

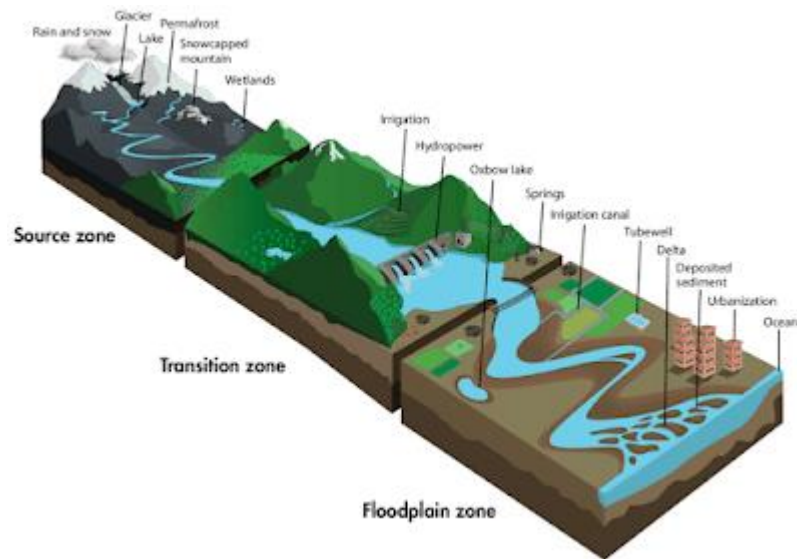
2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Daerah Aliran Sungai (DAS)

DAS merupakan satu kesatuan antara suatu wilayah daratan dengan sungai dan anak-anak sungainya, serta memiliki fungsi untuk menampung, menyimpan, dan mengalirkan air hujan ke laut atau danau (Putri dkk., 2024). DAS merupakan satuan geohidrologis alami yang berfungsi sebagai tempat berlangsungnya siklus hidrologi secara utuh, mulai dari hujan, infiltrasi, perkolasi, aliran bawah tanah, limpasan permukaan, hingga penguapan dan evapotranspirasi.

Berdasar pembagian wilayahnya DAS terbagi menjadi 3 wilayah:

1. Wilayah Hulu, yaitu bagian atas DAS yang biasanya memiliki topografi curam, berfungsi sebagai daerah tangkapan air (*catchment area*). di mana proses-proses penting seperti infiltrasi, intersepsi vegetasi, dan awal pembentukan aliran permukaan terjadi. Karena topografinya yang curam, wilayah hulu sangat rentan terhadap erosi dan longsor apabila tutupan lahannya terganggu. Oleh karena itu, keberadaan vegetasi alami seperti hutan sangat penting untuk menjaga kestabilan wilayah hulu.
2. Wilayah Tengah, empat berlangsungnya pengaliran utama dengan bentuk lahan bergelombang atau miring sedang. Di wilayah tengah, air yang berasal dari hulu mulai mengalir dalam bentuk aliran permukaan yang lebih stabil. Namun, jika pengelolaan lahan tidak tepat, wilayah tengah juga berpotensi menjadi sumber sedimen akibat limpasan air hujan dan aktivitas pertanian intensif.
3. Wilayah Hilir, bagian akhir aliran dan umumnya memiliki topografi datar, dengan risiko tinggi terhadap sedimentasi dan banjir. Umumnya, wilayah ini dimanfaatkan untuk permukiman padat penduduk, pertanian irigasi, dan aktivitas ekonomi lainnya.



Gambar 2. 1 Ilustrasi Daerah Aliran Sungai
Sumber : (Flügel dkk., 2018).

Fungsi suatu DAS merupakan fungsi gabungan yang dilakukan oleh seluruh faktor yang ada pada DAS tersebut, yaitu vegetasi, bentuk wilayah (topografi), tanah, dan permukiman. Apabila salah satu dari faktor tersebut di atas mengalami perubahan maka hal tersebut akan mempengaruhi pola ekosistem DAS. Sedangkan perubahan ekosistem yang akan menyebabkan gangguan terhadap bekerjanya fungsi DAS sehingga tidak berjalan sebagaimana mestinya. Apabila fungsi suatu DAS terganggu maka sistem penangkapan curah hujan akan menjadi tidak sempurna.

2.1.1 Bentuk DAS

Daerah Aliran Sungai (DAS) memiliki bentuk fisik yang beragam yang sangat berpengaruh terhadap karakteristik hidrologi dan respon alirannya terhadap kejadian hujan. Bentuk DAS merujuk pada konfigurasi ruang wilayah DAS yang dipengaruhi oleh topografi, geologi, dan pola jaringan drainase yang terbentuk akibat proses geomorfik dan hidrologis. Secara morfometrik, bentuk DAS dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kategori seperti berbentuk memanjang, oval, semi-oval, dan pendek/memutar (*circular*) berdasarkan indeks morfometri seperti *form factor*, *elongation ratio*, dan *circularity ratio*, yang menggambarkan sejauh mana area DAS mendekati bentuk lingkaran atau memanjang (Irawan, Setiawan, Hendra, dkk., 2024). DAS dengan bentuk yang lebih *circular* umumnya memiliki

waktu konsentrasi yang lebih pendek dan puncak debit banjir yang lebih tinggi karena seluruh limpasan dapat tiba serempak di titik muara, sementara DAS yang memanjang cenderung memiliki waktu respon yang lebih panjang dan puncak banjir yang teredam karena limpasan tersebar lebih lama (Suharyanto dkk., 2020)

2.1.2 Jaringan Sungai (*Stream Network*)

Jaringan sungai adalah elemen penting dalam sistem hidrologi yang berperan sebagai rute dan wadah untuk mengalirkan air dari sumber ke muara dan akhirnya ke laut. Secara fungsional, jaringan ini terdiri dari sungai utama dan anak-anak sungainya yang saling terkoneksi. Sungai tidak hanya berfungsi untuk mengalirkan air, tetapi juga mengangkut sedimen dan material lain dari DAS. Jaringan sungai terbentuk sebagai sistem saluran yang dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti topografi, geologi, dan ciri-ciri permukaan bumi dari daerah sekitarnya. Pola dan konfigurasi jaringan sungai mencerminkan proses aliran air di permukaan serta bagian dari morfologi DAS yang rumit, yang berdampak pada karakter aliran air di setiap sektor sungai (Maimunah dkk., 2020).

Pola jaringan sungai dapat diklasifikasikan menjadi beberapa tipe utama, seperti dendritik, radial, trellis, rektangular, dan paralel. Pola dendritik umumnya berkembang pada wilayah dengan litologi homogen dan lereng relatif landai, sedangkan pola radial sering ditemukan pada daerah berbentuk kerucut seperti gunung api. Sementara itu, pola trellis dan rektangular biasanya dipengaruhi oleh struktur geologi berupa lipatan dan patahan. Setiap tipe pola jaringan sungai mencerminkan respon sistem aliran terhadap kondisi morfologi dan geologi wilayah DAS (Pangihutan Sinaga dkk., 2016).

2.1.3 Penggunaan Lahan (*Land Use*)

Penggunaan lahan merupakan proses dinamis yang sangat memengaruhi karakteristik hidrologi suatu wilayah tangkapan air karena secara langsung mengubah sifat fisik permukaan tanah, kemampuan infiltrasi, serta distribusi aliran permukaan dan aliran bawah tanah. Dalam kajian hidrologi DAS, perubahan lahan dari vegetasi alami seperti hutan dan semak menjadi lahan terbangun, lahan pertanian atau permukiman cenderung meningkatkan luas permukaan yang kurang permeabel, sehingga menurunkan kapasitas infiltrasi air hujan dan meningkatkan

aliran permukaan (*surface runoff*) yang berdampak pada peningkatan koefisien limpasan (*runoff coefficient*) dan risiko banjir di hilir sungai (Nofita dkk., 2025). Penggunaan lahan seperti ini bukan hanya memengaruhi aliran permukaan tetapi juga mengubah komponen hidrologi lainnya seperti aliran dasar (*baseflow*) dan jaringan aliran, sehingga pemahaman serta pengelolaan penggunaan lahan menjadi aspek penting dalam pengelolaan sumber daya air di DAS untuk meminimalkan dampak negatif terhadap sistem hidrologi.

2.1.4 Jenis Tanah

Jenis tanah dan karakteristik fisiknya memainkan peran penting dalam proses infiltrasi air ke dalam tanah, yang merupakan tahap awal aliran air dari permukaan menuju zona bawah tanah. Infiltrasi dipengaruhi secara signifikan oleh tekstur tanah, yaitu proporsi partikel berukuran pasir, lanau, dan liat yang membentuk tanah. Tanah bertekstur kasar seperti pasir memiliki pori-pori besar yang memfasilitasi masuknya air dengan cepat sehingga laju infiltrasi cenderung lebih tinggi dibandingkan tanah bertekstur halus seperti liat yang memiliki pori-pori kecil dan rapat sehingga menghambat aliran air ke dalam tanah (Cleophas dkk., 2022). Hal ini menunjukkan bahwa proporsi fragmen tekstural di dalam tanah memengaruhi porositas dan kapasitas infiltrasi, di mana semakin tinggi kandungan pasir dan porositas tanah, maka kemampuan tanah dalam menyerap air semakin besar dan laju infiltrasi meningkat, sedangkan tanah dominan liat memperlambat aliran air karena pori-pori yang lebih kecil.

SWAT menggunakan database tanah seperti USDA *Soil Survey Geographic* (SSURGO/STATSGO) atau FAO *soil database*, atau data tanah nasional yang dimasukkan secara manual oleh peneliti, untuk menetapkan parameter hidrologi tanah di setiap HRU. Tekstur tanah memengaruhi konduktivitas hidrolik jenuh (K_{sat}) dan laju infiltrasi, sehingga tanah bertekstur kasar (pasir) menghasilkan infiltrasi dan perkolasi yang lebih tinggi dibandingkan tanah liat yang memiliki laju infiltrasi rendah dan cenderung menghasilkan limpasan permukaan lebih besar. Oleh karena itu, perbedaan jenis tanah dalam satu DAS dapat menghasilkan variasi yang nyata pada debit sungai, kelembapan tanah, erosi, dan sedimentasi dalam simulasi SWAT.

2.1.5 Kemiringan Lereng

Kemiringan lereng (*slope gradient*) merupakan salah satu parameter topografi yang sangat berperan dalam proses hidrologi dan dinamika permukaan tanah dalam suatu DAS, karena memengaruhi aliran permukaan, infiltrasi, serta distribusi air setelah kejadian curah hujan. Studi morfometri menunjukkan bahwa kemiringan lereng berpengaruh langsung terhadap keseimbangan antara infiltrasi dan limpasan, di mana semakin curam suatu lereng, semakin besar kecenderungan air hujan untuk bergerak cepat sebagai aliran permukaan daripada meresap ke dalam tanah, sehingga dapat meningkatkan volume *runoff* dan mempercepat waktu konsentrasi aliran di hilir DAS (Melsse dkk., 2025). Hal ini disebabkan oleh gaya gravitasi yang lebih dominan pada lereng curam sehingga air lebih cepat bergerak ke bawah permukaan dan mengurangi peluang infiltrasi, yang secara keseluruhan mengubah distribusi hidrologi di wilayah tangkapan air tersebut.

Kemiringan lereng dibagi menjadi beberapa kelas berdasarkan *Digital Elevation Model* (DEM) untuk analisis topografi dalam studi DAS atau morfometri (Riyadi dkk., 2024). Kelas-kelas ini umum dipakai dalam kajian hidrologi karena kemiringan lereng berimplikasi pada infiltrasi, laju *runoff*, erosi, dan parametrisasi GIS untuk model hidrologi seperti SWAT. Klasifikasi lereng dapat dilihat pada Tabel 2. 1.

Tabel 2. 1 Klasifikasi Kemiringan Lereng

Kelas	Kategori Kemiringan Lereng	Rentang Kemiringan (%)	Keterangan
I	Datar	0-8	Lereng relatif datar dengan aliran permukaan rendah
II	Landai	8-15	Lereng landai dengan moderat dalam studi morfologi
III	Agak Curam	15-25	Lereng moderat – lebih curam dibanding landai
IV	Curam	25-45	Lereng curam yang mempercepat aliran permukaan
V	Sangat Curam	>45	Lereng sangat curam dengan risiko erosi lebih tinggi

Sumber: (Riyadi dkk., 2024)

2.2 Hujan

2.2.1 Curah Hujan

Hujan merupakan proses turunnya air dari atmosfer ke permukaan bumi setelah uap air di udara mengalami kondensasi menjadi tetesan yang cukup besar untuk jatuh akibat gravitasi. Jumlah dan distribusi hujan sangat penting dalam hidrologi karena menjadi input utama yang mengendalikan aliran permukaan dan komponen neraca air di suatu wilayah. Presipitasi (termasuk hujan) juga merupakan proses fisik kunci yang menghubungkan iklim dan hidrologi, sehingga variasi hujan berdampak pada pola aliran, banjir, dan kekeringan dalam sistem air bumi (Liu dkk., 2017).

Curah hujan merupakan ketinggian air hujan yang jatuh pada tempat yang datar dengan asumsi tidak menguap, tidak meresap dan tidak mengalir. Curah hujan memainkan peran krusial dalam perencanaan hidrologi dan lingkungan. Kondisi meteorologis mempengaruhi curah hujan melalui intensitas, jumlah, dan durasinya (Irawan, Setiawan, Hendra, dkk., 2024). Curah hujan yang tinggi di wilayah tropik pada umumnya dihasilkan dari proses konveksi dan pembentukan awan hujan panas. Pada dasarnya curah hujan dihasilkan dari gerakan massa udara lembab keatas.

1. Curah Hujan Observasi

Data curah hujan observasi yang diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan penakar hujan (*rain gauge*) oleh lembaga resmi seperti BMKG merupakan acuan utama (*ground truth*) dengan akurasi dan resolusi temporal tinggi (skala jam hingga harian) untuk kajian hidrologi, analisis banjir, serta validasi data satelit. Pengukuran langsung ini dinilai paling andal dalam merepresentasikan kondisi fluktuasi hujan aktual di lapangan dibandingkan estimasi penginderaan jauh (Satria WD dkk., 2025). Pemanfaatan data stasiun bumi sering dihadapkan pada kendala kontinuitas dan keterbatasan spasial, karena sifatnya yang hanya berupa data titik (*point data*). Masalah seperti jumlah stasiun yang minim, distribusi jaringan yang tidak merata, fenomena data hilang (*missing data*) akibat kerusakan alat, hingga sulitnya akses di wilayah topografi kompleks, menyebabkan data

observasi kerap kurang memadai untuk analisis spasial berskala luas maupun pemodelan hidrologi jangka Panjang (Kartika dkk., 2023).

2. Curah Hujan Satelit

Data curah hujan satelit merupakan hasil estimasi penginderaan jauh yang mengonversi parameter atmosfer seperti suhu puncak awan dan radiasi gelombang mikro menjadi nilai presipitasi menggunakan algoritma tertentu, dengan produk populer seperti *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) dan kelanjutannya, *Global Precipitation Measurement* (GPM), yang menawarkan resolusi lebih tinggi (Andari & Nurhamidah, 2025). Keunggulan utama data berbasis satelit ini terletak pada cakupan spasialnya yang luas, ketersediaan data secara *near real-time*, serta kemampuan menyediakan informasi kontinu di wilayah yang minim stasiun pengamat bumi (*blank spot*) seperti kawasan pegunungan dan daerah terpencil. Oleh karena itu, data ini sangat diandalkan dalam pemodelan hidrologi, analisis perubahan iklim, dan pengisian data hilang (*missing data*). Estimasi satelit masih memiliki kelemahan berupa bias sistematis terhadap kondisi aktual di lapangan yang dipengaruhi oleh resolusi spasial, kompleksitas topografi, dan karakteristik awan lokal. Alhasil, proses validasi dan koreksi bias menggunakan data observasi permukaan (*ground truth*) tetap menjadi tahapan wajib untuk meningkatkan akurasi dan representasi fisis model (Kartika dkk., 2023).

2.2.2 Melengkapi Data Curah Hujan yang Hilang

Melengkapi kekosongan data curah hujan sangat penting untuk mencegah terjadinya bias dalam perhitungan debit banjir dan simulasi model hidrologi. Masalah hilangnya data pada stasiun pengamat biasanya terjadi akibat kerusakan alat penakar, kesalahan pencatatan, atau kendala operasional di lapangan. Guna mengatasi redundansi tersebut, estimasi data yang hilang dihitung berdasarkan interpolasi data dari stasiun-stasiun hujan terdekat yang berada dalam satu kawasan dengan karakteristik iklim dan pola distribusi hujan yang sejenis (Putri Dwi dkk., 2021).

1. Metode Rata-Rata Aljabar

Metode rata-rata aritmatika adalah cara sederhana yang digunakan untuk memperkirakan data curah hujan yang hilang dengan cara menghitung rata-rata curah hujan dari beberapa stasiun hujan di sekitarnya. Metode ini dapat digunakan jika variasi curah hujan antar stasiun tidak terlalu besar dan wilayahnya memiliki karakteristik curah hujan relatif homogen. Metode ini dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n}{n}$$

Keterangan:

$\bar{p}$ = Curah hujan yang hilang
 $p_1, p_2, p_3 \dots p_n$ = Hujan di stasiun 1, 2, 3, ..., n
 n = Jumlah stasiun hujan

2. Metode *Normal Ratio*

Metode *normal ratio* digunakan untuk melengkapi data curah hujan yang hilang dengan mempertimbangkan perbedaan rata-rata curah hujan tahunan antara stasiun yang hilang dan stasiun terdekat. Metode ini dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\frac{p_x}{N_x} = \frac{1}{n} \left(\frac{p_1}{N_1} + \frac{p_2}{N_2} + \frac{p_3}{N_3} + \dots + \frac{p_n}{N_n} \right)$$

Keterangan

p_x = Hujan yang hilang di stasiun x
 $p_1, p_2, p_3 \dots p_n$ = Data hujan di stasiun sekitarnya pada periode yang sama
 N_x = Hujan tahunan di stasiun x
 $N_1, N_2, N_3 \dots N_n$ = Hujan tahunan di stasiun sekitar x
 N = Jumlah stasiun di sekitar x

3. Metode *Inverse Distance Square* (IDS)

Metode *Inverse Distance Square* digunakan untuk melengkapi data curah hujan yang hilang mempertimbangkan jarak antar stasiun yang hilang datanya dan stasiun terdekat. Semakin dekat jarak antar stasiun, semakin besar pengaruh data stasiun tersebut dalam perkiraan curah hujan yang hilang. Metode ini dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$p_x = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{L_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i^2}}$$

Keterangan:

P_x = Hujan yang hilang di stasiun x

P_i = Data hujan di stasiun sekitarnya pada periode yang sama

L_i = Jarak antar stasiun hujan

2.2.3 Menentukan Hujan Wilayah

Penentuan hujan wilayah adalah proses menghitung curah hujan rata-rata pada suatu area, seperti Daerah Aliran Sungai (DAS), dari beberapa stasiun pengamat. Hal ini penting karena data satu stasiun hanya bersifat data titik (*point rainfall*), sementara distribusi hujan aktual bervariasi secara spasial akibat faktor topografi, angin, dan iklim. Nilai rerata wilayah ini menjadi input dasar dalam pemodelan hidrologi dan perhitungan debit banjir (Faisol dkk., 2025).

1. Metode Rerata Aritmatik (Aljabar)

Metode rerata aritmatik dilakukan dengan menjumlahkan data hujan dari beberapa stasi pengamatan baik yang berada di dalam maupun sekitar wilayah DAS, kemudian hasilnya dibagi dengan jumlah total stasiun yang digunakan.

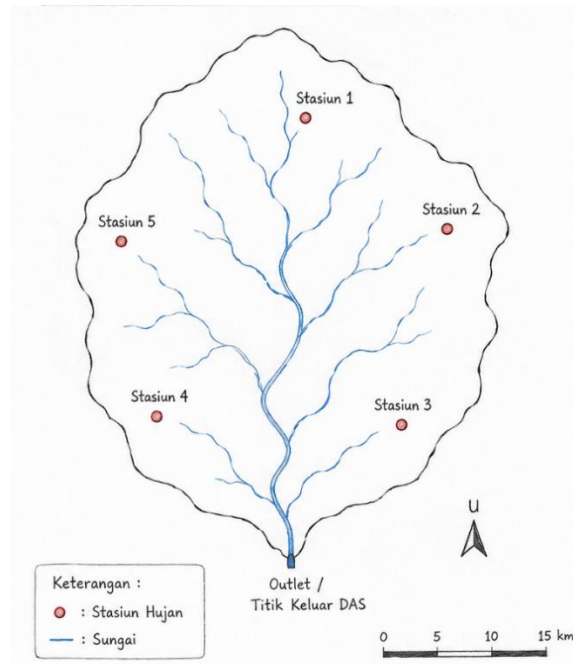
$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n}{n}$$

Keterangan:

$\bar{p}$ = Hujan rerata wilayah

$p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ = Hujan di stasiun 1, 2, 3, ..., n

n = Jumlah stasiun hujan



Gambar 2. 2 Metode Rerata Aritmatik (Aljabar)

2. Metode Poligon Thiessen

Metode poligon thiessen digunakan untuk menghitung curah hujan rata-rata di suatu wilayah dengan memperhitungkan bobot pengaruh dari setiap stasiun pengamatan. Bobot ini diperoleh dengan membagi wilayah menjadi beberapa poligon, dimana setiap poligon mewakili area pengaruh stasiun pengamatan tertentu.

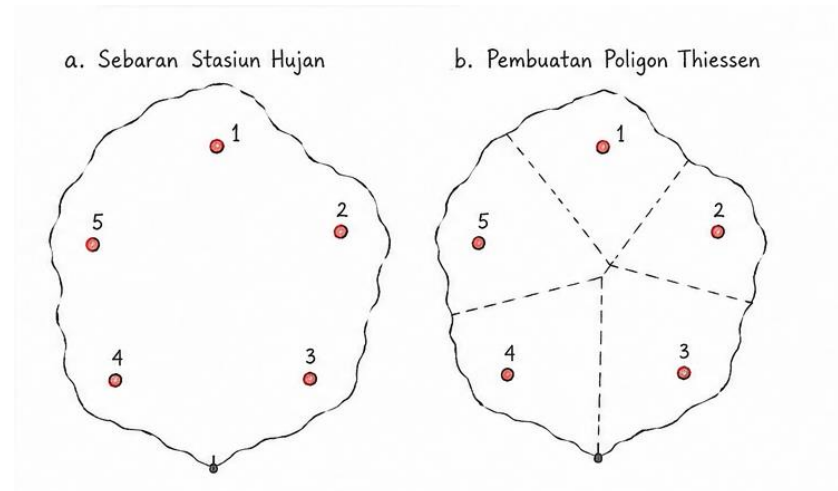
$$\bar{p} = \frac{A_1 p_1 + A_2 p_2 + \dots + A_n p_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}$$

Keterangan:

$\bar{p}$ = Hujan rerata wilayah

$p_1, p_2, \dots, p_n$ = Hujan di stasiun 1, 2, 3, ..., n

$A_1, A_2, \dots, A_n$ = luas daerah yang mewakili stasiun 1, 2, ..., n



Gambar 2. 3 Metode Poligon Thiessen

3. Metode Isohiet

Metode isohiet merupakan metode penentuan curah hujan wilayah menggunakan garis yang menghubungkan titik-titik dengan nilai curah hujan yang sama. Pada metode ini, curah hujan di antara dua garis isohiet dianggap merata dengan nilai rata-rata kedua garis tersebut. Metode isohiet dinilai lebih akurat dibandingkan metode aritmatika dan Poligon Thiessen karena mampu menggambarkan distribusi hujan secara lebih detail sesuai kondisi wilayah.

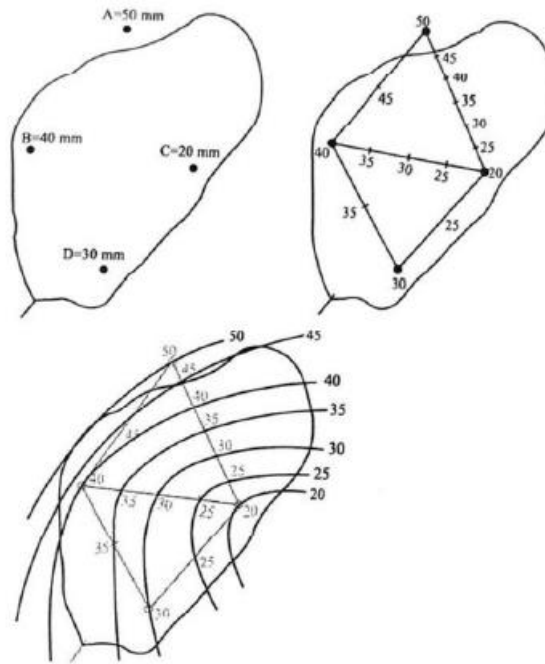
$$\bar{p} = \frac{A_1 \frac{I_1 + I_2}{2} + A_2 \frac{I_2 + I_3}{2} + \dots + A_n \frac{I_n + I_{n+1}}{2}}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}$$

Keterangan:

$\bar{p}$ = Hujan rerata wilayah

$I_1, I_2, \dots, I_n$ = Garis isohiet ke 1, 2, ..., n, n+1

$A_1, A_2, \dots, A_n$ = Luas daerah yang dibatasi oleh garis isohiet ke 1 dan 2, dan 3, ..., n dan n+1



Gambar 2. 4 Metode Isohiet

2.3 Suhu

Suhu adalah ukuran kuantitatif dari tingkat panas atau energi termal suatu benda atau lingkungan. Dalam konteks klimatologi dan hidrologi, suhu berperan sangat penting karena memengaruhi berbagai proses atmosfer dan hidrologis, seperti penguapan (evaporasi), transpirasi tanaman, kelembaban udara, hingga pembentukan awan dan hujan. Semakin tinggi suhu udara, semakin banyak energi yang tersedia untuk mengubah air dari cairan menjadi uap, yang kemudian dapat membentuk awan dan jatuh kembali sebagai hujan. Suhu juga mengatur aktivitas biologis, termasuk proses evapotranspirasi dari vegetasi. Suhu dapat didefinisikan secara mikroskopik berkaitan dengan gerakan molekul sedemikian rupa sehingga semakin besar kecepatan molekul makin tinggi suhunya (Fadholi, 2013).

Suhu yang lebih tinggi memungkinkan udara menahan lebih banyak uap air, yang dapat menyebabkan curah hujan yang lebih tinggi. Namun, jika curah hujan yang cukup tidak diimbangi, peningkatan suhu dapat menyebabkan kekeringan yang berkepanjangan. Akibatnya, perubahan suhu global yang disebabkan oleh perubahan iklim menempatkan sistem hidrologi di bawah tekanan yang signifikan, terutama di daerah yang rentan terhadap perubahan iklim seperti daerah aliran sungai.

2.4 Analisis Perubahan Iklim dengan Metode *Statistical Downscaling*

2.4.1 Perubahan Iklim

Perubahan iklim merupakan fenomena yang memengaruhi distribusi curah hujan dan intensitas hujan ekstrem, yang pada gilirannya berdampak pada komponen hidrologi seperti ketersediaan air di berbagai wilayah. Perubahan iklim global berpengaruh terhadap temperatur suhu, kelembaban relatif, lama penyinaran matahari, kecepatan angin, curah hujan, dan debit sungai (Irawan, Setiawan, Wildan Alfaridzi, dkk., 2024)

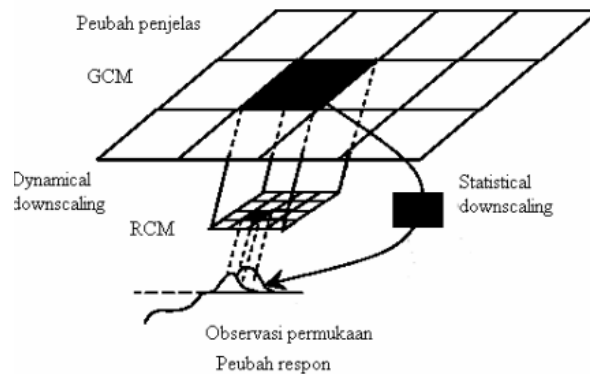
Perubahan iklim merujuk pada pergeseran pola cuaca jangka panjang yang diakibatkan oleh aktivitas manusia maupun fenomena alam (Malau dkk., 2025). Perubahan iklim yang disebabkan banyak faktor berdampak pada curah hujan yang turun. Pada musim kering curah hujan berkurang sedangkan pada musim basah curah hujan tinggi. Pada kedua kondisi tersebut membawa dampak negatif berupa kekeringan pada musim kering dan banjir di pada musim hujan (Sari dkk., 2020).

2.5 *Global Climate Models* (GCM)

Model Iklim Global (*Global Climate Models*/GCM) menghasilkan proyeksi iklim pada resolusi spasial yang relatif kasar (sekitar 150 –200 km). Resolusi ini tidak memadai untuk analisis dampak iklim di tingkat lokal, seperti perencanaan sumber daya air, pertanian, atau mitigasi bencana. Maka dibutuhkan *downscaling* untuk mengkonversi data iklim skala besar menjadi informasi yang relevan pada skala lokal. *Downscaling* adalah proses dalam studi iklim yang bertujuan menerjemahkan model iklim global dengan resolusi spasial kasar menjadi informasi iklim yang lebih detail dan relevan pada skala lokal atau regional (Halik dkk., 2023).

Dalam pemodelan *statistical downscaling* hubungan statistik dibangun antara variabel skala besar (*predictor*) dengan variabel iklim lokal (*predictand*) yang diobservasi. Statistik ini kemudian digunakan untuk menghasilkan proyeksi kondisi lokal dari output GCM, yang secara komputasi lebih efisien dan praktis untuk aplikasi hidrologi regional (Benestad, 2021). Hasil dari model *statistical downscaling* secara langsung berkaitan dengan statistik iklim pada waktu

sebelumnya yang dapat memberikan ramalan untuk waktu yang akan datang dalam berbagai perubahan iklim.



Gambar 2. 5 Ilustrasi *downscaling*

Secara prinsip, *statistical downscaling* bertujuan menyusun sebuah fungsi matematis yang menggambarkan hubungan antara kondisi atmosfer skala besar dan kondisi iklim lokal. Fungsi ini dapat diwakili melalui model regresi statistik:

$$Y_t = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_{i,t} + \varepsilon_t$$

Dimana

Y_t : prediktan pada waktu t

$X_{i,t}$: prediktor skala besar ke- i pada waktu t

β_0, β_i : koefisien regresi

ε_t : galat residual

Di sini, asumsi utama adalah bahwa pola hubungan statistik antara prediktor dan prediktan yang diperoleh dari masa lalu dapat digunakan untuk meramalkan masa depan. Namun, untuk memastikan bahwa model tahan terhadap perubahan iklim, asumsi ini perlu diuji secara menyeluruh melalui proses kalibrasi dan validasi (Wilby dkk., 2002).

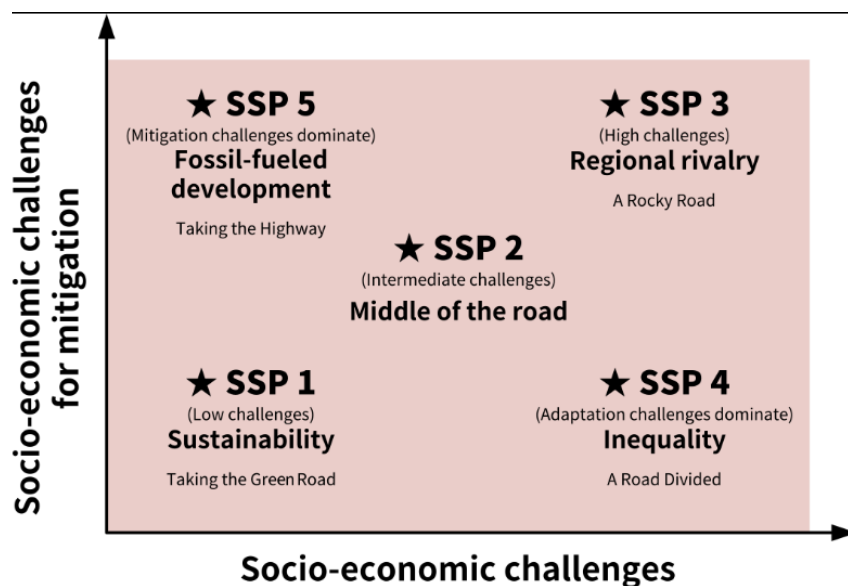
Dalam praktik *statistical downscaling*, prediktor merupakan variabel skala besar yang diperoleh dari reanalisis atau output GCM, yang mencerminkan kondisi atmosfer global seperti tekanan permukaan, kelembaban, suhu, angin, dan

geopotential height pada beberapa level atmosfer. Sedangkan predikitan adalah variabel iklim lokal yang diukur di stasiun meteorologi, seperti curah hujan dan suhu maksimum/minimum, yang menjadi sasaran proyeksi di tingkat lokal.

2.5.1 *Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)*

Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) merupakan sebuah skenario perubahan iklim yang disusun untuk mengetahui bagaimana faktor-faktor sosio ekonomi dapat memberikan pengaruh terhadap perubahan iklim. Faktor-faktor ini didalamnya termasuk populasi, pertumbuhan ekonomi, pendidikan, urbanisasi dan perkembangan teknologi (Hausfather, 2019).

Skenario SSP didasarkan pada lima narasi yang menggambarkan kecenderungan sosioekonomi yang membentuk masyarakat di masa depan. Kelima narasi tersebut ialah *sustainability* (SSP1), *middle of the road* (SSP2), *regional rivalry* (SSP3), *inequality* (SSP4) dan *fossil-fueled development* (SSP5) (Riahi dkk., 2017). Berbagai kemungkinan iklim masa depan dengan lima skenario emisi inti, mulai dari SSP1-1.9 (emisi sangat rendah), SSP1-2.6 (rendah) dan SSP2-4.5 (menengah), hingga SSP3-7.0 (tinggi) dan SSP5-8.5 (sangat tinggi). Proyeksi yang andal sangat penting dalam memproyeksikan perubahan iklim di masa depan.



Gambar 2. 6 Ilustrasi *Shared Socioeconomic Pathways*
(Sumber: IPCC, 2021)

Skenario SSP dapat dikombinasikan dengan berbagai jalur emisi, sehingga menghasilkan proyeksi iklim masa depan yang lebih kompleks dan beragam. Melalui kerangka SSP, dapat dianalisis bagaimana pilihan pembangunan, perilaku masyarakat, serta arah kebijakan akan memengaruhi tingkat emisi dan upaya pencapaian target Perjanjian Paris. Dengan mempertimbangkan dimensi adaptasi dan mitigasi secara bersamaan, skenario SSP menyediakan dasar bagi penelitian yang lebih komprehensif serta mendukung pengambilan keputusan kebijakan yang lebih tepat. Secara keseluruhan, kerangka SSP memungkinkan analisis bagaimana berbagai faktor sosial–ekonomi ikut membentuk dinamika perubahan iklim di masa depan (Hausfather, 2019).

2.5.2 *Statistical Downscaling Model (SDSM)*

Statistical Downscaling Model (SDSM) adalah salah satu model untuk pendugaan curah hujan dan suhu. SDSM adalah model statistik yang digunakan untuk menganalisis hubungan antara data berskala global dengan data berskala lokal. SDSM didasarkan pada hubungan empiris antara data GCM sebagai data global dengan data stasiun sebagai data lokal. SDSM tersusun atas kovariat dengan skala besar dan multikolinearitas (Butar-butur dkk., 2019).

Pada umumnya pendekatan SD melibatkan data deret waktu (t) dan data spasial GCM (g). Banyaknya peubah Y , peubah X , lapisan atmosfer dalam model dan autokorelasi serta kolinearitas pada peubah Y maupun X menunjukkan kompleksitas model. Hubungan fungsional sirkulasi atmosfer global dengan unsur-unsur iklim lokal memiliki bentuk umum seperti berikut:

$$Y_{t,p} = f(X_{t,q}, g)$$

Dengan:

- Y : peubah-peubah iklim global
- X : peubah-peubah luaran GCM
- t : periode waktu
- p : banyaknya peubah Y
- q : banyaknya peubah X

g : banyaknya grid domain GCM

Evaluasi kinerja model dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan tiga parameter statistik, yaitu koefisien determinasi (R^2), *Percent Bias* (Pbias), dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Nilai R^2 digunakan untuk mengukur sejauh mana keselarasan antara data hasil simulasi model dengan data observasi, di mana nilai yang mendekati 1 mengindikasikan tingkat akurasi yang sempurna. Sementara itu, Pbias diterapkan untuk mendeteksi kecenderungan model dalam menghasilkan nilai yang lebih tinggi (*overestimate*) atau lebih rendah (*underestimate*) dari data aktual, dengan nilai mendekati 0,0 sebagai indikator akurasi terbaik. Terakhir, RMSE digunakan untuk menilai standar deviasi dari galat model; semakin kecil nilai RMSE, semakin tinggi tingkat presisi model yang dihasilkan.

Model *Statistical Downscaling* akan memberikan hasil yang baik jika memenuhi tiga syarat utama, yaitu:

1. Hubungan antara respon (skala lokal) dengan prediktor (skala global) harus kuat untuk menjelaskan keragaman iklim lokal dengan baik.
2. Perubahan prediktor harus disimulasikan dengan baik oleh GCM.
3. Hubungan antara respon dan prediktor tidak berubah dengan adanya perubahan waktu dan tetap sama meskipun ada perubahan iklim di masa depan.

Dalam model ini, metode regresi dan stokastik digunakan untuk menunjukkan hubungan empiris antara data prediksi dan observasi serta prediktor CMIP6. Dua jenis deret waktu, deret waktu yang diamati dan deret waktu prediktor, diperlukan untuk melakukan SDSM. Dataset pertama berisi area yang diprediksi, seperti suhu dan curah hujan, sedangkan dataset kedua berfungsi sebagai prediktor dari model iklim skala global. Secara keseluruhan, selama periode kalibrasi dan validasi, SDSM memperkirakan curah hujan rata-rata dengan sangat baik. Namun, korelasi antara curah hujan yang diamati dan yang diperkirakan tidak begitu baik.

2.6 Pemodelan Hidrologi dengan *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT)

Hidrologi merupakan cabang ilmu yang mengeksplorasi gerakan, penyebaran, dan sifat kuantitas air yang ada di permukaan bumi, di bawah tanah, serta di atmosfer, sekaligus interaksi antara proses tersebut dengan lingkungan fisik dan manusia. Dalam studi hidrologi, air dianggap sebagai elemen penting dalam

siklus yang selalu bergerak melalui berbagai proses seperti curah hujan, penyusupan, penguapan, aliran permukaan, dan sungai (Sun & Xia, 2023).

Hidrologi mempelajari pergerakan, distribusi, dan sifat air di permukaan, bawah tanah, dan atmosfer serta interaksinya dengan lingkungan dan manusia. Air dipahami sebagai bagian dari siklus hidrologi melalui proses hujan, infiltrasi, penguapan, dan aliran. Variasi hidrologi memengaruhi pola aliran sungai dan distribusi air dalam DAS. Kajian hidrologi modern juga menyoroti dampak perubahan iklim dan penggunaan lahan terhadap variabel hidrologi, seperti evapotranspirasi, hujan ekstrem, dan pola aliran sungai. Pemodelan menunjukkan bahwa perubahan iklim dapat mengubah komponen neraca air, sehingga integrasi hidrologi dan analisis iklim penting untuk pengelolaan sumber daya air berkelanjutan.

2.6.1 Ketersediaan Air

Ketersediaan air (*water availability*) dalam konteks hidrologi merujuk pada jumlah air yang tersedia di suatu wilayah untuk berbagai keperluan, baik itu untuk kebutuhan domestik, irigasi, industri, maupun fungsi ekosistem. Ketersediaan ini merupakan hasil dari neraca air yang mencakup input (curah hujan), perubahan penyimpanan (tanah, tanah air, badan air), dan output (evapotranspirasi dan aliran keluar). Suatu DAS yang sehat akan memiliki keseimbangan antara input dan output air sehingga ketersediaan air relatif stabil sepanjang tahun. Namun, perubahan penggunaan lahan yang tidak terkendali dan variasi iklim dapat menyebabkan fluktuasi yang signifikan, seperti debit sungai yang sangat tinggi pada musim hujan tetapi sangat rendah pada musim kemarau, yang berdampak langsung pada ketersediaan air bagi masyarakat dan ekosistem (Joleha dkk., 2017).

2.6.1.1 Debit Aliran

Debit aliran merupakan ukuran volumetrik laju aliran air yang melewati suatu penampang sungai per satuan waktu, biasanya dinyatakan dalam meter kubik per detik (m^3/s). Debit ini mencerminkan akumulasi semua komponen aliran yang memasuki sungai, termasuk aliran permukaan, aliran bawah permukaan (*interflow*), dan aliran dasar (*baseflow*) yang hadir sebagai respons terhadap curah hujan di suatu DAS. Besaran debit sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisik DAS seperti

topografi, jenis tanah, penggunaan lahan, serta intensitas dan distribusi curah hujan; oleh karena itu, debit aliran sering digunakan sebagai indikator utama dalam kajian hidrologi dan manajemen sumber daya air untuk menilai kapasitas sungai dalam mengalirkan air selama musim hujan maupun musim kemarau. Studi empiris menunjukkan bahwa besarnya debit serta variabilitasnya sepanjang tahun perlu dianalisis dalam perencanaan sumber air dan mitigasi banjir agar pemanfaatan air dapat sesuai dengan kebutuhan masyarakat dan ekosistem setempat (Fahriana dkk., 2023).

Dalam penelitian hidrologi, analisis debit aliran juga sering dikaitkan dengan debit puncak yang terjadi saat kejadian hujan ekstrem, karena kondisi puncak ini berimplikasi pada desain infrastruktur hidrologi seperti jembatan, saluran, dan sistem drainase (Marupah & Virayani, 2022). Debit puncak yang tinggi dapat menunjukkan respon cepat aliran terhadap hujan intensif, dan sering kali menunjukkan dinamika sistem DAS yang sensitif terhadap perubahan penggunaan lahan dan tuntutan lingkungan.

2.6.1.2 Limpasan Permukaan

Limpasan permukaan (*surface runoff*) terjadi ketika curah hujan yang jatuh di suatu wilayah melebihi kemampuan infiltrasi tanah, dan kelebihan air itu bergerak di atas permukaan menuju sungai atau saluran lainnya. Limpasan merupakan komponen utama dari debit sungai dan sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor fisik DAS seperti kemiringan lereng, tekstur tanah, penggunaan lahan, serta intensitas hujan. Penelitian (Ikhwan dkk., 2022) menunjukkan bahwa ketika tanah jenuh air atau infiltrasi tidak mampu menampung jumlah hujan, maka air akan segera berubah menjadi limpasan permukaan yang meningkatkan laju aliran sungai.

Besarnya limpasan permukaan dipengaruhi oleh intensitas hujan, kapasitas infiltrasi tanah, tutupan vegetasi, kemiringan lereng, dan kondisi penggunaan lahan. Pada wilayah dengan tanah kedap air atau daerah terbangun, limpasan permukaan cenderung lebih tinggi dibanding daerah berhutan atau vegetasi rapat karena infiltrasi yang lebih rendah. Limpasan permukaan berperan penting dalam proses hidrologi karena berkaitan erat dengan debit puncak banjir, erosi tanah, dan transport sedimen dalam sistem DAS (Yousuf dkk., 2015).

2.6.2 Geographic Information System (GIS)

Geographic Information System (GIS) adalah suatu sistem berbasis komputer yang dirancang untuk mengelola data yang memiliki informasi spasial melalui pengumpulan, penyimpanan, manipulasi, analisis, hingga visualisasi data untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis ruang. GIS mampu mengintegrasikan data lokasi dengan data atribut non-spasial sehingga fenomena yang terletak di permukaan bumi dapat dianalisis secara ruang dan temporal dengan tingkat ketelitian yang tinggi, bukan hanya sekadar menampilkan peta. Dalam konteks aplikasi ilmiah, GIS dapat memproses informasi geografis untuk berbagai tujuan, seperti analisis lingkungan, perencanaan tata ruang, pengelolaan sumber daya alam, dan manajemen risiko bencana dengan menggabungkan data dari berbagai sumber untuk menghasilkan output yang informatif dan relevan bagi pengambil keputusan berdasarkan konteks geografisnya (Dara Chaniago & Muhamad Taki, 2022).

Dalam praktiknya, GIS digunakan untuk mengintegrasikan data dari berbagai sumber sehingga menghasilkan peta digital dan analisis yang akurat sesuai kebutuhan penelitian atau aplikasi lapangan. Sebagai contoh, GIS telah diimplementasikan dalam pemetaan infrastruktur telekomunikasi untuk meningkatkan efisiensi layanan di daerah terpencil, menunjukkan bagaimana GIS dapat membantu perencanaan dan peningkatan layanan masyarakat secara nyata (Khoridatul Huda dkk., 2024).

GIS semakin banyak digunakan dalam penelitian dan aplikasi geospasial karena kemampuannya mengelola serta menganalisis data yang memiliki referensi lokasi. Sebagai contoh, perangkat lunak QGIS merupakan salah satu *software* GIS sumber terbuka (*open-source*) yang umum digunakan untuk memproses data vektor dan raster secara efektif. QGIS menyediakan beragam alat analisis spasial, pemetaan, serta pengolahan data yang mendukung fungsi dasar SIG, seperti *overlay*, *buffering*, dan klasifikasi, sehingga dapat digunakan pada berbagai kebutuhan seperti perencanaan wilayah, pemantauan lingkungan, serta mitigasi bencana. Selain itu, QGIS juga mampu membaca dan menyimpan berbagai format geospasial populer seperti shapefile, GeoTIFF, dan KML, serta menyediakan modul ekstensi (*plugins*) yang memperluas fungsi utamanya, termasuk untuk analisis hidrologi, statistik ruang, dan pemodelan jaringan sungai (Leeuw dkk., 2020).

Perangkat lunak GIS seperti QGIS dilengkapi dengan alat kartografi yang memungkinkan pengguna membuat peta tematik yang informatif dan estetik, serta menyediakan modul untuk georeferensi data sehingga peta atau citra dapat disesuaikan dengan sistem koordinat yang benar. Kemampuan ini tidak hanya berguna untuk visualisasi, tetapi juga untuk mengintegrasikan data non-spasial ke dalam konteks geografi yang diperlukan dalam penelitian. Alih fungsi QGIS sebagai platform analisis spasial yang ramah pengguna dan bebas biaya lisensi menjadikan software ini sangat relevan untuk penelitian akademik maupun profesional, terutama di bidang pengelolaan sumber daya alam, kajian DAS, perencanaan tata ruang, serta proyek infrastruktur (Leeuw dkk., 2020)

2.6.3 *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*

Model *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) merupakan suatu model hidrologi yang dibangun oleh Dr. Jeff Arnold untuk USDA *Agricultural Research Services* (ARS) yang digunakan untuk mengevaluasi dan menilai kualitas suatu DAS dengan berbagai luasan di Amerika. SWAT dikembangkan untuk memprediksi dampak praktik – praktik manajemen lahan terhadap debit, sedimen maupun residu kimia pertanian pada suatu DAS yang kompleks dengan berbagai variasi jenis tanah, penggunaan lahan pada suatu periode waktu tertentu. Model ini dapat digunakan sebagai alat untuk memilih tindakan yang tepat guna menyelesaikan permasalahan di DAS tersebut (Karim dkk., 2014).

SWAT merupakan alat simulasi hidrologi yang banyak digunakan untuk menganalisis dampak perubahan iklim terhadap sumber daya air di berbagai wilayah, termasuk di Indonesia. SWAT mampu mensimulasikan aliran air, erosi tanah, dan kualitas air dengan mempertimbangkan berbagai skenario perubahan iklim dan penggunaan lahan.

Model SWAT terdiri dari empat tahap, yaitu pembentukan delineasi wilayah, pembentukan Hydrologic Response Units (HRUs), pembentukan input data, serta proses kalibrasi dan validasi (Nugraheni dkk., 2019). Delineasi wilayah menghitung besaran akumulasi aliran dan arah aliran melalui topografi. Hasil delineasi ini berupa batas daerah tangkapan air situ yang terbentuk bernama

subbasin, terbentuk juga jaringan sungai dan titik-titik outlet di setiap percabangan sungai yang ada.

1. HRUs tutupan lahan dan jenis tanah di klasifikasi ulang ulang ke dalam standar SWAT berdasarkan karakteristik dan penamaan. HRU yang terbentuk kemudian dikelompokkan di setiap wilayah sub basin.
2. Pembentukan input data SWAT untuk data generator iklim (*weather generator data*) dilakukan dengan memasukkan data-data iklim yang meliputi data iklim, data curah hujan harian rata-rata, serta data suhu maksimum dan minimum harian rata-rata.
3. Kalibrasi dan validasi model dilakukan dengan cara mengubah nilai parameter yang bersifat sensitif dan mempunyai pengaruh besar terhadap proses hidrologi yang diukur lalu simulasi kembali dilakukan untuk melihat perubahan output model yang terjadi dalam *file* *rch*.

2.7 Optimasi Pemodelan SDSM-SWAT untuk Prediksi Dampak Perubahan Iklim 2050

Pemodelan dampak perubahan iklim terhadap hidrologi DAS secara akurat memerlukan penggabungan data iklim masa depan dengan model hidrologi skala lokal, di mana pendekatan SDSM dan SWAT menjadi salah satu metode yang banyak diadopsi dalam kajian ilmiah internasional. Model SDSM digunakan untuk *downscale* data iklim dari model global (GCM) yang memiliki resolusi spasial kasar menjadi data iklim harian beresolusi tinggi yang sesuai dengan kebutuhan model SWAT di tingkat DAS. Pendekatan ini memungkinkan prediksi curah hujan dan temperatur masa depan di bawah skenario emisi tertentu seperti RCP/SSP, sehingga memudahkan pemodelan respons hidrologi terhadap perubahan iklim hingga tahun 2050 atau lebih (Singh & Thawait, 2022).

Proses optimasi model SDSM-SWAT mencakup beberapa tahapan penting seperti kalibrasi, validasi, dan evaluasi kinerja model sebelum digunakan untuk simulasi masa depan. Kalibrasi SWAT dengan data historis memastikan bahwa parameter model merefleksikan kondisi nyata hidrologi di DAS, sedangkan SDSM dilatih menggunakan data observasi iklim untuk menurunkan output GCM menjadi skenario iklim lokal yang realistis. Optimasi dilakukan untuk meminimalkan kesalahan prediksi dan meningkatkan kemampuan model dalam mereplikasi

variabilitas hidrologi, yang penting untuk memproyeksikan *streamflow*, evapotranspirasi, dan variabel lainnya secara valid hingga periode 2050 (Singh & Thawait, 2022).

Kombinasi SDSM dan SWAT yang dioptimalkan tidak hanya membantu dalam memprediksi dampak perubahan iklim terhadap kuantitas air seperti debit sungai dan ketersediaan air, tetapi juga terhadap dinamika sedimentasi dan kualitas air, karena model SWAT secara fisik merepresentasikan aliran permukaan, perkolasi, dan aliran dasar. Dalam studi (Singh & Thawait, 2022) di Southern Ontario, Kanada, integrasi SDSM-SWAT menunjukkan perubahan mendasar dalam pola *streamflow* serta pergeseran musiman aliran puncak akibat perubahan iklim yang diproyeksikan, menunjukkan bahwa masa depan hidrologi DAS dapat berubah secara signifikan dibandingkan dengan data historis.

Selain itu, optimasi pemodelan SDSM-SWAT memungkinkan penggunaan multi-model GCM dan skenario emisi yang berbeda untuk meminimalkan ketidakpastian proyeksi iklim masa depan. Beberapa penelitian lain juga menekankan pentingnya penggunaan beberapa skenario iklim dan metode *downscaling* untuk menangkap rentang kemungkinan respons hidrologi yang lebih luas terhadap perubahan iklim, sehingga prediksi hingga tahun 2050 menjadi lebih *robust* dan dapat dipakai sebagai dasar kebijakan pengelolaan air dan mitigasi bencana (Woyessa, 2024).

Dalam sebuah penelitian, optimasi SDSM-SWAT dapat dilengkapi dengan analisis sensitivitas dan evaluasi parameter untuk menentukan parameter kunci yang paling memengaruhi kinerja model di DAS yang diteliti. Analisis ini penting karena mempengaruhi output model seperti debit aliran, limpasan permukaan, dan ketersediaan air di masa depan. Dengan memahami sensitivitas parameter, peneliti dapat menyesuaikan strategi kalibrasi untuk menghasilkan prediksi yang lebih akurat di bawah skenario perubahan iklim sampai tahun 2050, sehingga hasilnya dapat digunakan untuk rekomendasi adaptasi dan manajemen sumber daya air yang berbasis bukti ilmiah.