

2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Daerah Aliran Sungai (DAS)

Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah wilayah daratan yang menjadi satu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya, yang berfungsi menampung, menyimpan dan mengalirkan air hujan ke danau atau laut secara alami. Batas wilayah DAS ditentukan oleh pemisah topografis di darat dan batas perairan yang masih dipengaruhi aktivitas daratan (Tikno et al., 2016).

Menurut Suripin, 2004 fungsi utama DAS adalah sebagai hidrologis, dimana fungsi tersebut sangat dipengaruhi oleh jumlah curah hujan yang diterima, geologi dan bentuk lahan. Fungsi hidrologis yang dimaksud termasuk kapasitas DAS untuk mengalirkan air, menyangga kejadian puncak hujan, melepaskan air secara bertahap, memelihara kualitas air, serta mengurangi pembuangan massa (seperti terhadap longsor). Berdasarkan fungsinya, DAS dibagi menjadi tiga bagian, yaitu:

1. DAS bagian Hulu

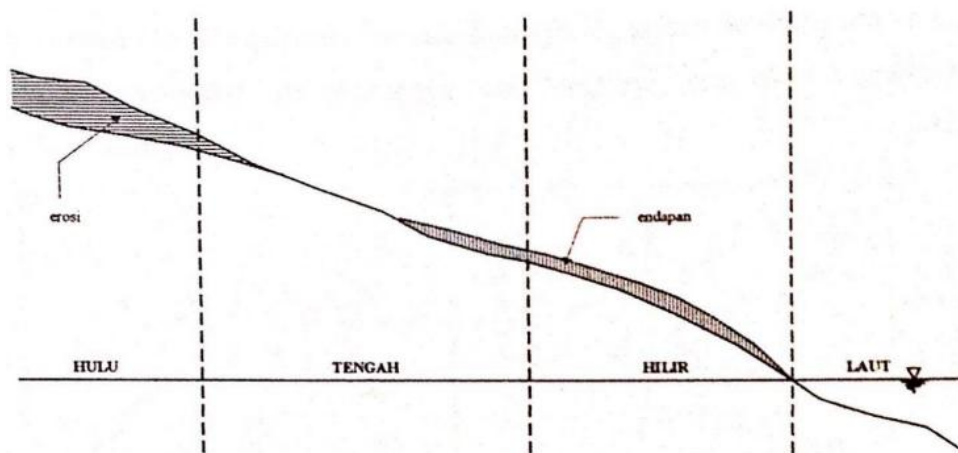
Wilayah hulu Daerah Aliran Sungai (DAS) biasanya dikenali dari kondisi tutupan vegetasinya, kualitas air, kapasitas penyimpanan air (debit), serta tingkat curah hujan yang diterima. Area ini umumnya berupa kawasan pegunungan dengan topografi yang bervariasi, curah hujan yang relatif tinggi dan berperan sebagai zona konservasi untuk menjaga stabilitas lingkungan DAS agar tidak mengalami kerusakan. Bagian hulu memiliki peranan vital dalam menjaga kelestarian tata air, sebab aktivitas di wilayah ini berpotensi menimbulkan dampak langsung terhadap wilayah hilir, seperti perubahan debit air dan pergerakan sedimen dalam sistem alirannya.

2. DAS bagian Tengah

Wilayah tengah DAS berfungsi sebagai area pengelolaan pemanfaatan air sungai yang diarahkan untuk menunjang kebutuhan sosial dan ekonomi masyarakat. Fungsi ini dapat dikenali melalui ketersediaan air, kualitas air, kemampuan aliran air dalam menyalurkan debit, tinggi muka air tanah dan keberadaan infrastruktur pengairan seperti pengelolaan sungai, bendungan, waduk, serta danau.

3. DAS bagian Hilir

Bagian hilir DAS memiliki peran dalam pemanfaatan air sungai untuk mendukung kepentingan sosial dan ekonomi, yang ditunjukkan melalui jumlah air yang tersedia, mutu air, kapasitas penyaluran air dan curah hujan yang diterima. Selain itu, wilayah ini juga mendukung aktivitas pertanian, penyediaan air bersih, hingga pengelolaan air limbah. Umumnya, bagian hilir adalah kawasan dataran rendah dengan kontur yang landai dan curah hujan yang cenderung lebih rendah dibandingkan bagian hulu.



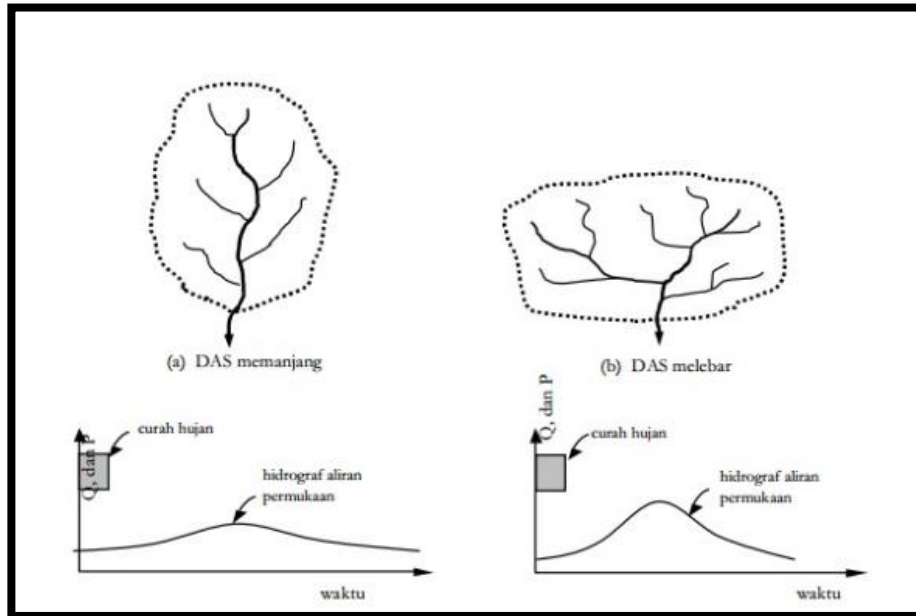
Gambar 2.1 Sketsa Profil memanjang alur sungai
Sumber: (Sosrodarsono, 1983)

Suripin, 2004 menyatakan karakteristik Daerah Aliran Sungai (DAS) merupakan deskripsi khusus yang menunjukkan kondisi suatu DAS, yang terbentuk dari sejumlah parameter seperti luas dan bentuk wilayah DAS, kondisi topografi, jenis tanah dan geologi, serta tutupan vegetasi atau pola pemanfaatan lahan. Secara lebih terperinci, karakteristik DAS dapat dijabarkan melalui beberapa aspek berikut.

2.1.1 Luas dan Bentuk DAS

Luas DAS mempengaruhi kecepatan dan volume aliran permukaan, semakin luas suatu DAS maka volume aliran permukaan semakin besar. Sedangkan bentuk suatu DAS berpengaruh terhadap pola aliran dalam sungai. Pada curah hujan dan intensitas yang sama, dengan bentuk DAS yang berbeda akan mengakibatkan kecepatan aliran permukaan (*surface runoff*) dari bentuk DAS yang memanjang dan sempit akan lebih besar dari pada bentuk DAS yang melebar atau melingkar. Hal

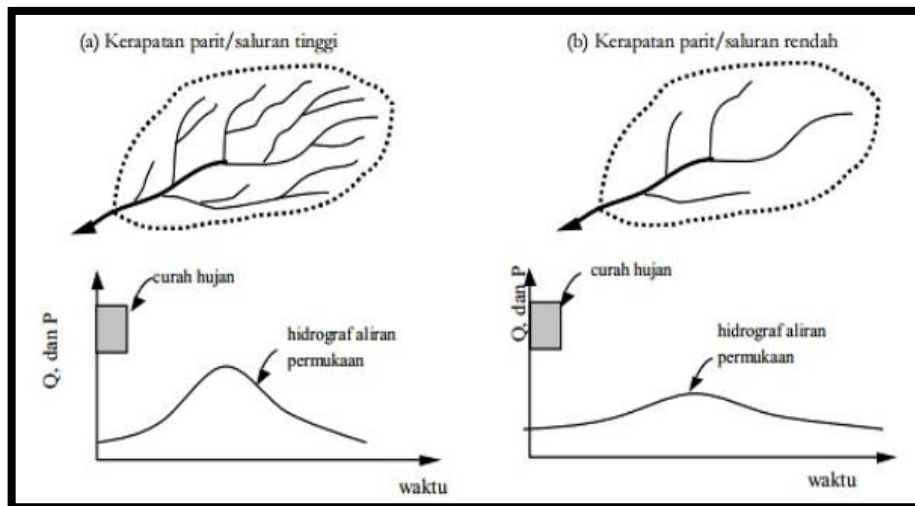
ini terjadi disebabkan waktu konsentrasi pada DAS memanjang terjadi lebih lama dibandingkan dengan DAS yang melebar, sehingga terkonsentrasinya air di titik kontrol lebih lambat dan hal ini berakibat pada laju dan volume aliran permukaan.



Gambar 2.2 Pengaruh bentuk DAS pada *surface runoff*
Sumber: (Suripin, 2004)

2.1.2 Kondisi topografi

Kondisi topografi seperti *slope*, keadaan dan kerapatan parit/saluran, serta bentuk-bentuk cekungan lainnya mempengaruhi kecepatan dan volume aliran permukaan. DAS dengan kemiringan curam disertai parit/saluran yang rapat akan menghasilkan laju dan volume aliran permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan DAS yang landai dengan parit yang jarang dan memiliki cekungan. Kerapatan parit sendiri memperpendek waktu konsentrasi sehingga memperbesar laju aliran permukaan.



Gambar 2.3 Pengaruh kerapatan parit pada hidrograf
Sumber: (Suripin, 2004)

2.1.3 Tata Guna Lahan

Tata guna lahan pada mempengaruhi aliran permukaan dinyatakan dalam koefisien aliran permukaan (C), yaitu bilangan perbandingan antara besarnya aliran permukaan dan besarnya curah hujan. Koefisien ini menjadi salah satu indikator untuk menentukan kondisi fisik suatu DAS nilai C berkisar antara 0-1. Nilai C yang mendekati angka nol menunjukkan bahwa kondisi DAS tersebut masih dalam keadaan baik dan sebaliknya nilai C yang semakin.

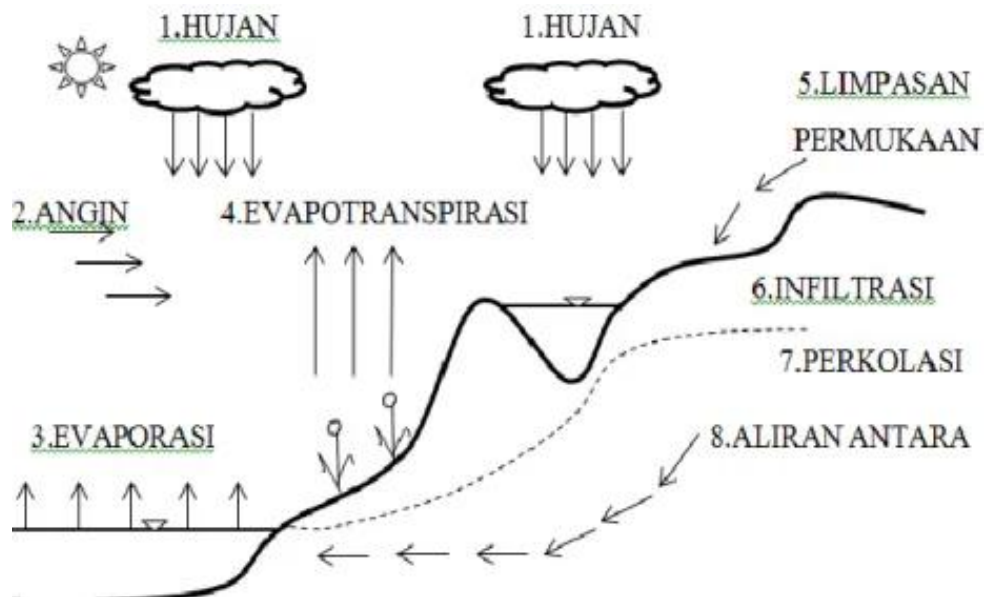
2.1.4 Kondisi Geologi

Kondisi geologi berkaitan dengan laju infiltrasi sehingga dapat mempengaruhi aliran permukaan. Kecepatan dan jumlah air yang meresap ke dalam tanah merupakan fungsi dari jenis tanah, kelengasan tanah, permeabilitas tanah, penutup tanah, drainase, water table, intensitas dan jumlah hujan.

2.2 Hujan

Hujan merupakan salah satu bentuk presipitasi uap air yang berasal dari alam yang tedapat di atmosfer. Bentuk presipitasi lainnya adalah salju dan es. Hujan berasal dari uap air di atmosfer sehingga mendingin dan terjadi kondensi menjadi butir-butir air dan kristal-kristal es yang akhirnya jatuh sebagai hujan (Triatmodjo, 1998). Sedangkan menurut Tukidi (2010) Hujan adalah suatu proses fisis yang dihasilkan dari fenomena cuaca. Pengaruh faktor fisiografis wilayah Indonesia dan

sekitarnya terhadap unsur-unsur iklim/cuaca telah menghasilkan tiga tipe curah hujan, yakni: tipe ekuatorial, tipe monsun, dan tipe lokal.



Gambar 2.4 Siklus hidrologi sedang

Sumber: (Triatmodjo, 2008)

2.2.1 Curah Hujan

Salah satu unsur iklim yang sangat penting bagi kehidupan di bumi adalah curah hujan. Hujan memainkan peran penting dalam siklus hidrologi karena dapat mempengaruhi kesetimbangan sumber daya air di permukaan bumi (Saidah, 2023). Curah hujan merupakan salah satu data hidrologi yang diperoleh melalui pengukuran ketebalan hujan oleh stasiun hujan dan data debit sungai yang tersebar dalam suatu wilayah daerah aliran sungai. Stasiun hujan ini dikelola oleh beberapa dinas-dinas terkait yang berwenang seperti Balai Wilayah Sungai, Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika, serta Dinas Pekerjaan Umum Bidang Pengairan. Dengan adanya sumber daya air di permukaan bumi yang disebabkan oleh curah hujan, manusia dapat memanfaatkannya untuk memenuhi kebutuhan hidup dan meningkatkan kesejahteraan (Syaifullah, 2014).

2.2.2 Intensitas Hujan

Intensitas hujan adalah besarnya curah hujan yang turun dalam satuan waktu tertentu, biasanya dinyatakan dalam mm/jam. Parameter ini menggambarkan seberapa cepat air hujan jatuh ke permukaan dan merupakan faktor penting dalam analisis hidrologi, terutama yang berkaitan dengan limpasan permukaan (*runoff*),

banjir dan infiltrasi. Intensitas hujan yang tinggi dalam waktu singkat dapat menghasilkan limpasan besar yang dapat memengaruhi hasil pemodelan hidrologi (Normand Maulana Mashary, Lily Montarcih Limantara, 2025). Kejadian hujan lebat umumnya didefinisikan sebagai peristiwa curah hujan dengan akumulasi ≥ 50 mm dalam durasi 24 jam, yang digunakan sebagai ambang batas dalam analisis kejadian hujan ekstrem (Irawan et al., 2024).

Intensitas hujan dipengaruhi oleh kondisi atmosfer, topografi dan dinamika cuaca lokal. Pada wilayah seperti DAS Citanduy yang memiliki topografi bervariasi, intensitas hujan dapat berubah secara signifikan dari satu wilayah ke wilayah lainnya sehingga penting untuk dianalisis bersamaan dengan data curah hujan satelit maupun observasi.

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
Hujan Normal	5-10	20-50
Hujan Lebat	10-20	50-100
Hujan Sangat Lebat	>20	>100

2.2.3 Pengukuran Data Hujan

Data curah dapat diperoleh dari pengukuran di permukaan bumi (*Ground Data*) atau pengukuran melalui penginderaan jauh seperti satelit dan radar. Satuan ukur untuk presipitasi adalah Inch, millimetres (volume/area) atau kg/m² (mass/area) untuk precipitation bentuk cair. 1 mm hujan artinya adalah ketinggian air hujan dalam radius 1 m² adalah setinggi 1 mm (Perdana et al., 2015). Berikut adalah metode atau alat untuk mendapatkan data curah hujan.

1. Alat Penakar Hujan Manual

Alat penakar hujan manual adalah alat pengukur hujan yang terdiri dari corong dan botol penampung yang berada di dalam suatu tabung silinder. Alat ini ditempatkan di tempat terbuka yang tidak dipengaruhi pohon-pohon dan gedung-gedung yang ada di sekitarnya. Air hujan yang jatuh pada corong

akan tertampung di dalam tabung silinder. Dengan mengukur volume air yang tertampung dan luas corong akan dapat diketahui kedalaman hujan. Curah hujan kurang dari 0,1 mm dicatat sebagai 0,0 mm yang harus dibedakan dengan tidak ada hujan yang dicatat dengan garis (-). Pengukuran dilakukan setiap hari. Biasanya pembacaan pada pagi hari, sehingga hujan tercatat adalah hujan yang terjadi selama satu hari sebelumnya, yang sering disebut hujan harian. Dengan alat ini tidak dapat diketahui kederasan hujan (intensitas) hujan, durasi (lama waktu) hujan dan kapan terjadinya. (Triatmodjo, 2008 ; Sumarauw, 2016).

2. Alat Penangkar Hujan Otomatis

Alat pengukur hujan otomatis ini mengukur hujan secara kontinyu sehingga dapat diketahui intensitas hujan dan lama waktu hujan. Ada dua macam alat penakar hujan otomatis yaitu alat penakar hujan jenis pelampung dan alat penakar hujan jenis timba jungkit (Triatmodjo, 2008 ; Sumarauw, 2016). Alat ini mengukur hujan yang jatuh masuk ke dalam tabung yang berisi pelampung. Jika muka air di dalam tabung naik, pelampung bergerak ke atas dan bersamaan dengan pelampung tersebut sebuah pena yang dihubungkan dengan pelampung melalui suatu tali penghubung juga ikut bergerak. Gerakan pena tersebut memberi tanda pada kertas grafik yang digulung pada silinder yang berputar. Jika tabung telah penuh, secara otomatis seluruh air akan melimpas keluar melalui mekanisme sifon yang dihubungkan (Triatmodjo, 2008 ; Sumarauw, 2016). Jenis lain dari alat penakar hujan otomatis adalah Alat Penakar Hujan Jenis Timba Jungkit. Alat penakar hujan ini terdiri dari silinder penampung yang dilengkapi dengan corong. Di bawah corong ditempatkan sepasang timba penakar kecil yang dipasang sedemikian rupa sehingga jika salah satu timba menerima curah hujan sebesar 0,25 mm, timba tersebut akan menjungkit dan menumpahkan isinya ke dalam tangki. Timba lainnya kemudian menggantikan tempatnya dan kejadian serupa akan terulang. Gerakan timba mengaktifkan suatu sirkuit listrik dan menyebabkan Bergeraknya pena pada lembaran kertas grafik yang terpasang pada suatu silinder dan berputar sesuai dengan perputaran jarum jam.

3. Penginderaan Jauh

Untuk mendapatkan data curah hujan baik itu data hujan harian atau per satuan waktu dapat juga menggunakan alat penginderaan jauh seperti satelit. Satelit sudah banyak dikembangkan di beberapa negara maju seperti Amerika Serikat dan Jepang. Dengan adanya satelit pemantau data curah hujan selain dapat untuk memperoleh data hujan juga dapat berguna sebagai data pembanding dengan curah hujan yang didapatkan di permukaan bumi (*Ground Data*). Kelemahan alat pengukur curah dengan penginderaan jauh ini adalah pengukuran curah hujan bukan berdasarkan dari titik hujan yang jatuh di permukaan bumi melainkan hujan yang masih berada di angkasa atau masih dalam berbentuk awan hujan.

2.3 Sumber Data Curah Hujan

2.3.1 Data Curah Hujan Observasi

Data hujan biasanya diperoleh dari pengamatan langsung di lapangan melalui stasiun-stasiun hujan yang dikelola oleh instansi tertentu (Pratiwi et al., 2017). Pencatatan data hujan di suatu daerah umumnya menggunakan alat penakar hujan yang diletakkan mengikuti pola sebaran tertentu (Saidah et al., 2021). Jumlah curah hujan dicatat dalam satuan inci atau milimeter, dimana jumlah curah hujan 1 mm artinya ketinggian air hujan yang menutupi permukaan per satuan luas adalah sebesar 1 mm, selama air tersebut tidak meresap, tidak menguap, dan tidak mengalir (Syaifullah, 2014).

2.3.2 Data Curah Hujan Satelit dan Reanalisis

Dengan keterbatasan stasiun hujan konvensional, data curah hujan berbasis satelit dan reanalisis menjadi alternatif penting dalam studi hidrologi (Abiyyu Putra et al., 2024). Data curah hujan satelit dan reanalisis merupakan salah satu sumber data alternatif yang banyak digunakan dalam kajian hidrologi, terutama pada wilayah yang memiliki keterbatasan jumlah dan sebaran stasiun hujan observasi. Data ini dihasilkan melalui penggabungan informasi pengamatan satelit, model numerik atmosfer, serta data observasi permukaan, sehingga mampu menyediakan data curah hujan dengan cakupan spasial yang luas dan resolusi temporal yang tinggi (Hersbach et al., 2020).

Produk data satelit dan reanalisis memiliki keunggulan dalam hal kontinuitas data dan ketersediaan jangka panjang, sehingga sangat bermanfaat untuk analisis hidrologi skala daerah aliran sungai (DAS). Namun demikian, data tersebut sering kali mengandung bias akibat keterbatasan resolusi spasial, asumsi model, serta ketidakpastian dalam proses estimasi curah hujan, khususnya di wilayah dengan topografi kompleks dan variasi iklim lokal yang tinggi (Jatmiko & Ismail, 2025).

Salah satu produk data reanalisis yang banyak digunakan adalah ERA5 yang dikembangkan oleh *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). ERA5 menyediakan data iklim global dengan resolusi spasial sekitar $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ dan resolusi temporal hingga skala jam. Data curah hujan pada ERA5 diperoleh melalui integrasi antara model atmosfer dan berbagai sumber data observasi, sehingga menghasilkan data yang konsisten secara spasial dan temporal (Hersbach et al., 2020).

Meskipun memiliki keunggulan dalam ketersediaan dan konsistensi data, curah hujan ERA5 masih memerlukan evaluasi dan koreksi bias sebelum digunakan dalam analisis hidrologi secara langsung. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa data curah hujan reanalisis cenderung mengalami perbedaan nilai terhadap data observasi, baik dalam skala rata-rata maupun distribusi hujan ekstrem. Oleh karena itu, penerapan metode koreksi bias menjadi langkah penting untuk meningkatkan kesesuaian data reanalisis terhadap kondisi hidrologi aktual di lapangan.

Dalam penelitian ini, data curah hujan reanalisis ERA5 digunakan sebagai data utama yang selanjutnya dikoreksi menggunakan beberapa metode statistik dengan mengacu pada data curah hujan observasi sebagai data pembanding, sehingga diharapkan dapat meningkatkan akurasi pemanfaatan data ERA5 dalam analisis hidrologi di DAS Citanduy.

2.4 Metode Poligon Thiessen

Metode Poligon Thiessen merupakan salah satu metode pembobotan spasial yang digunakan untuk menghitung curah hujan rata-rata wilayah berdasarkan luas pengaruh masing-masing stasiun hujan. Metode ini membagi wilayah studi menjadi beberapa poligon yang dibentuk dari jarak terdekat antar stasiun pengamatan, sehingga setiap titik dalam satu poligon diasumsikan diwakili oleh satu stasiun hujan terdekat.

Prinsip dasar metode Thiessen adalah bahwa kontribusi curah hujan dari setiap stasiun ditentukan berdasarkan proporsi luas area pengaruhnya terhadap luas total wilayah. Metode ini banyak digunakan dalam analisis hidrologi DAS karena mempertimbangkan distribusi spasial stasiun hujan dan relatif sederhana untuk diterapkan menggunakan Sistem Informasi Geografis (GIS). Curah hujan rata-rata wilayah dengan metode Thiessen dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$P = \frac{\sum(P_i \times A_i)}{\sum A_i} \quad 2.1$$

Keterangan:

- P = curah hujan rata-rata wilayah
 P_i = curah hujan di stasiun ke-i
 A_i = luas poligon Thiessen stasiun ke-i
 ΣA_i = luas total wilayah

Metode Thiessen dinilai lebih representatif dibanding rata-rata aritmatik sederhana ketika sebaran stasiun hujan tidak merata secara spasial (K Subramanya, 2013).

2.5 Melengkapi Data Curah Hujan yang Hilang

Ketersediaan data curah hujan yang lengkap merupakan syarat penting dalam analisis hidrologi. Namun dalam praktek pencatatan, seringkali terjadi kekosongan nilai pada catatan hujan harian akibat gangguan alat, kesalahan pencatatan, atau masalah operasional stasiun hujan. Kekosongan data tersebut jika tidak ditangani dapat menimbulkan bias pada analisis statistik hujan dan pemodelan hidrologi (Cesar et al., 2021). Untuk mengatasi masalah ini, beberapa metode statistik telah dikembangkan untuk mengestimasi nilai curah hujan yang hilang. Metode-metode yang umum digunakan antara lain yaitu:

1. Metode Rata-Rata Aritmatika

Metode Rata-Rata Aritmatika merupakan pendekatan sederhana untuk mengestimasi nilai curah hujan yang hilang berdasarkan rata-rata nilai hujan dari stasiun-stasiun tetangga yang memiliki data lengkap. Prinsip dasar

metode ini adalah menganggap bahwa curah hujan di lokasi yang hilang dapat diperkirakan dari nilai rata-rata pengamatan sejumlah stasiun terdekat.

$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n}{n} \quad 2.2$$

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

Metode ini mudah diterapkan dan sering digunakan sebagai baseline estimasi, tetapi kurang sensitif terhadap variasi spasial jika stasiun tetangga memiliki kondisi iklim atau topografi yang berbeda

2. Metode *Normal Ratio*

Metode *Normal Ratio* dikembangkan untuk memperhitungkan perbedaan karakteristik iklim antara stasiun yang mengalami kekosongan data dengan stasiun tetangga berdasarkan curah hujan normal (nilai rata-rata jangka panjang).

$$\frac{P_x}{N_x} = \frac{1}{n} \left(\frac{p_1}{N_1} + \frac{p_2}{N_2} + \frac{p_3}{N_3} + \dots + \frac{p_n}{N_n} \right) \quad 2.3$$

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

Metode *Normal Ratio* memperbaiki estimasi dengan membobot nilai hujan berdasarkan perbandingan curah hujan normal, sehingga jika stasiun tetangga memiliki pola iklim yang berbeda, bobot hasil estimasi berubah sesuai karakteristik normalnya. Metode ini umum digunakan pada analisis

hydrologi untuk mengisi data yang hilang saat variasi antar stasiun cukup besar

3. Metode *Inversed Square Distance*

Metode *Inversed Square Distance* adalah teknik interpolasi spasial yang memperkirakan nilai yang hilang berdasarkan nilai hujan di stasiun-stasiun tetangga dengan pembobotan berdasarkan jarak. Semakin dekat stasiun tetangga, semakin besar pengaruhnya terhadap estimasi nilai pada titik yang hilang.

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{L_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i^2}} \quad 2.4$$

Keterangan:

P_x = estimasi curah hujan pada stasiun yang hilang

P_i = nilai curah hujan di stasiun tetangga

L_i = jarak antara stasiun tetangga ke stasiun yang hilang

n = jumlah stasiun tetangga

Metode ini mengasumsikan bahwa hujan di titik yang hilang lebih dipengaruhi oleh stasiun tetangga yang lebih dekat secara geografis. Bobot $1/L_i^2$ membuat kontribusi stasiun yang jauh sangat kecil dibanding yang dekat, sehingga estimasi lebih mencerminkan pola spasial lokal.

2.6 Bias pada Data Satelit

Bias dalam data satelit terjadi ketika estimasi curah hujan yang diberikan oleh satelit tidak sesuai dengan pengukuran di permukaan bumi. Bias ini dapat disebabkan oleh kesalahan dalam algoritma deteksi hujan atau perbedaan skala antara data satelit dan data observasi (Hu et al., 2016)

2.6.1 Koreksi Bias

Data curah hujan satelit seperti ERA5 telah banyak dimanfaatkan dalam studi hidrologi karena cakupan wilayahnya yang luas dan ketersediaan data yang kontinu. Namun, data tersebut sering mengandung bias akibat perbedaan metode estimasi, resolusi spasial dan temporal, serta keterbatasan dalam menangkap fenomena lokal,

terutama di wilayah tropis dengan topografi kompleks seperti Indonesia. Oleh karena itu, koreksi bias menjadi langkah penting untuk meningkatkan akurasi data tersebut sebelum digunakan dalam pemodelan hidrologi.

1. Regresi Linear Berganda

Metode ini menggunakan regresi linear dengan lebih dari satu variabel independen untuk menyesuaikan data model terhadap data observasi, mempertimbangkan faktor-faktor seperti lintang, bujur dan elevasi (Misnawati, Boer et al., 2018).

2. *Distribution Mapping*

Metode ini menyesuaikan distribusi probabilitas kumulatif dari data model agar sesuai dengan distribusi data observasi, sering digunakan untuk mengoreksi data curah hujan harian atau bulanan (Jadmiko et al., 2017).

3. Rasio Rata-Rata (*Mean Ratio Bias Correction*)

Metode ini mengoreksi bias dengan menghitung rasio antara rata-rata data observasi dan rata-rata data model, kemudian menerapkan rasio tersebut untuk menyesuaikan data model (Misnawati, Boer et al., 2018).

4. Regresi Power

Koreksi bias regresi power adalah metode koreksi bias data umumnya curah hujan satelit atau model iklim yang menggunakan hubungan regresi berbentuk fungsi pangkat (*power function*) antara data sumber misalnya satelit dan data acuan biasanya pengamatan stasiun (Misnawati, Boer et al., 2018).

2.6.2 Metode Koreksi Bias Regresi Linear

Metode Regresi Linier merupakan salah satu metode koreksi bias statistik yang digunakan untuk memperbaiki data curah hujan estimasi agar lebih mendekati data curah hujan observasi. Metode ini bekerja dengan membangun hubungan matematis antara data curah hujan satelit sebagai variabel bebas dan data curah hujan observasi sebagai variabel terikat. Hubungan tersebut dinyatakan dalam bentuk persamaan regresi yang selanjutnya digunakan untuk mengoreksi seluruh data curah hujan estimasi. Persamaan umum Regresi Linier Sederhana dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Y = a + bX$$

2.5

Keterangan:

Y	= Curah Hujan Hasil Koreksi (mm)
X	= Curah Hujan ERA5 (mm)
a	= Konstanta Regresi
b	= Koefisien Regresi

Nilai konstanta (a) dan koefisien regresi (b) diperoleh melalui analisis regresi menggunakan metode kuadrat terkecil (*least squares method*), yaitu dengan meminimalkan jumlah kuadrat selisih antara nilai observasi dan nilai hasil estimasi. Parameter regresi yang diperoleh kemudian digunakan untuk membentuk persamaan koreksi yang diterapkan pada seluruh data curah hujan ERA5.

Metode Regresi Linier didasarkan pada asumsi bahwa terdapat hubungan linier antara data curah hujan satelit dan data curah hujan observasi. Apabila hubungan kedua data menunjukkan pola yang relatif linier, maka metode ini mampu memperbaiki bias sistematis yang terdapat pada data satelit dengan baik. Selain memperbaiki nilai rata-rata curah hujan, metode ini juga mampu menyesuaikan pola hubungan antara data estimasi dan data observasi sehingga hasil koreksi menjadi lebih representatif terhadap kondisi aktual.

Keunggulan metode Regresi Linier terletak pada proses perhitungannya yang relatif sederhana, mudah diterapkan dan mampu memberikan hasil koreksi yang baik apabila hubungan antara data satelit dan data observasi memiliki korelasi yang cukup kuat. Oleh karena itu, metode ini banyak digunakan dalam penelitian koreksi bias data curah hujan satelit maupun data reanalisis sebagai alternatif untuk meningkatkan kualitas data sebelum digunakan dalam analisis hidrologi dan pemodelan hidrologi (Ni Luh Jenitha Asdia Putri, Misnawati, 2022).

2.6.3 Metode Koreksi bias Distribution Mapping

Metode koreksi bias *Distribution Mapping* merupakan pendekatan statistik yang bertujuan untuk menyesuaikan distribusi data curah hujan dari sumber satelit atau reanalisis agar menyerupai distribusi data observasi. Berbeda dengan metode koreksi bias berbasis regresi yang menyesuaikan nilai secara langsung, *Distribution Mapping* berfokus pada penyamaan karakteristik statistik, seperti nilai minimum, maksimum, rata-rata dan bentuk distribusi data. Prinsip utama metode ini adalah memetakan fungsi distribusi kumulatif (*Cumulative Distribution Function/CDF*) dari data satelit ke CDF data observasi, di mana:

$$P_{koreksi} = F_{obs}^{-1}(F_{sat}(P_{sat})) \quad 2.6$$

Keterangan:

$P_{koreksi}$ = curah hujan hasil koreksi bias

P_{sat} = curah hujan dari data satelit

F_{sat} = fungsi distribusi kumulatif data satelit

F_{obs}^{-1} = invers fungsi distribusi kumulatif data observasi

$$pdf(x) = \frac{e\left(-\frac{x}{b}\right)x^{a-1}}{\Gamma(a)b^a} \quad 2.7$$

Keterangan:

pdf = *probability density function*

x = Besar curah hujan (mm)

a = Parameter bentuk (*shape parameter*)

b = Parameter skala (*scale parameter*)

$\Gamma(a)$ = Fungsi kuantil empiris

e = Bilangan eksponensial ($\approx 2,718$)

2.6.4 Metode Rasio Rata-Rata

Metode Rasio Rata-Rata merupakan salah satu metode koreksi bias yang digunakan untuk menyesuaikan data curah hujan estimasi terhadap data curah hujan observasi dengan menggunakan perbandingan nilai rata-rata curah hujan pada periode waktu yang sama. Metode ini mengasumsikan bahwa perbedaan antara data estimasi dan data observasi bersifat proporsional dan dapat dikoreksi dengan suatu faktor pengali.

Faktor koreksi pada metode Rasio Rata-Rata dihitung berdasarkan rasio antara rata-rata curah hujan observasi dan rata-rata curah hujan estimasi, yang secara matematis dinyatakan sebagai berikut:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n P_{obs,i}}{\sum_{i=1}^n P_{sat,i}} \quad 2.8$$

Keterangan:

K = faktor koreksi,

$P_{obs,i}$ = curah hujan observasi pada waktu ke- i (mm),

$P_{sat,i}$ = curah hujan estimasi (satelit/ERA5) pada waktu ke- i (mm),

n = jumlah data.

Selanjutnya, nilai curah hujan hasil koreksi dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{corr,i} = K \cdot P_{sat,i} \quad 2.9$$

di mana:

$P_{corr,i}$ = curah hujan hasil koreksi pada waktu ke- i (mm).

Metode Rasio Rata-Rata memiliki kelebihan dalam kemudahan penerapan dan efisiensi perhitungan. Namun demikian, metode ini hanya mengoreksi bias pada nilai rata-rata dan belum mempertimbangkan karakteristik distribusi data curah hujan, sehingga sensitivitas terhadap kejadian hujan ekstrem masih terbatas.

2.6.5 Metode Regresi Power

Metode Regresi Power merupakan metode koreksi bias yang menghubungkan data curah hujan estimasi dan data curah hujan observasi menggunakan persamaan regresi nonlinier berbentuk fungsi pangkat. Metode ini digunakan untuk mengakomodasi hubungan nonlinier yang sering terjadi antara data curah hujan estimasi dan data observasi, khususnya pada intensitas hujan yang tinggi. Hubungan antara curah hujan estimasi dan observasi dinyatakan dalam bentuk persamaan regresi power sebagai berikut:

$$P_{obs} = a \cdot P_{sat}^b \quad 2.10$$

Keterangan:

P_{obs} = curah hujan observasi (mm),

P_{sat} = curah hujan estimasi (ERA5) (mm),

a dan b = parameter regresi.

Untuk memudahkan penentuan parameter regresi, persamaan tersebut ditransformasikan ke dalam bentuk logaritmik:

$$\ln(P_{obs}) = \ln(a) + b \cdot \ln(P_{sat}) \quad 2.11$$

Parameter a dan b diperoleh melalui analisis regresi linier antara $\ln(P_{obs})$ dan $\ln(P_{sat})$. Setelah parameter regresi diperoleh, koreksi bias dilakukan dengan memasukkan nilai curah hujan estimasi ke dalam persamaan regresi power sebagai berikut:

$$P_{corr} = a \cdot P_{sat}^b \quad 2.12$$

Metode ini sangat bergantung pada kualitas data observasi serta kestabilan hubungan statistik antara kedua data.

2.7 Evaluasi Hasil Koreksi Bias

2.7.1 Root Mean Square Error (RMSE)

Root Mean Square Error (RMSE) adalah salah satu metode statistik yang digunakan untuk mengukur tingkat kesalahan (error) antara nilai hasil prediksi/model dengan nilai aktual/observasi. RMSE menghitung akar dari rata-rata kuadrat selisih antara nilai observasi dan nilai hasil prediksi.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad 2.13$$

Keterangan:

P_i = nilai prediksi (simulasi/model) ke- i

O_i = nilai observasi (aktual) ke- i

n = jumlah data

$\sum_{i=1}^n$ = penjumlahan dari seluruh data

2.7.2 Mean Absolute Error (MAE)

Mean Absolute Error (MAE) adalah ukuran statistik yang digunakan untuk mengevaluasi seberapa besar rata-rata kesalahan absolut antara nilai prediksi model dan nilai observasi. MAE memberikan gambaran seberapa jauh, secara rata-rata, hasil prediksi menyimpang dari nilai sebenarnya, tanpa memperhatikan arah deviasi (positif atau negatif).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad 2.14$$

Keterangan:

P_i = nilai hasil prediksi atau simulasi ke- i

O_i = nilai observasi (aktual) ke- i

n = jumlah data

$|P_i - O_i|$ = nilai absolut dari selisih

2.7.3 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) adalah indikator statistik yang digunakan untuk menilai performa model hidrologi, khususnya dalam memprediksi aliran sungai atau variabel hidrologi lainnya. Nilai NSE menunjukkan seberapa baik hasil simulasi model mereplikasi data observasi.

$$NSE = 1 - \frac{\sum (O_i - P_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \quad 2.15$$

Keterangan:

O_i = nilai curah hujan observasi (aktual) ke- i

P_i = nilai curah hujan hasil prediksi/simulasi/model ke- i

$\bar{O}$ = nilai rata-rata curah hujan observasi

n = jumlah data pengamatan

$\sum (O_i - P_i)^2$ = jumlah kuadrat selisih antara hasil simulasi dan observasi

$\sum (O_i - \bar{O})^2$ = jumlah kuadrat selisih antara observasi dan rata-rata observasi

2.7.4 Koefisien Determinasi (R^2)

Koefisien Determinasi (R^2) adalah ukuran statistik yang menunjukkan seberapa besar proporsi variasi dari data observasi yang dapat dijelaskan oleh model. R^2 memberikan gambaran sejauh mana hubungan linier antara hasil simulasi dan data observasi dalam evaluasi model hidrologi, seperti:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum(Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})^2} \quad 2.16$$

Keterangan:

Y_{obs} = nilai data observasi

Y_{sim} = nilai hasil simulasi atau model

$\bar{Y}_{obs}$ = rata-rata data observasi

Kriteria kinerja suatu model dapat ditinjau berdasarkan nilai R^2 dan nilai r . Sebagaimana pada tabel nilai R^2 menunjukkan tingkat hubungan kuat jika nilainya minimal sebesar 0,60 dan nilai r menunjukkan keeratan hubungan kuat jika nilainya 0,50.

Tabel 2.2 Tingkat Hubungan Berdasarkan Koefisien Determinasi (R^2)

Interval Nilai	Keeratan Hubungan
0,00 – 0,199	Sangat Rendah
0,20 – 0,399	Rendah
0,40 – 0,599	Sedang
0,60 – 0,799	Kuat
0,80 – 1,000	Sangat Kuat

Sumber: (Moriassi et al., 2007)

Tabel 2.3 Kriteria Evaluasi Kinerja Model Hidrologi Berdasarkan Statistik Evaluasi

Kriteria	Definisi	Interpretasi
RMSE	Rata-rata kuadrat selisih antara nilai simulasi dan observasi	Semakin kecil, semakin baik
MAE	Rata-rata kesalahan mutlak antara data simulasi dan observasi	Indikasi deviasi absolut
NSE	Efisiensi model dibandingkan rata-rata observasi	>0.5 cukup baik; >0.75 sangat baik

Kriteria	Definisi	Interpretasi
R^2	Korelasi linier antara simulasi dan observasi	Semakin mendekati 1, semakin baik

Sumber: (Moriassi et al., 2007)