

2 LANDASAN TEORI

2.1 Siklus Hidrologi

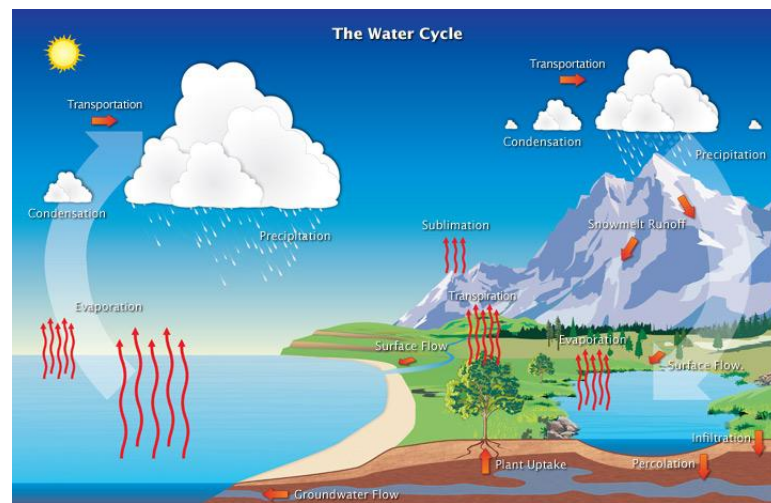
Secara geografis, pemahaman terhadap siklus hidrologi serta pengelolaan sumber daya air memiliki peranan yang sangat penting dalam menjaga keberlanjutan ekosistem dan mendukung kesejahteraan manusia. Siklus hidrologi merupakan rangkaian proses alami yang melibatkan pergerakan air antara atmosfer, daratan, dan lautan. Proses tersebut meliputi penguapan, presipitasi, infiltrasi, serta limpasan permukaan yang secara bersama-sama membentuk keseimbangan air di bumi (Ikrimah, 2024).

Siklus hidrologi diawali dengan proses evaporasi dari permukaan perairan dan transpirasi dari vegetasi, yang secara bersama-sama disebut sebagai evapotranspirasi. Uap air yang terbentuk kemudian mengalami kondensasi di atmosfer dan membentuk awan, selanjutnya jatuh ke permukaan bumi dalam bentuk presipitasi seperti hujan.

Air hujan yang mencapai permukaan bumi sebagian akan menjadi limpasan permukaan (*surface runoff*) yang mengalir menuju sungai dan laut, sementara sebagian lainnya akan meresap ke dalam tanah (*infiltrasi*) dan bergerak lebih dalam sebagai perkolasi untuk mengisi cadangan air tanah. Air tanah tersebut selanjutnya dapat muncul kembali ke permukaan sebagai aliran dasar (*baseflow*) yang menopang aliran sungai pada musim kering. Seluruh proses ini membentuk suatu sistem tertutup yang dikenal sebagai siklus hidrologi dan menjadi dasar dalam analisis hidrologi, khususnya dalam kajian neraca air dan pemodelan hidrologi daerah aliran sungai (DAS).

Gambar 2.1 menunjukkan komponen-komponen utama dalam siklus hidrologi yang meliputi evaporasi, transpirasi, kondensasi, presipitasi, infiltrasi, perkolasi, limpasan permukaan (*surface runoff*), aliran bawah permukaan (*subsurface flow*), dan aliran air tanah (*groundwater flow*). Energi matahari menyebabkan air dari laut, sungai, danau, serta permukaan tanah mengalami evaporasi, sedangkan vegetasi melepaskan uap air melalui proses transpirasi. Uap air tersebut kemudian mengalami kondensasi di atmosfer hingga membentuk awan, yang selanjutnya menghasilkan presipitasi dalam bentuk hujan. Air hujan yang

mencapai permukaan bumi sebagian mengalir sebagai limpasan permukaan menuju sungai dan badan air, sedangkan sebagian lainnya meresap ke dalam tanah melalui proses infiltrasi dan bergerak lebih dalam melalui perkolasi untuk mengisi cadangan air tanah. Seluruh proses tersebut berlangsung secara terus-menerus dan saling berhubungan sehingga menjaga keseimbangan distribusi air di bumi serta berperan penting dalam mengatur ketersediaan sumber daya air pada suatu daerah aliran sungai (DAS).



Gambar 2.1 Proses Siklus Hidrologi
Sumber : NASA Global Precipitation Measurement (GPM), 2010

2.1.1 *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) adalah sebuah model hidrologi skala daerah aliran sungai (DAS) yang bersifat semi-terdistribusi, berbasis fisik (*physically based*), dan beroperasi secara kontinu (*continuous time*) dalam jangka panjang. Model ini dikembangkan oleh *United States Department of Agriculture (USDA) Agricultural Research Service (ARS)* untuk memprediksi dampak manajemen lahan, perubahan penggunaan lahan, serta perubahan iklim terhadap ketersediaan air, sedimen, dan kimia pertanian di DAS yang luas (Arnold dkk., 2009). Karakteristik utama SWAT adalah kemampuannya untuk beroperasi secara harian tanpa memerlukan data input yang terlalu detail secara spasial, namun tetap mempertahankan representasi fisik yang akurat melalui parameterisasi tanah dan vegetasi.

2.1.2 Konsep Hydrologic Response Units (HRU)

Dalam pemodelan SWAT, suatu Daerah Aliran Sungai (DAS) tidak dianggap sebagai satu unit tunggal yang seragam. SWAT menggunakan pendekatan semi-terdistribusi dengan membagi DAS menjadi beberapa sub-DAS (sub-basins), yang kemudian dibagi lagi ke dalam unit-unit fungsional yang disebut HRU.

HRU adalah satuan lahan terkecil di dalam sub-DAS yang memiliki karakteristik hidrologi identik. HRU dibentuk melalui proses tumpang susun (*overlay*) dari tiga lapisan data spasial utama:

1. Tata Guna Lahan (*Land Use*)
2. Jenis Tanah (*Soil*)
3. Kemiringan Lereng (*Slope*)

Proses hidrologi seperti infiltrasi, penguapan, dan pergerakan air lateral dihitung secara independen pada setiap HRU. Hasil perhitungan dari seluruh HRU kemudian diakumulasikan untuk menentukan total debit yang masuk ke jaringan sungai di sub-DAS terkait. Untuk menghindari model yang terlalu kompleks akibat adanya poligon-poligon sangat kecil yang tidak signifikan, SWAT menerapkan sistem ambang batas (*threshold*). Peneliti dapat menetapkan persentase minimal (misalnya 10%) untuk tata guna lahan, tanah, dan lereng. Area yang luasnya di bawah ambang batas akan dihilangkan dan luasnya didistribusikan secara proporsional ke unit yang dominan.

2.1.3 Prinsip Hidrologi dalam SWAT

Simulasi hidrologi dalam SWAT didasarkan pada persamaan neraca air (persamaan keseimbangan air di dalam tanah). Komponen yang dihitung mencakup curah hujan, limpasan permukaan (*surface runoff*), evapotranspirasi, perkolasi, dan aliran dasar (*baseflow*). Persamaan dasar neraca air yang digunakan adalah sebagai berikut (Ramadhani dkk., 2021):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad 2.1$$

Keterangan:

SW_t : Kadar air tanah akhir (mm)

SW_0 : Kadar air tanah awal (mm)

t : Waktu (hari)

R_{day} : Curah hujan pada hari ke-i (mm)

Q_{surf} : Limpasan permukaan pada hari ke-i (mm)

E_a : Evapotranspirasi aktual pada hari ke-i (mm)

W_{seep} : Air yang masuk ke zona tidak jenuh dari profil tanah (mm)

Q_{gw} : Aliran balik (return flow) ke sungai (mm)

2.1.4 Kalibrasi, Validasi, dan Analisis Ketidakpastian (SWAT-CUP)

Keandalan suatu model hidrologi sangat ditentukan oleh kemampuan model tersebut dalam merepresentasikan kondisi nyata di lapangan secara akurat. Mengingat SWAT memiliki jumlah parameter fisik yang sangat banyak dan kompleks, diperlukan suatu proses penyesuaian parameter yang sistematis dan terstruktur. Proses ini difasilitasi oleh perangkat lunak SWAT-CUP (*SWAT Calibration and Uncertainty Programs*) yang dirancang untuk melakukan analisis sensitivitas, kalibrasi, validasi, serta evaluasi ketidakpastian model secara terpadu. Tahap awal yang dilakukan adalah analisis sensitivitas, yang bertujuan untuk mengidentifikasi parameter-parameter kunci yang paling berpengaruh terhadap output model, khususnya debit aliran. Melalui pendekatan global sensitivity analysis, pengaruh suatu parameter dievaluasi dengan mempertimbangkan variasi parameter lainnya secara simultan.

Tahap selanjutnya adalah kalibrasi model, yaitu proses penyesuaian nilai parameter dalam rentang yang diizinkan agar hasil simulasi mendekati data observasi di lapangan. Dalam penelitian ini digunakan algoritma *Sequential Uncertainty Fitting version 2* (SUFI-2) yang merupakan metode paling umum dalam SWAT-CUP (Watershed dkk., 2025). Algoritma ini memetakan seluruh ketidakpastian parameter input dan berupaya menangkap sebagian besar data observasi ke dalam pita ketidakpastian model atau 95% *Prediction Uncertainty* (95PPU). Proses kalibrasi dilakukan secara iteratif hingga diperoleh nilai statistik kinerja yang optimal. Parameter hasil kalibrasi kemudian diuji pada tahap validasi, yaitu dengan menggunakan data observasi independen pada periode waktu yang berbeda tanpa mengubah nilai parameter. Tahap ini bertujuan untuk memastikan bahwa model memiliki kemampuan prediksi yang konsisten dan tidak mengalami *overfitting*, sehingga layak digunakan untuk analisis ketersediaan air di masa mendatang.

Selain itu, evaluasi ketidakpastian model dilakukan menggunakan dua indikator utama, yaitu *P-factor* dan *R-factor*. Nilai *P-factor* menunjukkan persentase data observasi yang tercakup dalam pita ketidakpastian simulasi, di mana nilai yang mendekati 1 menunjukkan tingkat ketidakpastian yang rendah. Sementara itu, *R-factor* menggambarkan ketebalan pita ketidakpastian, dengan nilai mendekati 0 menunjukkan presisi model yang tinggi. Keberhasilan proses kalibrasi dan validasi selanjutnya dievaluasi menggunakan indikator kinerja statistik standar, yaitu *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), koefisien determinasi (R^2), dan Percent Bias (PBIAS), dengan kriteria kinerja memuaskan masing-masing $NSE > 0,50$, $R^2 > 0,60$, dan PBIAS dalam rentang $\pm 25\%$.

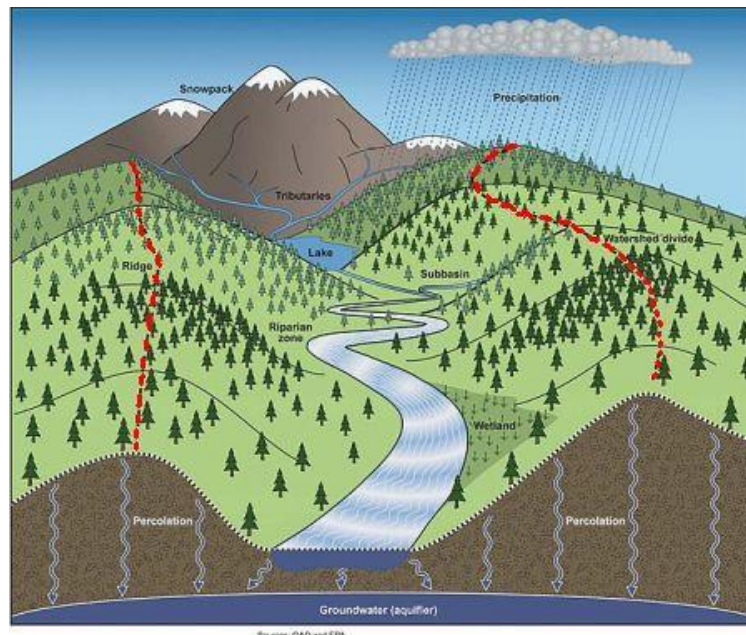
2.2 Daerah Aliran Sungai (DAS)

DAS adalah sistem alami dalam hidrologi yang sungai berperan sebagai elemen utama. Aliran sungai dipengaruhi oleh curah hujan dan kondisi biofisik DAS, yang meliputi geometri, morfometri, geologi, serta karakteristik penutupan lahan (Liamas, 1933; Nilda dkk., 2010). Manan (1978) menjelaskan bahwa DAS merupakan wilayah tangkapan air hujan yang dibatasi secara alami oleh punggung bukit atau pegunungan, dengan aliran air yang terpusat ke sungai utama dan berakhir di laut (Alfansyuri & Farni, 2018).

Secara konseptual, Daerah Aliran Sungai (DAS) tidak hanya dipahami sebagai batas wilayah geografis, tetapi sebagai suatu ekosistem yang kompleks yang mengintegrasikan unsur biotik dan abiotik. Setiap perubahan pemanfaatan lahan di wilayah hulu akan menimbulkan dampak berkelanjutan terhadap kuantitas maupun kualitas air di wilayah hilir (Bakari, 2025). Batas DAS ditentukan oleh pemisah topografis berupa punggung bukit (*ridge*) yang mengarahkan aliran air hujan. Dalam pengelolaan sumber daya air, DAS dianggap sebagai unit perencanaan yang paling rasional karena mencakup keterkaitan fungsional antara aliran permukaan dan air tanah.

Gambar 2.2 menunjukkan konsep Daerah Aliran Sungai (DAS), yaitu suatu wilayah daratan yang dibatasi oleh punggung bukit atau batas topografi, tempat seluruh air hujan yang jatuh mengalir melalui jaringan sungai menuju satu titik keluaran (*outlet*). Aliran air dalam DAS dipengaruhi oleh karakteristik topografi, jenis tanah, tutupan lahan, dan kondisi iklim sehingga berperan penting dalam

menentukan proses hidrologi, seperti infiltrasi, limpasan permukaan, serta aliran sungai.



Gambar 2.2 Skema Sistem Daerah Aliran Sungai (DAS)

Sumber: Study.com, *Watershed: Definition, Examples & Characteristics*, 2026

2.2.1 Bentuk-Bentuk DAS

Bentuk DAS adalah pola geometris wilayah tangkapan air yang dibatasi oleh punggung bukit dan menyalurkan air hujan menuju satu titik keluaran (outlet). Secara umum, bentuk DAS dibedakan menjadi beberapa tipe utama:

1. Memanjang (*Elongated*)

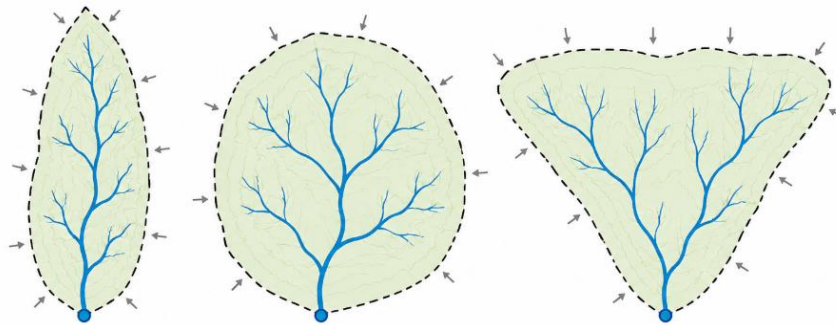
DAS tipe ini cenderung memiliki waktu konsentrasi yang lebih lama karena jarak dari hulu ke hilir cukup jauh. Akibatnya, puncak banjir lebih rendah dan durasi banjir lebih lama (landai).

2. Bulat (*Radial*)

DAS dengan bentuk ini memiliki waktu konsentrasi yang hampir bersamaan dari setiap anak sungai menuju sungai utama. Hal ini sering kali menyebabkan puncak banjir yang sangat tinggi karena air tiba di outlet pada saat yang bersamaan.

3. Pararel

Terdiri dari dua atau lebih anak sungai utama yang mengalir sejajar dan bertemu di bagian hilir. Puncak banjir terjadi jika kedua anak sungai tersebut membawa debit puncak secara bersamaan.



Gambar 2.3 Bentuk-bentuk DAS

2.2.2 Karakteristik Biofisik dan Jaringan Sungai

Karakteristik biofisik dan jaringan sungai merupakan komponen fundamental dalam analisis hidrologi Daerah Aliran Sungai (DAS), karena menjadi dasar pembentukan HRU pada model hidrologi. Parameter-parameter ini menentukan respons hidrologi suatu DAS terhadap curah hujan serta memengaruhi proses aliran permukaan, infiltrasi, dan penyimpanan air.

Jaringan sungai berperan sebagai sistem pengaliran utama yang mengumpulkan limpasan permukaan dari setiap sub-DAS dan menyalurkannya menuju outlet. Tingkat efisiensi sistem pengaliran tersebut dapat ditunjukkan melalui kerapatan drainase, yaitu rasio antara total panjang sungai terhadap luas DAS. Nilai kerapatan drainase yang tinggi menunjukkan kemampuan DAS yang lebih cepat dalam membuang kelebihan air, sehingga DAS cenderung memiliki respons yang cepat terhadap kejadian hujan ekstrem.

Penggunaan lahan (*land use*) turut menentukan karakteristik hidrologi DAS melalui pengaruhnya terhadap proses intersepsi, infiltrasi, dan limpasan permukaan. Tutupan vegetasi yang rapat mampu meningkatkan intersepsi air hujan oleh tajuk tanaman serta memperbesar infiltrasi ke dalam tanah. Selain itu, vegetasi juga meningkatkan kekasaran permukaan tanah yang berfungsi menurunkan kecepatan aliran permukaan, sehingga dapat mengurangi limpasan dan membantu menjaga ketersediaan air tanah, terutama pada musim kemarau.

Jenis tanah memengaruhi kemampuan DAS dalam menyimpan dan meneruskan air. Karakteristik fisik tanah menentukan kapasitas simpan air (*water holding capacity*), yaitu volume air yang dapat ditahan dalam pori-pori tanah. Tanah bertekstur kasar umumnya memiliki konduktivitas hidrolik yang tinggi sehingga memungkinkan perkolasi air menuju zona akuifer berlangsung lebih cepat, sedangkan tanah bertekstur halus seperti lempung cenderung memiliki infiltrasi rendah dan berpotensi menghasilkan limpasan permukaan yang lebih besar.

Kemiringan lereng (*slope*) merupakan faktor topografi yang berpengaruh langsung terhadap energi dan kecepatan aliran permukaan. Lereng yang curam mempercepat laju aliran air dan memperpendek waktu kontak air dengan permukaan tanah, sehingga mengurangi peluang infiltrasi dan menyebabkan air lebih cepat meninggalkan DAS. Dalam pemodelan hidrologi, pembagian kelas lereng khususnya di wilayah hulu menjadi variabel penting dalam pembentukan HRU untuk mengidentifikasi area yang berpotensi mengalami defisit air akibat proses pengaliran yang terlalu cepat.

2.3 Perubahan Iklim

Perubahan iklim merupakan kondisi ketika terjadi pergeseran pola statistik iklim, seperti temperatur, curah hujan, dan kelembapan, yang berlangsung dalam jangka waktu panjang umumnya puluhan hingga ratusan tahun. Perubahan ini banyak dikaitkan dengan aktivitas manusia, terutama akibat peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Dalam konteks hidrologi, teori siklus air menjelaskan bahwa perubahan pada suhu dan pola curah hujan akan memengaruhi berbagai proses dalam sistem hidrologi, seperti penguapan, transpirasi, infiltrasi, dan limpasan permukaan (*runoff*). Perubahan pada komponen-komponen tersebut pada akhirnya akan berdampak pada keseimbangan air (*water balance*) suatu daerah aliran sungai (U.S. National Park Service 2025). Perubahan iklim mengacu pada perubahan jangka panjang dalam pola cuaca global yang disebabkan oleh aktivitas manusia, terutama peningkatan emisi gas rumah kaca ke atmosfer. Efek pemanasan global menyebabkan perubahan iklim yang signifikan di seluruh dunia. Beberapa perubahan iklim yang diamati termasuk:

1. Peningkatan suhu rata-rata: Suhu rata-rata Bumi telah meningkat secara signifikan selama beberapa dekade terakhir. Pemanasan global ini disebabkan oleh peningkatan emisi gas rumah kaca, seperti karbon dioksida (CO₂) dan metana (CH₄), yang menjebak panas di atmosfer.
2. Peningkatan curah hujan ekstrem: Perubahan iklim juga menyebabkan perubahan dalam pola curah hujan. Beberapa wilayah mengalami peningkatan curah hujan ekstrem, yang dapat menyebabkan banjir dan kerusakan lingkungan.
3. Peningkatan tingkat permukaan laut: Pemanasan global menyebabkan pencairan es di kutub, yang mengakibatkan kenaikan tingkat permukaan laut. Ini berpotensi menyebabkan banjir pesisir, erosi pantai, dan intrusi air laut ke dalam sumber air tanah.
4. Perubahan pola musim: Pola musim juga mengalami perubahan akibat perubahan iklim. Puncak musim panas dan musim dingin dapat menjadi lebih panjang atau lebih pendek, dengan suhu ekstrem yang lebih sering terjadi.
5. Peningkatan kejadian bencana alam: Perubahan iklim telah dikaitkan dengan peningkatan kejadian bencana alam, seperti badai tropis yang lebih kuat, gelombang panas yang ekstrem, kekeringan yang parah, dan banjir yang sering terjadi.

Dalam konteks DAS dan ketersediaan air, perubahan iklim berarti perubahan pola curah hujan (jumlah, intensitas, dan distribusi musiman) serta perubahan evapotranspirasi yang kemudian memengaruhi aliran sungai dan air tanah. Pemanasan atmosfer, intensitas curah hujan bisa meningkat ~6-7 %/K tetapi total curah hujan hanya meningkat ~1-2 %/K sehingga pola hujan bergeser (lebih ekstrem tapi mungkin lebih jarang) (Chang dkk., 2021).

Di Indonesia, dampak perubahan iklim diindikasikan dengan adanya peningkatan frekuensi fenomena iklim yang dapat mengakibatkan kekeringan dan banjir. Fenomena iklim yang dikenal dengan ENSO (*El-Nino-Southern Oscillation*) yang terdiri dari kejadian *El Nino* dan *La Nina* sangat mempengaruhi distribusi curah hujan di Indonesia. Kejadian *El Nino* diidentikan dengan kejadian kekeringan, sementara *La Nina* diidentikan dengan kejadian banjir (Perdinan, 2021).

2.4 Ketersediaan Air

Ketersediaan air di daratan memiliki peran penting bagi kesehatan manusia, aktivitas ekonomi, fungsi ekosistem, serta proses geofisika. Karena tekanan uap jenuh air di atmosfer sangat sensitif terhadap perubahan suhu, maka gangguan pada siklus hidrologi global diperkirakan akan menyertai pemanasan iklim. Namun demikian, pola perubahan iklim di permukaan akibat peningkatan suhu menunjukkan kerumitan yang tinggi dan tingkat ketidakpastian yang lebih besar dibandingkan dengan perubahan suhu itu sendiri, di mana baik peningkatan maupun penurunan curah hujan dan limpasan diperkirakan akan terjadi di berbagai wilayah (Milly dkk., 2014).

Dalam analisis neraca air, variabel evapotranspirasi merupakan komponen pengeluaran (*output*) yang paling dipengaruhi oleh fluktuasi iklim. Untuk mendapatkan nilai estimasi kehilangan air atmosferik yang presisi di DAS Citanduy Hulu, penelitian ini menerapkan metode Penman-Monteith FAO-56 sebagai standar perhitungan evapotranspirasi acuan (ET_o).

2.4.1 Surplus Air

Surplus air merupakan kondisi hidrologis ketika ketersediaan air, khususnya yang berasal dari curah hujan, melampaui kebutuhan tanaman untuk proses evapotranspirasi serta melebihi kapasitas simpanan kejenuhan air tanah (*soil moisture storage*). Dalam analisis neraca air, fenomena ini merupakan indikator penting adanya kelebihan air yang tidak lagi dapat diserap oleh tanah maupun tanaman, sehingga air tersebut akan bergerak menjadi aliran permukaan (*surface runoff*) atau meresap lebih dalam untuk mengisi kembali cadangan air tanah (*groundwater recharge*). Karakteristik dan Mekanisme Surplus Air Berdasarkan teori neraca air Thornthwaite-Mather, surplus air terjadi melalui tahapan berikut:

1. Pengisian Kembali (*Recharge*): Setelah musim kemarau berakhir, air hujan pertama akan digunakan untuk mengisi kekosongan pori-pori tanah hingga mencapai tingkat kapasitas lapang (*field capacity*).
2. Kondisi Jenuh: Setelah tanah tidak mampu lagi menampung air, maka setiap tetes hujan tambahan akan dianggap sebagai Surplus.
3. Limpasan: Air surplus inilah yang menjadi sumber utama debit sungai (aliran permukaan) yang mengalir di DAS Citanduy Hulu menuju wilayah hilir.

2.4.2 Defisit Air

Defisit air adalah suatu kondisi hidrologis yang terjadi ketika jumlah air yang tersedia tidak mencukupi untuk memenuhi kebutuhan penguapan (evapotranspirasi) dan kebutuhan air tanah. Dalam analisis neraca air, kondisi ini muncul apabila nilai Evapotranspirasi Potensial (ETP) lebih besar daripada nilai Curah Hujan (CH) setelah cadangan air di dalam tanah habis digunakan. Fenomena defisit biasanya mendominasi pada musim kemarau panjang, di mana intensitas hujan sangat rendah sementara suhu udara yang tinggi memicu penguapan yang ekstrem.

2.4.3 Konsep Debit Andalan (*Dependable Flow*)

Debit andalan (*dependable flow*) didefinisikan sebagai besaran debit minimum sungai yang tersedia sepanjang tahun dengan probabilitas atau tingkat keterandalan tertentu yang disepakati untuk memenuhi kebutuhan air tertentu. Dalam perencanaan teknik sipil keairan, analisis debit andalan bertujuan untuk meminimalkan risiko kegagalan sistem akibat fluktuasi iklim ekstrem yang dapat memicu kekeringan atau kegagalan panen pada jaringan irigasi. Secara umum, penentuan besaran angka probabilitas keterandalan (P) disesuaikan dengan jenis peruntukan pemanfaatan air yang direncanakan. Untuk kepentingan pemenuhan kebutuhan ketersediaan air domestik (air minum), pembangkit listrik tenaga air (PLTA), serta kebutuhan air irigasi pertanian secara makro, standar baku yang kerap digunakan adalah debit andalan dengan tingkat keterandalan 80% atau disimbolkan sebagai Debit Andal Q80.

Secara statistika, Debit Andal Q80 mengandung makna bahwa debit aliran sungai yang bersangkutan memiliki probabilitas untuk sama dengan atau melampaui nilai Q80 tersebut sebesar 80% dari total waktu pengamatan jangka panjang. Sebaliknya, peluang terjadinya kondisi debit sungai yang lebih kecil daripada nilai Q80 tersebut (risiko kegagalan atau defisit) adalah sebesar 20% (100%-80%). Secara matematis, konsep probabilitas ini dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P(Q \geq Q80) = 0.80 \quad 2.2$$

Karakteristik hidrologis utama penggunaan debit andalan Q80 dalam analisis ketersediaan air menunjukkan bahwa parameter ini memiliki sifat yang konservatif

dan memberikan tingkat keamanan yang tinggi dalam perencanaan sumber daya air. Nilai Q80 merepresentasikan debit yang dapat diandalkan atau terlampaui sebesar 80% dari waktu pengamatan, sehingga menggambarkan kondisi aliran yang relatif rendah dan cenderung mendekati situasi musim kemarau. Penggunaan debit dengan tingkat keandalan tersebut bertujuan untuk memastikan bahwa perencanaan alokasi dan pemanfaatan air tetap berada pada batas yang aman meskipun terjadi penurunan ketersediaan air akibat berkurangnya curah hujan. Selain itu, debit Q80 juga dapat digunakan sebagai indikator aliran dasar (*baseflow*) karena nilainya sangat dipengaruhi oleh kemampuan karakteristik fisik Daerah Aliran Sungai (DAS), seperti kondisi tutupan lahan, kapasitas infiltrasi tanah, dan kemampuan penyimpanan air dalam akuifer bawah permukaan. Pada periode tanpa hujan, aliran sungai yang direpresentasikan oleh debit Q80 umumnya berasal dari pelepasan cadangan air tanah secara bertahap dan berkesinambungan menuju saluran sungai, sehingga mencerminkan kapasitas DAS dalam mempertahankan aliran selama kondisi kering. Oleh karena itu, parameter Q80 tidak hanya berfungsi sebagai dasar penentuan ketersediaan air yang andal, tetapi juga memberikan gambaran mengenai ketahanan hidrologis suatu DAS dalam menopang aliran sungai sepanjang tahun.

Untuk menentukan besaran nilai Debit Andal Q80 dari rangkaian data runtun waktu (*time series*) hasil pemodelan kontinu, metode yang paling umum dan diakui secara luas dalam regulasi hidrologi di Indonesia adalah metode Persamaan Weibull. Prosedur perhitungan posisi probabilitas Weibull dilakukan dengan mengurutkan data debit dari nilai terbesar hingga terkecil menggunakan rumus sebagai berikut:

$$P = \frac{m}{n+1} \times 100\% \quad 2.3$$

Di mana variabel di atas didefinisikan sebagai:

P = Probabilitas terjadinya atau terlampauinya suatu debit tertentu (%)

m = Nomor urut peringkat (*ranking*) data debit setelah diurutkan dari besar ke kecil (di mana untuk debit terbesar)

n = Jumlah total data pengamatan harian/bulanan dalam rentang tahun analisis

Melalui persamaan tersebut, nilai debit yang berada tepat pada koordinat posisi probabilitas akan diekstrak dan ditetapkan sebagai angka fiksasi Debit Andal bulanan yang digunakan untuk menganalisis fluktuasi surplus dan defisit air.

2.4.4 Penman-Monteith FAO-56

Evapotranspirasi tanaman acuan (ET₀) didefinisikan sebagai proses evapotranspirasi yang terjadi pada tanaman referensi berupa rumput dengan tinggi sekitar 12 cm dari permukaan tanah, yang tumbuh pada lahan dengan kondisi ketersediaan air yang tercukupi secara optimal. Berdasarkan hasil penelitian pada wilayah beriklim basah (*humid*) yang dilaporkan dalam FAO Paper 56, metode Penman–Monteith dinilai sebagai metode paling unggul dibandingkan metode lainnya dalam mengestimasi evapotranspirasi tanaman acuan (Yustiana & Antonio Sihotang, 2019). Metode ini menunjukkan tingkat korelasi yang sangat tinggi terhadap hasil pengukuran menggunakan lisimeter, yaitu sebesar 97% untuk seluruh periode bulanan dan 93% pada bulan puncak. Selain itu, nilai kesalahan estimasi standar (*standard error of estimate*) yang dihasilkan metode Penman–Monteith merupakan yang terendah, yakni sebesar 0,32, sementara metode lain menunjukkan nilai kesalahan yang lebih besar, berkisar antara 0,56 hingga 1,29 (Badan Standardisasi Nasional Indonesia (BSN), 2012). Perhitungan evapotranspirasi tanaman acuan dengan metode Penman-Monteith sebagai berikut (Monteith, 1965):

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta R_n + \gamma \frac{900}{(T+273)} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad 2.4$$

Keterangan:

ET₀ = Evapotranspirasi acuan (mm/hari)

R_n = Radiasi matahari netto di atas permukaan tanaman (MJ/m²/hari)

T = Suhu udara rata-rata (°C)

U₂ = Kecepatan angin pada ketinggian 2 m dari atas permukaan tanah (m/s)

e_s = Tekananuap air jenuh (kPa)

e_a = Tekananuap air aktual (kPa)

Δ = Kemiringan kurva tekanan uap air terhadap suhu (kPa/°C)

γ = Konstanta psikometrik (kPa/°C)

Tekananu uap jenuh (e_s) besarnya:

$$e_s = 0,611 \exp \exp \left(\frac{17,27 T}{T+237,3} \right) \quad 2.5$$

Tekananu uap actual (e_a) dapat dihitung dengan:

$$e_a = e_s \times RH \quad 2.6$$

Keterangan:

RH = Kelembaban Relatif Rata-rata (%)

Kemiringan kurva tekanan uap air terhadap suhu udara:

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(T+237,3)^2} \quad 2.7$$

Keterangan:

Δ = Kemiringan kurva tekanan uap air terhadap suhu udara (kPa/°C)

$$\gamma = \frac{c_p p}{\varepsilon \lambda} 10^{-3} = 0,00163 \frac{P}{\lambda} \quad 2.8$$

Keterangan:

γ = Konstanta psikrometrik (kPa/°C)

c_p = Nilai panas spesifikasi udara lembap sebesar 1,013 kJ/kg/°C

P = Tekanan atmosfer (kPa)

ε = Nilai perbandingan berat molekul uap air dengan udara kering = 0,622

λ = Panas laten untuk penguapan, (ML/kg)

2.4.5 Metode SCS *Curve Number* (CN)

Metode Soil Conservation Service - Curve Number (SCS-CN) merupakan salah satu pendekatan hidrologi yang paling luas digunakan untuk mengestimasi volume limpasan permukaan (*surface runoff*) berdasarkan karakteristik fisik suatu wilayah tangkapan air (Kannan, 2017). Dalam penelitian ini, metode SCS-CN menjadi parameter utama dalam komponen loss model pada software SWAT untuk menentukan besarnya infiltrasi dan air yang tersedia di DAS Citanduy Hulu. Persamaan SCS-CN disajikan pada persamaan 2. 7.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day}-0,2S)^2}{(R_{day}+0,8S)} \quad 2.9$$

Keterangan:

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

S = Retention parameter (mm)

Parameter retensi (S) menggambarkan kemampuan tanah dalam menyimpan air hujan sebelum terjadinya limpasan permukaan. Nilai parameter ini bersifat spasial dan dipengaruhi oleh variasi karakteristik tanah, pola penggunaan serta pengelolaan lahan, dan kondisi kemiringan lereng. Besarnya parameter retensi (S) ditentukan menggunakan Persamaan (2.10), sedangkan kisaran nilai CN disajikan pada Tabel 2.1 (Neitsch dkk., 2011).

$$S = 25,4 \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \quad 2.10$$

Keterangan:

S = Parameter retensi (mm)

CN = Curve Number

Tabel 2.1 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
Jenis Lahan	Keadaan Hidrologi	Kelompok Tanah			
		A	B	C	D
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
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

Nilai *Curve Number* adalah koefisien tak berdimensi (berkisar antara 0–100) yang merepresentasikan potensi limpasan suatu permukaan tanah. Penentuan nilai ini didasarkan pada integrasi dua variabel utama:

1. Tutupan Lahan (*Land Use*): Menggambarkan kondisi permukaan, seperti area hutan, persawahan, atau pemukiman, yang mempengaruhi hambatan aliran dan intersepsi air hujan.
2. Grup Hidrologi Tanah (*Hydrologic Soil Group* - HSG): Mengelompokkan tanah ke dalam tipe A, B, C, atau D berdasarkan laju infiltrasi minimumnya. Sebagai contoh, tanah tipe A memiliki laju infiltrasi tinggi (potensi limpasan rendah), sedangkan tipe D memiliki infiltrasi sangat rendah (potensi limpasan tinggi).

Dalam konteks fenomena perubahan iklim, penggunaan metode SCS-CN memiliki peran strategis sebagai berikut:

1. Estimasi Ketersediaan Air: Dengan mengetahui berapa banyak air yang tertahan di permukaan (infiltrasi) melalui parameter CN, perhitungan Neraca Air dapat memprediksi volume air yang benar-benar tersedia di sungai sebagai surplus atau defisit.
2. Analisis Sensitivitas Dampak: Melalui simulasi SWAT, dapat dianalisis apakah perubahan pola debit di DAS Citanduy Hulu murni disebabkan oleh tren curah hujan ekstrem (hasil Uji Mann-Kendall) atau diperparah oleh karakteristik tutupan lahan yang tercermin dalam nilai CN.
3. Dasar Strategi Pengelolaan: Nilai CN yang tinggi di wilayah tertentu memberikan landasan ilmiah bagi perumusan Strategi Pengelolaan Air, seperti rekomendasi konservasi tanah dan air untuk mengurangi risiko banjir dan meningkatkan cadangan air tanah saat musim kemarau.

2.5 Analisis Tren dan Data Klimatologi

Tren klimatologi merupakan kecenderungan perubahan statistik jangka panjang pada berbagai parameter cuaca, seperti curah hujan, suhu udara, kelembapan, dan kecepatan angin. Dalam konteks penelitian, analisis tren klimatologi menjadi sangat penting untuk mengidentifikasi apakah pola iklim di DAS telah mengalami perubahan yang signifikan secara historis.

2.5.1 Variabel Utama Tren Klimatologi

Untuk memahami dinamika perubahan iklim secara komprehensif, diperlukan identifikasi terhadap variabel-variabel utama yang membentuk tren klimatologi pada wilayah Citanduy Hulu. Variabel tersebut meliputi :

1. Tren Suhu Udara

Menuru Allen dkk. (2003) perubahan iklim berkontribusi terhadap peningkatan suhu udara yang berdampak pada meningkatnya laju evaporasi serta menurunnya kelembapan tanah. Kondisi tersebut menyebabkan tanah menjadi semakin kering, khususnya pada wilayah yang telah mengalami keterbatasan ketersediaan air (Gulo, 2024). Laporan Bank Dunia 2021 menyebutkan, Indonesia sebagai negara dengan kecenderungan suhu lebih hangat berpotensi mengalami hujan ekstrem lebih besar. Berdasarkan teori hubungan Clausius–Clapeyron, setiap kenaikan suhu udara sebesar 1°C akan meningkatkan kemampuan atmosfer dalam menampung uap air sekitar 7 persen (Rosalina dkk., 2024). Kondisi ini menyebabkan udara memiliki kecenderungan lebih besar untuk menarik uap air dari permukaan tanah dan vegetasi.

Kenaikan suhu udara juga meningkatkan defisit tekanan uap (*Vapor Pressure Deficit/VPD*), yaitu selisih antara kapasitas maksimum uap air yang dapat ditampung udara dan jumlah uap air yang terkandung di dalamnya. Nilai VPD yang tinggi merupakan faktor utama pendorong meningkatnya evapotranspirasi acuan (ET_o) (Miao dkk., 2025). Suhu udara yang tinggi mempercepat proses penguapan sehingga air berkurang sebelum dapat dimanfaatkan secara optimal.

Selain itu, suhu udara yang melampaui batas optimal pertumbuhan tanaman dapat menyebabkan stomata menutup sehingga proses transpirasi terhambat. Namun, pada saat yang sama, evaporasi langsung dari permukaan tanah tetap meningkat secara signifikan, yang mengakibatkan kandungan air tanah menurun lebih cepat dan meningkatkan risiko kekeringan lahan.

2. Tren Curah Hujan

Tren curah hujan menggambarkan pola perubahan intensitas, frekuensi, dan distribusi hujan dalam suatu wilayah selama periode waktu tertentu. Analisis

tren ini penting untuk memahami kecenderungan peningkatan atau penurunan curah hujan, baik secara musiman maupun tahunan, serta pergeseran waktu kejadian hujan. Perubahan tren curah hujan dapat memengaruhi keseimbangan hidrologi, karena berperan langsung terhadap proses limpasan permukaan, infiltrasi, dan ketersediaan air. Oleh karena itu, kajian tren curah hujan menjadi dasar penting dalam perencanaan dan pengelolaan sumber daya air, terutama dalam menghadapi ketidakpastian iklim dan dinamika variabilitas cuaca (Miao dkk., 2025).

2.5.2 Relevansi Tren Klimatologi terhadap Ketersediaan Air

Dalam perspektif hidrologi terapan, ketersediaan air di suatu wilayah aliran tidak bersifat statis, melainkan hasil dari interaksi dinamis antara variabel atmosfer dan karakteristik biofisik lahan. Hubungan ini dirumuskan secara fundamental melalui prinsip Neraca Air (*Water Balance*), yang merepresentasikan hukum kekekalan massa air dalam suatu sistem DAS :

$$P = ET + R \pm \Delta S \quad 2.11$$

Keterangan:

P = Presipitasi (Curah Hujan)

ET = Evapotranspirasi

R = Runoff (Limpasan/Debit)

ΔS = Perubahan simpanan air tanah

Tren klimatologi yang menunjukkan kenaikan evapotranspirasi atau penurunan curah hujan secara otomatis akan menurunkan nilai (debit sungai), yang berarti menurunkan ketersediaan air baku di DAS Citanduy Hulu.

2.5.3 Metode Analisis Tren

1. Uji Mann-Kendall

Uji signifikansi terhadap tren indeks-indeks iklim ekstrem dilakukan menggunakan metode statistik Mann–Kendall Test. Metode ini dinilai paling tepat untuk menganalisis perubahan iklim serta mendeteksi adanya ketidakberlanjutan atau diskontinuitas pada data iklim (Chrysoulakis dkk., 2001). Statistik Uji Mann-Kendall (S) dihitung dengan membandingkan setiap nilai data dengan nilai-nilai berikutnya dalam deret waktu:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad 2.12$$

Keterangan:

- n = Jumlah total titik data
- x_i dan x_j = Nilai data pada waktu ke- i dan ke- j (dimana $j > i$)
- $\text{sgn}(x_j - x_i)$ = Fungsi tanda (sign function) yang memberikan nilai :
- +1 jika $(x_j - x_i) > 0$ (data meningkat)
 - 0 jika $(x_j - x_i) = 0$ (data tetap)
 - 1 jika $(x_j - x_i) < 0$ (data menurun)

Nilai statistik S selanjutnya dikonversi menjadi statistic Z (Z-score) untuk menentukan signifikansi. Jika nilai $|Z| > 1,96$ (pada Tingkat kepercayaan 95%), maka tren tersebut dinyatakan signifikan secara statistik.

2. Sen's Slope Estimator

Secara konseptual, apabila uji Mann–Kendall digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan suatu tren, maka Sen's Slope Estimator berfungsi untuk menentukan laju atau kecepatan perubahan yang terjadi. Dalam konteks DAS Citanduy Hulu, metode ini digunakan untuk menghitung besaran perubahan variabel iklim terhadap waktu, seperti peningkatan suhu udara dalam satuan derajat Celsius per tahun atau penurunan curah hujan dalam satuan milimeter per tahun (Fahmi dkk., 2025). Keunggulan utama metode Sen's Slope terletak pada ketahanannya terhadap keberadaan data pencilan (*outlier*), yang umumnya muncul akibat kejadian cuaca ekstrem, sehingga hasil estimasi tren menjadi lebih andal. Sen's Slope (Q) dihitung dengan mencari median dari semua kemiringan (*slope*) pasangan data :

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad 2.13$$

Keterangan:

- Q_i = Kemiringan antara dua titik data
- x_j dan x_k = Nilai data pada waktu j dan k
- j dan k = Indeks waktu (tahun), di mana $j > k$
- Q_{med} = Nilai Sen's Slope akhir, yang merupakan median dari seluruh kumpulan nilai Q_i yang telah dihitung.

2.5.4 Pemanfaatan Data Satelit ERA5 untuk Analisis Klimatologi

Dalam analisis hidrologi modern, ketersediaan data iklim yang kontinu secara spasial dan temporal menjadi tantangan utama, terutama pada wilayah DAS yang memiliki keterbatasan persebaran stasiun penakar hujan terrestrial. Untuk mengatasi kendala tersebut, penelitian ini memanfaatkan ERA5-Land, yang merupakan dataset reanalisis iklim generasi kelima dari *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). ERA5-Land menyediakan data iklim global dengan resolusi spasial yang lebih halus dan resolusi temporal per jam, yang sangat ideal untuk pemodelan hidrologi tingkat DAS. Dataset ini menggabungkan model fisik atmosfer dengan pengamatan historis dari satelit dan stasiun bumi melalui teknik asimilasi data yang canggih (Muñoz-sabater dkk., 2021).

Keandalan ERA5 sebagai sumber data atmosfer dalam penelitian ini didukung oleh hasil evaluasi yang menunjukkan bahwa ERA5 memiliki performa terbaik dalam merepresentasikan suhu dan tekanan udara serta konsistensi temporal yang kuat dibandingkan produk reanalisis lainnya, sehingga layak digunakan sebagai data masukan dalam analisis hidrologi (Chen dkk., 2025).

2.6 *Geographic Information System (GIS)*

Geographic Information System (GIS) atau Sistem Informasi Geografis (SIG) adalah sebuah sistem berbasis komputer yang dirancang khusus untuk mengumpulkan, menyimpan, memanipulasi, menganalisis, dan menyajikan data yang memiliki referensi geografis atau spasial. Dalam konteks hidrologi, GIS bukan sekadar alat pemetaan, melainkan platform analisis yang memungkinkan peneliti untuk mengintegrasikan berbagai lapisan data (layer) seperti topografi, jenis tanah, dan tata guna lahan ke dalam satu kesatuan referensi koordinat yang presisi (Sheena & Ramalingam, 2024).

Kemampuan GIS dalam melakukan analisis tumpang susun (*overlay*) sangat krusial dalam penelitian DAS, karena memungkinkan perhitungan parameter hidrologi yang kompleks secara otomatis. GIS mengubah data dunia nyata yang bersifat kontinu menjadi data digital (baik dalam format raster maupun vector) yang dapat diolah oleh model hidrologi seperti SWAT untuk memprediksi perilaku aliran air di suatu wilayah.