

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Perkembangan pembangunan serta pertumbuhan penduduk yang pesat telah memberikan tekanan signifikan terhadap keseimbangan sumber daya alam, khususnya terhadap penggunaan lahan. Peningkatan jumlah penduduk secara langsung meningkatkan kebutuhan terhadap lahan untuk berbagai keperluan seperti permukiman, pertanian, dan infrastruktur (Pratiwi & YUSDIANA, 2022). Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, lahan dimanfaatkan secara intensif, yang berujung pada perubahan penggunaan dan tutupan lahan (Monsaputra, 2023).

Perubahan penggunaan lahan merupakan fenomena global yang terjadi hampir di seluruh dunia (Chemura et al., 2020). Namun, dalam praktiknya, perubahan ini sering tidak mempertimbangkan kesesuaian antara fungsi lahan dan kondisi lingkungan, yang pada akhirnya mengakibatkan kerusakan sumber daya alam, khususnya di wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS). Kerusakan ini berdampak luas terhadap kelestarian sumber daya air (Raharjo, 2009).

Salah satu bentuk kerusakan tersebut adalah terganggunya siklus hidrologi akibat alih fungsi lahan yang tidak terarah. Hal ini berdampak tidak hanya secara fisik, tetapi juga terhadap aspek ekonomi dan sosial di wilayah hulu maupun hilir DAS (Ahmad Tamrin, 2017). Contoh nyata fenomena ini dapat dilihat pada DAS Birr di Ethiopia dan DAS Zuli di China, yang menunjukkan peningkatan limpasan permukaan akibat urbanisasi dan ekspansi kawasan hutan (Malede et al., 2022)

Kondisi serupa juga terjadi di Indonesia, khususnya di Sulawesi Selatan. Selama periode 1990 sampai 2020, DAS Maros mengalami penurunan luas hutan sebesar 1.057,90 hektar, yang diakibatkan oleh perubahan lahan menjadi semak belukar, permukiman, sabana, badan air, kebun campur, dan persawahan, dengan alih fungsi menjadi kawasan permukiman sebagai perubahan dominan (Badwi et al., 2023)

Sub DAS Tanralili, yang merupakan bagian dari DAS Maros dengan luas 26.343,4 hektar, juga menunjukkan tren perubahan penggunaan lahan yang terus berlangsung hingga tahun 2020. Perubahan ini berdampak pada penurunan aliran dasar (base flow) akibat berkurangnya luas hutan lahan kering sekunder dan pertanian lahan kering bercampur semak (Surahman et al., 2017).

Penggunaan lahan dan kondisi hidrologi saling terkait erat, mengingat setiap jenis penggunaan lahan memiliki karakteristik daya serap air tanah yang berbeda (Atharinafi & Wijaya, 2021; Strajhar et al., 2016; Sudinda, 2021). Perubahan penggunaan lahan yang mengurangi kemampuan tanah dalam menyerap air mengakibatkan peningkatan aliran permukaan, yang pada akhirnya meningkatkan debit puncak sungai. Penelitian (Nurhidayat, 2021) menunjukkan bahwa debit

puncak di Sub DAS Tanralili meningkat dari 28,64 m<sup>3</sup>/detik pada tahun 2000 menjadi 35,60 m<sup>3</sup>/detik pada tahun 2020.

Peningkatan aliran permukaan ini mengakibatkan air hujan yang seharusnya meresap menjadi limpasan permukaan, yang kemudian mengalir ke sungai dan danau, sehingga mengganggu keseimbangan hidrologi dan kualitas lingkungan (Badaruddin et al., 2021). Ketika daya tampung dan daya dukung lingkungan melampaui kapasitasnya, ketersediaan air bersih pun terganggu (Fausy et al., 2022).

Sub DAS Tanralili merupakan sumber penting pasokan air bersih untuk kebutuhan air minum di Kota Makassar bagian Timur dan Utara, serta untuk pengembangan sektor pertanian dan perikanan di wilayah hulu, tengah, dan hilir. Selain itu, Sub DAS ini juga mengalami berbagai permasalahan hidrologis, seperti erosi, sedimentasi, banjir, dan kekeringan, yang berdampak pada degradasi infrastruktur publik, termasuk Bendung PDAM Lekopancing (Surahman et al., 2017).

Permasalahan-permasalahan ini mengindikasikan adanya ketidakseimbangan tata air akibat perubahan penggunaan lahan yang tidak terkendali. Jika tren ini terus berlanjut, maka akan muncul ancaman serius terhadap keseimbangan sumber daya air di masa depan. Oleh karena itu, diperlukan upaya sistematis untuk memahami dinamika perubahan penggunaan lahan serta dampaknya terhadap neraca air.

Upaya ini dapat dilakukan melalui analisis spasial penggunaan lahan secara detail, prediksi perubahan di masa depan, serta penyusunan rekomendasi arahan. Perubahan Penutupan lahan sebagai masukan dalam model juga mempengaruhi Erosi. Perubahan Penutupan lahan di Sub DAS Tanralili yang dianalisis adalah yang paling berpengaruh signifikan terhadap erosi. Penentuan arahan model pengelolaan didasarkan pada fungsi kawasan yang ada di wilayah DAS. Untuk itu, penelitian ini akan menggunakan pendekatan jaringan saraf tiruan (Artificial Neural Network) dengan perangkat lunak Idrisi Terrset melalui instrumen Land Change Modeler untuk menganalisis perubahan penggunaan lahan. Selanjutnya, perhitungan nilai neraca air Sub DAS Tanralili dilakukan menggunakan Soil Water Assessment Tools (SWAT). Arahan internalisasi pada Sub DAS Tanralili dengan melakukan Kajian dampak (Impact Assesment) Erosi untuk mendapat peta Impact Assesment Erosi. Kemudian, mempertimbangkan klasifikasi tingkat erosi sebagai acuan untuk menentukan arahan konservasi yang tepat agar dapat mengurangi terjadinya erosi dan sebagai bahan rekomendasi perencanaan pengelolaan DAS terbaik.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam mendukung perencanaan, pengelolaan, dan pengambilan keputusan berbasis data spasial untuk menjaga keseimbangan sumber daya air dan konservasi tanah Sub DAS Tanralili.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah penelitian adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana dinamika perubahan penggunaan lahan dalam periode waktu tertentu (2018, 2023, 2028, dan 2033) dan skenario pembatasan perubahan penggunaan di Sub DAS Tanralili berbasis pola ruang.

2. Bagaimana implikasi perubahan penggunaan lahan terhadap respon hidrologi dan tingkat erosi serta arahan konservasi tanah untuk menjaga keberlanjutan Sub DAS Tanralili?

### **1.3. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan latar belakang dan perumusan masalah maka tujuan penelitian ini, yaitu:

1. Mengetahui dinamika perubahan penggunaan lahan Tahun 2018 dan 2023, prediksi perubahan penggunaan lahan tahun 2028 dan 2033 serta menentukan skenario pembatasan perubahan penggunaan lahan dengan instrument pola ruang di Sub DAS Tanralili
2. Mengetahui implikasi perubahan penggunaan lahan terhadap respon hidrologi dan erosi menyusun arahan konservasi tanah berdasarkan tingkat erosi di Sub DAS Tanralili.

### **1.4. Manfaat Penelitian**

1. Manfaat Akademis, memberikan kontribusi ilmiah dalam bidang pengelolaan sumber daya alam, khususnya terkait dengan dinamika penggunaan lahan dan respon hidrologi serta tingkat erosi pada Daerah Aliran Sungai.
2. Manfaat Praktis, menjadi dasar perencanaan tata guna lahan yang lebih berkelanjutan untuk pengelolaan sumber daya air di Sub DAS Tanralili.
3. Manfaat Kebijakan, memberikan rekomendasi berbasis data kepada pemerintah daerah dan pihak terkait untuk mendukung upaya konservasi tanah dan pengendalian perubahan penggunaan lahan.

### **1.5. Kerangka Pikir Penelitian**

Perubahan penggunaan lahan akibat pertumbuhan penduduk dan pembangunan membawa dampak signifikan terhadap respon hidrologi di Daerah Aliran Sungai (DAS). Dinamika ini menyebabkan berkurangnya kemampuan lahan dalam menyerap air, meningkatkan aliran permukaan, mengubah debit puncak sungai, serta mengganggu ketersediaan air.

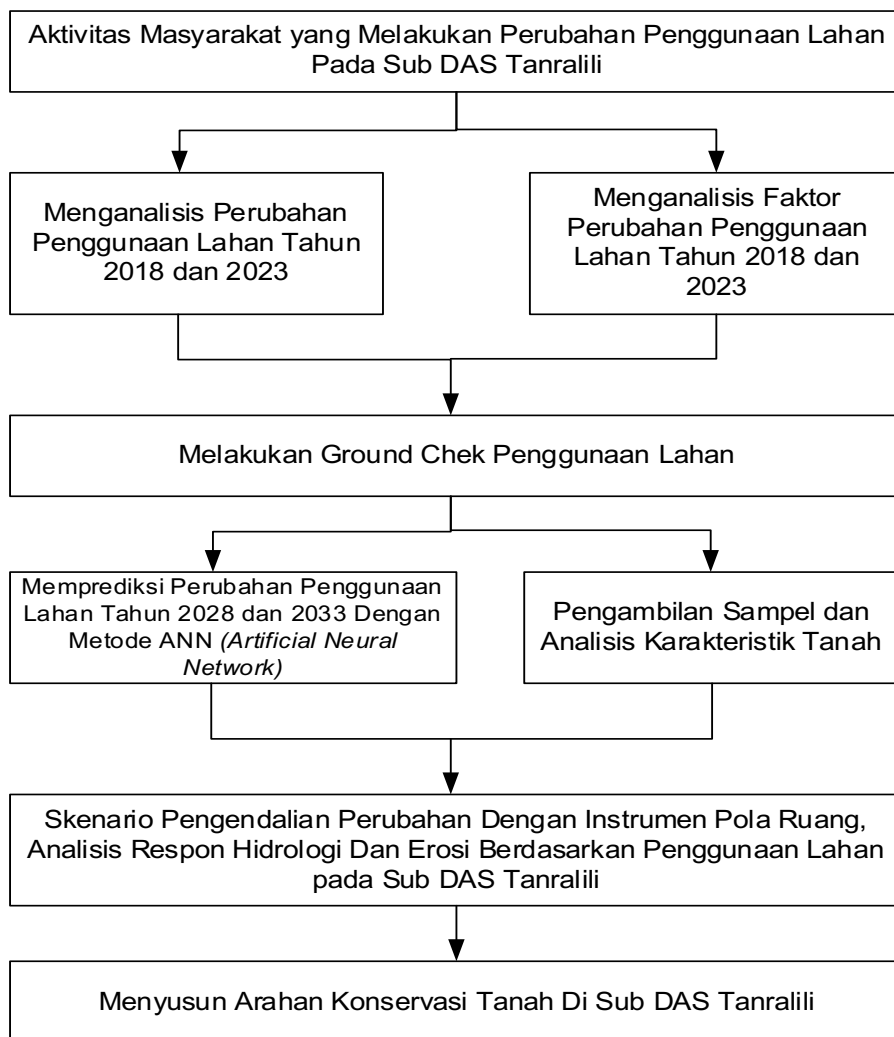
Sub DAS Tanralili, yang merupakan bagian dari DAS Maros dan berfungsi sebagai sumber utama air bersih bagi Kota Makassar serta sektor pertanian dan perikanan, mengalami perubahan penggunaan lahan yang terus berlangsung hingga saat ini. Tren ini meningkatkan ancaman terhadap ketidakseimbangan tata air, yang ditandai dengan meningkatnya erosi, sedimentasi, banjir, dan kekeringan.

Oleh karena itu, diperlukan analisis spasial yang mendalam terhadap perubahan penggunaan lahan serta prediksi dampaknya terhadap keseimbangan air di masa mendatang. Model prediksi berbasis Artificial Neural Network (ANN) melalui Land Change Modeler pada Idrisi TerrSet akan digunakan untuk memetakan dinamika perubahan penggunaan lahan hingga tahun 2033.

Selanjutnya, respon hidrologi dan tingkat erosi akan dihitung menggunakan model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) untuk mengetahui distribusi

hidrologi akibat alih fungsi lahan. Berdasarkan hasil tersebut, akan disusun skenario pengendalian perubahan penggunaan lahan serta rekomendasi arahan konservasi tanah untuk menjaga keberlanjutan distribusi hidrologi di Sub DAS Tanralili.

Dengan demikian, kerangka pikir penelitian ini berupaya mengintegrasikan dinamika perubahan penggunaan lahan, respon hidrologi dan tingkat erosi serta skenario pengendalian perubahan penggunaan lahan dan rekomendasi arahan konservasi tanah.

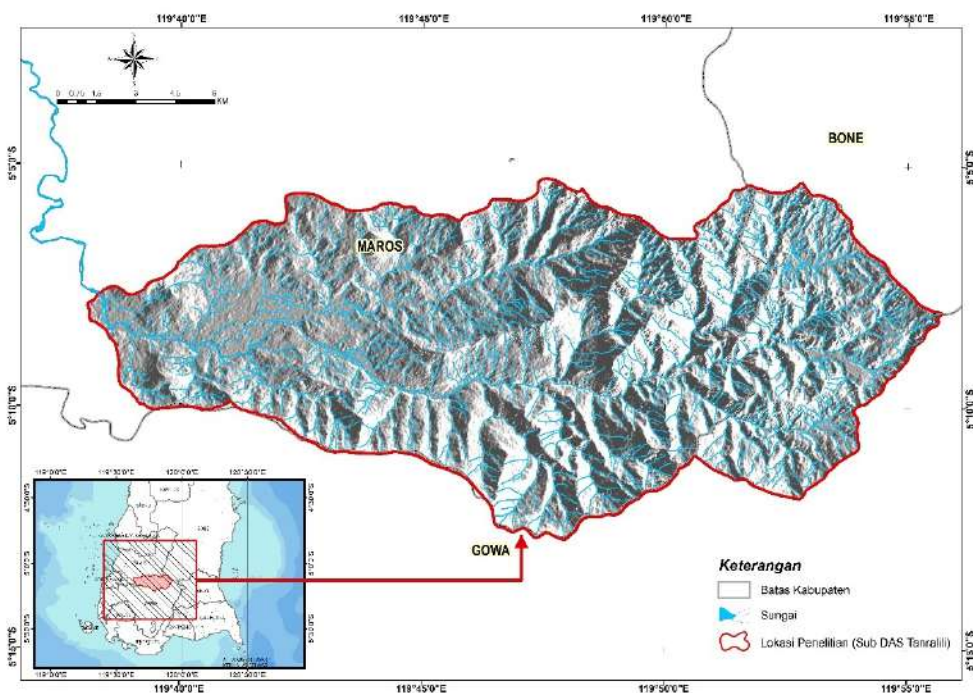


Gambar 1. Kerangka Pikir Penelitian

## BAB II METODE PENELITIAN

### 2.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Sub DAS Tanralili, yang terletak di Provinsi Sulawesi Selatan dan merupakan bagian dari DAS Maros. Secara geografis, wilayah ini berada pada koordinat 5°0' hingga 5°12' Lintang Selatan dan 119°34' hingga 119°56' Bujur Timur, dengan luas wilayah sekitar 27.838,90 hektar.



Gambar 2. Peta Lokasi Penelitian

### 2.2. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah: 1). Perangkat keras (hardware) berupa laptop dan printer; 2). Perangkat lunak (software) berupa ArcMAP 10.8; TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System 3). Alat survei berupa Global Positioning System (GPS), bor tanah, ring sampel, alat tulis dan kamera digital.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi, Citra Sentinel 2 tahun 2018 dan 2023, peta Sub DAS Tanralili dan peta kerja.

### 2.3. Jenis dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan dua jenis data, yaitu data sekunder dan data primer. Data sekunder mencakup data spasial seperti peta administrasi Kabupaten Maros dan Gowa, serta peta Sub DAS Tanralili, disertai dengan kajian pustaka dari berbagai hasil penelitian relevan. Sementara itu, data primer diperoleh melalui kegiatan survei dan observasi langsung di lapangan serta data hasil uji laboratorium.

Tabel 1 Tujuan, Jenis data, metode analisis data serta output yang dihasilkan berdasarkan tujuan penelitian

Tujuan	Jenis Data	Metode Analisis Data	Output
Mengetahui dinamika perubahan penggunaan lahan Tahun 2018 dan 2023, prediksi perubahan penggunaan lahan tahun 2028 dan 2033 serta menentukan skenario pembatasan perubahan penggunaan lahan dengan instrument pola ruang di Sub DAS Tanralili	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Citra Sentinel 2 penggunaan lahan tahun 2018 dan 2023, hasil interpretasi citra satelit Sentinel 2</li> <li>2. Peta jenis tanah, peta kemiringan lereng, kepadatan penduduk tahun 2023, Jarak dari pemukiman, Jarak dari jalan dan Jarak dari ibukota kecamatan, peta pola ruang RTRW Provinsi Sulawesi Selatan.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Interpretasi visual (<i>Digitazion on screen</i>), matriks transisi</li> <li>2. <i>Land Change Modeler</i> (LCM)</li> <li>3. Analisis jaringan saraf tiruan (<i>Artificial Neural Network</i>)</li> <li>4. Analisis Spasial dan Deskriptif</li> </ol>	Penggunaan lahan, perubahan penggunaan lahan dan faktor penentu perubahan penggunaan lahan Tahun 2018 dan 2023 serta prediksi perubahan penggunaan lahan Tahun 2028 dan 2033. Skenario pembatasan perubahan penggunaan lahan dengan pembatasan area perubahan
Mengetahui implikasi perubahan penggunaan lahan terhadap respon hidrologi dan erosi menyusun arahan konservasi tanah berdasarkan tingkat erosi di Sub DAS Tanralili	Data sebaran penggunaan lahan eksisting, data karakteristik tanah, data iklim (curah hujan, temperatur, kelembaban, radiasi, suhu)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Soil Water Assesment Tools (SWAT)</li> <li>2. Analisis Spasial dan Deskriptif</li> </ol>	Implikasi perubahan penggunaan lahan terhadap respon hidrologi dan tingkat erosi. Arahan konservasi tanah

## 2.4. Prosedur Penelitian

### 2.4.1. Analisis Penggunaan dan Perubahan Penggunaan Lahan

Klasifikasi penggunaan lahan di Sub DAS Tanralili dilakukan melalui interpretasi visual (on-screen digitizing) citra satelit Sentinel-2, dengan mempertimbangkan unsur rona (tone), ukuran, warna, tekstur, pola, bentuk, bayangan, asosiasi, dan situs (Lillesand dan Kiefer, 1997). Interpretasi ini menghasilkan peta penggunaan lahan untuk tahun 2018 dan 2023. Validasi dilakukan melalui survei lapangan guna memastikan kesesuaian antara hasil klasifikasi citra dengan kondisi aktual, dengan titik pengamatan dipilih berdasarkan keterwakilan jenis penggunaan lahan dan lokasi yang diragukan. Tingkat akurasi hasil klasifikasi dihitung menggunakan matriks kesalahan (error matrix) untuk memperoleh nilai *Overall Accuracy* dan *Kappa Accuracy*.

Perhitungan *kappa accuracy*:

$$KA = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r x_{ii} + x + i}{N^2 \sum_{i=1}^r x_{ii} + x + i} \times 100\%$$

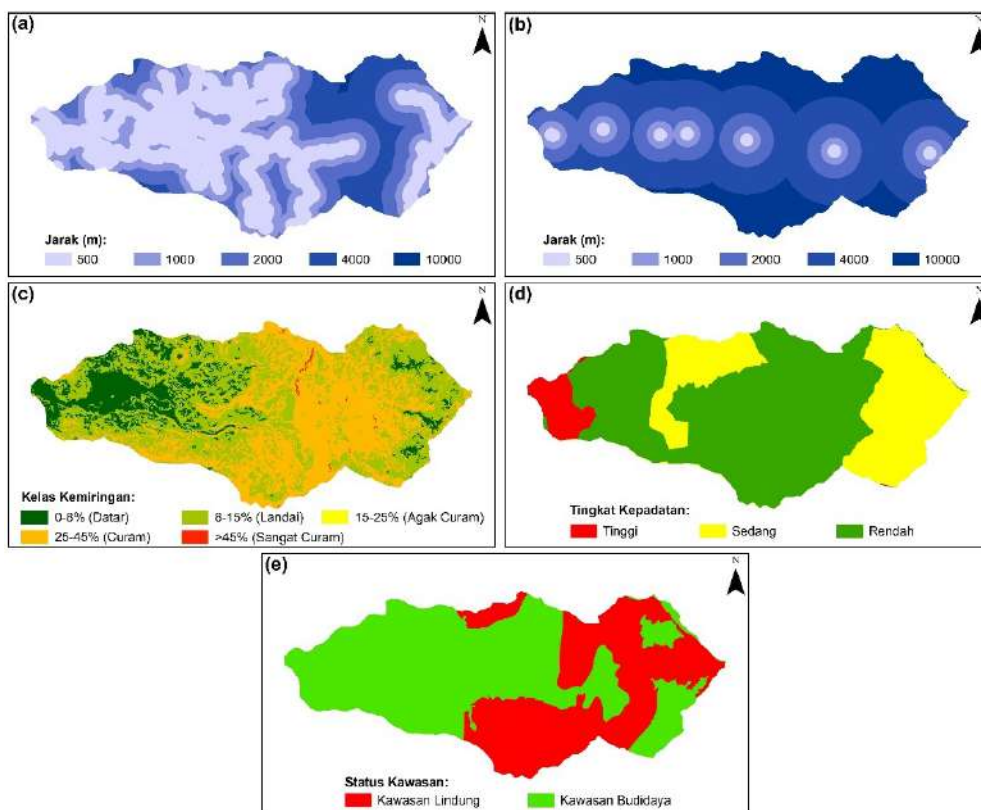
Selanjutnya, analisis spasial dilakukan terhadap kedua peta untuk memperoleh informasi konversi penggunaan lahan, yang disajikan dalam bentuk matriks transisi perubahan penggunaan lahan.

### 2.4.2. Prediksi Perubahan Penggunaan Lahan

Analisis prediksi perubahan penggunaan lahan dalam penelitian ini dilakukan menggunakan *Land Change Modeler* (LCM), yang diintegrasikan melalui perangkat lunak berbasis pengolahan citra digital dan Sistem Informasi Geografis (SIG) (Nofrizal & Purwaningsih, 2019). LCM merupakan bagian dari perangkat lunak *TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System* dan mencakup tiga tahapan utama: *change analysis*, *transition potential*, dan *change prediction*. Aplikasi *TerrSet* mengisyaratkan data berbentuk raster, sehingga data spasial yang awalnya berformat data vektor perlu dikonversi terlebih dahulu menjadi data raster dengan format .img (*Imagine*), lalu ditransformasi kembali ke format .rst (*ArcRaster*) agar kompatibel dengan model (Munawir, 2018). Resolusi spasial yang digunakan untuk masing-masing data spasial diseragamkan sebesar 100 x 100 meter.

Tahap pertama adalah penentuan sub-model transisi (*transition sub-model*), yang mengidentifikasi berbagai jenis perubahan penggunaan lahan. Sub-model ini dapat dikelompokkan berdasarkan kesamaan faktor penentu. Tahap selanjutnya adalah tahap *test and selection driving factor* atau pengujian dan seleksi faktor-faktor pendorong perubahan lahan. Adapun faktor pendorong perubahan yang digunakan meliputi kemiringan lereng, kepadatan penduduk tahun 2023, jarak terhadap jalan dan pusat Desa. Selain itu, pertimbangan juga diberikan terhadap faktor kebijakan dari Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Provinsi Sulawesi Selatan.

Klasifikasi lereng di Sub DAS Tanralili dibagi menjadi empat kelas: 0-2%, 2-5%, 5-15% dan 15-40%. Faktor jarak seperti kedekatan dengan jalan dan pusat Desa dibagi menjadi lima interval: 0-500 m, 500-1.000 m, 1.000-2.000 m, 2.000-4.000 m, dan 10.000 m, menggunakan metode pengukuran *Euclidean Distance*. Adapun kebijakan tata ruang dari RTRW Provinsi Sulawesi Selatan diklasifikasikan ke dalam dua kelas: Kawasan lindung dan kawasan budidaya. Distribusi spasial faktor-faktor yang digunakan dalam model disajikan pada Gambar 3.

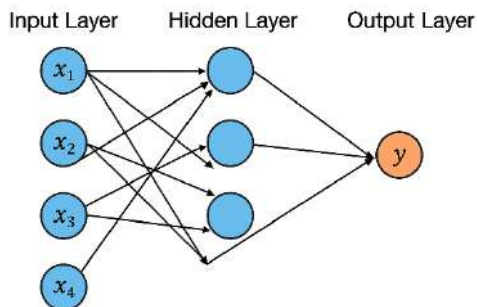


Gambar 3. Faktor-Faktor Pendorong yang Digunakan dalam Model Prediksi, (a). Jarak dari Jalan, (b). Jarak dari Pusat Desa, (c). Kemiringan Lereng, (d). Kepadatan Penduduk, (e). Pola Ruang RTRW Provinsi Sulawesi Selatan.

Pemilihan faktor kebijakan yang masih dalam tahap perencanaan didasarkan pada kemungkinan besar telah terealisasinya faktor tersebut pada periode prediksi. Setiap faktor diuji menggunakan nilai *Cramer's V*, dengan nilai mendekati 1 menunjukkan kontribusi signifikan terhadap model, sedangkan faktor dengan nilai rendah dieliminasi dari model.

Model prediksi yang digunakan adalah *Artificial Neural Network (ANN)*, yang beroperasi dalam struktur jaringan *Multi-Layer Perceptron (MLP)* dengan algoritma *Backpropagation*. Model Jaringan syaraf tiruan (*Artificial Neural Network/ANN*) merupakan unit-unit pemrosesan yang memiliki jaringan saling terhubung satu sama

lain dan dimodelkan berdasarkan sifat paling dasar dari neuron pada otak manusia. Model ANN bersifat *non-linear* dan dapat dianggap sebagai fungsi matematika yang kompleks yang mengubah data masukan (histori perubahan dan variabel pendorong) menjadi keluaran yang diinginkan (potensi transisi perubahan). Jaringan ini terdiri dari lapisan input, satu atau lebih lapisan tersembunyi, dan satu lapisan output, menyerupai struktur kerja neuron dalam sistem saraf manusia. Setiap lapisan berisi node atau neuron dan dihubungkan oleh garis-garis dengan warna berbeda yang menunjukkan bobot koneksi yang tidak sama (Gambar 4).



Gambar 4. Arsitektur Jaringan *Multilayer Perceptron* dalam Model ANN

Model ANN melibatkan dua kelas training sites: (1) satu kelas piksel yang berubah secara aktual, dan (2) satu kelas yang memiliki syarat untuk berubah namun tidak pada kenyataannya. Masing-masing piksel dari kedua kelas tersebut akan di-training dan testing dengan bobot yang nilainya telah ditentukan secara acak. Ketika model dijalankan, piksel yang telah ditentukan secara acak tersebut akan melalui tahap pembelajaran dan pengujian oleh jaringan. Output yang dihasilkan dari model ini adalah peta peluang konversi (*potential transition map*) yang memiliki nilai peluang antara 0 hingga 1, dimana semakin mendekati 1 maka daerah tersebut memiliki peluang yang tinggi untuk berubah menjadi penggunaan lahan lain. Peta potensi transisi (*potential transition map*) merujuk pada probabilitas suatu jenis penggunaan lahan untuk berubah menjadi jenis penggunaan lain dalam periode waktu tertentu (Munawir, 2018).

Tahap akhir adalah melakukan prediksi penggunaan lahan di Sub DAS Tanralili pada tahun 2033 menggunakan *model change prediction* dengan metode Markov. Prediksi ini mengacu pada pola perubahan selama periode 2018-2023, dengan asumsi bahwa tren perubahan lahan di masa lalu akan cenderung berulang pada periode yang akan datang (Dani et al., 2017).

#### 2.4.3. Skenario Pengendalian Perubahan Penggunaan Lahan di Sub DAS Tanralili

Penyusunan skenario pengendalian perubahan penggunaan lahan dalam penelitian ini yaitu suatu upaya pengendalian laju perubahan penggunaan lahan pada tahun prediksi yang dianalisis, guna mengurangi dampak negatif yang

dihasilkan serta menciptakan arah pertumbuhan lahan yang lebih terkendali sesuai peruntukan fungsionalnya. Pengendalian laju perubahan penggunaan lahan tersebut dilakukan berdasarkan skenario pengendalian laju perubahan melalui intervensi kebijakan pola Ruang RTRW Provinsi Sulawesi Selatan Periode Tahun 2022-2044.

Skenario Pembatasan Area Perubahan (SPAP) dilakukan dengan mengintegrasikan faktor penghambat (*constraint*) pada saat proses prediksi menggunakan model ANN. Faktor penghambat tersebut digunakan untuk mempengaruhi seberapa besar kemungkinan suatu area akan mengalami perubahan di masa depan. Nilai 0 (kendala mutlak) mewakili area yang dibatasi untuk berubah (Kawasan Lindung dalam pola ruang RTRW Provinsi Sulawesi Selatan Periode Tahun 2022-2044), sementara nilai 1 (netral) merupakan area tanpa intervensi atau potensi perubahannya hanya bergantung pada model dasar.

Saat model dijalankan, potensi perubahan yang dihitung model dikalikan dengan nilai dari peta ini. Sehingga, meskipun suatu areal memiliki potensi tinggi untuk berubah, jika nilainya di peta hanya 0.5, maka potensi aktualnya berkurang setengah.

Skenario pengendalian perubahan penggunaan lahan dilakukan terhadap hasil prediksi perubahan penggunaan lahan tahun 2028 dan 2033, dengan tujuan mempertahankan dan atau meningkatkan jenis penggunaan lahan yang memiliki fungsi dalam menjaga kestabilan hidrologi dan menjaga tingkat erosi di Sub DAS Tanralili.

#### 2.4.4. Analisis Respon Hidrologi

Tahap pertama adalah mengumpulkan data primer dan sekunder. Tahap kedua adalah menganalisis sampel tanah untuk input ke model SWAT. Tahap ketiga adalah menjalankan model SWAT, yang dibagi menjadi beberapa tahapan tersendiri, yaitu: (1) deliniasi DAS; (2) analisis Hydrology Response Unit (HRU); (3) input data iklim; (4) membangun data iklim; (5) menjalankan model; (6) kalibrasi dan validasi dan (7) simulasi parameter hidrologi.

Analisis yang dapat dilakukan untuk menggambarkan kondisi hidrologi DAS adalah dengan mengandaikan proses transformasi yang terjadi mengikuti suatu aturan tertentu dimana harus dapat menggambarkan kondisi biofisik DAS dalam proses transformasi yang disusun dalam sebuah model hidrologi (Harto, 2000). Siklus hidrologi sebagaimana yang disimulasikan oleh SWAT didasarkan pada persamaan keseimbangan air (Neitsch, dkk. 2012).

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

Keterangan : SW<sub>t</sub> = Kadar air tanah akhir (mm H<sub>2</sub>O)  
 SW<sub>0</sub> = Kadar air tanah awal pada hari ke-i (mm H<sub>2</sub>O)  
 t = Waktu (hari)  
 R<sub>day</sub> = Jumlah hujan pada hari ke-i (mm H<sub>2</sub>O),  
 Q<sub>surf</sub> = Jumlah aliran permukaan pada hari ke-i (mm H<sub>2</sub>O)

- Ea = Evapotranspirasi pada hari ke-1 (mm H<sub>2</sub>O)  
 Wseep = jumlah air yang masuk zona vadose dari profil tanah (seepage) pada hari ke-i (mm H<sub>2</sub>O)  
 Qgw = aliran air bawah tanah (baseflow/groundwaterflow/returnflow) pada hari ke-i (mm H<sub>2</sub>O).

Dalam permodelan Soil and water Asesment Tools (SWAT) Tahapan kegiatan analisis yang dilakukan adalah sebagai berikut:

### 1. Delineasi Batas Sub DAS

Pembuatan deliniasi DAS melalui beberapa tahapan yang dilakukan yaitu pemasukan data DEM yang telah dibuat sebelumnya, penentuan jaringan sungai (stream defenition), pembuatan outlet (outlet definition), seleksi dan penentuan outlet DAS (Watershede outlet selection and defenition), dan penghitungan parameter Sub DAS (calculate Sub-basin parameter).

### 2. Klasifikasi Penamaan Penggunaan Lahan

Klasifikasi penggunaan lahan di Sub DAS Tanralili yang telah dilakukan melalui interpretasi visual (on-screen digitizing) citra satelit Sentinel-2, dengan mempertimbangkan unsur rona (tone), ukuran, warna, tekstur, pola, bentuk, bayangan, asosiasi, dan situs (Lillesand dan Kiefer, 1997). Interpretasi ini menghasilkan peta penggunaan lahan.

Tabel 2 Klasifikasi Penamaan Penggunaan Lahan untuk Model SWAT

No.	Penggunaan Lahan	SWAT Landuse	Kode SWAT
1	Hutan	Forest	FRST
2	Lahan Terbangun	Residential	URBN
3	Pertanian Lahan Kering	Agricultural Land-Generic	AGRL
4	Pertanian Lahan Basah	Rice	RICE
5	Semak/Belukar	Range-Brush	LBLS
6	Tubuh Air	Water	WATR

### 3. Klasifikasi Jenis Tanah

Data jenis tanah diperoleh dari data sistem lahan (landsystem) Regional Physical Planning Programme for Transmigration (RePPPProt) Badan Kordinasi Survey dan Pemetaan Nasional Tahun 1987. Kebutuhan input data tanah dalam model SWAT adalah data tanah berupa jenis tanah (Chairuddin Zulkarnain, 2023) serta parameter fisik dan kimia tanah. Sehingga untuk memenuhi kebutuhan input parameter SWAT dilakukan analisis untuk memperoleh input parameter data tanah. Analisis pendekatan yang digunakan adalah dengan mengekstraksi informasi tanah dari peta RePPPProt yang dikombinasikan dengan informasi dari Web Soil USDA Natural Resource Conservation Service. (Neitsch et al., 2012).

#### 4. Penyiapan Data Iklim

Data iklim yang dibutuhkan berupa data (curah hujan, temperatur, radiasi matahari, kelembaban udara, dan kecepatan angin) data curah hujan diperoleh dari satelit CHIRPS (*Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations*), data temperature, kecepatan angin, kelembaban udara dan radiasi matahari di peroleh dari Satelit MERRA-II NASA yang dapat diakses melalui website <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. Data iklim yang merupakan perhitungan harian mulai Tahun 2014-2023.

#### 5. Pembentukan HRU (*Hydrological Response Unit*)

Hydrological Response Unit atau disingkat HRU merupakan unit terkecil dalam skala analisis yang dilakukan pada pemodelan SWAT. Pembentukan HRU dilakukan dengan overlay peta penutupan lahan, peta jenis tanah, dan data kemiringan lereng. Setiap HRU yang terbentuk berisi informasi spesifik mengenai lahan tersebut yang mencakup penutupan lahan, jenis tanah, dan kemiringan lereng. Data penutupan lahan dan jenis tanah yang digunakan dalam analisis HRU berformat raster ESRI sedangkan klasifikasi kelas lereng berasal dari dataset DEM yang digunakan untuk mendelineasi batas DAS.

#### 6. Simulasi Model Soil and Water Assesment Tool

Data input yang disiapkan pada tahap pengumpulan data dimasukkan ke dalam file data input (SWAT Input File). Ada 17 file data input yang terkait dengan analisis hidrologi. File PCP, TMP, SLR, HMD, dan SOL disiapkan dengan memasukkan data iklim dan tanah ke dalam parameter masing-masing file. Sedangkan FIG, CIO, COD, BSN, SUB, HRU, MGT, GW, dan RTE file terbentuk setelah prosedur analisis dilakukan. Data tutupan lahan dan data pemukiman menggunakan data yang telah disediakan oleh SWAT dalam file CROP dan URBAN. Data iklim berupa data harian meliputi curah hujan (mm), suhu maksimum dan minimum (°C), radiasi matahari (MJ/m<sup>2</sup>/hari), kecepatan angin, dan kelembaban udara (%) disusun dalam PCP, TMP, SLR file. HMD dan WGN. Penyusunan data iklim terkait dengan metode penghitungan evapotranspirasi yang digunakan (Yang et al., 2008).

Simulasi model SWAT dilakukan setelah proses penggabungan HRU dengan data iklim selesai. Proses simulasi dijalankan berdasarkan periode bulanan. Model SWAT dapat dijalankan pada menu SWAT Simulation dengan syarat tahapan Watershed Delineation, HRU Analysis, dan Write Input Tables telah selesai dengan baik. Simulasi model SWAT menghasilkan output aliran permukaan (*Qsurf*) yang diprediksi menggunakan SCS curve number yang dimodifikasi (Neitsch et al., 2012):

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)_2}{(R_{day} - I_a) + S}$$

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Dimana : Qsurf = Jumlah aliran permukaan pada hari ke-i (mm)  
 Rday = Jumlah curah hujan pada hari ke-i (mm),  
 Ia = Kehilangan awal akibat simpanan permukaan, intersepsi dan infiltrasi (mm)  
 S = Parameter retensi (mm)  
 CN = Curve Number

Jumlah aliran lateral ( $Q_{lat}$ ) yang dilepaskan ke saluran utama berdasarkan simulasi SWAT dapat dilihat dengan persamaan (Neitsch et al., 2012) :

$$Q_{lat} = (Q_{lat} + Q_{latstor,i-1}) \left(1 - \exp \left[ \frac{-1}{TTlag} \right] \right)$$

Keterangan :  $Q_{lat}$  = Jumlah aliran lateral yang dialirkan ke saluran utama pada hari tertentu (mm H<sub>2</sub>O)  
 $Q_{lat}$  = Jumlah aliran lateral yang dihasilkan di sub-cekungan pada hari tertentu  
 $Q_{latstor, i-1}$  = Aliran lateral disimpan atau tertinggal dari hari sebelumnya (mm H<sub>2</sub>O)  
 TTlag = Waktu tempuh aliran lateral (hari)

Aliran air tanah ( $Q_{gw}$ ), atau aliran dasar, yang berkontribusi ke saluran utama berdasarkan simulasi SWAT, dihitung dengan persamaan (Neitsch et al., 2012):

$$Q_{gw} = \frac{8000 \cdot K_{sat}}{L_{gw}^2} \cdot h_{wtbl}$$

Keterangan :  $Q_{gw}$  = Jumlah air yang mengalir di equifer yang berkontribusi terhadap debit sungai (mm H<sub>2</sub>O)  
 $K_{sat}$  = Konduktivitas hidrolis dari akuifer (mm / hari)  
 $L_{gw2}$  = Jarak dari punggung atau sub-cekungan bagi air tanah sistem ke saluran utama (m)  
 $h_{wtbl}$  = Ketinggian permukaan air (m).

Setelah tahapan simulasi telah dilakukan dengan menggunakan proses Running SWAT, tahapan selanjutnya ialah menampilkan hasil output dari simulasi. Proses tersebut dilakukan dengan menggunakan sub menu Read SWAT Output. Hasil output dari simulasi kemudian disimpan untuk keperluan analisis berikutnya. Dalam model SWAT ketersediaan air diistilahkan dengan water yield (hasil air) yang diperoleh pada masing-masing Sub Basin atau Sub DAS dengan satuan mm. Water yield diperoleh dari hasil perhitungan menggunakan rumus berikut (Neitsch et al., 2012):

$$WYLD = SURQ + LATQ + GWQ - TLOSS - pond\ abstractions$$

Dimana: WYLD = Jumlah air efektif yang tersedia dalam suatu DAS (mm)

- SURQ = Jumlah aliran permukaan yang mencapai sungai utama (mm)  
 LATQ = Jumlah air yang mengalir secara lateral dibawah permukaan yang berkontribusi terhadap debit sungai (mm)  
 GWQ = Jumlah air yang mengalir di aquifer yang berkontribusi terhadap debit sungai (mm)  
 TLOSS = Total kehilangan air ke aquifer (mm)

## 7. Kalibrasi dan Validasi Model

Kalibrasi dan validasi model dilakukan untuk menilai keakuratan output model terhadap hasil observasi. Kalibrasi adalah proses pemilihan kombinasi parameter untuk meningkatkan koherensi antara respon hidrologi yang diamati/diukur dan hasil simulasi sedangkan Validasi adalah proses evaluasi suatu model untuk mendapatkan gambaran tingkat ketidakpastian yang dimiliki suatu model dalam memprediksi proses hidrologi. Kalibrasi model dilakukan untuk mengetahui hubungan antara debit air sungai dari model SWAT dengan debit air sungai terukur. Kalibrasi dan validasi dinilai dengan regresi nilai determinasi ( $R^2$ ) dan Nash-Sutcliffe model Efficiency (NSE). Nilai  $R^2$  menggambarkan hubungan seberapa jauh antara hasil simulasi dan hasil pengamatan yang nilainya antara 0-1. Dalam melihat keakuratan pola hasil keluaran model dengan hasil observasi lapangan digunakan koefisien deterministik atau persamaan linier:

$$R^2 = \frac{(X - \bar{X})^2 - (X - Y)^2}{(X - \bar{X})^2}$$

dimana X adalah besarnya debit pengamatan, adalah debit rata-rata pengamatan dan Y adalah debit perhitungan model. Hasil perhitungan  $R^2$  menunjukkan evaluasi kelayakan model tersebut, apabila  $R^2$  mendekati 1 maka terdapat hubungan yang erat antara hasil prediksi model dengan hasil observasi lapangan.

Metode Nash-Sutcliffe model Efficiency digunakan untuk melihat sebaran normal yang menentukan jarak perbedaan antara pengukuran dan simulasi. NSE mengindikasikan seberapa dekat hasil pengukuran terhadap data simulasi. NSE = 1 merupakan nilai optimal. Nilai antara 0.0 dan 1.0 secara umum menunjukkan tingkat kemampuan model dalam melakukan simulasi dapat diterima. Nilai <0.0 menunjukkan bahwa nilai rata-rata pengukuran lebih baik dari pada nilai simulasi, dengan kata lain kemampuan model dalam melakukan simulasi tidak dapat diterima. Kemampuan model dalam menggambarkan keadaan karakteristik DAS yang dievaluasi menggunakan data harian dan akan diterima saat menunjukkan NSE >0.5 (Neitsch, et al, 2010). Metode statistik yang digunakan untuk menguji model adalah persamaan efisiensi model Nash-Sutcliffe (NSE):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y - y^{\wedge})^2}{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}$$

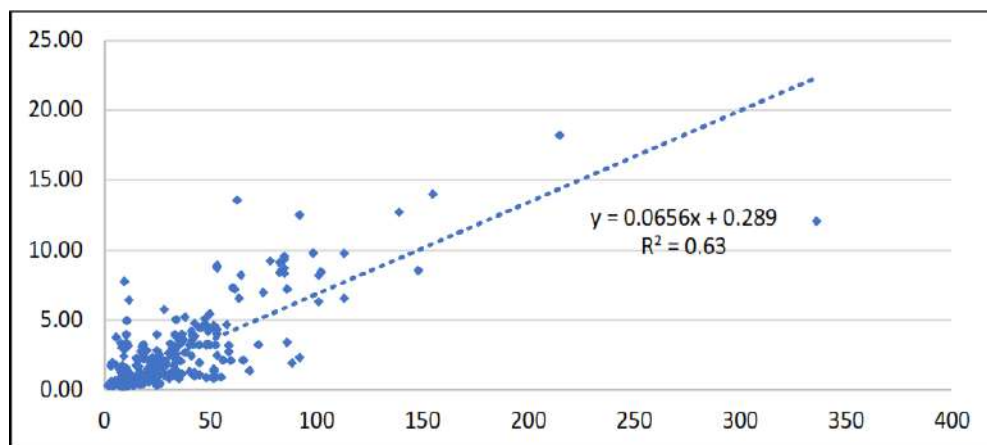
dimana  $y$  adalah debit terukur (mm), adalah hasil simulasi (mm), dan rata-rata debit terukur. Efisiensi model NS dikelompokkan menjadi tiga kelas (Tabel 3): baik, memuaskan, dan tidak memuaskan.

Tabel 3 Klasifikasi Nilai NS

Nilai NS	Kategori
NS $\leq 0,75$	Bagus (sangat memuaskan)
$0,75 > NS > 0,36$	Memuaskan
NS $< 0,36$	Kurang memuaskan

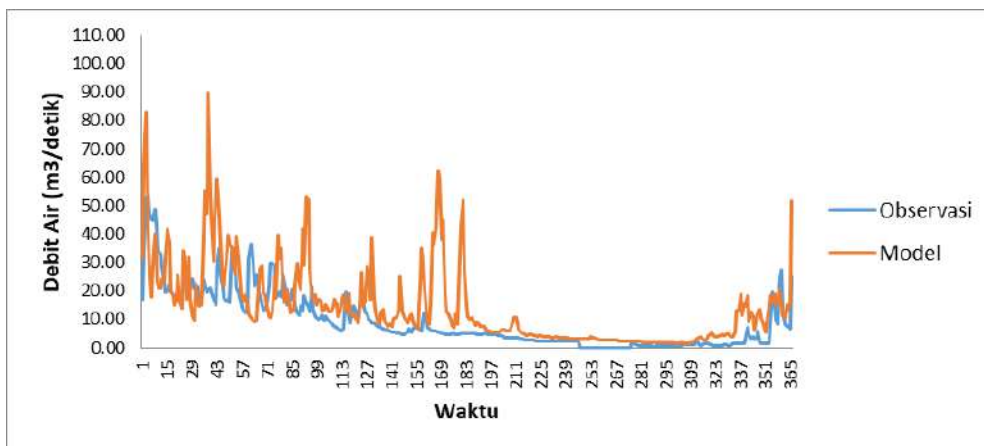
Sumber: Nash-Sutcliffe 1970 (Nash, 2001)

Periode kalibrasi dipilih untuk menentukan tahun mana yang akan digunakan dalam proses kalibrasi dan validasi. Dalam penelitian ini merujuk pada hasil penelitian yang telah dilakukan oleh (sari, 2022) di Sub DAS Tanralili, menunjukkan hasil kalibrasi model dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,63 dengan kriteria memuaskan. Kalibrasi model dengan membandingkan debit observasi dan debit simulasi menggunakan data tahun 2021 (Januari-Desember). Adapun hasil analisis regresi yang dilakukan oleh Sari 2022 ditunjukkan pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Analisis regresi perbandingan debit observasi dan debit simulasi model (Januari-Desember 2021). (Sari 2022).

Proses validasi dilakukan dengan membandingkan data debit simulasi model dengan data debit observasi. Dalam penelitian ini merujuk pada hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Surahman 2021 di Sub DAS Tanralili, menunjukkan konsistensi model SWAT setelah validasi dengan nilai Nash-Sutcliffe (NS) sebesar 0,64 (memuaskan). Validasi model dengan membandingkan debit observasi dan debit simulasi menggunakan data tahun 2015 (Januari-Desember). Adapun hasil validasi yang dilakukan oleh Surahman 2021 ditunjukkan pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Perbandingan debit observasi dan debit simulasi model setelah validasi (Januari-Desember 2015). (Surahman 2022).

## 8. Klasifikasi Output Model SWAT

Data keluaran model SWAT berupa informasi pada masing-masing HRU, Sub DAS maupun Sungai memberikan informasi keluaran model. Informasi yang terdapat di masing-masing Sub DAS dan HRU dihasilkan selama periode simulasi terdiri dari evapotranspirasi potensial dan aktual, kandungan air tanah, perkolasi, aliran permukaan, aliran lateral, aliran dasar dan hasil air (Neitsch et al. 2012). Sedangkan informasi pada tingkat sungai adalah aliran masuk dan aliran keluar. Model SWAT yang telah dijalankan menghasilkan output model diantaranya HRU (Hydrological Respon Unit) dan RCH (Reach). Dari output HRU dapat dikeluarkan hasil erosi dengan kode SYLDt\_ha, sedangkan untuk RCH dapat dikeluarkan hasil Limpasan dengan kode aliran permukaan (SURF), aliran lateral (LAT), hasil air (WYLD) dan aliran bawah tanah (GW). Hasil ini kemudian digunakan untuk menganalisis kondisi Hidrologi Sub DAS Tanralili secara deskriptif Kuantitatif. Variable output di outlet sungai disajikan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4 Variabel Output SWAT

Variabel	Definisi
PRECIP	Jumlah curah hujan (mm)
PET	Evapotranspirasi potensial (mm)
ET	Evapotranspirasi aktual (mm)
SW	Kadar air tanah pada akhir periode waktu (mm)
PERC	Air yang merembes melewati zona akar (mm)
SURQ	Kontribusi aliran permukaan terhadap debit sungai (mm)
GW_Q	Air bawah tanah (mm)
WYLD	Hasil air (mm)
SYLDt	Hasil erosi (ton/ha)

## 9. Karakteristik Hidrologi Model SWAT

Analisis karakteristik hidrologi meliputi total curah hujan (PRECIP) total air sungai (WYLD), aliran permukaan (SUR\_Q), aliran lateral (LAT\_Q) dan aliran dasar (GW\_Q). Total air sungai adalah total air yang mengalir dari setiap HRU dan masuk ke saluran utama dalam jangka waktu tertentu (Arnold et al, 2011). Aliran permukaan (SUR\_Q) merupakan air limpasan yang mengalir diatas permukaan tanah dari setiap HRU. Aliran lateral (LAT\_Q) merupakan air yang mengalir pada profil tanah dengan arah lateral dan masuk ke saluran utama dalam jangka waktu tertentu. Aliran dasar (GW\_Q) adalah aliran akuifer dangkal dan masuk ke saluran utama dalam jangka waktu tertentu. Selain hidrologi tersebut diatas, juga dihitung debit maksimum, debit minimum dan koefisien regim aliran (run off). Hal ini untuk mengetahui fluktuasi debit yang berada di titik outlet. Nilai C atau koefisien aliran dan koefisien regim aliran merupakan salah satu indikator untuk mengetahui kondisi suatu DAS. Klasifikasi KRA sajikan pada Tabel 5 Berikut.

Tabel 5 Klasifikasi Rezim Aliran

Koefisien Rezim Aliran (KRA)	Kelas
$0 < X \leq 5$	Sangat Baik
$5 < X \leq 10$	Baik
$10 < X \leq 15$	Sedang
$15 < X \leq 20$	Agak Buruk
$X > 20$	Buruk

### 2.4.5. Analisis Tingkat Erosi

Prediksi nilai erosi dan aliran permukaan, dengan menggunakan model SWAT menggunakan rumus dari Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) yang telah dikembangkan oleh Wischmeier dan Smith (1978) dari yang sebelumnya Universal Universal Soil Loss Equation Hasil Erosi dihitung dengan persamaan:

$$R = a(V_Q X Q_P)^b SY = R \times L \times LS \times CP$$

Dimana : SY = Jumlah Tanah tererosi (ton/tahun)

R = Aliran Permukaan

K = Faktor Erodibilitas tanah

LS = Faktor Kemiringan lereng

CP = Faktor Penggunaan lahan

$V_Q$  = Volume aliran permukaan ( $m^3$ )

$Q_P$  = Aliran Puncak ( $m^3/s$ )

$a = 11,8$                        $b = 0,56$

Untuk menentukan arahan penggunaan lahan yang tepat, maka perlu diketahui seberapa besar erosi yang ada pada Sub DAS Tanralili, klasifikasi Tingkat erosi disajikan pada Tabel 7 berikut.

Tabel 6 Klasifikasi Tingkat Erosi

Kelas	Besarnya Erosi (Ton/ha/Tahun)	Keterangan
I	<15	Erosi Sangat Ringan (SR)
II	15 – 60	Erosi Ringan (R)
III	60 – 180	Erosi Sedang (S)
IV	180 – 480	Erosi Berat (B)
V	>480	Erosi Sangat Berat (SB)

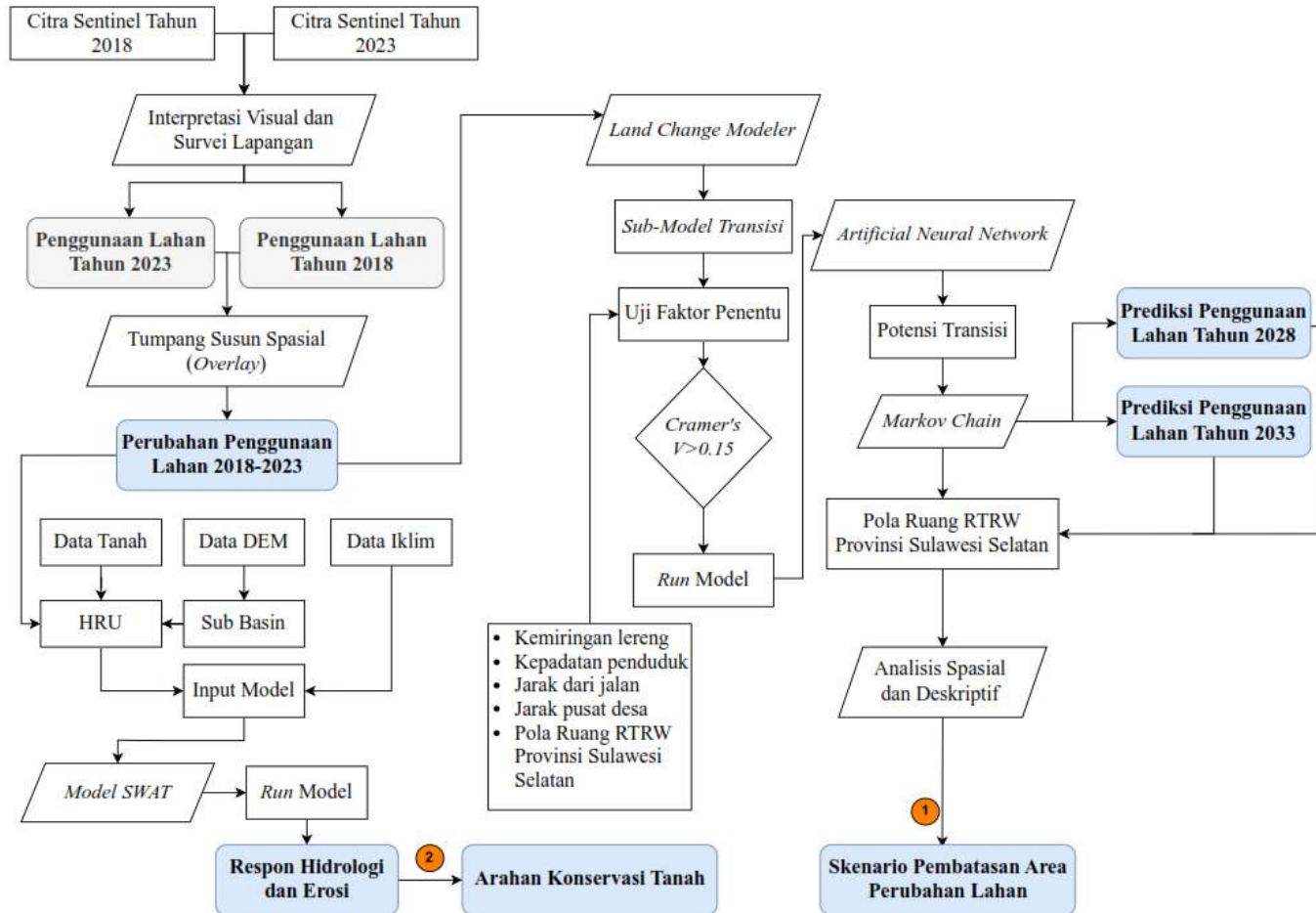
Sumber: Departemen Kehutanan, 1998

#### 2.4.6. Analisis Arahan Konservasi Tanah Sub DAS Tanralili

Analisis penggunaan lahan pada Sub DAS Tanralili merupakan penerapan rencana pengelolaan untuk memperbaiki karakteristik Sub DAS Tanralili. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode vegetatif dan sipil teknis. Skenario kondisi penggunaan lahan tersebut dilakukan untuk mensimulasi karakteristik hidrologi dan tingkat erosi bila metode tersebut diterapkan pada Sub DAS Tanralili. Klasifikasi penggunaan lahan eksisting dirunning untuk memprediksi karakteristik hidrologinya dan erosi. Arahan ini diharapkan dapat menjadi pertimbangan bagi pemerintah dalam perencanaan pengelolaan di Sub DAS Tanralili. Penyusunan arahan model pengelolaan Sub DAS Tanralili dilakukan dengan menghitung nilai erosi. Untuk penilaian dampak (impact assesment) digunakan peta penggunaan lahan yang menggambarkan kondisi eksisting, data tersebut diperoleh dari hasil interpretasi citra sentinel 2, yang kemudian di overlay dengan peta Kawasan hutan dan peta fungsi Kawasan yang telah di sesuaikan dengan pola ruang Provinsi Sulawesi Selatan.

Perubahan penggunaan lahan sebagai masukan dalam model juga mempengaruhi Erosi. Perubahan penggunaan lahan di Sub DAS Tanralili yang dianalisis adalah yang paling berpengaruh signifikan terhadap erosi. Penentuan arahan model pengelolaan didasarkan pada fungsi kawasan yang ada di wilayah Sub DAS itu sendiri yang di peroleh dari data hasil identifikasi citra satelit resolusi tinggi atau sedang, yang dilaksanakan oleh Kementerian Kehutanan/Badan Informasi Geospasial/LAPAN/pihak lain yang sesuai dengan kewenangannya dan melakukan peninjauan lapangan. Arahan konservasi pada Sub DAS Tanralili dengan melakukan kajian tingkat erosi tanah untuk mendapat peta sebaran tingkat erosi serta peta arahan.

Berdasarkan besarnya laju erosi pada suatu Daerah aliran sungai maka dilakukan berbagai metode untuk mengurangi dampak yang lebih besar nantinya, sehingga dapat dilakukan upaya mitigasi untuk mengantisipasi dan mengurangi kejadian dampak tersebut. Klasifikasi tingkat erosi sebagai acuan untuk menentukan arahan model pengelolaan yang tepat agar dapat mengurangi terjadinya erosi dan sebagai bahan rekomendasi perencanaan pengelolaan DAS terbaik.



Gambar 7. Bagan Alir Metode Penelitian