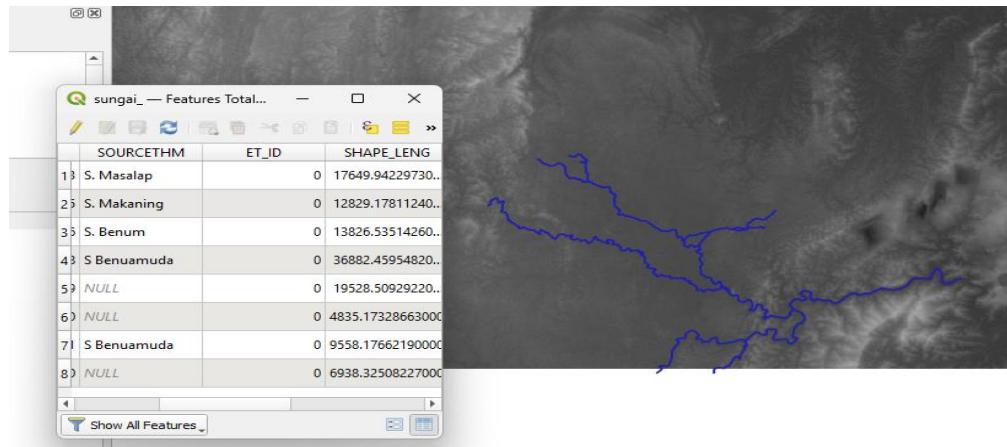
Gambar 6. Proses digitasi aliran sungai .

d) Validasi Lapangan (*Ground Check*)

Untuk memastikan kesesuaian data digitasi dengan kondisi aktual dilakukan validasi lapangan melalui survei langsung di lokasi. Kegiatan ini dilakukan dengan mencocokan jalur aliran hasil interpretasi citra dengan keberadaan alur sungai nyata, memperbaiki kesalahan identifikasi, dan merekam elemen penting seperti lebar sungai, keberadaan bangunan penghambat, atau kondisi sedimentasi, apabila ditemukan ketidak sesuaian data pada saat validasi lapangan maka dilakukan pengambilan posisi koordinat menggunakan GPS handheld untuk selanjutnya dilakukan koreksi terhadap kesalahan atau ketidak sesuaian yang terjadi. Pada tahap ini seharusnya digunakan alat berakurasi tinggi seperti GNSS. Namun, karena keterbatasan peralatan pada saat observasi lapangan, pengambilan data dilakukan menggunakan GPS handheld.

e) Output Akhir

Output dari proses ini adalah data jaringan aliran aktual dalam format digital *shapefile* (*shp*) database ini dapat digunakan sebagai input kalibrasi pada saat pembuatan *watershed*, ouput data shp dapat dilihat pada Gambar 7.



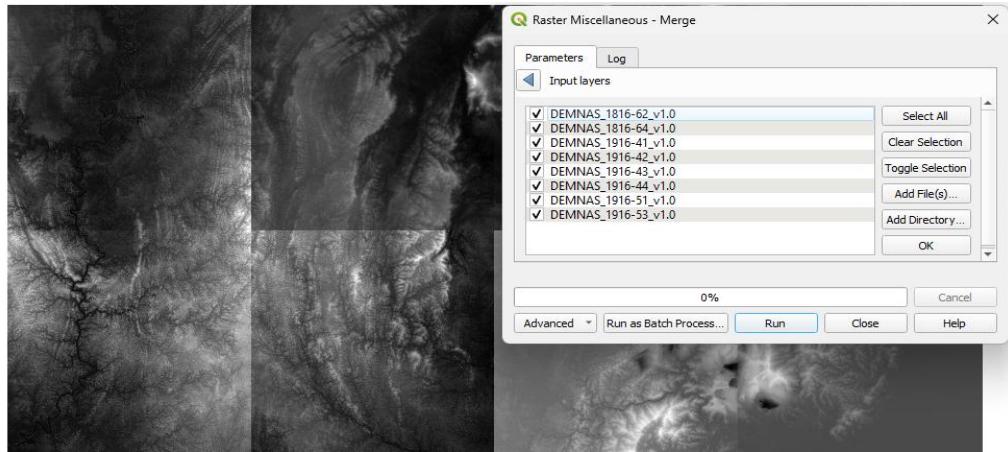
Gambar 7. Data *shapefile* sungai hasil digitasi.

2. Penyiapan Data *Digital Elevation Model* (DEM)

Digital Elevation Model (DEM) merupakan data digital yang menggambarkan geometri dari bentuk permukaan bumi atau bagiannya yang terdiri dari himpunan titik-titik koordinat yang mendefinisikan permukaan bumi (Wardana et al., 2019). Tahap pengolahan data DEM dimulai setelah data diunduh dari situs resmi Indonesia Geoportal (Ina-Geoportal)). Data tersebut kemudian diolah menggunakan perangkat lunak QGIS untuk menampilkan bentuk permukaan bumi. Data DEM memberikan informasi ketinggian yang sangat penting untuk memahami karakteristik topografi wilayah, sehingga dapat digunakan untuk menentukan arah aliran air, area tangkapan hujan, dan lokasi sub-DAS yang relevan untuk analisis hidrologi, adapun pengolahan pada proses penyiapan data DEM sebagai berikut.

a) Penggabungan DEM

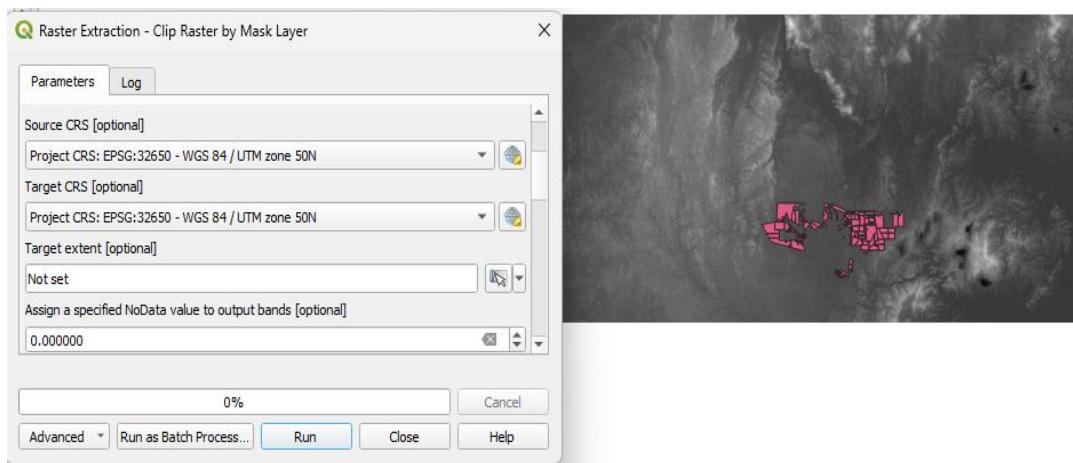
Penggabungan data DEM dilakukan dengan menyatukan sejumlah file DEM yang terpisah menjadi satu kesatuan data elevasi yang lebih utuh dan menyeluruh. Langkah ini bertujuan untuk membentuk gambaran topografi yang mencakup area yang lebih besar atau memiliki tingkat kedetailan tinggi dari beberapa wilayah yang sebelumnya terpisah. Penggabungan data ini dikarnakan area yang dibutuhkan dalam penelitian cukup luas sehingga data DEM yang diunduh lebih dari 2 file data, yang kemudian harus digabung menjadi 1 data utuh, dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Penggabungan data DEM (*Merge*).

b) Pemotongan DEM

Pemotongan DEM dilakukan untuk mendapatkan data DEM yang lebih kecil dan relevan sesuai dengan lingkup areal penelitian, hal ini sangat diperlukan mengingat semakin besar data citra yang diolah akan mempengaruhi waktu pengolahan, sehingga perlu dilakukan pemotongan sesuai dengan lingkup area penelitian, pemotongan data dilakukan setelah proses *georeferencing* pada dem, selanjutnya pemotongan dilakukan pada QGIS menggunakan *tools clip raster by mask layer*, proses ini membutuhkan data *shapefile* sesuai area yang kita tentukan, dan selanjutnya dilakukan proses pemotongan data DEM, dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Proses pemotongan data DEM.

3. Penyiapan Data Tanah

Penyiapan data tanah merupakan salah satu tahap krusial dalam pemodelan SWAT, karena sifat fisik dan kimia tanah sangat memengaruhi proses hidrologi, seperti *infiltrasi*, perkolas, kapasitas simpan air, serta erosi. Oleh karena itu, penyusunan data tanah dilakukan secara cermat agar mampu mewakili kondisi sebenarnya di lapangan. Langkah pertama adalah mengumpulkan data jenis tanah (*soil*) dari sumber yang valid yaitu basis data internasional FAO *Soil Map*. Data ini didapat berupa data spasial *shapefile* (shp) yang memuat unit-unit tanah berdasarkan klasifikasi tertentu.

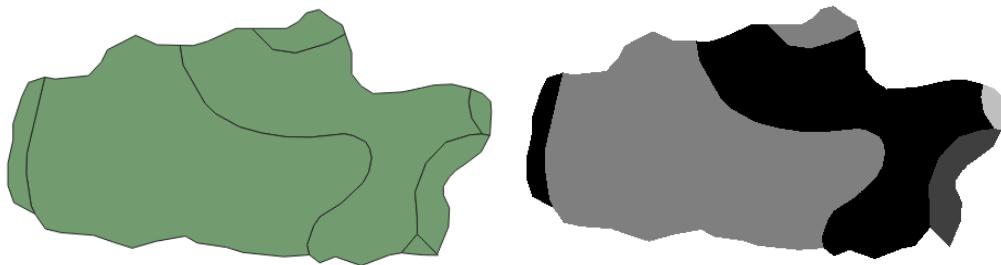
Selanjutnya, dilakukan identifikasi dan penyesuaian parameter data tanah yang dibutuhkan oleh SWAT. Setiap jenis tanah perlu dilengkapi dengan informasi parameter seperti: jenis tanah, tekstur tanah (persentase pasir, debu, liat, kedalaman lapisan tanah (*soil depth*), *bulk density* (massa jenis kering), kapasitas lapang (*field capacity*), titik layu permanen (*wilting point*), *saturated hydraulic conductivity* (permeabilitas jenuh), kandungan bahan organik (organic carbon content), data parameter tersebut terdapat pada data tanah yang telah diunduh sebelumnya, sebagai contoh informasi yang ada didalam data tanah dapat dilihat pada Gambar 10.

OBJECTID	OBJECTID	SNUM	FAOSOIL	DOMSOIL	SOIL_ID	SNAM
1	1	4	4563	Qc59-1ab	1	Qc59-1ab
2	2	5	4519	Je63-2/3a	1	Qc59-1ab
3	3	12	3643	Ao70-2/3b	2	Je63-2/3a
4	4	13	4535	Lo66-2/3c	3	Ao70-2/3b
5	6	17	4563	Qc59-1ab	4	Lo66-2/3c
6	7	19	3749	Jd9-2/3a	5	Jd9-2/3a
					8	

Gambar 10. Konversi format data tanah.

Parameter-parameter ini kemudian dimasukkan ke format exel yang kemudian digunakan dalam analisis data pada tahap pembentukan HRU, setelah data

parameter diinput kedalam exel dan disimpan dalam format csv file (*Comma Separated Values*) agar dapat terbaca oleh QGIS, selanjutnya data tersebut diinput kedalam Software QGIS untuk selanjutnya diubah menjadi bentuk raster menggunakan bantuan *tools* yang tersedia pada *Software QGIS*, format csv dan raster inilah yang nantinya akan di-overlay dengan peta penggunaan lahan dan kemiringan lereng untuk membentuk *Hydrological Response Units* (HRU) dalam SWAT, yaitu kombinasi unik dari jenis tanah, tutupan lahan, dan kelas kemiringan yang mewakili unit terkecil dalam simulasi hidrologi, dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Pengubahan data vektor ke data raster.

Dengan menyiapkan data tanah secara lengkap dan akurat, model SWAT dapat mensimulasikan proses-proses hidrologi seperti *surface runoff*, infiltrasi, penyimpanan air tanah, dan erosi secara lebih realistik. Ini menjadi dasar penting dalam menilai dampak penggunaan lahan (terutama ekspansi sawit) terhadap keseimbangan hidrologi di suatu DAS.

4. Penyiapan Data Tutupan Lahan

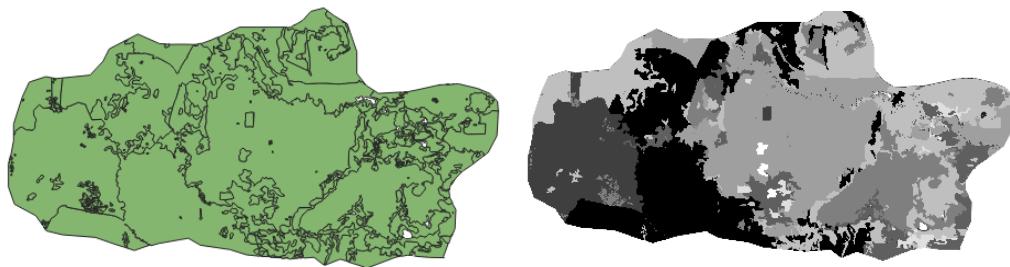
Penyiapan data tutupan lahan merupakan tahap penting dalam pemodelan SWAT karena jenis dan distribusi tutupan lahan sangat berpengaruh terhadap proses-proses hidrologi seperti *evapotranspirasi*, *infiltrasi*, *surface runoff*, dan erosi. Tutupan lahan menentukan bagaimana air hujan diserap, tertahan, atau dialirkan di permukaan tanah. Oleh karena itu, pemetaan dan klasifikasi penggunaan lahan dilakukan secara teliti untuk mencerminkan kondisi aktual wilayah studi.

Data tutupan lahan (*land cover*) diunduh dalam format *shapefile* (shp) berisikan informasi-informasi penting yang menggambarkan keadaan realisasi dilapangan. Tutupan lahan diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori, misalnya: hutan, sawah, permukiman, semak belukar, badan air, dan perkebunan kelapa sawit dimana tiap kategori memiliki kode dan informasi data yang berbeda-beda. Setelah klasifikasi selesai, dilakukan proses reklasifikasi (*reclassification*) proses pemindahan suatu item dari satu kategori ke kategori, kelas, atau akun lain, untuk menyelaraskan setiap kategori tutupan lahan dengan kode sistem SWAT, dapat dilihat pada Gambar 12.

Provinsi	PL_19_R	Legenda	Class	CROPNAME	CPNM	IDLC
KALIMANTAN ...	2002	Hutan Lahan K...	FRST	Forest-Mixed	FRST	1
KALIMANTAN ...	2002	Hutan Lahan K...	FRST	Wetlands-Forested	WETF	2
KALIMANTAN ...	2002	Hutan Lahan K...	FRST	Wetlands-Forested	WETF	2
KALIMANTAN ...	2002	Hutan Lahan K...	FRST	Wetlands-Forested	WETF	2
KALIMANTAN ...	2002	Hutan Lahan K...	FRST	Wetlands-Mixed	WETL	2
KALIMANTAN ...	2002	Hutan Lahan K...	FRST	Forest-Evergreen	FRSE	3
KALIMANTAN ...	2002	Hutan Lahan K...	FRST	Agriculture Land-Generic	AGRL	4
KALIMANTAN ...	2002	Hutan Lahan K...	FRST	Agriculture Land-Generic Ag	AGRL	4
KALIMANTAN ...	2002	Hutan Lahan K...	FRST	Orchard	ORCD	5
KALIMANTAN ...	2002	Hutan Lahan K...	FRST	Range-Brush	RNGB	6
KALIMANTAN ...	2002	Hutan Lahan K...	FRST	Oak	OAK	7

Gambar 12. Reklasifikasi pada data tutupan lahan.

Data hasil reklasifikasi kemudian dikonversi menjadi format raster dengan resolusi sesuai kebutuhan (umumnya 30 meter), dan digunakan sebagai input dalam proses pembentukan *Hydrological Response Units* (HRU) di dalam SWAT. HRU merupakan kombinasi unik dari tutupan lahan, jenis tanah, dan kemiringan lereng yang menjadi dasar simulasi dalam model. Melalui penyajian data tutupan lahan yang baik, model SWAT dapat memetakan perbedaan karakteristik hidrologi berdasarkan tipe vegetasi dan penggunaan lahan, sehingga dapat mengevaluasi dengan lebih akurat dampak perubahan tutupan lahan, khususnya alih fungsi menjadi perkebunan sawit, terhadap aliran air dan keseimbangan hidrologi di DAS, dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Pengubahan data vektor ke data raster.

5. Penyiapan Data Iklim

Penyiapan data iklim merupakan tahap yang sangat penting dalam pemodelan SWAT karena proses hidrologi di dalam model sangat dipengaruhi oleh variabel iklim, terutama curah hujan dan suhu. Data iklim digunakan sebagai data utama dalam simulasi harian untuk menghitung *evapotranspirasi*, *surface runoff*, perkolasi air tanah, pembentukan limpasan, dan erosi. Oleh karena itu, akurasi dan kelengkapan data iklim sangat menentukan kualitas hasil simulasi.

A. Parameter Iklim yang Dibutuhkan

Model SWAT memerlukan data iklim harian dengan variabel yang akan dijelaskan pada bagian berikut:

1) Curah Hujan (*Precipitation*)

Curah hujan merupakan input paling berpengaruh karena berperan langsung dalam pembentukan *surface runoff*, kelembapan tanah, dan potensi banjir. Data ini harus tersedia secara harian dan kontinu.

2) Suhu Maksimum Dan Minimum

Kedua parameter ini digunakan dalam perhitungan *evapotranspirasi* (ET) menggunakan metode Penman-Monteith, yang penting dalam menentukan kehilangan air melalui penguapan dan transpirasi vegetasi.

3) Radiasi Matahari (*Solar Radiation*)

Data radiasi matahari dalam model SWAT diperlukan untuk mendukung perhitungan evapotranspirasi dan siklus energi di permukaan bumi, apabila

diperlukan dalam analisis evapotranspirasi, namun secara utuh data radiasi matahari harus diinput kedalam model SWAT.

4) Kelembaban Relatif (*Relative Humidity*)

Data kelembaban relatif diperlukan dalam analisis model SWAT karena mempengaruhi laju penguapan dari permukaan tanah dan vegetasi.

5) Kecepatan Angin (*Wind Speed*)

Data iklim yang wajib untuk masukkan ke dalam model adalah data kecepatan angin, data ini memengaruhi efisiensi penguapan dan membantu dalam perhitungan evapotranspirasi (ET) secara dinamis, evapotranspirasi (ET) adalah elemen kunci dalam menentukan kebutuhan air tanaman, yang menggambarkan laju gabungan antara penguapan dan transpirasi dari permukaan, berikut contoh master data kecepatan angin, dapat dilihat pada Gambar 14.

	A	B
1	ID,NAME,LAT,LONG,ELEVATION	
2	1,w5642,0.3413,116.8736,66.72	
3	2,w5643,0.3463,117.5207,52.71	
4	3,w5644,0.7577,117.5824,144.01	
5	4,w5645,0.8371,116.9072,114.69	
6		

Gambar 14. Parameter data kecepatan angin.

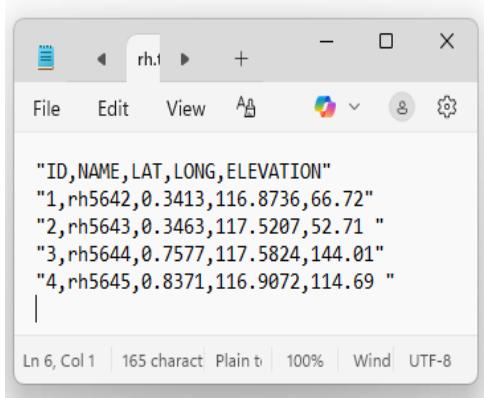
B. Sumber Data Iklim

Dalam penelitian ini, data iklim harian diperoleh dari sumber data reanalisis satelit Nasa Power (*Prediction Of Worldwide Energy Resources*). Pada website ini menyediakan data iklim global dengan resolusi spasial dan temporal yang cukup tinggi, serta mencakup berbagai parameter yang dibutuhkan dalam pemodelan hidrologi menggunakan SWAT, seperti curah hujan, suhu maksimum dan minimum, radiasi matahari, kelembaban relatif, dan kecepatan angin. Pemilihan sumber data ini dilakukan karena keterbatasan data iklim lokal dari stasiun

pengamatan, serta untuk memastikan ketersediaan data harian yang lengkap dan konsisten. Data Nasa Power diunduh dalam format CSV dan kemudian dikonversi ke dalam format teks (.txt) dengan melakukan modifikasi pada data agar dapat terbaca sesuai dengan kebutuhan input SWAT. Lokasi koordinat DAS ditentukan secara spesifik agar data yang diambil benar-benar merepresentasikan kondisi iklim wilayah studi.

C. Format dan Pengolahan Data

Data iklim yang dikumpulkan kemudian dikonversi ke format standar SWAT, yaitu file teks (.txt) untuk masing-masing variabel. disusun berdasarkan stasiun klimatologi dengan format harian yang lengkap dan berurutan (tahun bulan tanggal), selanjutnya agar setiap data yang terkumpul dapat dibaca oleh model swat dengan akumulasi keseluruhan data, maka dibuatkan master data, untuk merepresentasikan setiap data yang ada, dapat dilihat pada Gambar 15.



The image shows a comparison between a CSV file and its corresponding text representation. On the left, a CSV file is displayed with columns: IMERG_PRECT, RH2M, T2M_MAX, T2M_MIN, TOA_SW, and WS2M. The data consists of 15 rows of numerical values. On the right, a text editor window shows the same data as text. The text starts with a header "ID,NAME,LAT,LONG,ELEVATION" followed by 15 lines of data, each containing five values separated by commas. The text editor interface includes a toolbar, a status bar at the bottom, and a scroll bar on the right.

IMERG_PRECT	RH2M	T2M_MAX	T2M_MIN	TOA_SW	WS2M
6.1644473	92.43	31.18	21.22	35.97	0.1
0.0975781	91.68	30.85	20.45	37.25	0.08
2.3427436	91.82	31.25	20.47	37.71	0.09
0.89884233	92.42	31.44	21.78	36.66	0.11
3.3504875	93.01	30.99	22	34.79	0.13
0.013190387	93.09	30.4	20.81	33.58	0.14
0.20985699	92.46	30.17	20.64	33.98	0.12
0.8749767	91.34	30.59	20.84	35.56	0.11
12.297263	90.78	31.17	20.79	36.94	0.11
4.558458	91.17	31.25	20.62	37.07	0.11
8.381003	91.89	31.2	22.09	36.11	0.12
78.850334	92.33	31.26	21.8	35.36	0.11
42.996975	92.04	31.44	20.45	35.91	0.11

Gambar 15.Konversi data iklim exel ke format (.txt).

SWAT juga membutuhkan file pendukung seperti *Weather Generator file*(WGN) berisi statistik iklim bulanan untuk lokasi simulasi dapat dibuat dari data harian atau diunduh dari basis data SWAT.

D. Penempatan dan Integrasi ke Dalam Model

Setelah data diolah dan dikonversi kedalam format yang ditentukan, selanjutnya file iklim dimasukkan ke direktori proyek SWAT dan dihubungkan dengan titik-

titik stasiun klimatologi yang telah dikonfigurasi berdasarkan koordinatnya. Masing-masing sub-DAS akan menerima input data dari stasiun terdekat yang relevan secara spasial. Tujuan dari tahap ini adalah untuk memastikan bahwa seluruh proses hidrologi dalam simulasi SWAT berjalan secara dinamis dan realistik berdasarkan kondisi iklim aktual. Akurasi dalam penyiapan data iklim akan memengaruhi keakuratan hasil simulasi seperti debit sungai, limpahan, evapotranspirasi, kelembapan tanah, serta siklus air tahunan di dalam DAS.

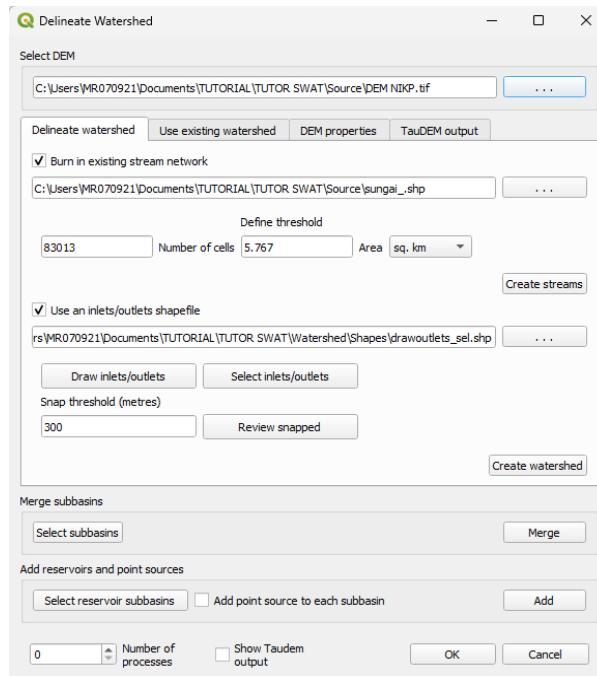
6. *Delineated Watershed (bahasa indonesia deliniasi)*

Delineated watershed daerah aliran sungai (DAS), merupakan proses menentukan batas wilayah daratan yang mengalirkan air menuju satu titik tertentu, seperti sungai atau danau. Fungsi *Delineated Watershed* pada model *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) adalah untuk mengidentifikasi dan membagi wilayah kajian menjadi beberapa sub-DAS (sub-basin) yang lebih kecil, sesuai dengan pola aliran air yang terbentuk dari curah hujan menuju titik outlet tertentu. Proses ini bertujuan untuk menentukan batas-batas alami daerah tangkapan air (*watershed*) dengan memanfaatkan data topografi, seperti *Digital Elevation Model* (DEM), guna memahami karakteristik hidrologi di suatu wilayah secara lebih terperinci, berikut merupakan proses pembuatan daerah aliran sungai :

a. Input Data Dem

Pada tahap ini, data *Digital Elevation Model* (DEM) dimasukkan ke dalam sistem yang merupakan tahap pertama pengolahan model SWAT, melalui *software* QGIS. Data DEM merupakan data ketinggian permukaan bumi dalam bentuk raster, dan berfungsi sebagai dasar untuk mengenali bentuk topografi wilayah studi. Dalam model SWAT, data DEM digunakan untuk menentukan arah *surface runoff* berdasarkan perbedaan elevasi, mengidentifikasi lokasi jaringan sungai alami, melakukan pembatasan wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS) secara otomatis. Kualitas dan resolusi DEM sangat penting karena akan mempengaruhi keakuratan dalam pembentukan sub-basin, pengaliran air, dan perhitungan hidrologi di seluruh sistem, Pada penelitian ini digunakan data DEMNAS dengan resolusi spasial sebesar 8 meter x 8 meter, cukup baik untuk melakukan proses

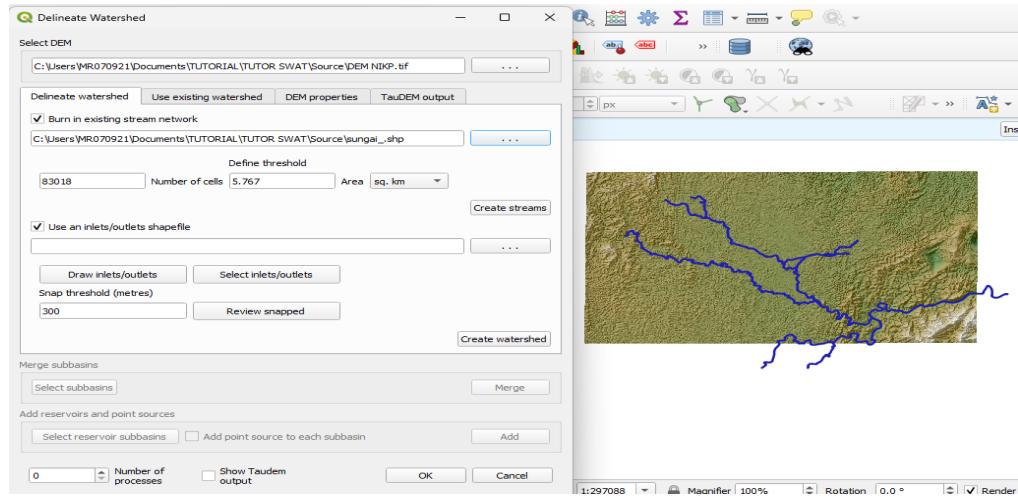
pembentukan watershed dengan wilayah yang luas. Proses ini merupakan fondasi awal sebelum analisis dilakukan, input data DEM pada model SWAT dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. Input data DEM.

b. Input Data Kalibrasi Sungai

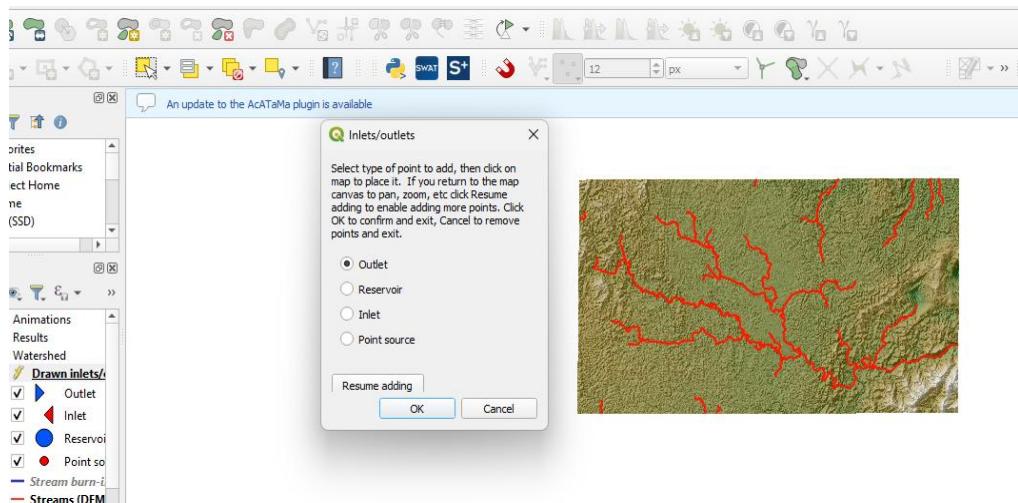
Setelah data DEM terbaca oleh sistem SWAT tahap berikutnya adalah kalibrasi sungai. Data sungai yang sebelumnya sudah dihasilkan dari proses observasi, deliniasi pada citra drone dan validasi lapangan yang telah disimpan selanjutnya diinput kedalam model SWAT sebagai data kalibrasi sungai existing. Proses ini dilakukan untuk mencocokkan posisi dan arah sungai yang ada (*existing*) dengan aliran yang nantinya dihasilkan model SWAT dengan kondisi sebenarnya di lapangan. Kalibrasi penting untuk memastikan bahwa pemodelan aliran air dalam SWAT berjalan sesuai kondisi nyata. Kesalahan pada tahap ini bisa menyebabkan ketidakakuratan dalam pembagian sub-basin maupun dalam simulasi aliran sungai, input data sungai untuk melakukan kalibrasi dapat dilihat pada Gambar 17.



Gambar 17. Kalibrasi menggunakan data sungai hasil digitasi.

c. Pemilihan Outlet

Outlet adalah titik akhir atau titik keluaran dari suatu DAS tempat di mana seluruh aliran air dikumpulkan dan biasanya menjadi lokasi pengukuran debit atau analisis hasil model. Pada tahap ini, pengguna harus memilih satu atau beberapa titik outlet di jaringan sungai yang telah dikalibrasi. Pemilihan outlet yang tepat sangat penting karena akan menentukan batas wilayah DAS secara otomatis oleh sistem. Proses ini juga menjadi dasar untuk pembagian wilayah kerja (sub-basin) dan pengaturan alur simulasi hidrologi dalam model SWAT, tahap ini dapat dilihat pada Gambar 18.



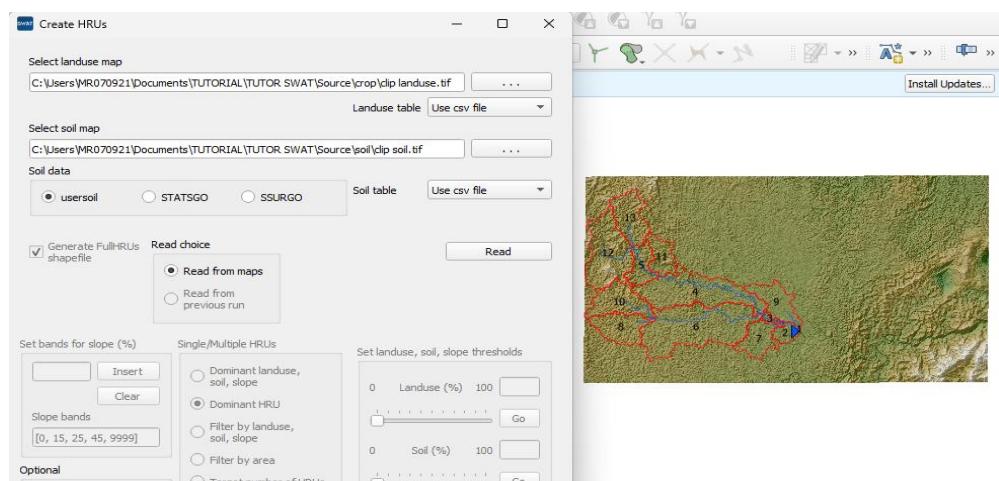
Gambar 18. Pemilihan outlet DAS.

7. Pembagian *Hydrologic Response Unit* (HRU)

Setelah proses delineasi daerah aliran sungai (DAS) dan pembentukan sub-basin selesai, model SWAT memasuki tahap penting, yaitu pembagian *Hydrologic Response Unit* (HRU). HRU merupakan unit terkecil dalam model SWAT yang bersifat homogen (memiliki kesamaan) dalam hal penggunaan lahan, jenis tanah, dan kelas lereng. Artinya, satu HRU mewakili kombinasi unik dari ketiga karakteristik tersebut di dalam satu sub-basin. Tujuan dari pembagian HRU adalah untuk membentuk variasi spasial dalam DAS tanpa harus membagi sub-basin menjadi grid kecil, sehingga simulasi proses hidrologi menjadi lebih realistik, serta pengaruh dari tata guna lahan, jenis tanah, dan topografi terhadap *surface runoff*, erosi, dan kualitas air bisa dianalisis lebih detail. Adapun langkah-langkah umum dalam Pembagian HRU pada penelitian ini sebagai berikut:

a. Input Data Tutupan Lahan dan Data Tanah

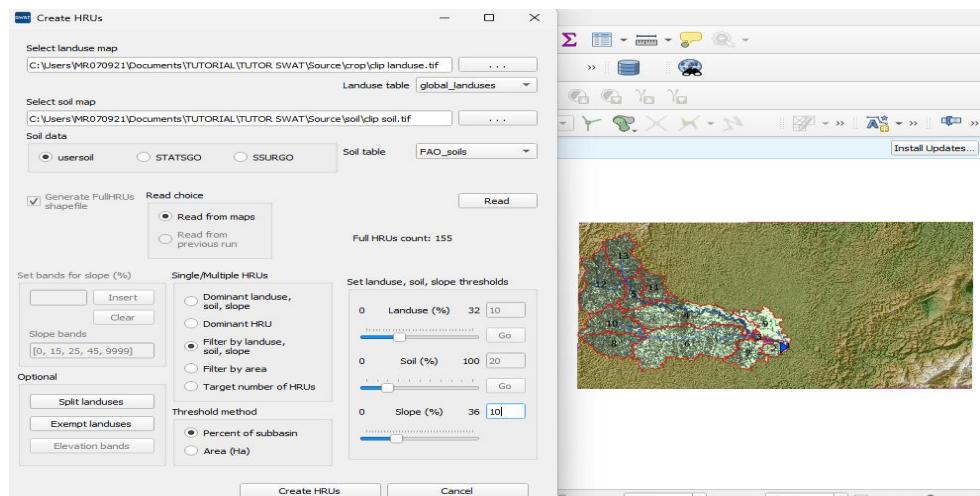
Pada tahap ini, data tutupan lahan dan data jenis tanah yang sebelumnya sudah diolah pada tahap penyiapan selanjutnya diinput dengan format data raster dan csv (*Comma Separated Values*) ke dalam model SWAT. Data ini menggambarkan jenis-jenis penggunaan lahan dan jenis tanah di wilayah studi. Proses selanjutnya adalah dengan membaca data yang telah diinput apakah data terbaca oleh sistem SWAT atau terjadi kesalahan pada penginputan data, tahap ini dapat dilihat pada Gambar 19.



Gambar 19. Input data tutupan lahan dan data tanah.

b. Filter By Landuse

Proses ini digunakan untuk membatasi atau memfokuskan analisis tampilan data hanya pada area-area yang memiliki penggunaan lahan tertentu, seperti area pemukiman, area pertanian, atau area hutan, pada bagian pembatasan ini digunakan *slope* sebesar 10%, untuk *landuse* sebesar 10% dan pada bagian *soil* sebesar 20%. Tujuan dari pembatasan menggunakan filter by landuse ini adalah menganalisis dampak penggunaan lahan tertentu terhadap *surface runoff*, erosi, atau kualitas air, melakukan evaluasi skenario perubahan tutupan lahan, seperti konversi hutan menjadi lahan pertanian, mengidentifikasi kontribusi spesifik penggunaan lahan terhadap total debit atau sedimentasi dan mendukung pengambilan keputusan berbasis lahan seperti restorasi hutan atau pengembangan pertanian berkelanjutan, tahap ini dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 20. Proses *filter by landuse*.

8. Edit Input Data Iklim

Tahap edit input data iklim dalam model SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) adalah langkah penting untuk memastikan bahwa data iklim yang digunakan dalam simulasi merepresentasikan kondisi yang aktual, akurat, dan sesuai dengan kebutuhan model. Tahap ini dilakukan setelah membuat atau membentuk HRU pada tahap sebelumnya. Tujuan tahap edit input data iklim adalah untuk memastikan data iklim yang digunakan valid dan sesuai dengan lokasi DAS yang

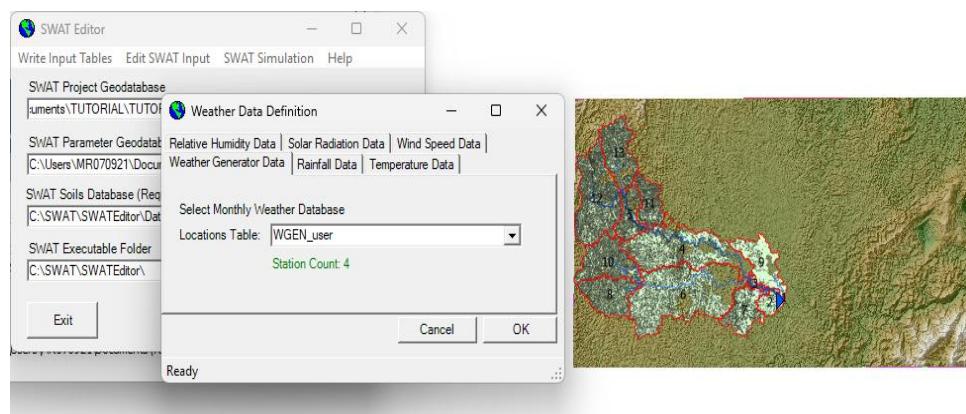
dimodelkan, menyesuaikan atau memperbaiki data iklim agar tidak terdapat kesalahan data seperti nilai yang hilang (*missing*), outlier, atau ketidaksesuaian format, dan kemungkinan pengujian skenario iklim seperti perubahan curah hujan atau suhu. Pada tahap pengolahan ini terbagi menjadi beberapa langkah sebagai berikut :

a. *Write Input Tables*

Write input tables adalah tahap di mana perangkat lunak SWAT menghasilkan file-file input model dalam format teks atau tabel, yang akan dibaca oleh engine SWAT saat melakukan simulasi hidrologi dan kualitas air. Pada tahap ini terbagi menjadi beberapa langkah yaitu :

1) *Weather Stations*

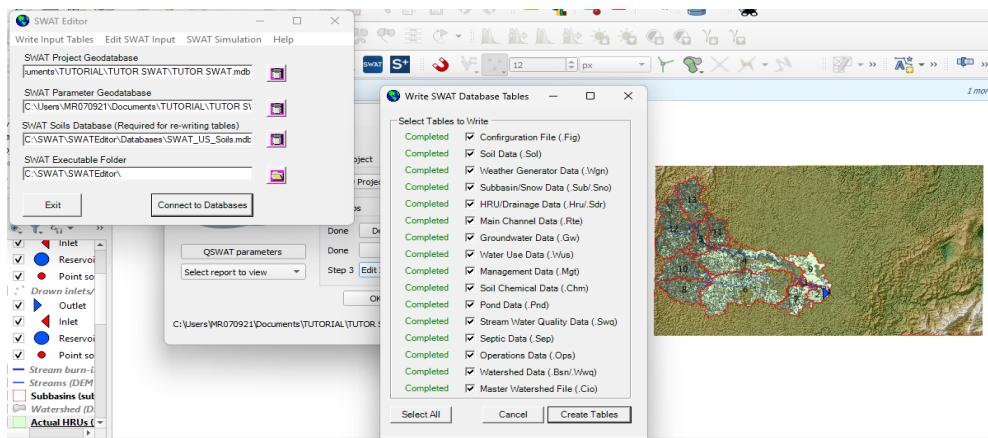
Pada tahap *Weather Stations*, pengguna memilih stasiun cuaca dan memasukkan data iklim yang sebelumnya telah dipersiapkan dalam format yang dapat dibaca oleh SWAT (.txt). Data iklim tersebut meliputi curah hujan (*precipitation*), suhu maksimum dan minimum, radiasi matahari (*solar radiation*), kelembaban relatif (*relative humidity*), serta kecepatan angin (*wind speed*). Seluruh data yang telah diolah pada tahap penyiapan data iklim, dimasukkan ke dalam sistem untuk merepresentasikan kondisi iklim di lokasi penelitian secara akurat. Proses ini sangat penting guna mendukung analisis dan simulasi yang sesuai dengan karakteristik iklim di lokasi penelitian, tahap ini dapat dilihat pada Gambar 21.



Gambar 21. Proses *weather stations*.

2) Write SWAT Input Tables

Tahap *Write SWAT Input Tables* merupakan proses akhir dalam pra-pemrosesan data pada QSWAT sebelum simulasi dilakukan. Proses yang terjadi saat pengguna mengklik tombol “*Write Input Tables*”, sistem akan melakukan validasi untuk memastikan semua input (DEM, outlet, sungai, tanah, tutupan lahan, HRU, iklim) telah lengkap dan sesuai. Pada tahap ini juga, perangkat lunak akan melakukan proses otomatis mengubah semua data masukan (*input*) yang telah disiapkan sebelumnya menjadi file-file teks terstruktur yang akan digunakan oleh mesin simulasi SWAT. Tujuan proses ini yaitu mengonversi data spasial (DEM, tanah, penggunaan lahan, sungai) dan data atribut iklim, ke dalam format file teks yang dikenali oleh SWAT, membangun struktur folder model SWAT, yang berisi semua file konfigurasi, parameter, dan referensi, mengintegrasikan seluruh parameter dalam bentuk sub-basin, *Hydrologic Response Unit* (HRU), saluran sungai, tanah, dan iklim. Pada tahap ini sangat menentukan keberhasilan proses run SWAT ditahap selanjutnya, tahap ini dapat dilihat pada Gambar 22.



Gambar 22. Proses validasi pada *Write SWAT input tables*.

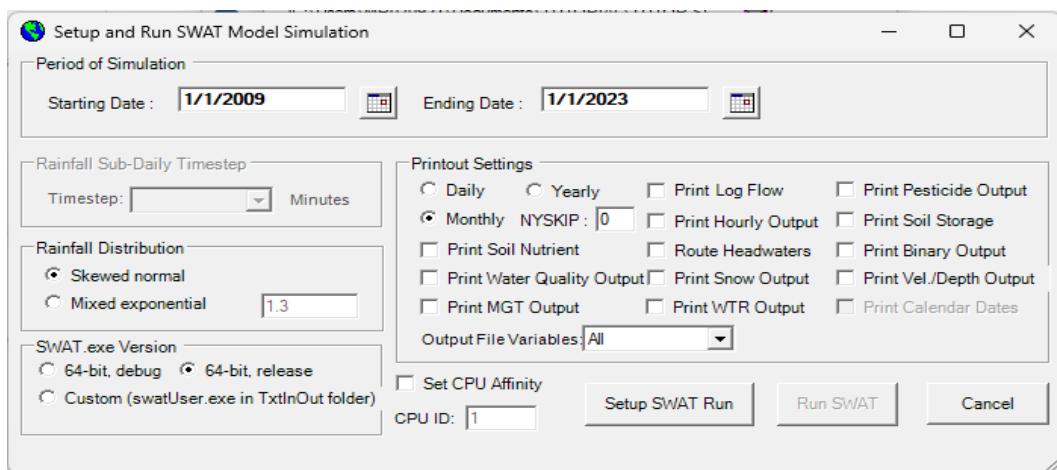
3.2.3 Tahap Analisis

Tahap analisis dan prakiraan dengan model SWAT melibatkan serangkaian langkah untuk memahami karakteristik hidrologi dalam suatu Daerah Aliran Sungai (DAS) dan memprakiraan perubahan yang mungkin terjadi akibat berbagai

skenario lingkungan. Proses ini digunakan untuk menilai dampak faktor-faktor seperti perubahan penggunaan lahan, perubahan iklim, atau intervensi manusia terhadap sumber daya air dan kualitas lingkungan. Beragam data input yang diperlukan, seperti data curah hujan, iklim, DEM, peta penggunaan lahan, dan jenis tanah, dimasukkan ke dalam model SWAT untuk menghasilkan output.

1. Simulasi SWAT

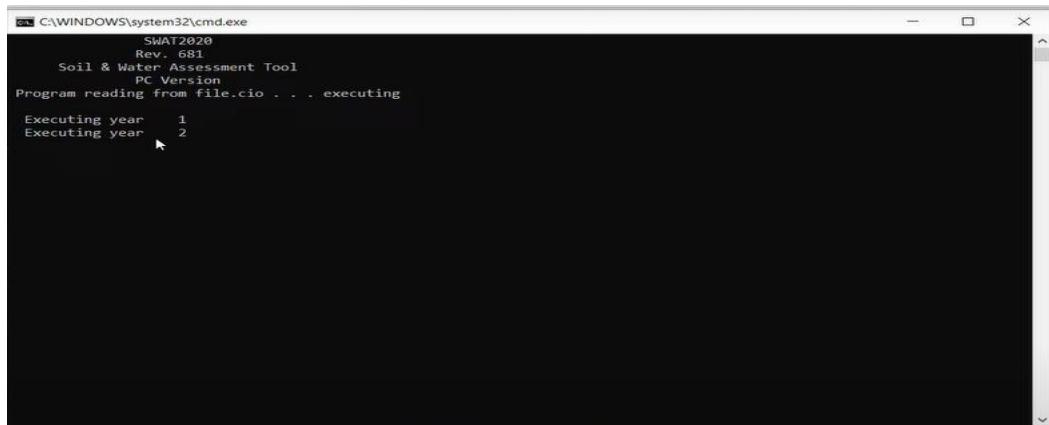
Setelah seluruh data input telah dipersiapkan dan diverifikasi dengan baik, serta seluruh parameter model telah ditetapkan sesuai kondisi lapangan, maka langkah selanjutnya adalah menjalankan simulasi menggunakan model SWAT. Tahapan ini merupakan inti dari proses pemodelan, di mana sistem akan mengolah semua data masukan untuk mensimulasikan respon hidrologi dari daerah aliran sungai (DAS) yang dianalisis. Proses "Run SWAT" akan menghasilkan berbagai output seperti debit aliran, erosi tanah, hasil transportasi sedimen, serta kualitas air berdasarkan skenario yang telah ditentukan. Sebelum menjalankan simulasi, penting untuk memastikan bahwa konfigurasi model, periode waktu, serta lokasi outlet telah ditetapkan secara benar agar hasil simulasi dapat merepresentasikan kondisi sebenarnya di lapangan, proses ini dapat dilihat pada Gambar 23.



Gambar 23. Input tanggal pada proses *run SWAT*.

Setelah memilih *Run SWAT* maka hal yang harus dilakukan adalah menentukan tanggal mulai dan tanggal berakhir simulasi yang akan dijalankan pada model

SWAT. Pada tahap inilah dapat pula ditentukan simulasi untuk tahun yang akan datang atau melakukan prakiraan dengan menentukan tanggal awal mulai dengan panjang tahun (*range*) yang akan diprakiraan. Setelah pengaturan pada tahap simulasi ditentukan sesuai dengan data yang akan dianalisis selanjutnya adalah dengan menjalankan SWAT, proses ini dapat dilihat pada Gambar 24.



Gambar 24. Proses *running* model SWAT.

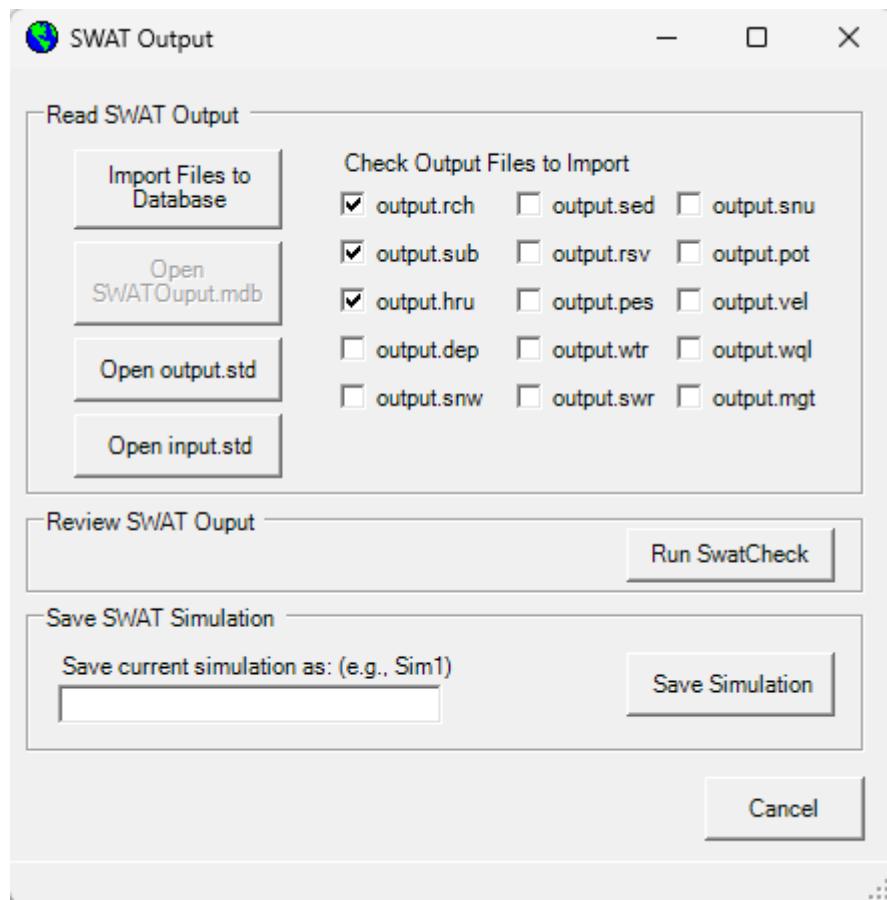
2. *Read SWAT Output*

Setelah proses simulasi selesai dijalankan melalui tahapan *Run SWAT*, langkah selanjutnya adalah membaca dan menganalisis hasil keluaran model, yang dikenal dengan tahapan "*Read SWAT Output*". Tahapan ini sangat penting karena memungkinkan pengguna untuk memahami bagaimana respons daerah aliran sungai (DAS) terhadap input data iklim, penggunaan lahan, topografi, dan parameter lainnya yang telah dimasukkan ke dalam model.

Model SWAT menghasilkan berbagai *file output* yang mencakup komponen hidrologi, kualitas air, serta dinamika sedimen pada berbagai skala spasial, seperti: Sub-basin (*output.sub*), *Hydrologic Response Unit* (*output.hru*), *Outlet* sungai (*output.rch*), Areal DAS keseluruhan. Beberapa parameter penting yang dapat dianalisis dalam *output* ini meliputi: debit harian, bulanan, dan tahunan, *surface runoff*, aliran dasar (*baseflow*), erosi dan muatan sedimen, konsentrasi nutrien seperti nitrogen dan fosfor. Pada penelitian ini data yang digunakan dalam

analisis yaitu data pada Sub-basin (*output.sub*), *Hydrologic Response Unit* (*output.hru*), dan sungai (*output.rch*).

Data *output* pada model SWAT dapat ditampilkan dalam bentuk grafik dan tabel, sehingga memudahkan interpretasi hasil simulasi. Dengan memahami dan mengevaluasi hasil dari "Read SWAT Output", pengguna dapat mengambil kesimpulan terkait kondisi hidrologi DAS yang dimodelkan serta menilai efektivitas skenario pengelolaan DAS yang diterapkan, proses ini dapat dilihat pada Gambar 25.



Gambar 25. Proses *read SWAT Output*.

3. Visualisasi

Tahap visualisasi pada model *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) merupakan tahap akhir yang sangat penting untuk memahami dan mengevaluasi

hasil simulasi. Visualisasi membantu dalam menyampaikan informasi hasil model secara lebih intuitif dan mudah dipahami, baik untuk analisis teknis maupun untuk komunikasi kepada pihak non-teknis.

a. Tujuan Visualisasi pada SWAT

Setelah model SWAT selesai dijalankan, berbagai output akan dihasilkan, seperti debit aliran sungai, laju sedimentasi, kualitas air, dan *evapotranspirasi*. Output-output ini bersifat numerik dan tersebar dalam berbagai file teks atau tabel. Agar hasil ini dapat ditafsirkan dengan lebih cepat dan akurat, maka diperlukan tahapan visualisasi. Tujuan lain visualisasi pada model SWAT adalah untuk mempermudah interpretasi data hasil simulasi melalui tampilan grafik, tabel, dan peta, menganalisis pola spasial dan temporal, misalnya sebaran sedimen per sub-basin atau fluktuasi debit per bulan, mengevaluasi dan membandingkan hasil model dengan data pengamatan (*observasi*) selama proses kalibrasi dan validasi.

b. Jenis Output Visualisasi

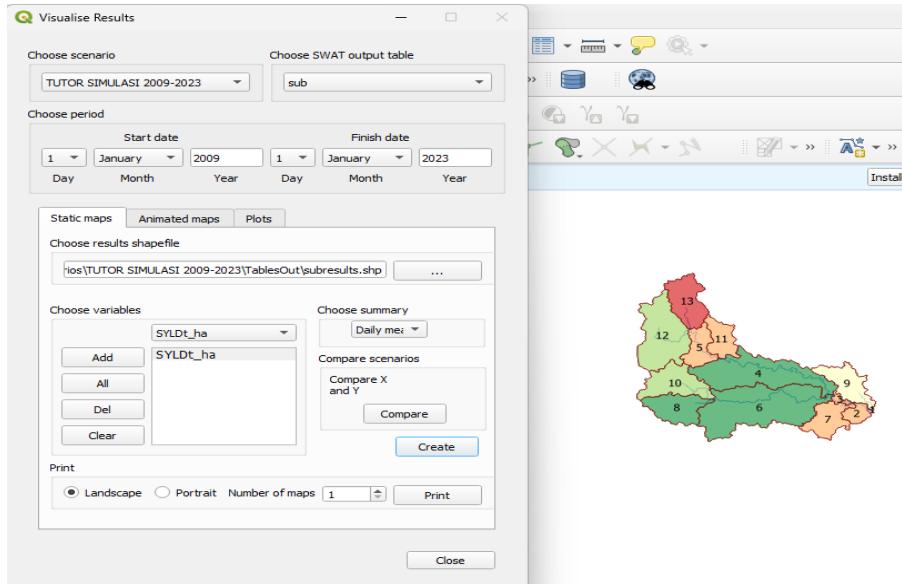
Pada tahap ini, berbagai *output* model ditampilkan dalam bentuk grafik, tabel, maupun peta spasial untuk memberikan gambaran yang lebih jelas tentang kondisi hidrologi dan kualitas lingkungan di wilayah studi. Berikut jenis-jenis *output* yang dapat divisualisasikan dari hasil model SWAT.

1) *Surface Runoff*

Visualisasi *surface runoff* dilakukan dalam bentuk analisis model peta atau grafik garis yang menunjukkan fluktuasi *surface runoff* dari waktu ke waktu. Grafik ini digunakan untuk mengevaluasi apakah model mampu merepresentasikan pola limpasan alami pada wilayah DAS.

2) Sedimentasi

Distribusi sedimentasi divisualisasikan dalam bentuk peta spasial yang menggambarkan sebaran beban sedimen antar sub-basin atau HRU. Warna pada peta menunjukkan area yang mengalami erosi tinggi atau rendah. proses ini dapat dilihat pada Gambar 26.



Gambar 26. Analisis erosi pada pemodelan SWAT.

3) *Evapotranspirasi (ET)*

Nilai *evapotranspirasi* (ET) dan komponen neraca air lainnya (seperti *surface runoff*, perkolas, dan aliran dasar) divisualisasikan dalam bentuk grafik garis atau peta area untuk menganalisis proses hidrologi di tiap zona DAS.

4. Analisis Erosi

Analisis erosi dalam model SWAT merupakan salah satu komponen penting untuk memahami sejauh mana lahan sawit di suatu daerah aliran sungai (DAS) mengalami degradasi akibat proses pengikisan tanah. Hasil dari analisis pada penelitian ini ditampilkan dalam bentuk beban sedimen (dalam tatanan ton/ha/tahun) yang dihasilkan dari masing-masing *Hydrologic Response Unit* (HRU) dan sub-basin. Informasi ini sangat penting dalam mengidentifikasi zona-zona tingkat bahaya erosi di dalam DAS, sehingga dapat dijadikan dasar dalam penyusunan rencana konservasi tanah dan air.

Visualisasi dari output erosi ditampilkan dalam bentuk peta spasial berwarna, yang memudahkan untuk mengenali daerah dengan tingkat erosi tinggi yang memerlukan perhatian khusus. Dengan adanya analisis ini, kita tidak hanya memperoleh gambaran kuantitatif tentang besarnya beban sedimen, tetapi juga

dapat memahami distribusinya secara spasial, sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan lahan secara berkelanjutan.

5. Output Peta

Output peta merupakan salah satu bentuk penyajian hasil analisis spasial yang memiliki peran strategis dalam penelitian hidrologi maupun pengelolaan sumber daya alam. Peta ini tidak hanya berfungsi sebagai media visualisasi, tetapi juga sebagai sarana analisis yang mampu menyampaikan informasi kompleks secara lebih jelas, ringkas, dan mudah dipahami. Melalui pendekatan tematik, peta hasil analisis dapat menampilkan distribusi spasial suatu variabel, sehingga memudahkan peneliti maupun pemangku kepentingan dalam menafsirkan pola, kecenderungan, serta hubungan antarvariabel dalam lingkup wilayah penelitian.

Dalam konteks pemodelan hidrologi menggunakan *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), output peta berperan penting sebagai instrumen evaluasi dan validasi hasil simulasi terhadap kondisi nyata di lapangan. Peta tematik yang dihasilkan dalam penelitian ini meliputi beberapa komponen utama, yaitu:

- a) Peta Penggunaan Lahan, yang menggambarkan distribusi spasial aktivitas pemanfaatan lahan, seperti perkebunan kelapa sawit, hutan, pertanian, dan pemukiman, yang memengaruhi karakteristik hidrologi DAS. Peta *Surface runoff*, yang menampilkan pola *surface runoff* di seluruh wilayah DAS, sehingga dapat diketahui variasi limpasan yang dihasilkan pada area dengan kondisi penggunaan lahan dan topografi berbeda.
- b) Peta *Evapotranspirasi*, yang menunjukkan tingkat kehilangan air melalui proses penguapan dan transpirasi vegetasi, sehingga mencerminkan peran vegetasi dalam siklus hidrologi.
- c) Peta Erosi, yang memberikan informasi mengenai tingkat kerentanan lahan terhadap proses pengikisan tanah akibat curah hujan dan kondisi penggunaan lahan.
- d) Peta Sedimentasi, yang memperlihatkan akumulasi material sedimen yang terangkut dan diendapkan di bagian-bagian tertentu dari sistem sungai.

- e) Peta Prediksi Erosi, yang menggambarkan proyeksi tingkat erosi pada periode tertentu di masa mendatang, sehingga berguna untuk perencanaan konservasi dan mitigasi degradasi lahan.

Melalui peta-peta tersebut, penelitian ini tidak hanya menghasilkan data numerik semata, tetapi juga menyajikan dimensi spasial yang memperkaya pemahaman terhadap karakteristik hidrologi DAS. Dengan adanya visualisasi spasial, proses interpretasi, komunikasi hasil penelitian, serta perumusan strategi pengelolaan DAS menjadi lebih komprehensif dan aplikatif.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan model SWAT, hasil penelitian ini memberikan beberapa poin penting yang dapat disimpulkan terkait karakteristik hidrologi yang terjadi pada DAS Makanyng, sebagai berikut :

1. Dominasi lahan kelapa sawit seluas 7.738,51 ha, berdampak pada besarnya *surface runoff* mencapai 471,4 mm/tahun dengan nilai koefisien limpasan berkisar antara 0,27 hingga 0,48. Besar *evapotranspirasi* mencapai 459,50 mm/tahun relatif rendah dibandingkan ekosistem hutan tropis alami yang dapat mencapai 1.182 mm/tahun. Besar erosi yang dihasilkan model SWAT sebesar 65 hingga 403 ton/ha/tahun dengan kategori Berat.
2. Hasil model SWAT menunjukkan besar sedimen yang masuk ke segmen sungai sebesar 99.215–748.409 ton/tahun, dan besar sedimen yang keluar segmen sungai sebesar 2.288–584.165 ton/tahun. Kontribusi terbesar beban sedimen berasal dari Sub-DAS 5, 6, dan 11, yang didominasi perkebunan kelapa sawit.
3. Prakiraan besar erosi hasil simulasi model SWAT menunjukkan erosi yang akan terjadi sebesar 57 – 385 (ton/ha/tahun) pada periode tahun 2025-2035, dan prakiraan besar erosi menggunakan metode USLE hasil model SWAT sebesar 57-228 (ton/ha/tahun).

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, terdapat beberapa rekomendasi yang dapat dilakukan untuk mengurangi dampak negatif penggunaan lahan sawit terhadap kondisi hidrologi DAS Makanyng.

1. Pengelolaan tata guna lahan. Praktik konservasi tanah dan air perlu diterapkan pada areal sawit, seperti pembuatan terasering, gulusan, penggunaan mulsa, penanaman penutup tanah, serta pengaturan jarak tanam yang sesuai. Diversifikasi vegetasi atau penerapan hutan penyangga (buffer zone) juga penting untuk meningkatkan evapotranspirasi dan mengurangi limpasan.
2. Konservasi DAS. Rehabilitasi lahan kritis pada sub-DAS dengan surface runoff dan erosi tinggi harus dilakukan secara berkelanjutan. Selain itu, penguatan vegetasi riparian (sempadan sungai) sangat diperlukan untuk menahan sedimen agar tidak langsung masuk ke aliran sungai.
3. Pengelolaan hidrologi dan sedimen. Monitoring berkala terhadap debit sungai, erosi, dan sedimentasi perlu dilaksanakan untuk memantau karakteristik hidrologi DAS. Penerapan teknologi pengendali sedimen, seperti sediment trap atau kolam pengendap, dapat menjadi langkah efektif untuk mengurangi beban sedimen yang masuk ke badan air.
4. Kebijakan dan perencanaan wilayah. Pemerintah daerah perlu mempertimbangkan daya dukung dan daya tampung DAS dalam penyusunan rencana tata ruang serta dalam pemberian izin pembukaan lahan sawit. Kolaborasi antara pemerintah, perusahaan perkebunan, dan masyarakat juga menjadi kunci dalam implementasi program konservasi berbasis DAS.

DAFTAR PUSTAKA

- Aboelnour, M., Gitau, M. W., & Engel, B. A. (2020). A comparison of streamflow and baseflow responses to land-use change and the variation in climate parameters using SWAT. *Water (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/w12010191>
- Agusta, H., Bintoro, H. M. H., Febrianto, R. E., & Zaman, S. (2024). The infiltration variability under oil palm plantation related to moss and understory vegetation covers in terrestrial and riparian sites in Jambi, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1354(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1354/1/012039>
- Akoko, G., Le, T. H., Gomi, T., & Kato, T. (2021). A review of swat model application in africa. *Water (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/w13091313>
- Ardi, Putri, R. (2014). *Analisa Perubahan Pola Aliran Sungai dan Daerah Genangan di Pantai Surabaya-Sidoarjo Menggunakan Citra Satelit Penginderaan Jauh*. 12. <http://repository.its.ac.id/id/eprint/64194>
- Brighenti, T. M., Gassman, P. W., Gutowski, W. J., & Thompson, J. R. (2023). Assessing the Influence of a Bias Correction Method on Future Climate Scenarios Using SWAT as an Impact Model Indicator. *Water (Switzerland)*, 15(4), 1–15. <https://doi.org/10.3390/w15040750>
- Budiyanto, S., Tarigan, S. D., Sinukaban, N., & Murtilaksono, K. (2015). The Impact of Land Use on Hydrological Characteristics in Kaligarang Watershed. *International Journal of Science and Engineering*, 8(2), 125–130.
- Cao, Z., Wang, S., Luo, P., Xie, D., & Zhu, W. (2022). Watershed Ecohydrological Processes in a Changing Environment: Opportunities and Challenges. *Water (Switzerland)*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/w14091502>
- Christanto, N., Setiawan, M. A., Nurkholis, A., Istiqomah, S., Sartohadi, J., & Hadi, M. P. (2018). Analisis Laju Sedimen DAS Serayu Hulu dengan Menggunakan Model SWAT. *Majalah Geografi Indonesia*, 32(1), 50. <https://doi.org/10.22146/mgi.32280>

- Ding, J., Wang, Y., Cao, C., & Sun, W. (2023). Improvement of the Soil and Water Assessment Tool Model and Its Application in a Typical Glacial Runoff Watershed: A Case Study of the Qarqan River Basin, China. *Sustainability (Switzerland)*, 15(22). <https://doi.org/10.3390/su152216046>
- Ertian, M. H., Jati, D. R., & Akbar, A. A. (2025). *Kerawanan Banjir pada Permukiman di Kalimantan Barat.* 23(5), 1359–1369. <https://doi.org/10.14710/jil.23.5.1359-1369>
- Febriani, N., & Ahyuni, A. (2023). Analisis Perubahan Penggunaan Lahan Tahun 2010-2020 Terhadap Debit Banjir di Daerah Aliran Sungai (DAS) Sikilang Kabupaten Pasaman Barat. *El-Jughrifiyah*, 3(1), 46. <https://doi.org/10.24014/jej.v3i1.19514>
- Francois, M., de Aguiar, T. R., Mielke, M. S., Rousseau, A. N., Faria, D., & Mariano-Neto, E. (2024). Interactions Between Forest Cover and Watershed Hydrology: A Conceptual Meta-Analysis. *Water (Switzerland)*, 16(23), 1–21. <https://doi.org/10.3390/w16233350>
- Garg, K. K., Akuraju, V., Anantha, K. H., Singh, R., Whitbread, A. M., & Dixit, S. (2022). Identifying potential zones for rainwater harvesting interventions for sustainable intensification in the semi - arid tropics. *Scientific Reports*, 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07847-4>
- Gassman, P. W., Sadeghi, A. M., & Srinivasan, R. (2014). Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. *Journal of Environmental Quality*, 43(1), 1–8. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.11.0466>
- Halake, R., Wang, K., Onodera, S., & Saito, M. (2025). Long-term effects of forest growth dynamics and climate change on groundwater recharge and evapotranspiration in a steep catchment of western Japan. *Ecological Indicators*, 177(May), 113652. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113652>
- Han, G., & Xu, Z. (2022). Watershed Water Environment and Hydrology under the Influence of Anthropogenic and Natural Processes. *Water (Switzerland)*, 14(7), 1–4. <https://doi.org/10.3390/w14071059>
- Indrapraja, L., Noerhayati, E., & Rachmawati, A. (2020). Kajian Karakteristik Fisik dan Hidrologi Daerah Aliran Sungai Konto Hulu Kecamatan Pujon, Kabupaten Malang. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 8(4), 252–269.
- Intara, Y. I., Nusantara, A. D., Supanjani, Caniago, Z., & Ekawita, R. (2018). Oil Palm Roots Architecture in Response to Soil Humidity. *International Journal of Oil Palm*, 1(2), 79–89.
- Janjic, J., & Tadić, L. (2023). Fields of Application of SWAT Hydrological Model—A Review. *Earth (Switzerland)*, 4(2), 331–344. <https://doi.org/10.3390/earth4020018>

Javadinejad, S. (2022). *1 Introduction 2 Concept and descriptions*. 3(1), 145–155. <https://doi.org/10.25082/REIE.2021.01.005>

Junaidi, E. (2015). Pemanfaatan Soil And Water Assessment Tool (SWAT) sebagai alat pengambil keputusan dalam pengelolaan Das (Studi kasus di DAS Cisadane). *Jurnal Teknik Hidraulik*, 6(2), 147–162. <https://jurnalth.pusair-pu.go.id/index.php/JTH/article/view/521>

Kadir, S. (2019). Karakteristik Daerah Aliran Sungai (DAS) Tabanio Untuk Merumuskan dan Mengevaluasi Dinamika Kerentanan Lingkungan. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1), 1–14. http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_Sistem_Pembetungan_Terpusat_Strategi_Melestari

Kadir, S., Badaruddin, S. H., & Indrayatie, E. R. (2020). *Pengelolaan Daerah-Aliran Sungai I R D H O* www.irdhcenter.com L. www.irdhcenter.com

Kang, M., & Cho, S. (2021). Progress in water and energy flux studies in asia: A review focused on eddy covariance measurements. *Journal of Agricultural Meteorology*, 77(1), 2–23. <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-20-00036>

Laka, B., Sideng, U., & Amal. (2017). Perubahan Penggunaan Lahan Di Kecamatan Sirimau Kota Ambon. *Jurnal Geocelebes*, 1(2), 43. <https://doi.org/10.20956/geocelebes.v1i2.2165>

Lion, M., Kosugi, Y., Takanashi, S., Noguchi, S., Itoh, M., Katsuyama, M., Matsuo, N., & Shamsuddin, S. A. (2017). Evapotranspiration and water source of a tropical rainforest in peninsular Malaysia. *Hydrological Processes*, 31(24), 4338–4353. <https://doi.org/10.1002/hyp.11360>

Litbang, P., & Alam, K. (2010). *Kabupaten Bogor (S patial Analysis of Erosion Danger Level at Cisadane Watershed Area Bogor District)** Oleh / By : Tutu Herawati I . *PENDAHULUAN Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) merupakan kegiatan memperbaiki , memelihara , dan melindungi keadaa.*

Liu, H., Yan, H., & Guan, M. (2025). Evaluating the effects of topography and land use change on hydrological signatures: a comparative study of two adjacent watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(8), 2109–2132. <https://doi.org/10.5194/hess-29-2109-2025>

Machado, R. E., Cardoso, T. O., & Mortene, M. H. (2022). *International Soil and Water Conservation Research Determination of runoff coefficient (C) in catchments based on analysis of precipitation and flow events. 10.* <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.09.001>

Malau, J. H. F. (2024). *Komparasi dinamika evapotranspirasi pada kebun kelapa*

- sawit dan hutan sekunder di provinsi jambi johanes halomoan freshly malau.*
- Miskewitz, R. (2012). *Soil Water Assessment Tool (SWAT)*. Texas Water Resources Institute.
- Nang, Y. W., Onodera, S. I., Wang, K., Shimizu, Y., & Saito, M. (2024). Slope Gradient Effects on Sediment Yield of Different Land Cover and Soil Types. *Water (Switzerland)*, 16(10). <https://doi.org/10.3390/w16101419>
- Nathania, J., Subiyanto, S., & Suprayogi, A. (2017). Analisis Perubahan Lahan Dan Zona Nilai Tanah Di Kecamatan Ungaran Timur Akibat Pembangunan Jalan Tol Semarang - Solo (Tahun 2008-2017). *Jurnal Geodesi Undip*, 6, 433–442.
- Natnael, S., Habte, L., & Waleed, M. (2025). Land use dynamics and their impact on hydrology and water quality of a river catchment: a comprehensive analysis and future scenario. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(7), 4124–4136. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-35946-y>
- Oliveira, R., E., P. W. M., Salomão, G. N., Tavares, A. L., Santos, J. F. dos, Santos, D. C., Dias, L. C., Silva, M. S. da, Melo, A. M. Q. de, Costa, C. E. A. de S., & Rocha, E. J. P. da. (2021). Response of Water Balance Components to Changes in Soil Use and Vegetation Cover Over Three Decades in the Eastern Amazon. *Frontiers in Water*, 3(October), 1–15. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.749507>
- Permatasari, R. (2017). *Pengaruh Perubahan Penggunaan Lahan terhadap Rezim Hidrologi DAS (Studi Kasus : DAS Komering)*. 24(1), 91–98. <https://doi.org/10.5614/jts.2017.24.1.11>
- R.P Santun Sitorus. (2017). Perencanaan Penggunaan Lahan. *IPB Press, Bogor, Indonesia*.
- Raco, B., Wicaksono, A., & Triweko, R. W. (2022). Tingkat Bahaya Erosi Akibat Perubahan Tutupan Lahan Pada Daerah Tangkapan Air Danau Tondano. *Jurnal Teknik Sipil*, 11(1), 63–76.
- Ramadhan, M. F. (2021). Analisis Perkiraan Sedimentasi dan Fungsi Hidrologi DAS Ngrancah, Kulonprogo Menggunakan Permodelan SWAT. *Jurnal Paradigma: Jurnal Multidisipliner Mahasiswa Pascasarjana Indonesia*, 1(2), 18–27.
- Rehman, O. U., Rashid, M., Kausar, R., Alvi, S., & Hussain, R. (2015). Slope Gradient and Vegetation Cover Effects on The Runoff and Sediment Yield in Hillslope Agriculture. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 3(6), 478. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v3i6.478-483.292>
- Robin, K., Salgado, M. J. H., Ramgraber, M., Moeck, C., & Schirmer, M. (2021).

Estimating surface runoff and groundwater recharge in an urban catchment using a water balance approach. 2411–2428.

Sakti, N.A., Suprayogi, S. (2018). Aplikasi Model Soil And Water Assesment Tool (Swat) Untuk Mengkaji Debit Harian Dan Limpasan Permukaan (Kasus: Sub DAS Wakung, Pemalang, Jawa Tengah). *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 10, 1–9.

Scott, D. F., Bruijnzeel, L. A., & Mackensen, J. (2005). The hydrological and soil impacts of forestation in the tropics. In *Forests, Water and People in the Humid Tropics: Past, Present and Future Hydrological Research for Integrated Land and Water Management* (Issue September). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535666.032>

Seran, S. S. L. (2022). Analisis Erosi Pada Das Noelmina Menggunakan Metode Usle. *Eternitas: Jurnal Teknik Sipil*, 2(1), 33–39. <https://doi.org/10.30822/eternitas.v2i1.1716>

Setyanugraha, T., Romdania, Y., Herison, A., & Zakaria, A. (2023). Pemetaan Kemiringan Lereng Menggunakan Software Geographic Information System Pada Sub DAS Way Pubian. *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Desain*, 11(2), 351–362. <https://doi.org/10.23960/jrssd.v11i2.3274>

Staddal, I. (2016). Analisis Aliran Permukaan Menggunakan Model SWAT di DAS Bila Sulawesi Selatan. *Jurnal Technopreneur (JTech)*, 4(1), 57–63.

Sulistiyanto. (2021). Sistem Informasi GEOGRAFIS TEORI dan PRAKTEK dengan Quantum GIS. In *Ahlimedia Press* (pp. 1–186). http://www.joi.isoss.net/PDFs/Vol-7-no-2-2021/03_J_ISOSS_7_2.pdf

Sun, C., Hou, H., & Chen, W. (2021). Effects of vegetation cover and slope on soil erosion in the Eastern Chinese Loess Plateau under different rainfall regimes. *PeerJ*, 9. <https://doi.org/10.7717/peerj.11226>

Tarigan, S., Stiegler, C., Wiegand, K., Knohl, A., & Murtilaksono, K. (2020). Relative contribution of evapotranspiration and soil compaction to the fluctuation of catchment discharge: case study from a plantation landscape. *Hydrological Sciences Journal*, 65(7), 1239–1248. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1739287>

Ulltyta, A., Tarigan, S. D., & Wahjunie, E. D. (2022). Infiltrasi dan Aliran Permukaan pada Agroforestri dan Kelapa Sawit. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 27(3), 359–366. <https://doi.org/10.18343/jipi.27.3.359>

Wardana, K. P. W., Subiyanto, S., & Hani'ah. (2019). Analisis Tinggi Tanaman Padi Menggunakan Model 3D Hasil Pemotretan Uav Dengan Pengukuran Lapangan. *Jurnal Geodesi Undip*, 8(1), 378–387.

Ware, H. H., Chang, S. W., Lee, J. E., & Chung, I. M. (2024). Assessment of Hydrological Responses to Land Use and Land Cover Changes in Forest-Dominated Watershed Using SWAT Model. *Water (Switzerland)*, 16(4). <https://doi.org/10.3390/w16040528>

Yana, J. N., Kusumastuti, D. I., & Winarno, D. J. (2020). *Analisis Metode Aliran Permukaan Langsung (Direct Runoff) Sungai Way Besai Menggunakan Software HEC-HMS*. 8(4), 649–658.