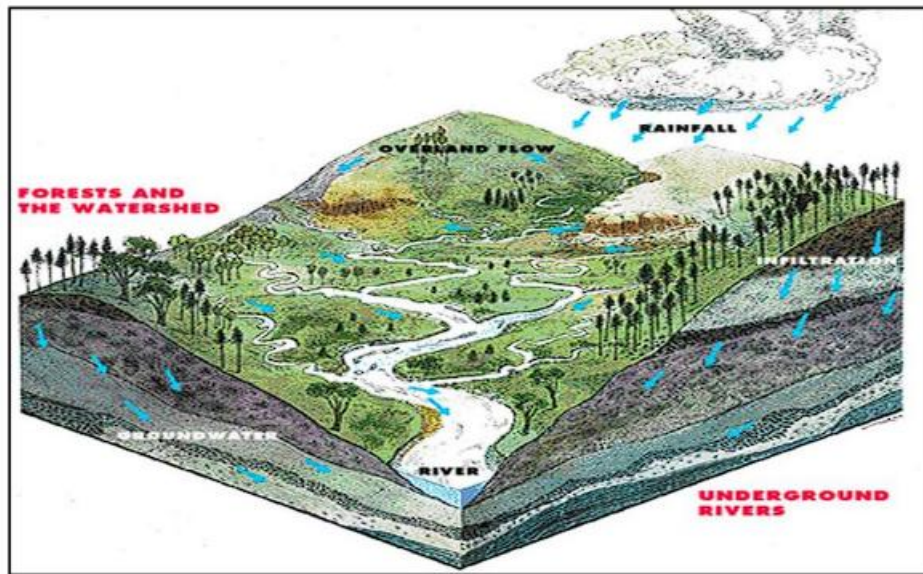


2 LANDASAN TEORI

2.1 Daerah Aliran Sungai (DAS)

Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah daerah yang di batasi punggung-punggung gunung dimana air hujan yang jatuh pada daerah tersebut akan ditampung oleh punggung gunung tersebut dan akan dialirkan melalui sungai-sungai kecil ke sungai utama (Fitri et al., 2019). DAS adalah suatu wilayah yang merupakan kesatuan ekosistem yang dibatasi oleh pemisah topografis dan berfungsi sebagai pengumpul, penyimpan dan penyalur air, sedimen, unsur hara melalui sistem sungai, mengeluarkannya melalui outlet tunggal yaitu ke danau/laut. Apabila turun hujan di daerah tersebut, maka air hujan yang turun akan mengalir ke sungai-sungai yang ada di sekitar daerah yang dituruni hujan (Naharuddin et al., 2018). Fungsi Daerah Aliran Sungai adalah sebagai areal penangkapan air (*catchment area*), penyimpan air (*water storage*) dan penyalur air (*distribution water*) (Halim, 2014).



Gambar 2.1 Daerah Aliran Sungai
Sumber: (Naharuddin et al., 2018)

DAS merupakan suatu kesatuan yang sistematis, dimana terdapat *input* curah hujan yang diproses dalam satu ekosistem DAS yang menghasilkan *output* berupa debit, aliran permukaan, erosi, sedimentasi dan sebagainya (Staddal et al., 2016).

Komponen output berupa debit aliran merupakan salah satu komponen yang dapat dijadikan sebagai dasar dalam kajian analisis kondisi hidrologis suatu DAS.

2.2 Air Permukaan

Air permukaan adalah air yang mengalir secara berkesinambungan atau dengan terputus-putus dalam alur sungai atau saluran dari sumbernya yang tertentu, dimana semua ini merupakan bagian dari sistem sungai yang menyeluruh. Yang termasuk air permukaan meliputi air sungai (*rivers*), saluran (*stream*), sumber (*springs*), danau dan waduk. Sumber air permukaan dalam bentuk air di sungai, saluran, danau, waduk dan lainnya merupakan sumber air yang mempunyai ketersediaan paling besar.

Air permukaan yang dibutuhkan untuk kehidupan dan produksi adalah air yang terdapat dalam proses sirkulasi air (siklus hidrologi), jika sirkulasi tidak merata maka akan terjadi bermacam kesulitan diantaranya sirkulasi yang kurang, maka kekurangan air ini harus ditambah dalam suatu usaha pemanfaatan air. (Sosrodarsono & Takeda, 2003). Untuk analisis ketersediaan air permukaan, yang akan digunakan sebagai acuan adalah andalan dari pencatatan yang ada. Yang paling berperan dalam studi ketersediaan air permukaan adalah data rekaman debit aliran sungai. Rekaman tersebut harus berkesinambungan dalam periode waktu yang dapat digunakan untuk pelaksanaan proyek penyediaan air. Apabila penyesuaian air akan dilakukan dari sungai yang masih alami, maka diperlukan rekaman data dari periode-periode aliran rendah yang kritis yang cukup panjang, sehingga besar pasok air dapat diketahui.

2.3 Debit Aliran Sungai

Debit aliran adalah jumlah air yang mengalir pada suatu titik keluaran (outlet) tertentu dalam satuan volume per waktu. Debit aliran dihasilkan dari data Tinggi Muka Air (TMA) dan data kecepatan arus sungai pada suatu penampang di titik keluaran pada suatu daerah tangkapan air. Debit sungai adalah informasi laju aliran air atau volume air sungai yang dapat diukur dalam satuan waktu tertentu dalam satuan meter kubik per detik (m^3/dt) (Fatmawati, 2016).

Aliran di sungai atau debit aliran sungai menyatakan jumlah air yang melewati suatu titik pengukuran. Debit aliran di sungai merupakan hasil kombinasi dari aliran permukaan, aliran antara (*throughflow*) dan aliran dasar (*baseflow*).

Salah satu komponen proses hidrologi yang mempengaruhi aliran sungai adalah air yang mengalir sedikit di bawah permukaan tanah. Komponen ini sering disebut sebagai: *through-flow*, *interflow*, atau aliran bawah permukaan (*subsurface stormflow*). Bagian hujan ini yang terperkolasi ke dalam lapisan yang lebih bawah akan menjadi air tanah. Air tanah (*groundwater*) yang ke luar melalui sungai disebut sebagai *baseflow*. *Baseflow* muncul sebagai debit air yang masih ada di Sungai pada saat musim kering atau selama periode tidak hujan. Debit (*Streamflow*) meningkat selama periode kenaikan (*rising limb*) hidrograf sampai puncak, setelah itu debit akan berkurang mengikuti periode penurunan (*falling limb*) atau periode resesi (*recession*) (Indarto, 2015).



Gambar 2.2 Komponen Aliran Permukaan

Sumber: (Indarto, 2015)

Periode resesi berlanjut sampai hujan berikutnya terjadi atau debit air kembali ke level seperti sebelum terjadi hujan. Komponen aliran dasar (*baseflow*) mungkin akan bertambah sedikit karena adanya hujan yang berturut-turut. Nilai fluktuasi debit yang tinggi menunjukkan besarnya aliran permukaan yang terjadi pada musim penghujan dan debit aliran pada musim kemarau sangat kecil (menunjukkan

kekeringan), hal ini secara tidak langsung menunjukkan kurang mampunya infiltrasi lahan suatu DAS untuk menahan dan menyimpan air hujan sehingga limpasan air hujan yang jatuh banyak masuk ke sungai kemudian terbangun ke laut yang menyebabkan ketersediaan air pada musim kemarau di DAS tersebut menjadi sedikit (Pratama & Yuwono, 2016).

Hujan yang jatuh di dalam DAS, kondisi peruntukan lahan, jenis tanah, kerapatan jaringan sungai, topografi, dan pemanfaatan aliran sungai untuk memenuhi kebutuhan hidup seperti irigasi, industri, perkebunan, dll. akan berpengaruh pada pola debit yang teramati sebagai data rentang waktu. Karakteristik DAS mencakup ukuran dan bentuk DAS, rerata kemiringan lahan, topografi, tanah dan vegetasi, jaringan sungai dan pola drainase, peruntukan lahan dan kondisi kadar lengas tanah pada saat terjadinya hujan juga berpengaruh terhadap debit aliran sungai.

2.4 Aliran Dasar (*Baseflow*)

Aliran dasar (*baseflow*) terjadi ketika air hujan meresap ke dalam tanah sampai mencapai ambang batas jenuh dan waktu yang diperlukan air bawah tanah (*groundwater*) untuk melepas air ke sungai. Aliran dasar ini juga sering disebut dengan aliran musim kering. Hal tersebut dikarenakan pada saat musim kering pun aliran ini masih tetap berlangsung. Aliran dasar berasal dari air hujan yang terinfiltrasi dan masuk ke dalam sub DAS menjadi cadangan air tanah dan perlahan-lahan akan mengalir keluar bergabung dengan aliran sungai. Aliran dasar berguna dalam suplai air dalam jangka panjang yang menjaga air tetap ada di sungai sepanjang waktu. *Baseflow* teramati sebagai debit di sungai ketika musim kemarau jika tidak terjadi hujan (Maiwa et al., 2020).

2.5 Ketersediaan Air

Ketersediaan air adalah jumlah air (debit) yang diperkirakan terus menerus ada di suatu lokasi (bendung atau bangunan air lainnya) di sungai dengan jumlah tertentu dan dalam jangka waktu (periode) tertentu (Direktorat Irigasi, 1980). Air mempunyai peranan yang sangat strategis dan harus tetap tersedia jumlahnya, sehingga dapat mendukung kehidupan manusia dan pelaksanaan pembangunan di masa sekarang maupun di masa yang akan datang (Irawan, 2024). Air yang tersedia

tersebut dapat digunakan untuk berbagai keperluan seperti air baku yang meliputi air domestik (air minum dan rumah tangga) dan non domestik (perdagangan, perkantoran) dan industri, pemeliharaan sungai, peternakan, perikanan, irigasi dan pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Untuk pemanfaatan air, perlu diketahui informasi ketersediaan air andalan (debit, hujan). Debit andalan adalah debit minimum sungai dengan besaran tertentu yang mempunyai kemungkinan terpenuhi yang dapat digunakan untuk berbagai keperluan. Untuk mendapatkan data mengenai debit andalan di suatu lokasi diperlukan data pendukung yang bisa berupa data debit, data hujan ataupun data debit bulanan (Triatmodjo, 2008).

2.5.1 Debit Andalan Berdasarkan Data Debit

Menurut (Triatmodjo, 2008), prosedur analisis debit andalan sangat dipengaruhi oleh ketersediaan data. Apabila terdapat data debit dalam jumlah cukup panjang, maka analisis ketersediaan air dapat dilakukan dengan melakukan analisis frekuensi terhadap data debit tersebut. Untuk mendapatkan ketersediaan air di suatu stasiun diperlukan debit aliran yang bersifat runtut waktu (*time series*), misalnya data debit harian sepanjang tahun selama beberapa tahun. Data tersebut menjadi masukan utama dalam model simulasi wilayah sungai, yang menggambarkan secara lengkap variabilitas data debit aliran.

Debit andalan dapat ditentukan dengan menggunakan kurva massa debit yang dibentuk dengan menyusun data debit, dari debit maksimum sampai debit minimum. Susunan data dapat dinyatakan dalam bentuk gambar kurva massa atau dalam bentuk tabel. Pada kurva massa debit, ordinat adalah debit aliran sedang waktu (hari) atau % waktu sebagai absis. Kurva menunjukkan besarnya debit disamai atau dilampaui untuk beberapa persen waktu yang diinginkan. Untuk bentuk tabel, data debit harian diurutkan dari nilai terbesar sampai terkecil, persen keandalan diperoleh dari nilai m/n yang dinyatakan dalam % di mana m adalah nomor urut dan n adalah jumlah data. Adapun rumusnya sebagai berikut.

$$P = \frac{m}{n + 1} \times 100\% \quad (2.1)$$

2.5.2 Penurunan Data Debit Berdasarkan Data Hujan

Menurut (Triatmodjo, 2008), apabila data debit yang bersifat runtut waktu (*time series*) tidak dapat ditemukan di semua lokasi sungai sehingga data debit tidak tersedia maka analisa debit andalan dapat dilakukan menggunakan data hujan. Analisis debit andalan dapat dilakukan dengan menggunakan model hujan aliran. Pada umumnya data hujan tersedia dalam jangka waktu yang panjang sementara data debit dalam waktu pendek. Untuk itu dibuat hubungan antara data debit dan data hujan dalam periode waktu yang sama, selanjutnya berdasarkan hubungan tersebut dibangkitkan data debit berdasar data hujan yang tersedia, sehingga akan diperoleh data debit dalam periode yang sama dengan data hujan. Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk mendapatkan hubungan antara data debit dan data hujan, di antaranya adalah model regresi, model Mock dan model tangki.

2.5.3 Penurunan Data Debit Berdasarkan Data Debit Bulanan

Menurut (Triatmodjo, 2008), apabila data debit aliran yang bersifat runtut waktu (*time series*) yang berupa data debit harian sepanjang tahun selama beberapa tahun tidak tersedia, dan yang tersedia hanya berupa data debit bulanan dalam beberapa tahun, maka data debit andalan dapat diperoleh berdasarkan data debit bulanan tersebut. Debit andalan dapat dilakukan berdasarkan debit tahunan atau debit bulanan (atau 2 mingguan) dengan cara berdasarkan debit tahunan, dihitung debit tahunan dan selanjutnya debit andalan didasarkan pada debit tahunan tersebut. Sedangkan untuk debit andalan berdasarkan debit bulanan/dua mingguan, debit andalan dihitung berdasarkan data debit setiap bulan atau setiap dua mingguan.

2.6 Bangkitan Data

Perhitungan-perhitungan hidrologi terdapat tiga model yang digunakan yaitu model deterministik, model probabilistik, model stokastik. Model stokastik mampu mengisi kekosongan diantara kedua model tersebut, yaitu mempertahankan sifat-sifat peluang yang berhubungan dengan runtun waktu kejadiannya. Salah satu model yang termasuk kedalam metode stokastik yaitu metode Thomas Fiering. Pembangkitan data menggunakan metode Thomas Fiering dapat digunakan untuk memecahkan persoalan kurang panjangnya data hidrologi. Keunggulan metode Thomas Fiering adalah dapat meramalkan data untuk beberapa tahun ke depan.

Adapun rumus yang digunakan dalam metode Thomas Fiering yaitu (Irawan, Setiawan, Alfaridzi, et al., 2024):

$$Q_{i+1} = \bar{Q}_{j+1} + r_{j,j+1} \cdot \frac{S_{j+1}}{S_j} (Q_1 - \bar{Q}_j) + U_i \cdot S_{j+1} \sqrt{1 - r_{j,j+1}^2} \quad (2.2)$$

Dimana:

Q_{i+1} = Debit hasil pembangkitan untuk bulan j dan tahun ke (i+1).

Q_1 = Data observasi atau data lapangan.

$\bar{Q}_j$ = Rerata debit pada bulan J.

$\bar{Q}_{j+1}$ = Rerata debit pada bulan J+1.

$r_{j,j+1}$ = koefisien korelasi antara data observasi bulan j dengan bulan j+1.

S_j = standar deviasi bulan J.

S_{j+1} = standar deviasi bulan J+1.

U_i = faktor stokastik yang diambil dari bilangan random.

2.7 Uji Validitas Data

Kalibrasi debit dilakukan guna mengetahui apakah nilai debit pada debit simulasi telah mendekati kondisi sebenarnya. Adapun data debit dianalisis validasinya menggunakan metode *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), Koefisien Korelasi (R), Uji Konsistensi, Uji Ketiadaan Tren, dan Uji Stasioner.

2.7.1 *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE)

Metode ini menunjukkan seberapa baik plot nilai observasi dibandingkan dengan nilai prediksi-simulasi, dengan rentang nilai hingga satu. Dengan kata lain, semakin hasil mendekati angka satu, maka semakin baik nilai NSE (Irawan, Setiawan, Hendra, et al., 2024). Adapun rumus yang digunakan yaitu (Lufi et al., 2020):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{(X_i - \bar{X}_i)^2} \quad (2.3)$$

Dimana:

X_i = Data observasi (data aktual).

Y_i = Hasil simulasi data.

$\bar{X}_i$ = Rata-rata data observasi.

N = Jumlah data.

Tabel kriteria nilai dari NSE disajikan dal Tabel 2.1

Tabel 2.1 Kriteria Nilai Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

NSE Value	Interpretation
$NSE > 0,75$	<i>Good</i>
$0,36 < NSE < 0,75$	<i>Qualified</i>
$NSE < 0,36$	<i>Not Qualified</i>

2.7.2 Correlation Coefficient (R)

Tujuan dari analisis ini adalah untuk mendapatkan pola dan kedekatan hubungan antara dua atau lebih variabel. Adapun rumus yang digunakan dalam perhitungan koefisien korelasi (R) yaitu (Lufi et al., 2020):

$$R = \frac{N \sum_{t=1}^N X_i Y_i - \sum_{t=1}^N X_i - \sum_{t=1}^N Y_i}{\sqrt{N \sum_{t=1}^N X_i - (\sum_{t=1}^N X_i)^2}} \quad (2.4)$$

Dimana:

R = Koefisien korelasi.

X_i = Data observasi (data aktual).

Y_i = Data simulasi atau data bangkitan.

N = Jumlah data.

Tabel kriteria nilai dari koefisien disajikan dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Kriteria Nilai Koefisien Korelasi (R)

<i>R Value</i>	<i>Interpretation</i>
0 – 0,19	<i>Very Low</i>
0,20 – 0,39	<i>Low</i>
0,40 – 0,59	<i>Moderate</i>
0,60 – 0,79	<i>Strong</i>
0,8 – 1,00	<i>Very Strong</i>

2.7.3 Uji Konsistensi Data

Dalam analisis hidrologi, perlu dilakukan pengujian konsistensi data debit dalam urutan waktu. Dua metode yang paling umum digunakan dalam uji konsistensi data yaitu kurva massa ganda dan *Rescales Adjusted Partial Sums* (RAPS) (Irawan, Komala Sari, et al., 2020). Adapun sumber data yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari data debit PDA Cirahong. Oleh karena itu, metode RAPS dipilih untuk digunakan dalam uji konsistensi data debit dalam urutan waktu. Adapun proses pengujian data menggunakan metode RAPS sebagai berikut:

1. Hitungan rerata digunakan untuk mengurutkan data debit berdasarkan urutan tahun sebelumnya.
2. Menghitung nilai total penyimpangan terhadap nilai rata-rata (Sk^*).

$$Sk^* = \sum_{i=1}^k (Q_i - \bar{Q}), \text{ dengan } k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.5)$$

3. Menghitung nilai simpangan baku dari data Y (D_y)

$$D_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n}} \quad (2.6)$$

4. Menghitung nilai RAPS (Sk^{**})

$$Sk^{**} = \frac{Sk^*}{D_y} \quad (2.7)$$

5. Menghitung nilai statistik Q dan R

$$Q = |Sk^{**}|_{\text{maksimum}} \quad (2.8)$$

$$R = |Sk^{**}|_{\text{maksimum}} - |Sk^{**}|_{\text{minimum}} \quad (2.9)$$

6. Nilai Q_{hitung} dan R_{hitung} dibandingkan dengan Q_{kritis} dan R_{kritis} seperti yang ditunjukkan dalam tabel berikut:

Tabel 2.3 Nilai Kritis Parameter Statistik Q dan R

Jumlah Data (n)	$\frac{Q}{\sqrt{n}}$			$\frac{R}{\sqrt{n}}$		
	90%	95%	99%	90%	95%	99%
10	1,05	1,14	1,29	1,21	1,28	1,38
20	1,10	1,22	1,42	1,34	1,43	1,60
30	1,12	1,24	1,46	1,40	1,50	1,70
40	1,13	1,26	1,50	1,42	1,53	1,74
50	1,14	1,27	1,52	1,44	1,55	1,78
100	1,17	1,29	1,55	1,50	1,62	1,86
>100	1,22	1,36	1,63	1,62	1,75	2,00

2.7.4 Uji Ketiadaan Trend

Uji ketiadaan trend dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui ada tidaknya trend atau variasi dalam data. Apabila terdapat kecenderungan (trend) pada data debit maka data tidak disarankan dalam analisis hidrologi. Hal ini dikarenakan analisis hidrologi harus mengikuti pola trend yang ada. Salah satu metode yang digunakan untuk mengevaluasi ketidakadaan trend adalah uji korelasi peringkat atau dikenal sebagai koefisien peringkat korelasi Spearman. Dalam penggunaan rumus Spearman, terdapat dua kondisi yang perlu diperhatikan. Jika tidak ada peringkat yang sama atau kembar (*tied rank*) maka rumus yang dipakai menggunakan persamaan 2.10. Sedangkan, jika peringkatnya sama atau kembar maka menggunakan persamaan 2.11. Berikut adalah situasi yang mungkin terjadi dan kondisi yang dapat digunakan untuk menggunakan rumus metode Spearman:

$$KP = 1 - \frac{6 \sum d_t^2}{(n^3 - n)} \quad (2.10)$$

$$t = KP \left[\frac{n-2}{1-KP^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

Dimana:

KP = n korelasi peringkat dari Spearman

n = jumlah data

dt = $R_t - T_t$

T_t = Peringkat dari waktu

R_t = Peringkat variabel hidrologi

t = Nilai distribusi t, pada derajat kebebasan (n-2) untuk derajat kepercayaan tertentu umumnya 5%

Tabel 2.4 Nilai Kritis t_c untuk Distribusi-t Uji Dua Sisi

dk	Derajat Kepercayaan (α)				
	10%	5%	2,5%	1%	0,5%
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657
2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032
6	1,44	1,943	2,447	3,143	3,707
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,25
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055
13	1,35	1,771	2,16	2,65	3,012
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947
16	1,337	1,746	2,12	2,583	2,921
17	1,333	1,740	2,11	2,567	2,898
18	1,33	1,734	2,101	2,552	2,878
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845
21	1,323	1,721	2,08	2,518	2,831
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819
23	1,319	1,714	2,069	2,5	2,807
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797
25	1,316	1,708	2,06	2,485	2,787
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771

dk	Derajat Kepercayaan (α)				
	10%	5%	2,5%	1%	0,5%
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756
inf.	1,282	1,645	1,96	2,326	2,576

Sumber: (Soewarno, 1995)

2.7.5 Uji Stasioner

Uji stasioner dilakukan untuk menguji kestabilan nilai rata-rata dan varian dari data deret berkala. Ada dua tahapan dalam uji stasioner, yaitu Uji F dan Uji T. Adapun tahapan masing masing uji sebagai berikut.

2.7.5.1 Uji F

Kestabilan varian dapat dinilai dengan uji-F. Metode berikut digunakan untuk melakukan uji-F:

1. Membagi deret menjadi dua kelompok
2. Cari nilai F_{hitung} menggunakan persamaan di bawah ini:

$$F = \frac{N_1 S_1^2 (N_2 - 1)}{N_2 S_2^2 (N_1 - 1)} \quad (2.12)$$

Dengan:

N_1, N_2 = Jumlah data kelompok 1 dan 2

S_1, S_2 = Simpangan baku kelompok 1 dan 2

3. Bandingkan nilai F_{hitung} dengan F_{kritis}
4. Apabila nilai $F_{hitung} < F_{kritis}$, maka data homogen dan hipotesis tidak ditolak.

2.7.5.2 Uji T

Uji-T digunakan untuk menentukan kestabilan rata-rata data deret berkala. Proses uji-T adalah sebagai berikut:

1. Lakukan pembagian kelompok data seperti yang dilakukan dalam uji-F
2. Cari nilai σ dengan menggunakan persamaan:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(N_1 - 1)S_1^2 + (N_2 - 1)S_2^2}{N_1 + N_2 - 2}} \quad (2.13)$$

3. Cari nilai t_{hitung} dengan menggunakan persamaan:

$$t_{hitung} = \frac{\overline{X_1} - \overline{X_2}}{\sigma \sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}} \quad (2.14)$$

4. Menentukan interval kepercayaan dan bandingkan nilai t_{hitung} dengan t_{kritis} dari tabel uji-T.
5. Apabila nilai $t_{hitung} < t_{kritis}$, maka hipotesis tidak ditolak.

2.8 Manajemen Debit Lingkungan

2.8.1 Debit Lingkungan

Environmental Flow atau debit lingkungan, juga dikenal sebagai aliran ekologis atau aliran minimum, mengacu pada jumlah air yang harus dipertahankan dalam sebuah sungai atau saluran alami untuk menjaga keberlanjutan ekosistem sungai. Menurut Deklarasi Brisbane (2007) dalam (Linnansaari et al., 2012), debit lingkungan menggambarkan kuantitas, kualitas, dan waktu aliran air yang diperlukan untuk mempertahankan ekosistem air tawar dan mata pencaharian serta kesejahteraan manusia yang bergantung pada ekosistem ini. Istilah ini memberikan definisi yang paling inklusif untuk ilmu manajemen aliran dalam konteks perlindungan ekosistem alami dan kebutuhan penggunaan air di antara semua pemangku kepentingan. Debit lingkungan adalah parameter penting dalam perencanaan alokasi air yang memperhatikan kebutuhan minimum air yang diperlukan untuk menjaga fungsi ekosistem, keanekaragaman hayati, dan kualitas air. Besaran aliran pemeliharaan sungai di Indonesia diatur dalam PP No. 38 tahun 2011 tentang sungai yaitu debit andalan Q95%.

2.8.2 Metode Penentuan Debit Lingkungan

Manajemen aliran merupakan sebuah gagasan yang bersifat ekologis dan dicerminkan dalam berbagai macam metode penelitian dalam dunia internasional. Tharne (2003) dalam (Linnansaari et al., 2012) menjelaskan lebih dari dua ratus metode penentuan debit lingkungan dan mengklasifikasikannya menjadi empat kategori umum, yaitu:

1. Metode hidrologis didasarkan pada analisis data aliran sungai historis (yang ada atau yang disimulasikan), tidak digunakan pada tingkat spesies tertentu, dan memberikan tingkat aliran keseluruhan yang bertujuan untuk melestarikan

integritas biotik sungai. Hal ini didasarkan pada asumsi umum bahwa lebih banyak air memberikan jaminan terbaik bagi biota sungai (sampai titik tertentu), dan mempertahankan ambang batas yang rendah akan mengurangi risiko terhadap biota.

2. Metode hidrolisik didasarkan pada hubungan antara beberapa ukuran hidrolisik sungai (biasanya perimeter atau kedalaman yang dibasahi) dan debit (Jowett, 1997 dalam Allain & El-Jabi, 2002). Metode yang paling umum digunakan adalah metode perimeter terbasahi yang memprediksi daerah terbasahi dari penampang sebagai fungsi debit di lokasi (satu titik) di sungai. Metode ini sering digunakan di Amerika Serikat dan Kanada.
3. Metode simulasi habitat bertujuan untuk melestarikan spesies khusus yang persyaratan habitatnya dapat diestimasi di daerah studi kasus atau diyakini dapat ditinjau dari penelitian sebelumnya di tempat yang berbeda.
4. Metode holistik dapat dikategorikan menjadi dua pendekatan utama berdasarkan rezim aliran lingkungan. Baik *bottom-up* maupun *top-down*, semua pendekatan holistik memiliki tujuan yang sama yaitu pencapaian atau pemeliharaan keberlanjutan ekologi (Gippel, 2005 dalam Allain & El-Jabi, 2002).

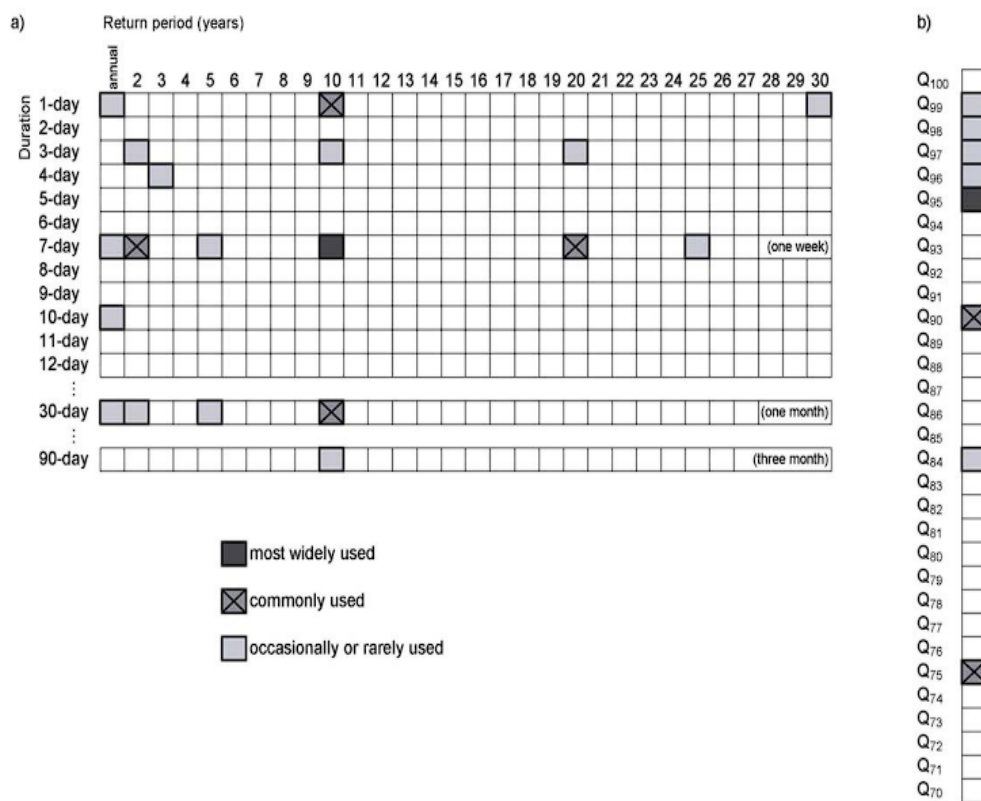
Metode hidrologis merupakan metode yang paling sering digunakan di dunia internasional karena metode ini tidak memakan banyak biaya dan waktu serta mudah untuk diterapkan. Metode hidrologis terdiri dari berbagai macam metode yaitu metode tennant, metode aliran rata-rata tahunan (MAF) 25%, metode *baseflow* akuatik atau aliran median bulanan, metode kurva durasi aliran dan metode statistik aliran rendah (7Q10).

2.9 Low Flow

Low flow atau aliran rendah adalah aliran terendah yang biasa muncul saat musim kekeringan atau kemarau. Menurut World Meteorology Organization, *low flow* adalah aliran air di sungai selama cuaca kering berkepanjangan. Aliran ini muncul selama musim kemarau berkepanjangan ketika kapasitas air menjadi sangat rendah dibandingkan hari-hari lain dalam jangka waktu tertentu, sehingga beban polutan yang diterima sungai menjadi sangat kecil. *Low flow* biasanya digunakan

untuk menghitung ketersediaan air bagi ekosistem yang terletak di sekitar badan air tersebut. Informasi *low flow* secara luas digunakan dalam mengevaluasi kapasitas sungai untuk memungkinkan pemanfaatan air permukaan, alokasi pelepasan limbah dan penentuan jumlah beban harian maksimumnya. Periode dalam 1 tahun untuk perhitungan aliran rendah biasanya dimulai dari 1 April hingga 31 Maret. Selain itu, penggunaan 30 tahun terakhir data aliran saat ada tren aliran rendah tahunan dapat mengurangi kesalahan dan bias estimasi 7Q10 (Blum et al., 2019).

Low flow dapat dikategorikan menjadi dua jenis yang berbeda yaitu indeks dan persentil melebihi. Notasi untuk tipe indeks adalah nQ_y , yang dapat diartikan sebagai debit rendah (Q) selama n hari dengan periode ulang y tahun. Di sisi lain, notasi untuk bentuk kedua adalah Q_p yang dapat diartikan sebagai debit aliran yang mungkin terlampaui p-persen dari waktu (Pyrce, 2004 dalam Zabet, 2012).



Gambar 2.3 Perkiraan Aliran Rendah Berdasarkan Hidrologi

(a) Indeks Aliran, dan b) Durasi Aliran Nilai

Sumber: (Pyrce, 2004)

Ada banyak jenis *low flow* dan masing masing memiliki tujuan yang berbeda. Secara global, indeks yang paling banyak digunakan adalah aliran 7Q10 dan Q95. *Low flow* 7Q10 adalah aliran rendah rata-rata selama tujuh hari berturut-turut dengan periode ulang 10 tahun (7Q10). The US Geological survey telah mengembangkan beberapa teknik untuk pengkajian profil 7Q10. Indeks frekuensi aliran rendah banyak digunakan dalam studi kekeringan, desain sistem pasokan air, estimasi pengambilan air permukaan yang aman, klasifikasi potensi pengenceran limbah (kapasitas asimilasi) sungai, mengatur pembuangan limbah ke sungai, pemeliharaan debit aliran tertentu, dll. Serupa dengan aliran 7Q10, aliran Q95 telah digunakan sebagai indeks biologis, untuk perizinan pengambilan air, dan untuk batas pembuangan limbah. Hal ini sangat bermanfaat untuk pengelolaan DAS yang berkelanjutan.

Dalam metode ini, *low flow* dianggap sebagai karakteristik yang didapat melalui rekaman data berkelanjutan dari pos duga air. Dengan mengaplikasikan metode distribusi Weibull untuk minima serta metode kurva debit aliran, maka akan didapat debit *low flow* 7Q10 dan Q95.

2.10 Metode Hidrologis 7Q10

Metode 7Q10 merupakan metode aliran rendah yang paling sering digunakan oleh peneliti (Smakhtin, 2001). 7Q10 adalah debit aliran terendah dalam 7 hari yang terjadi setiap 10 tahun (Nnaji et al., 2014). Di lokasi yang memiliki pengukuran, 7Q10 dihitung menggunakan distribusi nilai ekstrem dengan memperkirakan rata-rata terendah selama satu minggu yang terjadi kembali setiap 10 tahun secara rata-rata. Periode dalam 1 tahun untuk perhitungan aliran rendah biasanya dimulai dari 1 April hingga 31 Maret. Selain itu, penggunaan 30 tahun terakhir data aliran saat ada tren aliran rendah tahunan dapat mengurangi kesalahan dan bias estimasi 7Q10 (Blum et al., 2019).

Metode 7Q10 merupakan metode yang paling umum digunakan untuk menganalisis *low flow* di musim kemarau terutama ketika aliran sungai yang dimaksud mengalami masalah pencemaran. Selain itu, USGS sering menggunakan statistik aliran 7Q10 untuk membantu memandu keputusan dalam pekerjaan sehari-hari mereka dalam pengaturan Total Beban Harian Maksimum, pasokan air dan

pengelolaan, izin pembuangan air limbah, dan perlindungan habitat perairan yang terancam punah (Sebayang et al., 2023). 7Q10 secara umum diakui sebagai aliran desain selama kondisi aliran rendah untuk melindungi kehidupan akuatik. Periode 7 hari ini meminimalkan variasi aliran harian, mengurangi kesalahan pengukuran, dan lebih baik merepresentasikan kondisi kekeringan. Dengan periode ulang 10 tahun, metode ini memperkirakan aliran rendah ekstrem selama tahun-tahun kekeringan, memberikan nilai aliran desain lingkungan yang realistis dan andal. Aliran 7Q10 banyak diterapkan dalam pengelolaan sumber daya air, termasuk pemeliharaan standar kualitas air, alokasi beban limbah, dan penetapan kriteria kronis untuk kehidupan akuatik sebagai bagian dari pengelolaan daerah aliran sungai (Verma et al., 2017). Disamping itu, penggunaan metode hidrologis 7Q10 lainnya beserta referensinya meliputi:

Tabel 2.5 Penggunaan Metode Aliran 7Q10

Penggunaan 7Q10	Referensi
Desain/referensi indikasi <i>low flow</i>/arus dalam aliran.	Riggs et al. (1980), Caissie et al. (1998), Smakhtin & Toulouse (1998), Caruso (2000), Smakhtin (2001), Tharme (2003)
Melindungi/mengatur kualitas air dari pembuangan air limbah atau alokasi beban limbah.	Riggs et al. (1980), Diamond et al. (1994), Schreffler (1998), Gu & Dong (1998), Chaudhury et al. (1998), Reis & Friesz (2000), Mohamed et al. (2002), Wallace & Cox (2002), Deksissa et al. (2003), Flynn (2003), State of Massachusetts (2004).
Alokasi beban limbah untuk pembuangan ke dalam aliran perairan penerima untuk kriteria kehidupan akuatik kronis.	Ohio Environmental Protection Agency Division of Surface Water (1997)

Penggunaan 7Q10	Referensi
• Mengatur pengambilan dan pembuangan air ke sungai. • Indikator umum kondisi kekeringan yang umum terjadi yang mencakup wilayah yang luas.	Carter & Putnam (1978)
• Desain standar aliran rendah untuk menghitung alokasi beban limbah kondisi mantap untuk kehidupan akuatik: kriteria kronis.	Virginia Department of Environmental Quality (2004)
• Total beban harian maksimum untuk menilai kehidupan akuatik perlindungan.	New York State Department of Environmental Conservation (1996)
• Kuantitas minimum aliran sungai yang diperlukan untuk melindungi habitat selama situasi kekeringan.	Delaware Water Supply (2004)
• Alokasi beban limbah untuk polutan inisiatif danau besar tanpa adanya desain aliran beban harian maksimum total.	Minnesota Office of the Revisor of Statutes (2004)
• Kriteria kronis berkelanjutan untuk kehidupan akuatik.	U.S. Environmental Protection Agency (1999)
• Kriteria/estimasi kronis untuk pemeliharaan atau perlindungan habitat atau kehidupan akuatik.	Flynn (2003)
• Indikator kemungkinan potensi kematian kehidupan akuatik.	Imhof & Brown (2003)

Penggunaan 7Q10	Referensi
Desain <i>low flow</i> tahunan untuk aliran efluen limbah cair dan volume serta periode aliran minimum.	Cusimano (1992)

Sumber: (Pyrce, 2004)

2.11 Distribusi Weibull untuk Minima

Distribusi Weibull untuk minima atau biasa ditulis $Weibull_{min}$ juga dikenal sebagai Distribusi *Extreme-Value type III* (EV3) adalah kandidat alami untuk model hidrologi minima yang membatasi aliran rendah dalam kasus yang paling parah yaitu nol (Naghetini, 2017). Jika aliran rendah dibatasi oleh nol, distribusi EV3 disebut sebagai $Weibull_{min}$ dua parameter. Di sisi lain, jika aliran rendah dibatasi oleh beberapa nilai ξ , distribusi EV3 disebut sebagai $Weibull_{min}$ tiga parameter (Naghetini, 2017). Fungsi distribusi kumulatif untuk $Weibull_{min}$ dua parameter diberikan oleh:

$$Fz(z) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{z}{\beta}\right)^{\alpha}\right] \text{ dengan } z \geq 0, \beta \geq 0 \text{ dan } \alpha > 0 \quad (2.15)$$

Dimana β dan α masing-masing adalah parameter skala dan bentuk. Jika 1, $Weibull_{min}$ menjadi distribusi eksponensial satu parameter dengan parameter skala β . Fungsi kepadatan probabilitas dari distribusi $Weibull_{min}$ dua parameter dinyatakan sebagai berikut (Naghetini, 2017).

$$Fz(z) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{z}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{z}{\beta}\right)^{\alpha}\right] \quad (2.16)$$

Rata-rata dan varians dari dua parameter $Weibull_{min}$ variate, masing-masing diberikan oleh:

$$E(Z) = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (2.17)$$

$$Var [Z] = \beta^2 \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \right] \quad (2.18)$$

Koefisien variasi dan skewness dari variabel Weibull_{min} dua parameter berturut-turut adalah

$$CV_Z = \frac{\sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right)}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right)} = \frac{\sqrt{B(\alpha) - A^2(\alpha)}}{A(\alpha)} \quad (2.19)$$

dan

$$\gamma = \frac{\Gamma \left(1 + \frac{3}{\alpha} \right) - 3\Gamma \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right)\Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) + 2\Gamma^3 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right)}{\sqrt{\left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \right]^3}} \quad (2.20)$$

Adapun dalam perhitungan distribusi weibull minima perlu menghitung nilai $E(Z)$ dan $\sigma(Z)$ terlebih dahulu yang masing-masing didapat dari rata-rata dan standar deviasi dari sampel yaitu nilai 7Q tahunan yang sudah diurutkan sesuai panjang rekaman tahun data. Berdasarkan nilai ini, dapat dihitung koefisien variasi (CV_Z), yang digunakan untuk mengukur variasi data debit berdasarkan rata-rata dan standar deviasi. Rumus yang digunakan yaitu:

$$CV_Z = \frac{\sigma(Z)}{E(Z)} \quad (2.21)$$

Setelah didapat nilai koefisien variasi (CV_Z), Perhitungan parameter dan probabilitas untuk distribusi Weibull_{min} dua parameter dapat dilakukan dengan terlebih dahulu menyelesaikan Persamaan (2.22) untuk α , baik melalui prosedur iterasi numerik, mirip dengan yang digunakan untuk menghitung parameter bentuk GEV, atau dengan tabulasi (atau regresi) nilai α yang mungkin dari dan fungsi bantu $A(\alpha) = \Gamma(1 + 1/\alpha)$ terhadap CV_Z (Naghetini, 2017). Analisis ketergantungan α dan $A(\alpha)$ pada koefisien variasi CV_Z mengarah pada hubungan korelatif berikut:

$$\alpha = 1.0079(CV)^{-1.084}, \text{ dengan } 0.08 \leq CV_Z \leq 2 \quad (2.22)$$

dan

$$A(\alpha) = -0.0607(CV_Z)^3 + 0.5502(CV_Z)^2 - 0.4937(CV_Z) + 1.003, \quad (2.23)$$

dengan $0.08 \leq CV_Z \leq 2$

Setelah α dan $A(\alpha)$ telah ditentukan, parameter β dapat dihitung dari Persamaan (2.17), atau dengan persamaan sebagai berikut:

$$\beta = \frac{E(Z)}{A(\alpha)} \quad (2.24)$$

Dengan kedua parameter diketahui, kuantil Weibull_{min} dua parameter ditentukan oleh:

$$z(F) = \beta [-\ln(1 - F)]^{\frac{1}{\alpha}} \text{ atau } z(T) = \beta \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2.25)$$

Dengan rumus tersebut, dapat ditentukan nilai 7Q10 dengan mengisi nilai T (periode ulang tahun) pada Persamaan 2.25 yaitu 10 tahun. Hal tersebut dikarenakan 7Q10 menggunakan periode ulang 10 tahun.

2.12 Analisis Kurva Debit Aliran/*Flow Duration Curve Analysis (FDCA)*

Metodologi berbasis hidrologi lainnya yang diterapkan di seluruh dunia dalam bentuk umumnya adalah metode FDCA (Smakhtin, 2001). Kurva debit aliran (FDCA) adalah grafik debit sungai yang diplot terhadap frekuensi pelampauan dan biasanya berasal dari deret waktu lengkap aliran sungai yang terekam (World Meteorological Organization., 2008). Mudah dibuat dan digunakan dalam berbagai aplikasi sumber daya air yang berbeda di seluruh rentang aliran sungai. Konstruksi ini didasarkan pada pemeringkatan data (biasanya debit harian) dan menghitung frekuensi pelampauan untuk setiap nilai. Metode ini secara efektif menyusun ulang hidrograf yang diamati dari yang diurutkan berdasarkan waktu menjadi yang diurutkan berdasarkan besaran. Persentase waktu ketika debit tertentu terlampaui dapat diperkirakan dari plot.

Dalam penelitian ini FDCA juga digunakan untuk mempelajari distribusi probabilitas dari data yang direkam. (Smakhtin, 2001) menunjukkan bahwa desain rentang aliran rendah dari FDCA berkisar antara 70 dan 99% (dilambangkan sebagai Q70 dan Q99). Q90 dan Q95 adalah bentuk yang sering digunakan sebagai indikator aliran rendah dan telah banyak digunakan untuk menetapkan debit lingkungan minimum. Selain itu, di Indonesia masih terdapat anggapan bahwa penentuan debit pemeliharaan sungai ditentukan pada skala statistik probabilistik dengan menetapkan debit sebesar 95% atau dikenal dengan Q95 (Sebayang et al., 2023). Serupa dengan aliran 7Q10, aliran Q95 telah digunakan sebagai indeks biologis, untuk perizinan pengambilan air, dan untuk batas pembuangan limbah. Adapun kegunaan indeks durasi aliran Q95 yang digunakan untuk studi *low flow* diuraikan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Kegunaan Indeks Durasi Aliran Q95 untuk Studi *Low Flow*

Kegunaan Q95	Studi
• Indeks aliran rendah yang umum digunakan atau indikator kondisi aliran rendah yang ekstrem.	Riggs (1980), Brilly et al. (1997) Smakhtin (2001), Wallace & Cox (2002), Tharme (2003)
• Aliran minimum untuk melindungi sungai.	Petts et al. (1997)
• Kondisi minimum bulanan untuk pelepasan titik.	Michigan Department of Environmental Quality (2002)
• Perizinan pengambilan air permukaan dan penilaian batas pembuangan air limbah.	Higgs and Petts (1988), Smakhtin & Toulouse (1998)
• Indeks biologis untuk aliran bulanan rata-rata.	Dakova et al. (2000)
• Mempertahankan variasi musiman bulanan alami. • Mengoptimalkan aturan aliran lingkungan.	Stewardson & Gippel (2003)

Sumber: (Pyrce, 2004)

Adapun dalam penggunaan FDCA, data diberi peringkat lalu dihitung frekuensi pelampauannya atau *exceedance frequency* (EF_{Qi}) dengan rumus (World Meteorological Organization, 2008):

$$EF_{Qi} = \frac{i}{N} \quad (2.26)$$

Dimana:

i = peringkat data.

N = jumlah data.

Dari hasil tersebut dapat dicari nilai besaran Q_i yang merupakan debit yang sesuai dengan persentil i . Jika frekuensi yang dibutuhkan tidak diberikan secara tepat, nilai dapat diperoleh sebagai nilai Q yang sesuai dengan nilai terbesar dari EF_{Qi} yang kurang dari, atau sama dengan, nilai yang dibutuhkan dari EF_{Qi} . Sebagai alternatif, jika terdapat perbedaan besar antara nilai-nilai yang berurutan, interpolasi linier dapat digunakan.