

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. TINJAUAN UMUM

Pengembangan PLTA merupakan pekerjaan yang melibatkan berbagai disiplin ilmu yang saling mendukung, seperti ilmu teknik sipil (hidrologi, rekayasa sungai, bangunan air), ilmu teknik elektro (pendistribusian daya listrik ke konsumen), dan ilmu teknik lingkungan (dampak pekerjaan terhadap lingkungan di sekitar embung).

Untuk menunjang proses perencanaan diperlukan teori-teori dan rumus-rumus dari pustaka yang sangat berperan, terutama pada saat pengolahan data maupun desain rencana bangunan air.

PLTA merupakan pembangkit tenaga listrik dengan cara pemanfaatan energi yang terjadi akibat aliran air (debit dan tinggi jatuh). Energi dari aliran tersebut dimanfaatkan untuk menggerakkan bilah turbin sehingga dapat berputar, kemudian turbin tersebut menggerakkan generator untuk mengubah tenaga gerak menjadi tenaga listrik.

2.2. ANALISIS HIDROLOGI

Hidrologi merupakan bidang ilmu pengetahuan yang mempelajari kejadian-kejadian serta penyebaran/ distribusi air secara alami di bumi. Unsur hidrologi yang dominan disuatu wilayah adalah curah hujan, oleh sebab itu data curah hujan suatu daerah merupakan data utama dalam menentukan besarnya debit banjir rencana maupun debit andalan yang terjadi pada daerah tersebut.

2.2.1. Perhitungan Curah Hujan Rata-Rata DTA

Perhitungan curah hujan rata-rata DTA dimaksudkan untuk mendapatkan nilai curah hujan rata-rata DTA, yang merupakan hasil penggabungan nilai curah hujan yang diperoleh dari stasiun-stasiun pengamatan curah hujan dengan metode tertentu. Beberapa metode perhitungan yang biasa digunakan yaitu :

- **Metode Rata-Rata Aljabar (Metode *Arithmetic*)**

Metode metode rata-rata aljabar dapat menghasilkan data yang baik bila daerah pengamatannya datar, penempatan alat ukur tersebar merata, dan besarnya curah hujan tidak bervariasi. Metode ini merupakan metode yang paling sederhana, yaitu dengan menjumlahkan curah hujan dari semua tempat pengukuran selama satu periode tertentu dan membaginya dengan banyaknya stasiun pengukuran curah hujan. Jika dirumuskan dalam suatu persamaan adalah sebagai berikut :

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 \dots + R_n}{n} \dots\dots\dots (2.1)$$

Di mana :

\bar{R} = Curah hujan rata-rata (mm)

$R_1 \dots R_n$ = Besarnya curah hujan pada masing-masing stasiun (mm)

n = Banyaknya stasiun hujan

(Sumber : *Hidrologi untuk Pengairan. Ir.Suyono Sosrodarsono & Kensaku Takeda*)



Gambar II-1 Sketsa stasiun curah hujan cara rata-rata Aljabar

- **Metode Poligon *Thiessen***

Metode Poligon *Thiessen* memiliki ketelitian yang cukup, sehingga sangat baik jika digunakan untuk menghitung curah hujan rata-rata DTA yang masing-masing dipengaruhi oleh lokasi stasiun pengamatan curah hujan berdasarkan peta jaringan sungai dan lokasi stasiun pengamatan.

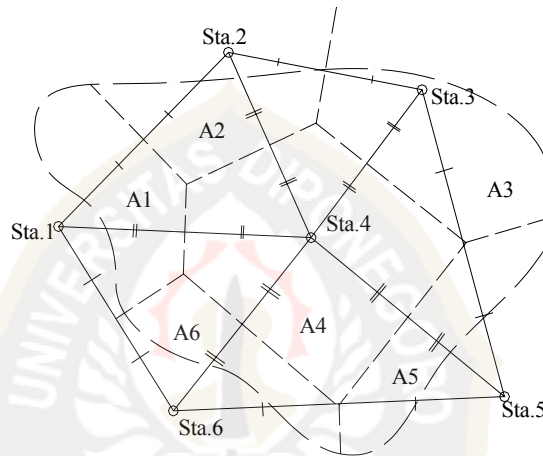
Syarat-syarat penggunaan Metode *Thiessen*, yaitu :

→ Stasiun hujan minimal 3 buah dan letak stasiun dapat tidak merata

→ Daerah yang terlibat dibagi menjadi poligon-poligon, dengan stasiun pengamat hujan sebagai pusatnya.

Cara perhitungan :

Hubungkan titik-titik stasiun yang terdapat pada lokasi pengamatan sehingga terbentuk poligon, lalu tarik garis sumbu tegak lurus tepat di tengah-tengah garis-garis yang menghubungkan stasiun tersebut, sehingga diperoleh segmen-segmen yang merupakan daerah pengaruh bagi stasiun terdekat.



Gambar II-2 Pembagian daerah pengaruh Metode Poligon *Thiessen*

Setelah luas tiap-tiap daerah pengaruh untuk masing-masing stasiun didapat, koefisien *Thiessen* dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$C_i = \frac{A_i}{A_{total}} \dots\dots\dots (2.2a)$$

$$\bar{R} = \sum_{i=1}^n C_i \cdot R_i = \frac{A_1 R_1 + A_2 R_2 + \dots + A_n R_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \dots\dots\dots (2.2b)$$

di mana :

C = Koefisien *Thiessen*

A_i = Luas pengaruh dari stasiun pengamatan i (km²)

A = Luas total dari DTA (km²)

\bar{R} = Curah hujan rata-rata (mm)

R₁, R₂,...,R_n = Curah hujan pada setiap titik pengukuran (mm)

(*Hidrologi untuk Pengairan. Ir.Suyono Sosrodarsono & Kensaku Takeda*)

- **Metode Isohyet**

Prinsip dari metode ini yaitu curah hujan pada suatu wilayah di antara dua *Isohyet* sama dengan rata-rata curah hujan dari garis-garis *Isohyet* tersebut.

Syarat-syarat penggunaan Metode *Isohyet*, yaitu :

- Digunakan di daerah datar/ pegunungan.
- Stasiun hujan harus banyak dan tersebar merata
- Perlu ketelitian tinggi dan diperlukan analisis yang berpengalaman.

Cara perhitungan :

Peta *Isohyet* digambar pada peta topografi dengan perbedaan (interval) 10 sampai 20 mm berdasarkan data curah hujan pada titik-titik pengamatan didalam dan di sekitar daerah yang dimaksud. Untuk memperkirakan curah hujan daerah, titik-titik yang curah hujannya sama dihubungkan agar membentuk *Isohyet* dari berbagai harga. Luas bidang diantara 2 *Isohyet* yang berurutan diukur dengan planimeter dan rata-rata curah hujan pada wilayah di antara 2 *Isohyet* tersebut dianggap terjadi pada wilayah tertutup.

Sehubungan dengan itu, apabila R_{12} adalah rata-rata curah hujan yang diwakili oleh daerah *Isohyet* berurutan dengan harga R_1 dan R_2 , luas antara dua *Isohyet* ialah A_1 , dan seterusnya maka curah hujan daerahnya dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\bar{R} = \frac{\frac{R_1 + R_2}{2} A_1 + \frac{R_2 + R_3}{2} A_2 + \dots + \frac{R_n + R_{n+1}}{2} A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad \dots \dots \dots (2.3)$$

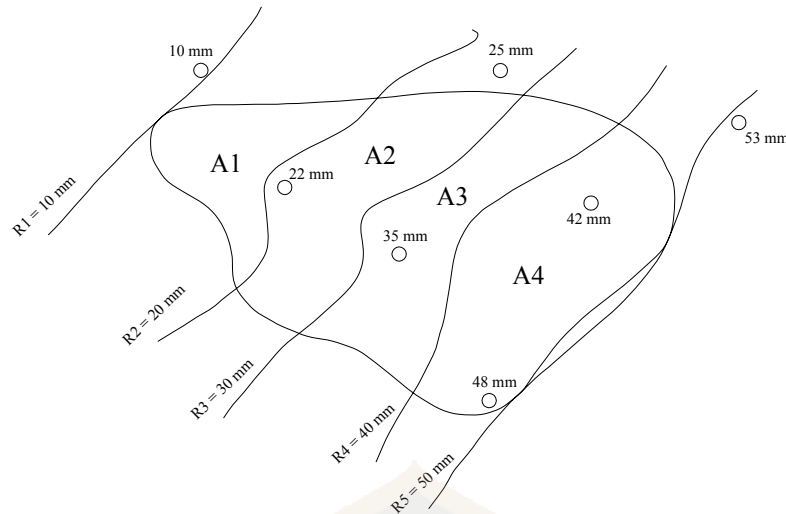
di mana :

\bar{R} = Curah hujan rata-rata (mm)

R_1, R_2, \dots, R_n = Curah hujan stasiun 1, 2, ..., n (mm)

A_1, A_2, \dots, A_n = Luas bagian yang dibatasi oleh *Isohyet-Isohyet* (Km²)

(*Hidrologi Teknik, Ir.CD.Soemarto,B.I.E.Dipl.H.*)



Gambar II-3. Daerah pengaruh pada Metoda Isohyet

• **Analisis Data Curah Hujan Yang Hilang**

Untuk melengkapi data yang hilang atau rusak diperlukan data dari stasiun lain yang memiliki data yang lengkap dan diusahakan letak stasiunnya paling dekat dengan stasiun yang hilang datanya. Untuk perhitungan data yang hilang dapat digunakan diantaranya dengan Metode *Ratio Normal*, Metode *Reciprocal* (kebalikan kuadrat jarak) dan dengan Metode Rata-Rata Aljabar

Pada metode *ratio normal*, syarat untuk menggunakan metode ini adalah rata-rata curah hujan tahunan stasiun yang datanya hilang harus diketahui, disamping dibantu dengan data curah hujan rata-rata tahunan dan data pada stasiun pengamatan sekitarnya.

Rumus :

$$R_x = \frac{1}{n} \left(\frac{\overline{R_x}}{R_A} R_A + \frac{\overline{R_x}}{R_B} R_B + \dots + \frac{\overline{R_x}}{R_n} R_n \right) \dots \dots \dots (2.4a)$$

di mana :

- R_x = Curah hujan stasiun yang datanya dicari (mm)
- R_A, R_B, \dots dan R_n = Curah hujan stasiun A, stasiun B, dan stasiun n (mm)

- \overline{R}_x = Rata-rata curah hujan tahunan stasiun yang datanya dicari (mm)
- \overline{R}_A , \overline{R}_B dan \overline{R}_n = Rata-rata curah hujan tahunan stasiun A, stasiun B dan stasiun n (mm)

Pada metode *Reciprocal*, persamaan ini menggunakan data curah hujan referensi dengan mempertimbangkan jarak stasiun yang dilengkapi datanya dengan referensi tersebut atau dengan persamaan sebagai berikut:

$$H_h = \frac{\left(\frac{H_{r1}}{L_1^2}\right) + \left(\frac{H_{r2}}{L_2^2}\right) + \left(\frac{H_{r3}}{L_3^2}\right) + \dots + \left(\frac{H_m}{L_n^2}\right)}{\left(\frac{1}{L_1^2}\right) + \left(\frac{1}{L_2^2}\right) + \left(\frac{1}{L_3^2}\right) + \dots + \left(\frac{1}{L_n^2}\right)} \dots\dots\dots (2.4b)$$

Di mana,

- H_h = Hujan di stasiun yang akan dilengkapi (mm)
- $H_1 \dots H_n$ = Hujan di stasiun referensi (mm)
- $L_1 \dots L_n$ = Jarak referensi dengan data stasiun yang dimaksud (km)

Pada metode rata-rata aljabar, persamaan ini digunakan apabila perbedaan curah hujan tahunan normal di stasiun pengamat terdekat <10% dari stasiun yang kehilangan data tersebut.

$$P_x = \frac{1}{n}(P_A + P_B + P_C) \dots\dots\dots (2.4c)$$

Di mana :

- P_x = curah hujan stasiun x (yang hilang)
- P_A, P_B, P_C = curah hujan tahunan normal pada stasiun A,B,C (yaitu hujan pada saat yang sama dengan hujan yang hilang)
- n = jumlah stasiun hujan yang diamati

(Diktat Mata Kuliah Hidrologi, Ir.Hj. Sri Ekowahyuni, MS.)

2.2.2. Perhitungan Parameter Statistik

Adapun parameter statistik yang digunakan untuk menentukan jenis distribusi data ialah sebagai berikut :

1. Harga rata – rata (\bar{X})

Rumus :

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \dots\dots\dots (2.5)$$

Di mana :

\bar{X} = Curah hujan rata – rata (mm)

X_i = Curah hujan di stasiun hujan ke i (mm)

n = Jumlah data

2. Standar deviasi (S_x)

Rumus :

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \dots\dots\dots (2.6)$$

Di mana :

S_x = Deviasi standar

\bar{X} = Curah hujan rata – rata (mm)

X_i = Curah hujan di stasiun hujan ke i (mm)

n = Jumlah data

3. Koefisien *Skewness* (C_s)

Kemencengan (*Skewness*) adalah suatu nilai yang menunjukkan derajat ketidaksimetrisan dari suatu bentuk distribusi.

Rumus :

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{(n - 1) * (n - 2) * S^3} \dots\dots\dots (2.7)$$

Di mana :

- C_s = Koefisien *Skewness*
 S = Deviasi standar
 \bar{X} = Curah hujan rata – rata (mm)
 X_i = Curah hujan di stasiun hujan ke i (mm)
 n = Jumlah data

4. Koefisien *Kurtosis* (C_k)

Pengukuran *kurtosis* dimaksud untuk mengukur keruncingan dari bentuk kurva distribusi, yang umumnya dibandingkan dengan distribusi normal.

Rumus :

$$C_k = \frac{n^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{(n-1) * (n-2) * (n-3) * S^4} \dots\dots\dots (2.8)$$

Di mana :

- C_k = Koefisien *Kurtosis*
 S = Deviasi standar
 \bar{X} = Curah hujan rata – rata (mm)
 X_i = Curah hujan di stasiun hujan ke i (mm)
 n = Jumlah data

5. Koefisien variasi (C_v)

Koefisien Variasi adalah nilai perbandingan antara deviasi standar dengan nilai rata-rata hitung suatu distribusi.

Rumus :

$$C_v = \frac{S_x}{\bar{X}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Di mana :

- C_v = Koefisien Variasi
 S_x = Deviasi standar
 \bar{X} = Curah hujan rata – rata (mm)

(*Hidrologi Aplikasi Metode Statistik untuk Analisa Data Jilid 1, Soewarno*)

2.2.3. Penentuan Jenis Distribusi Data

Untuk menentukan jenis distribusi data, digunakan beberapa pendekatan yang bertujuan agar jenis distribusi data yang dipilih sesuai dengan keadaan data yang ada. Adapun beberapa pendekatan yang dilakukan yaitu :

- a. Berdasarkan hasil perhitungan parameter statistik

Tabel II-1. Syarat distribusi data

No.	Jenis Distribusi	Syarat
1.	Normal	$C_s \approx 0$ $C_k = 0$
2.	Log Normal	$C_s \approx 3C_v + C_v^3 \approx 0,3$ $C_k = C_v^8 + 6C_v^6 + 15 C_v^4 + 16 C_v^2 \approx 3,435$
3.	Gumbel Tipe I	$C_s \leq 1,1396$ $C_k \leq 5,4002$
4.	Log Pearson Tipe III	$C_s \neq 0$ $C_k \approx 1,5 (C_s(\ln X))^2 + 3 \approx 21,20$

(Sumber : Hidrologi Terapan, Dr. Ir. Sri Harto Br. Dip. H)

- b. Berdasarkan *plotting* terhadap kertas probabilitas *Gumbel* dan *Pearson*

Jenis distribusi data dapat diamati dari garis yang terbentuk oleh titik-titik hasil *plotting* data pada kertas probabilitas. Apabila *plotting* titik-titik pada kertas probabilitas tersebut mendekati garis lurus, berarti pemilihan distribusinya semakin mendekati benar.

- c. Berdasarkan hasil Uji Keselarasan

Uji keselarasan dimaksudkan untuk menentukan apakah persamaan distribusi peluang yang telah dipilih dapat mewakili dari distribusi statistik sampel data yang dianalisis. Ada dua jenis keselarasan (*Goodness of Fit Test*), yaitu uji keselarasan *Chi Square* dan *Smirnov Kolmogorof*. Pada tes ini biasanya yang diamati adalah nilai hasil perhitungan yang diharapkan.

➤ *Uji keselarasan Chi Square*

Prinsip pengujian dengan metode ini didasarkan pada jumlah pengamatan yang diharapkan pada pembagian kelas dan ditentukan terhadap jumlah data pengamatan yang terbaca di dalam kelas tersebut atau dengan membandingkan nilai *chi square* (X^2) dengan nilai *Chi Square* kritis (X^2Cr)

Rumus :

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{Ef_i - Of_i}{Ef_i} \right]^2 \dots\dots\dots (2.10)$$

Di mana :

X^2 = Harga *Chi Square*

Ef_i = Banyaknya frekuensi yang diharapkan pada data ke-i

Of_i = Frekuensi yang terbaca pada kelas yang sama pada data ke-i

n = Jumlah data

Prosedur perhitungan uji *Chi Square* adalah sebagai berikut :

1. Urutkan data pengamatan dari besar ke kecil
2. Hitunglah jumlah kelas yang ada (K) = $1 + 3,322 \log n$. Dalam pembagian kelas disarankan agar setiap kelas terdapat minimal tiga buah pengamatan.

3. Hitung nilai $Ef = \left[\frac{\sum n}{\sum K} \right] \dots\dots\dots (2.11)$

4. Hitunglah banyaknya Of untuk masing – masing kelas.
5. Hitung nilai X^2 untuk setiap kelas kemudian hitung nilai total X^2 , dari tabel untuk derajat nyata tertentu yang sering diambil sebesar 5% dengan parameter derajat kebebasan (lihat Tabel II-2) akan didapat X^2_{Cr} .

Rumus derajat kebebasan adalah :

$$DK = K - (R + 1) \dots\dots\dots (2.12)$$

Di mana :

DK = Derajat kebebasan

K = Banyaknya kelas

R = Banyaknya keterikatan (biasanya diambil R=2 untuk distribusi normal dan binomial dan R=1 untuk distribusi *Poisson* dan *Gumbel*)

(*Hidrologi Aplikasi Metode Statistik untuk Analisa Data, Soewarno*)

Jika nilai $chi\ square(X^2) < \text{nilai } Chi\ Square\ kritis\ (X^2Cr)$, analisis data dapat menggunakan persamaan distribusi data sesuai dengan yang diasumsikan pada uji *Chi Square*.

Tabel II-2. Nilai kritis untuk distribusi *Chi-Square*

Dk	α derajat kepercayaan							
	0.995	0.99	0.975	0.95	0.05	0.025	0.01	0.005
1	0,0000393	0,000157	0,000982	0,00393	3,841	5,024	6,635	7,879
2	0,0100	0,0201	0,0506	0,103	5,991	7,378	9,210	10,597
3	0,0717	0,115	0,216	0,352	7,815	9,348	11,345	12,838
4	0,207	0,297	0,484	0,711	9,488	11,143	13,277	14,860
5	0,412	0,554	0,831	1,145	11,070	12,832	15,086	16,750
6	0,676	0,872	1,237	1,635	12,592	14,449	16,812	18,548
7	0,989	1,239	1,690	2,167	14,067	16,013	18,475	20,278
8	1,344	1,646	2,180	2,733	15,507	17,535	20,090	21,955
9	1,735	2,088	2,700	3,325	16,919	19,023	21,666	23,589
10	2,156	2,558	3,247	3,940	18,307	20,483	23,209	25,188
11	2,603	3,053	3,816	4,575	19,675	21,920	24,725	26,757
12	3,074	3,571	4,404	5,226	21,026	23,337	26,217	28,300
13	3,565	4,107	5,009	5,892	22,362	24,736	27,688	29,819
14	4,075	4,660	5,629	6,571	23,685	26,119	29,141	31,319
15	4,601	5,229	6,262	7,261	24,996	27,488	30,578	32,801
16	5,142	5,812	6,908	7,962	26,296	28,845	32,000	34,267
17	5,697	6,408	7,564	8,672	27,587	30,191	33,409	35,718
18	6,265	7,015	8,231	9,390	28,869	31,526	34,805	37,156
19	6,844	7,633	8,907	10,117	30,144	32,852	36,191	38,582
20	7,434	8,260	9,591	10,851	31,41	34,170	37,566	39,997
21	8,034	8,897	10,283	11,591	32,671	35,479	38,932	41,401
22	8,643	9,542	10,982	12,338	33,924	36,781	40,289	42,796
23	9,260	10,196	11,689	13,091	36,172	38,076	41,638	44,181
24	9,886	10,856	12,401	13,848	36,415	39,364	42,980	45,558
25	10,520	11,524	13,120	14,611	37,652	40,646	44,314	46,928
26	11,160	12,198	13,844	15,379	38,885	41,923	45,642	48,290
27	11,808	12,879	14,573	16,151	40,113	43,194	46,963	49,645
28	12,461	13,565	15,308	16,928	41,337	44,461	48,278	50,993
29	13,121	14,256	16,047	17,708	42,557	45,722	49,588	52,336
30	13,787	14,953	16,791	18,493	43,773	46,979	50,892	53,672

Sumber : Soewarno, 1995

➤ Uji keselarasan Smirnov Kolmogorof

Pengujian kecocokan sebaran dengan metode ini dilakukan dengan membandingkan probabilitas untuk tiap variabel dari distribusi empiris dan teoritis sehingga didapat perbedaan (Δ) tertentu. Perbedaan maksimum yang dihitung (Δ_{maks}) dibandingkan dengan perbedaan kritis (Δ_{cr}) untuk suatu derajat nyata dan banyaknya varian tertentu, maka sebaran sesuai jika $(\Delta_{maks}) < (\Delta_{cr})$.

Rumus :

$$\Delta_{maks} [P(X) - P(X_i)] < \Delta_{cr(\alpha,n)} \dots\dots\dots (2.13)$$

Tabel II-3. Nilai Δ kritis untuk uji keselarasan Smirnov Kolmogorof

n	α			
	0,20	0,10	0,05	0,01
5	0,45	0,51	0,56	0,67
10	0,32	0,37	0,41	0,49
15	0,27	0,30	0,34	0,40
20	0,23	0,26	0,29	0,36
25	0,21	0,24	0,27	0,32
30	0,19	0,22	0,24	0,29
35	0,18	0,20	0,23	0,27
40	0,17	0,19	0,21	0,25
45	0,16	0,18	0,20	0,24
50	0,15	0,17	0,19	0,23
n>50	$\frac{1,07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{n}}$

(Sumber : Hidrologi Terapan, Dr. Ir. Sri Harto Br. Dip. H)

2.2.4. Perhitungan Curah Hujan Rencana

Perhitungan curah hujan rencana digunakan untuk memperkirakan besarnya hujan dengan periode ulang tertentu. Berdasarkan curah hujan rencana tersebut kemudian dicari intensitas hujan yang digunakan untuk mencari debit banjir rencana.

Untuk memperkirakan curah hujan rencana dilakukan dengan analisa frekuensi data hujan. Ada beberapa metode yang dapat digunakan yaitu:

1. Metode Normal (Cara Analitis)

Adapun persamaan-persamaan yang digunakan pada perhitungan dengan Metode Normal atau disebut pula distribusi *Gauss* ialah sebagai berikut:

$$X_T = \bar{X} + (k.S) \dots\dots\dots (2.14)$$

Di mana

- X_T = Curah hujan dengan periode ulang T tahun (mm)
- \bar{X} = Harga rata-rata curah hujan (mm)
- S = Standar Deviasi (simpangan baku)
- k = Nilai variabel reduksi *Gauss* periode ulang T tahun (Tabel II-4.)

Tabel II-4. Nilai Variabel Reduksi *Gauss* (k)

Periode Ulang T (tahun)	Peluang	k	Periode Ulang T (tahun)	Peluang	k
1,001	0,999	-3,05	2,5	0,400	0,25
1,005	0,995	-2,58	3,3	0,300	0,52
1,010	0,990	-2,33	4	0,250	0,67
1,050	0,950	-1,64	5	0,200	0,84
1,110	0,900	-1,28	10	0,100	1,28
1,250	0,800	-0,84	20	0,050	1,64
1,330	0,750	-0,67	50	0,020	2,05
1,430	0,700	-0,52	100	0,010	2,33
1,670	0,600	-0,25	200	0,005	2,58
2	0,500	0	500	0,002	2,88
			1000	0,001	3,09

(Sumber : Hidrologi Terapan, Dr. Ir. Sri Harto Br. Dip. H)

2. Metode Gumbel Tipe I

Untuk menghitung curah hujan rencana dengan metode distribusi Gumbel Tipe I digunakan persamaan distribusi frekuensi empiris sebagai berikut (Soewarno, 1995):

$$X_T = \bar{X} + \frac{S}{S_n}(Y_T - Y_n) \dots\dots\dots (2.15)$$

di mana :

X_T = Curah hujan dengan periode ulang T tahun (mm)

\bar{X} = Harga rata-rata curah hujan (mm)

S = Standar Deviasi (simpangan baku)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}}$$

Y_T = Nilai reduksi variat dari variabel yang diharapkan terjadi pada periode ulang tertentu, hubungan antara periode ulang T dengan Y_T dapat dilihat pada Tabel II-7 atau dapat dihitung dengan rumus :

$$Y_T = -\ln \left[-\ln \frac{T-1}{T} \right] ; \text{ untuk } T \geq 20, \text{ maka } Y_T = \ln T$$

Y_n = Nilai rata-rata dari reduksi variat (*mean of reduce variate*) nilainya tergantung dari jumlah data (n) dan dapat dilihat pada Tabel II-5

S_n = Deviasi standar dari reduksi variat (*mean of reduced variate*) nilainya tergantung dari jumlah data (n) dan dapat dilihat pada Tabel II-6

Tabel II-5. Reduced Mean (Y_n)

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0,4952	0,4996	0,5035	0,5070	0,5100	0,5128	0,5157	0,5181	0,5202	0,5220
20	0,5236	0,5252	0,5268	0,5283	0,5296	0,5300	0,5820	0,5882	0,5343	0,5353
30	0,5363	0,5371	0,5380	0,5388	0,5396	0,5400	0,5410	0,5418	0,5424	0,5430
40	0,5463	0,5442	0,5448	0,5453	0,5458	0,5468	0,5468	0,5473	0,5477	0,5481
50	0,5485	0,5489	0,5493	0,5497	0,5501	0,5504	0,5508	0,5511	0,5515	0,5518
60	0,5521	0,5524	0,5527	0,5530	0,5533	0,5535	0,5538	0,5540	0,5543	0,5545
70	0,5548	0,5550	0,5552	0,5555	0,5557	0,5559	0,5561	0,5563	0,5565	0,5567
80	0,5569	0,5570	0,5572	0,5574	0,5576	0,5578	0,5580	0,5581	0,5583	0,5585
90	0,5586	0,5587	0,5589	0,5591	0,5592	0,5593	0,5595	0,5596	0,5598	0,5599
100	0,5600									

Sumber : CD Soemarto, 1999

Tabel II-6. Reduced Standard Deviation (S_n)

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0,9496	0,9676	0,9833	0,9971	1,0095	1,0206	1,0316	1,0411	1,0493	1,0565
20	1,0628	1,0696	1,0754	1,0811	1,0864	1,0915	1,0961	1,1004	1,1047	1,1080
30	1,1124	1,1159	1,1193	1,1226	1,1255	1,1285	1,1313	1,1339	1,1363	1,1388
40	1,1413	1,1436	1,1458	1,1480	1,1499	1,1519	1,1538	1,1557	1,1574	1,1590
50	1,1607	1,1623	1,1638	1,1658	1,1667	1,1681	1,1696	1,1708	1,1721	1,1734
60	1,1747	1,1759	1,1770	1,1782	1,1793	1,1803	1,1814	1,1824	1,1834	1,1844
70	1,1854	1,1863	1,1873	1,1881	1,1890	1,1898	1,1906	1,1915	1,1923	1,1930
80	1,1938	1,1945	1,1953	1,1959	1,1967	1,1973	1,1980	1,1987	1,1994	1,2001
90	1,2007	1,2013	1,2026	1,2032	1,2038	1,2044	1,2046	1,2049	1,2055	1,2060
100	1,2065									

Sumber : CD Soemarto, 1999

Tabel II-7. *Reduced Variate* (Y_T)

Periode Ulang	<i>Reduced Variate</i>
2	0,3665
5	1,4999
10	2,2502
20	2,9606
25	3,1985
50	3,9019
100	4,6001
200	5,2960
500	6,2140
1000	6,9190
5000	8,5390
10000	9,9210

Sumber : CD Soemarto, 1999

3. Metode Distribusi Log Pearson tipe III

Metode *Log Pearson tipe III* apabila digambarkan pada kertas peluang logaritmik akan merupakan persamaan garis lurus, sehingga dapat dinyatakan sebagai model matematik dengan persamaan sebagai berikut (Soewarno, 1995):

$$Y_T = \bar{Y} + k.S \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

di mana :

X = Curah hujan (mm)

Y_T = Nilai logaritmik dari X atau log X dengan periode ulang tertentu

\bar{Y} = Rata-rata hitung (lebih baik rata-rata geometrik) nilai Y

S = Deviasi standar nilai Y

k = Karakteristik distribusi peluang log-pearson tipe III (dapat dilihat pada Tabel II-8)

Langkah-langkah perhitungan kurva distribusi *Log Pearson Tipe*

III adalah :

1. Tentukan logaritma dari semua nilai X

2. Hitung nilai rata-ratanya :

$$\overline{\log(X)} = \frac{\sum \log(X)}{n}$$

3. Hitung nilai deviasi standarnya dari log X :

$$S\log(X) = \sqrt{\frac{\sum (\log(X) - \overline{\log(X)})^2}{n-1}}$$

4. Hitung nilai koefisien kemencengan (CS) :

$$CS = \frac{n \sum (\log(X) - \overline{\log(X)})^3}{(n-1)(n-2)(S\log(X))^3}$$

sehingga persamaannya dapat ditulis :

$$\log X_T = \overline{\log(X)} + k(S\log(X))$$

5. Tentukan anti log dari log X_T , untuk mendapatkan nilai X_T yang diharapkan terjadi pada tingkat peluang atau periode ulang tertentu sesuai dengan nilai CS-nya. Nilai k dapat dilihat pada Tabel II-8.

Tabel II-8. Harga k untuk Distribusi *Log Pearson tipe III*

Kemencengan (CS)	Periode Ulang (tahun)							
	2	5	10	25	50	100	200	1000
	Peluang (%)							
	50	20	10	4	2	1	0,5	0,1
3,0	-0,396	0,420	1,180	2,278	3,152	4,051	4,970	7,250
2,5	-0,360	0,518	1,250	2,262	3,048	3,845	4,652	6,600
2,2	-0,330	0,574	1,284	2,240	2,970	3,705	4,444	6,200
2,0	-0,307	0,609	1,302	2,219	2,912	3,605	4,298	5,910
1,8	-0,282	0,643	1,318	2,193	2,848	3,499	4,147	5,660
1,6	-0,254	0,675	1,329	2,163	2,780	3,388	3,990	5,390
1,4	-0,225	0,705	1,337	2,128	2,706	3,271	3,828	5,110
1,2	-0,195	0,732	1,340	2,087	2,626	3,149	3,661	4,820
1,0	-0,164	0,758	1,340	2,043	2,542	3,022	3,489	4,540
0,9	-0,148	0,769	1,339	2,018	2,498	2,957	3,401	4,395
0,8	-0,132	0,780	1,336	1,998	2,453	2,891	3,312	4,250
0,7	-0,116	0,790	1,333	1,967	2,407	2,824	3,223	4,105
0,6	0,099	0,800	1,328	1,939	2,359	2,755	3,132	3,960
0,5	-0,083	0,808	1,323	1,910	2,311	2,686	3,041	3,815
0,4	-0,066	0,816	1,317	1,880	2,261	2,615	2,949	3,670
0,3	-0,050	0,824	1,309	1,849	2,211	2,544	2,856	3,525
0,2	-0,033	0,830	1,301	1,818	2,159	2,472	2,763	3,380
0,1	-0,017	0,836	1,292	1,785	2,107	2,400	2,670	3,235
0,0	0,000	0,842	1,282	1,751	2,054	2,326	2,576	3,090
-0,1	0,017	0,836	1,270	1,761	2,000	2,252	2,482	3,950
-0,2	0,033	0,850	1,258	1,680	1,945	2,178	2,388	2,810
-0,3	0,050	0,853	1,245	1,643	1,890	2,104	2,294	2,675
-0,4	0,066	0,855	1,231	1,606	1,834	2,029	2,201	2,540
-0,5	0,083	0,856	1,216	1,567	1,777	1,955	2,108	2,400
-0,6	0,099	0,857	1,200	1,528	1,720	1,880	2,016	2,275
-0,7	0,116	0,857	1,183	1,488	1,663	1,806	1,926	2,150
-0,8	0,132	0,856	1,166	1,488	1,606	1,733	1,837	2,035
-0,9	0,148	0,854	1,147	1,407	1,549	1,660	1,749	1,910
-1,0	0,164	0,852	1,128	1,366	1,492	1,588	1,664	1,800
-1,2	0,195	0,844	1,086	1,282	1,379	1,449	1,501	1,625
-1,4	0,225	0,832	1,041	1,198	1,270	1,318	1,351	1,465
-1,6	0,254	0,817	0,994	1,116	1,166	1,200	1,216	1,280
-1,8	0,282	0,799	0,945	1,035	1,069	1,089	1,097	1,130
-2,0	0,307	0,777	0,895	0,959	0,980	0,990	1,995	1,000
-2,2	0,330	0,752	0,844	0,888	0,900	0,905	0,907	0,910
-2,5	0,360	0,711	0,771	0,793	0,798	0,799	0,800	0,802
-3,0	0,396	0,636	0,660	0,666	0,666	0,667	0,667	0,668

Sumber : Soewarno, 1995

4. Metode Log Normal

Metode Log Normal apabila digambarkan pada kertas peluang logaritmik akan merupakan persamaan garis lurus, sehingga dapat dinyatakan sebagai model matematik dengan persamaan sebagai berikut (Soewarno, 1995) :

$$X = \bar{X} + k.S \dots\dots\dots (2.17)$$

di mana :

- X = Besarnya curah hujan yang diharapkan terjadi pada periode ulang tertentu.
- \bar{X} = curah hujan rata-rata
- S = Deviasi standar.
- k = Karakteristik distribusi peluang log-normal 3 parameter yang merupakan fungsi dari koefisien kemencengan CS (lihat Tabel II-9.)

Tabel II-9. Faktor frekuensi k untuk distribusi log normal 3 parameter

Koefisien Kemencengan (CS)	Peluang kumulatif (%)					
	50	80	90	95	98	99
	Periode Ulang (tahun)					
	2	5	10	20	50	100
-2,00	0,2366	-0,6144	-1,2437	-1,8916	-2,7943	-3,5196
-1,80	0,2240	-0,6395	-1,2621	-1,8928	-2,7578	-3,4433
-1,60	0,2092	-0,6654	-1,2792	-1,8901	-2,7138	-3,3570
-1,40	0,1920	-0,6920	-1,2943	-1,8827	-2,6615	-3,2601
-1,20	0,1722	-0,7186	-1,3067	-1,8696	-2,6002	-3,1521
-1,00	0,1495	-0,7449	-1,3156	-1,8501	-2,5294	-3,0333
-0,80	0,1241	-0,7700	-1,3201	-1,8235	-2,4492	-2,9043
-0,60	0,0959	-0,7930	-0,3194	-1,7894	-2,3600	-2,7665
-0,40	0,0654	-0,8131	-0,3128	-1,7478	-2,2631	-2,6223
-0,20	0,0332	-0,8296	-0,3002	-1,6993	-2,1602	-2,4745
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,20	-0,0332	0,8996	0,3002	1,5993	2,1602	2,4745
0,40	-0,0654	0,8131	0,3128	1,7478	2,2631	2,6223
0,60	-0,0959	0,7930	0,3194	1,7894	2,3600	2,7665
0,80	-0,1241	0,7700	1,3201	1,8235	2,4492	2,9043
1,00	-0,1495	0,7449	1,3156	1,8501	2,5294	3,0333
1,20	-0,1722	0,7186	1,30567	1,8696	2,6002	3,1521
1,40	-0,1920	0,6920	1,2943	1,8827	2,6615	3,2601
1,60	-0,2092	0,6654	1,2792	1,8901	2,7138	3,3570
1,80	-0,2240	0,6395	1,2621	1,8928	2,7578	3,4433
2,00	-0,2366	0,6144	1,2437	1,8916	2,7943	3,5196

2.2.5. Perhitungan Intensitas Curah Hujan

Untuk menentukan Debit Banjir Rencana (*Design Flood*), perlu didapatkan harga suatu Intensitas Curah Hujan terutama bila digunakan metoda rational. Intensitas curah hujan adalah ketinggian curah hujan yang terjadi pada suatu kurun waktu di mana air tersebut berkonsentrasi. Analisis intensitas curah hujan ini dapat diproses dari data curah hujan yang telah terjadi pada masa lampau.

Untuk menghitung intensitas curah hujan, dapat digunakan beberapa macam metode sebagai berikut :

1. *Menurut Dr. Mononobe*

Rumus ini digunakan apabila data curah hujan yang tersedia hanya curah hujan harian .

Rumus :

$$I = \frac{R_{24}}{24} * \left[\frac{24}{t} \right]^{2/3} \dots\dots\dots (2.18a)$$

di mana :

- I = Intensitas curah hujan (mm/jam)
- R₂₄ = Curah hujan maksimum dalam 24 jam (mm)
- t = Lamanya curah hujan (jam)

2. *Menurut Sherman*

Rumus :

$$I = \frac{a}{t^b} \dots\dots\dots (2.18a)$$

$$\log a = \frac{\sum_{i=1}^n (\log i) \sum_{i=1}^n (\log t)^2 - \sum_{i=1}^n (\log t \cdot \log i) \sum_{i=1}^n (\log t)}{n \sum_{i=1}^n (\log t)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\log t) \right)^2}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (\log i) \sum_{i=1}^n (\log t) - n \sum_{i=1}^n (\log t \cdot \log i)}{n \sum_{i=1}^n (\log t)^2 - \left(\sum_{i=1}^n (\log t) \right)^2}$$

di mana :

- I = Intensitas curah hujan (mm/jam)
- t = Lamanya curah hujan (menit)
- a,b = Konstanta yang tergantung pada lama curah hujan yang terjadi di daerah aliran.
- n = Banyaknya pasangan data i dan t

3. Menurut Talbot

Rumus :

$$I = \frac{a}{(t + b)} \dots\dots\dots (2.22)$$

di mana :

- I = Intensitas curah hujan (mm/jam)
- t = Lamanya curah hujan (menit)
- a,b = Konstanta yang tergantung pada lama curah hujan yang terjadi di daerah aliran.
- n = Banyaknya pasangan data i dan t

$$a = \frac{\sum_{j=1}^n (i.t) \sum_{j=1}^n (i^2) - \sum_{j=1}^n (i^2.t) \sum_{i=1}^n (i)}{n \sum_{j=1}^n (i^2) - \left[\sum_{j=1}^n (i) \right]^2}$$

$$b = \frac{\sum_{j=1}^n (i) \sum_{j=1}^n (i.t) - n \sum_{j=1}^n (i^2.t)}{n \sum_{j=1}^n (i^2) - \left[\sum_{j=1}^n (i) \right]^2}$$

4. Menurut Ishiguro

Rumus :

$$I = \frac{a}{\sqrt{t + b}} \dots\dots\dots (2.23)$$

di mana :

- I = Intensitas curah hujan (mm/jam)
- T = Lamanya curah hujan (menit)

- a,b = Konstanta yang tergantung pada lama curah hujan yang terjadi di daerah aliran
- n = Banyaknya pasangan data i dan t

$$a = \frac{\sum_{j=1}^n (i \cdot \sqrt{t}) \sum_{j=1}^n (i^2) - \sum_{j=1}^n (i^2 \cdot \sqrt{t}) \sum_{j=1}^n (i)}{n \sum_{j=1}^n (i^2) - \left[\sum_{j=1}^n (i) \right]^2}$$

$$b = \frac{\sum_{j=1}^n (i) \sum_{j=1}^n (i \cdot \sqrt{t}) - n \sum_{j=1}^n (i^2 \cdot \sqrt{t})}{n \sum_{j=1}^n (i^2) - \left[\sum_{j=1}^n (i) \right]^2}$$

(Hidrologi Teknik, Ir.CD.Soemarto,B.I.E.Dipl.H.)

2.2.6. Debit Banjir Rencana

Metode untuk mendapatkan debit banjir rencana adalah sebagai berikut :

➤ **Metode Haspers**

Untuk menghitung besarnya debit rencana dengan metode *Haspers* digunakan persamaan sebagai berikut :

Rumus *Haspers* :

$$Qt = \alpha \cdot \beta \cdot q_n \cdot A \dots\dots\dots (2.19a)$$

(Cara Menghitung Design Flood, Departemen Pekerjaan Umum)

di mana :

- Koefisien Runoff (α)

$$\alpha = \frac{1 + 0,012A^{0,7}}{1 + 0,075A^{0,7}} \dots\dots\dots (2.19b)$$

- Koefisien Reduksi (β)

$$\frac{1}{\beta} = 1 + \frac{t + (3,7 \times 10^{-0,4t})}{t^2 + 15} \cdot x \frac{A^{0,75}}{12} \dots\dots\dots (2.19c)$$

➤ **Metode Rasional**

Metode ini digunakan dengan anggapan bahwa DTA memiliki :

- Intensitas curah hujan merata di seluruh DTA dengan durasi tertentu.
- Lamanya curah hujan = waktu konsentrasi dari DTA.
- Puncak banjir dan intensitas curah hujan mempunyai tahun berulang yang sama.

Rumus :

$$Q_T = (1/3,6) * C * I * A \text{ (m}^3\text{/detik)} \dots\dots\dots (2.20a)$$

Di mana :

Q_T = Debit banjir rencana untuk periode ulang T tertentu (m³/det)

C = Koefisien limpasan (*run off*)

I = Intensitas hujan, dihitung menggunakan rumus *Mononobe* :

$$I = \frac{R_{24}}{24} * \left[\frac{24}{tc} \right]^{2/3} \text{ (mm/jam)}$$

$$t = \frac{L}{V} \text{ di mana : } V = 72 \left[\frac{i}{L} \right]^{0,6}$$

tc = waktu konsentrasi/lamanya hujan (jam)

A = Luas DTA (km²)

(*Hidrologi untuk Pengairan. Ir.Suyono Sosrodarsono & Kensaku Takeda*)

Tabel II-10a Harga Koefisien Limpasan (Run Off)

Kondisi Daerah Pengaliran dan Sungai	Harga C
Daerah pegunungan yang curam	0,75 – 0,90
Daerah pegunungan tersier	0,70 – 0,80
Tanah bergelombang dan hutan	0,50 – 0,75
Tanah dataran yang ditanami	0,45 – 0,60
Persawahan yang dialiri	0,70 – 0,80
Sungai di daerah pegunungan	0,75 – 0,85
Sungai kecil di dataran	0,45 – 0,75
Sungai besar yang lebih dari setengah daerah pengalirannya terdiri dari dataran	0,50 – 0,75

(*Ir.Suyono Sosrodarsono & Kensaku Takeda, Hidrologi untuk Pengairan*)

Koefisien pengaliran dalam tabel II-10a telah didasarkan pada pertimbangan bahwa koefisien itu terutama tergantung dari faktor-faktor fisik. Kemudian *Dr. Kawakami* menyusun sebuah rumus yang mengemukakan bahwa untuk sungai tertentu koefisien itu tidak tetap, tetapi berbeda-beda yang tergantung dari curah hujan

$$C = 1 - \frac{R'}{Rt} = 1 - C' \dots\dots\dots (2.20b)$$

Di mana :

C = Koefisien limpasan/pengaliran

C' = Laju kehilangan = $\frac{\gamma}{Rt^s}$

Rt = Jumlah curah hujan (mm)

R' = Kehilangan curah hujan (mm)

γ, s = Tetapan

Sedangkan tabel II-10b memperlihatkan rumus-rumus koefisien pengaliran rata-rata yang diperoleh dengan analisa data yang diukur.

Tabel II-10b Rumus-Rumus Koefisien Limpasan (Koefisien Pengaliran)

Daerah	Kondisi Sungai	Curah Hujan	Koefisien Pengaliran
Hulu			$f = 1 - 15,7/Rt^{3/4}$
Tengah	sungai biasa		$f = 1 - 5,65/Rt^{1/2}$
Tengah	Sungai di zone lava		$f = 1 - 7,2/Rt^{1/2}$
Tengah		Rt > 200 mm	$f = 1 - 3,14/Rt^{1/3}$
Hilir		Rt < 200 mm	$f = 1 - 6,6/Rt^{1/2}$

(*Ir.Suyono Sosrodarsono & Kensaku Takeda, Hidrologi untuk Pengairan*)

➤ **Metode Der Weduwen**

Digunakan untuk luas DTA $\leq 100 \text{ km}^2$

Rumus dari metode *Weduwen* adalah sebagai berikut :

$$Qt = \alpha \cdot \beta \cdot q_n \cdot A \dots\dots\dots (2.21a)$$

(DPU Pengairan ,Buku Petunjuk Perencanaan Irigasi-
Bagian Penunjang Standar Perencanaan Irigasi, Desember 1986)

di mana :

$$t = 0,25LQ^{-0,125} I^{-0,25} \dots\dots\dots (2.21b)$$

$$\beta = \frac{120 + \left(\frac{t+1}{t+9}\right) \cdot A}{120 + A} \dots\dots\dots (2.21c)$$

$$q_n = \frac{R_n \cdot 67,65}{240 t + 1,45} \dots\dots\dots (2.21d)$$

$$\alpha = 1 - \frac{4,1}{\beta q_n + 7} \dots\dots\dots (2.21e)$$

di mana :

- Qt = Debit banjir rencana (m³/det)
- Rn = Curah hujan maksimum (mm/hari)
- α = Koefisien pelimpasan air hujan (*run off*)
- β = Koefisien pengurangan (reduksi) daerah untuk curah hujan DTA
- qn = Debit persatuan luas (m³/det.km²)
- t = Waktu konsentrasi/lamanya hujan (jam)
- A = Luas DTA (Km²)
- L = Panjang sungai (Km)
- I = Gradien sungai atau medan/ kemiringan dasar sungai
Yaitu kemiringan rata-rata sungai (10% bagian hulu dari panjang sungai tidak dihitung. Beda tinggi dan panjang diambil dari suatu titik 0,1 L dari batas hulu DTA).

Adapun syarat dalam perhitungan debit banjir dengan metode Weduwen adalah sebagai berikut :

$$A = \text{Luas daerah pengaliran} < 100 \text{ Km}^2$$

$$t = 1/6 \text{ sampai } 12 \text{ jam}$$

Langkah kerja perhitungan Metode Weduwen :

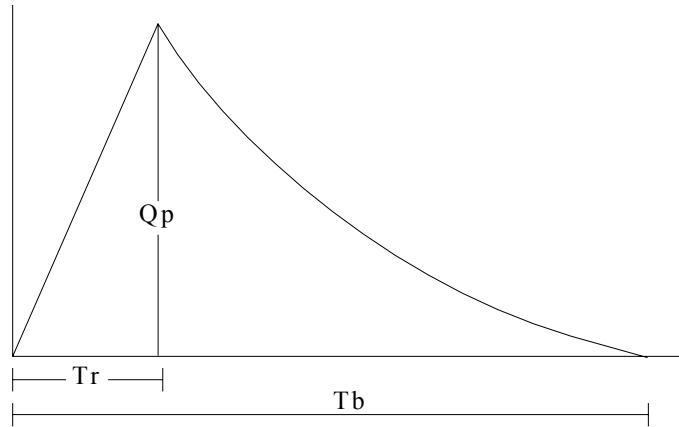
- Hitung A, L dan I dari peta garis tinggi DTA, substitusikan kedalam persamaan
- Buat harga perkiraan untuk Q_1 dan gunakan persamaan di atas untuk menghitung besarnya t, q_n , α dan β .
- Setelah besarnya t, q_n , α dan β didapat kemudian dilakukan iterasi perhitungan untuk Q_2 .
- Ulangi perhitungan sampai dengan $Q_n = Q_{n-1}$ atau mendekati nilai tersebut.

➤ Metode Analisis Hidrograf Satuan Sintetik Gamma I.

Cara ini dipakai sebagai upaya untuk memperoleh *hidrograf* satuan suatu DTA yang belum pernah diukur. Dengan pengertian lain tidak tersedia data pengukuran debit maupun data AWLR (*Automatic Water Level Recorder*) pada suatu tempat tertentu dalam sebuah DTA (tidak ada stasiun hidrometer).

Hidrograf satuan sintetik secara sederhana dapat disajikan 4 sifat dasarnya yang masing-masing disampaikan sebagai berikut :

- 1). Waktu naik (*Time of Rise*, TR), yaitu waktu yang diukur dari saat *hidrograf* mulai naik sampai saat terjadinya debit puncak.
- 2). Debit puncak (*Peak Discharge*, Qp).
- 3). Waktu dasar (*Base Time*, TB), yaitu waktu yang diukur dari saat *hidrograf* mulai naik sampai berakhirnya limpasan langsung atau debit sama dengan nol.
- 4). Koefisien tampungan (*Storage Coefficient*) yang menunjukkan kemampuan DTA dalam fungsinya sebagai tampungan air.



Gambar II-4. Sketsa hidrograf satuan sintetik

Sisi naik *hidrograf* satuan diperhitungkan sebagai garis lurus sedang sisi resesi (*resession climb*) hidrograf satuan disajikan dalam persamaan eksponensial berikut:

$$Q_t = Q_p \cdot e^{-t/k} \dots\dots\dots (2.21e)$$

di mana :

- Qt = Debit yang diukur dalam jam ke-t sesudah debit puncak dalam (m³/det)
- Qp = Debit puncak dalam (m³/det)
- t = Waktu yang diukur dari saat terjadinya debit puncak (jam)
- k = Koefisien tampungan (jam)

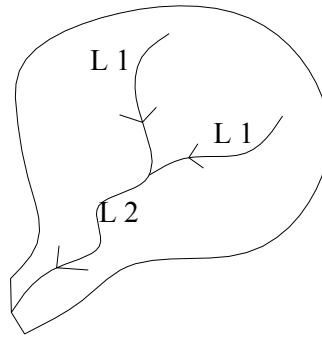
(*Analisis Hidrologi, Dr. Ir. Sri Harto Br. Dip. H*)

a. Waktu mencapai puncak

$$T_R = 0,43 \left[\frac{L}{100.SF} \right]^3 + 1,06665.SIM + 1,2775 \dots\dots\dots (2.22)$$

di mana :

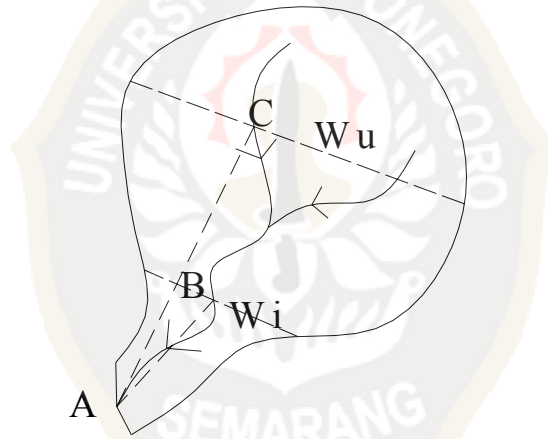
- TR = Waktu naik (jam)
- L = Panjang sungai (Km)
- SF = Faktor sumber yaitu perbandingan antara jumlah semua panjang sungai tingkat 1 dengan jumlah semua panjang sungai semua tingkat



Gambar II-5. Sketsa penetapan panjang dan tingkat sungai

$$SF = (L1+L1)/(L1+L1+L2)$$

SIM = Faktor simetri ditetapkan sebagai hasil kali antara faktor lebar (WF) dengan luas relatif DTA sebelah hulu (RUA)



Gambar II-6. Sketsa penetapan WF

$$A-B = 0,25 L$$

$$A-C = 0,75 L$$

$$WF = Wu/Wi$$

b. Debit puncak

$$Qp = 0,1836.A^{0,5886} .TR^{-0,4008} .JN^{0,2381} \dots\dots\dots (2.23)$$

di mana :

Qp = debit puncak (m³/det)

JN = Jumlah pertemuan sungai (buah)

A = Luas DTA (Km²)

TR = Waktu naik (jam)

c. Waktu dasar

$$T_B = 27,4132.T_R^{0,1457} .S^{-0,0986} .SN^{0,7344} RUA^{0,2574} \dots\dots\dots (2.24)$$

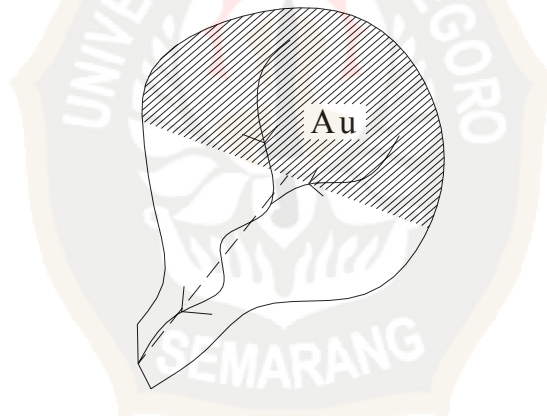
di mana :

TB = Waktu dasar (jam)

S = Landai sungai rata-rata

SN = Frekuensi sumber yaitu perbandingan antara jumlah segmen sungai-sungai tingkat 1 dengan jumlah segmen sungai semua tingkat

RUA= Perbandingan antara luas DTA yang diukur di hulu garis yang ditarik tegak lurus garis hubung antara stasiun pengukuran dengan titik yang paling dekat dengan titik berat DTA melewati titik tersebut dengan luas DTA total



Gambar II-7. Sketsa penetapan RUA

$$RUA = Au/A$$

d. Φ indeks

Penetapan hujan efektif untuk memperoleh hidrograf dilakukan dengan menggunakan indeks-infiltrasi. Untuk memperoleh indeks ini agak sulit, untuk itu dipergunakan pendekatan dengan mengikuti petunjuk Barnes (1959). Perkiraan dilakukan dengan mempertimbangkan pengaruh parameter DTA yang secara hidrologi dapat diketahui pengaruhnya terhadap indeks infiltrasi :

Persamaan pendekatannya adalah sebagai berikut :

$$\Phi = 10,4903 - 3,859x10^{-6} .A^2 + 1,6985x10^{-13} (A/ SN)^4 \dots\dots\dots (2.25)$$

e. Aliran dasar

Untuk memperkirakan aliran dasar digunakan persamaan pendekatan berikut ini. Persamaan ini merupakan pendekatan untuk aliran dasar yang tetap, dengan memperhatikan pendekatan *Kraijenhoff Van Der Leur* (1967) tentang *hidrograf* air tanah :

$$Q_b = 0,4751 \cdot A^{0,6444} \cdot D^{0,9430} \dots\dots\dots (2.26)$$

di mana :

Qb = Aliran dasar (m³/det)

A = Luas DTA (Km²)

D = kerapatan jaringan kuras (*drainage density*)/ indeks kerapatan sungai yaitu perbandingan jumlah panjang sungai semua tingkat dibagi dengan luas DTA.

f. Faktor tampungan

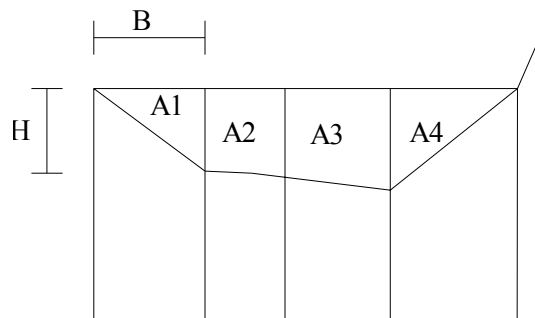
$$k = 0,5617 \cdot A^{0,1798} \cdot S^{-0,1446} \cdot SF^{-1,0897} \cdot D^{0,0452} \dots\dots\dots (2.27)$$

di mana :

k = koefisien tampungan

➤ **Metode Passing Capacity**

Menghitung *passing capacity* didapatkan dari perhitungan debit suatu penampang pada saat kondisi *bank full* (kondisi muka air banjir) dan dihitung dari penampang sungai yang lurus. Pada kondisi tanah asli tiap penampang dibagi menjadi beberapa bagian sehingga didapat Luas penampang basah rata-rata dan keliling basah rata-rata.



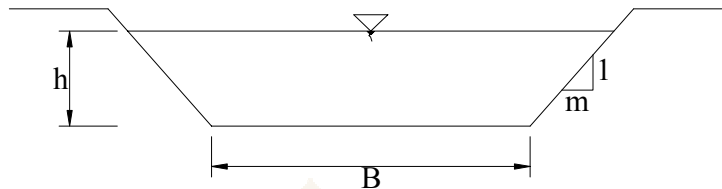
Gambar II-8. Penampang melintang sungai dibagi menjadi beberapa bagian

$$A1 = 0,5 \times (B \times H) \dots\dots\dots (2.28a)$$

$$P1 = \sqrt{(B^2 + H^2)} \dots\dots\dots (2.28b)$$

$$A_{total} = A1 + A2 + \dots A_n$$

$$P_{total} = P1 + P2 + \dots P_n$$



Gambar II-9. Penampang melintang sungai penampang trapesium

Sedangkan untuk penampang trapesium rumus-rumus yang digunakan adalah :

$$A = (B + mh)h \dots\dots\dots (2.28c)$$

$$P = B + 2h\sqrt{(1 + m^2)} \dots\dots\dots (2.28d)$$

$$R = \frac{A}{P} \dots\dots\dots (2.28e)$$

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \dots\dots\dots (2.28f)$$

Berdasarkan rumus di atas, maka debit yang mengalir melalui suatu penampang dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Q = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \cdot A \dots\dots\dots (2.29)$$

di mana :

Q = Debit banjir yang mengalir (m³/det)

A = Luas Penampang Basah (m²)

B = Lebar dasar saluran (m)

h = Tinggi muka air (m)

P = Keliling Basah (m)

m = Kemiringan dinding saluran dengan perbandingan terkecil

- n = Koefisien manning
 R = Jari-jari hidrolis (m)
 V = Kecepatan aliran (m/det)
 I = Kemiringan Lereng (V:H)

(Sumber : Hidrolika Terapan, Dr.Ing.Ir. Agus Maryono, Prof.Dr.Ing. W.Muth, Prof.Dr.Ing. N.Eisenhauer, 2003)

Tabel II-11 Nilai koefisien manning (n) untuk berbagai bahan

Bahan	n
Saluran Besi tuang dilapisi	0,014
Saluran beton	0,013
Saluran bata dilapisi mortar	0,015
Saluran pasangan batu disemen	0,025
Saluran tanah bersih	0,022
Saluran tanah	0,030
Saluran dengan batu dan tebing rumput	0,040
Saluran pada galian batu pedas	0,040

(Bambang Triatmojo, Dr. Ir. DEA. HidrolikaII)

2.3. PERHITUNGAN VOLUME EMBUNG

2.3.1. Perhitungan Angkutan Sedimen

Dalam perhitungan angkutan sedimen ini bertujuan untuk mendapatkan debit total sedimen pada embung. Volume sedimen yang ditampung di dalam embung dihitung berdasarkan pada besarnya laju sedimentasi tahunan, di mana volume *dead storage* dihitung berdasarkan pada besarnya debit sedimen dikalikan dengan umur rencana embung tersebut. Dalam perhitungan perkiraan volume angkutan sedimen dengan menggunakan data dari embung tersebut.

Apabila luas Daerah Tangkapan Air dari embung lebih kecil dari 100 km², maka angka satuan sedimentasi dapat dicari dengan menggunakan Tabel II-12a yang dibuat berdasar hasil-hasil pencatatan yang sesungguhnya dari embung-embung lapangan yang telah dibangun.

Tabel II-12a Tabel untuk memperoleh angka satuan Sedimen di Daerah Tangkapan Air

Topografi	Geografi	Daerah Tangkapan Air (km ²)						
		2	5	10	20	30	50	100
Stadium Permulaan Pembentukan	Zone A			100-300	300 - 800			
	Zone B			100-200	200 - 500			
	Zone C			100-150	150 - 400			
Stadium Akhir Pembentukan	Zone A		100 - 200		200 - 500			
	Zone B		100 - 150		250 - 400			
	Zone C		50 - 100		100 - 350			
Stadium Pertengahan	Zone B	< 50	50 - 100		100 - 350			
Merupakan Dataran yang Stabil	Zone C	<50		50 - 100		100 - 200		
	Zone B	<50		50 - 100		100 - 200		
	Zone C	<50		50 -100		100-200		

(Sumber : Suyono Sosrodarsono, Ir, Kensaku Takeda, *Bendungan Type Urugan, PT.Pradnya Paramita, 1977*).

Karakteristik terpenting yang sangat mempengaruhi tingkat sedimentasi adalah karakteristik topografi dan geologi yang dirumuskan sebagai berikut:

- a. Untuk karakteristik topografi dirumuskan dan dibedakan seperti yang tertera pada Tabel II-12b.

Tabel II-12b. Karakteristik Topografi Daerah Tangkapan Air.

Karakteristik Topografi	Peningkatan gejala erosi dalam alur sungai	Kemiringan dasar sungai	Perbedaan elevasi dan permukaan laut	Lain-Lain
Stadium Permulaan Pembentukan	Intensitas erosinya terbesar dengan proses penggerusan tebing sungainya	1/100 – 1/500	Lebih besar dari 500 m	Kemiringan tebing sungai sekitar 30°
Stadium Akhir Pembentukan	Intensitas erosinya besar dengan proses penggerusan tebing sungainya	1/500 – 1/700	± 400 m	
Stadium Pertengahan	Intensitas erosinya kecil kecuali dalam keadaan banjir	± 1/800	± 300 m	
Merupakan Dataran yang Stabil	Intensitas erosinya kecil walaupun dalam keadaan banjir	± 1/1000	± 100 m	

(Sumber : Suyono Sosrodarsono, Ir, Kensaku Takeda, *Bendungan Type Urugan, PT. Pradnya Paramita, 1977*).

b. Karakteristik geologi, dirumuskan dan dibedakan sebagai berikut:

→ Zone A

Daerah Tangkapan Air yang lebih dari 1/3 bagian terdiri dan daerah gunung berapi, daerah longsor dan terutama daerah yang terbentuk dari batuan yang berasal dari gunung berapi (*zone of volcanic origin*).

→ Zone B

Daerah Tangkapan Air yang antara 1/3 sampai dengan 1/5 bagian terdiri dari batuan seperti tersebut di atas.

→ Zone C

Daerah Tangkapan Air yang tidak termasuk dalam kategori kedua zone tersebut.

2.3.2. Perhitungan Hubungan Elevasi - Luas Genangan -Volume Embung

Perhitungan ini didasarkan pada data peta topografi dengan beda tinggi (kontur) 1 m. Cari luas permukaan embung yang dibatasi garis kontur, kemudian dicari volume yang dibatasi oleh 2 garis kontur yang berurutan dengan menggunakan rumus pendekatan volume sebagai berikut :

$$V_X = \frac{1}{3} \times Z \times (F_Y + F_X + \sqrt{F_Y \times F_X}) \dots\dots\dots (2.30)$$

di mana :

V_X = Volume pada kontur X

Z = Beda tinggi antar kontur

F_Y = Luas pada kontur Y

F_X = Luas pada kontur X

Hasil dari perhitungan tersebut di atas, kemudian dibuat grafik hubungan antara elevasi, luas genangan dan volume embung. Dari grafik tersebut dapat dicari luas dan volume setiap elevasi tertentu dari embung tersebut.

2.3.3. Perhitungan Volume Storage

2.3.3.1. Volume Dead Storage

Volume *dead storage* adalah volume sedimen yang mampu ditampung didalam embung selama umur rencana serta berfungsi meredam arus banjir yang dapat secara tiba-tiba pada musim kemarau, sehingga tidak menimbulkan kerusakan pada tubuh embung. Volume *dead storage* dihitung berdasarkan pada besarnya angkutan sedimen tahunan.

$$\text{Vol. dead storage} = Q_{\text{sedimen}} * \text{Umur rencana usia embung} \dots\dots\dots (2.31)$$

2.3.3.2. Volume Efektif Storage

Volume Efektif *storage* adalah besarnya volume penyimpanan air didalam embung untuk memenuhi keperluan PLTA selama satu tahun. Volume Efektif *storage* dihitung dipengaruhi oleh besarnya debit andalan

dan kebutuhan air yang harus ditampung agar kebutuhan air dapat terpenuhi.

$$\left(|Inflow - Outflow| \max = Vol. efektif storage \right) \dots\dots\dots (2.32a)$$

Volume Efektif *storage* juga dapat dihitung dengan mengurangi Volume *storage* total yang didapat dari Grafik Hubungan elevasi-Volume Embung dengan jumlah volume *dead storage*.

$$Vol. efektif storage = Vol. storage total - vol. dead storage \dots\dots\dots (2.32b)$$

2.3.4. Penelusuran Banjir (*Flood Routing*)

Penelusuran banjir adalah suatu prosedur untuk memperkirakan waktu dan besaran banjir di suatu titik sungai, berdasarkan data yang diketahui pada sungai sebelah hulu. Penelusuran banjir dimaksudkan untuk mengetahui karakteristik *hidrograf outflow*/keluaran, yang sangat diperlukan dalam pengendalian banjir. Perubahan *hidrograf* banjir antara *inflow* (I) dan *outflow* (O) karena adanya faktor tampungan atau adanya penampang sungai yang tidak seragam atau akibat adanya meander sungai. Penelusuran banjir ada dua yaitu untuk mengetahui perubahan *inflow* dan *outflow* pada waduk dan *inflow* pada satu titik dengan suatu titik di tempat lain pada sungai.

Perubahan *inflow* dan *outflow* akibat adanya tampungan, sehingga pada suatu waduk terdapat *inflow* banjir (I) akibat adanya banjir dan *outflow* (O) apabila muka air waduk naik, di atas *spillway* (terdapat limpasan).

I > O tampungan waduk naik Elevasi muka air waduk naik.

I < O tampungan waduk turun Elevasi muka waduk turun.

Pada penelusuran banjir berlaku persamaan kontinuitas.

$$I - O = \Delta S \dots\dots\dots (2.33a)$$

ΔS = Perubahan tampungan air di waduk

Persamaan kontinuitas pada periode $\Delta t = t_1 - t_2$ adalah :

$$\left[\frac{I_1 + I_2}{2} \right] * \Delta t - \left[\frac{O_1 + O_2}{2} \right] * \Delta t = S_2 - S_1 \dots\dots\dots (2.33b)$$

I_1 dan I_2 diketahui dari hidrograf debit masuk ke waduk jika periode penelusuran delta t telah ditentukan. S_1 merupakan tampungan waduk pada permulaan periode penelusuran yang diukur dalam datum fasilitas

pengeluaran (puncak pelimpah). Q_1 adalah debit yang keluar pada permulaan periode penelusuran.

Untuk menghitung besarnya $Q_{outflow}$ embung dihitung dengan persamaan :

$$Q_{outflow} = \frac{2}{3} * Cd * B * \sqrt{\frac{2}{3} g * H^{\frac{3}{2}}} \dots\dots\dots (2.33c)$$

Di mana : Cd = koefisien debit digunakan 2,1

B = lebar pelimpah

H = elevasi air yang melimpah melalui pelimpah/ *spillway*
(*trial error*)

g = percepatan gravitasi 9,81 m/det²

Dalam penelusuran banjir pada embung, langkah-langkah yang perlu dilakukan adalah :

1. Menentukan *hidrograf inflow* sesuai skala perencanaan
2. menyiapkan data hubungan volume embung dengan elevasi embung (lengkung kapasitas).
3. Merencanakan atau menghitung debit limpasan *spillway* embung pada setiap ketinggian air diatas *spillway* dan dibuat dalam grafik.
4. Ditentukan kondisi awal embung (muka air embung) pada saat *routing*. Hal ini diperhitungkan terhadap kondisi yang paling berbahaya dalam rangka pengendalian banjir.
5. Menentukan periode waktu peninjauan t_1, t_2, \dots dst, periode waktu (t_2-t_1) semakin kecil bertambah baik
6. Selanjutnya perhitungan penelusuran banjir dilakukan dengan menggunakan tabel dengan metode langkah demi langkah (*step by step method*) sebagai berikut :

Tabel II-13. Contoh Bentuk Perhitungan Penelusuran Banjir (*flood Routing*)

Jam Ke-	Δt (detik)	I Inflow (m ³ /dt)	I _r rata-rata (m ³ /dt)	Vol I _r *t (m ³)	asumsi elev.	O outflow (m ³ /dt)	O _r rata-rata (m ³ /dt)	Vol O _r *t (m ³)	Storage Normal	S Storage banjir (m ³)	kumulatif Storage X 103	Elev. MA (m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0		3,942			50	0					12310668,23	50
	3600		102,257	3,681E+05			7,704	2,77E+04	1,231E+07	3,404E+05		
1		200,572			50,19	15,407394					12651058,88	50,19
dst												

Keterangan :

Kolom 1 = jam

Kolom 2 = Δt

Kolom 3 = Q_{inflow}

Kolom 4 = Q_{inflow} rata-rata

Kolom 5 = Kolom 4 * Kolom 2

Kolom 6 = Asumsi elevasi

Kolom 7 = $Q_{outflow}$

Kolom 8 = $Q_{outflow}$ rata-rata

Kolom 9 = Kolom 8 * Kolom 2

Kolom 10 = *Storage* normal

Kolom 11 = *Storage* banjir (kolom 5 – kolom 9)

Kolom 12 = *Storage* komulatif

Kolom 13 = Elevasi muka air berdasarkan *storage* komulatif

2.4. Simulasi Pemanfaatan Air

2.4.1. Perhitungan Simulasi Air Embung

Simulasi Pemanfaatan air dilakukan untuk mengecek apakah air yang tersedia dalam embung cukup memadai untuk memenuhi kebutuhan air seperti suplesi irigasi, kebutuhan air baku, kebutuhan air konservasi maupun untuk pemanfaatan PLTA atau tidak dapat memenuhi kebutuhannya.

Simulasi Pemanfaatan air embung merupakan fungsi dari inflow, outflow dan volume tampungan, dengan persamaan sebagai berikut :

$$I-O = ds/dt \dots\dots\dots (2.34a)$$

$$V_t = V_{t-1} + I_t - O_t \dots\dots\dots (2.34b)$$

I = Inflow = Inflow setiap satuan waktu (m^3)

O = Outflow = Outflow setiap satuan waktu (m^3)

ds/dt = perubahan tampungan setiap satuan waktu (m^3)

V_t = tampungan embung pada periode t

V_{t-1} = tampungan embung pada periode $t-1$

I_t = Inflow embung pada periode t

O_t = outflow pada periode t

2.4.2. Perhitungan Debit Andalan

Debit andalan adalah rangkaian debit bulanan yang diperoleh melalui perhitungan dengan metode tertentu untuk beberapa tahun pengamatan dan mempertimbangkan keadaan alam alur sungai. Maksud dari perhitungan debit ini adalah menentukan jumlah air yang dapat disediakan untuk memenuhi kebutuhan operasional PLTA.

Untuk menghitung debit andalan digunakan metode *Water Balance FJ. Mock* yang dikembangkan khusus untuk sungai-sungai di Indonesia. Data-data yang diperlukan antara lain :

- Data curah hujan bulanan (R) dan hari hujan (n) pada bulan tersebut.
- Data iklim daerah rencana.
- *Catchment Area* (Daerah Tangkapan Air)

- Data tanah.

Prinsip perhitungan ini adalah bahwa hujan yang jatuh di atas tanah (*presipitasi*) sebagian akan hilang karena penguapan (*evaporasi*), sebagian akan hilang menjadi aliran permukaan (*direct run off*) dan sebagian akan masuk tanah (*infiltrasi*). Infiltrasi mula-mula menjenuhkan permukaan (*top soil*) yang kemudian menjadi perkolasi dan akhirnya keluar ke sungai sebagai *base flow*.

Tahap-tahap perhitungan debit andalan antara lain :

a. Data Curah Hujan

R_s = curah hujan bulanan (mm)

n = jumlah hari hujan.

Data Curah Hujan yang diperlukan adalah data hujan bulanan yang terlampaui 80 % berdasarkan data curah hujan yang ada. Data curah hujan bulanan yang ada sepanjang pengamatan diurutkan dari yang kecil ke besar berdasarkan jumlah curah hujan pertahunnya. Persamaan yang digunakan untuk mengetahui curah hujan efektif (R_{80}) adalah dengan menghitung urutan $m = n/5 + 1$ (2.35)

Di mana :

m = Data urutan ke m yang akan dipakai sebagai R_{80}

n = Jumlah tahun pengamatan (tahun)

Jadi curah hujan efektif dan data hujan yang digunakan adalah tahun pada urutan ke- m dari data curah hujan dan hari hujan stasiun pengamatan.

b. Evapotranspirasi terbatas, yaitu penguapan aktual dengan mempertimbangkan kondisi tanah, frekuensi curah hujan, dan prosentase vegetasi pada daerah setempat.

$$E = E_p \cdot \frac{d}{30} \cdot m \dots\dots\dots (2.36a)$$

Di mana:

E = Perbedaan antara evapotranspirasi potensial dengan evapotranspirasi terbatas.

E_p = Evapotranspirasi potensial.

d = Jumlah hari kering dalam satu bulan.

m = Prosentase lahan yang tidak tertutup vegetasi (tanaman)

m = 0% untuk lahan dengan hutan lebat.

m = 0% pada akhir musim hujan, dan bertambah 10% setiap bulan kering untuk lahan dengan hutan sekunder.

m = 10-40% untuk lahan yang tererosi.

m = 30-50% untuk lahan pertanian yang diolah.

Berdasarkan frekuensi curah hujan di Indonesia, sifat infiltrasi, dan penguapan dari tanah permukaan, diperoleh hubungan persamaan berikut:

$$d = \frac{3}{2} \cdot (18 - n) \dots\dots\dots (2.36b)$$

Sehingga dari dua persamaan diatas didapat :

$$\frac{E}{E_p} = \left(\frac{m}{20} \right) \cdot (18 - n) \dots\dots\dots (2.36c)$$

$$E_t = E_p - E \dots\dots\dots (2.36d)$$

Di mana :

n = Jumlah hari hujan.

E_t = Evapotranspirasi terbatas.

Evapotranspirasi

Besarnya evapotranspirasi dihitung dengan menggunakan metoda Penman yang dimodifikasi oleh *Nedeco/Prosida* seperti diuraikan dalam PSA – 010. Evapotranspirasi dihitung dengan menggunakan rumus-rumus teoritis empiris dengan memperhatikan faktor-faktor meteorologi yang terkait seperti suhu udara, kelembaban, kecepatan angin dan penyinaran matahari.

Evapotranspirasi tanaman yang dijadikan acuan adalah rerumputan pendek ($a_b = 0,25$). Selanjutnya untuk mendapatkan harga evapotranspirasi harus dikalikan dengan koefisien tanaman tertentu.

Sehingga evapotranspirasi sama dengan evapotranspirasi potensial hasil perhitungan *Penman x crop factor*. Dari harga evapotranspirasi yang diperoleh, kemudian digunakan untuk menghitung kebutuhan air bagi pertumbuhan dengan menyertakan data curah hujan efektif.

Rumus evapotranspirasi *Penman* yang telah dimodifikasi adalah sebagai berikut :

$$\text{Rumus : } E_{to} = \frac{1}{L^{-1}x\delta + \Delta(H_{sh}^{ne} - H_{lo}^{ne})} + \frac{\delta E_q}{\delta + A} \dots\dots\dots (2.36e)$$

di mana :

E_{to} = Indek evaporasi yang besarnya sama dengan evapotranspirasi dari rumput yang dipotong pendek (mm/hr)

$$\begin{aligned} H_{sh}^{ne} &= \text{Jaringa radiasi gelombang pendek (longley/day)} \\ &= \{ 1,75 \{ 0,29 \cos \Omega + 0,52 r \times 10^{-2} \} \} \times \alpha \text{ ahsh} \times 10^{-2} \\ &= \{ \text{aah} \times f(r) \} \times \alpha \text{ ahsh} \times 10^{-2} \\ &= \text{aah} \times f(r) \text{ (Tabel Penman 5)} \end{aligned}$$

α = albedo (koefisien reaksi), tergantung pada lapisan permukaan yang ada untuk rumput = 0,25

$$\begin{aligned} R_a &= \alpha \text{ ah} \times 10^{-2} \\ &= \text{Radiasi gelombang pendek maksimum secara teori (Longley/day)} \\ &= \text{jaringan radiasi gelombang panjang (Longley/day)} \\ &= 0,97 \alpha \text{ Tai}^4 \times (0,47 - 0,770 \sqrt{ed} x \{ 1 - 8/10(1 - r) \}) \end{aligned}$$

$$H_{sh}^{ne} = f(\text{Tai}) \times f(\text{Tdp}) \times f(m)$$

$$f(\text{Tai}) = \alpha \text{ Tai}^4 \text{ (Tabel Penman 1)}$$

= efek dari temperature radiasi gelombang panjang

$$m = 8(1 - r)$$

$$f(m) = 1 - m/10$$

= efek dari angka nyata dan jam penyinaran matahari terang maksimum pada radiasi gelombang panjang

r = lama penyinaran matahari relatif

E_q = evaporasi terhitung pada saat temperatur permukaan sama dengan temperatur udara (mm/hr)

$$= 0,35 (0,50 + 0,54 \mu_2) \times (e_a - e_d)$$

$$= f(\mu_2) \times PZ_{wa} \text{ sa} - PZ_{wa}$$

μ_2 = kecepatan angin pada ketinggian 2m diatas tanah (Tabel Penman 3)

$Pz_{wa} = e_a$ = tekanan uap jenuh (mmHg) (Tabel Penman 3)

$$= e_d = \text{tekanan uap yang terjadi (mmHg) (Tabel Penman 3)}$$

L = panas laten dari penguapan (longley/minutes)

Δ = kemiringan tekanan uap air jenuh yang berlawanan dengan dengan kurva temperatur pada temperatur udara (mmHg/0C)

δ = konstata Bowen (0,49 mmHg/0C), kemudian dihitung Eto.

catatan : 1 longley/day = 1 kal/cm²hari

Untuk perhitungan evapotranspirasi selain diperlukan data klimatologi daerah proyek, juga diperlukan tabel–tabel koefisien sebagai berikut :

Tabel II- 14a. Koefisien suhu (tabel 1a – b)

((f(T,ai),10⁻²)

Suhu Udara (celcius)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
20	8,370	8,380	8,400	8,410	8,420	8,430	8,440	8,460	8,470	8,480
21	8,430	8,500	8,510	8,520	8,530	8,540	8,550	8,700	8,570	8,590
22	8,600	8,610	8,620	8,630	8,640	8,650	8,670	8,680	8,690	8,710
23	8,720	8,730	8,740	8,760	8,770	8,780	8,790	8,810	8,820	8,930
24	8,840	8,850	8,860	8,880	8,890	8,900	8,910	8,930	8,940	8,950
25	8,960	8,970	8,980	9,000	9,010	9,020	9,030	9,050	9,060	9,070
26	9,080	9,090	9,100	9,120	9,130	9,140	9,150	9,170	9,180	9,190
27	9,200	9,210	9,220	9,240	9,250	9,260	9,270	9,270	9,300	9,310
28	9,320	9,330	9,350	9,366	9,370	9,390	9,400	9,410	9,430	9,440
29	9,450	9,460	9,470	9,490	9,500	9,510	9,520	9,540	9,550	9,560
30	9,570	9,580	9,600	9,610	9,620	9,640	9,650	9,660	9,680	9,690

Tabel II- 14b. Koefisien suhu (tabel 1a – b)

 $(d,^{-1},10^{\wedge}2)$

Suhu Udara (celcius)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
20	1,840	1,860	1,870	1,880	8,420	1,910	1,910	1,920	1,930	1,940
21	1,960	1,970	1,980	1,990	8,530	2,020	2,020	2,040	2,050	2,060
22	2,070	2,080	2,090	2,100	8,640	2,120	2,140	2,150	2,160	2,170
23	2,180	2,190	2,210	2,220	8,770	2,240	2,260	2,270	2,280	2,290
24	2,300	2,320	2,330	2,340	8,890	2,370	2,380	2,400	2,410	2,420
25	2,430	2,450	2,460	2,470	9,010	2,500	2,510	2,520	2,540	2,550
26	2,560	2,570	2,590	2,600	9,130	2,630	2,640	2,660	2,670	2,690
27	2,700	2,710	2,730	2,740	9,250	2,780	2,890	2,810	2,820	2,840
28	2,860	2,870	2,880	2,900	9,370	2,920	2,940	2,950	2,960	2,980
29	2,990	3,010	3,020	3,040	9,500	3,070	3,080	3,100	3,110	3,130
30	3,140	3,160	3,180	3,190	9,620	2,230	3,240	3,260	3,280	3,290

Tabel II- 14c. Tekanan udara (tabel 1a – b)

 $((P_{wa,z})_a)$

Suhu Udara (celcius)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
20	17,53	17,64	17,75	17,86	17,97	18,08	18,20	18,31	18,43	18,54
21	18,65	18,77	18,86	19,00	19,11	19,23	19,35	19,46	19,58	19,70
22	19,82	19,94	20,06	20,19	20,31	20,43	20,56	20,69	20,89	20,93
23	21,09	21,19	21,32	21,45	21,58	21,71	21,84	21,97	22,10	22,23
24	22,37	22,50	22,63	22,76	22,91	23,05	23,19	23,31	23,45	23,60
25	23,75	23,90	24,03	24,20	24,35	24,49	24,64	24,79	24,94	25,08
26	25,31	25,45	25,60	25,74	25,89	26,03	26,10	26,32	26,46	26,60
27	26,74	26,90	27,00	27,21	27,37	27,53	27,69	27,85	28,10	28,16
28	28,32	28,49	28,66	28,83	29,00	29,17	29,34	29,51	29,68	29,85
29	30,03	30,20	30,38	30,56	30,74	30,92	31,30	31,28	31,46	31,64
30	31,82	32,00	32,19	32,38	32,57	32,76	32,95	33,14	33,33	33,52

Tabel II- 14d. Koefisien tekanan udara (tabel 1a – b) (g+d)

Suhu Udara (celcius)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
20	1,58	1,58	1,59	1,60	1,60	1,61	1,61	1,62	1,63	1,63
21	2,64	1,65	1,66	1,66	1,66	1,67	1,68	1,68	1,69	1,70
22	1,70	1,71	1,72	1,72	1,73	1,74	1,75	1,75	1,75	1,76
23	1,77	1,78	1,78	1,79	1,83	1,80	1,81	1,82	1,82	1,83
24	1,83	1,84	1,85	1,86	1,87	1,87	1,88	1,89	1,89	1,90
25	1,91	1,92	1,92	1,93	1,94	1,95	1,95	1,96	1,97	1,98
26	1,98	1,99	2,00	2,01	2,01	2,02	2,03	2,04	2,04	2,05
27	2,06	2,07	2,08	2,08	2,09	2,09	2,10	2,11	2,12	2,13
28	2,14	2,15	2,16	2,17	2,18	2,18	2,19	2,20	2,21	2,22
29	2,23	2,24	2,25	2,25	2,26	2,27	2,28	2,29	2,30	2,31
30	2,32	2,33	2,34	2,35	2,36	2,37	2,38	2,38	2,39	2,40

Tabel II- 14e. Koefisien tekanan udara dan angin (tabel Penman 2) (f(T,dp))

Harga Pz,wa	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
12	0,195	0,195	0,195	0,195	0,195	0,195	0,195	0,195	0,194	0,194
13	0,193	0,192	0,191	0,190	0,189	0,187	0,186	0,185	0,184	0,183
14	0,182	0,181	0,180	0,179	0,177	0,176	0,175	0,175	0,174	0,173
15	1,172	0,171	0,170	0,169	0,168	0,197	0,166	0,165	0,164	0,163
16	0,162	0,161	0,160	0,159	0,158	0,157	0,156	0,560	0,155	0,145
17	0,153	0,152	0,151	0,150	0,149	0,148	0,147	0,146	0,146	0,135
18	0,144	0,143	0,142	0,141	0,140	0,139	0,138	0,137	0,136	0,126
19	0,134	0,133	0,132	0,131	0,131	0,130	0,129	0,128	0,127	0,117
20	0,126	0,125	0,124	0,123	0,122	0,122	0,121	0,120	0,119	0,110
21	0,117	0,116	0,115	0,114	0,114	0,113	0,112	0,111	0,110	0,102
22	0,109	0,108	0,107	0,107	0,106	0,105	0,104	0,104	0,103	0,094
23	0,102	0,101	0,100	0,099	0,099	0,097	0,096	0,096	0,095	0,087
24	0,093	0,092	0,091	0,091	0,091	0,090	0,089	0,089	0,088	0,086
25	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086

Tabel II- 14f. Koefisien angin (tabel Penman 3)

(g,f(u2))

Kec, Pd V2 M/dt	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,086	0,095	0,104	0,123	0,132	0,142	0,151	0,151	10,160	0,169
1	0,178	0,187	0,197	0,206	0,215	0,225	0,234	0,244	0,258	0,262
2	0,271	0,280	0,290	0,299	0,308	0,318	0,327	0,337	0,346	0,355
3	0,364	0,373	0,382	0,392	0,401	0,410	0,420	0,429	0,438	0,447
4	0,456	0,465	0,475	0,484	0,493	0,503	0,512	0,522	0,531	0,540
5	0,549	0,558	0,570	0,548	0,586	0,599	0,605	0,614	0,624	0,633
6	0,642	0,651	0,550	0,670	0,678	0,688	0,698	0,707	0,716	0,725
7	0,734	0,743	0,752	0,762	0,771	10,780	0,790	0,799	0,808	0,817
8	0,826	0,835	0,845	0,854	0,863	0,873	0,882	0,891	0,901	0,910
9	0,919	0,928	0,938	0,947	0,956	0,966	0,975	0,984	0,994	1,003
10	1,012	0,021	1,031	1,040	1,049	1,059	1,068	1,077	1,087	1,096

Tabel II- 14g. Tekanan udara (tabel Penman 4)

(OA,Hsh,10⁻²)

Lintang Selatan	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agt	Sep	Okt	Nov	Des
0	8,590	8,870	8,930	8,670	8,230	7,950	8,030	8,410	8,770	8,830	8,620	8,460
1	8,660	8,920	8,930	8,620	8,150	7,850	7,940	8,340	8,740	8,850		8,550
2	8,740	8,960	8,920	8,570	8,060	7,750	7,850	8,270	8,710	8,880	8,750	8,630
3	8,820	9,000	8,920	8,520	7,980	7,650	7,750	8,210	8,680	8,810	8,810	8,720
4	8,890	9,040	8,910	8,470	7,890	7,550	7,660	8,140	8,670	8,930	8,880	8,800
5	8,970	9,080	8,910	8,420	7,810	7,450	7,560	8,080	8,640	8,950	8,940	8,890
6	9,040	9,120	8,910	8,370	7,720	7,350	7,470	8,010	8,620	8,970	9,010	8,970
7	9,120	9,160	8,900	8,320	7,640	7,250	7,370	7,950	8,590	8,880	9,080	9,060
8	9,190	9,200	8,900	8,270	7,550	7,150	7,280	7,880	8,570	9,010	9,140	9,140
9	9,270	9,240	8,900	8,220	7,470	7,050	7,180	7,810	8,540	9,030	9,210	9,230
10	9,350	9,280	8,890	8,170	7,380	6,950	7,090	7,740	8,510	9,060	9,270	9,320

Tabel II- 14h. Koefisien radiasi matahari (tabel Penman 5) (a,sh,f®)

Lintang Selatan	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0,218	0,257	0,296	0,335	0,374	0,413	0,452	0,491	0,530	0,569	0,603
6	0,216	0,255	0,294	0,333	0,372	0,411	0,450	0,489	0,280	0,567	0,606
10	0,214	0,253	0,292	0,331	0,370	0,409	0,449	0,487	0,526	0,565	0,604
20	0,204	0,243	0,282	0,321	0,360	0,399	0,438	0,477	0,526	0,555	0,591
30	0,188	0,227	0,266	0,305	0,344	0,383	0,422	0,461	0,500	0,539	0,573
40	0,167	0,206	0,245	0,284	0,323	0,362	0,401	0,440	0,479	0,518	0,557
50	0,140	0,179	0,218	0,257	0,296	0,335	0,374	0,413	0,452	0,491	0,530
60	0,120	0,159	0,198	0,237	0,276	0,315	0,354	0,393	0,432	0,471	0,510
70	0,074	0,113	0,152	0,191	0,230	0,269	0,308	0,347	0,386	0,425	0,461
80	0,019	0,058	0,097	0,136	0,175	0,214	0,253	0,292	0,331	0,370	0,409
90	0,000	0,039	0,078	0,117	0,156	0,195	0,234	0,273	0,312	0,351	0,390

c. Keseimbangan air di permukaan tanah (*water balance*)

Hal-hal yang berkaitan dengan keseimbangan air di permukaan tanah, antara lain:

- Curah hujan yang mencapai permukaan tanah (*Storage*)

$$S = R - Et \dots\dots\dots (2.37a)$$

Jika harga S (+) bila $R > Et$, air masuk ke dalam tanah,

Jika harga S (-) bila $R < Et$, sebagian air tanah akan keluar, terjadi defisit

- *Soil Storage* yaitu perubahan kandungan air tanah
- *Soil Moisture* yaitu kelembaban permukaan tanah yang ditaksir berdasarkan kondisi porositas lapisan tanah atas *catchment area*.
- *Water Surplus* ialah banyaknya air yang berada di permukaan tanah

$$Water\ Surplus = (R - Et) - Soil\ Storage \dots\dots\dots (2.37b)$$

Perubahan kandungan air tanah, *soil storage* (ds) = selisih antara *soil moisture capacity* bulan sekarang dengan bulan sebelumnya. *Soil moisture capacity* ini ditaksir berdsarkan kondisi porositas lapisan tanah atas *catchment area*. Biasanya ditaksir 60 s/d 250 mm, yaitu kapasitas kandungan air dalam tanah per m². Jika porositas tanah lapisan atas tersebut makin besar, maka *soil moisture capacity* akan makin besar pula

d. Debit dan *Storage* air tanah

Hal-hal yang mempengaruhi debit dan *storage* air tanah yaitu :

- Koefisien *infiltrasi* (I_c) ditentukan berdasarkan kondisi porositas tanah dan kemiringan alur sungai. Pada lahan yang datar I_c besar, dan pada lahan yang terjal air bergerak dengan kecepatan tinggi sehingga I_c kecil.
- *Storage* air tanah ditentukan dengan persamaan berikut:

$$V_n = k.V_{(n-1)} + (0,5.I(1 + k)) \dots\dots\dots (2.38a)$$

Di mana :

V_n = Volume air tanah bulan ke- n

k = q_t/q_0 = Faktor *resesi* aliran di tanah

q_t = Aliran air tanah pada bulan t

q_0 = Aliran air tanah pada bulan awal ($t = 0$)

I = *Infiltrasi*

V_{n-1} = Volume air tanah bulan ke ($n-1$)

Harga k yang tinggi akan memberikan *resesi* yang lambat seperti pada kondisi geologi lapisan bawah yang sangat lulus air. Koefisien *infiltrasi* ditaksir berdasarkan kondisi porositas tanah dan kemiringan daerah pengaliran.

Lahan yang *porous* mempunyai *infiltrasi* lebih tinggi dibanding tanah lempung berat. Lahan yang terjal menyebabkan air tidak sempat berinfiltrasi ke dalam tanah sehingga koefisien infiltrasi akan kecil.

- Aliran Sungai

Aliran dasar = infiltrasi – perubahan volume air dalam tanah

$B(n)$ = $I - dV(n)$

Aliran permukaan = volume air lebih – infiltrasi

$D(ro)$ = $WS - I$

Aliran sungai = aliran permukaan + aliran dasar

Run off = $D(ro) + B(n)$

$$\text{Debit} = \frac{\text{aliransungai} \times \text{luas DAS}}{\text{satubulan}(\text{detik})} \dots\dots\dots (2.38b)$$

2.4.3. Volume Kehilangan Air oleh Penguapan

Untuk mengetahui besarnya volume penguapan yang terjadi pada muka embung dihitung dengan rumus :

$$V_e = E_a * S * A_g * d \dots\dots\dots (2.39a)$$

Di mana :

- V_e = Volume air yang menguap tiap bulan (m^3)
 E_a = Evaporasi hasil perhitungan (mm/hari)
 S = Penyinaran matahari hasil pengamatan (%)
 A_g = Luas permukaan kolam embung pada setengah tinggi embung (m^2)
 d = Jumlah hari dalam satu bulan

Untuk memperoleh nilai evaporasi dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$E_a = 0,35 * (e_a - e_d) * (1 - 0,01V) \dots\dots\dots (2.39b)$$

Di mana :

- e_a = Tekanan uap jenuh pada suhu rata-rata harian (mm/hg)
 e_d = Tekanan uap sebenarnya (mm/hg)
 V = Kecepatan angin pada ketinggian 2 m di atas permukaan tanah

2.4.4. Volume Kehilangan Air oleh Rembesan

Besarnya volume kehilangan air akibat resapan melalui dasar, dinding, dan tubuh embung tergantung dari sifat lulus air material dasar dan dinding kolam. Sedangkan sifat ini tergantung pada jenis butiran tanah atau struktur batu pembentuk dasar dinding kolam. Perhitungan resapan air ini menggunakan rumus praktis untuk menentukan besarnya volume resapan air kolam embung, sebagai berikut :

$$V_i = K * V_u \dots\dots\dots (2.40)$$

Di mana :

- V_i = Jumlah resapan Tahunan (m^3)
 V_u = Volume tampungan pada embung (m^3)

K = Faktor yang nilainya tergantung dari sifat lulus air material dan dinding kolam embung.

K=10%, bila dasar dan dinding kolam embung praktis rapat air
($k \leq 10^{-5}$ sm/det)

K=25%, bila dasar dan dinding kolam embung bersifat semi
lulus air ($k = 10^{-3} - 10^{-4}$).

2.4.5. Kebutuhan Air Baku

Kebutuhan air baku di sini dititik beratkan pada penyediaan air baku untuk diolah menjadi air bersih.

2.4.5.1. Standar Kebutuhan Air

Standar kebutuhan air ada 2 (dua) macam yaitu :

a. Standar kebutuhan air domestik

Standar kebutuhan air domestik yaitu kebutuhan air yang digunakan pada tempat-tempat hunian pribadi untuk memenuhi keperluan sehari-hari seperti memasak, minum, mencuci dan keperluan rumah tangga lainnya. Satuan yang dipakai adalah liter/orang/hari.

b. Standar kebutuhan air non domestik

Standar kebutuhan air non domestik adalah kebutuhan air bersih diluar keperluan rumah tangga. Kebutuhan air non domestik antara lain :

1) Penggunaan komersil dan industri

Yaitu penggunaan air oleh badan-badan komersil dan industri.

2) Penggunaan umum

Yaitu penggunaan air untuk bangunan-bangunan pemerintah, rumah sakit,sekolah-sekolah dan tempat-tempat ibadah.

Kebutuhan air non domestik untuk kota dapat dibagi dalam beberapa kategori antara lain :

- Kota kategori I (Metro)
- Kota kategori II (Kota besar)

- Kota kategori III (Kota sedang)
- Kota kategori IV (Kota kecil)
- Kota kategori V (Desa)

Tabel II-15a. Kategori kebutuhan air non domestik

NO	URAIAN	KATEGORI KOTA BERDASARKAN JUMLAH JIWA				
		>1.000.000	500.000 S/D 1.000.000	100.000 S/D 500.000	20.000 S/D 100.000	<20.000
		METRO	BESAR	SEDANG	KECIL	DESA
1	Konsumsi unit sambungan rumah (SR) l/o/h	190	170	130	100	80
2	Konsumsi unit hidran umum (HU) l/o/h	30	30	30	30	30
3	Konsumsi unit non domestik l/o/h (%)	20-30	20-30	20-30	20-30	20-30
4	Kehilangan air (%)	20-30	20-30	20-30	20-30	20-30
5	Faktor hari maksimum	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
6	Faktor jam puncak	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
7	Jumlah jiwa per SR	5	5	5	5	5
8	Jumlah jiwa per HU	100	100	100	100	100
9	Sisa tekan di penyediaan distribusi (mka)	10	10	10	10	10
10	Jam operasi	24	24	24	24	24
11	Volume reservoir (% max day demand)	20	20	20	20	20
12	SR : HR	50:50 s/d 80:20	50:50 s/d 80:20	80:20	70:30	70:30
13	Cakupan pelayanan (%)	*) 90	90	90	90	**) 70

*) 60% perpipaan, 30% non perpipaan

Sumber : Ditjen Cipta Karya; tahun 2000

**) 25% perpipaan, 45% non perpipaan

Kebutuhan air bersih non domestik untuk kategori I sampai dengan V dan beberapa sektor lain adalah sebagai berikut :

Tabel II-15b. Kebutuhan air non domestik kota kategori I, II, III dan IV

NO	SEKTOR	NILAI	SATUAN
1	Sekolah	10	Liter/murid/hari
2	Rumah sakit	200	Liter/bed/hari
3	Puskesmas	2000	Liter/hari
4	Masjid	3000	Liter/hari
5	Kantor	10	Liter/pegawai/hari
6	Pasar	12000	Liter/hektar/hari
7	Hotel	150	Liter/bed/hari
8	Rumah makan	100	Liter/tempat duduk/hari
9	Kompleks militer	60	Liter/orang/hari
10	Kawasan industri	0,2-0,8	Liter/detik/hari
11	Kawasan pariwisata	0,1-0,3	Liter/detik/hari

Sumber : Ditjen Cipta Karya Dep PU

Tabel II-15c. Kebutuhan air bersih kategori V

NO	SEKTOR	NILAI	SATUAN
1	Sekolah	5	Liter/murid/hari
2	Rumah sakit	200	Liter/bed/hari
3	Puskesmas	1200	Liter/hari
4	Hotel/losmen	90	Liter/hari
5	Komersial/industri	10	Liter/hari

Sumber : Ditjen Cipta Karya Dep PU

Tabel II-15d. Kebutuhan air bersih domestik kategori lain

NO	SEKTOR	NILAI	SATUAN
1	Lapangan terbang	10	Liter/det
2	Pelabuhan	50	Liter/det
3	Stasiun KA-Terminal bus	1200	Liter/det
4	Kawasan industri	0,75	Liter/det/ha

Sumber : Ditjen Cipta Karya Dep PU

2.4.5.2. Proyeksi Kebutuhan Air Bersih

Proyeksi kebutuhan air bersih dapat ditentukan dengan memperhatikan pertumbuhan penduduk untuk diproyeksikan terhadap kebutuhan air bersih sampai dengan lima puluh tahun mendatang atau tergantung dari proyeksi yang dikehendaki. Adapun yang berkaitan dengan proyeksi kebutuhan tersebut adalah:

a. Angka Pertumbuhan Penduduk

Angka pertumbuhan penduduk dihitung dengan prosentase memakai rumus:

$$\text{Angka Pertumbuhan (\%)} = \frac{\sum \text{penduduk}_n - \sum \text{penduduk}_{n-1}}{\sum \text{penduduk}_{n-1}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.41)$$

b. Proyeksi Jumlah Penduduk

Dari angka pertumbuhan penduduk di atas dalam prosen digunakan untuk memproyeksikan jumlah penduduk sampai dengan lima puluh tahun mendatang. Meskipun pada kenyataannya tidak selalu tepat, tetapi perkiraan ini dapat dijadikan sebagai dasar perhitungan volume kebutuhan air di masa mendatang. Ada beberapa metode yang digunakan untuk memproyeksikan jumlah penduduk antara lain yaitu:

1) Metode *Geometrical Increase*

$$P_n = P_o + (1 + r)^n \dots\dots\dots (2.42a)$$

dimana :

P_n = Jumlah penduduk pada tahun ke-n (jiwa)

P_o = Jumlah penduduk pada awal tahun (jiwa)

R = Prosentase pertumbuhan geometrical penduduk tiap tahun (%)

n = Periode waktu yang ditinjau (tahun)

2) Metode *Arithmetical Increase*

$$P_n = P_o + n.r \dots\dots\dots (2.42b)$$

$$r = \frac{P_o - P_t}{t} \dots\dots\dots (2.42c)$$

dimana :

P_n = Jumlah penduduk pada tahun ke-n (jiwa)

P_o = Jumlah penduduk pada awal tahun proyeksi (jiwa)

r = Angka pertumbuhan penduduk tiap tahun (%)

n = Periode waktu yang ditinjau (tahun)

t = Banyak tahun sebelum tahun analisis

2.5. PERHITUNGAN TINGGI TERJUN (*HEAD*)

Tinggi terjun yang dimaksud terdiri dari :

- Terjun Bruto = $H_{bruto} = H_{kotor}$

Adalah selisih tinggi muka air di kolam (*reservoir* atas) dengan muka air pembuangan jika turbin tidak berputar.

- Terjun Bersih = H_{netto}

Dibedakan menjadi dua yaitu:

1. Turbin reaksi

Adalah selisih antara tenaga total (tenaga potensial dan tenaga kinetis) yang terkandung dalam air tiap satuan berat sebelum masuk turbin dan setelah keluar turbin.

2. Terjun Impuls = Hnetto

Adalah tinggi tekanan dan tinggi kecepatan pada *link* ujung curat dikurangi tinggi titik terendah pada pusat berat mangkok-mangkok dari turbin yang merupakan titik akhir dan ini lazimnya merupakan pusat ujung curat.

- Terjun Rencana = *Design Head*

Adalah terjun bersih untuk turbin yang telah direncanakan oleh pabrik pada efisiensi yang baik.

- Terjun Terukur = *Rated Head*

Adalah terjun bersih di mana turbin dengan pintu terbuka penuh (*Full Gale Point*) akan memberikan *rated capacity* dari generator dalam Kilowatt atau terjun efektif di mana daya kuda dari turbin dijamin oleh pabrik.

2.6. KEHILANGAN ENERGI/TINGGI TERJUN (*HEAD LOSS*)

Dengan adanya penyaluran dari kolam (*reservoir*) ke saluran pembuangan akan terjadi kehilangan energi yang terdiri dari :

1. Akibat pemasukan dapat dihitung dengan rumus :

$$H_{netto} = H_{bruto} - \Delta H \dots\dots\dots (2.43a)$$

$$\sum H_f = \Delta H + \sum k \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (2.43b)$$

Di mana:

$$\begin{aligned} \Delta H &= Major Loss \\ &= akibat gesekan pada pipa \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum k \cdot V^2 / 2g &= Minor Loss \\ &= akibat belokan-belokan, perubahan penampang pipa, dll \end{aligned}$$

Nilai Hnetto besar bila ΔH sekecil mungkin.

2. Akibat *trash rack* dapat dihitung dengan rumus :

$$H_f = \phi \left(\frac{\delta}{b} \right)^{4/3} \frac{v^2}{2g} \sin \alpha \dots\dots\dots (2.43c)$$

Di mana:

- ϕ = Koefisien penampang kisi
 δ = Tebal kisi (m)
 b = Jarak sisi kisi (m)
 V = Kecepatan air dimuka kisi (m/dt)
 g = Percepatan gravitasi (m/det)
 α = sudut antara kisi dan arah aliran ($^{\circ}$)

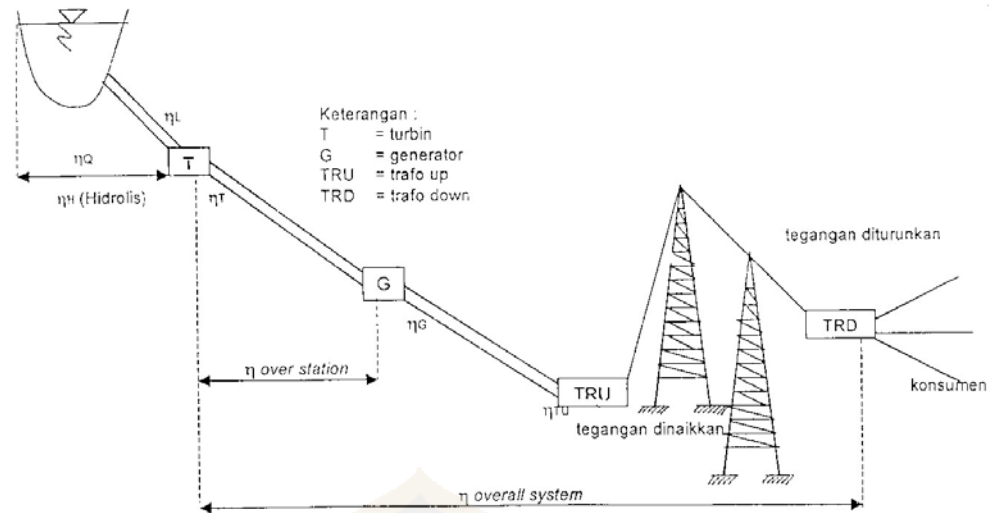
2.7. DAYA YANG DIHASILKAN PLTA

2.7.1. Analisis Jenis PLTA

Maksud didirikannya PLTA yaitu mengurangi energi yang hilang tanpa menghilangkan aliran air. Pada setiap bagian aliran sungai, gradien hidrolik yang diperlukan untuk mengalirkan air dapat dikurangi dengan memperkecil kecepatannya. Beberapa cara untuk mencapai hal tersebut yaitu :

- Mendirikan bendungan pada alur sungai untuk menambah ketinggian muka air
- Mengalihkan sebagian atau seluruh debit air ke dalam saluran tersendiri dengan kemiringan sekecil mungkin. Dengan demikian terdapat perbedaan tinggi antara muka air di dalam saluran dengan muka air di dalam sungai, dan pada tempat tertentu perbedaan tinggi ini digunakan sebagai sumber penggerak turbin PLTA.

Adapun skema perjalanan air hingga menjadi tenaga listrik secara umum dapat dilihat pada Gambar II-10 berikut:



Gambar II-9 Skema Perjalanan air hingga menjadi tenaga listrik

2.7.2. Klasifikasi PLTA

Menurut O.F. Patty, 1995 pada buku Tenaga Air, PLTA dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

- a. Menurut kapasitas :
 - PLTA mikro dengan daya hingga 99 kW
 - PLTA kapasitas rendah dengan daya 100 hingga 999 kW
 - PLTA kapasitas sedang dengan daya 1000 hingga 9999 kW
 - PLTA kapasitas tinggi dengan daya di atas 10000 kW
- b. Menurut tinggi jatuhnya air (*head*)
 - PLTA dengan tekanan rendah besarnya $H < 15$ m
 - PLTA dengan tekanan sedang besarnya H antara 15 hingga 30 m
 - PLTA dengan tekanan tinggi $H > 50$ m

2.7.3. Macam daya yang dihasilkan

Daya yang dihasilkan oleh PLTA dapat digolongkan sebagai berikut:

- a. Daya maksimum yaitu daya terbesar yang dapat dibangkitkan PLTA. Pada umumnya yang disebut output dari PLTA adalah daya maksimum ini.

- b. Daya pasti (*firm output*) yaitu daya yang dibangkitkan selama 355 hari dalam setahun untuk PLTA aliran langsung dan 365 hari dalam setahun untuk PLTA jenis waduk.
- c. Daya puncak yaitu hasil yang dibangkitkan selama berjam-jam tertentu setiap hari (umumnya lebih dari 4 jam) yang meliputi 355 hari dalam setahun
- d. Daya puncak khusus yaitu daya yang dihasilkan setiap hari tanpa pembatasan jam operasi dalam musim hujan dikurangi dengan daya pasti.
- e. Daya penyediaan (*supply output*) yaitu hasil yang dapat dibangkitkan dalam musim kemarau, dengan menggunakan simpanan air dalam waduk yang dikumpulkan selama musim hujan dikurangi dengan daya pasti.
- f. Daya penyediaan puncak dan daya waduk.

2.7.4. Perhitungan Daya

Jika tinggi jatuh efektif maksimum adalah H (m), debit maksimum turbin adalah Q (m³/det²), efisiensi dari turbin dan generator masing-masing adalah η_t dan η_g maka :

$$\text{Daya teoritis} = 9,8 Q H \text{ (kW)} \dots\dots\dots (2.44a)$$

$$\text{Daya turbin} = 9,8 \eta_t Q H \text{ (kW)} \dots\dots\dots (2.44b)$$

$$\text{Daya generator} = 9,8 \eta_g Q H \text{ (kW)} \dots\dots\dots (2.44c)$$

Daya generator umumnya disebut *output* PLTA.

Sedangkan pada PLTA yang dipompa jika tinggi jatuh bersih dari pompa adalah H (m), debit pompa adalah Q (m³/det), efisiensi dari motor generator dan pompa masing-masing adalah η_m dan η_p , maka daya yang masuk ke dalam pompa (*input*) adalah:

$$P_i = 9,8 Q H / (\eta_m \cdot \eta_p) \dots\dots\dots (2.44d)$$

Pada umumnya, daya yang masuk (*input*) untuk PLTA yang dipompa menjadi maksimum dalam kondisi tinggi jatuh minimum untuk

jenis *francis* dan kondisi tinggi jatuh maksimum untuk pompa *kaplan* atau *propeller*.

Sedangkan daya yang dapat diperhitungkan terhadap *overall efisiensi* (EOV) di mana *overall efisiensi* tersebut dirumuskan sebagai berikut :

$$P \text{ keluar} = 9,8 \cdot Q_r \cdot H_n \cdot \text{EOV} \text{ (kW)} \dots\dots\dots (2.44e)$$

Di mana :

Q_r = Debit rencana (m^3/det)

H_n = Terjun bersih (m)

EOV = *overall efisiensi*

2.7.5. Perhitungan tenaga yang dibangkitkan

Tenaga yang dihasilkan adalah tenaga listrik yang dibangkitkan oleh PLTA. Untuk perencanaan, kemungkinan pembangkitan energi dalam setahun dihitung dan dikalikan dengan faktor kesediaan (*availability factor*) antara 0,95 sampai 0,97 untuk mendapatkan tenaga pembangkitan tahunan (*annual generated energy*). Dari harga ini dapat dihitung biaya pembangunan dan biaya pembangkitan yang digunakan dalam perbandingan ekonomis dari berbagai rencana.

Efisiensi keseluruhan (*overall*) dapat dihitung dengan rumus :

$$\eta_{TG} = \eta_T \cdot \eta_G \dots\dots\dots (2.45)$$

Setelah efisiensi keseluruhan dihitung dan atas dasar lengkung aliran (*flow duration curva*), tenaga listrik yang mungkin dibangkitkan dihitung dari aliran air, tinggi terjun (*head*) dan jumlah jam kerja, sesuai dengan aturan (*operation rute*) dan kebutuhan sistem tenaga listrik.

2.8. PERHITUNGAN PIPA PESAT (*PENSTOCK*)

Pipa tekan dipakai untuk mengalirkan air dari tangki atas (*head tank*) atau langsung dari bangunan pengambilan ke turbin. Saluran pipa tekan adalah nama umum bagi terowongan yang dipakai untuk menempatkan pipa pesat, blok ankur dan pelana. Pipa pesat ditempatkan di atas atau di bawah permukaan tanah sesuai dengan keadaan geografis dan geologi di mana pipa tersebut ditempatkan.

Pipa merupakan penyalur yang berhubungan langsung dengan *runner turbin* sehingga mulai titik tersebut energi bisa direncanakan. Diameter pipa pesat dapat dihitung dengan rumus:

$$D = 0,72 Q^{0.5} \dots\dots\dots (2.46)$$

Di mana : D = Diameter pipa pesat (m)

Q = Debit air (m³/det)

Batas minimum diameter adalah 0,6 m dengan pertimbangan memudahkan untuk pemeliharaan. Bahan struktur dari baja, kayu, beton atau campuran dengan syarat harus memenuhi syarat dapat menyalurkan air, tidak bocor dan harus dapat menahan tekanan. Dalam laporan ini penulis menggunakan pipa pesat dari baja.

➤ Pipa pesat dari baja ada 2 kriteria :

1. Pipa kecil apabila : P*D < 10.000 kg/cm
Maka pipa tidak perlu pakai sabuk / beugel.
2. Apabila P*D > 10.000 kg/cm
Maka pipa memerlukan beugel perkuatan.

P = tekanan air

$$P = \frac{H_{dyn}}{10} \text{ kg / cm}^2 \dots\dots\dots (2.47)$$

di mana :

D = Diameter pipa

H_{dyn} = H dinamis = 1,2 H statis

Untuk di Indonesia umumnya dipakai jenis 1

➤ Keuntungan pipa dari baja:

1. Rapat air dan licin

Untuk pipa yang menggunakan paku keling K_s = 80

Untuk pipa yang menggunakan las K_s = 90

$$Q = V * F \dots\dots\dots (2.48a)$$

$$V = K_s * R^{2/3} * I^{1/2} \dots\dots\dots (2.48b)$$

2. Baja dipandang kuat menahan tekanan air karena tegangan besar.

σ kayu = 60 kg/cm² δ = tebal

σ baja = 1200 kg/cm² δ = tipis

$$\delta_{kayu} > \delta_{baja}$$

Rumus Ketel (untuk desain tebal pipa)

$$\delta = \frac{P * R}{\eta * \sigma_1} + k \dots\dots\dots (2.49)$$

di mana:

η = Koefisien las
 = 0,48 – 0,9

P = Tekanan air (kg/cm²)

σ_1 = Tegangan cincin (kg/cm²)

R = Jari-jari pipa (cm)

k = *Corrosion allowed* = (0,1 – 0,3 cm),

Tegangan ijin plat:

$$\sigma = \frac{P.R}{(\delta - k)\eta} (kg / cm^2) \dots\dots\dots (2.50)$$

1. Tegangan cincin = σ_1

Gaya yang bekerja adalah tegak lurus akibat tekanan air yang mengalami keseimbangan gaya.

$$N = 2 \sigma_1 \delta dz \sin (d\phi/2) \dots\dots\dots (2.51a)$$

$$K = P dn dz \dots\dots\dots (2.51b)$$

Jika N = K maka didapat:

$$\delta = \frac{P.R}{\eta.\sigma_1} \dots\dots\dots (2.51c)$$

di mana: P = Tekanan air (kg/cm²)

η = Koefisien las

σ_1 = Tegangan (kg/cm²)

2. Tegangan lentur = σ_2

Tegangan pipa diantara dua *socket*

Gw = Berat air dalam pipa

Gp = Berat pipa kosong

$$M = \frac{1}{12} ql^2$$

$$W = \frac{1}{4} \pi D^2 \delta$$

$$\delta_2 = \frac{M}{W} = \frac{\frac{1}{12} (Gw + Gp) \cos \beta}{\frac{1}{4} \pi D^2 \delta} * L \quad (\text{kg/cm}^2) \dots\dots\dots (2.52)$$

3. Tegangan akibat berat sendiri = σ_3

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{Gp \sin \beta}{\pi D \delta} (\text{kg / cm}^2) \dots\dots\dots (2.53)$$

Tegangan total

- Tegangan tangensial (σ_t)

$$\sigma_t = (\sigma_1 - \sigma_3) / m (\sigma_2 + \sigma_3 + P) \dots\dots\dots (2.54a)$$

- Tegangan radial (σ_r)

$$\sigma_r = 1/m (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \dots\dots\dots (2.54b)$$

- Tegangan aksial (σ_a)

$$\sigma_a = \sigma_2 + \sigma_3 - 1/m ((\sigma_1 - P)) \dots\dots\dots (2.54c)$$

di mana : $m = \text{Angka poisson} = 10/3$

2.9. INSTALASI PENGATUR AIR

Instalasi ini terdiri dari unit-unit struktur yang berfungsi sebagai pengatur jumlah air yang akan dilalui menuju turbin, sebagai sarana agar air tetap dalam keadaan bersih sebelum masuk ke saluran atau juga untuk mengatur jumlah debit air dibangun bagi guna keperluan irigasi dan penyediaan air bersih. Unit-unit struktur tersebut adalah sebagai berikut :

- ❖ Pintu Pengatur Air

Bangunan ini berada dibangun bagi yang berfungsi mengatur debit air yang diperlukan untuk kebutuhan irigasi/persediaan air baku. Perencanaan bentuk dan dimensi tergantung dari besar tekanan yang bekerja baik *low pressure* maupun *high pressure*. Adapun modelnya bisa berupa pintu sorong, radial dan lain-lain. Sedangkan bahannya bisa terbuat dari kayu, baja dan lainnya, di mana cara pengangkatannya bisa dilakukan secara manual untuk pintu ringan dan alat bantu katrol listrik untuk pintu-pintu ukuran besar dan berat.

❖ Saringan Air (*Trash Rack*)

Saringan air dipasang didepan pintu yang berfungsi untuk menahan sampah-sampah maupun batu-batu yang mungkin terbawa oleh air agar tidak ikut masuk ke dalam saluran (pipa pesat). Bentuk dari profil *trash rack* ini ada kaitannya dengan kehilangan energi. Rumus kehilangan energi akibat *Trash Rack* (lihat persamaan(2.43c)

2.10. SALURAN PEMBUANGAN (TAIL RACE)

Saluran pembuangan ini berfungsi untuk mengalirkan debit air yang keluar dari turbin air untuk kemudian dibuang ke sungai, saluran irigasi atau ke laut. Saluran ini dimensinya harus sama atau lebih besar daripada saluran pemasukan mengingat adanya kemungkinan perubahan mendadak dari debit turbin air. Rumus untuk mendimensi saluran ini sama dengan rumus untuk mendimensi saluran pemasukan yaitu:

$$Q = A * V \dots\dots\dots (2.55a)$$

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \dots\dots\dots (2.55b)$$

$$R = \frac{A}{P} \dots\dots\dots (2.55c)$$

di mana:

Q = Debit yang mengalir (m³/det)

A = Luas Penampang Basah (m²)

V = Kecepatan aliran (m/det)

B = Lebar dasar saluran (m)

h = Tinggi muka air (m)

P = Keliling Basah (m)

R = Jari-jari hidrolis (m)

n = Koefisien manning

I = Kemiringan dasar saluran

2.11. PIPA H1SAP (*DRAFT TUBE*)

Pipa hisap umumnya dibuat ditempat pipa keluar atau dibagian muka saluran pembuangan. Di mana fungsi *draft tube* pada turbin reaksi adalah untuk memanfaatkan tinggi terjun antara rotor dan muka air bawah secara efisien, dan juga untuk mendapatkan kembali dan memanfaatkan energi kinetik air yang keluar.

Perhitungan hisapan pada *draft tube* :

$$A = (D_r^2 - D_t^2) \pi / 4 \dots\dots\dots (2.56a)$$

Di mana :

D_r = Diameter *runner*

D_t = Diameter poros turbin (35 %)

Sedangkan kecepatan air yang keluar dari turbin :

$$V_r = \frac{Q}{A} \dots\dots\dots (2.56b)$$

Di mana:

Q = Debit air yang keluar

A = Luas penampang

Tinggi kecepatan pada *runner* :

$$H_v = V^2 / 2g \dots\dots\dots (2.56c)$$

Tinggi statis *runner* :

$$H_\delta = \frac{TWL - (\Phi_{turbin} + D_r)}{2} = \frac{TWL - (\Phi_{turbin} + H_q)}{2} \dots\dots\dots (2.56d)$$

Di mana = H_q = Tinggi barometer site (m)

sedangkan rata-rata kecepatan air dalam *draft tube* :

$$V_a = (V_v + V) / 2 \dots\dots\dots (2.56e)$$

Di mana : V_a = Kecepatan rata-rata (m/det)

V_v = Kecepatan air yang keluar dari *runner* (m/det)

V = Kecepatan air yang keluar dari *draft tube* (m/det)