

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Penggunaan lahan memainkan peran penting dalam mempengaruhi produksi air dengan mempengaruhi proses hidrologi. Perubahan penggunaan lahan dapat mengubah limpasan permukaan, pengisian air tanah, dan aliran sungai, yang pada akhirnya mempengaruhi sumber daya air (Tian et al., 2022). Pertumbuhan penduduk, ekspansi pertanian, kegiatan industri, dan urbanisasi diidentifikasi dalam berbagai studi di berbagai Daerah Aliran Sungai (DAS), termasuk DAS Fetam di Ethiopia (Mekonnen & Manderso, 2023), DAS Liuxihe di Cina (Zhu et al., 2021), DAS Shazand di Iran (Mirchooli et al., 2022), dan DAS Brantas di Indonesia (Wiwoho et al., 2023) sebagai faktor yang mempengaruhi terjadinya perubahan penggunaan lahan. Perubahan penggunaan lahan memiliki dampak yang signifikan terhadap produksi air di berbagai wilayah. Penelitian di DAS Serra Azul, Brazil menunjukkan bagaimana hilangnya hutan dan fragmentasi akibat transisi penggunaan lahan mengurangi hasil air dan ketahanan lingkungan, sehingga menekankan pentingnya langkah-langkah konservasi (Dutra et al., 2022). Di cekungan Omo-Gibe, Ethiopia, perubahan penggunaan lahan telah mengganggu proses hidrologi dan mempengaruhi sumber daya air (Chaemiso et al., 2021). Sementara itu, di DAS Cimanuk, Indonesia, perubahan penggunaan lahan, terutama perluasan area pertanian dan pengurangan tutupan hutan, telah menyebabkan penurunan produksi air di sungai, terutama pada musim kemarau (Ridwansyah et al., 2019). Jenis penggunaan lahan tertentu dapat meningkatkan atau menurunkan produksi air. Studi di lokasi seperti DAS Ciwulan di Indonesia (Suroso et al., 2021) dan Dataran Tiongkok Utara (Li et al., 2021) telah menunjukkan bahwa perubahan tutupan lahan, seperti penggundulan hutan, urbanisasi, dan perubahan wilayah pertanian, secara langsung mempengaruhi proses hidrologi. Perubahan-perubahan ini menyebabkan fluktuasi debit sungai, limpasan permukaan, evapotranspirasi, dan hasil air. Sebagai contoh, konversi kawasan hutan menjadi lahan pertanian menyebabkan berkurangnya daerah tangkapan air dan menurunnya debit sungai selama musim kemarau (Truong et al., 2022). Sebaliknya, peningkatan tutupan hutan di wilayah tertentu seperti distrik Kaski dan Tanahun di Nepal (Thakur et al., 2017) dan penerapan praktik-praktik pengelolaan terbaik di daerah tangkapan air Jatigede DAS Cimanuk di Indonesia (Ridwansyah et al., 2018) menyebabkan peningkatan kuantitas dan kualitas air.

Hasil air didefinisikan sebagai jumlah total air yang dihasilkan dari sebuah DAS yang tersedia untuk aliran sungai, biasanya dihitung sebagai total aliran permukaan dan aliran bawah tanah yang keluar dari DAS tersebut (Neitsch et al., 2011) dan untuk menduga hasil air di suatu DAS, penerapan alat pemodelan hidrologis dapat membantu. Model hidrologis dapat membantu dalam memahami dan memprediksi berbagai proses hidrologis seperti presipitasi, infiltrasi, evapotranspirasi, aliran permukaan, dan aliran bawah permukaan (Liu et al., 2023). SWAT (*Soil Water Assessment Tool*) merupakan salah satu model hidrologis yang

efektif untuk menduga komponen hidrologis termasuk hasil air di suatu DAS. Studi di berbagai wilayah seperti Afrika Selatan (Smit et al., 2024), Kanada (Islam et al., 2024), India dan Nepal (Kumari et al., 2024) telah menggunakan model SWAT untuk mensimulasikan proses hidrologi. Kinerja model SWAT dalam memprediksi komponen hidrologis seperti evapotranspirasi, limpasan permukaan, dan aliran air tanah telah divalidasi melalui analisis sensitivitas dan statistik kesesuaian seperti koefisien determinasi ( $R^2$ ), yang menunjukkan kemampuannya dalam mensimulasikan respon hidrologi jangka panjang secara akurat (Wiwoho et al., 2021). SWAT juga memungkinkan simulasi dampak dari berbagai skenario penggunaan lahan dan manajemen air terhadap hidrologi DAS. Dengan menggunakan data iklim, tanah, penutupan lahan/penggunaan lahan, dan topografi, SWAT dapat memprediksi aliran air, sedimen, dan nutrisi di dalam DAS (Verma et al., 2022), sehingga dapat digunakan untuk merencanakan intervensi yang tepat dalam pengelolaan sumber daya air.

Perubahan penggunaan lahan merupakan salah satu permasalahan utama di DAS (Soma et al., 2023) (Achmad et al., 2020) termasuk di DAS Maros. DAS Maros, yang sebagian besar wilayahnya berada di Kabupaten Maros, merupakan salah satu DAS yang terletak di Kawasan Strategis Nasional (KSN) MAMMINASATA (Makassar, Maros, Sungguminasa, dan Takalar). KSN MAMMINASATA, sebagai pusat pertumbuhan dan pelayanan di Kawasan Indonesia bagian timur (PERPRES No. 55 Tahun 2011) memerlukan keseimbangan antara aspek ekonomi, sosial, dan ekologi. Dari perspektif ekologi, keberadaan DAS Maros memiliki peran krusial dalam mengatur produksi air bagi masyarakat yang memanfaatkan sumber daya alam di wilayah ini. DAS Maros diharapkan dapat menjadi wilayah yang mampu mendukung pengelolaan air yang berkelanjutan, sehingga mampu memenuhi kebutuhan air untuk berbagai sektor, termasuk pertanian, industri, dan rumah tangga. Namun, DAS Maros menghadapi permasalahan perubahan penutupan lahan yang mengarah pada munculnya masalah sumberdaya air yang signifikan. Deforestasi yang terjadi dalam kurun waktu 1999-2020 di wilayah DAS ini mengakibatkan penurunan tutupan hutan yang signifikan sebesar 1.105,72 hektar dengan perubahan lahan hutan menjadi lahan pertanian, daerah permukiman, dan penggunaan lainnya. Berikut ditunjukkan data perubahan penutupan lahan dari hutan menjadi penutupan lahan lainnya pada tabel 1.1 (Badwi et al., 2023). Permasalahan lain yang juga terjadi di DAS Maros adalah ekspansi pertanian yang ditujukan untuk meningkatkan ekonomi lokal dan pendapatan petani yang tidak diikuti dengan pengetahuan konservasi di wilayah DAS ini menyebabkan tantangan lingkungan yang signifikan berupa erosi tanah yang parah, dengan perkiraan degradasi lahan kritis sekitar 372,94 ha per tahun (Imran & Djafar, 2020). Selain itu urbanisasi juga turut mendorong pengembangan perumahan yang signifikan dan peningkatan sistem aktivitas perkotaan yang berdampak pada peningkatan polusi air dan degradasi ekosistem DAS Maros. Peningkatan luas pemukiman di DAS ini telah meningkatkan debit puncak sungai 6-10 kali jika dibandingkan dengan kondisi sebelumnya dan menyebabkan penurunan kualitas air khususnya parameter BOD (Syafri et al., 2020). Perubahan penggunaan lahan dari lahan bervegetasi ke lahan non vegetasi

termasuk pembangunan perumahan, dan kegiatan perkotaan berkontribusi terhadap penurunan kuantitas (Mandy et al., 2020) dan kualitas air (Syafri et al., 2020) di DAS. DAS Maros juga mengalami kondisi kekeringan yang mempengaruhi ketersediaan dan kualitas air, yang mengarah pada tantangan pasokan air kedepannya (Pahar et al., 2021).

Tabel 1.1 Konversi Hutan di Das Maros Periode 1990-2020

| <b>Tutupan Lahan Awal</b> | <b>Tutupan Lahan Akhir</b> | <b>Luas (Ha)</b> |
|---------------------------|----------------------------|------------------|
| Hutan                     | Bekas Tebangan             | 19,34            |
| Hutan                     | Semak Belukar              | 129,13           |
| Hutan                     | Pemukiman/Lahan Terbangun  | 28,93            |
| Hutan                     | Savana/Padang Rumput       | 31,10            |
| Hutan                     | Tubuh Air                  | 0,40             |
| Hutan                     | Kebun Campuran             | 609,32           |
| Hutan                     | Sawah                      | 239,68           |
| Hutan                     | Lahan Terbuka              | 47,82            |
| <b>Total</b>              |                            | <b>1.105,72</b>  |

Untuk meningkatkan produksi air di DAS Maros, penyusunan skenario penggunaan lahan yang diintervensi oleh pola ruang Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) dapat menjadi salah satu strategi efektif. RTRW merupakan instrumen penting dalam menjaga produksi air DAS melalui perencanaan ruang yang terpadu. RTRW mengintegrasikan berbagai aspek penggunaan lahan seperti pertanian, perumahan, industri, dan konservasi, memastikan kegiatan yang dilakukan tidak saling bertentangan dan mendukung tujuan konservasi air. Dengan menetapkan zona kawasan lindung, RTRW berupaya melindungi sumber daya air dari aktivitas yang merusak lingkungan. Selain itu, RTRW menyediakan kerangka hukum dan peraturan untuk mencegah penggunaan lahan yang tidak sesuai dan merusak lingkungan. Partisipasi masyarakat dalam proses penyusunan RTRW memastikan bahwa berbagai kebutuhan dan perspektif diakomodir, mendukung implementasi yang efektif dan berkelanjutan. Evaluasi dan penyesuaian RTRW secara berkala memastikan relevansi dan efektivitasnya dalam menjaga produksi air di DAS (UU No. 26 Tahun 2007). Dengan merancang pola penggunaan lahan yang berkelanjutan dan berbasis pada hasil simulasi model SWAT, dapat dicapai keseimbangan antara kebutuhan pembangunan dan konservasi sumber daya air. Intervensi RTRW dapat mencakup upaya restorasi hutan, pembangunan infrastruktur resapan air, serta penerapan praktik pertanian berkelanjutan untuk mendukung ketersediaan air yang optimal (Chairil et al., 2021) di DAS Maros. Berdasarkan uraian di atas, dirasa perlu melakukan kajian untuk menganalisis dampak perubahan penggunaan lahan terhadap produksi air di DAS Maros menggunakan model SWAT.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, dapat kita ketahui bahwa DAS Maros menghadapi permasalahan terkait perubahan penggunaan lahan dan produksi air. Produksi air sangat dipengaruhi oleh aktifitas penggunaan lahan yang ada di DAS. Hal inilah yang menjadi dasar sehingga perlu dilakukan penelitian untuk melihat

dampak perubahan penggunaan lahan terhadap hasil air di DAS Maros melalui pendekatan spasial. Adapun rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

- a. Bagaimana perubahan penggunaan lahan di DAS Maros pada saat ini dan yang akan datang?
- b. Bagaimana dampak perubahan penggunaan lahan terhadap produksi air di DAS Maros pada saat ini dan yang akan datang?
- c. Bagaimana intervensi penerapan pola ruang terhadap produksi air DAS Maros?

### **1.3 Tujuan dan Manfaat**

Berdasarkan uraian pertanyaan penelitian dalam perumusan permasalahan, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Menganalisis perubahan penggunaan lahan tahun 2014-2023 dan memproyeksi perubahan penggunaan lahan tahun 2032 di DAS Maros;
- b. Menganalisis produksi air di tahun 2014, 2023, dan 2032 di DAS Maros;
- c. Melakukan simulasi intervensi penerapan pola ruang terhadap produksi air di DAS Maros.

Adapun manfaat penelitian yaitu:

- a. Manfaat Teoritis

Penelitian ini diharapkan menjadi karya ilmiah yang dapat digunakan bagi pengembangan riset terkait penggunaan lahan dan produksi air.

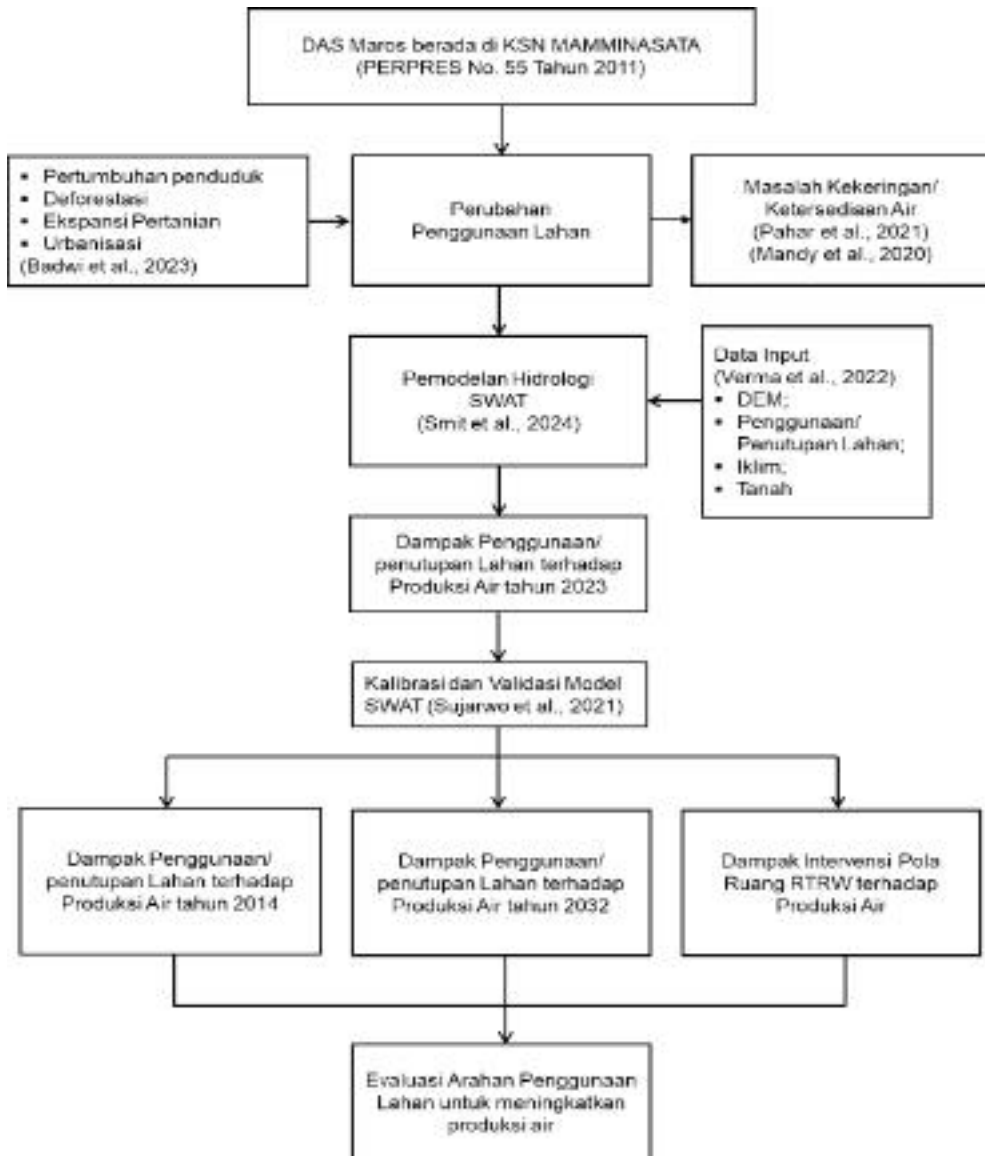
- b. Manfaat Praktis

Penelitian ini diharapkan menjadi bahan informasi mengenai kondisi produksi air di DAS Maros dan menjadi bahan masukan bagi pemerintah atau pembuat kebijakan dalam menyusun program perencanaan pemanfaatan ruang dalam rangka meningkatkan kualitas DAS khususnya dalam menjaga produksi air sehingga bermanfaat bagi lingkungan dan masyarakat.

### **1.4 Kerangka Pikir**

Sebagai salah satu DAS yang berada di KSN MAMMINASATA, DAS Maros memiliki peran vital dalam mengatur produksi air untuk memenuhi berbagai keperluan pembangunan. Namun, permasalahan penggunaan lahan seperti deforestasi, ekspansi pertanian, dan urbanisasi menjadi isu krusial di DAS Maros. Perubahan penggunaan lahan ini secara signifikan mempengaruhi proses hidrologis DAS Maros, yang mengarah pada berkurangnya produksi air. Proses deforestasi mengurangi penyerapan air oleh vegetasi, sehingga meningkatkan aliran permukaan dan risiko erosi. Ekspansi pertanian, yang seringkali melibatkan konversi hutan menjadi lahan pertanian berkontribusi pada peningkatan penggunaan air untuk irigasi, sementara urbanisasi menciptakan area kedap air yang mengurangi infiltrasi dan meningkatkan limpasan permukaan. Untuk menduga produksi air di DAS Maros, penerapan alat pemodelan hidrologis dapat menjadi solusi efektif. Salah satu model yang dapat digunakan adalah SWAT. Model SWAT memungkinkan simulasi berbagai skenario penggunaan lahan dan membantu dalam memahami dampak perubahan penggunaan lahan terhadap produksi air. Untuk meningkatkan produksi

air di DAS Maros, perlu dilakukan pengaturan penggunaan lahan yang efektif. Hal ini dapat dicapai salah satunya melalui intervensi pola ruang RTRW yang berbasis pada prinsip-prinsip keberlanjutan. Intervensi ini harus mencakup perlindungan hutan, penetapan zona hijau, serta pengelolaan pertanian dan kawasan urban yang ramah lingkungan. Dengan demikian, proses hidrologis DAS dapat dijaga dan ketersediaan air di DAS Maros dapat ditingkatkan secara berkelanjutan. Hal inilah yang menjadi dasar sehingga perlu dilakukan penelitian terkait dampak perubahan penggunaan lahan pada beberapa skenario terhadap produksi air di DAS Maros. Adapun kerangka pikir penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.1.

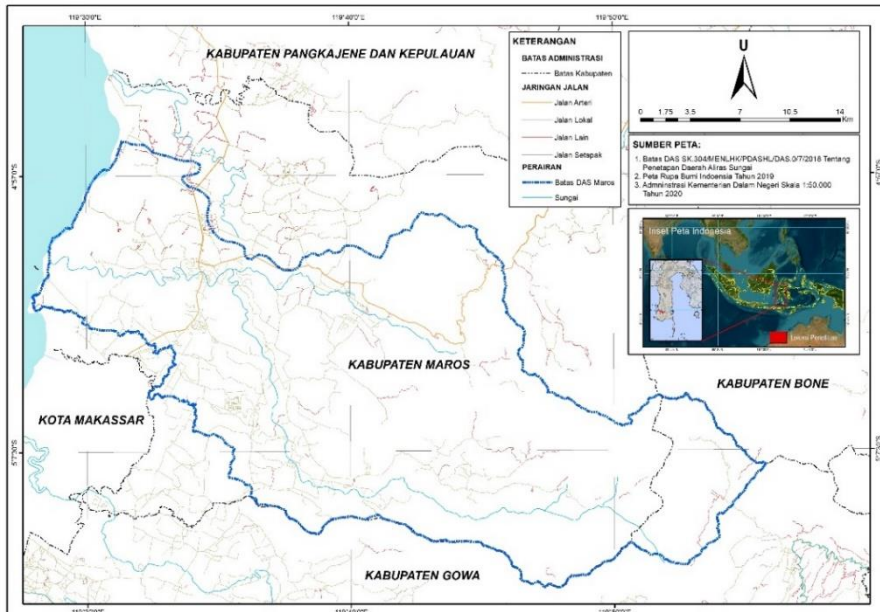


Gambar 1.1 Kerangka Pikir Penelitian

## BAB II METODE PENELITIAN

### 2.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan di Daerah Aliran Sungai (DAS) Maros yang secara administrasi mencakup Kabupaten Maros, Kabupaten Gowa, Kabupaten Bone, dan Kota Makassar, Provinsi Sulawesi Selatan. DAS Maros merupakan bagian dari Kawasan Strategis Nasional (KSN) yang memiliki tantangan dan peluang signifikan dalam pengelolaan sumber daya air, terutama untuk mendukung pembangunan wilayah melalui penyediaan air yang berkelanjutan. Penelitian ini berlangsung selama delapan bulan, dari Oktober 2024 hingga Mei 2025, dengan tahapan meliputi persiapan data, pengumpulan data, analisis data, dan penyusunan laporan penelitian. Distribusi spasial lokasi penelitian disajikan pada Gambar 2.1 untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai cakupan wilayah studi.



Gambar 2.1 Lokasi Penelitian

### 2.2 Alat dan Bahan

Penelitian ini memanfaatkan berbagai alat untuk mengumpulkan data guna mendukung analisis data penelitian. Alat-alat yang digunakan digunakan untuk memperoleh data primer dan sekunder secara akurat dan efisien. Daftar alat tersebut, beserta fungsinya, disajikan dalam Tabel 2.1

Tabel 2.1 Alat Penelitian

| No. | Alat                                                                                                                                                           | Kegunaan                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Laptop dengan prosesor minimal Core i3 dengan kapasitas ram 4 gb dan penyimpanan 250 gb                                                                        | Mengolah dan menganalisis data.                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 2   | Program sistem informasi geografis <ul style="list-style-type: none"> <li>- Arc GIS 10.4.1</li> <li>- Quantum GIS (QGIS) 2.16</li> <li>- Sibias 1.2</li> </ul> | Melakukan penyiapan dan analisis data spasial, proyeksi penutupan lahan dengan tambahan <i>tools</i> MOLUSCE pada QGIS, analisis hidrologi (SWAT) dengan tambahan <i>tools</i> ArcSWAT pada Arc GIS, analisis skenario perubahan iklim dengan Sibias, dan analisis arahan atau rekomendasi. |
| 3   | Microsoft office                                                                                                                                               | Melakukan pengolahan dan penyajian data numerik dan teks.                                                                                                                                                                                                                                   |
| 4   | Kamera                                                                                                                                                         | Mendokumentasikan kegiatan penelitian.                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 5   | Alat tulis menulis                                                                                                                                             | Mencatat proses penelitian baik teknis maupun non teknis lainnya.                                                                                                                                                                                                                           |

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data input analisis. Data penelitian berupa data primer yang diperoleh secara langsung dari lapangan melalui sampling maupun uji laboratorium dan data sekunder yang diperoleh dari pihak/lembaga lain yang merupakan wali data. Daftar bahan yang digunakan disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Bahan Penelitian

| No. | Bahan                                      | Sumber                                                                                                                                                                                        | Kegunaan                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | Peta Batas DAS Maros                       | Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (BPDAS) Jeneberang Saddang, Ditjen Pengelolaan Daerah Aliran Sungai dan Rehabilitasi Hutan (PDASRH), Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) | Menentukan batas wilayah kajian penelitian                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 2.  | Citra Landsat 8 OLI Tahun 2014, 2019, 2023 | <i>United States Geological Survey</i> (USGS) di laman <a href="https://earthexplorer.usgs.gov">https://earthexplorer.usgs.gov</a>                                                            | Digunakan untuk menghasilkan peta penutupan lahan tahun 2014, 2019, dan 2023. Selanjutnya digunakan untuk analisis perubahan Penutupan lahan saat ini dan untuk proyeksi perubahan Penutupan lahan tahun 2032. Peta penutupan lahan tahun 2014, 2023, dan proyeksi 2032 selanjutnya digunakan sebagai variabel input SWAT |

| No. | Bahan                                                                                   | Sumber                                                                                                                                                                                               | Kegunaan                                         |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 3.  | Data Iklim Tahun 2014-2023                                                              | Satelit “ <i>The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications</i> ” (MERRA) - II Nasa, diperoleh di laman <a href="https://power.larc.nasa.gov/">https://power.larc.nasa.gov/</a> | Menjadi variabel input SWAT                      |
| 4.  | DEM ( <i>Digital Elevation Model</i> ) Nasional                                         | Ina Geoportal Badan Informasi Geografis (BIG) di laman <a href="https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/">https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/</a>                                           | Menjadi variabel input SWAT                      |
| 5.  | Data debit                                                                              | Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Pompean Jeneberang, Ditjen Sumber Daya Air, Kementerian PUPR                                                                                                       | Memvalidasi model SWAT                           |
| 6.  | Peta Administrasi, sungai dan akses jalan                                               | Kementerian Dalam Negeri Indonesia dan Badan Informasi Geografis (BIG) diperoleh di laman <a href="https://tanahair.indonesia.go.id">https://tanahair.indonesia.go.id</a>                            | Menunjukkan letak administrasi lokasi penelitian |
| 7.  | RTRW Kabupaten Maros, Kabupaten Gowa, Kabupaten Bone, dan Kota Makassar Tahun 2012-2032 | Pemerintah Daerah Kabupaten Maros, Kabupaten Gowa, Kabupaten Bone, dan Kota Makassar                                                                                                                 | Pola ruang RTRW Menjadi variabel input SWAT      |
| 8.  | Data Tanah                                                                              | Peta <i>Landsystem</i> RePPProT Skala 1:250.000 Tahun 1984 dan Pengambilan sampel tanah di lapangan dan uji laboratorium                                                                             | Menjadi variabel input SWAT                      |

### 2.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini terdiri atas dua tahapan utama, yaitu pengumpulan data dan analisis data. Data yang dikumpulkan mencakup DEM, peta penutupan lahan tahun 2014, 2019, dan 2023, peta jenis tanah, data iklim, peta RTRW Kabupaten Maros, Kabupaten Gowa, Kabupaten Bone, Kota Makassar, peta proyeksi penutupan lahan tahun 2032, dan proyeksi data iklim tahun 2032. Data-data tersebut akan digunakan dalam analisis model SWAT.

Tahapan analisis dimulai dengan analisis perubahan penutupan lahan tahun 2014-2023, dilanjutkan dengan analisis proyeksi penutupan lahan tahun 2032. Selanjutnya dilakukan juga analisis proyeksi data iklim tahun 2032



menggunakan model perubahan iklim CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*) Mk3.5. Setelah persiapan data input SWAT selesai, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis hidrologi dengan menjalankan simulasi model SWAT dalam empat iterasi berbeda yaitu:

- a. Iterasi pertama menggunakan peta penutupan lahan dan data iklim tahun 2014 untuk mengetahui produksi air di masa lalu.
- b. Iterasi kedua menggunakan peta penutupan lahan dan data iklim tahun 2023 untuk mengetahui produksi air saat ini, dan membandingkan hasilnya dengan tahun 2014 untuk melihat pengaruh perubahan penutupan lahan terhadap produksi air.
- c. Iterasi ketiga menggunakan data proyeksi penutupan lahan tahun 2032 dan proyeksi data iklim tahun 2032 untuk melihat produksi air di masa depan.
- d. Iterasi keempat menggunakan pola ruang RTRW tahun 2032 dan proyeksi data iklim tahun 2032 untuk melihat produksi air di masa depan, kemudian membandingkan hasilnya dengan iterasi ketiga, untuk mengevaluasi seberapa efektif intervensi RTRW dalam meningkatkan produksi air di DAS Maros.

Pemodelan SWAT dilakukan melalui beberapa tahapan, dimulai dari deliniasi batas DAS, input parameter model SWAT, pembentukan *Hydrological Response Unit* (HRU), penginputan data iklim, dan simulasi model SWAT. Tahap selanjutnya adalah melakukan kalibrasi dan validasi model.

## **2.4 Metode Penelitian**

### **2.4.1 Pengumpulan Data**

#### **1. Batas DAS Maros**

Data batas DAS Maros diperoleh melalui permohonan data kepada instansi yang menjadi wali data yaitu BPDAS Jeneberang Saddang, Ditjen PDASRH, KLHK. Data batas DAS yang digunakan mengacu pada SK.304/MENLHK/PDASHL/DAS.0/7/2018 tentang penetapan peta Daerah Aliran Sungai. Data tersebut berupa file shapefile (shp) yang akan digunakan untuk menentukan batas wilayah kajian penelitian.

#### **2. *Digital Elevation Model* (DEM)**

DEM adalah representasi digital dari permukaan topografi bumi. DEM biasanya disajikan dalam bentuk grid atau raster, di mana setiap piksel dalam grid memiliki nilai elevasi atau ketinggian dari permukaan tanah. DEM memiliki arti penting karena berfungsi sebagai kumpulan data penting yang darinya semua karakteristik topografi dari daerah tangkapan air, sub-daerah tangkapan air, dan HRU diturunkan. Atribut-atribut ini meliputi luas, kemiringan, panjang lereng, panjang saluran, kemiringan saluran, lebar saluran, dan kedalaman saluran (Zhang et al., 2014). Tahapan kerja pembuatan DEM untuk digunakan dalam model SWAT dimulai dengan:

- a. Unduh data DEM dari laman <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/>, memilih resolusi DEM 30m, dan memastikan data tersebut dalam format raster GeoTIFF.
- b. Siapkan perangkat lunak ArcGIS untuk mengolah data DEM tersebut. Buka perangkat lunak ArcGIS, lalu impor file DEM yang telah diunduh.
- c. Impor shapefile batas DAS Maros ke dalam ArcGIS. Gunakan *tool "Clip"* untuk memotong DEM sesuai dengan batas DAS Maros. Setelah DEM dipotong, periksa data DEM untuk adanya depresi atau artefak lainnya dan gunakan *tool "Fill Sinks"* untuk menghilangkan depresi yang tidak realistis.
- d. Pastikan data DEM sudah dalam sistem koordinat UTM, dan jika belum, gunakan *tool "Reproject"* untuk mengkonversi sistem koordinat DEM.
- e. Terakhir, ekspor data DEM dalam format yang didukung oleh SWAT, yaitu TIFF. Setelah semua langkah tersebut dilakukan, data DEM siap digunakan sebagai variabel input untuk model SWAT.

### 3. Penutupan Lahan

Data penutupan lahan dihasilkan dari proses digitasi citra secara manual dengan pendekatan *unsupervised classification*. Klasifikasi ini menggunakan panduan yang telah diketahui dari situs tertentu baik dalam analisis fotografi udara, pengalaman pribadi maupun ketetapan dari institusi tertentu (Miranda et al., 2018). Dalam kaitanya dengan penelitian ini, panduan berasal dari “Buku Petunjuk Teknis Penafsiran Citra Satelit Resolusi Sedang Untuk Update Data Penutupan Lahan Nasional Tahun 2020” dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. Tahapan analisis perubahan penutupan lahan sebagai berikut:

- 1) Mengunduh citra satelit, dalam penelitian ini digunakan citra Landsat 8 tahun 2014, 2019, dan 2023. Data citra ini diperoleh dengan mengunduh citra dari laman <https://earthexplorer.usgs.gov> yang menyediakan citra satelit dengan resolusi spasial yang memadai untuk analisis perubahan lahan.
- 2) Composite Band, atau kombinasi band merupakan proses menggabungkan tiga kanal spektral untuk menghasilkan tampilan warna yang sesuai dengan karakteristik objek di permukaan bumi. Kombinasi band 6-5-4 dengan resolusi spasial 30 m x 30 m digunakan dalam analisis ini. Untuk meningkatkan ketajaman citra, proses pan-sharpening dilakukan dengan memanfaatkan band 8 (Panchromatic), sehingga resolusi meningkat menjadi 15 m x 15 m.
- 3) Interpretasi citra, dilakukan melalui metode digitasi on-screen. Pada proses ini, karakteristik visual citra dianalisis berdasarkan sembilan unsur utama interpretasi, yaitu rona, ukuran, bentuk, tekstur, pola, tinggi, bayangan, situs, dan asosiasi. Penggunaan unsur-unsur ini dimaksudkan untuk meningkatkan ketepatan dalam mengidentifikasi berbagai jenis penutupan lahan. Hasil akhir interpretasi adalah peta penutupan lahan tahun 2014, 2019, dan 2023.

- 4) Uji Akurasi Hasil Interpretasi Citra, proses ini dimaksudkan untuk mengevaluasi tingkat kepercayaan hasil interpretasi citra terhadap klasifikasi penutupan lahan pada setiap tahun yang dianalisis dengan menghitung persentase akurasi yang diperoleh. Prinsip utama dalam uji akurasi adalah membandingkan hasil interpretasi citra dengan kondisi sebenarnya di lapangan untuk memastikan validitas data yang digunakan (Anggari et al., 2023). Untuk analisis data historis, dimana tidak memungkinkan melakukan verifikasi lapangan, metode alternatif digunakan, yaitu membandingkan hasil interpretasi dengan citra resolusi tinggi yang tersedia melalui aplikasi Google Earth Pro. Pendekatan ini terbukti efektif diterapkan untuk mengestimasi akurasi interpretasi citra satelit di masa lalu (Nwilo et al., 2022). Untuk menentukan titik sampel yang digunakan dalam uji akurasi, dilakukan perhitungan pada setiap kelas penutupan lahan menggunakan rumus Estok Navitte Cowan sebagai berikut:

$$n = \frac{Z^2 [p(1-p)] N}{Z^2 [p(1-p)] + (N-1)E^2} \quad (1)$$

Keterangan:

- n : Ukuran sampel  
 Z : Koefisien reliabilitas atau nilai variabel normal standar. Penggunaan nilai Z dengan tingkat kepercayaan 90% adalah 1,65.  
 P(1-p) : Variasi populasi yang dinyatakan dalam bentuk proporsi.  
 E : Margin of eror  
 N : Ukuran populasi atau luas masing-masing penutupan lahan.

Evaluasi akurasi hasil interpretasi citra dilakukan menggunakan metode *confusion matrix*, yang disajikan dalam Tabel 2.3 sebagai alat untuk membandingkan antara data hasil klasifikasi dengan data referensi (*ground truth*). *Confusion matrix* memberikan gambaran tentang tingkat kesalahan klasifikasi serta distribusi kelas yang telah diinterpretasikan, sehingga menjadi dasar dalam mengevaluasi kualitas hasil interpretasi. Berdasarkan *confusion matrix* tersebut, dilakukan penghitungan akurasi untuk memperoleh nilai *overall accuracy* dan *kappa accuracy*. *Overall accuracy* menunjukkan persentase total klasifikasi yang sesuai antara hasil interpretasi dan data referensi, sedangkan *kappa accuracy* memberikan ukuran kesesuaian yang mempertimbangkan kemungkinan kecocokan yang terjadi secara kebetulan. Penilaian tingkat akurasi interpretasi citra mengacu pada klasifikasi nilai Kappa, yaitu: 0,81–1,00 (sangat baik), 0,61–0,80 (baik), 0,41–0,60 (sedang), 0,21–0,40 (lemah), dan 0,01–0,20 (sangat lemah). Klasifikasi ini memberikan panduan objektif dalam menilai keandalan hasil klasifikasi citra terhadap kondisi sebenarnya di lapangan. Akurasi hasil klasifikasi dianalisis melalui indikator utama, yaitu (Anggari et al., 2023):

1. *Producer's Accuracy*, yang menunjukkan tingkat ketepatan klasifikasi dari perspektif referensi (kemampuan model dalam mengklasifikasikan suatu kelas dengan benar).
2. *User's Accuracy*, yang menunjukkan sejauh mana hasil klasifikasi sesuai dengan kondisi sebenarnya dari perspektif pengguna.
3. *Overall Accuracy*, yang mengukur persentase keseluruhan klasifikasi yang benar dibandingkan dengan data referensi.
4. *Kappa accuracy*, yang menunjukkan ukuran statistik yang memperhitungkan kemungkinan klasifikasi yang benar secara acak

Secara matematis, perhitungan setiap jenis akurasi dapat dinyatakan dalam rumus sebagai berikut:

$$\text{producer's accuracy} = \frac{X_{ii}}{\sum X_{i+}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{user's accuracy} = \frac{X_{ii}}{\sum X_{+i}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{overall accuracy} = \frac{\sum_{i=1}^r X_{ii}}{N} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{Kappa} = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}} \quad (5)$$

Keterangan:

A, B, C : Data acuan

A', B', C' : Data hasil klasifikasi citra

X<sub>ii</sub> : Data yang diuji

$\sum X_{i+}$  : Jumlah data dalam baris

$\sum X_{+i}$  : Jumlah data dalam kolom

N : Total data yang diuji

Tabel 2.3 *Confusion Matriks*

|                          | Data Acuan |                        |   |                 | Total         | <i>User's accuracy</i> |
|--------------------------|------------|------------------------|---|-----------------|---------------|------------------------|
|                          |            | A                      | B | C               |               |                        |
| Data                     | A'         | X <sub>ii</sub>        |   |                 | $\sum X_{+i}$ | $X_{ii} / \sum X_{+i}$ |
| Hasil                    | B'         |                        |   |                 |               |                        |
| Klasifikasi              | C'         |                        |   | X <sub>ii</sub> |               |                        |
| Citra                    | Total      | $\sum X_{i+}$          |   |                 | N             |                        |
| <i>Producer accuracy</i> |            | $X_{ii} / \sum X_{i+}$ |   |                 |               |                        |

Selanjutnya dengan memanfaatkan peta penutupan lahan tahun 2014, 2019, dan 2023, peta proyeksi penutupan lahan tahun 2032 dibuat melalui model *Cellular Automata-Artificial Neural Network* (CA-ANN) menggunakan *tools* MOLUSCE di QGIS. Proyeksi penutupan lahan tahun 2032 dibahas tersendiri di tahap analisis data. Untuk menggunakan peta penutupan lahan sebagai variabel input SWAT, berikut adalah tahapan kerjanya:

- a. Pastikan bahwa peta penutupan lahan memiliki kelas penutupan lahan yang memiliki atribut yang jelas. Buka perangkat lunak ArcGIS, lalu impor file peta penutupan lahan (.shp) ke dalam ArcGIS.
- b. Impor shapefile batas DAS Maros yang sudah dimiliki ke dalam ArcGIS. Gunakan *tool "Clip"* untuk memotong peta penutupan lahan sesuai dengan batas DAS Maros, sehingga hanya data penutupan lahan dalam batas DAS Maros yang akan digunakan.
- c. Lakukan *reclassify* atau penyesuaian kelas penutupan lahan dengan klasifikasi yang diperlukan oleh SWAT, karena SWAT memiliki klasifikasi lahan standar sehingga perlu mengubah kode atau nama kelas penutupan lahan agar sesuai.
- d. Konversi peta tersebut ke format raster (GeoTIFF). Pastikan data penutupan lahan dalam sistem koordinat yang sama dengan DEM dan data lainnya dengan menggunakan *tool "Reproject"* untuk mengonversi sistem koordinat jika diperlukan.
- e. Ekspor data penutupan lahan dalam format GeoTIFF yang sesuai dengan input SWAT. Setelah semua langkah tersebut dilakukan, data penutupan lahan siap digunakan sebagai variabel input untuk model SWAT.
- f. Tahapan kerja di atas diterapkan untuk peta penutupan lahan tahun 2014, 2023, peta proyeksi penutupan lahan tahun 2032, dan pola ruang RTRW Kabupaten/Kota.

#### 4. Iklim

Data iklim tahun 2014-2023 diperoleh dari satelit MERRA-2 *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) melalui laman <https://power.larc.nasa.gov/>. Satelit MERRA-2 dipilih karena kemampuannya dalam menyediakan data iklim secara terbuka dan dapat diunduh dengan mudah, hal ini memudahkan integrasi dengan model SWAT (Shi et al., 2023). Pengunduhan data pada laman didasarkan pada titik koordinat stasiun iklim menggunakan model iklim CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*) karena reputasinya yang unggul dalam penelitian iklim, kemampuannya untuk mensimulasikan perilaku hidrologi secara akurat, dan perannya dalam menyediakan input data yang diperlukan untuk menganalisis efek perubahan iklim pada sumber daya air secara efektif (Raj et al., 2021). Tahapan kerja dalam memperoleh data iklim dimulai dengan:

- a. Menentukan batasan pengambilan data menggunakan batas wilayah kajian (batas DAS Maros).
- b. Membuat grid menggunakan titik stasiun CSIRO dan menentukan titik stasiun yang mempengaruhi wilayah kajian.

- c. Membuka website pada laman <https://power.larc.nasa.gov/>, kemudian memilih menu *Power Data Access Viewer*. Selanjutnya lakukan penyesuaian data pada menu *Power Single Point Data Access*.
- d. Memilih jenis data yang akan diunduh pada menu *Chose a User Community*. Pada penelitian ini menggunakan *Agroclimatology*. Data yang digunakan berupa data curah hujan (pcp), temperatur maksimum (tmp\_max), temperatur minimum (tmp\_min), kelembaban (rh), kecepatan angin (wind) dan radiasi matahari (solar).
- e. Input titik koordinat stasiun pada poin latitude/longitude kemudian melakukan penyesuaian data sesuai kebutuhan meliputi data iklim periode tahun 2014–2023 menggunakan format CSV, setelah itu klik Submit→CSV→Download. Data yang telah di download kemudian dikonversi ke format txt agar dapat digunakan sebagai variabel input SWAT.

## 5. Tanah

Data tanah dalam penelitian ini diperoleh dari Peta *Landsystem* RePPProT Skala 1:250.000 yang dikeluarkan pada tahun 1987 oleh Badan Koordinasi Survei dan Pemetaan Nasional. Untuk mendapatkan data tanah yang lebih detail pada skala 1:50.000, dilakukan penyesuaian melalui pengambilan sampel tanah dari satuan unit lahan. Kelompok lahan dengan karakteristik (atribut) yang sama atau serupa disebut satuan unit lahan (Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2016). Sampel tanah selanjutnya diuji di Laboratorium untuk memperoleh data sifat fisik dan kimia tanah berupa Volume retak tanah (SOL\_CRK), Kapasitas air tersedia (SOL\_AWC), Konduktivitas hidrolik jenuh (SOL\_K), Albedo tanah (SOL\_ALB), Tekstur (TEXTURE), Kedalaman tanah (SOL\_Z), *Bulk density* (SOL\_BD), Permeabilitas (SOL\_KSat), Kadar C organik (SOL\_CBN), Persentase liat (CLAY), Persentase debu (SILT), Persentase pasir (SAND), Erodibilitas tanah (USEL\_K), dan pH (SOL\_PH).

## 6. Peta Administrasi, Sungai dan Akses Jalan Kabupaten/Kota

Data administrasi, sungai dan akses jalan didapatkan dari web GIS Kementerian Dalam Negeri Indonesia dan data sungai dan jalan di Badan Informasi Geografis (BIG) melalui laman <https://tanahair.indonesia.go.id>.

## 7. Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kabupaten/Kota

Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kabupaten Maros, Kabupaten Gowa, Kabupaten Bone, dan Kota Makassar diperoleh melalui permohonan data kepada instansi pemerintahan kabupaten/kota untuk periode tahun 2012-2032. Pola ruang RTRW dalam format Shapefile akan dijadikan variabel input SWAT dengan cara yang sama melalui tahapan menggunakan peta penutupan lahan sebagai variabel input SWAT yang telah dijelaskan sebelumnya.

## 2.4.2 Analisis Data

### 1. Perubahan Penutupan Lahan 2014-2023

Dalam penelitian ini, analisis perubahan penutupan lahan dilakukan dalam rentang waktu 10 tahun (2014-2023). Selama kurun waktu tersebut, diperkirakan telah terjadi perubahan dalam penggunaan lahan di wilayah studi. Untuk mengidentifikasi perubahan ini, digunakan metode change detection yang merupakan teknik analisis yang bertujuan untuk mendeteksi dan menentukan tingkat perubahan penutupan lahan dari waktu ke waktu. Metode ini memanfaatkan teknologi remote sensing untuk mengidentifikasi perbedaan dalam tutupan lahan berdasarkan data citra satelit dari dua atau lebih periode pengamatan (Lakhdar et al., 2024). Proses analisis perubahan penutupan lahan menggunakan metode change detection dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu:

1. *Overlay* peta, yaitu melakukan tumpang susun antara peta penutupan lahan pada tahun awal pengamatan ( $T_0$ ) dengan peta penutupan lahan pada tahun akhir pengamatan ( $T_1$ ).
2. Identifikasi objek yang berubah dan tidak berubah, yaitu menganalisis area yang memiliki perbedaan kelas penutupan lahan antara  $T_0$  dan  $T_1$ .
3. Menentukan objek yang tidak mengalami perubahan, yaitu area dengan kelas penutupan lahan yang tetap sama pada kedua periode waktu.
4. Penghitungan luas perubahan, yaitu mengukur luas masing-masing kelas penutupan lahan yang mengalami perubahan dari  $T_0$  ke  $T_1$ , sehingga besar perubahan yang terjadi pada setiap kategori penutupan lahan dapat diketahui.
5. Analisis tabular, yaitu menyusun hasil perubahan dalam bentuk tabel untuk memperoleh informasi yang lebih terstruktur mengenai distribusi perubahan lahan di wilayah studi.

Proses analisis perubahan penutupan lahan menggunakan metode change detection dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$TH = \frac{(A1-A0)}{(T1-T0)} \quad (6)$$

Keterangan :

- TH : perubahan penutupan lahan per tahun pada periode tertentu, dinyatakan dalam luas per tahun (ha/tahun)
- A0 : luas penutupan lahan pada waktu pengamatan awal, dinyatakan dalam hektar (ha)
- A1 : luas penutupan lahan pada waktu pengamatan akhir, dinyatakan dalam hektar (ha)
- T0 : tahun pengamatan awal
- T1 : tahun pengamatan akhir

## 2. Proyeksi Penutupan Lahan tahun 2032

Tahap pemodelan dan proyeksi penutupan lahan dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *tools* MOLUSCE di dalam software QGIS. Proyeksi penutupan lahan dilakukan dengan menggunakan sistem *Artificial Neural Network* (ANN) dan model *Cellular Automata* (CA). penutupan lahan 2032 diperoleh dengan memasukkan input penutupan lahan tahun 2014, 2019, dan 2023. Simulasi model dijalankan dengan model *Cellular Automata Simulation*. Perubahan penutupan lahan didasarkan pada kesesuaian lahannya, penutupan lahan periode sebelumnya dan penutupan lahan tetangganya.

Proyeksi dilakukan dengan mengharapkan bahwa perubahan yang akan terjadi di masa depan memiliki pola dan peluang yang serupa dengan pola perubahan yang terjadi selama periode waktu yang digunakan. Selanjutnya dilakukan pembelajaran terhadap setiap informasi (input) yang diperoleh dari perubahan penutupan lahan dengan menjalankan sistem jaringan syaraf tiruan. Jaringan syaraf tiruan mempelajari pola-pola dari input yang diberikan (penutupan lahan tahun 2014 dan 2023) kemudian menghasilkan kemungkinan perubahan yang akan terjadi.

Langkah selanjutnya adalah menjalankan model *Cellular Automata* (CA) untuk mendapatkan proyeksi penutupan lahan tahun 2032. Hasil proyeksi penutupan lahan tahun 2032 yang telah diuji akurasi kemudian dioverlay dengan penutupan lahan tahun 2023, setelah itu dilihat perubahan luasan penutupan lahannya. Berikut adalah Langkah-langkah yang dilakukan dalam proyeksi pada software QGIS dengan plugin MOLUSCE:

### a. Input

Tahap input adalah proses memasukkan data ke dalam plugin, untuk kolom initial dimasukkan data penutupan lahan tahun awal (2014) dan untuk kolom final dimasukkan data penutupan lahan tahun akhir (2019), sedangkan pada kolom spasial variables dimasukkan data faktor pendorong, dimana semua data penutupan lahan dan faktor pendorong yang sudah dikonversikan ke dalam bentuk raster.

### b. Mengevaluasi Korelasi Faktor Pendorong

Pada tahap ini faktor pendorong diuji tingkat korelasi (keterkaitan) antara faktor pendorong dan penutupan lahan dengan rentang nilai 0-1, nilai 0 menunjukkan tidak ada keterkaitan, sedangkan nilai 1 menunjukkan adanya keterkaitan erat antara variabel.

### c. Perubahan Area

Tahap ini memperlihatkan penambahan dan pengurangan pada setiap penutupan lahan, selain itu juga terdapat matriks transisi peluang terjadinya perubahan yang akan terjadi.



d. *Transition Potential Modelling*

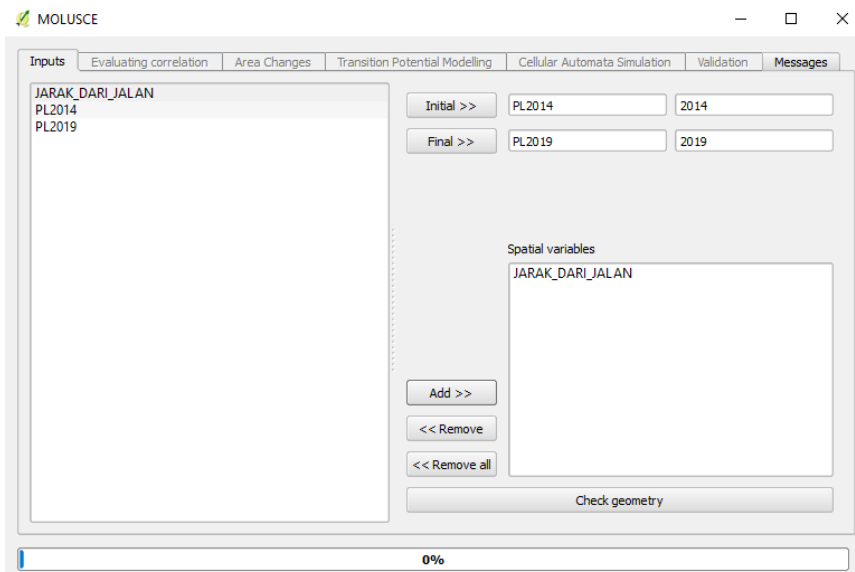
Tahap ini memilih opsi model *Artificial Neural Network* (ANN) dengan mengatur beberapa parameter, kemudian nantinya mengeluarkan nilai RMS terbaik yang berarti nilai error terkecil suatu model.

e. *Cellular Automata Simulations*

Prediksi dilakukan dengan alur yang ada dalam mollusce yaitu  $t_1 + (t_1 - t_0)$ , dimana  $t_1$  adalah tahun akhir dan  $t_0$  adalah tahun awal, maka prediksi yang dihasilkan pada penelitian ini adalah  $2019 + (2019 - 2014) = 2023$  dengan menggunakan iterasi 1, dan untuk memproyeksi penutupan lahan tahun 2023, maka iterasinya dinaikkan menjadi 3, karena rentang waktunya bertambah tiga kali lipat dari rentang waktu awal.

f. Validasi Model

Validasi model dibutuhkan sebelum menjalankan model untuk melakukan proyeksi penutupan lahan tahun 2032. Validasi dilakukan menggunakan peta penutupan lahan tahun 2014 dan 2019. Dengan input penutupan lahan tahun 2014 dan 2019 tersebut dilakukan proyeksi penutupan lahan lima tahun setelahnya yaitu penutupan lahan tahun 2023. Validasi dilakukan dengan membandingkan peta penutupan lahan tahun 2023 hasil simulasi dengan penutupan lahan tahun 2023 hasil interpretasi yang dilakukan. Apabila hasilnya saling mendekati, maka validasi dapat diterima untuk kemudian dilakukan proyeksi penutupan lahan tahun 2032. Validasi sendiri dihitung pada Molusce dengan memperhatikan nilai Kappa.

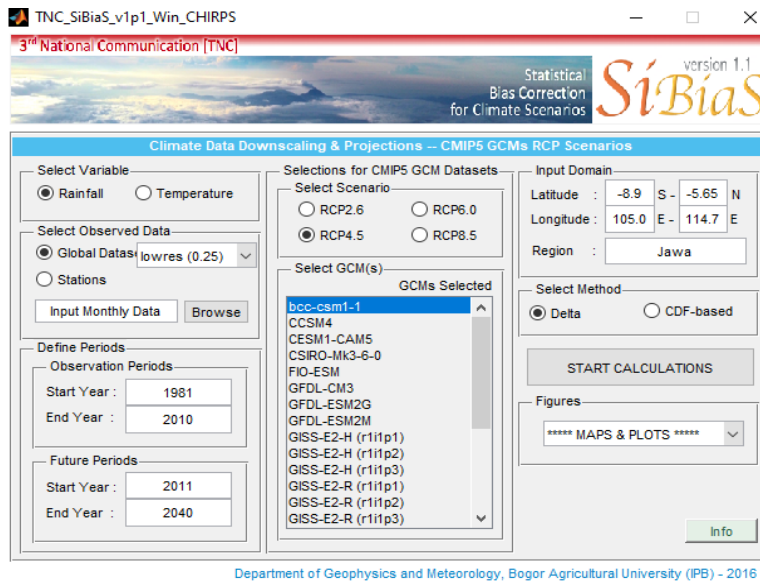


Gambar 2.2 Tampilan Antarmuka MOLUSCE

### 3. Proyeksi Perubahan Iklim

Program SiBiaS dibuat untuk membantu memudahkan perhitungan proyeksi atau skenario perubahan iklim berdasarkan downscaling data GCM (*General Circulation Models*) CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*) khususnya untuk data curah hujan dan suhu bulanan. Data GCM dari CMIP5 merupakan data yang dihasilkan oleh model iklim global yang digunakan untuk memprediksi dan memahami perubahan iklim di masa lalu, saat ini, dan masa depan. CMIP5 adalah inisiatif internasional yang menyediakan serangkaian simulasi model standar yang memungkinkan para ilmuwan untuk membandingkan dan menganalisis performa serta proyeksi berbagai model iklim. Program ini didesain untuk membantu menyiapkan data proyeksi iklim di daerah, dan grafik yang disediakan hanya bersifat untuk pengecekan hasil perhitungan. Proyeksi iklim tidak terlepas dari aspek ketidakpastian iklim masa depan, sehingga penggunaan beberapa model dapat meningkatkan kualitas proyeksi iklim. Namun demikian tidak semua model dapat digunakan, dibutuhkan studi literatur model GCM untuk menentukan model yang cocok di Indonesia. Model yang digunakan dalam penelitian ini adalah model skenario RCP4.5 CSIRO-Mk3-6-0, model tersebut dianggap sesuai dengan kondisi di Pulau Sulawesi (Barkey et al., 2019). Proyeksi iklim dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

- a. Menyiapkan data curah hujan yang diperoleh melalui tahapan pengumpulan data pada Sub Bab Pengumpulan Data Iklim.
- b. Melakukan penyesuaian terhadap inputan data berdasarkan format penyusunan data yang telah ditentukan.
- c. Data curah hujan yang telah disesuaikan kemudian diinput masuk kedalam software. Selanjutnya, secara otomatis software akan membaca data observasi yang telah dimasukkan serta secara otomatis mengkalkulasikan tahun proyeksi yang akan dihasilkan
- d. Memilih skenario yang akan digunakan, dalam penelitian ini menggunakan skenario RCP4.5 dan GCM CSIRO Mk3.6.0 dengan proyeksi menggunakan metode delta.
- e. Tahapan selanjutnya, melakukan simulasi dengan menekan *tools start calculation* pada menu. Hasil proyeksi kemudian dapat dilihat pada folder penyimpanan.



Gambar 2.3 Tampilan Antarmuka SiBias

#### 4. Analisis Hidrologi Model SWAT

Penerapan model SWAT dalam penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan data produksi air, yang dalam konteks model SWAT dikenal dengan istilah *water yield* (WYLD). *Water yield* didefinisikan sebagai jumlah total air yang dihasilkan dari suatu daerah aliran sungai (DAS) yang tersedia untuk aliran sungai, yang mencakup aliran permukaan maupun aliran bawah tanah. Dalam model SWAT, *water yield* dihitung untuk setiap sub-DAS dalam satuan milimeter (mm). Nilai *water yield* diperoleh berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan berikut (Neitsch et al., 2011).

$$\text{WYLD} = \text{SURQ} + \text{LATQ} + \text{GWQ} - \text{TLOSS} - \text{pond abstractions} \quad (7)$$

Keterangan:

- WYLD : Jumlah air efektif yang tersedia dalam suatu DAS (mm H<sub>2</sub>O)
- SURQ(Qsurf) : Jumlah aliran permukaan yang mencapai sungai utama (mm H<sub>2</sub>O)
- LATQ(Qlat) : Jumlah air yang mengalir secara lateral dibawah permukaan yang berkontribusi terhadap debit sungai (mm H<sub>2</sub>O)
- GWQ(Qwg) : Jumlah air yang mengalir di aquifer yang berkontribusi terhadap debit sungai (mm H<sub>2</sub>O)
- TLOSS : Total kehilangan air ke aquifer (mm H<sub>2</sub>O)
- pond abstractions* : Jumlah air yang hilang akibat penampungan air buatan seperti kolam atau embung

Dalam analisisnya, berikut adalah Langkah pengerjaanya:

a. Deliniasi Batas DAS

Dengan menggunakan data DEM yang telah dibuat sebelumnya. Deliniasi batas DAS dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

- 1) Membuat proyek SWAT dengan memilih menu *SWAT Project* → *New Project*, dan menyimpan file proyek di folder yang sudah disiapkan.
- 2) Menginput data DEM yang telah dibuat dengan menggunakan *menu Watershed Delineator* → *Automatic Watershed Delineation* dan memilih data DEM yang akan digunakan.
- 3) Melakukan kalkulasi data melalui menu *Watershed Delineator* → *Flow Direction and Accumulation*.
- 4) Menentukan jaringan sungai dengan menggunakan menu *Stream Network* → *Create Streams and Outlets*.
- 5) Menentukan outlet dengan menu *Whole Watershed Outlet*, kemudian menyeleksi outlet sungai pada lokasi penelitian, dan melakukan deliniasi DAS.
- 6) Melakukan perhitungan parameter sub DAS (*calculate subbasin parameter*). Dengan tahapan ini, proses deliniasi DAS telah selesai dilakukan.

b. Pembentukan *Hydrological Response Unit* (HRU)

HRU atau Unit Respon Hidrologi adalah satuan lahan atau unit lahan dengan beberapa unsur yang terbentuk dari overlay data peta penutupan lahan, peta jenis tanah, dan peta kemiringan lahan (Dzulfiqar & Sapei, 2023).

Berikut adalah tahapan dalam pembentukan HRU:

- 1) Menginput peta penutupan lahan dan jenis tanah yang telah diubah ke format raster dan menggunakan sistem koordinat UTM. Langkah awal membuat data HRU adalah dengan memilih menu *HRU Analysis* → *Land Use/Soils/Slope Definition*.
- 2) Menginput peta penutupan lahan dengan menggunakan *tools Land Use Data*, lalu memilih data penutupan lahan, *Choose Grid Fields* → *Value* → *Lookup Table*, dan memilih data tabulasi penutupan lahan yang telah dibuat dengan ekstensi .txt, kemudian *Reclassify*.
- 3) Menginput peta jenis tanah dengan menggunakan *tools Soil Data*, lalu memilih data jenis tanah, *Choose Grid Fields* → *Value* → *Soil Database Options* → *User Soil* → *Lookup Table*, dan memilih data tabulasi jenis tanah yang telah dibuat dengan ekstensi .txt, kemudian *Reclassify*.
- 4) Melakukan parameterisasi kemiringan lahan dengan menggunakan *tools Slope*, memasukkan 5 kelas kemiringan (0-8%, 8-15%, 15-25%, 25-45%, >45%), lalu *Reclassify*.
- 5) Ketiga data tersebut kemudian dioverlay untuk membentuk kombinasi informasi dari setiap data yang menjadi karakteristik pada setiap sub DAS.

HRU yang terbentuk didefinisikan dengan batas nilai sebesar 0% untuk mendapatkan jumlah kombinasi HRU yang optimal.

c. Penginputan Data Iklim Harian

Input data iklim dilakukan dengan memilih menu *Write Input Tables* dan memilih file WGN (*Weather Generator Data*) yang telah ditransformasikan sebelumnya, seperti curah hujan (pcp.txt), temperatur (tmp.txt), radiasi matahari (solar.txt), kelembaban udara (rh.txt), dan kecepatan angin (wind.txt).

d. Menjalankan dan Membaca Hasil Model

Simulasi Model SWAT dilakukan dengan menjalankan *tools "Run SWAT"* pada menu simulasi SWAT. Pada tahap ini, dilakukan pengaturan periode waktu, versi SWAT, dan besaran waktu keluaran data (harian, bulanan, atau tahunan). Selanjutnya, model SWAT dijalankan untuk menghasilkan kondisi hidrologi berupa produksi air (*Water Yield*), dan tahap ini diulang beberapa kali sesuai dengan kebutuhan penelitian. Sebelum melakukan simulasi, pastikan bahwa tahapan *Watershed Delineation*, *Analysis HRU*, *Write Input Tables*, telah selesai dijalankan dengan sukses. Setelah proses running selesai, langkah berikutnya adalah menampilkan *output* hasil simulasi dengan menggunakan menu "*Read SWAT Output*" dan menyimpan hasil simulasi melalui menu "*Save Simulations*".

e. Kalibrasi dan Validasi Model

Kalibrasi bertujuan agar output dari suatu model yang digunakan mendekati output observasi (validasi). Apabila hasil model SWAT telah memberikan gambaran yang baik terhadap hasil observasi maka hasil model tersebut dapat digunakan untuk analisis selanjutnya. Model tersebut telah cukup baik apabila hasil model SWAT memiliki kemiripan dengan hasil observasi. Menghitung nilai keakuratan suatu model dapat menggunakan indikator statistik berupa koefisien determinasi ( $R^2$ ). Nilai  $R^2$  yang mendekati 1 menunjukkan hubungan yang erat antara hasil model dengan hasil observasi (Serur & Adi, 2022). Nilai  $R^2$  untuk data debit dapat ditentukan melalui persamaan sebagai berikut:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \overline{Q_m}) \cdot (Q_{s,i} - \overline{Q_s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \overline{Q_m})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \overline{Q_s})^2}} \right]^2 \quad (8)$$

Keterangan:

$R^2$  : koefisien determinasi.

$Q_m$  : debit aktual yang terukur atau observasi ( $m^3/det$ ).

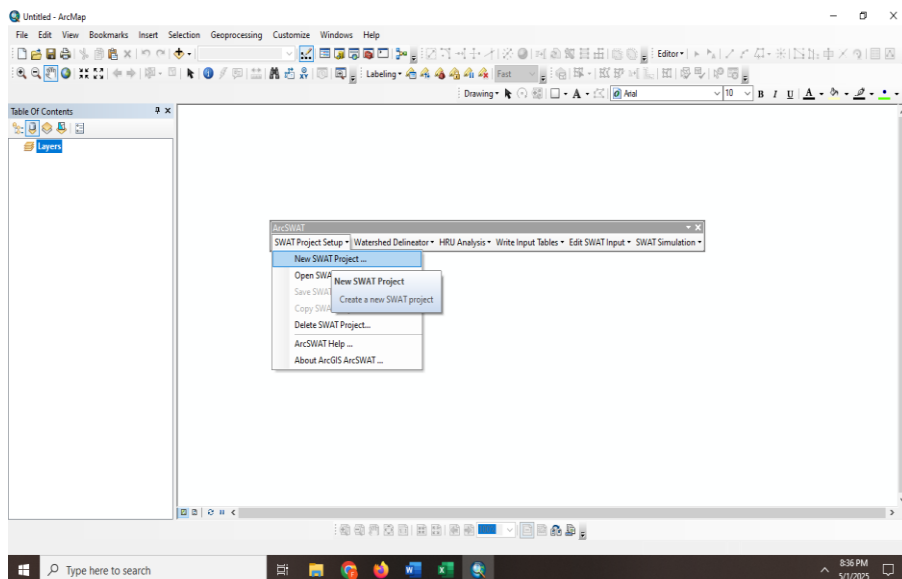
$Q_s$  : debit hasil simulasi SWAT ( $m^3/det$ ).

$Q_{m,i}$  : debit rata-rata aktual yang terukur atau observasi ( $m^3/det$ ).

$Q_{s,i}$  : debit rata-rata simulasi SWAT ( $m^3/det$ ).

#### f. Pengaturan Masukan untuk Simulasi SWAT

Setelah memperoleh model SWAT tahun 2023 di DAS Maros yang telah divalidasi dan dikalibrasi. Selanjutnya melakukan pengaturan masukan data untuk memperoleh informasi produksi air DAS Maros dengan iterasi berbeda. Dibagian pengaturan masukan data SWAT, terdapat menu SWAT Editor yang akan membantu dalam mengedit beberapa data input untuk disesuaikan dengan daerah kajian. Pada menu SWAT editor kita masukkan data penutupan lahan tahun 2014, proyeksi penutupan lahan tahun 2032, dan penggunaan lahan berdasarkan intervensi pola ruang untuk selanjutnya dilakukan simulasi model SWAT.



Gambar 2.4 Tampilan Antarmuka ArcSWAT