

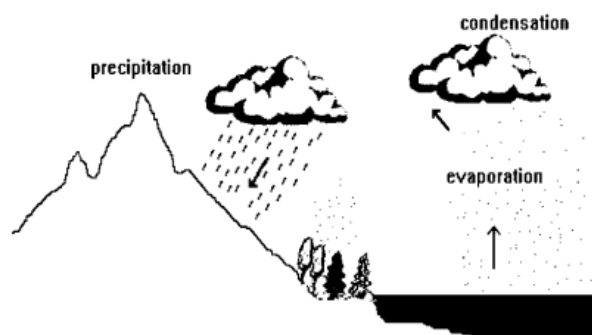
2 LANDASAN TEORI

2.1 Hujan

Hujan adalah salah satu bentuk dari presipitasi yang terjadi akibat turunnya air dari atmosfer ke permukaan bumi. Presipitasi ini dapat berupa hujan, hujan salju, kabut, embun, dan hujan es. Proses pembentukan hujan dimulai dari uap air yang terdapat di atmosfer. Bentuk dan jumlahnya dipengaruhi oleh berbagai faktor iklim seperti angin, temperatur, dan tekanan atmosfer. Uap air tersebut akan naik ke atmosfer sehingga mendingin dan terjadi kondensasi menjadi butir-butir air dan kristal-kristal es yang akhirnya jatuh sebagai hujan (Triatmodjo, 2008).

Hujan merupakan sumber utama bagi air yang mengalir di sungai dan air yang tersimpan di dalam tampungan alami maupun buatan. Jumlah dan variasi debit sungai tergantung pada jumlah, intensitas, dan distribusi hujan di wilayah tertentu. Proses terbentuknya hujan secara umum terdiri dari tiga tahapan utama yaitu evaporasi, kondensasi, dan presipitasi yang disajikan dalam Gambar 2.1 (Nasir dkk., 2017).

Air hujan yang jatuh ke suatu permukaan bumi akan dicatat dan kemudian disebut sebagai curah hujan. Jumlah air yang jatuh di permukaan bumi dapat diukur dengan menggunakan alat penakar hujan. Distribusi hujan dalam ruang dapat diketahui dengan mengukur hujan di beberapa lokasi pada daerah yang ditinjau sedangkan untuk distribusi waktu dapat diketahui dengan mengukur hujan sepanjang waktu (Triatmodjo, 2008).



Gambar 2.1 Tahapan terjadinya hujan

2.2 Curah Hujan

Curah hujan merupakan jumlah air hujan yang jatuh di permukaan tanah datar selama periode tertentu. Data curah hujan diperoleh melalui pengukuran dengan menggunakan alat penakar hujan. Hasil pengukuran tersebut dinyatakan dalam satuan milimeter (mm). Curah hujan 1 mm adalah jumlah air hujan yang jatuh di permukaan per satuan luas (m^2) dengan catatan tidak ada yang menguap, meresap atau mengalir (Aldrian dkk., 2011).

Curah hujan merupakan salah satu parameter cuaca yang mana datanya sangat penting diperoleh untuk kepentingan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) pihak pemerintah dan swasta yang berkepentingan dengan pengelolaan sumber daya air, pengendalian banjir, dan pengelolaan infrastruktur dibutuhkan juga oleh masyarakat khususnya dalam bidang pertanian, perencanaan pembangunan, dan mitigasi bencana alam. Curah hujan memiliki peran penting dalam perencanaan hidrologi dan lingkungan. Kondisi meteorologis mempengaruhi curah hujan melalui intensitas, jumlah, dan durasinya (Irawan dkk., 2024). Jumlah hujan yang jatuh di permukaan bumi dianggap terdistribusi secara merata pada seluruh daerah tangkapan air dinyatakan dalam satuan mm.

Intensitas hujan adalah jumlah curah hujan dalam suatu waktu yang biasanya dinyatakan dalam mm/jam, mm/hari, mm/bulan, dan mm/tahun yang sering disebut hujan jam-jaman, harian, mingguan, bulanan, dan tahunan. Curah hujan diukur dengan tujuan untuk mengetahui jumlah, intensitas, dan distribusi hujan di suatu wilayah tertentu. Pengukuran tersebut dapat menggunakan dua cara yang berbeda yaitu pada pengukuran langsung dengan alat di lapangan dan penginderaan jauh oleh satelit di luar angkasa. Keadaan hujan dan intensitas hujan umumnya dibedakan menjadi 5 tingkatan sesuai intensitasnya seperti yang disajikan pada Tabel 2.1. Data hujan biasanya disimpan dalam satu hari dan berkelanjutan (Triatmodjo, 2008).

Tabel 2.1 Keadaan Hujan dan Intensitas Hujan

Keadaan Hujan	Intensitas Hujan (mm)	
	1 Jam	24 Jam
Hujan sangat ringan	<1	<5
Hujan ringan	1 - 5	5 - 20

Keadaan Hujan	Intensitas Hujan (mm)	
	1 Jam	24 Jam
Hujan normal	5 - 10	20 - 50
Hujan lebat	10 - 20	50 - 100
Hujan sangat lebat	>20	>100

2.2.1 Curah Hujan Observasi

Curah hujan observasi adalah jumlah air hujan yang jatuh pada suatu area tertentu yang diukur secara langsung menggunakan alat pengukur curah hujan dalam jangka waktu tertentu seperti penakar hujan. Data hasil observasi ini dianggap lebih akurat karena mengukur curah hujan secara langsung di lokasi tertentu. Namun, terdapat banyak tantangan dalam pengumpulan data curah hujan yang spesifik secara spasial dan temporal. Hal ini disebabkan oleh distribusi stasiun pengamatan yang tidak merata terutama di wilayah-wilayah yang sulit diakses. Selain itu, ketersediaan data deret waktu curah hujan juga terbatas dan jumlah stasiun pengamatan yang terbatas. Alat penakar hujan dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu penakar hujan biasa (*manual raingauge*) dan penakar hujan otomatis (*automatic raingauge*) (Triatmodjo, 2008).

1. Alat penakar hujan biasa (*manual raingauge*)

Alat penakar hujan manual merupakan alat pengukur curah hujan yang beroperasi secara konvensional dengan alat yang digunakan biasanya berbentuk corong yang mengarahkan air hujan ke dalam wadah penampung untuk diukur menggunakan gelas ukur oleh petugas pengamat. Dalam pengukuran menggunakan penakar hujan manual, curah hujan dengan jumlah kurang dari 1 mm dicatat sebagai 0,0 mm dan jika tidak ada hujan yang dicatat maka dapat dicatat dengan simbol garis (-). Pengamatan ini umumnya dilakukan setiap hari dan pembacaan data biasanya dilakukan pada pagi hari sehingga hujan tercatat adalah hujan yang terjadi selama satu hari sebelumnya yang disebut hujan harian. Namun, alat ini memiliki keterbatasan tidak dapat mencatat waktu durasi hujan maupun intensitas hujan (Triatmodjo, 2008).

2. Alat penakar hujan otomatis (*automatic raingauge*)

Alat penakar hujan otomatis adalah alat pengukur curah hujan yang dilengkapi dengan sistem otomatisasi berbasis sensor dan teknologi elektronik. Alat

ini mengukur hujan secara kontinu sehingga dapat diketahui intensitas hujan dan lama waktu hujan secara *real-time* dengan pemantauan secara lebih akurat dan efisien. Alat penakar hujan otomatis terdapat tiga jenis yaitu alat penakar hujan jenis pelampung, alat penakar hujan jenis timba jungkit, dan alat penakar hujan jenis timbangan (Triatmodjo, 2008).

2.2.2 Curah Hujan Satelit

Curah hujan satelit adalah pengukuran curah hujan yang menggunakan teknologi penginderaan jauh melalui sensor berbasis satelit. Sensor ini mampu mendeteksi radiasi elektromagnetik yang dipantulkan dari permukaan bumi termasuk dari awan yang mengandung hujan. Pengamatan ini melibatkan dua jenis sensor utama yaitu gelombang mikro (*microwave*) dan sensor inframerah (*infrared*). Sensor gelombang mikro memiliki kemampuan untuk menembus awan dan mengukur distribusi serta intensitas hujan di dalamnya, sementara sensor inframerah mengamati suhu puncak awan di mana suhu yang lebih mengindikasikan potensi curah hujan (Nasir dkk., 2017).

Curah hujan satelit memungkinkan pemantauan curah hujan secara global dengan cakupan spasial luas yang memungkinkan untuk wilayah yang sulit dijangkau atau tidak memiliki stasiun pengamatan darat. Data curah hujan satelit juga dapat diperoleh secara *real-time* dengan resolusi temporal dan spasial yang relatif tinggi serta data dapat lebih akurat berdasarkan reanalisis data model numerik. Reanalisis data model numerik ini merupakan estimasi data curah hujan yang dihasilkan melalui kombinasi antara observasi aktual dari berbagai sumber seperti stasiun cuaca, satelit, dan radiosonde dengan model numerik atmosfer. Proses pembentukan data reanalisis melibatkan metode asimilasi data di berbagai pengamatan yang tersebar secara geografis dan temporal digabungkan ke dalam model numerik menggunakan algoritma tertentu. Namun, terdapat beberapa keterbatasan pengukuran ini sering kali terkendala oleh bias dan kesalahan estimasi. Oleh karena itu, data curah hujan dari satelit perlu divalidasi dan dikalibrasi untuk meningkatkan akurasi dan memastikan kesesuaian data satelit dengan data observasi (Moges dkk., 2022). Produk curah hujan satelit banyak tersedia untuk pengukuran yaitu dari *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) dengan model *Global Precipitation Measurement* (GPM) dan *NASA Prediction of*

Worldwide Energy Resources (POWER) yang telah menunjukkan performa baik untuk berbagai kebutuhan analisis iklim dan hidrologi (Permana dkk., 2021).

Pemilihan produk satelit GPM didasarkan pada kemampuannya dalam menyediakan data curah hujan dengan resolusi spasial dan temporal yang tinggi sehingga dapat menangkap variabilitas curah hujan secara lebih detail. Sementara itu, NASA POWER digunakan karena menyediakan data atmosfer dan meteorologi berbasis satelit yang berguna untuk berbagai aplikasi, termasuk permodelan hidrologi dan analisis iklim. Oleh karena itu, penggunaan data GPM dan NASA POWER dalam penelitian membantu memberikan analisis sebagai alternatif untuk memahami pola cuaca dan perubahan iklim dengan lebih baik.

GPM adalah misi penginderaan jauh yang dikembangkan oleh NASA dan *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) sebagai kelanjutan dari misi sebelumnya *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) yang diliris pada 27 Februari 2014 dengan tujuan utama untuk meningkatkan pengukuran curah hujan secara global baik dari segi cakupan geografis maupun akurasi pengukuran dan penggabungan radar hujan frekuensi ganda yang meningkatkan estimasi bentuk, ukuran, dan distribusi hidrometeor gelombang mikro dengan saluran frekuensi gelombang mikro yang tinggi. Penambahan data yang tersedia ini akan meningkatkan pendeteksian hujan lebat, hujan ringan, dan salju (Hobouchian dkk., 2017).

Data GPM tersedia dari Maret 2014 hingga saat ini. GPM terdiri dari instrumen GPM *Microwave Imager* (GMI) dan *Dual Precipitation Radar* (DPR). DPR dapat mengukur intensitas curah hujan secara vertikal sedangkan untuk GMI merupakan sensor yang mengukur radiasi gelombang mikro dari awan dan tetesan hujan. Algoritma ini bertujuan untuk mengkalibrasi, melampirkan, menginterpolasi perkiraan curah hujan dari data gelombang mikro dan IR, dan data penakar hujan secara optimal dengan resolusi spasial $0,1^\circ$ (~ 10 km) dan resolusi temporal 30 menit. Data GPM ini beroperasi beberapa kali dalam setiap waktu pengamatan dengan beberapa tipe yaitu *early run*, *late run*, dan *final run* (Huffman dkk., 2017).

NASA POWER adalah sistem penginderaan jauh yang dirancang untuk menyediakan data cuaca dan klimatologi berbasis satelit yang dikembangkan oleh NASA. Data ini berbasis pada model reanalisis atmosfer dengan kombinasi dari

data observasi dan data penginderaan jauh yang dikalibrasi dengan data satelit diolah menggunakan model *Global Forecast System* (GFS) dan *Modern -Era Retrospective analysis for Research and Applications* (MERRA-2). Data tersebut diproses dan disediakan dalam tiga format temporal yaitu bulanan, harian, dan perjam. Data yang tersedia diantaranya curah hujan (*precipitation*), suhu (*temperature*), kelembapan relatif (*relative humidity*), kecepatan dan arah angin (*wind speed and wind direction*), dan radiasi matahari (*solar radiation*). Data yang disediakan NASA POWER memiliki resolusi spasial $0,5^\circ$ (~ 50 km) yang memungkinkan pemantauan iklim secara global dengan cakupan yang luas. Data NASA POWER ini dapat dimanfaatkan dalam penelitian untuk mendukung di sektor pertanian, energi terbarukan, dan penelitian iklim (Darman dkk., 2024).

2.3 Melengkapi Data Curah Hujan Hilang

Hilangnya data curah hujan disebabkan oleh berbagai faktor seperti kesalahan dalam pencatatan atau gangguan sistem di stasiun otomatis menyebabkan data hilang, alat pengukur hujan yang rusak atau tidak berfungsi dengan baik, sehingga data tidak tercatat, dan hujan dengan intensitas sangat rendah mungkin tidak terdeteksi oleh alat. Melengkapi data curah hujan yang hilang dapat dilakukan dengan berbagai metode tergantung pada ketersediaan data, durasi kehilangan, serta karakteristik curah hujan di wilayah tersebut. Metode yang umum digunakan meliputi pendekatan statistik seperti rata-rata aritmatika, metode *normal ratio*, dan interpolasi spasial seperti *Inversed Square Distance* (Prawaka dkk., 2016).

1. Metode Rata-Rata Aritmatika

Metode rata-rata aritmatika adalah cara sederhana yang digunakan untuk memperkirakan data curah hujan yang hilang dengan menghitung rata-rata curah hujan dari beberapa stasiun hujan di sekitarnya. Metode ini cocok digunakan jika variasi curah hujan antar stasiun tidak terlalu besar dan wilayahnya memiliki karakteristik curah hujan relatif homogen. Metode ini tidak mempertimbangkan perbedaan elevasi atau faktor geografis lainnya, hasil estimasi dapat memiliki tingkat akurasi yang lebih rendah pada wilayah dengan variasi curah hujan yang tinggi. Metode ini dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.1.

$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n}{n} \quad 2.1$$

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 lebih akurat dibandingkan rata-rata aritmatika, terutama di wilayah dengan variasi curah hujan yang besar. Curah hujan yang hilang dihitung dengan mengalikan rasio antara rata-rata curah hujan tahunan stasiun hilang dan stasiun lainnya. Meskipun lebih tepat, metode ini memerlukan data rata-rata curah hujan tahunan yang tidak selalu tersedia dan kurang efektif jika hubungan antarstasiun tidak kuat. Metode ini dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.2.

$$\frac{p_x}{N_x} = \frac{1}{n} \left(\frac{p_1}{N_1} + \frac{p_2}{N_2} + \frac{p_3}{N_3} + \dots + \frac{p_n}{N_n} \right) \quad 2.2$$

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 hujan di sekitar x

3. Metode *Inversed Square Distance*

Metode *Inverse Square Distance* digunakan untuk melengkapi data curah hujan yang hilang dengan mempertimbangkan jarak antara stasiun yang hilang datanya dan stasiun terdekat. Semakin dekat jarak antara stasiun, semakin besar pengaruh data stasiun tersebut dalam perkiraan curah hujan yang hilang. Metode ini memberi bobot lebih pada stasiun yang lebih dekat dan cocok untuk wilayah dengan distribusi stasiun merata. Metode ini dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.3.

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{L_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i^2}} \quad 2.3$$

Keterangan:

P_x = Hujan yang hilang di stasiun x

P_i = Data hujan di stasiun sekitarnya pada periode yang sama

L_i = Jarak antara stasiun hujan

2.4 Penentuan Hujan Wilayah

Penentuan curah hujan wilayah merupakan proses untuk memperkirakan atau menghitung hujan rata-rata di suatu wilayah dengan mempertimbangkan data dari beberapa stasiun hujan di sekitarnya dan dapat mengatasi masalah distribusi spasial hujan yang tidak merata akibat perbedaan topografi. Penentuan curah hujan wilayah berperan penting dalam analisis hidrologi dan pengelolaan sumber daya air. Oleh karena itu, diperlukan metode penentuan curah hujan wilayah yang dapat dilakukan dengan tiga metode berikut yaitu metode rerata aritmatik (aljabar), metode poligon Thiessen, dan metode isohiet (Triatmodjo, 2008).

2.4.1 Metode Rerata Aritmatik (Aljabar)

Metode rerata aritmatik merupakan metode paling sederhana untuk menghitung curah hujan rata-rata di suatu wilayah. Metode ini dilakukan dengan menjumlahkan data curah hujan dari beberapa stasiun pengamatan baik yang berada di dalam maupun sekitar wilayah DAS seperti pada Gambar 2.2 kemudian hasilnya dibagi dengan jumlah total stasiun yang digunakan. Metode ini cocok digunakan untuk wilayah dengan distribusi stasiun yang merata dan kondisi topografi yang relatif seragam. Hujan wilayah dapat dihitung dengan persamaan 2.4 (Triatmodjo, 2008).

$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n}{n} \quad 2.4$$

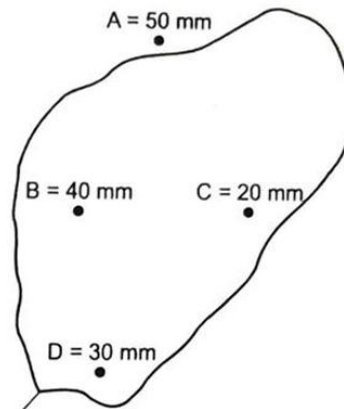
Keterangan:

$\bar{p}$ = 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 (Triatmodjo, 2008) menyajikan metode rerata aritmatik dengan menampilkan sebuah area tidak beraturan yang memiliki beberapa titik pengukuran (A, B, C, dan D) dengan nilai tertentu dalam satuan milimeter.



Gambar 2.2 Sebaran Stasiun Hujan di DAS

2.4.2 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. Poligon tersebut dibentuk dengan membuat garis tegak lurus di tengah-tengah garis penghubung antara dua stasiun curah hujan yang berdekatan seperti pada Gambar 2.3. Pada suatu luasan di dalam DAS dianggap bahwa hujan adalah sama dengan yang terjadi pada stasiun yang terdekat, sehingga hujan yang tercatat pada stasiun mewakili luasan tersebut. Metode ini dapat digunakan untuk penelitian berdasarkan bobot PCH (Cho dkk., 2009). Hitungan curah hujan rerata dilakukan dengan memperhitungkan daerah pengaruh dari tiap stasiun dengan persamaan 2.5 sebagai berikut (Triatmodjo, 2008).

$$\bar{p} = \frac{A_1 p_1 + A_2 p_2 + \dots + A_n p_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad 2.5$$

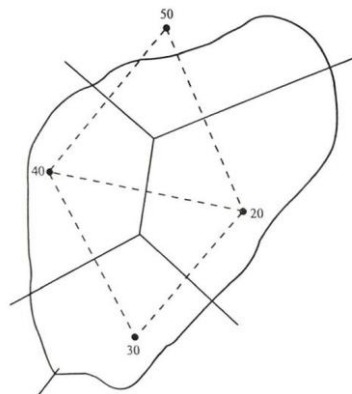
Keterangan:

$\bar{p}$ = 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 (Triatmodjo, 2008) menyajikan untuk penentuan metode poligon Thiessen yang digunakan untuk menentukan wilayah pengaruh dari titik-titik pengukuran dalam suatu area tidak beraturan.



Gambar 2.3 Metode Poligon Thiessen

2.4.3 Metode Isohiet

Isohiet adalah garis yang menghubungkan titik-titik dengan kedalaman hujan yang sama seperti yang dilakukan dengan prosedur seperti pada Gambar 2.4. Pada metode isohiet wilayah di antara dua garis isohiet dianggap memiliki curah hujan yang merata dengan nilai curah hujan yang setara dengan rata-rata dari kedua garis isohiet tersebut. Proses penentuan curah hujan wilayah menggunakan metode ini mirip dengan pembuatan topografi. Metode ini lebih akurat dibandingkan dengan metode aritmatika dan poligon Thiessen. Hujan rerata tersebut dapat dilakukan berdasarkan persamaan 2.6 berikut (Triatmodjo, 2008).

$$\bar{p} = \frac{A_1 \frac{I_1 + I_2}{2} + A_1 \frac{I_2 + I_3}{2} \dots + A_2 \frac{I_n + I_n}{2}}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad 2.6$$

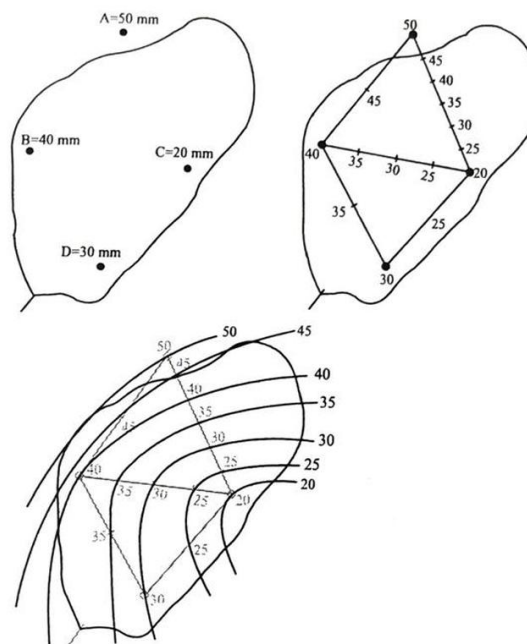
Keterangan:

$\bar{p}$ = 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, 2 dan 3...,
n dan n+1

Gambar 2.4 (Triatmodjo, 2008) menyajikan penentuan metode Isohiet ditampilkan tiga tahap utama yaitu titik pengukuran dengan nilai tertentu, proses interpolasi antar titik, dan pembuatan garis isohiet yang menghubungkan nilai yang sama untuk menggambarkan distribusi spasial parameter.



Gambar 2.4 Metode Isohiet

2.5 Analisis Statistik terhadap Akurasi Curah Hujan

Analisis statistik terhadap akurasi curah hujan adalah proses evaluasi yang bertujuan untuk mengukur tingkat kesesuaian antara data curah hujan yang diprediksi seperti yang diperoleh dari data dari satelit atau model reanalisis dengan data observasi yang diperoleh dari stasiun cuaca di lapangan. Proses ini sangat penting untuk memastikan kualitas dan keandalan data prediksi dengan cara menilai sejauh mana data yang dihasilkan mendekati data observasi yang sebenarnya. Selain itu, analisis ini juga berfungsi untuk mengidentifikasi adanya bias dalam data prediksi serta menilai kesesuaian pola spasial dan temporal antara data prediksi dan data observasi (Masood dkk., 2023). Proses analisis statistik ini melibatkan

beberapa pendekatan antara lain analisis kuantitatif, analisis biner deteksi hujan, dan analisis volumetrik.

2.5.1 Analisis Kuantitatif

Analisis kuantitatif merupakan metode evaluasi yang bertujuan untuk mengukur tingkat kesesuaian antara data hasil prediksi seperti data dari model satelit dengan data observasi yang diperoleh dari stasiun cuaca. Analisis ini menggunakan parameter statistik berbasis perhitungan numerik untuk menghitung kesalahan atau bias antara data prediksi dengan data observasi. Pendekatan ini mengasumsikan bahwa hasil perhitungan dapat dihitung tanpa mempertimbangkan elemen ketidakpastian atau probabilistik. Pada evaluasi data curah hujan digunakan untuk mengukur keakuratan model prediksi dalam mempresentasikan pola hujan aktual (Masood dkk., 2023). Beberapa metrik statistik yang digunakan untuk analisis ini meliputi:

1. *Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)*

Nilai NSE dapat mengukur seberapa baik nilai prediksi dari model menjelaskan variabilitas dalam data observasi dengan membandingkan kesalahan prediksi model dengan variabilitas data observasi dari rata-rata. Rentang nilai NSE berkisar antara $-\infty$ hingga 1, dimana nilai $NSE=1$ menunjukkan prediksi sepenuhnya sesuai dengan data observasi, nilai $0 < NSE < 1$ menunjukkan model memiliki kemampuan lebih baik daripada rata-rata observasi tetapi masih terdapat kesalahan, nilai $NSE=0$ menunjukkan model sama sekali tidak lebih baik dari rata-rata observasi, model hanya mengulangi nilai rata-rata observasi, dan nilai $NSE < 0$ menunjukkan model memiliki kinerja yang lebih buruk daripada rata-rata observasi (Moriassi dkk., 1983). Nilai NSE dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.7.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{obs}} - Y_{i\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{obs}} - \overline{Y_{i\text{obs}}})^2} \quad 2.7$$

Keterangan :

n = jumlah total data

$Y_{i\text{obs}}$ = nilai observasi ke- i

$Y_{i\text{sim}}$ = nilai simulasi ke- i

$\overline{Y_{i\text{obs}}}$ = nilai rata-rata observasi

Tabel 2.2 (Moriassi dkk., 1983) disajikan untuk menginterpretasikan kategori nilai NSE yang diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori untuk memberikan pemahaman mengenai tingkat akurasi dan keandalan model.

Tabel 2.2 Kategori Nilai NSE

Interpretasi NSE	Nilai
Sempurna	1
Lebih baik	$0 < \text{NSE} < 1$
Kurang baik	0
Tidak baik	$\text{NSE} < 0$

2. Root Mean Square Error (RMSE)

RMSE adalah metrik statistik yang digunakan untuk mengukur rata-rata penyimpangan antara nilai prediksi suatu model dengan nilai observasi dalam satuan yang sama dengan aslinya. RMSE memberikan informasi yang menunjukkan nilai total kesalahan prediksi dalam model. Semakin kecil nilai RMSE, maka semakin baik kinerja model dalam mempresentasikan data observasi secara akurat. Nilai $\text{RMSE}=0$ menunjukkan performa model yang sempurna, di mana setiap prediksi model sesuai dengan nilai observasi, sebaliknya jika nilai $\text{RMSE}>0$ maka semakin besar nilai, semakin besar pula tingkat kesalahan antara nilai prediksi dan observasi (Liu dkk., 2020). Nilai RMSE dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.8.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{obs}} - Y_{i\text{sim}})^2}{n}} \quad 2.8$$

Keterangan:

n = jumlah total data

$Y_{i\text{obs}}$ = nilai observasi ke- i

$Y_{i\text{sim}}$ = nilai simulasi ke- i

3. Mean Bias Error (MBE)

MBE adalah metrik evaluasi yang digunakan untuk mengidentifikasi arah dan besaran bias sistematis dalam suatu model. MBE membantu memahami apakah

model secara konsisten melebih-lebihkan (*overestimate*) atau meremehkan (*underestimate*) nilai sebenarnya. Model dianggap mengalami *overestimate* jika nilai $MBE > 0$, sedangkan *underestimate* terjadi jika nilai $MBE < 0$, namun jika nilai $MBE = 0$ menunjukkan tidak ada bias sistematis dalam model, tetapi perlu evaluasi tambahan untuk mengukur akurasi keseluruhan model (Liu dkk., 2020). Perhitungan nilai MBE dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.9.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{i\text{sim}} - Y_{i\text{obs}}) \quad 2.9$$

Keterangan:

n = jumlah total data

$Y_{i\text{obs}}$ = nilai observasi ke-i

$Y_{i\text{sim}}$ = nilai simulasi ke-i

4. Koefisien Korelasi (r)

Koefisien korelasi adalah ukuran statistik yang digunakan untuk mengevaluasi kekuatan dan arah hubungan linear antara dua variabel. Dalam evaluasi data curah hujan koefisien korelasi digunakan untuk menilai sejauh mana nilai prediksi memiliki hubungan yang konsisten dengan nilai observasi. Semakin tinggi nilai koefisien korelasi, semakin baik kesesuaian antara nilai prediksi dan observasi yang menunjukkan bahwa model atau metode yang digunakan memiliki tingkat keakuratan yang tinggi. Nilai koefisien korelasi dapat dihitung dengan persamaan 2.10 (Liu dkk., 2020).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{obs}} - \overline{Y_{i\text{obs}}}) (Y_{i\text{sim}} - \overline{Y_{i\text{sim}}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{obs}} - \overline{Y_{i\text{obs}}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{sim}} - \overline{Y_{i\text{sim}}})^2}} \quad 2.10$$

Keterangan:

n = jumlah total data

$Y_{i\text{obs}}$ = nilai observasi ke-i

$Y_{i\text{sim}}$ = nilai simulasi ke-i

$\overline{Y_{i\text{obs}}}$ = nilai rata-rata observasi

$\overline{Y_{i\text{sim}}}$ = nilai rata-rata simulasi

Tabel 2.3 (Pratama dkk., 2022) disajikan untuk menginterpretasikan kategori nilai koefisien korelasi yang menunjukkan tingkat hubungan antara dua variabel yang diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori.

Tabel 2.3 Kategori Nilai Koefisien Korelasi (r)

Tingkat Hubungan	Interval Koefisien
Sangat Lemah	0,00 - 0,199
Lemah	0,20 - 0,399
Sedang	0,40 - 0,599
Kuat	0,60 - 0,799
Sangat Kuat	0,80 - 1,000

2.5.2 Analisis Biner

Analisis biner merupakan metode analisis data yang bertujuan untuk pengelompokan atau mengklasifikasikan kejadian ke dalam dua kategori utama. Analisis biner dalam evaluasi curah hujan digunakan untuk mengevaluasi kejadian curah hujan dengan fokus pada pemodelan atau analisis apakah suatu peristiwa curah hujan terjadi atau tidak dalam suatu periode waktu tertentu berdasarkan ambang batas tertentu tanpa mempertimbangkan besaran curah hujan yang lebih rinci.

Proses analisis biner melibatkan penggunaan matriks kontingensi untuk menyajikan hasil klasifikasi data berdasarkan dua kategori biner, seperti prediksi dan observasi. Metrik ini sering kali berbentuk tabel kontingensi 2x2 yang menggambarkan hubungan antara dua variabel kategorikal. Tabel ini membantu memberikan ringkasan kejadian hasil prediksi dan observasi dengan penjelasan detail terdapat pada Tabel 2.4 sehingga memudahkan penghitungan metrik evaluasi seperti *Probability of Detection* (POD), *False Alarm Ratio* (FAR), dan *Critical Success Index* (CSI) (Liu dkk., 2020).

Tabel 2.4 Kontingensi Kategorikal Metrik

Prediksi	Observasi	
	Hujan	Tidak Hujan
Hujan	<i>Hit</i> (H)	<i>False Alarm</i> (FAR)
Tidak Hujan	<i>Miss</i> (M)	<i>Correct Negative</i> (CN)

Berdasarkan Tabel 2.4 setiap elemen dalam tabel kontingensi dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Hit* (H) : Merupakan jumlah kejadian di mana prediksi menyatakan "hujan terjadi" dan dalam kenyataannya memang hujan benar-benar terjadi. Elemen ini menunjukkan tingkat keberhasilan model dalam memprediksi kejadian hujan secara akurat.
- Miss* (M) : Menggambarkan jumlah kejadian di mana model memprediksi "tidak ada hujan" tetapi dalam kenyataannya hujan benar-benar terjadi. Elemen ini mengindikasikan kelemahan model dalam mendeteksi kejadian hujan.
- False Alarm* (FAR) : Menunjukkan jumlah kejadian di mana model memprediksi "hujan terjadi" tetapi kenyataannya tidak terjadi hujan. Elemen ini mencerminkan kesalahan model dalam menghasilkan peringatan palsu.
- Correct Negative* (CN) : Menunjukkan jumlah kejadian di mana model memprediksi "tidak ada hujan" dan kenyataannya hujan memang tidak terjadi. Elemen ini mencerminkan keberhasilan model dalam memprediksi tidak adanya kejadian hujan.

Penghitungan metrik evaluasi seperti POD, FAR, dan CSI dilakukan untuk menilai kinerja suatu model dalam mendeteksi kejadian tertentu. Ketiga metrik ini digunakan secara bersamaan untuk mengevaluasi keandalan dan akurasi suatu model dalam mendeteksi kejadian yang diprediksi. Penjelasan mengenai masing-masing metrik dijelaskan sebagai berikut:

1. *Probability of Detection* (POD)

POD merupakan metrik evaluasi yang digunakan untuk menilai kemampuan suatu model atau sistem dalam mendeteksi kejadian positif yang benar-benar terjadi. Dalam konteks prediksi cuaca, POD mengindikasikan seberapa baik model dapat memprediksi kejadian hujan dibandingkan dengan kejadian hujan yang

sebenarnya terjadi. Nilai POD berada dalam rentang antara 0 hingga 1 yang dapat dinyatakan dalam persen (%), di mana semakin tinggi nilai POD, semakin baik kemampuan model dalam mendeteksi kejadian hujan dan tidak mempertimbangkan jumlah prediksi salah. Evaluasi terhadap model dapat dilakukan menggunakan persamaan 2.11 (Liu dkk., 2020).

$$POD = \frac{H}{H + M} \quad 2.11$$

2. False Alarm Ratio (FAR)

FAR merupakan metrik evaluasi yang digunakan untuk mengukur seberapa sering model memprediksi kejadian yang tidak terjadi. Metrik menggambarkan proporsi prediksi hujan yang ternyata tidak terjadi hujan (*false alarm*) dibandingkan dengan semua prediksi hujan yang dibuat oleh model. Nilai FAR berada pada rentang 0 hingga 1 yang dapat dinyatakan dalam persen (%) di mana semakin rendah nilai FAR, semakin akurat model dalam memprediksi kejadian hujan dengan sedikit kesalahan dalam memprediksi hujan. Nilai FAR dapat diketahui berdasarkan perhitungan dari persamaan 2.12 (Liu dkk., 2020).

$$FAR = \frac{F}{H + F} \quad 2.12$$

3. Critical Success Index (CSI)

CSI adalah metrik evaluasi yang digunakan untuk mengukur kinerja model prediksi, terutama dalam konteks kejadian langka seperti hujan atau fenomena cuaca ekstrem. CSI mengkombinasikan informasi dari *hit*, *miss*, dan *false alarm* untuk memberikan gambaran tentang seberapa baik model dalam mendeteksi kejadian positif (misalnya, hujan) dan menghindari kesalahan prediksi. Nilai CSI berada pada rentang 0 hingga 1 yang dapat dinyatakan dalam persen (%), nilai CSI yang lebih tinggi menunjukkan bahwa model lebih baik dalam memprediksi kejadian hujan dengan sedikit kesalahan (*miss* atau *false alarm*). Perhitungan nilai CSI dapat menggunakan persamaan 2.13 (Liu dkk., 2020).

$$CSI = \frac{H}{H + M + F} \quad 2.13$$

2.5.3 Analisis Volumetrik

Analisis volumetrik dalam evaluasi curah hujan merupakan metode yang digunakan untuk mengukur dan menganalisis volume curah hujan yang jatuh di dalam periode waktu tertentu. Metrik ini berfokus pada evaluasi prediksi curah hujan dengan mempertimbangkan volume curah hujan yang dihasilkan oleh model serta perbandingannya dengan data observasi. Analisis ini sangat penting untuk pengelolaan sumber daya air dan evaluasi potensi banjir karena mempertimbangkan jumlah air yang masuk ke dalam sistem drainase atau waduk. Beberapa metode perhitungan yang digunakan seperti *Volumetric Hit Indeks* (VHI), *Volumetric False Alarm Ratio* (VFAR), dan *Volumetric Critical Success Index* (VCSI) dengan $Y_{i\text{ sim}}$ merupakan estimasi curah hujan prediksi, $Y_{i\text{ obs}}$ menunjukkan curah hujan observasi, n merupakan jumlah total data, i merupakan jumlah sampel, dan t menunjukkan nilai ambang batas untuk terjadi hujan 1 mm dan tidak hujan <1 mm. (Liu dkk., 2020).

1. *Volumetric Hit Indeks* (VHI)

VHI adalah metrik evaluasi yang digunakan untuk mengukur seberapa baik model dalam memprediksi volume curah hujan yang benar-benar terjadi di suatu wilayah dibandingkan dengan volume curah hujan yang terjadi menurut data observasi. Metrik ini memperhitungkan volume hujan (bukan hanya kejadian hujan) dalam mengukur kinerja prediksi. Nilai VHI dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.14 dengan rentang nilai 0 hingga 1, dimana angka 1 merupakan nilai sempurna (Liu dkk., 2020).

$$VHI = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{ sim}} | (Y_{i\text{ sim}} > t \& Y_{i\text{ obs}} > t))}{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{ sim}} | (Y_{i\text{ sim}} > t \& Y_{i\text{ obs}} > t)) + \sum_{i=1}^n (Y_{i\text{ obs}} | (Y_{i\text{ sim}} \leq t \& Y_{i\text{ obs}} > t))} \quad 2.14$$

2. *Volumetric False Alarm Ratio* (VFAR)

VFAR adalah metrik yang digunakan untuk mengukur proporsi volume curah hujan yang diprediksi oleh model tetapi tidak terjadi (*false alarm*). VFAR memperhitungkan volume curah hujan yang salah diprediksi oleh model dan dibandingkan dengan total volume yang diprediksi sebagai hujan. Rentang nilai

VFAR berada pada 0 hingga 1, dimana nilai 0 merupakan nilai sempurna, dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.15 (Liu dkk., 2020).

$$VFAR = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{sim}} | (Y_{i\text{sim}} > t \& Y_{i\text{obs}} \leq t))}{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{sim}} | (Y_{i\text{sim}} > t \& Y_{i\text{obs}} > t)) + \sum_{i=1}^n (Y_{i\text{sim}} | (Y_{i\text{sim}} > t \& Y_{i\text{obs}} \leq t))} \quad 2.15$$

3. Volumetric Critical Success Index (VCSI)

VCSI adalah metrik yang digunakan untuk mengukur keberhasilan model dalam memprediksi volume curah hujan yang terjadi secara benar, dengan memperhitungkan baik volume yang diprediksi dengan benar (*hit*), volume yang hilang (*miss*), dan volume yang salah diprediksi (*false alarm*). Nilai VCSI berkisar pada rentang 0 hingga 1, nilai 1 merupakan nilai sempurna bahwa model memprediksi semua volume curah hujan dengan benar tanpa kesalahan. Nilai VCSI dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.16 (Liu dkk., 2020).

$$VCSI = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{sim}} | (Y_{i\text{sim}} > t \& Y_{i\text{obs}} > t))}{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{sim}} | (Y_{i\text{sim}} > t \& Y_{i\text{obs}} > t)) + \sum_{i=1}^n (Y_{i\text{obs}} | (Y_{i\text{sim}} \leq t \& Y_{i\text{obs}} > t)) + \sum_{i=1}^n (Y_{i\text{sim}} | (Y_{i\text{sim}} > t \& Y_{i\text{obs}} \leq t))} \quad 2.16$$

2.6 Daerah Aliran Sungai (DAS)

DAS adalah suatu wilayah daratan yang merupakan satu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya yang berfungsi menampung, menyimpan, dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan ke danau atau ke laut secara alami, yang batas di darat merupakan pemisah topografis dan batas di laut sampai dengan daerah perairan yang masih terpengaruh aktivitas daratan (Peraturan Pemerintah No. 37, 2012).

DAS merupakan aliran sungai yang ditentukan dengan penggunaan peta *digital elevation model* (DEM) sehingga mengetahui posisi air hujan yang jatuh ke daerah DAS yang akan mengalir menuju sungai utama yang ditinjau. Pencatatan data curah hujan dilakukan pada suatu daerah aliran sungai yang dilakukan di beberapa stasiun. Data curah hujan tersebut akan diolah sehingga mendapatkan debit. DAS berfungsi sebagai upaya untuk meningkatkan ketersediaan air, mengurangi sedimentasi, serta meningkatkan kualitas air guna pemanfaatan yang berkelanjutan.

Suatu DAS biasanya di bagi menjadi daerah hulu, tengah, dan hilir (Irawan dkk., 2024). Daerah hulu merupakan bagian yang penting karena mempunyai fungsi perlindungan terhadap seluruh DAS khususnya untuk mengatur tata air. DAS sangat dipengaruhi oleh berbagai karakteristik yang saling berkaitan. Karakteristik ini menentukan bagaimana air mengalir, tersimpan, dan didistribusikan di dalam DAS, serta memengaruhi potensi banjir, erosi, dan ketersediaan air.

2.6.1 Bentuk DAS

Bentuk suatu DAS dapat mempengaruhi terkait kecepatan dan pola aliran air secara keseluruhan. Struktur fisik DAS seperti topografi, kemiringan lereng, dan elevasi sangat menentukan kecepatan dan arah aliran sungai. Berdasarkan perbedaan debit banjir yang terjadi bentuk DAS dapat dilihat pada Gambar 2.5 dapat dibedakan menjadi tiga bentuk (Mori dkk., 2003).

1. Memanjang

DAS berbentuk memanjang biasanya memiliki dimensi lebih panjang dibandingkan lebar, aliran sungai cenderung lebih lurus dan terarah, dan terkadang berbentuk seperti bulu burung. Bentuk DAS memanjang biasanya menghasilkan debit banjir yang relatif kecil karena waktu prediksi banjir datang dari anak-anak sungai yang berbeda, tetapi banjir yang terjadi cenderung berlangsung lama.

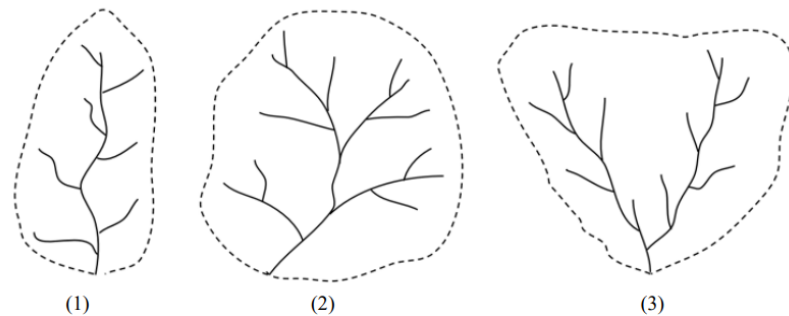
2. Radial

Bentuk DAS radial adalah sebuah pola aliran sungai yang menyebar ke semua arah dan bertemu di titik-titik tertentu. Aliran sungai pada DAS radial membentuk pola yang mirip dengan kipas atau lingkaran. Bentuk ini cenderung mengalami banjir yang besar jika terjadi hujan dikarenakan anak-anak sungai mengalir terkonsentrasi pada satu titik.

3. Pararel

Daerah pengaliran ini merupakan salah satu pola aliran yang berbentuk unik yang ditandai dengan adanya dua atau lebih jalur sungai yang mengalir sejajar satu sama lain. Aliran ini mengikuti arah kemiringan lereng dan biasanya memiliki sudut yang lebih tajam dan anak-anak sungai akan menyatu di bagian hilir. Dikarenakan adanya penyatuan aliran dari beberapa sub-DAS biasanya memiliki risiko banjir

yang cukup tinggi jika terjadi hujan yang bersamaan terutama di daerah hilir setelah titik pertemuan.



Gambar 2.5 Bentuk-bentuk DAS

2.6.2 Jaringan Sungai (*Stream Network*)

Jaringan sungai adalah sistem yang terdiri dari sungai utama beserta anak-anak sungainya yang saling terhubung dan mengalirkan air dari daerah hulu menuju hilir hingga bermuara ke danau, laut, atau badan air lainnya. Jaringan ini terbentuk secara alami mengikuti bentuk topografi dan karakteristik geologi suatu wilayah. Jaringan sungai memiliki peran yang sangat penting karena digunakan untuk mendefinisikan dan mensimulasikan aliran air, distribusi air hujan, serta interaksi antara permukaan tanah dan saluran sungai (Triatmodjo, 2008).

Jaringan sungai dapat dimodelkan dalam SWAT secara otomatis dengan menggabungkan data DEM, arah aliran (*flow direction*), dan akumulasi aliran (*flow accumulation*). Jaringan sungai yang dihasilkan dalam model SWAT dapat digunakan untuk berbagai tujuan seperti simulasi debit aliran, pengendalian erosi, dan pengelolaan sumber daya air.

2.6.3 Penggunaan Lahan (*Land Use*)

Land use adalah cara manusia memanfaatkan permukaan tanah untuk berbagai aktivitas, seperti pertanian, perkebunan, hutan, permukiman, dan industri. Perubahan penggunaan lahan secara langsung menyebabkan terjadinya perubahan tutupan lahan, seiring pertambahan jumlah penduduk dan kegiatan yang dilakukan manusia dapat menyebabkan kondisi lahan berubah pada waktu yang berbeda. Perubahan penggunaan lahan umumnya dapat diamati dengan menggunakan data-data spasial dari peta penggunaan lahan dari titik tahun yang berbeda. Data-data

penginderaan jauh (*remote sensing data*) seperti citra satelit, radar, dan foto udara (Swain dkk., 2022).

Ada tiga kelas data secara umum yang tercakup dalam penutupan lahan yaitu struktur fisik yang dibangun oleh manusia, fenomena biotik seperti vegetasi alami, tanaman pertanian, dan kehidupan binatang serta tipe pembangunan. Dalam penelitian *land use* dapat membantu mengidentifikasi distribusi dan jenis penggunaan lahan dalam DAS. Penggunaan lahan dapat mempengaruhi hasil infiltrasi, limpasan permukaan, dan evapotranspirasi menggunakan peta tutupan lahan dan diklasifikasikan berdasarkan jenis tutupan lahan. Dengan mengintegrasikan data tutupan lahan ke dalam model hidrologi seperti SWAT, pengaruh perubahan *land use* terhadap debit sungai dapat dievaluasi secara lebih akurat (Swain dkk., 2022). Pemahaman ini penting untuk mendukung perencanaan tata guna lahan yang berkelanjutan dan pengelolaan DAS yang efektif.

2.6.4 Jenis Tanah Berdasarkan Infiltrasi

Tanah adalah bagian dari kerak bumi yang tersusun atas bahan organik dan mineral. Proses terbentuknya tanah sangat berkaitan dengan faktor pembentuk tanah, dimana faktor pembentuk tanah akan mempengaruhi jenis-jenis tanah. Tanah dapat diklasifikasi berdasarkan kesamaan dan kemiripan sifat dan ciri morfologi, fisika dan kimia, serta mineralogi, kemudian diberi nama agar mudah dikenal, diingat, dipahami, dan digunakan serta dapat dibedakan satu dengan lainnya. Sistem klasifikasi tanah dapat diklasifikasikan salah satunya berdasarkan *Soil Map of the World* (FAO/UNESCO 1974) dan disesuaikan dengan keadaan di Indonesia.

Sistem klasifikasi tanah FAO atau lebih dikenal dengan satuan tanah FAO dibangun tahun 1974 dalam rangka penyusunan peta tanah dunia skala 1:5.000.000 oleh FAO/UNESCO (1974). Sistem ini dikembangkan dengan dua kategori yaitu satuan tanah dan sub-unit yang setara dengan jenis tanah menurut sistem klasifikasi tanah nasional. Dalam sistem ini, pengklasifikasian tanah menggunakan horison penciri. Nama dan kriteria horison penciri sesuai dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi tanah di dunia dan sebagian merujuk kepada sistem taksonomi tanah. Nama-nama tanah diambil terutama dari nama-nama tanah Rusia serta Eropa Barat, Canada dan Amerika Serikat, dan beberapa nama baru yang

dikembangkan untuk tujuan khusus agar dapat menampung dan memwadahi semua jenis tanah di dunia. Sistem ini dibangun dalam rangka memenuhi kebutuhan informasi tanah dan potensi penggunaannya terkait dengan pertanian khususnya dalam pemenuhan kebutuhan pangan dunia. Dalam sistem ini dikenal nama-nama tanah yang umumnya juga sudah dikenal di Indonesia, antara lain *Gleysol*, *Regosol*, *Lithosol*, *Renzina*, *Andosol*, *Podzol*. Nama tanah lainnya yang agak asing diantaranya adalah *Solonetz*, *Yermosol*, *Xerolsol*, *Kastanozem*, *Chernozem*, *Phaeozem*, dan lain sebagainya (Subardja dkk., 2014).

Klasifikasi jenis tanah merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi siklus hidrologi terutama dalam hal kapasitas infiltrasi, retensi air, dan pembentukan limpasan permukaan. Dalam model SWAT, data jenis tanah digunakan untuk mendefinisikan karakteristik tanah pada *Hydrological Response Unit* (HRU) yaitu unit analisis terkecil yang mengintegrasikan informasi tanah, tutupan lahan, dan topografi. Kelompok Hidrologi Tanah (*Hydrologic Soil Group*, HSG) SWAT menggunakan klasifikasi dari *Natural Resources Conservation Service* (NRCS) yang membagi tanah ke dalam empat kelompok hidrologi berdasarkan karakteristik infiltrasi air dan laju perkolasi setelah tanah jenuh air. Kelompok tanah tersebut diantaranya *soil group A* dengan tanah pasir dan kerikil yang memiliki infiltrasi tinggi, *soil group B* dengan tanah berbutir sedang yang memiliki infiltrasi sedang, *soil group C* dengan tanah berbutir sedang sampai halus yang memiliki infiltrasi rendah, dan *soil group D* dengan tanah liat daya kembang tinggi dan tanah dengan muka air tanah permanen tinggi yang memiliki infiltrasi sangat rendah (Neitsch dkk., 2011).

2.6.5 Kemiringan Lereng

Kemiringan lereng adalah perbandingan antara beda tinggi (jarak vertikal) suatu lahan dengan jarak mendatarnya. Kemiringan lereng merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk menentukan lahan kritis. Kemiringan lereng dapat dinyatakan dalam satuan persen (%) atau derajat (°). Kemiringan lereng dapat didapatkan dari data spasial dari hasil pengolahan data ketinggian (garis kontur) dengan bersumber pada peta topografi. Kemiringan ini sangat penting dalam analisis hidrologi dan pengelolaan sumber daya air karena berpengaruh terhadap perilaku limpasan permukaan dan potensi terjadinya bencana. Kemiringan lereng

sendiri dibagi menjadi beberapa kelas. Berikut ini merupakan klasifikasi kemiringan lereng berdasarkan pola Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah dapat dilihat pada Tabel 2.5 (Setyanugraha dkk., 2023).

Tabel 2.5 Klasifikasi Kemiringan Lereng

Kelas	Klasifikasi	Kemiringan (%)
I	Datar	0 - 8
II	Landai	8 - 15
III	Agak Curam	15 - 25
IV	Curam	25 - 45
V	Sangat Curam	>45

2.7 Geographic Information System (GIS)

Geographic Information System (GIS) merupakan sistem berbasis komputer yang dirancang untuk mengumpulkan, menyimpan, mengakses kembali, menganalisis, dan menyajikan data spasial. Kemampuan ini menjadikan GIS sebagai alat yang efektif dalam mengatasi berbagai permasalahan kompleks yang berkaitan dengan penelitian, perencanaan, pelaporan, serta pengelolaan sumber daya alam dan lingkungan (Satar, 2014). GIS mampu mengelola berbagai jenis data spasial termasuk data dalam format tabel, peta, hasil observasi lapangan, citra satelit, dan data dari perangkat *Global Positioning System* (GPS).

Dalam implementasinya, GIS terdiri dari lima subsistem utama yaitu pengumpulan data, pemrosesan awal (*preprocessing*), pengelolaan data (*data management*), manipulasi dan analisis data (*data manipulation and analysis*), penyajian hasil akhir (*product generation*). Setiap subsistem berperan penting dalam memastikan integrasi dan kelancaran pengolahan data spasial untuk menghasilkan informasi yang relevan dan akurat.

GIS merupakan sistem yang kompleks dan umumnya terintegrasi dengan sistem komputer lainnya pada berbagai tingkatan fungsional dan jaringan. Komponen GIS meliputi perangkat keras (*hardware*) mulai dari PC *Dekstop*, *workstations*, hingga *multiuser host*, perangkat lunak (*software*) yang mencakup berbagai modul program seperti ArcGIS, Quantum GIS, ERDAS, dan lain-lain, data dan informasi geografi sebagai inti dari pengolahan GIS, dan organisasi (sistem manajemen) yang mencakup struktur organisasi tempat GIS dioperasikan, termasuk sumber daya

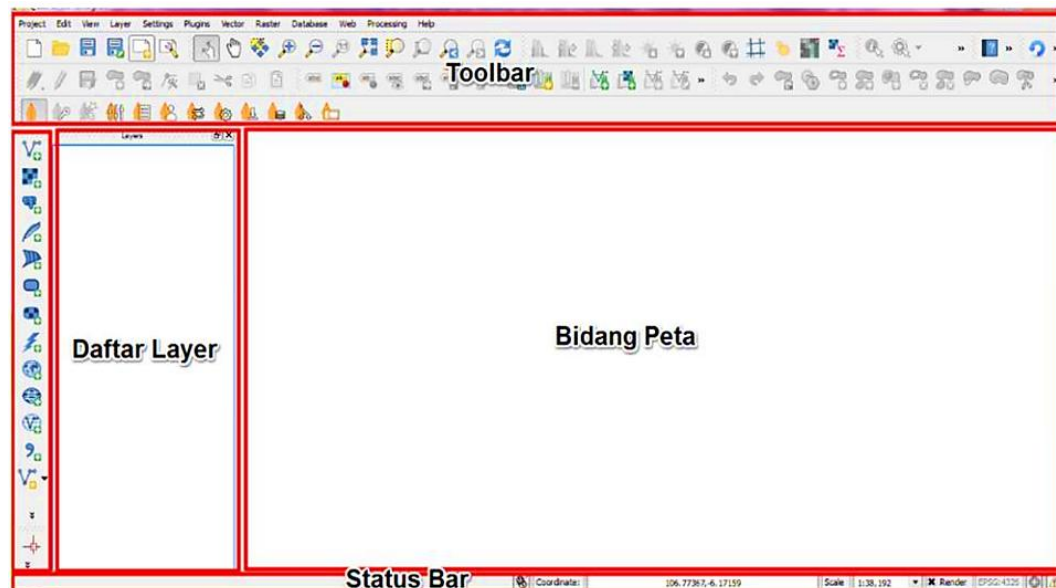
manusia (*humanware*) yang bertanggung jawab dalam pengelolaan dan pemanfaatan produk GIS (Satar, 2014).

QGIS adalah perangkat lunak sumber terbuka (*open-source*) yang digunakan untuk mengelola, menganalisis, dan memvisualisasikan data geospasial. QGIS menyediakan berbagai alat untuk analisis spasial, pemetaan, serta pengolahan data berbasis sistem informasi geografis (SIG). Sebagai sistem SIG, QGIS memiliki kemampuan untuk menangani berbagai jenis data spasial, baik itu data vektor (titik, garis, poligon) maupun raster (seperti citra satelit atau peta topografi). QGIS menjadi alat yang sangat penting dalam berbagai bidang, seperti perencanaan wilayah, pengelolaan sumber daya alam, mitigasi bencana, transportasi, dan infrastruktur (Astrini & Oswald, 2012).

QGIS mendukung banyak format data geospasial termasuk *shapefile*, KML, dan GeoTIFF serta menyediakan berbagai fitur untuk memanipulasi dan mengedit data tersebut. QGIS dilengkapi dengan alat cartografi untuk membuat peta yang informatif dan mudah dipahami. QGIS juga memiliki kemampuan untuk melakukan georeferensi yang memungkinkan pengguna untuk mengonversi peta atau citra non-spasial ke dalam sistem koordinat geografis yang akurat. Selain itu, QGIS juga mendukung analisis spasial lanjut seperti *overlay*, *buffering*, interpolasi, klasifikasi lahan, analisis jaringan, serta perhitungan hidrologi dan dilengkapi dengan berbagai *plugin* yang memperluas fungsional dan kemampuannya. *Plugin* adalah ekstensi atau modul tambahan yang dapat diunduh dan diinstal untuk menambah alat atau fitur baru ke dalam QGIS. Tampilan antarmuka yang mudah digunakan serta komunitas pengguna dan pengembang yang aktif QGIS terus berkembang menjadi solusi perangkat lunak SIG yang andal (Astrini & Oswald, 2012).

Program QGIS akan digunakan dalam pengolahan data spasial pada penelitian. Secara umum program ini akan digunakan untuk input data spasial, menganalisis serta akan memunculkan hasil analisis datanya yang dapat berupa visualisasi peta maupun data berupa angka, proses delineasi batas DAS, klasifikasi tutupan lahan, dan jenis tanah berdasarkan DAS. Delineasi batas DAS adalah proses penentuan batas DAS atau sub-DAS berdasarkan karakteristik hidrologi suatu bentang alam. Proses ini dapat dilakukan secara otomatis dengan memanfaatkan

data *Digital Elevation Model* (DEM) yang memberikan informasi topografi penting untuk analisis lebih lanjut. Selain itu, data lain seperti klasifikasi tutupan lahan dan jenis tanah berdasarkan DAS juga dapat digunakan dalam proses ini untuk memperoleh gambaran yang lebih lengkap tentang kondisi alam yang mempengaruhi aliran air. Tampilan QGIS dapat dilihat pada Gambar 2.6 (Astrini & Oswald, 2012).



Gambar 2.6 Tampilan QGIS

2.8 Pemodelan Debit sungai dengan *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT)

Debit sungai adalah volume aliran yang mengalir melalui suatu penampang melintang sungai dalam satuan waktu tertentu. Biasanya dinyatakan dalam satuan meter kubik per detik (m^3/det) atau liter per detik (l/det). Debit sungai mencerminkan respon hidrologi suatu DAS terhadap input curah hujan dan merupakan bagian penting dalam siklus hidrologi. Debit sungai berperan penting dalam pengelolaan sumber daya air, baik untuk keperluan irigasi, suplai air bersih, maupun mitigasi dampak lingkungan seperti banjir, erosi, dan transportasi sedimen yang dapat terjadi apabila pengelolaan sumber daya air tidak dilakukan secara efektif. Pemodelan debit sungai dapat dimodelkan melalui *software* SWAT dengan menggunakan berbagai input data hidrologi, data klimatologi, dan karakteristik fisik DAS, serta kalibrasi dan validasi untuk meningkatkan akurasi hasil simulasi.

2.8.1 SWAT

SWAT adalah model berbasis proses yang digunakan untuk memprediksi simulasi dalam siklus hidrologi dan dampak pengelolaan lahan terhadap kualitas dan kuantitas air, sedimen, serta bahan kimia pertanian dalam suatu DAS. Model ini dikembangkan oleh *United States Department of Agriculture (USDA) Agricultural Research Service* dan telah banyak digunakan di seluruh dunia untuk mendukung pengelolaan sumber daya air. Model ini mengintegrasikan data spasial, data hidrologi, data klimatologi, informasi tutupan lahan, dan jenis tanah untuk hubungan antara komponen dalam siklus hidrologi (Neitsch dkk., 2011).

SWAT memungkinkan pelaksanaan berbagai analisis dan simulasi pada DAS dengan menghubungkannya ke perangkat lunak seperti ArcGIS dan QGIS. Melalui model SWAT, perilaku hidrologi DAS dapat diprediksi termasuk debit sungai sebagai salah satu parameter utama. Dalam pemodelannya SWAT memiliki beberapa tahapan diantaranya pembentukan *watershed* berdasarkan data DEM dan *stream network*, analisis HRU berdasarkan klasifikasi tutupan lahan, jenis tanah, dan *slope*, input data klimatologi, *simulation setup*, *run simulation*, *output visualization*, proses kalibrasi dan validasi terhadap model, dan analisa hasil.

Sebagai model semi distribusi, SWAT memiliki kemampuan untuk melakukan simulasi pada skala kecil seperti unit respon hidrologi HRU dengan cakupan temporal yang panjang dan resolusi waktu yang rinci. Setiap HRU akan memiliki informasi subbasin, nomor HRU, jenis penutupan lahan, jenis tanah dan luas HRU. HRU didapatkan dari *overlay* peta tanah dan peta penggunaan lahan.

Proses yang diperhitungkan pada model SWAT yang terjadi di dalam DAS didasarkan pada neraca air. Model SWAT memprediksi bagaimana air bergerak dan tersimpan di DAS dengan memperhitungkan semua komponen neraca air yaitu curah hujan sebagai input dan berbagai jalur kehilangan air. Neraca air ini penting dalam simulasi aliran sungai, limpasan permukaan, dan ketersediaan air tanah. Komponen hidrologi neraca air yang berlaku pada model SWAT secara matematis dijelaskan melalui persamaan 2.17 (Neitsch dkk., 2011).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^i (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad 2.17$$

Keterangan:

SW_t = kandungan air tanah pada hari ke-t (mm)

SW_0 = kandungan air tanah awal pada hari pertama simulasi (mm)

R_{day} = curah hujan harian (mm)

Q_{surf} = limpasan permukaan (*surface runoff*) harian (mm)

E_a = evapotranspirasi aktual harian (mm)

W_{seep} = perkolasi air ke lapisan bawah tanah (mm)

Q_{gw} = aliran air tanah (*baseflow*) ke sungai (mm)

t = menunjukkan waktu (t hari)

Dalam pemodelan SWAT untuk simulasi debit sungai, debit yang dihasilkan adalah total debit aliran sungai (*simulated streamflow*) di lokasi atau segmen sungai tertentu dalam DAS. Model ini dirancang untuk mensimulasikan pola debit sungai dalam jangka waktu tertentu, baik secara harian, bulanan, maupun tahunan. Dalam simulasi debit sungai komponen limpasan permukaan merupakan komponen utama. Limpasan permukaan terjadi saat jumlah air yang turun ke permukaan tanah melebihi jumlah air yang mengalami infiltrasi. Ketika tanah permukaan masih dalam keadaan belum jenuh, laju infiltrasi dapat tinggi. Namun, seiring dengan lamanya durasi tanah permukaan lama kelamaan akan basah atau jenuh. Peristiwa ini dapat menimbulkan limpasan permukaan yang terjadi akibat besarnya air yang turun ke permukaan tanah melebihi jumlah air yang mengalami infiltrasi.

Dalam menghitung limpasan permukaan (*surface runoff*), SWAT memiliki dua metode utama, yaitu metode *Soil Conservation Service-Curve Number* (SCS-CN) dan metode infiltrasi *Green and Ampt*. Metode SCS-CN, yang merupakan salah satu metode paling umum digunakan dalam pemodelan hidrologi, memprediksi limpasan permukaan berdasarkan permeabilitas tanah, tata guna lahan, dan kondisi kelembapan awal tanah. Nilai SCS-CN merupakan fungsi dari kombinasi ketiga faktor tersebut yang menentukan besarnya limpasan yang terjadi di suatu wilayah. Dijelaskan pada Gambar 2.7 untuk hubungan curah hujan

terhadap limpasan pada metode SCS-CN. Persamaan SCS-CN disajikan pada persamaan 2.18 (Neitsch dkk., 2011).

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{day}} - 0,2S)^2}{(R_{\text{day}} + 0,8S)} \quad 2.18$$

Keterangan:

R_{day} = curah hujan per hari (mm)

S = *retention* parameter (mm)

Parameter retensi (S) merupakan kapasitas tanah untuk menahan air sebelum terjadi limpasan. Parameter retensi bervariasi secara spasial karena perubahan tanah, penggunaan lahan, pengelolaan dan kemiringan lereng. Parameter retensi (S) dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.19 dan untuk rentang nilai CN dapat dilihat pada tabel Tabel 2.6 (Neitsch dkk., 2011).

$$S = 25,4 \left(\frac{100}{\text{CN}} - 10 \right) \quad 2.19$$

Keterangan:

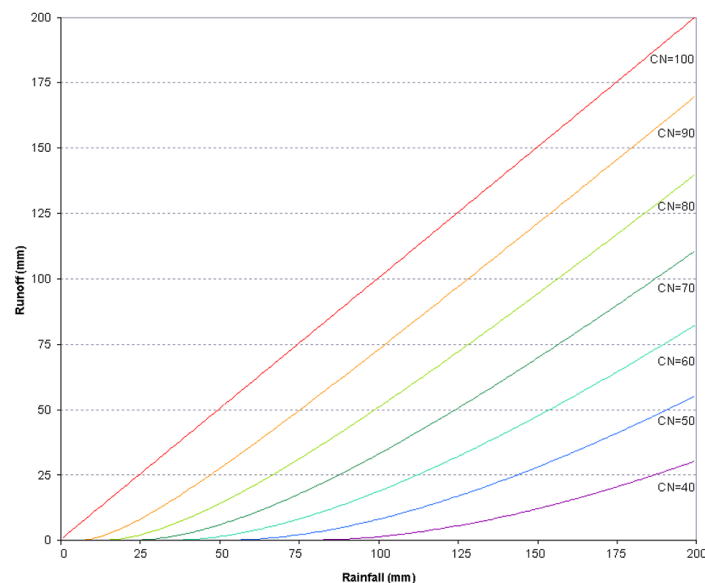
S = parameter retensi (mm)

CN = *Curve Number*

Tabel 2.6 Nilai CN Berdasarkan *Soil Conservation Service* (SCS)

Jenis Lahan	Keadaan Hidrologi	Kelompok Tanah			
		A	B	C	D
Padang rumput yang luas untuk tempat penggembalaan ternak	Buruk	68	79	86	89
	Cukup	49	69	79	84
	Baik	39	61	74	80
Padang rumput yang tidak untuk ternak, untuk dipanen	-	30	58	71	78
Semak-semak, gulma, rerumputan	Buruk	48	67	77	83
	Cukup	35	56	70	77
	Baik	30	48	65	73
Perkebunan	Buruk	57	73	82	86
	Cukup	43	65	76	82
	Baik	32	58	72	79
Hutan	Buruk	45	66	77	83
	Cukup	36	60	73	79
	Baik	30	55	70	77

Jenis Lahan	Keadaan Hidrologi	Kelompok Tanah			
		A	B	C	D
Tanah pertanian	-	59	74	82	86
Ruang terbuka	Buruk	68	79	86	89
	Cukup	49	69	79	84
	Baik	39	61	74	80
Area terbangun perumahan	-	61	75	83	87
Badan air	-	100	100	100	100



Gambar 2.7 Grafik Hubungan antara *Runoff* dengan Curah Hujan pada Metode SCS-CN

2.8.2 Optimasi Model

Optimasi model adalah proses penyesuaian parameter model agar hasil simulasi mendekati atau sesuai dengan data observasi di lapangan. Penerapan model SWAT untuk simulasi debit sungai membutuhkan data yang akurat dan representatif. Agar hasil simulasi mencerminkan kondisi aktual di lapangan maka proses optimasi model perlu dilakukan. Optimasi ini biasanya dilakukan menggunakan data debit observasi. Optimasi pemodelan debit dilakukan dalam penyesuaian parameter CN untuk mengontrol limpasan permukannya. Efektivitas model dievaluasi melalui parameter statistik berdasarkan interpretasi dari masing-masing jenis yang menggambarkan performa model. Optimasi model dapat dilakukan secara manual maupun otomatis menggunakan SWAT-CUP (Neitsch dkk., 2011).

SWAT-CUP merupakan *software* yang digunakan untuk proses optimasi model hidrologi SWAT. SWAT-CUP sendiri memiliki empat macam program yaitu SUFI-2, GLUE, ParaSol, dan MCMC. Aplikasi SWAT-CUP digunakan untuk analisis sensitivitas, kalibrasi, validasi, dan menganalisis ketidakpastian pada model hidrologi SWAT. SWAT CUP merupakan *software* yang dikembangkan dari SWAT karena hal itu kalibrasi dan analisis ketidakpastian suatu program dapat dengan mudah terhubung ke SWAT. Dari semua program, SUFI-2 paling banyak digunakan karena mengakomodir parameterisasi, analisis sensitivitas, kalibrasi, validasi, dan analisis ketidakpastian parameter hidrologi (Abbaspour, 2015).

SWAT-CUP dengan metode SUFI-2 memiliki 3 bagian penting dalam melakukan kalibrasi antara lain *calibration inputs*, *executable file*, dan *calibration output*. Tahap awal dari kalibrasi ada pada *calibration inputs* yaitu tahap memasukkan data. Pada tahap ini terdiri dari *Par_inf.txt* untuk memilih jenis parameter dan jumlah simulasi, *SUFI2_swEdit.def*, *File.Cio* dan *Absolute_SWAT_Values.txt*, serta menu input data *Observation*, *Extraction*, *Objective Function* dan *No Observation*. Menu *executable file* merupakan bagian yang menjalankan proses kalibrasi, terdiri dari proses *SUFI2_pre.bat*, *SUFI2_run.bat*, *SUFI2_post.bat*, kemudian *calibration output* menampilkan hasil dari kalibrasi (Abbaspour, 2015).

SUFI2 merupakan metode kalibrasi di mana ketidakpastian parameter masukan digambarkan memiliki distribusi yang seragam. Berdasarkan ketidakpastian nilai *output* tersebut, model dikalibrasi menggunakan metode 95% *Prediction Uncertainty* (95PPU). SUFI-2 memulai proses kalibrasi dengan mengasumsikan besarnya ketidakpastian pada parameter masukan, kemudian nilai ketidakpastian berkurang seiring dengan proses kalibrasi. Untuk mengukur kesesuaian antara hasil simulasi yang dinyatakan sebagai 95PPU dan observasi yang dinyatakan sebagai sinyal tunggal (dengan beberapa kesalahan terkait dengannya).

SWAT-CUP dapat menampilkan hasil analisis statistik mencakup beberapa parameter yaitu korelasi antara data (R^2), RMSE, NSE, dan PBIAS. (Abbaspour, 2015). Hasil analisis statistik ini memberikan gambaran mengenai seberapa baik model dalam merepresentasikan kondisi alam dan seberapa dapat diandalkannya

untuk prediksi lebih lanjut. Selain itu, hasil tersebut juga membantu menentukan apakah model yang telah dikalibrasi dapat diterapkan pada kondisi lingkungan yang lebih luas atau jika diperlukan penyesuaian lebih lanjut. Jika nilai-nilai statistik menunjukkan bahwa model tidak dapat memberikan hasil yang memadai, penyesuaian pada parameter model atau kalibrasi tambahan diperlukan untuk meningkatkan akurasi dan keandalan prediksi model.