

**STUDI SIMULASI DEBIT DENGAN MENGGUNAKAN MODEL  
TANGKI UNTUK POLA PENGOPERASIAN PLTA SIBUNDONG DI  
TAPANULI UTARA**

**SKRIPSI**

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
Memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**YOSSA PRATAMA ROSELLA PUTRA  
NIM. 115060400111036**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2017**

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas berkat rahmat serta kasih-Nya saya Yossa Pratama Rosella Putra dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “Studi Simulasi Debit dengan Menggunakan Model *Tank* Untuk Pola Pengoperasian PLTA Sibundong di Tapanuli Utara”.

Tujuan penulisan skripsi ini untuk memenuhi syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) bagi mahasiswa program S-1 di Jurusan Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Saya menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu saya mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini.

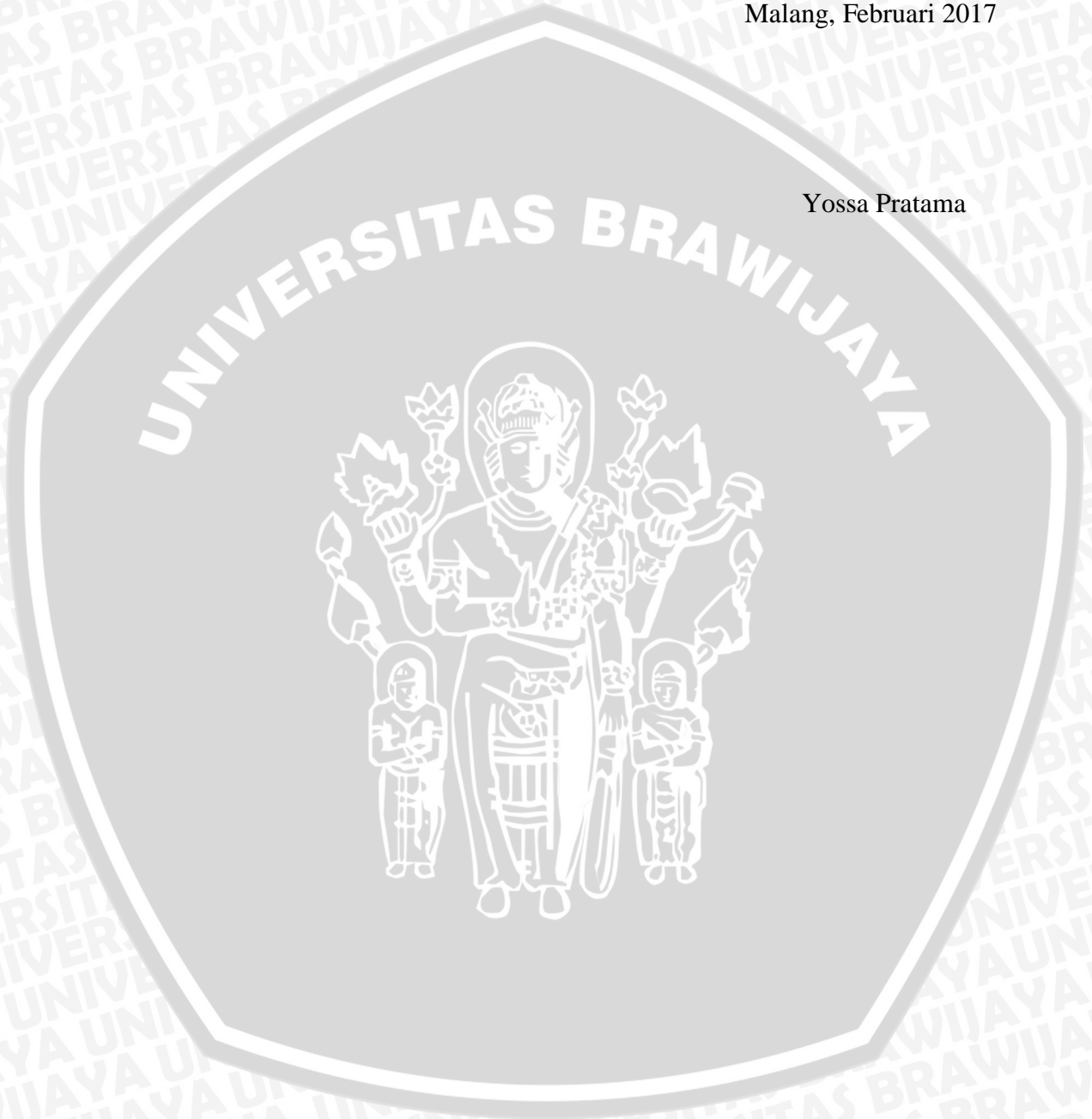
Terselesaikannya skripsi ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, sehingga pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat saya menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Ir. Suwanto Marsudi, MS sebagai pembimbing I, yang telah bersedia meluangkan waktu dan membimbing saya sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini
2. Bapak Dr. Eng. Riyanto Haribowo, ST., MT sebagai pembimbing II, yang telah memberi motivasi, dukungan dan membimbing saya dalam proses penyusunan skripsi.
3. Bapak Ir. Moh.Sholichin MT.,Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Pengairan sekaligus pembimbing akademik saya selama kuliah di jurusan Teknik Pengairan Malang.
4. Ibu Emma Yuliani ST., MT.,Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Teknik Pengairan
5. Bapak Dr. Eng. Donny Harisuseno, ST., MT selaku KKDK Pemanfaatan dan Pendayagunaan SDA atas arahan yang diberikan dalam penyusunan skripsi ini.
6. Teman-teman Teknik Pengairan 2011 atas dorongan, motivasi dan kebersamaan selama ini dalam menggapai cita menjadi seorang *Engineer*.
7. Dan terakhir untuk Bapak, Ibu dan Adik tercinta atas doa, motivasi, perhatian yang diberikan sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan khususnya di bidang Pemanfaatan dan Pendayagunaan SDA.

Malang, Februari 2017

Yossa Pratama



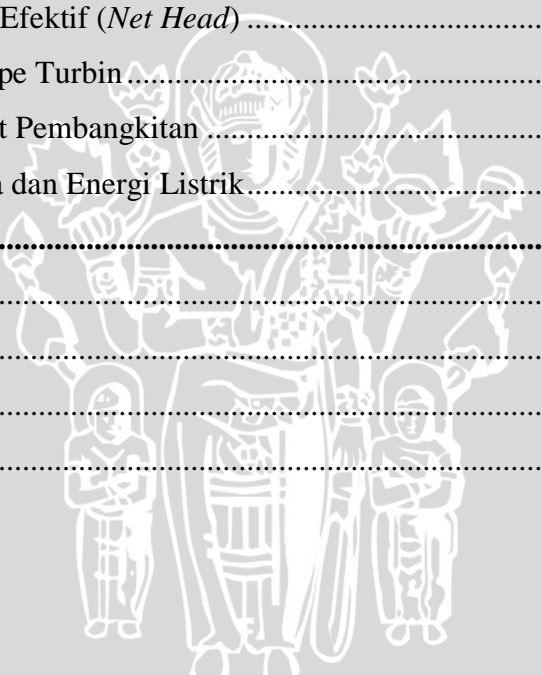
## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	vi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Deskripsi Daerah Studi .....	2
1.2.1 Lokasi Studi .....	2
1.2.2 Letak Geografis.....	3
1.2.3 Lokasi Stasiun Hujan .....	4
1.2.4 Lokasi AWLR ( <i>Automatic Water Level Recorder</i> ) .....	5
1.3 Kondisi Fisik.....	6
1.3.1 Topografi .....	6
1.3.2 Hidrologi dan Klimatologi.....	7
1.3.3 Penggunaan Lahan .....	7
1.4 Identifikasi Masalah.....	8
1.5 Rumusan Masalah.....	8
1.6 Batasan Masalah .....	9
1.7 Tujuan .....	9
1.8 Manfaat .....	9
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	11
2.1 Hidrologi.....	11
2.1.1 Siklus Hidrologi .....	11
2.1.2 Daerah Aliran Sungai.....	11
2.2 Curah Hujan Rerata Daerah .....	13
2.2.1 Metode Rata-rata Aljabar ( <i>Arithmetic Mean Meethod</i> ).....	13
2.3 Estimasi Data Hujan yang Hilang.....	13
2.3.1 Normal Ratio Method .....	14
2.4 Pengujian Data Curah Hujan .....	14
2.3.1 Uji Konsistensi.....	14
2.5 Evaporasi dan Evapotranspirasi.....	16

2.5.1	Definisi.....	16
2.5.2	Perhitungan Besarnya Evapotranspirasi .....	17
2.6	Simulasi Debit Metode Model <i>Tank</i> .....	20
2.6.1	Dasar-dasar Teori Model Tangki.....	23
2.6.2	Konsep Model Tangki Sugawara.....	26
2.6.3	Keuntungan dan Kerugian Penerapan Model Tangki.....	28
2.7	Metode Perbandingan Luas .....	28
2.8	Korelasi Debit.....	29
2.8.1	Koefisien <i>Nash-Sutcliffe</i> .....	29
2.9	Metode Kalibrasi.....	30
2.10	Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).....	31
2.10.1	Potensi Tenaga Air di Indonesia .....	31
2.10.2	Definisi PLTA.....	31
2.10.3	Klasifikasi PLTA .....	31
2.11	Menentukan Aliran Tersedia .....	35
2.11.1	Kurva Durasi Aliran.....	35
2.12	Turbin .....	37
2.12.1	Pemilihan Turbin Berdasarkan Tinggi Tekan.....	38
2.12.2	Kriteria Pemilihan Jenis Turbin.....	38
2.12.3	Turbin Berdasarkan Model Aliran Air Masuk <i>Runner</i> .....	39
2.12.4	Macam-macam Turbin.....	41
2.13	Analisa Perhitungan Tinggi Jatuh Efektif.....	44
2.14	Perhitungan Daya dan Energi Listrik.....	45
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>		<b>47</b>
3.1	Data Studi .....	47
3.1.1	Data Curah Hujan dan Data Debit.....	47
3.1.2	Data Klimatologi.....	47
3.2.	Analisa Data Hujan.....	47
3.2.1	Menambah Data Hujan yang Hilang .....	47
3.2.2	Uji Konsistensi.....	47
3.2.3	Curah Hujan Rerata Daerah .....	48
3.3	Perhitungan Evapotranspirasi .....	48
3.4	Simulasi Debit Menggunakan Metode Model Tangki.....	48
3.5	Perhitungan debit dengan <i>Flow Duration Curve</i> .....	50



3.6	Analisa Daya.....	50
3.7	Data Teknis.....	50
<b>BAB IV ANALISA PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>55</b>
4.1	Menambah Data Hujan yang Hilang .....	55
4.1.1	Data Hujan yang Hilang di Stasiun Balige tahun 2012, 2013 .....	55
4.2	Uji Konsistensi Data Curah Hujan.....	57
4.3	Curah Hujan Rerata Daerah.....	61
4.4	Perhitungan Evapotranspirasi .....	62
4.5	Simulasi Debit Metode Model Tangki.....	78
4.6	Perhitungan Nilai Korelasi <i>Nash-Sutcliffe</i> untuk Kalibrasi .....	83
4.7	Metode Perbandingan Luas .....	84
4.8	Kurva Durasi Aliran.....	92
4.9	Tinggi Jatuh Efektif ( <i>Net Head</i> ) .....	94
4.10	Pemilihan Tipe Turbin .....	95
4.11	Analisa Debit Pembangkitan .....	95
4.12	Analisa Daya dan Energi Listrik.....	96
<b>BAB IV PENUTUP.....</b>		<b>103</b>
5.1	Kesimpulan .....	103
5.2	Saran .....	106
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>		
<b>LAMPIRAN .....</b>		



## DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 1.1	Lokasi Studi .....	2
Gambar 1.2	Peta DAS Sibundong .....	4
Gambar 1.3	Peta Lokasi Stasiun Hujan .....	5
Gambar 1.4	Peta Lokasi AWLR Dolok Sanggul .....	6
Gambar 2.1	Siklus Hidrologi .....	12
Gambar 2.2	Daerah Aliran Sungai (DAS) .....	12
Gambar 2.3	Kurva Massa Ganda Uji Konsistensi .....	15
Gambar 2.4	Kurva Massa Ganda Uji Konsistensi .....	16
Gambar 2.5	Model Tangki dan Proses Limpasan .....	21
Gambar 2.6	Tangki Susunan Paralel .....	22
Gambar 2.7	Tangki Susunan Gabungan Seri dan Paralel .....	22
Gambar 2.8	Tangki .....	24
Gambar 2.9	Tangki .....	25
Gambar 2.10	Bagan Pengaliran Sungai dan Pemodelan Tangki Susunan Seri .....	26
Gambar 2.11	PLTA <i>Run of River</i> .....	33
Gambar 2.12	Tipe Kekuatan Instalasi Pembangkit Tenaga Air. (a) Aliran dari Sungai, (b) Pembelokan Terusan, (c) Bendungan di Lembah (d) Penyimpangan/pembelokan Tekanan Air Tinggi .....	35
Gambar 2.13	<i>Flow Duration Curve</i> .....	36
Gambar 2.14	Penggerak/pemutar dari Berbagai Macam Turbin .....	37
Gambar 2.15	Tinggi Tekan pada Turbin .....	38
Gambar 2.16	Turbin Aliran Tangensial .....	40
Gambar 2.17	Turbin Aliran Aksial .....	40
Gambar 2.18	Turbin Aliran Aksial – Radial .....	40
Gambar 2.19	Turbin <i>Crossflow</i> .....	41
Gambar 2.20	Turbin Pelton .....	42
Gambar 2.21	Turbin Turgo .....	43
Gambar 2.22	Turbin Francis .....	44
Gambar 2.23	Skema Tinggi Jatuh pada Bangunan PLTA .....	44
Gambar 2.24	Jangkauan Debit Operasi untuk Beberapa Jenis Turbin .....	46
Gambar 3.1	Model Tangki Susunan Seri .....	49

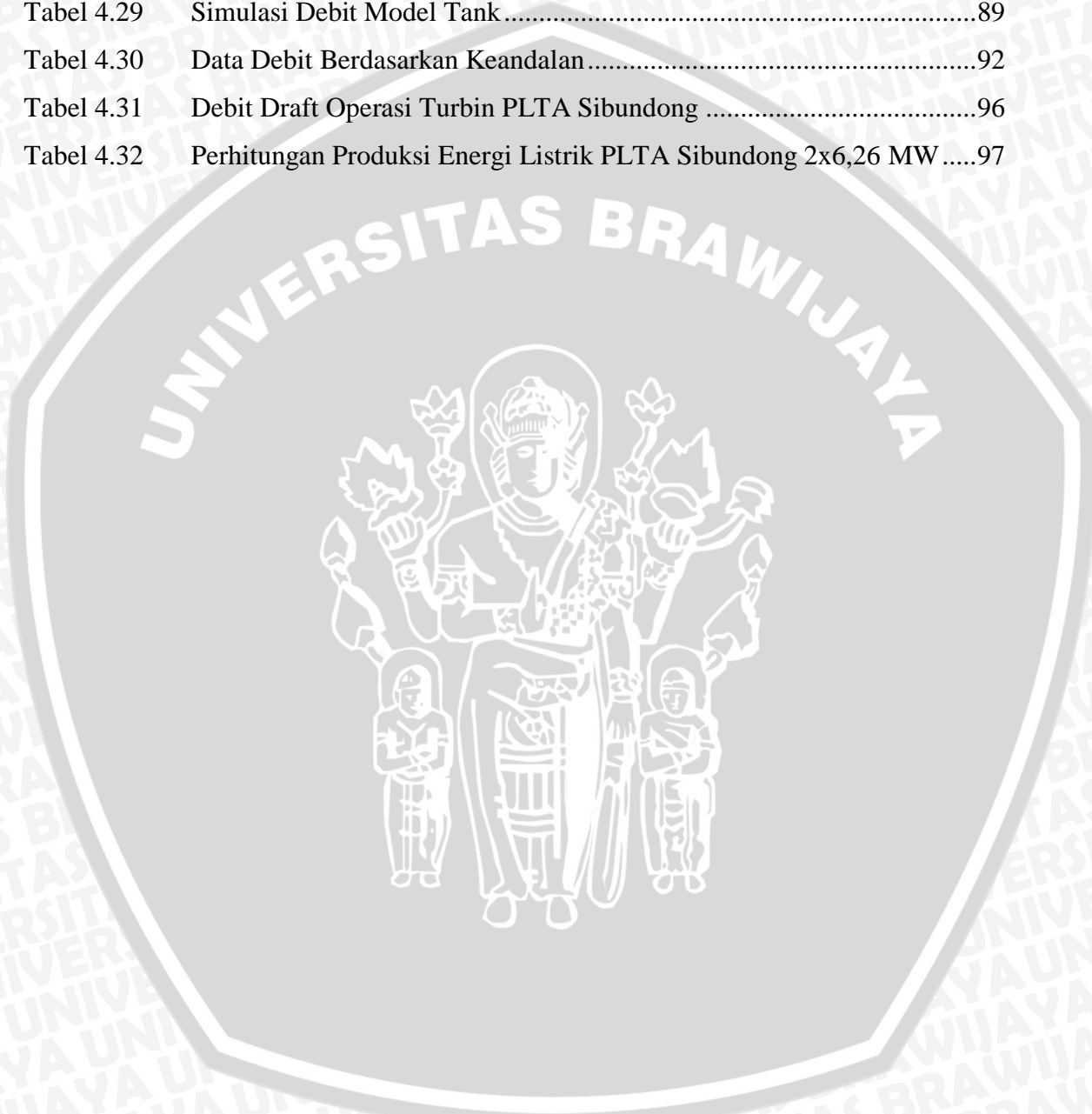
Gambar 3.2	Prosedur Perhitungan Debit Metode Model Tangki .....	51
Gambar 3.3	Diagram Alir Penyelesaian Skripsi .....	52
Gambar 3.4	Langkah-langkah dalam Kalibrasi Simulasi Debit Menggunakan Model <i>Tank</i> .....	53
Gambar 4.1	Kurva Massa Ganda Hubungan Antara Komulatif Rerata Stasiun Hujan Sibolga, Balige dengan Komulatif Stasiun Hujan Sarula. ....	58
Gambar 4.2	Kurva Massa Ganda Hubungan Antara Komulatif Rerata Stasiun Hujan Sarula, Balige dengan Komulatif Stasiun Hujan Sibolga. ....	59
Gambar 4.3	Kurva Massa Ganda Hubungan Antara Komulatif Rerata Stasiun Hujan Sarula, Sibolga dengan Komulatif Stasiun Hujan Balige .....	60
Gambar 4.4	Susunan Model Tangki Simulasi Debit Sungai .....	79
Gambar 4.5	Program Solver pada Excel.....	80
Gambar 4.6	Grafik Hasil Perbandingan Debit Simulasi Dan Debit Pengamatan.....	98
Gambar 4.7	Grafik Hasil Debit Simulasi Sesudah Dikalibrasi.....	90
Gambar 4.8	<i>Flow Duration Curve</i> Sungai Sibundong .....	94
Gambar 4.9	Sketsa Tinggi Jatuh.....	94
Gambar 4.10	Grafik Pemilihan Tipe Turbin.....	95



## DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 1.1	Lokasi Stasiun Hujan .....	4
Tabel 1.2	Jenis Penggunaan Lahan dan Luas .....	7
Tabel 2.1	Hubungan $t$ dengan $e\gamma$ , $w$ , $f(t)$ .....	19
Tabel 2.2	Harga $R\gamma$ untuk Indonesia ( $5^{\circ}\text{LU} - 10^{\circ}\text{LS}$ ) .....	20
Tabel 2.3	Angka Koreksi (C) Bulanan Untuk Rumus Penman .....	20
Tabel 4.1	Data Hujan yang Hilang di Stasiun Balige Tahun 2012,2013 .....	55
Tabel 4.2	Data Hujan Stasiun Sarula, Sibolga dan Hujan Tahunan .....	55
Tabel 4.3	Data Hujan Stasiun Sarula dan Sibolga .....	56
Tabel 4.4	Data Hujan Stasiun Sarula, Sibolga dan Hujan Tahunan .....	56
Tabel 4.5	Curah Hujan Tahunan Stasiun Hujan yang Diuji .....	57
Tabel 4.6	Uji Konsistensi Komulatif Rerata Stasiun Hujan Sibolga, Balige dengan Komulatif Stasiun Hujan Sarula .....	57
Tabel 4.7	Uji Konsistensi Komulatif Rerata Stasiun Hujan Sarula, Balige dengan Komulatif Stasiun Hujan Sibolga .....	58
Tabel 4.8	Uji Konsistensi Komulatif Rerata Stasiun Hujan Sarula, Sibolga dengan Komulatif Stasiun Hujan Balige .....	59
Tabel 4.9	Data Curah Hujan Stasiun Hujan Sarula.....	61
Tabel 4.10	Data Curah Hujan Stasiun Hujan Sibolga.....	61
Tabel 4.11	Data Curah Hujan Stasiun Balige .....	61
Tabel 4.12	Data Curah Hujan dengan Metode Rata-rata Aljabar .....	62
Tabel 4.13	Harga $R\gamma$ untuk Indonesia ( $5^{\circ}\text{LU} - 10^{\circ}\text{LS}$ ) .....	63
Tabel 4.14	Hubungan Suhu dengan Besarnya Tekanan Uap .....	63
Tabel 4.15	Angka Koreksi ( c ) Menurut Rumus Penman.....	66
Tabel 4.16	Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2004.....	68
Tabel 4.17	Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2005.....	69
Tabel 4.18	Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2006.....	70
Tabel 4.19	Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2007 .....	71
Tabel 4.20	Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2008.....	72
Tabel 4.21	Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2009.....	73
Tabel 4.22	Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2010.....	74
Tabel 4.23	Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2011 .....	75

Tabel 4.24	Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2012 .....	76
Tabel 4.25	Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2013 .....	77
Tabel 4.26	Parameter dan Koefisien Model Tangki .....	81
Tabel 4.27	Metode Perbandingan Luas .....	84
Tabel 4.28	Simulasi Debit Model Tank .....	87
Tabel 4.29	Simulasi Debit Model Tank .....	89
Tabel 4.30	Data Debit Berdasarkan Keandalan .....	92
Tabel 4.31	Debit Draft Operasi Turbin PLTA Sibudong .....	96
Tabel 4.32	Perhitungan Produksi Energi Listrik PLTA Sibudong 2x6,26 MW .....	97



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dengan pertumbuhan penduduk yang semakin pesat menyebabkan penurunan kondisi sumber daya alam, terutama sumber daya tanah dan air termasuk kondisi DAS. Hal ini dikarenakan timbulnya kerusakan vegetasi penutup tanah yang merupakan faktor terpenting dalam memelihara ketahanan tanah terhadap erosi dan kemampuan tanah dalam meresap air.

Daerah Aliran Sungai (DAS) (*catchment, basin, watershed*) merupakan daerah dimana semua airnya mengalir ke dalam suatu sungai yang dimaksudkan. Daerah ini umumnya dibatasi oleh batas topografi, yaitu merupakan tempat tertinggi sehingga air hujan yang jauh di dalamnya akan selalu menuju tempat hilirnya (bagian yang lebih rendah). Batas ini tidak ditetapkan berdasar air bawah tanah karena permukaan air tanah selalu berubah sesuai dengan musim dan tingkat kegiatan pemakaian.

Peralihan fungsi lahan pada Daerah Aliran Sungai (DAS) memberikan pengaruh cukup dominan terhadap debit banjir. Hujan yang jatuh pada suatu tata guna lahan akan menguap, meresap dan menjadi aliran/limpasan permukaan. Pemanfaatan lahan pada suatu DAS untuk berbagai penggunaan, akan mempengaruhi besarnya aliran yang terjadi di sungai. Hal ini disebabkan karena perbedaan besarnya bagian hujan yang meresap ke dalam tanah tergantung pada masing-masing tata guna lahan di mana hujan jatuh.

Pada DAS Sibudong untuk PLTA Aek Sibudong dilatarbelakangi dengan semakin meningkatnya penduduk di pulau Sumatra dan pasokan tenaga listrik mengalami penurunan daya mampu karena umur pembangkit yang semakin tua dan penambahan kapasitas pembangkit baru yang relatif kecil. Sistem kelistrikan di Provinsi Sumatra Utara dipasok dengan menggunakan sistem transmisi 150 kV dan transmisi 275 kV (tidak termasuk Pulau Nias/Gunung Sitoli, Teluk Dalam, Pulau Tello dan Pulau Sembilan yang masih beroperasi secara *isolated*). Saat ini beban puncak terlayani sekitar 1.374 MW dan dipasok oleh Sektor Pembangkitan Belawan, Sektor Pembangkitan Medan, Sektor Pembangkitan Pandan dan Sektor Pembangkitan Labuhan Angin. Pada saat ini PLN juga melakukan *swap energy* dengan PT Inalum untuk ikut membantu memenuhi kebutuhan beban puncak.

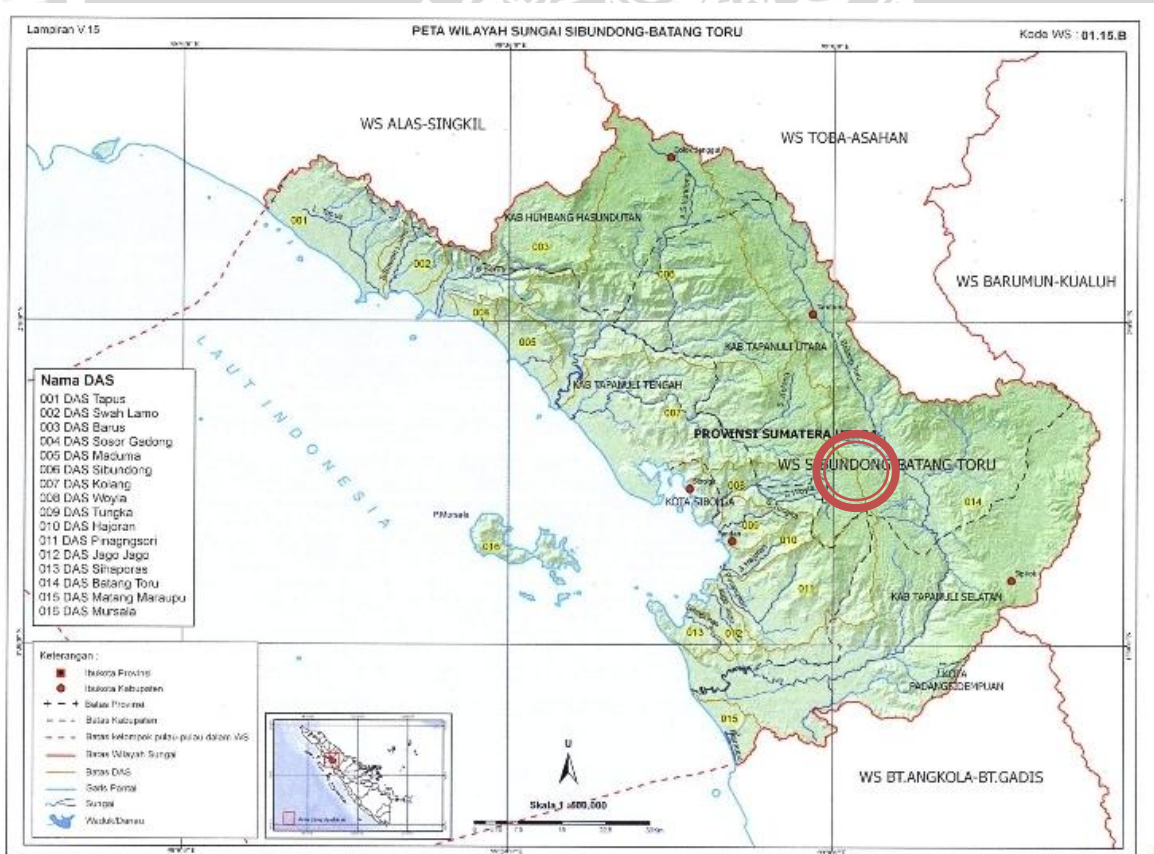
Dalam hal ini, potensi sungai Sibundong dapat dikaji melalui perhitungan debit andalan untuk dijadikan indikator dalam pemenuhan daya listrik yang akan dihasilkan oleh PLTA Sibundong. Debit andalan adalah besarnya debit yang tersedia untuk memenuhi kebutuhan air dengan resiko kegagalan yang telah diperhitungkan. Perhitungan debit andalan bertujuan untuk menentukan debit perencanaan yang diharapkan selalu tersedia di sungai, dihitung berdasarkan konsep peluang. Perhitungan debit andalan membutuhkan pengaplikasian metode ilmu hidrologi, ilmu probabilitas dan ilmu statistika.

Model *Tank* (tangki) merupakan bagian dari model *Rainfall Run-off Library* (RRL) yang melukiskan siklus hidrologi secara vertikal. Model ini menggambarkan konsep dari neraca air yang dibuat untuk meniru (*simulate*) daerah pengaliran sungai dengan menggantinya oleh sejumlah tampungan yang digambarkan sebagai sederet tangki.

## 1.2. Deskripsi Daerah Studi

### 1.2.1 Lokasi Studi

Lokasi studi adalah di Sungai Aek Sibundong, Kabupaten Tapanuli Utara, Provinsi Sumatra Utara.



Gambar 1.1. Lokasi Studi

Sumber: Dinas Pengelolaan Sumber Daya Air Provinsi Sumatra Utara

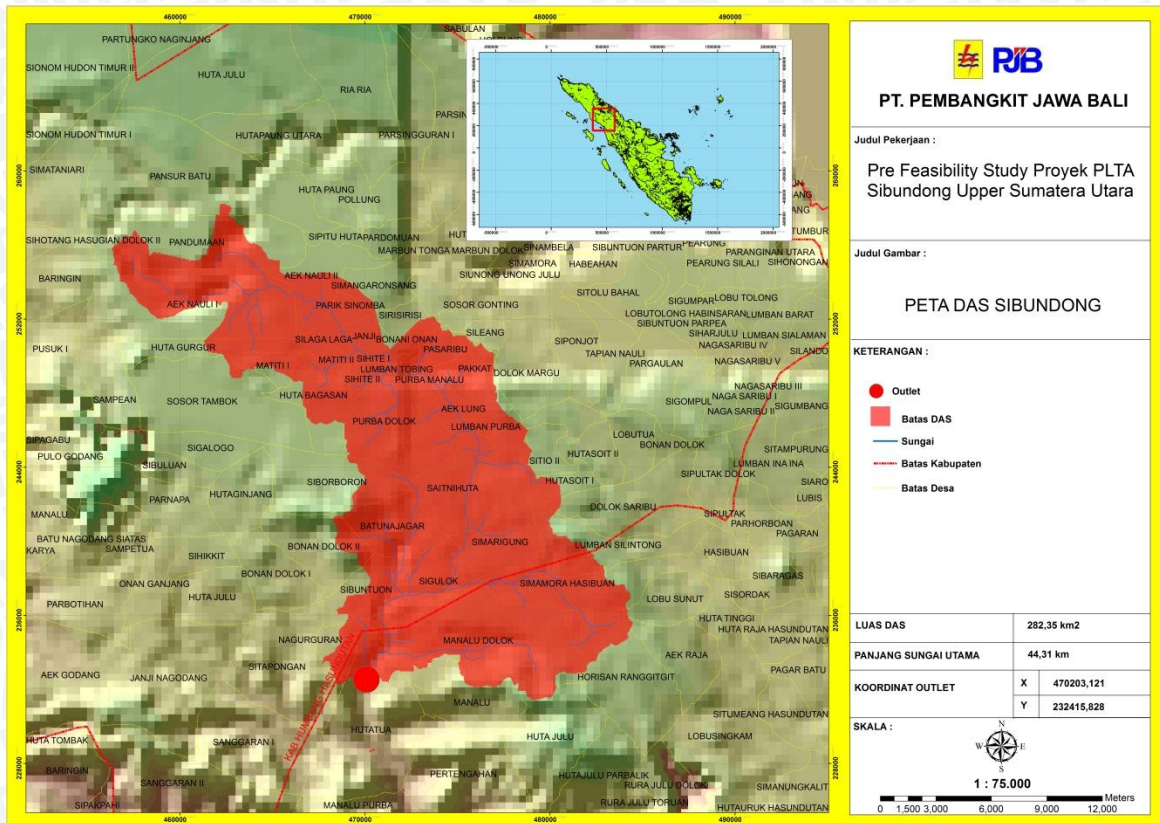
### 1.2.2 Letak Geografis

Kabupaten Tapanuli Utara terletak di wilayah dataran tinggi Sumatra Utara berada pada ketinggian antara 150-1700 meter di atas permukaan laut. Secara geografis Kabupaten Tapanuli Utara terletak pada koordinat 1°20'00" -2°41'00" Lintang Utara (LU) dan 98°05"-99°16" Bujur Timur (BT), sedangkan Kecamatan Tarutung terletak pada 01°54'00" -02°01'00" Lintang Utara (LU) dan 98°52"-99°04" Bujur Timur (BT).

Secara geografis letak Kabupaten Tapanuli Utara diapit atau berbatasan langsung dengan lima kabupaten, yaitu sebagai berikut:

- Sebelah Utara : berbatasan dengan Kabupaten Toba Samosir
- Sebelah Selatan : berbatasan dengan Kabupaten Labuhan Batu
- Sebelah Barat : berbatasan dengan Kabupaten Tapanuli Selatan
- Sebelah Timur : berbatasan dengan Kabupaten Humbang Hasundutan dan Kabupaten Tapanuli Tengah

Luas wilayah daratan Kabupaten Tapanuli Utara sekitar 3.793,71 km<sup>2</sup> dan luas perairan Danau Toba 6,60 km<sup>2</sup>. Dari 15 kecamatan yang ada, yang paling luas di Kabupaten Tapanuli Utara adalah Kecamatan Garoga, yaitu sekitar 567,58 km<sup>2</sup> atau 14,96% dari luas Kabupaten dan kecamatan yang terkecil adalah Kecamatan Muara dengan luas sekitar 79,75 km<sup>2</sup> atau 2,10% luas kabupaten.



Gambar 1.2. Peta DAS Sibundong

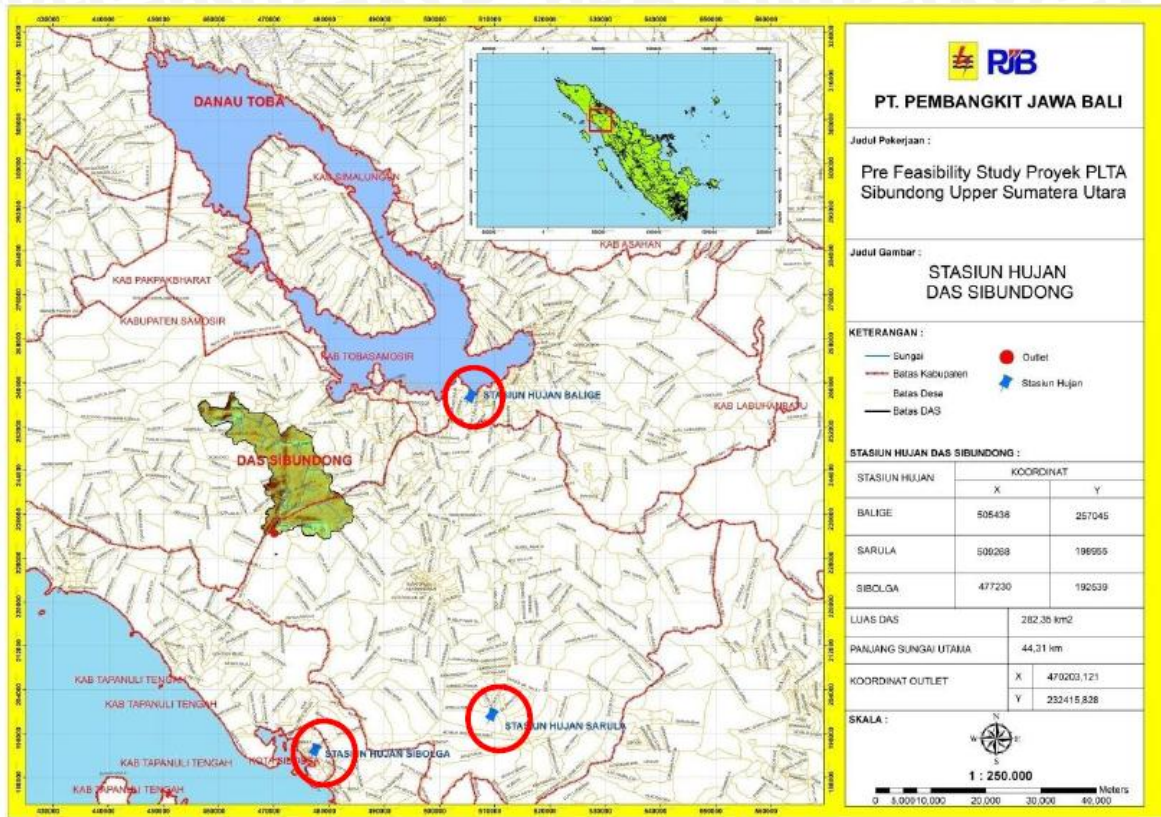
Sumber: Dinas Pengelolaan Sumber Daya Air Provinsi Sumatera Utara

### 1.2.3 Lokasi Stasiun Hujan

Tabel 1.1. Lokasi Stasiun Hujan

No.	Nama Stasiun Hujan	Koordinat Lokasi St. Hujan	Periode Pencatatan Data Hujan
1	Sibolga	1°33' LU ; 98°53' BT	2004 – 2013 (10 th)
2	Sarulla	1°48' LU ; 99°5' BT	2004 – 2013 (10 th)
3	Gabe Hutaraja (Balige)	2°19' LU ; 99°2' BT	2004 – 2011 (8 th)

Dimana peta lokasi stasiun hujan tersebut terhadap DAS Sibundong dapat digambarkan sebagai berikut:

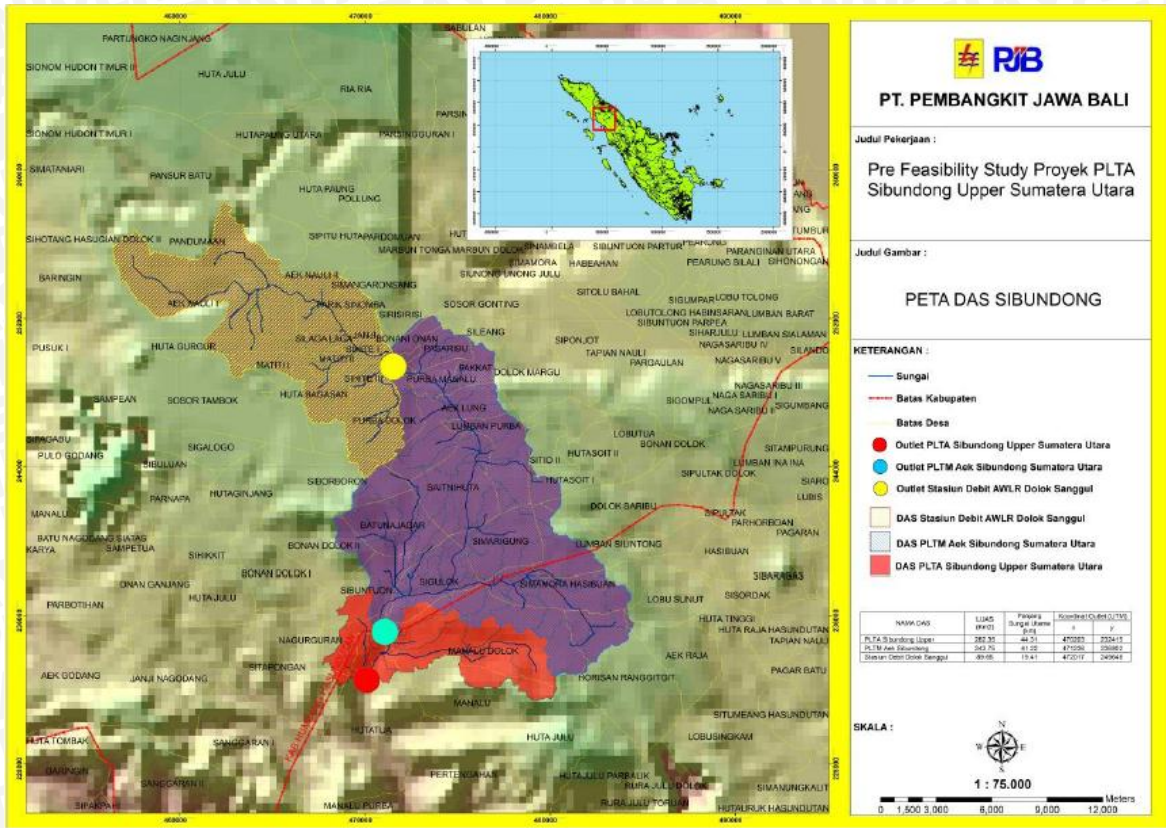


Gambar 1.3. Peta Lokasi Stasiun Hujan

Sumber: Dinas Pengelolaan Sumber Daya Air Provinsi Sumatera Utara

#### 1.2.4 Lokasi AWLR (*Automatic Water Level Recorder*)

Lokasi AWLR ini terletak di Desa Purba Turuan Kecamatan Dolok Sanggul Kabupaten Tapanuli Utara Provinsi Sumatera utara.



Gambar 1.4. Peta Lokasi AWLR Dolok Sanggul

Sumber: Dinas Pengelolaan Sumber Daya Air Provinsi Sumatera Utara

### 1.3 Kondisi Fisik

#### 1.3.1 Topografi

Berdasarkan kondisi Topografi dan kontur tanah untuk Kabupaten/Kota di Provinsi Sumatera Utara, bahwa Kabupaten Tapanuli Utara memiliki karakteristik wilayah bergelombang dan berbukit. Berdasarkan topografinya daerah ini berada di jajaran bukit barisan dengan keadaan tanah umumnya berbukit dan bergelombang, hanya sekitar 9,66 % dari keseluruhan luas wilayah yang berbentuk datar dan berada pada ketinggian 300-2.000 m di atas permukaan laut.

Berdasarkan topografinya daerah ini dapat dirinci sebagai berikut:

##### a. Menurut Ketinggian

No.	Ketinggian	Luas	Prosentase
1	300 - 500 m	13.784 Ha	3,63 %
2	500 - 1.000 m	148.072 Ha	39,03 %
3	1.000 - 1.500 m	216.919 Ha	57,18 %
4	1.500 m - keatas	596 Ha	0,16 %



No.	Ketinggian	Luas	Prosentase
<b>Jumlah</b>		<b>379.371 Ha</b>	<b>100 %</b>

Sumber: Taputkab.go.id

b. Menurut Kemiringan/Kelerengan Tanah

No.	Kemiringan Tanah	Luas	Prosentase
1	Datar (0 s.d. 2 %)	11.976 Ha	3,16 %
2	Landai (2 s.d. 5 %)	101.903 Ha	26,86 %
3	Miring (15 s.d. 40 %)	97.230 Ha	25,63 %
4	Terjal ( 45 %)	168.262 Ha	44,35 %
<b>Jumlah</b>		<b>379.371 Ha</b>	<b>100 %</b>

Sumber: Taputkab.go.id

### 1.3.2 Hidrologi dan Klimatologi

Salah satu unsur cuaca/iklim adalah curah hujan. Kabupaten Tapanuli Utara yang berada pada ketinggian lebih dari 500 meter di atas permukaan laut sangat berpeluang memperoleh curah hujan yang banyak. Selama tahun 2007, rata-rata curah hujan tahunan tercatat 8.777 mm dan lama hari hujan 231 hari atau rata-rata curah hujan bulanan sebanyak 5731,42 mm dan lama hari hujan 19,25 hari. Dari rata-rata curah hujan bulanan tahun 2007, terlihat curah hujan tertinggi terjadi pada bulan April yaitu 1133 mm dan lama hari hujan 27 hari dan curah hujan terendah pada bulan Agustus yaitu 365 mm dan lama hari hujan 15 hari dan temperatur udara berkisar antara 17<sup>0</sup> C – 29<sup>0</sup> C, serta rata-rata kelembaban udara (RH) sebesar 85,04 %.

### 1.3.3 Penggunaan Lahan

Penggunaan sumber daya lahan di Kabupaten Tapanuli Utara terdiri dari penggunaan lahan basah dan lahan kering, lahan basah terdiri dari pertanian tanaman pangan, perikanan. Sedangkan lahan kering terdiri dari kehutanan, peternakan dan perkebunan.

Tabel 1.2. Jenis Penggunaan Lahan dan Luas

No.	Jenis Penggunaan Lahan	Luas (ha)
1	Pemukiman	18.482
2	Sarana sosek budaya	2.45
3	Pertanian dalam arti luas	79.159

No.	Jenis Penggunaan Lahan	Luas (ha)
4	Pertambangan	43
5	Ladang - Huma	18.180
6	Alang-alang	68.606
7	Kehutanan	102.117
8	Kolam/Empang	978
9	Rawa-rawa	3.463
10	Lahan kritis	2.153
11	Industri	39

Sumber: Taputkab.go.id

#### 1.4 Identifikasi Masalah

Dalam perencanaan bangunan air, misalnya Pembangkit Listrik Tenaga Air diperlukan data debit yang cukup untuk keperluan analisa hidrologi DAS. Di sisi lain pengumpulan data-data tersebut masih merupakan suatu permasalahan yang jarang terutama di Negara-negara berkembang seperti Indonesia. Hal ini disebabkan karena kurangnya peralatan pengukuran debit, kurangnya tenaga pelaksana atau kurang baiknya penyimpanan data.

Pada DAS Sibudong juga mengalami permasalahan pengukuran debit yang tidak lengkap, banyak pengamatan debit yang kosong dan memperpanjang data debit runtut waktu yang kurang panjang. Selain itu dalam praktek sering dijumpai keadaan data setempat yang baik kuantitatif maupun kualitatif tidak memenuhi syarat, misalnya data yang kurang, banyak data yang hilang, besaran-besaran data yang meragukan. Keadaan ini tidak berarti menghambat atau menghentikan sama sekali analisis yang akan dilakukan. Dengan adanya model *Tank* diharapkan mampu menjawab permasalahan ini dengan melakukan simulasi debit guna mengetahui besarnya debit di sungai.

#### 1.5 Rumusan Masalah

1. Bagaimana hasil simulasi debit dengan menggunakan model *Tank*?
2. Bagaimana hasil kalibrasi antara debit menggunakan model *Tank* dengan hasil pengukuran?

3. Berapa besar potensi daya dan energi listrik yang bisa dihasilkan untuk pola pengoperasian PLTA berdasarkan hasil perhitungan simulasi debit DAS Sibundong?

#### 1.6 Batasan Masalah

1. Lokasi studi adalah DAS Sibundong.
2. Metode simulasi yang digunakan adalah model *Tank*.
3. Skema simulasi model *Tank* menggunakan 4 tangki susunan seri (standar).
4. Evapotranspirasi menggunakan rumus Penman.
5. Tidak membahas pendugaan laju erosi dan sedimentasi.

#### 1.7 Tujuan

Tujuan studi ini bertujuan untuk menerapkan model *Tank* dalam pendugaan debit air sungai dan menghitung besar debit andalan pada sungai Sibundong. Untuk menganalisa potensi daya pola pengoperasian PLTA Sibundong.

#### 1.8 Manfaat

Manfaat dari studi ini adalah dihasilkannya model tangki yang diharapkan dapat diterapkan cara serupa pada DAS lain yang memiliki kesamaan karakteristik dengan daerah studi, sehingga masalah keterbatasan data debit suatu DAS dapat dipecahkan dan dihasilkannya daya pada pola pengoperasian PLTA guna memenuhi kebutuhan masyarakat.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Hidrologi

Hidrologi adalah ilmu yang berkaitan dengan air di bumi, baik mengenai terjadinya, peredaran dan penyebarannya, sifat-sifatnya dan hubungan dengan lingkungannya terutama dengan makhluk hidup. Penerapan ilmu hidrologi dapat dijumpai dalam beberapa kegiatan seperti perencanaan dan operasi bangunan air, penyediaan air untuk berbagai keperluan (air bersih, irigasi, perikanan, peternakan), pembangkit listrik tenaga air, pengendalian banjir, pengendalian erosi dan sedimentasi, transportasi air, drainasi, pengendali polusi, air limbah dan sebagainya.

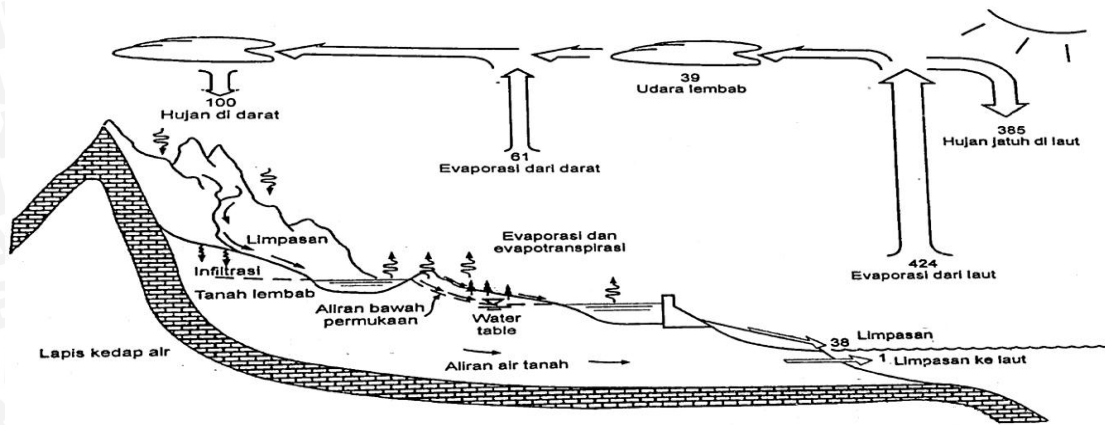
##### 2.1.1 Siklus Hidrologi

Siklus hidrologi merupakan proses kontinyu dimana air bergerak dari bumi ke atmosfer dan kemudian kembali ke bumi lagi. Dalam gambar 2.1 ditunjukkan komponen-komponen dari siklus hidrologi. Neraca air tahunan diberikan dalam nilai relatif terhadap hujan yang jatuh di daratan. Air di permukaan tanah, sungai, danau dan laut menguap ke udara. Uap air tersebut bergerak dan naik ke atmosfer, yang kemudian mengalami kondensasi dan berubah menjadi titik-titik air yang berbentuk awan. Selanjutnya titik-titik air tersebut jatuh sebagai hujan ke permukaan laut dan daratan. Hujan yang jatuh sebagian tertahan oleh tumbuh-tumbuhan (intersepsi) dan selebihnya sampai ke permukaan tanah (infiltrasi) dan sebagian lainnya mengalir di atas permukaan tanah (aliran permukaan atau *surface run off*) mengisi cekungan tanah, danau dan masuk ke sungai dan akhirnya mengalir ke laut. Air yang meresap ke dalam tanah sebagian mengalir di dalam tanah (perkolasi) mengisi air tanah yang kemudian keluar sebagai mata air atau mengalir ke sungai. Akhirnya aliran air di sungai akan sampai ke laut. Proses tersebut berlangsung terus menerus yang disebut dengan siklus hidrologi.

##### 2.1.2 Daerah Aliran Sungai

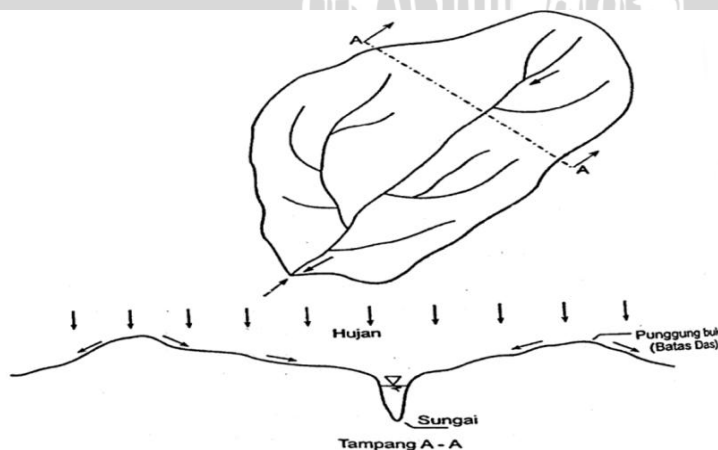
Daerah aliran sungai (DAS) adalah daerah yang dibatasi oleh punggung- punggung gunung/pegunungan di mana air hujan yang jatuh di daerah tersebut akan mengalir menuju sungai utama pada suatu titik/stasiun yang ditinjau. DAS ditentukan dengan menggunakan peta topografi yang dilengkapi dengan garis-garis kontur. Untuk maksud tersebut dapat digunakan peta topografi dengan skala 1:50.000. Garis-garis kontur dipelajari untuk

menentukan arah dari limpasan permukaan. Limpasan berasal dari titik-titik tertinggi dan bergerak menuju titik-titik yang lebih rendah dalam arah tegak lurus dengan garis-garis kontur. Daerah yang dibatasi oleh garis yang menghubungkan titik-titik tertinggi tersebut adalah DAS. Gambar 2.2 menunjukkan contoh bentuk DAS. Dalam gambar tersebut ditunjukkan pula penampang pada keliling DAS. Garis yang mengelilingi DAS tersebut merupakan titik-titik tertinggi. Air hujan yang jatuh di dalam DAS akan mengalir menuju sungai utama yang ditinjau, sedang yang jatuh di luar DAS akan mengalir ke sungai lain di sebelahnya.



Gambar 2.1 Siklus Hidrologi  
Sumber: Triatmodjo (2008:3)

Luas DAS diperkirakan dengan mengukur daerah itu pada peta topografi. Luas DAS sangat berpengaruh terhadap debit sungai. Pada umumnya semakin besar DAS semakin besar jumlah limpasan permukaan sehingga semakin besar pula aliran permukaan atau debit sungai.



Gambar 2.2 Daerah Aliran Sungai (DAS)  
Sumber: Triatmodjo (2008:8)

## 2.2 Curah Hujan Rerata Daerah

Curah hujan yang diperlukan untuk penyusunan suatu rancangan pemanfaatan air dan rancangan pengendalian banjir adalah curah hujan rata-rata di seluruh daerah yang bersangkutan. Curah hujan ini disebut curah hujan wilayah/daerah.

### 2.2.1 Metode Rata-rata Aljabar (*Arithmetic Mean Method*)

Rata-rata aljabar digunakan untuk luas daerah kurang dari 50.000 ha. Hasil yang diperoleh dengan cara ini tidak berbeda jauh dari hasil yang didapat dengan cara lain dan digunakan jika jumlah titik pengamatan banyak dan tersebar merata di seluruh daerah yang bersangkutan. Keuntungan cara ini adalah obyektif yang berbeda dengan cara isohyet, dimana faktor subyektif turut menentukan. Perhitungan ini dapat dilakukan jika daerah pengaruh dan curah hujan rerata dari tiap stasiun hampir sama.

$$R = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n}{n} \quad (2-1)$$

Dengan:

$R$	= tinggi curah hujan rata-rata (mm)
$R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$	= tinggi curah hujan pada masing-masing stasiun (mm)
$n$	= banyaknya stasiun hujan

## 2.3 Estimasi Data Hujan yang Hilang

Data yang ideal adalah data yang sesuai dengan apa yang dibutuhkan. Tetapi dalam praktek sangat sering dijumpai data yang tidak lengkap (*incomplete record*) hal ini dapat disebabkan beberapa hal, antara lain yaitu kerusakan alat, kelalaian petugas, penggantian alat, bencana (pengrusakan) dan sebagainya. Keadaan tersebut menyebabkan pada bagian-bagian tertentu dari data runtut waktu terdapat data yang kosong (*missing record*). Dalam memperkirakan besarnya data yang hilang, harus diperhatikan pula pola penyebaran hujan pada stasiun yang bersangkutan maupun stasiun-stasiun sekitarnya.

Keadaan data hujan hilang ini untuk kepentingan tertentu dapat mengganggu. Misalnya pada suatu saat terjadi banjir, sedangkan data hujan pada saat atau beberapa stasiun pada saat yang bersamaan tidak tersedia (karena berbagai sebab). Keadaan demikian tidak terasa merugikan bila data tersebut tidak tercatat pada saat yang dipandang tidak penting.

Menurut Soewarno (2000) dalam bukunya Hidrologi Operasional Jilid Kesatu, analisis hidrologi memang tidak selalu diperlukan pengisian data yang kosong atau hilang. Misal terdapat data kosong pada musim kemarau sedang analisis data hidrologi tersebut

menghitung debit banjir musim kemarau tersebut, tetapi bila untuk analisis kekeringan maka data kosong pada musim kemarau tersebut harus diusahakan untuk melengkapi.

Data hujan yang hilang dapat diestimasi apabila di sekitarnya ada stasiun penakar hujan (minimal 2 stasiun) yang lengkap datanya atau stasiun penakar yang datanya hilang diketahui hujan rata-rata tahunannya. (Limantara, 2010)

Menghadapi keadaan ini, terdapat dua langkah yang dapat dilakukan yaitu:

1. Membiarkan saja data yang hilang tersebut, karena dengan cara apapun data tersebut tidak akan diketahui dengan tepat.
2. Bila dipertimbangkan bahwa data tersebut mutlak diperlukan maka perkiraan data tersebut dapat dilakukan dengan cara-cara yang dikenal.

### 2.3.1 Normal Ratio Method

Linsley, Kohler dan Paulhus (1958) menyarankan satu metode yang disebut “*Normal Ratio Method*” sebagai berikut:

$$D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \frac{A_{n_x}}{A_{n_i}} \quad (2-2)$$

Dengan:

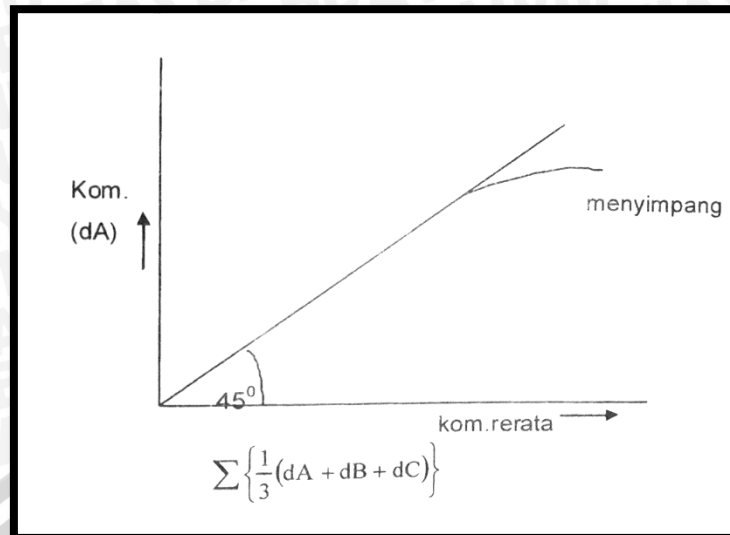
- $D_x$  : Data curah hujan yang diperkirakan pada stasiun x  
 $n$  : Jumlah stasiun di sekitar x untuk mencari data curah hujan di x  
 $d_i$  : Data curah hujan harian di stasiun i  
 $A_{n_x}$  : Data curah hujan rata-rata tahunan di stasiun x  
 $A_{n_i}$  : Data curah hujan rata-rata tahunan di stasiun sekitar x

## 2.4 Pengujian Data Curah Hujan

### 2.4.1 Uji Konsistensi

Lengkung massa ganda dimaksudkan untuk melakukan uji konsistensi data hujan. Dari pengujian tersebut dapat diketahui apakah terjadi perubahan lingkungan atau perubahan cara menakar. Jika hasil uji menyatakan data hujan di suatu stasiun konsisten berarti pada daerah pengaruh stasiun tersebut tidak terjadi perubahan lingkungan dan tidak terjadi perubahan cara menakar selama pencatatan data tersebut dan sebaliknya.





Gambar 2.3 Kurva Massa Ganda Uji Konsistensi  
Sumber: Limantara (2010:55)

Catatan:

Jika data hujan di Stasiun A konsisten, maka:

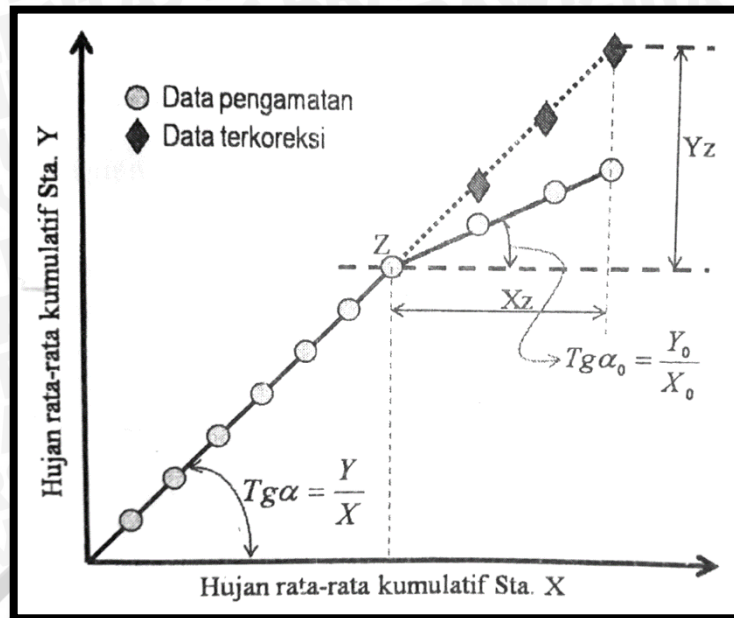
→ grafik berupa garis lurus dengan gradient sudut =  $\text{tg } 45^\circ$

Cara melakukan uji konsistensi:

Misalkan yang akan diuji data hujan di pos Y, maka data hujan tahunan kumulatif di pos Y dibandingkan secara grafis dengan harga kumulatif dari rerata hujan tahunan dari pos A, B, C dan D dan seterusnya yang lokasinya ada di sekitar X. Data hujan tahunan di X dan sekitarnya minimal 10 tahun. Kemudian data digambarkan pada kertas grafik (milimeter) dengan data hujan kumulatif pos Y sebagai sumbu tegak dan kumulatif dari rerata hujan tahunan dari pos di sekitarnya sebagai sumbu mendatar.

Dari perubahan pola (*trend*) pasangan data itu dapat disimpulkan sebagai berikut:

(1) Jika pola yang terjadi berupa garis lurus dan tidak terjadi patahan arah garis itu, maka data hujan pos Y adalah konsisten, sebaliknya (2) Jika pola yang terjadi berupa garis lurus dan terjadi patahan arah garis itu, maka data hujan pos Y tidak konsisten dan harus dilakukan koreksi. Secara rinci bisa digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.4 Kurva Massa Ganda Uji Konsistensi

Sumber: Limantara (2010:56)

## 2.5 Evaporasi dan Evapotranspirasi

### 2.5.1 Definisi

Peristiwa berubahnya air menjadi uap dan bergerak dari permukaan tanah dan permukaan air ke udara disebut evaporasi. Peristiwa penguapan dari tanaman disebut transpirasi. Proses evaporasi dan transpirasi saling berkaitan sehingga dinamakan evapotranspirasi. Jika air yang tersedia dalam tanah cukup banyak maka evapotranspirasi itu disebut evapotranspirasi-potensial.

Evaporasi merupakan faktor penting dalam studi tentang pengembangan sumber-sumber daya air. Evaporasi sangat mempengaruhi debit sungai, besarnya kapasitas waduk, besarnya kapasitas pompa untuk irigasi, penggunaan konsumtif (*consumptive use*) untuk tanaman dan lain-lain. Sedangkan evapotranspirasi merupakan faktor dasar untuk menentukan kebutuhan air dalam rencana irigasi dan merupakan proses yang penting dalam siklus hidrologi.

Faktor-faktor yang mempengaruhi evaporasi dan evapotranspirasi adalah suhu air, suhu udara (atmosfir), kelembaban, kecepatan angin, tekanan udara, sinar matahari dan lain-lain yang saling berhubungan satu dengan yang lain. Pada waktu pengukuran evaporasi, maka kondisi atau keadaan ketika itu harus diperhatikan, mengingat faktor itu sangat dipengaruhi oleh perubahan lingkungan. Kondisi-kondisi itu tidak merata di seluruh daerah. Umpamanya di bagian yang satu disinari matahari, di bagian yang lain berawan (Sosrodarsono, S. 2006:57).

### 2.5.2 Perhitungan Besarnya Evapotranspirasi

Pada Evapotranspirasi merupakan proses penting dalam siklus hidrologi, oleh sebab itu telah banyak jenis cara penentuannya yang telah diadakan antara lain cara dengan mempergunakan rumus-rumus perhitungan, cara pengukuran dengan menggunakan lysimeter, cara perkiraan banyaknya evaporasi dari panci evaporasi dan lain-lain. Pada studi ini nilai evapotranspirasi didapatkan dari dalam persamaan yang diberikan Penman-Monteith (1965) yang digunakan sebagai standar FAO untuk menghitung evapotranspirasi potensial.

Perhitungan Evapotranspirasi yang diberikan Penman-Monteith menurut Montarjih:

Data terukur yang dibutuhkan:

- Suhu rerata bulanan ( $t^{\circ}\text{C}$ )
- Kelembaban relatif bulanan rerata ( $\text{RH} \rightarrow \%$ )
- Kecerahan matahari bulanan ( $\frac{n}{N} \rightarrow \%$ )
- Kecepatan angin bulanan rerata ( $U \rightarrow \text{m/dt}$ )
- Letak lintang daerah
- Angka koreksi ( $C$ )

Rumus:

$$ET_o = C \cdot ET_o^* \quad (2-3)$$

$$ET_o^* = w(0,75 R_s - R_{n1}) + (1-w)f(U)(e_g - e_d) \quad (2-4)$$

Dengan:

$w$  = faktor yang berhubungan dengan suhu dan elevasi daerah  $\rightarrow$  Tabel PN.1

$R_s$  = radiasi gelombang pendek (mm/hr)

$$R_s = (0,25 + 0,54 \frac{n}{N}) R_{\gamma} \quad (2-5)$$

$R_{\gamma}$  = radiasi gelombang pendek yang memenuhi batas luar atmosfer  $\rightarrow$  Tabel PN.2

$R_n$  = radiasi bersih gelombang panjang (mm/hr)

$$R_{n1} = f(t) \cdot f(e_d) \cdot f(\frac{n}{N}) \quad (2-6)$$

$$f(t) = \text{fungsi suhu: } \sigma \cdot T_a^4 \text{ (PN.1)} \quad (2-7)$$

$$f(e_d) = \text{fungsi tekanan uap} \\ = 0,34 - 0,044 \sqrt{\epsilon d} \quad (2-8)$$

$$\epsilon d = \epsilon d^* \text{ RH} \quad (2-9)$$

$$f\left(\frac{n}{N}\right) = \text{fungsi kecerahan matahari}$$

$$= 0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \quad (2-10)$$

$f(U)$  = fungsi kecepatan angin pada ketinggian 2,00 m

$$f(U) = 0,27 * (1 + 0,864 U) \quad (2-11)$$

$(\varepsilon\gamma - \varepsilon d)$  = perbedaan tekanan uap jenuh dengan tekanan uap yang sebenarnya

$$\varepsilon d = \varepsilon\gamma * RH$$

$$\varepsilon\gamma = \text{tekanan uap sebenarnya}$$

$$= f(t)$$

$$RH = \text{kelembaban relatif (\%)}$$

$$C = \text{angka koreksi}$$

Prosedur perhitungan:

1. Cari data suhu rerata bulanan (t)

2. Dari tabel PN.1

Berdasar data t → cari:  $\gamma$ , w, f(t)

3. Cari data RH

4. Cari  $\varepsilon d = \varepsilon\gamma * RH$

5. Lihat tabel PN.2, berdasar LL cari  $R\gamma$

6. Cari data kecerahan matahari  $\left(\frac{n}{N}\right)$

7. Cari  $R_s = (0,25 + 0,54 \frac{n}{N}) R\gamma$

8. Cari  $f\left(\frac{n}{N}\right) = 0,1 + 0,9 \frac{n}{N}$

9. Cari data kecepatan angin (U)

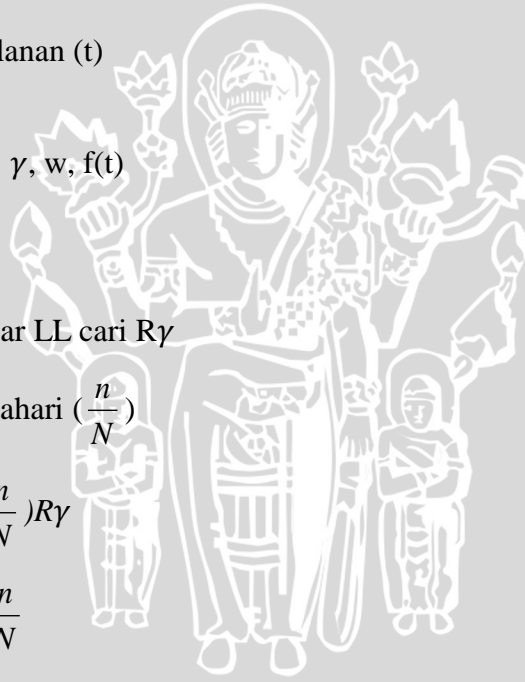
10. Cari  $f(U) = 0,27 * (1 + 0,864 U)$

11. Cari  $R_{n.1} = f(t) * f(\varepsilon d) * f\left(\frac{n}{N}\right)$

12. Cari C → Tabel PN.3

13. Cari  $ET_o^* = w (0,75R_s - R_{n1}) + (1-w) f(U) (\varepsilon\gamma - \varepsilon d)$

$$ET_o = C * ET_o^*$$



Tabel 2.1. Hubungan t dengan  $e\gamma$ , w, f(t)

Suhu ( $^{\circ}\text{C}$ )	$e\gamma$ mmbar	w	f(t)
24,0	29,85	0,735	15,40
24,2	30,21	0,737	15,45
24,4	30,57	0,739	15,50
24,6	30,94	0,741	15,55
24,8	31,31	0,743	15,60
25,0	31,69	0,745	15,65
25,2	32,06	0,747	15,70
25,4	32,45	0,749	15,75
25,6	32,83	0,751	15,80
25,8	33,22	0,753	15,85
26,0	33,62	0,755	15,90
26,2	34,02	0,757	15,94
26,4	34,42	0,759	15,98
26,6	34,83	0,761	16,02
26,8	35,25	0,763	16,06
27,0	35,66	0,765	16,10
27,2	36,09	0,767	16,14
27,4	35,50	0,769	16,18
27,6	36,94	0,771	16,22
27,8	37,37	0,773	16,26
28,0	37,81	0,775	16,30
28,2	38,25	0,777	16,34
28,4	38,70	0,779	16,38
28,6	39,14	0,781	16,42
28,8	39,61	0,783	16,46
29,0	40,06	0,785	16,50

Sumber: Montarcih (2010:35)

Tabel 2.2. Harga Ry untuk Indonesia (5°LU - 10°LS)

Bulan	LU			0	LS				
	5	4	2		2	4	6	8	10
Jan	13,0	14,3	14,7	15,0	15,3	15,5	15,8	16,1	16,1
Feb	14,0	15,0	15,3	15,5	15,7	15,8	16,0	16,1	16,0
Mar	15,0	15,5	15,6	15,7	15,7	15,6	15,6	15,1	15,3
Apr	15,1	15,5	15,3	15,3	15,1	14,9	14,7	14,1	14,0
Mei	15,3	14,9	14,6	14,4	14,1	13,8	13,4	13,1	12,6
Juni	15,0	14,4	14,2	13,9	13,9	13,2	12,8	12,4	12,6
Juli	15,1	14,6	14,3	14,1	14,1	13,4	13,1	12,7	11,8
Ags	15,3	15,1	14,9	14,8	14,8	14,3	14,0	13,7	12,2
Sep	15,1	15,3	15,3	15,3	15,3	15,1	15,0	14,9	13,1
Okt	15,7	15,1	15,3	15,3	15,4	15,6	15,7	15,8	14,6
Nov	14,8	14,5	14,8	14,8	15,1	15,5	15,8	16,0	15,6
Des	14,6	14,1	14,4	14,4	14,8	15,4	15,7	16,0	16,0

Sumber: Montarcih (2010:31)

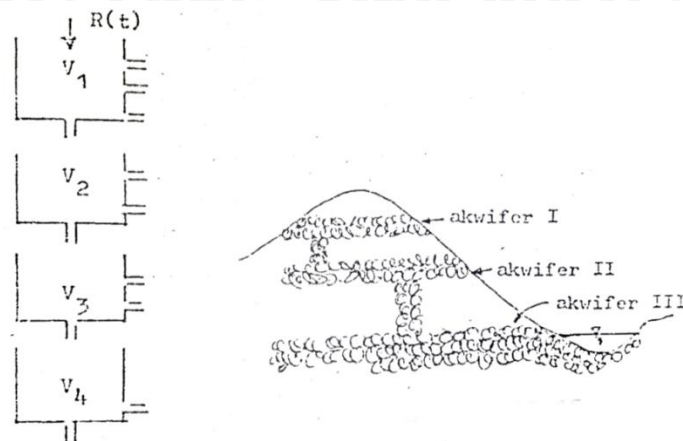
Tabel 2.3. Angka Koreksi (C) Bulanan Untuk Rumus Penman

Bulan	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun
C	1,10	1,10	1,10	0,90	0,90	0,90
Bulan	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des
C	0,90	1,00	1,10	1,10	1,10	1,10

Sumber: Montarcih (2010:34)

## 2.6 Simulasi Debit Metode Model *Tank*

Pemilihan dasar metode model tangki ini adalah untuk meniru (*simulate*) daerah pengaliran sungai dengan menggantinya oleh sejumlah tampungan yang digambarkan sebagai sederet tangki. Model tersebut dikembangkan oleh Dr. M. Sugawara. Model yang menggunakan 4 buah tangki yang disusun secara seri, seperti terlihat pada gambar 2.5. Aliran yang melewati lubang-lubang yang berada di dinding kanan tangki-tangki yang bersangkutan akan menghasilkan limpasan, sedangkan aliran yang melewati dasar tangki merupakan infiltrasi.



Gambar 2.5 Model Tangki dan Proses Limpasan  
Sumber: Soemarto (1987:470)

Curah hujan yang jatuh pada suatu waktu  $R(t)$  akan mengisi tangki paling atas  $V_1$ . Air yang tertampung oleh tangki  $V_1$  mengalir lewat lubang-lubang di dinding kanan atau merembes lewat lubang di dasar tangki dan masuk mengisi tangki  $V_2$  dalam tahap kedua. Air yang tertampung dalam tangki  $V_2$  mengalir lewat lubang-lubang di dinding kanan dan merembes lewat dasar tangki masuk ke tangki  $V_3$  dalam tahap ketiga. Proses ini berulang hingga sampai tangki terakhir.

Model tersebut akan segera dimengerti bila kita hubungkan dengan mekanisme proses limpasan di dalam daerah pengaliran seperti terlihat pada bagan yang tercantum pada gambar 2.7. Curah hujan yang jatuh ke permukaan tanah akan membasahi permukaan tanah tersebut. Bila permukaan tanah mengandung air sedikit atau banyak, maka sebagian air hujan akan mengalir di atas permukaan tanah. Dalam model tangki, permukaan air di tangki  $V_1$  berada sedikit di atas lubang pada dinding kanan yang terbawah sehingga mengalirkan limpasan.

Bila curah hujan masih berlanjut maka permukaan tanah akan cukup basah, sehingga limpasan permukaan akan naik terus dan dapat ditirukan dalam model dengan muka air dalam tangki  $V_1$  yang naik sampai di atas lubang di dinding kanan tangki  $V_1$  yang teratas. Di samping itu air juga merembes ke bawah yang dalam model digambarkan dengan aliran lewat lubang di dasar tangki  $V_1$ . Air yang berinfiltrasi dari permukaan tanah akan ditinggal dalam akuifer 1. Bila air yang terkumpul itu melebihi suatu batas tertentu ia akan mulai melimpas dari akuifer 1. Sebagai contoh dari kejadian ini adalah adanya mata air yang keluar di lereng bukit. Dalam model air tersebut digambarkan oleh aliran yang keluar dari lubang-lubang di dinding kanan tangki  $V_2$ .

Air yang berinfiltrasi dari akuifer 1 ke akuifer yang ada di bawahnya akan memperlihatkan kelakuan yang sama dengan aliran dari akuifer 1. Sebagai contoh adalah

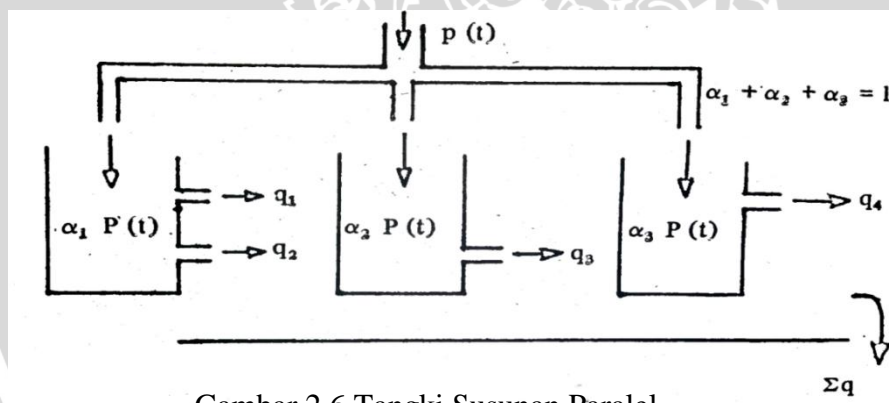
adanya mata-mata air di kaki bukit dan dalam model hal lini digambarkan oleh aliran yang keluar dari lubang-lubang di dinding kanan tangki  $V_3$ .

Air yang berinfiltrasi lebih ke bawah lagi akan menstabilkan air tanah dan mengalir secara lambat keluar dari akuifernya dalam musim kemarau ke dalam sungai. Dalam model hal ini digambarkan sebagai aliran lewat lubang-lubang di dinding kanan tangki  $V_4$ .

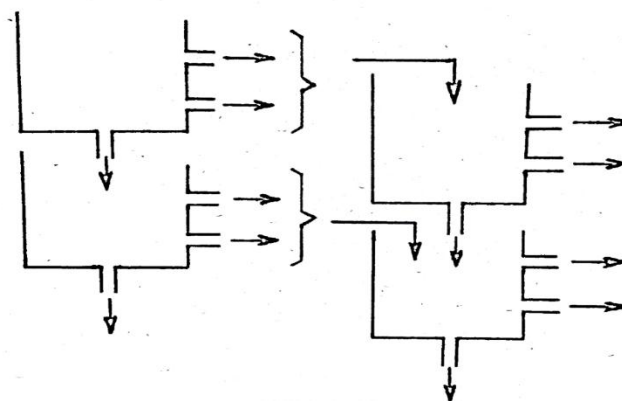
Jumlah limpasan yang keluar dari lubang-lubang di dinding kanan semuatangi adalah merupakan besarnya limpasan yang dihitung dalam suatu daerah pengaliran dengan masukan curah hujan tertentu.

Jadi dengan melihat tangki-tangki dalam model dan membandingkan dengan komponen-komponen limpasan, maka tangki  $V_1$  yang terletak paling atas kira-kira merupakan limpasan permukaan, tangki  $V_2$  merupakan limpasan antara (*intermediate runoff*), sedangkan tangki-tangki  $V_3$  dan  $V_4$  merupakan aliran dasar (*base flow*).

Pada umumnya model tangki merupakan susunan dari 3 atau 4 buah tangki yang disusun secara seri seperti terlihat pada gambar 2.7. Di samping itu juga dimungkinkan cara penyusunan lain tergantung pada sifat-sifat daerah pengalirannya.



Gambar 2.6 Tangki Susunan Paralel  
Sumber: Soemarto (1987:472)



Gambar 2.7 Tangki Susunan Gabungan Seri dan Paralel  
Sumber: Soemarto (1987:473)



### 2.6.1 Dasar-dasar Teori Model Tangki

Besarnya limpasan yang keluar dari tangki sebanding dengan tinggi air dalam tangki yang bersangkutan (*storage depth*)  $h(t)$  di atas lubang. Limpasan  $q(t)$  dirumuskan sebagai berikut.

$$q(t) = h(t) \lambda \quad (2-12)$$

Dengan:

$$q(t) = \text{limpasan (mm/hari)}$$

$$h(t) = \text{tinggi tampungan (mm)}$$

$$\lambda = \text{koefisien lubang (hari}^{-1}\text{)}$$

Jika tidak ada penambahan air dari atas tangki maka dari persamaan kontinuitas diperoleh:

$$-q = \frac{dh}{dt} \quad (2-13)$$

Dari persamaan (2-17) dan (2-18) didapat:

$$q = q_0 e^{-\lambda t} \quad (2-14)$$

dimana  $q_0 = q$  pada saat  $t = 0$

Dari persamaan (2-14) terlihat bahwa limpasan akan menurun secara eksponensial dengan bertambahnya waktu, jika tidak ada penambahan air dari atas.

Jika terdapat masukan air dari atas tangki, misalnya curah hujan untuk tangki teratas atau infiltrasi untuk tangki di bawahnya, maka rumus (2-14) dapat ditulis sebagai berikut:

$$p(t) = q = \frac{dh}{dt} \quad (2-15)$$

dimana:

$$p(t) = \text{curah hujan atau infiltrasi dari tangki atas.}$$

Penyesuaian rumus (2-15) adalah sebagai berikut:

$$q(t) = \int_0^{\infty} p(t - \tau) \lambda e^{-\lambda \tau} d\tau \quad (2-16)$$

Persamaan (2-16) adalah tidak lain merupakan integral konvolusi yang digunakan untuk menghitung hidrograf satuan. Dengan kata lain perhitungan limpasan menurut metoda hidrograf satuan adalah analog dengan perhitungan limpasan dari salah satu tangki dalam model tangki.

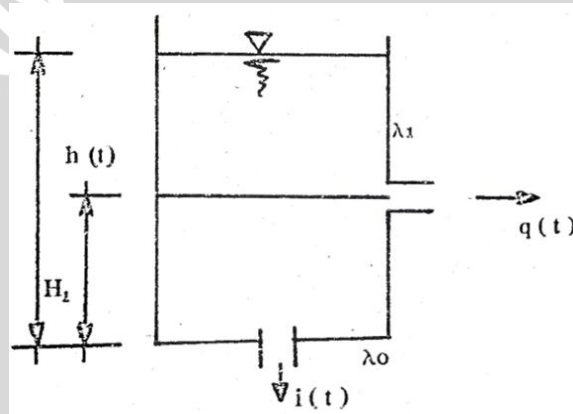
Meninjau dengan lubang pada ketinggian  $H_1$  di atas dasar tangki (Gambar 2.8). Tangki tersebut tidak akan mengalirkan air sebelum tinggi air melewati  $H_1$ , tetapi hanya

terjadi infiltrasi saja lewat lubang di dasar tangki. Oleh karena itu  $H_1$  merupakan kehilangan permulaan (*initial loss*) atau kekurangan retensi kelengasan (*moisture*) dari tanah. Tangki semacam itu sering digunakan untuk tangki teratas dan tangki kedua. Hal ini menunjukkan gejala sebagai berikut:

- Curah hujan dengan intensitas tinggi meskipun dengan durasi pendek akan menyebabkan limpasan permukaan.
- Curah hujan dengan durasi panjang meskipun dengan intensitas rendah akan menaikkan infiltrasi dan dengan demikian akan menaikkan retensi kelengasan tanah (*soil moisture*).

Hubungan antara  $q(t)$  dan  $i(t)$  dengan  $h(t)$  dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} q(t) &= (h(t) - H_1) \lambda_1 \\ i(t) &= h(t) \lambda_0 \end{aligned} \quad (2-17)$$



Gambar 2.8 Tangki

Sumber: Soemarto (1987:475)

Dengan syarat  $h(t) > H_1$ . Dari hukum kontinuitas diperoleh:

$$p(t) - q(t) - i(t) = \frac{dh}{dt} \quad (2-18)$$

penyelesaian persamaan (2-25) terhadap  $q(t)$  dan  $i(t)$  jika  $p(t) = 0$  adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} q(t) &= \lambda_1 e^{-(\lambda_0 + \lambda_1)t} - \frac{\lambda_0 \lambda_1 H_1}{\lambda_0 + \lambda_1} \\ i(t) &= \lambda_0 e^{-(\lambda_0 + \lambda_1)t} + \frac{\lambda_0 \lambda_1 H_1}{\lambda_0 + \lambda_1} \end{aligned} \quad (2-19)$$

jika  $p(t) \neq 0$

$$\begin{aligned} q(t) &= \frac{\lambda_1}{\lambda_0 + \lambda_1} K(t) - \frac{\lambda_0 \lambda_1 H_1}{\lambda_0 + \lambda_1} \\ i(t) &= \frac{\lambda_1}{\lambda_0 + \lambda_1} K(t) + \frac{\lambda_0 \lambda_1 H_1}{\lambda_0 + \lambda_1} \end{aligned} \quad (2-20)$$

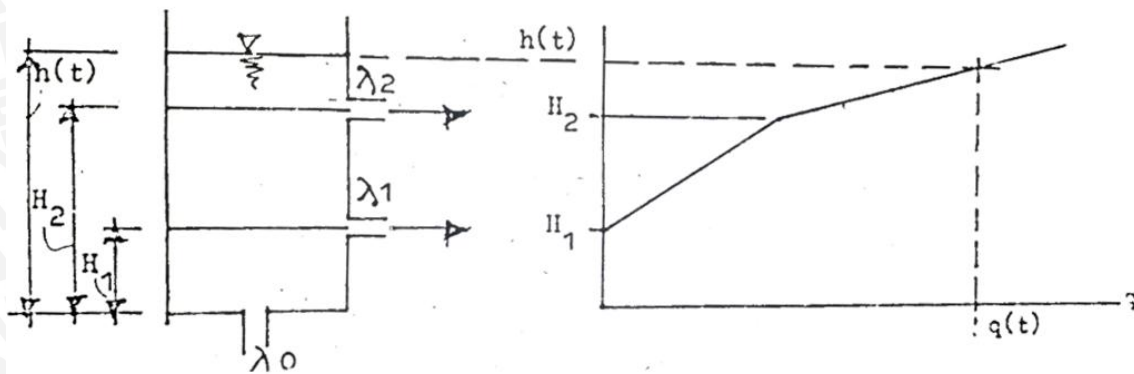
dimana:

$$K(t) = \int_0^{\infty} p(t - \tau) (\lambda_0 + \lambda_1) e^{-(\lambda_0 + \lambda_1)\tau} + d\tau \quad (2-21)$$

Persamaan (2-19) dan (2-20) menunjukkan bahwa limpasan  $q(t)$  dan infiltrasi  $i(t)$  mempunyai koefisien pengurangan (*diminishing coefficient*) yang ditulis sebagai fungsi eksponensial jumlah  $\lambda_0 + \lambda_1$ .

Pada tangki yang berlubang 2 buah pada dinding kanan tangki dengan konstanta lubang masing-masing  $\lambda_1$  dan  $\lambda_2$ , serta  $h(t) > H_2$  dan  $H_2 > H_1$ , maka besarnya limpasan  $q_3(t)$  dan infiltrasi  $i(t)$  mempunyai *diminishing coefficient* yang ditulis dalam persamaan dimana di dalamnya terdapat faktor dari fungsi eksponensial  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$ . Dengan jalan ini, besarnya limpasan dan infiltrasi yang keluar dari tangki mempunyai *diminishing coefficient* dari fungsi eksponensial ( $\lambda_0, \lambda_0 + \lambda_1, \lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2, \dots$ ) yang akan bertambah besar dengan membesarnya tampungan. Oleh sebab itu dalam model tangki yang disusun secara seri, jumlah limpasannya dinyatakan sebagai jumlah dari fungsi eksponensial dengan *diminishing coefficient* yang berbeda-beda untuk masing-masing tangki.

Secara normal tangki yang berada di atasnya mempunyai lubang-lubang limpasan dan infiltrasi dengan konstanta yang lebih besar dibanding dengan tangki di bawahnya. Oleh karena itu selama hujan turun limpasan dari tangki yang lebih atas menjadi lebih dominan, dengan berlalunya waktu setelah hujan berhenti, tangki atas telah mengalirkan semua tampungannya dan kemudian limpasan yang berasal dari tangki yang lebih bawah berganti menjadi lebih dominan.

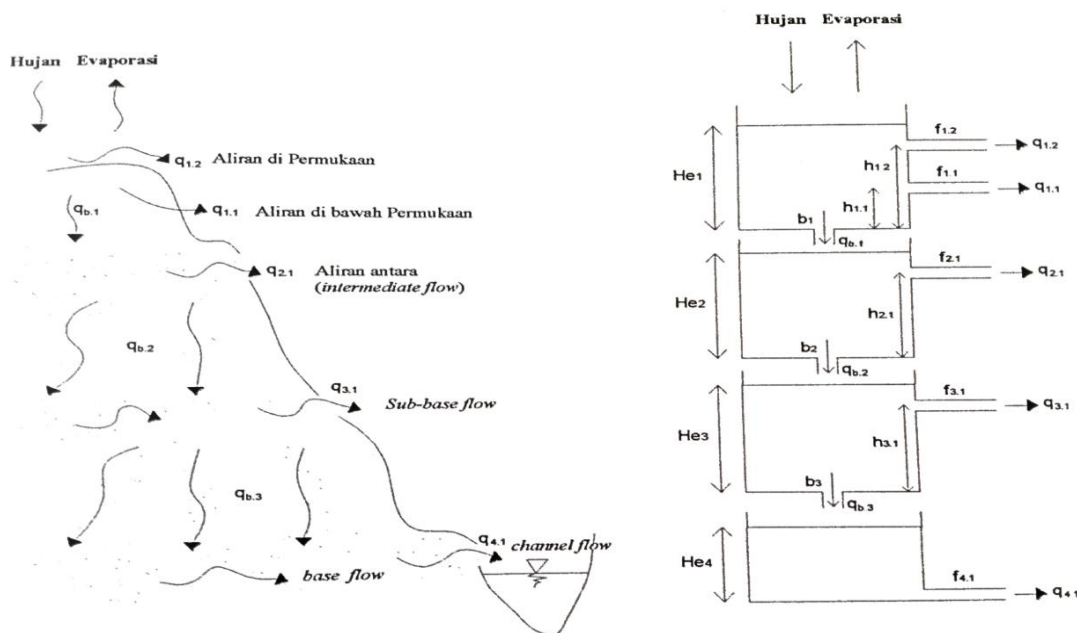


Gambar 2.9 Tangki  
Sumber: Soemarto (1987:477)

## 2.6.2 Konsep Model Tangki Sugawara

Curah hujan yang jatuh pada suatu waktu  $R(t)$  akan mengisi tangki teratas (tangki 1). Air yang tertampung oleh tangki 1 mengalir lewat lubang-lubang di dinding kanan atau merembes lewat lubang dasar tangki dan masuk mengisi tangki 2. Air yang tertampung di dalam tangki 2 mengalir lewat lubang di dinding kanan atau merembes melalui lubang dasar tangki dan masuk tangki 3 dalam tahap ke-tiga. Air yang tertampung di dalam tangki 3 mengalir lewat lubang di dinding kanan atau merembes melalui lubang dasar tangki dan masuk tangki 4 dalam tahap ke-empat.

Dengan melihat tangki-tangki dalam model dan membandingkan dengan komponen-komponen limpasan, maka tangki 1 merupakan aliran permukaan (*surface flow*) dan *sub-surface flow*, tangki 2 merupakan aliran antara (*intermediate flow*), tangki 3 merupakan aliran sub-dasar (*sub-base flow*) tangki 4 merupakan aliran dasar (*base flow*) seperti tercantum pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Bagan Pengaliran Sungai dan Pemodelan Tangki Susunan Seri  
Sumber: Setiawan (2003:2)

Suatu tangki bisa mempunyai *outlet* samping yang merupakan limpasan permukaan (*run off*), *outlet* bawah yang merupakan infiltrasi dan komponen tampungan itu sendiri. Tangki ini memodelkan proses limpasan permukaan daripada sebagian ataupun seluruh daerah tangkapan. Komponen satu tangki dari model tangki dapat dilihat pada gambar 2.11.

Parameter yang standar dari model tangki Sugawara antara lain terdiri dari:

1. Angka simpanan awal dari tiap tangki ( $He_i$ )
2. Faktor pengali atau koefisien dari lubang keluaran samping ( $f_i$ ) dan bawah ( $b_i$ )
3. Tinggi lubang keluaran samping ( $h_i$ )

Per debit yang keluar dari masing-masing *outlet* adalah:

1. Tangki I:

$$q_{1.2(t)} = f_{1.2} \times (He_{1(t-1)} + R_{(t)} - Et_{0(t)} - h_{1.2}) \quad (2-22)$$

$$q_{1.1(t)} = f_{1.1} \times (He_{1(t-1)} + R_{(t)} - Et_{0(t)} - h_{1.1}) \quad (2-23)$$

$$qb_{1(t)} = b_1 \times (He_{1(t-1)} + R_{(t)} - Et_{0(t)}) \quad (2-24)$$

$$He_{1(t)} = (He_{1(t-1)} + R_{(t)} - Et_{0(t)} - q_{1.2(t)} - q_{1.1(t)} - qb_{1(t)}) \quad (2-25)$$

2. Tangki II:

$$q_{2.1(t)} = f_{2.1} \times (He_{2(t-1)} + qb_{1(t)} - h_{2.1}) \quad (2-26)$$

$$qb_{2(t)} = b_2 \times (He_{2(t-1)} + qb_{1(t)}) \quad (2-27)$$

$$He_{2(t)} = (He_{2(t-1)} + qb_{1(t)} - h_{2.1}) \quad (2-28)$$

3. Tangki III:

$$q_{3.1(t)} = f_{3.1} \times (He_{3(t-1)} + qb_{2(t)} - h_{3.1}) \quad (2-29)$$

$$qb_{3(t)} = b_3 \times (He_{3(t-1)} + qb_{2(t)}) \quad (2-30)$$

$$He_{3(t)} = (He_{3(t-1)} + qb_{2(t)} - q_{3.1(t)} - qb_{3(t)}) \quad (2-31)$$

4. Tangki IV:

$$q_{4.1(t)} = f_{4.1} \times (He_{4(t-1)} + qb_{3(t)}) \quad (2-32)$$

$$qb_{4(t)} = b_4 \times (He_{4(t-1)} + qb_{3(t)}) \quad (2-33)$$

$$He_{4(t)} = (He_{4(t-1)} + qb_{3(t)} - q_{4.1(t)}) \quad (2-34)$$

$$Q = \sum q_i \quad (2-35)$$

Dengan:

$q_i$  = debit yang keluar dari lubang samping I (mm/hr)

$qb_i$  = debit yang keluar dari lubang bawah I (mm/hr)

$h_i$  = tinggi muka air dari lubang I (mm)

$He_i$  = tinggi air simpanan awal dari tangki I (mm)

$f_i$  = koefisien lubang samping I (hari<sup>-1</sup>)

$b_i$  = koefisien lubang bawah I (hari<sup>-1</sup>)

$Q$  = debit yang keluar dari lubang I (m<sup>3</sup>/dtk)

$A$  = Luas DAS (km<sup>2</sup>)

### 2.6.3 Keuntungan dan Kerugian Penerapan Model Tangki

Keuntungan adalah:

1. Metoda ini meninjau kehilangan mula, curah hujan dan hubungannya dengan distribusi waktu curah hujan.
2. Metoda ini meninjau adanya non linearitas dari limpasan.
3. Debit yang dihitung dengan metoda ini terdiri atas komponen-komponen, misalnya limpasan permulaan, limpasan air tanah tahap satu, limpasan air tanah tahap dua dan seterusnya.
4. Pemindahan tampungan dari tangki yang lebih atas ke tangki yang lebih bawah memberikan penundaan waktu limpasan secara otomatis.
5. Metoda ini mempunyai karakteristik umum dengan metoda perhitungan limpasan yang lain, seperti cara hidrograf satuan, metoda fungsi tampungan dan metoda fungsi limpasan.
6. Dalam pelaksanaan perhitungan hanyalah dengan melakukan perkalian, penjumlahan dan pengurangan.

Kerugiannya adalah:

1. Metoda ini non linear, sehingga tidak mungkin mendapatkan koefisien-koefisien secara matematik. Cara mendapatkannya dilakukan dengan cara coba-coba, sehingga menyita banyak waktu.
2. Model ini mempunyai banyak koefisien.
3. Metoda ini tidak dipakai untuk penelusuran banjir.

### 2.7 Metode Perbandingan Luas

Pada metode perbandingan Luas, konsep yang dipakai adalah metode rasional, antara lain:

$$Q = C.I.A \quad (2-36)$$

Jika dibandingkan antara 2 DAS, maka didapat perbandingan sebagai berikut:

$$\frac{Q_I = C_I \cdot I_I \cdot A_I}{Q_I = C_I \cdot I_I \cdot A_I} \quad (2-37)$$

Dengan:

- $Q_I$  = debit DAS I ( $m^3/dt$ )
- $Q_{II}$  = debit DAS II ( $m^3/dt$ )
- $C_I$  = koefisien pengaliran DAS I
- $C_{II}$  = koefisien pengaliran DAS II

- $I_I$  = intensitas hujan DAS I  
 $I_{II}$  = intensitas hujan DAS II  
 $A_I$  = luas DAS I  
 $A_{II}$  = luas DAS II

## 2.8 Korelasi Debit

Suatu analisis yang membahas tentang derajat asosiasi dalam analisis regresi disebut dengan analisis korelasi (*correlation analysis*). Derajat hubungan tersebut umumnya dinyatakan secara kuantitatif sebagai koefisien korelasi (*correlation coefficient*) yaitu  $R$  dan koefisien determinasi yaitu  $R^2$ . Nilai koefisien korelasi yang tinggi tidak berarti menunjukkan kesamaan kejadian fenomena hidrologi (*hydrological similarity*) akan tetapi lebih cenderung menunjukkan kesamaan waktu kejadian atau keserempakan kejadian fenomena hidrologi. Nilai koefisien korelasi berkisar antara  $-1,0 \leq R \leq 1,0$ . Nilai ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

- $R = 1$  hubungan positif sempurna  
 $0,6 < R < 1$  hubungan langsung positif baik  
 $0 < R < 0,6$  hubungan langsung positif lemah  
 $R = 0$  tidak terdapat hubungan linier  
 $0,6 < R < 0$  hubungan langsung negatif lemah  
 $-1 < R < -0,6$  hubungan langsung negatif baik  
 $R = -1$  hubungan negatif sempurna

### 2.8.1 Koefisien Nash-Sutcliffe

Koefisien Nash menunjukkan tingkat ketelitian dari korelasi hubungan antara data yang terukur dan terhitung. Fungsi ini digunakan untuk mengevaluasi kesahihan model. Sebuah model yang bagus akan menghasilkan nilai koefisien Nash mendekati 1 ( $0 < N < 1$ ). Nilai koefisien Nash dirumuskan:

$$Nash - Sutcliffe = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{si} - Q_{mi})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{Q} - Q_{mi})^2} \quad (2-38)$$

Dengan:

$Q_{si}$  = run-off terhitung pada interval waktu  $i$

- $Q_{mi}$  = *run-off* terukur pada interval waktu  $i$   
 $\bar{Q}$  = *run-off* terukur rerata untuk periode yang digunakan  
 $i$  = interval waktu  
 $N$  = jumlah interval waktu

## 2.9 Metode Kalibrasi

Pada prinsipnya, metode kalibrasi yang ada dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu:

### 1. Coba-coba

Dalam hal ini, nilai parameter dicocokkan secara manual dengan cara coba-coba. Metode ini paling banyak digunakan dan direkomendasikan, khususnya untuk model yang kompleks. Dimana sebuah grafik yang bagus sudah dianggap mewakili hasil simulasi.

### 2. Otomatis

Dalam hal ini, sebuah algoritma dipakai untuk menentukan nilai fungsi objektif dan digunakan untuk mencari kombinasi dan permutasi parameter sebanyak mungkin untuk menentukan tingkat keakuratan yang optimum.

### 3. Kombinasi

Dalam hal ini, kalibrasi secara otomatis dilakukan untuk menentukan kisaran (*range*) nilai suatu parameter, selanjutnya digunakan *trial and error* untuk menentukan detail kombinasi yang optimal.

Metode kalibrasi yang banyak digunakan untuk pemodelan hujan aliran adalah metode coba-coba (*trial and error*). Hal itu disebabkan karena proses penggunaannya cukup sederhana, cepat dan membutuhkan sedikit pengalaman bagi pemodel.

Perbedaan antara hasil pengukuran dengan hasil pemodelan disebabkan oleh empat faktor, yaitu:

1. Kesalahan acak, yang dapat berasal dari data masukan, seperti hujan, suhu dan evapotranspirasi yang digunakan untuk mewakili kondisi data masukan.
2. Kesalahan acak, yang berasal dari data pengukuran, seperti debit air di sungai yang diukur oleh AWLR.
3. Kesalahan dalam penentuan nilai parameter.
4. Ketidaklengkapan data dalam struktur model.

Sumber ketidakpastian pertama dan kedua memegang peranan yang paling dominan dan menentukan tingkat penerimaan suatu model. Proses kalibrasi yang objektif



bertujuan untuk mengurangi ketidakpastian ketiga sehingga tingkat kesalahan dapat diminimalisir.

Selama proses kalibrasi, penting untuk diketahui faktor ketidakpastian mana yang paling berpengaruh sehingga tidak ada penggantian antara sumber ketidakpastian satu yang dicocokkan terhadap ketidakpastian lainnya, misalnya mengganti data yang salah dengan mencocokkan parameter. Meski demikian, kalibrasi akan menghasilkan kurva kecocokan antara data terukur dan terhitung menurut periode kalibrasi meskipun terkadang juga memberikan prediksi yang tidak sesuai. Penting juga bagi pemodel untuk melakukan pendekatan dalam menentukan model dan tidak menyandarkan konsep utama yang mewakili sistem fisik karena telah sesuai dengan formula matematis dalam pengaplikasian model yang telah digunakan sebelumnya (Refsgaard, 2000).

## **2.10 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)**

### **2.10.1 Potensi Tenaga Air di Indonesia**

Potensi tenaga air di Indonesia secara teoritis menurut hasil studi yang dilakukan pemerintah sekitar 77.854,8 MW yang tersebar di seluruh Indonesia, terutama di lima pulau besar, dengan perincian sebagai berikut (Patty, 1995):

- Pulau Jawa: 5% sebesar 4.421,6 MW
- Pulau Sumatra: 20% sebesar 15.803,5 MW
- Pulau Kalimantan: 30% sebesar 23.052,8 MW
- Pulau Sulawesi: 15% sebesar 11.378,5 MW
- Pulau Irian: 28% sebesar 22.157,4 MW
- Lain-lain 2%

### **2.10.2 Definisi PLTA**

Pembangkit Listrik Tenaga Air adalah sistem pembangkit listrik dimana air dengan debit tertentu disalurkan dari sumber air menuju ke turbin air dimana energi kinetik dikonversikan menjadi energi mekanik dan energi mekanik dikonversi melalui sebuah generator menjadi sebuah energi listrik.

### **2.10.3 Klasifikasi PLTA**

Pembangkit listrik tenaga air diperagakan secara besar-besaran dalam berbagai jenis. Hampir setiap proyek tenaga air mempunyai sesuatu yang sangat menarik perhatian,

yang tidak sebagaimana biasanya didapati di proyek-proyek lain yang sama tipenya. Akan tetapi untuk memudahkan pembahasannya perlu diadakan klasifikasi mengenai pembangkit dalam grup-grup yang berbeda. Dengan demikian suatu klasifikasi dapat dilakukan dengan berbagai cara, tergantung pada aspek istimewa yang ditinjau klasifikasinya. Jadi, pembangkit tenaga air dapat diklasifikasikan atas dasar lokasi, keadaan topografi, ada atau tidak adanya kolam penampungan, tingkatan pengoperasian tinggi jatuh air, keadaan hidrolis pembangkitnya sendiri dan sebagainya. Untuk memberi pengertian yang lengkap dari setiap jenisnya, diperlukan berbagai keterangan dari setiap kategori.

Klasifikasi PLTA pembangkit listrik menurut Dandekar dan Sharma dapat ditentukan dari beberapa faktor yakni (Dandekar, 1991:118):

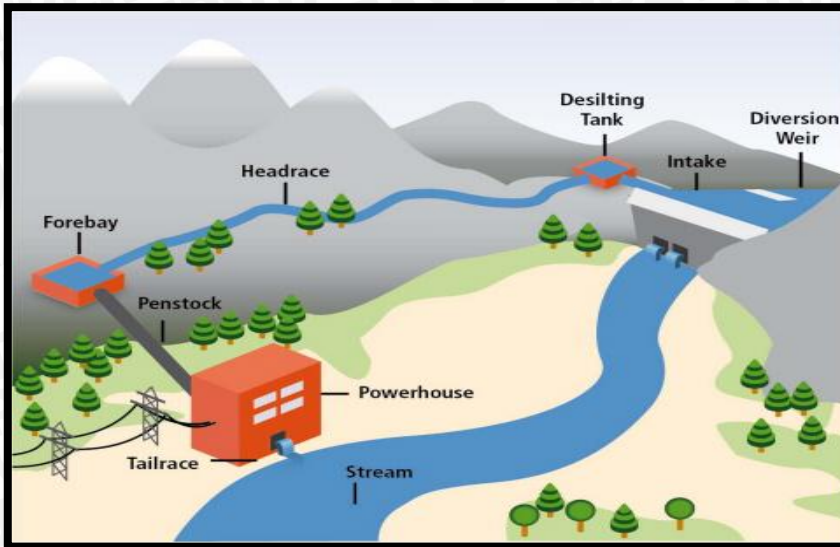
1. Klasifikasi berdasarkan tujuan:

Sudut lain yang sama pentingnya ialah, meskipun yang akan dibahas mengenai proyek pembangkit listrik tenaga air, dalam banyak hal tidaklah semudah mengadakan proyek yang bertujuan tunggal memproduksi tenaga listrik, karena secara normal biasanya proyek direncanakan mempunyai tujuan bermacam-macam. Jadi suatu proyek tunggal boleh dipertimbangkan mempunyai fungsi yang berbeda-beda, misalnya untuk suplai air, irigasi, kontrol banjir dan lain sebagainya, di samping produksi utamanya yaitu tenaga listrik.

2. Klasifikasi berdasarkan keadaan hidraulik:

Suatu dasar klasifikasi pada pembangkit listrik tenaga air adalah memperhatikan pengaruh prinsip dasar hidrolika saat perencanaannya. Ada empat jenis pembangkit listrik tenaga air yang menggunakan prinsip dasar ini, ialah:

- Pembangkit listrik tenaga air konvensional (*Run off River*). Pembangkit listrik ini menggunakan kekuatan air secara wajar yang diperoleh dari pengaliran air dan sungai.



Gambar 2.12 PLTA *Run of River*

Sumber: Kumar and Schei (2011:451)

- Pembangkit listrik dengan pemompaan kembali air ke kolam penampungan. Dengan demikian pembangkit mempergunakan konsep perputaran kembali air yang sama dengan mempergunakan pompa, yang dilakukan saat pembangkit melayani permintaan tenaga listrik yang tidak begitu berat. Setiap pembangkit dibangun di atas tanah yang luas di berbagai bagian dunia ini, sebagian besar di antaranya telah selesai dibangun di negara-negara seperti Amerika, Perancis dan Jepang.
- Pembangkit listrik tenaga air pasang surut. Hanya sedikit pembangkit jenis ini, seperti *La rance* di Perancis yang telah dioperasikan dengan mempergunakan tenaga air pasang surut yang luar biasa besarnya.
- Pembangkit listrik tenaga air yang ditekan. Pembangkit ini merupakan jenis yang jarang dijumpai diantara jenis-jenis PLTA. Di sini tenaga air digunakan secara umum, dengan mengalihkan air dari sebuah sumber air yang besar, seperti air laut yang masuk ke sebuah penurunan topografis yang alamiah, yang didistribusikan dalam pengoperasian ketinggian tekanan air untuk membangkitkan tenaga listrik. Tingkatan ketinggian air akibat penurunan dikontrol terhadap proses penguapan alam.

### 3. Klasifikasi dasar mengenai lokasi dan topografi:

Instalasi pembangkit listrik tenaga air dapat berlokasi di daerah pegunungan atau dataran. Biasanya pembangkit listrik di daerah pegunungan bangunan utamanya merupakan bendungan, sedang pembangkit listrik di daerah yang datar bangunan utamanya berupa tanggul. Di daerah dataran, biasanya sungainya lebar, dengan banjir besar di daerah tanah yang datar dan mungkin membutuhkan kerja perubahan sungai yang lama.

Pembangkit yang lokasinya jauh di pedalaman berarti jauh dari beban utama di pusat, berarti biaya pengiriman muatan listrik relatif lebih mahal daripada proyek-proyek di dekat kota.

4. Klasifikasi berdasarkan kapasitas PLTA:

- Kapasitas kecil ( $< 5\text{MW}$ )
- Kapasitas menengah ( $5 - 100\text{ MW}$ )
- Kapasitas tinggi ( $101 - 1000\text{MW}$ )
- Kapasitas paling tinggi ( $> 1000\text{MW}$ )

5. Klasifikasi berdasarkan ketinggian tekanan air:

- Tekanan air rendah ( $< 15\text{ m}$ )
- Tekanan air menengah ( $15 - 70\text{ m}$ )
- Tekanan air tinggi ( $71 - 250\text{ m}$ )
- Tekanan air sangat tinggi ( $> 250\text{ m}$ )

6. Klasifikasi berdasarkan bangunan utama:

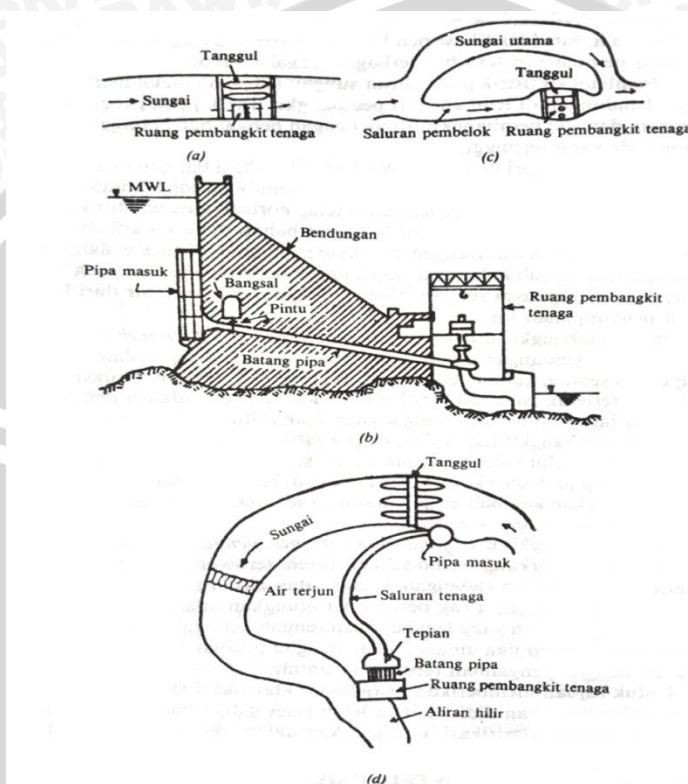
- Pembangkit listrik pada aliran sungai
- Pembangkit listrik dengan bendungan di lembah
- Pembangkit listrik pada pengalihan terusan
- Pembangkit listrik dengan pengalihan ketinggian tekanan air yang tertinggi

Tiap-tiap kategori difokuskan atas lokasi bangunan utama. Pembangkit listrik pada aliran sungai, pemilihan lokasi utama itu harus menjamin bahwa pengalirannya tetap normal, atau tepatnya aliran dari sungai tidak mengganggu bahan-bahan material konstruksi pembangkit listrik itu. Dengan demikian pembangkit listrik walaupun mempunyai sebuah kolam cadangan untuk penyimpanan air yang besar, juga mempunyai sebuah saluran pengaturan jalannya air dari kolam penyimpanan itu.

Pada pembangkit listrik dengan bendungan yang terletak di lembah, maka bendungan itu merupakan lokasi yang utama dalam menciptakan sebuah kolam penampung cadangan air dan konstruksi bangunan terletak pada sisi tanggul itu. Tidak terlihat adanya penyimpangan jalannya air dari sungai yang utama.

Pada pembangkit listrik dengan pengalihan terusan, aliran sungai dialihkan melalui sebuah terusan ke konstruksi bangunan yang lokasinya cukup jauh dari kolam penyimpanan. Air dari lokasi bangunan itu dikeringkan kembali ke dalam sungai semula, dengan suatu pengalihan aliran air saat dini hari.

Pada pembangkit listrik tenaga air dengan pengalihan ketinggian, tekanan air dialirkan melalui sebuah sistem terowongan dan terusan yang menuju kolam cadangan di atas atau aliran arus lain melalui lokasi bangunan. Yang perlu diperhitungkan adalah adanya sistem pemberitahuan yang lengkap dan sebuah ketinggian tekanan air yang relatif tinggi jika dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga air dengan pengalihan terusan aliran air.



Gambar 2.12. Tipe Kekuatan Instalasi Pembangkit Tenaga Air. (a) Aliran dari Sungai, (b) Pembelokan Terusan, (c) Bendungan di Lembah. (d) Penyimpanan/pembelokan Tekanan Air Tinggi.

Sumber: Dandekar (1991:124)

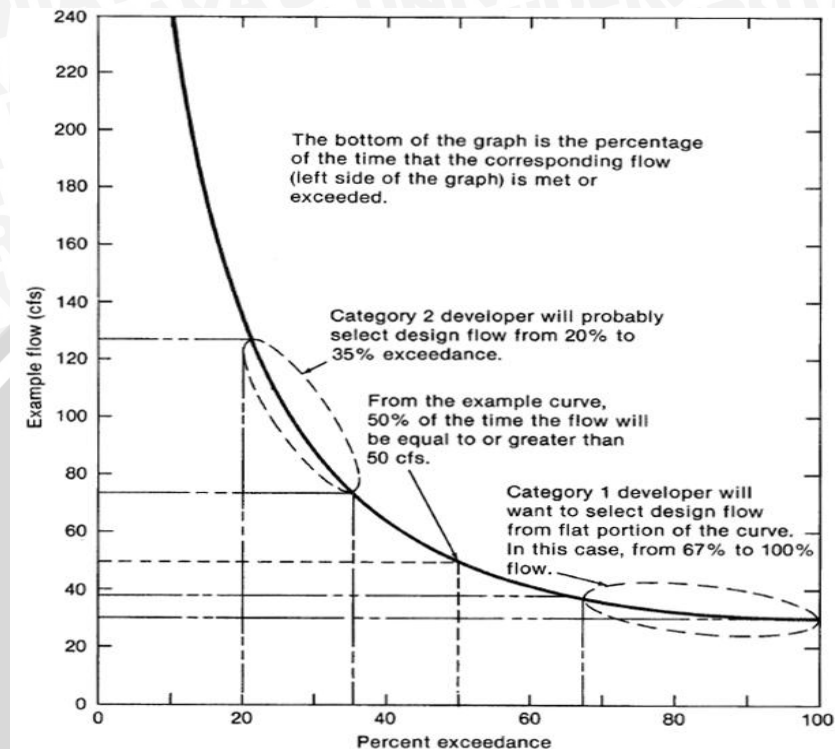
## 2.11 Menentukan Aliran Tersedia

Aliran yang tersedia adalah aliran yang dapat digunakan dalam sistem PLTA untuk menghasilkan listrik. Aliran tersedia untuk menghasilkan listrik bervariasi sebagai aliran yang bervariasi.

### 2.11.1 Kurva Durasi Aliran

Untuk menentukan aliran tersedia, insinyur menggunakan metode statistik untuk kegiatan proyek aliran masa mendatang dari catatan aliran sungai masa lampau. Produk akhir dari studi hidrologi tersebut adalah kurva durasi aliran. Kurva diplot pada kertas grafik standard dan menunjukkan pola rata-rata aliran. Aliran yang tersedia dapat ditentukan dari pola aliran ini. Gambar 2.14. adalah contoh dari kurva durasi aliran. Di sisi

kiri menunjukkan besar debit dan di bagian bawah grafik menunjukkan persentase terlampaui. Misalnya, nilai aliran ditampilkan pada kurva 50% adalah 50 m<sup>3</sup>/dt, yang berarti bahwa untuk contoh ini aliran akan sama atau melebihi 50 m<sup>3</sup>/dt pada persentase 50% dari waktu selama aliran rata-rata tahunan.



Gambar 2.13 *Flow Duration Curve*

Sumber: U.S. Department of Energy (1983:3-14)

Sejak kategori 1, U.S. Department of Energy tertarik pada periode aliran rendah dari tahun ini, porsi datar dekat bagian bawah kurva adalah kepentingan tertentu kepada mereka. Kategori 2, pengembang biasanya tertarik pada arus antara 20 sampai 35% terlampaui. Aliran desain yang paling ekonomis untuk kategori 2, pengembang biasanya di kisaran 25% terlampaui. Aliran desain adalah aliran yang tersedia dipilih untuk digunakan dalam ukuran *microhydropower*.

Debit andalan adalah debit yang tersedia sepanjang tahun dengan besarnya resiko kegagalan tertentu. Menurut pengamatan dan pengalaman, besarnya debit andalan untuk keperluan PLTA sebesar 85 – 90%. Untuk PLTA umumnya dipakai peluang 97,3% karena dalam 1 tahun biasanya turbin dan generator akan mengalami turun mesin (*overhaul*) selama 10 hari. Tingkat keandalan debit tersebut dapat terjadi, berdasarkan probabilitas kejadian mengikuti rumus *Weibull*:

$$P = \frac{i}{(n+1)} \times 100\% \quad (2-39)$$

Dimana:

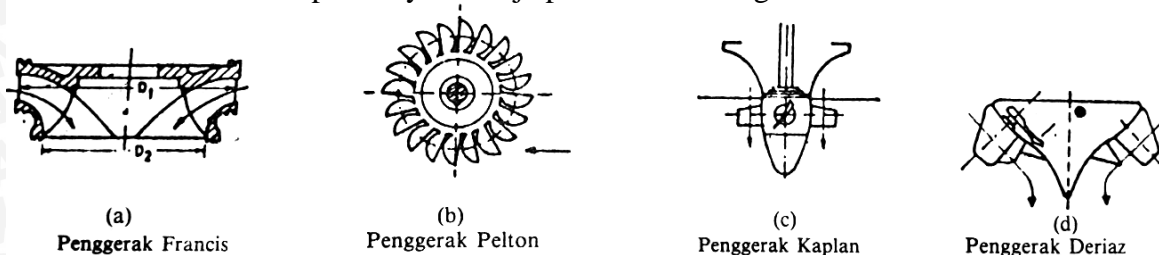
- $i$  = nomor urut debit
- $n$  = jumlah data
- $P$  = probabilitas terjadinya kumpulan nilai yang diharapkan selama periode pengamatan (%)

## 2.12. Turbin

Turbin air adalah suatu sistem pembangkit tenaga yang mengkonversikan energi air menjadi energi mekanis. Sebelum fluida (cair) memasuki turbin di dalam salurannya terjadi perubahan dari *head* ketinggian menjadi *head* kecepatan atau energi potensial menjadi energi kinetis. Perubahan energi potensial menjadi kinetis tidak hanya terjadi dalam saluran air memasuki turbin, tetapi yang utama terjadi di dalam turbin melalui mulut pipa pemancar (*nozzles*).

Selanjutnya energi kinetis berpindah menjadi energi mekanis pada poros turbin melalui mekanisme perubahan momentum. Gaya dari perubahan momentum aliran terhadap sudu turbin yang bekerja pada jarak tertentu dari sumbu poros mengakibatkan terjadinya torsi yang menghasilkan daya turbin. Mekanisme semacam ini berlangsung pada turbin impuls atau turbin aksi. Dengan kata lain bahwa pada turbin impuls, kerja poros turbin (momen putar) yang terjadi diakibatkan secara langsung oleh perubahan momentum yang mengakibatkan terjadinya impuls. Sedangkan pada turbin reaksi, momen putar yang terjadi tidak semata-mata terjadi oleh perubahan momentum dan gaya impuls, tetapi juga dipengaruhi oleh adanya gaya-gaya reaksi.

Pada roda turbin terdapat sudu-sudu yang bergerak sesuai dengan gerakan roda, yang berfungsi untuk menerima momentum dari fluida kerja atau air. Gaya-gaya yang memutar roda turbin sepenuhnya bekerja pada sudu-sudu gerak.



Gambar 2.14 Penggerak/pemutar dari Berbagai Macam Turbin

Sumber: Dandekar (1991:393)

### 2.12.1. Pemilihan Turbin Berdasarkan Tinggi Tekan

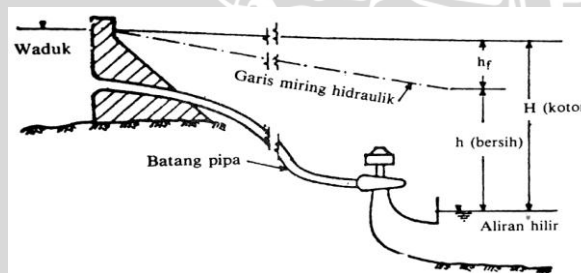
Perbedaan kemiringan (elevasi) dari muka air antara hulu dan hilir dari turbin adalah tinggi tekan (*head*), di bawah tinggi tekan tersebut turbin berfungsi. Dimana tidak ada muka air bebas, perbedaan antara jumlah seluruh tenaga pada kedua sisi turbin, memberikan suatu ketinggian. Turbin bekerja di bawah suatu wilayah yang luas dengan tinggi tekan dari 2 meter sampai 2.000 meter. Berdasarkan wilayah tersebut, diadakan penggolongan turbin sebagai berikut:

Tabel 2.8. Daerah Operasi Turbin

Tinggi Tekan	Variasi Head (m)
Tinggi tekan rendah	2- 15 m
Tinggi tekan sedang	16 – 70 m
Tinggi tekan tinggi	71 – 500 m
Tinggi tekan sangat tinggi	>500 m

Sumber: Dandekar (1991:394)

Dasar dari penggolongan ini, dapat dikatakan bahwa untuk tinggi tekan rendah hanya turbin *Baling/Kaplan*. Untuk tinggi tekan menengah, selain turbin Kaplan dapat dipergunakan juga turbin Francis. Untuk tinggi tekan tinggi, dipergunakan turbin Francis atau Pelton. Untuk tinggi tekan sangat tinggi, dipergunakan turbin Pelton dengan berbagai macam penyesuaian. Untuk tinggi tekan >500 m dipergunakan turbin Deriaz, tetapi pemakaiannya terbatas di bawah keadaan aliran balik (*reversible flow*).



Gambar. 2.15 Tinggi Tekan pada Turbin

Sumber: Dandekar (1991:395)

### 2.12.2. Kriteria Pemilihan Jenis Turbin

Pemilihan jenis turbin dapat ditentukan berdasarkan kelebihan dan kekurangan dari jenis-jenis turbin, khususnya untuk suatu desain yang sangat spesifik. Pada tahap awal, pemilihan jenis turbin dapat diperhitungkan dengan mempertimbangkan parameter-parameter khusus yang mempengaruhi sistem operasi turbin, yaitu:



- Faktor tinggi jatuh air efektif (*Net Head*) yang akan dimanfaatkan untuk operasi turbin merupakan faktor utama yang mempengaruhi pemilihan jenis turbin.
- Faktor daya (*power*) yang diinginkan berkaitan dengan *head* dan debit yang tersedia.
- Kecepatan (putaran) turbin yang akan ditransmisikan ke generator. Sebagai contoh untuk sistem transmisi *direct couple* antara generator dengan turbin pada *head* rendah, sebuah turbin reaksi (propeller) yang dapat mencapai putaran yang diinginkan, sementara turbin pelton dan crossflow berputar sangat lambat (*low speed*) yang akan menyebabkan sistem tidak beroperasi.

Tabel 2.9. Jenis turbin berdasarkan head, debit, daya dan kecepatan spesifik

Hydraulic Turbines		H (m)	Q (m <sup>3</sup> /dt)	P (kW)	N <sub>s</sub> (r.p.m.)(kW,m)
Reaction	Bulb	2 – 10	3- 40	100 - 2500	200 – 450
	Kaplan and properller – axial flow	2 - 20	3 - 50	50 - 5000	250 – 700
	Francis with high specific speed – diagonal flow	10 - 40	0,7 - 10	100 - 5000	100 – 250
	Francis with low specific speed – radial flow	40 - 200	1 - 20	500 - 15000	30 – 100
Impulse	Pelton	60 - 1000	0,2 - 5	200 - 15000	<30
	Turgo	30 - 200		100 – 6000	
	Cross-flow	2 - 50	0,01 – 0,12	2 - 15	

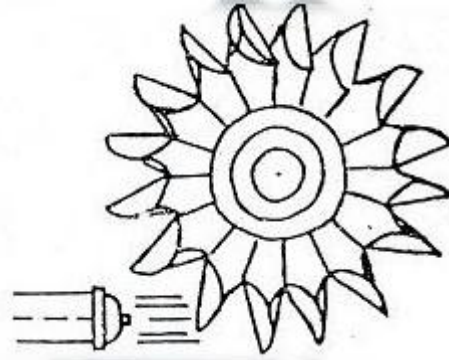
Sumber: Ramos (2000:82)

### 2.12.3. Turbin Berdasarkan Model Aliran Air Masuk *Runner*

Berdasarkan model aliran air masuk *runner*, maka turbin dapat dibagi menjadi tiga tipe yaitu:

- Turbin Aliran Tangensial

Pada kelompok turbin ini posisi air masuk runner dengan arah tangensial atau tegak lurus dengan poros runner mengakibatkan runner berputar, contohnya turbin Pelton dan turbin Cross-flow.

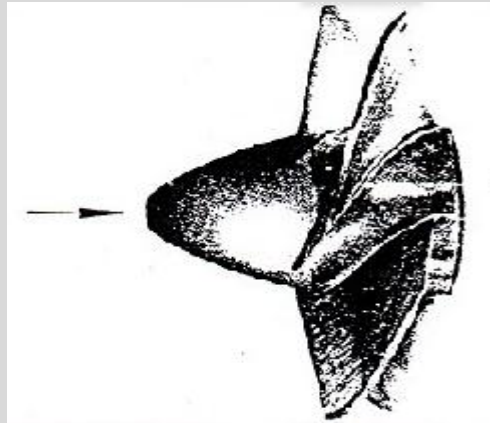


Gambar 2.16 Turbin Aliran Tangensial

Sumber: Haimerl (1960)

b. Turbin Aliran Aksial

Pada turbin ini air masuk runner dan keluar runner sejajar dengan poros runner, turbin Kaplan atau Propeller adalah salah satu contoh dari tipe turbin ini.

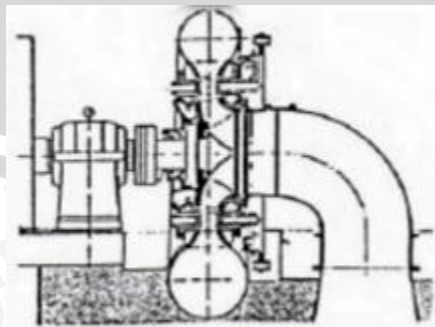


Gambar 2.17 Turbin Aliran Aksial

Sumber: Haimerl (1960)

c. Turbin Aliran Aksial – Radial

Pada turbin ini air masuk ke dalam runner secara radial dan keluar runner secara aksial sejajar dengan poros. Turbin Francis adalah termasuk dari jenis turbin ini.



Gambar 2.18 Turbin Aliran Aksial – Radial

Sumber: Haimerl (1960)

#### 2.12.4. Macam-macam Turbin

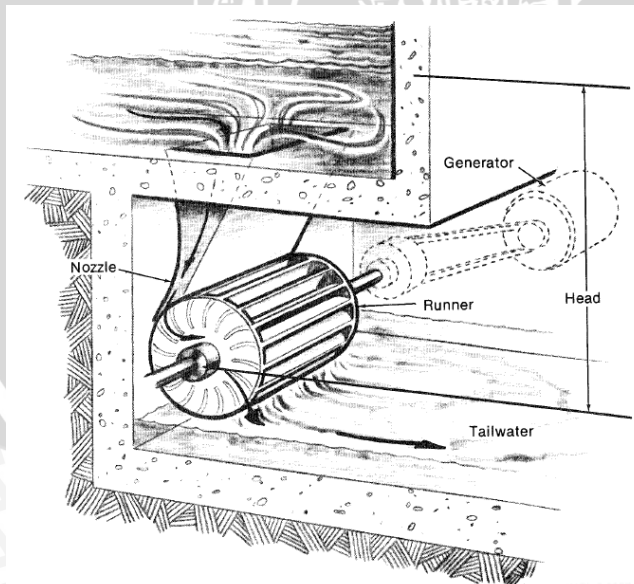
##### a. Turbin Impuls (Crossflow, Pelton, Turgo)

Turbin ini dibuat sedemikian sehingga rotor (*runner*) bekerja karena aliran air, di sini beda tinggi diubah menjadi kecepatan karena perbedaan tinggi, yang khas dari jenis ini adalah turbin pelton, dengan pasangan ember-ember (*buckets*) pada keliling luar rotor yang bekerja karena pancaran air (*jet discharge*) dari mulutnya (*nozzle*).

##### b. Turbin *Crossflow*

Berbeda dengan jenis turbin lainnya dengan aliran aksial atau radial, pada turbin aliran silang air dilewatkan turbin secara transversal. Seperti pada kincir air lainnya, air dilewatkan melalui tepi kincir melewati silinder pusat dan keluar melewati tepi kincir berbeda. Ketika air melewati silinder pusat, air dapat membersihkan silinder dari kotoran dan polusi. Tipe kincir ini mempunyai kecepatan mesin rendah.

Turbin aliran silang (*Crossflow*) ini biasanya terdiri dari dua turbin yang mempunyai kapasitas yang berbeda. Kincir turbin mempunyai diameter yang sama namun mempunyai panjang yang berbeda, untuk mempertahankan perbedaan volume pada tekanan yang sama. Turbin ini biasanya menghasilkan volume rasio 1:2. Efisiensi total dari jenis turbin ini lebih rendah jika dibandingkan dengan turbin Kaplan, Francis dan Pelton. Namun turbin ini mempunyai kurva efisiensi mendatar di bawah beban yang bervariasi.



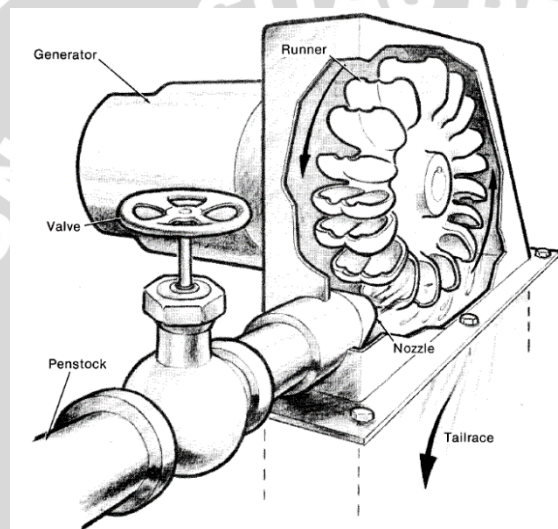
Gambar 2.19 Turbin *Crossflow*

Sumber: U.S. Department of Energy (1983:4.1-5)

### c. Turbin Pelton

Turbin pelton adalah turbin untuk tinggi terjun yang tinggi, yaitu di atas 300 meter. Teknik mengkonversikan energi potensial air menjadi energi mekanik pada roda air turbin dilakukan melalui proses impuls sehingga turbin pelton juga disebut sebagai turbin impuls.

Bentuk sudu turbin terdiri dari dua bagian yang simetris. Sudu dibentuk sedemikian sehingga pancaran air akan mengenai tengah-tengah sudu dan pancaran air tersebut akan berbelok kedua arah sehingga bisa membalikkan pancaran air dengan baik dan membebaskan sudu dari gaya samping. Untuk turbin dengan daya yang besar, sistem penyemprotan airnya dibagi lewat beberapa *nozzle*. Dengan demikian diameter pancaran air bisa diperkecil dan ember sudu lebih kecil.

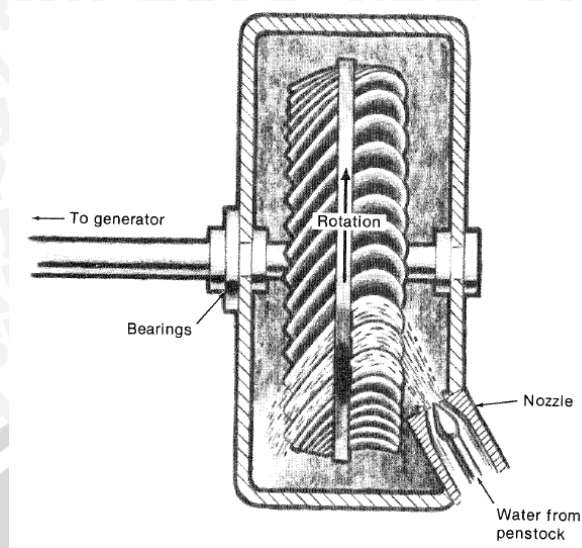


Gambar 2.20 Turbin Pelton

Sumber: U.S. Department of Energy (1983:4.1-1)

### d. Turbin Turgo

Turbin turgo dapat beroperasi pada *head* 30 sampai 300 meter. Seperti turbin pelton, turbin turgo merupakan turbin impulse tetapi sudunya berbeda.. pancaran air dari *nozzle* membentuk sudu pada sudut 20°. Kecepatan putar turbin turgo lebih besar dari turbin pelton. Akibatnya dimungkinkan transmisi langsung dari turbin ke generator sehingga menaikkan efisiensi total sekaligus menurunkan biaya perawatan.



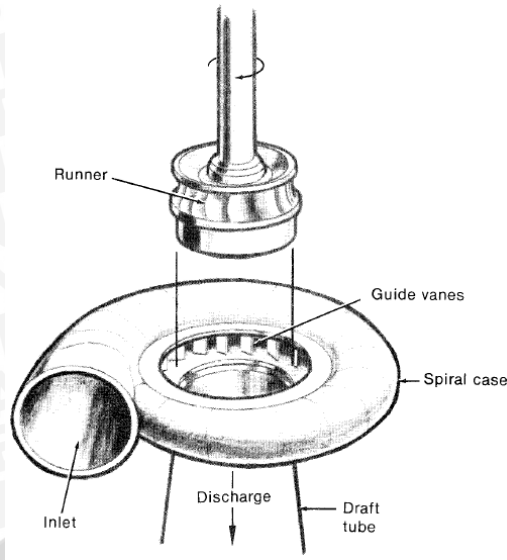
Gambar 2.21 Turbin Turgo

Sumber: U.S. Department of Energy (1983:4.1-6)

#### e. Turbin Francis

Turbin francis merupakan salah satu turbin reaksi. Turbin dipasang diantara sumber air tekanan tinggi di bagian masuk dan air bertekanan rendah di bagian keluar. Turbin francis menggunakan sudu pengarah, sudu pengarah mengarahkan air masuk secara tangensial dan dapat diatur sudutnya. Untuk penggunaan pada berbagai kondisi aliran air penggunaan sudu pengarah yang dapat diatur merupakan pilihan yang tepat.

Turbin francis paling banyak digunakan di Indonesia. Turbin ini digunakan untuk tinggi terjun air sedang, yaitu 20-400 meter. Teknik mengkonversikan energi potensial air menjadi energi mekanik pada roda air turbin dilakukan melalui proses reaksi sehingga turbin francis juga disebut turbin reaksi.



Gambar 2.22 Turbin Francis

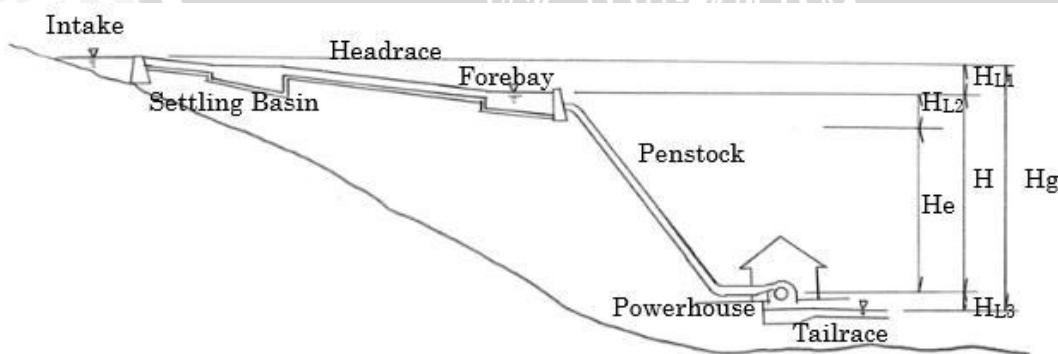
Sumber: U.S. Department of Energy (1983: 4.1-7)

f. Turbin Kaplan

Turbin kaplan digunakan untuk tinggi terjun yang rendah, yaitu di bawah 20 meter. Teknik mengkonversikan energi potensial air menjadi energi mekanik pada roda air turbin dilakukan melalui pemanfaatan kecepatan air, roda air turbin menyerupai baling-baling dari kipas angin. Turbin kaplan dan Propeler merupakan turbin reaksi aliran aksial. Turbin ini tersusun dari propeller seperti pada perahu. Propeller tersebut biasanya mempunyai tiga hingga enam sudu.

2.13. Analisa Perhitungan Tinggi Jatuh Efektif

Kehilangan tinggi (*head losses*) digambarkan pada gambar di bawah.  $H_{L1}$  diperhitungkan dari perbedaan *water level* intake ke *forebay* (*head pond*).  $H_{L3}$  dihitung dari perbedaan *water level* dari turbin ke *tailrace*.



Gambar 2.23 Skema Tinggi Jatuh pada Bangunan PLTA

Sumber: Anonim (2014:5-2)



$$H_e = H_g - (H_{L1} + H_{L2} + H_{L3}) \quad (2-40)$$

Dimana:

$H_e$  = Head efektif

$H_g$  = gross head

$H_{L1}$  = kehilangan waterway

$H_{L2}$  = kehilangan di penstock

$H_{L3}$  = kehilangan di turbin dan tailrace

#### 2.14. Perhitungan Daya dan Energi Listrik

Pembangkitan tenaga air adalah suatu bentuk perubahan tenaga dari tenaga air dengan ketinggian dan debit tertentu menjadi tenaga listrik, dengan menggunakan turbin air dan generator.

Daya dan energi listrik dalam hubungannya dengan debit dapat dirumuskan sebagai berikut:

Daya listrik:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H_{net} \cdot \eta \quad (2-41)$$

Energi listrik:

$$E = P \cdot 24 \cdot n \quad (2-42)$$

Dimana:

$P$  = daya (kW)

$E$  = energi (kWh)

$Q$  = debit pembangkitan ( $m^3/dt$ )

$H_{net}$  = tinggi jatuh efektif (m)

$h$  = ketinggian efektif (m)

$\eta$  = efisiensi turbin dan generator (70% keadaan terburuk)

$n$  = jumlah hari operasional

Dalam perhitungan produksi energi listrik untuk PLTA jenis *Run Off River* (ROR) yang langsung memanfaatkan aliran sungai tanpa memiliki tampungan harian yang besar jumlah hari operasional dapat ditentukan dengan melakukan pendekatan probabilitas debit dengan kurva durasi aliran (FDC) dengan debit draft operasional turbin, sementara untuk PLTA dengan tipe reservoir maka perhitungan produksi energi listrik dapat dihitung dengan analisa simulasi operasi waduk, draft turbin mengacu pada kemampuan turbin untuk beroperasi pada jangkauan debit tertentu.

Setelah analisa daya dan energi diperhitungkan maka perlu dihitung besarnya faktor kapasitas pembangkit (*Capacity Factor*) yang menunjukkan kinerja hari operasional unit pembangkit, *Capacity Factor* (CF) dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

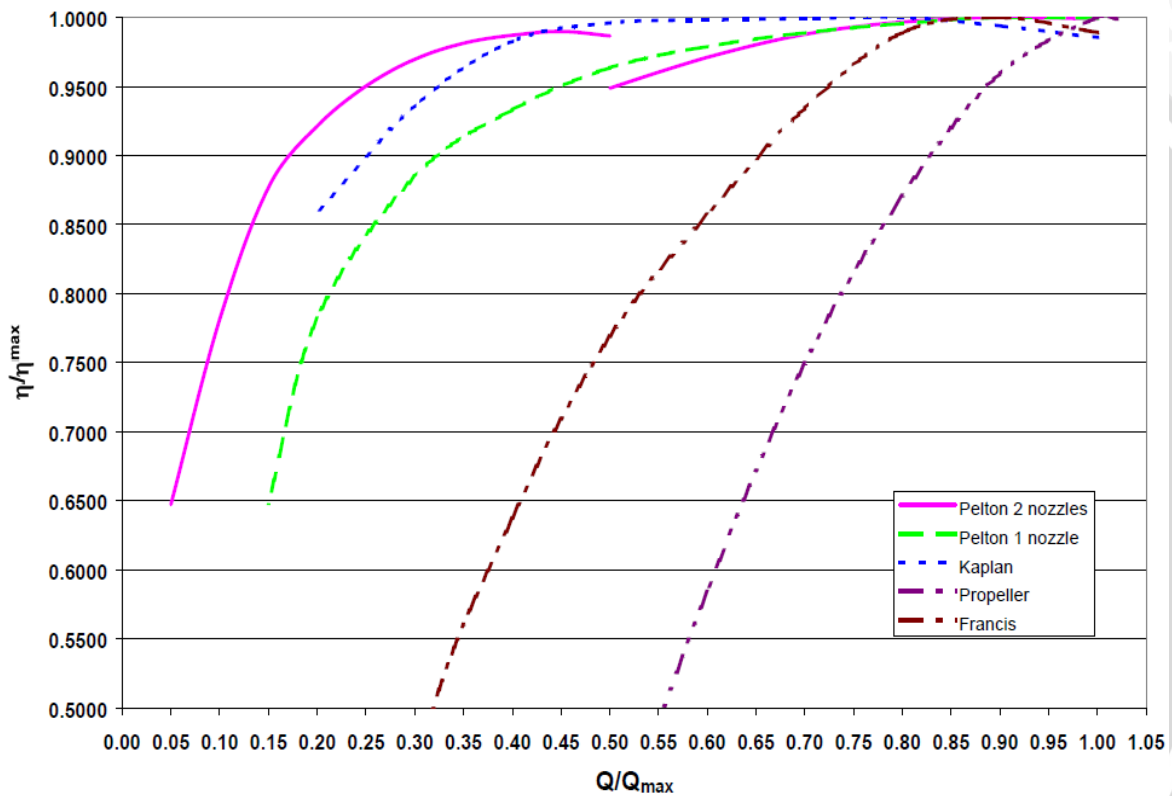
$$\text{Capacity Factor (CF)} = \frac{\text{Annual Energy (MWh)}}{(\text{installed capacity} \times \text{lama hari operasi} \times \text{durasi operasi})} \% \quad (2-43)$$

Keterangan:

CF = Besar kapasitas pembangkit (%)

*Annual Energy* = Produksi Energi (MWh)

*Installed Capacity* = Kapasitas debit terpasang (m<sup>3</sup>/dt)



Gambar 2.24 Jangkauan Debit Operasi untuk Beberapa Jenis Turbin

Sumber: ESHA (2004:183)



## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Data Studi

Dalam studi ini dilakukan beberapa tahapan analisa terhadap data yang telah tersedia. Data-data yang digunakan dalam studi ini adalah data-data sekunder, yang meliputi data hidrologi (data hujan harian, data AWLR, luas DAS) dan data klimatologi.

##### 3.1.1 Data Curah Hujan dan Data Debit

Data hujan yang diperlukan adalah data hujan harian selama 10 tahun untuk dua stasiun hujan dan 8 tahun untuk satu stasiun hujan. Stasiun-stasiun hujan tersebut antara lain sebagai berikut:

1. Stasiun Penakar Hujan Sarula (10 tahun)
2. Stasiun Penakar Hujan Sibolga (10 tahun)
3. Stasiun Penakar Hujan Balige (8 tahun)

Sedangkan data debit yang digunakan adalah data AWLR harian Sungai Sibundong sepanjang tahun 2006 – 2011.

##### 3.1.2 Data Klimatologi

Data klimatologi yang digunakan dalam studi ini adalah data klimatologi wilayah Balige tahun 2004-2013. Data ini berisi catatan data klimatologi bulanan pada tahun 2004 – 2013 yang terdiri dari data kecepatan angin, kelembaban, kecerahan matahari, suhu dan tekanan uap. Data ini digunakan untuk menghitung evapotranspirasi.

#### 3.2 Analisa Data Hujan

##### 3.2.1 Menambah Data Hujan yang Hilang

Metode yang digunakan pada studi ini adalah *Normal Ratio Method*.

##### 3.2.2 Uji Konsistensi

Tahapan yang dilakukan untuk uji konsistensi:

1. Data hujan tahunan disusun mulai tahun terbaru (acuan pada pencatatan data terbaru).
2. Menghitung hujan rerata stasiun sibolga, balige.
3. Menghitung nilai komulatif rerata stasiun sibolga, balige.

4. Menghitung nilai komulatif rerata stasiun sarula.
5. Menggambar grafik hubungan antara komulatif rerata stasiun sibolga, balige dan komulatif stasiun sarula.
6. Menghitung hujan rerata stasiun sarula, balige.
7. Menghitung nilai komulatif rerata stasiun sarula, balige.
8. Menghitung nilai komulatif sibolga.
9. Menggambar grafik hubungan antara komulatif rerata stasiun sarula, balige dan komulatif stasiun sibolga.
10. Menghitung hujan rerata stasiun sarula, sibolga.
11. Menghitung nilai komulatif rerata stasiun sarula, sibolga.
12. Menghitung nilai komulatif balige.
13. Menggambar grafik hubungan antara komulatif rerata stasiun sibolga, sarula dan komulatif stasiun balige.

### **3.2.3 Curah Hujan Rerata Daerah**

Data curah hujan rerata daerah yang dihitung adalah pada tahun 2004-2013. Data hujan rerata daerah tersebut akan digunakan sebagai input data pada simulasi debit Model Tangki.

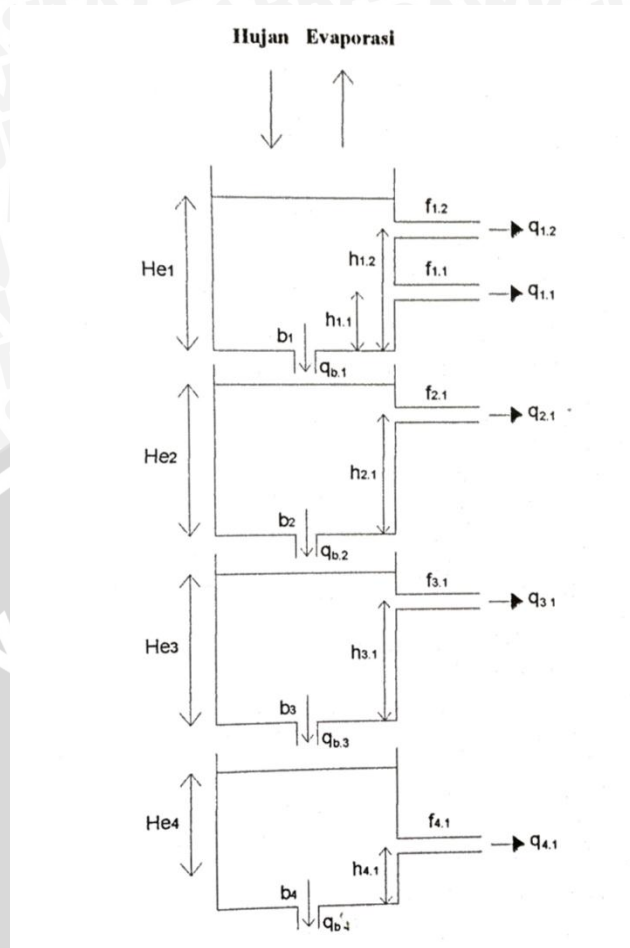
Dalam studi ini perhitungan curah hujan rerata daerah menggunakan metode rerata aljabar.

### **3.3 Perhitungan Evapotranspirasi**

Perhitungan evapotranspirasi menggunakan data klimatologi berupa suhu, kelembaban relatif, lama penyinaran matahari dan kecepatan angin. Pengukuran seperti ini disebut juga pengukuran tak langsung dimana pada studi ini menggunakan metode Penman.

### **3.4 Simulasi Debit Menggunakan Metode Model Tangki**

Metode yang digunakan dalam studi ini adalah metode Model Tangki yang telah dikembangkan oleh Dr. Sugawara. Pada studi ini dilakukan pemodelan dengan menggunakan 4 buah tangki yang disusun secara seri seperti pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Model Tangki Susunan Seri

Pada studi ini digunakan komputer dalam hal ini perangkat lunak *spreadsheet* (MS-Excel) agar mempermudah dan mempercepat penyelesaian iterasi simulasi debit Model Tangki ini.

Langkah-langkah simulasi debit metode model tangki adalah sebagai berikut:

1. Melakukan kalibrasi debit model tangki untuk mendapatkan nilai-nilai parameter  $He_i$ ,  $h_i$ ,  $f_i$  dan  $b_i$  menggunakan input data hujan bulanan rerata daerah metode aljabar pada langkah sebelumnya dengan cara coba banding/*trial and error* sampai didapatkan nilai Kesalahan Absolut Relatif (KAR) paling kecil.
2. Perhitungan debit model tangki sebagaimana langkah-langkah berikut:
  - a. Tambahkan curah hujan hari ini pada tampungan kemarin, kemudian kurangi dengan evapotranspirasinya. Pengurangan evaporasi dilakukan hanya pada tangki teratas (tangki I), tetapi jika pengurangan dari tangki I belum cukup maka kekurangan tersebut akan dipikul oleh tangki-tangki di bawahnya (tangki II, tangki III dan tangki IV).

- b. Perhitungan limpasan dan infiltrasi dilakukan menurut tinggi tampungan yang didapat dalam langkah (a). Besarnya limpasan dan infiltrasi diperoleh dari perkalian koefisien lubang dengan tinggi tampungan terhadap lubang yang bersangkutan.
- c. Perhitungan sisa tinggi tampungan yang diperoleh dari langkah (a) dengan mengurangi limpasan dan evapotranspirasinya.

Prosedur simulasi metode model tangki dapat dilihat pada gambar 3.2.

### 3.5 Perhitungan debit dengan *Flow Duration Curve*

Kumpulan data debit bulanan selama 6 tahun digunakan untuk membuat FDC. Kemudian data debit tersebut ditabulasikan berdasarkan besaran debit pada masing-masing probabilitas kejadian bulanan kumulatif selama 6 tahun, selanjutnya diplotkan ke dalam bentuk grafik perbandingan antara besaran debit terhadap probabilitas kejadian yang selanjutnya disebut dengan grafik durasi aliran (*Flow Duration Curve/FDC*).

### 3.6 Analisa Daya

Menghitung daya untuk pola pengoperasian PLTA berdasarkan hasil perhitungan besar debit DAS Sibundong dapat melakukan perhitungan dengan rumus (2-41).

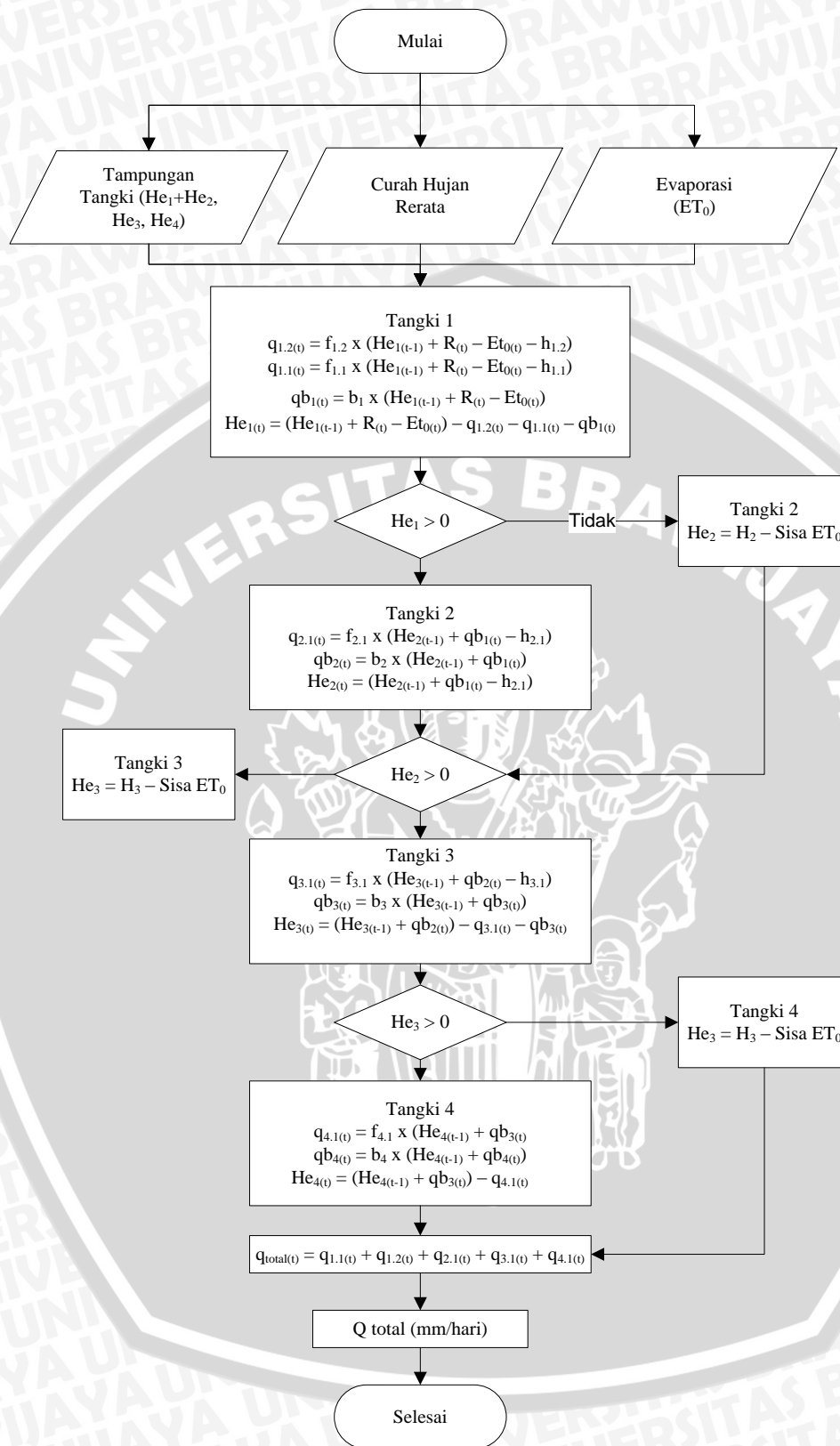
### 3.7 Data Teknis

#### 1. Waduk atau Bendungan

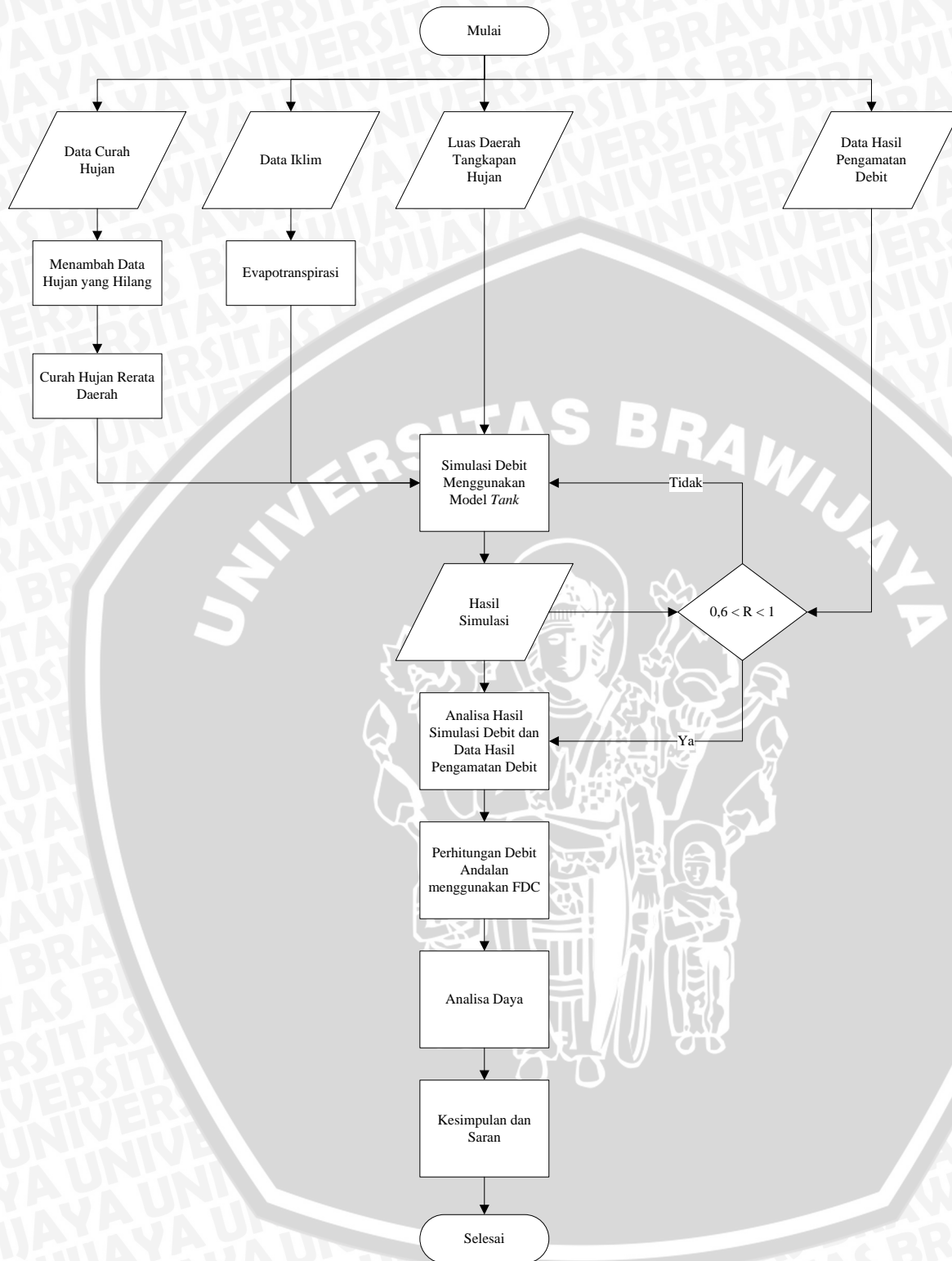
- Luas DAS Sibundong : 282 km<sup>2</sup>
- Luas DAS Dolok Sanggul : 50 km<sup>2</sup>
- Tinggi jatuh kotor : 155,27 m

#### 2. PLTA

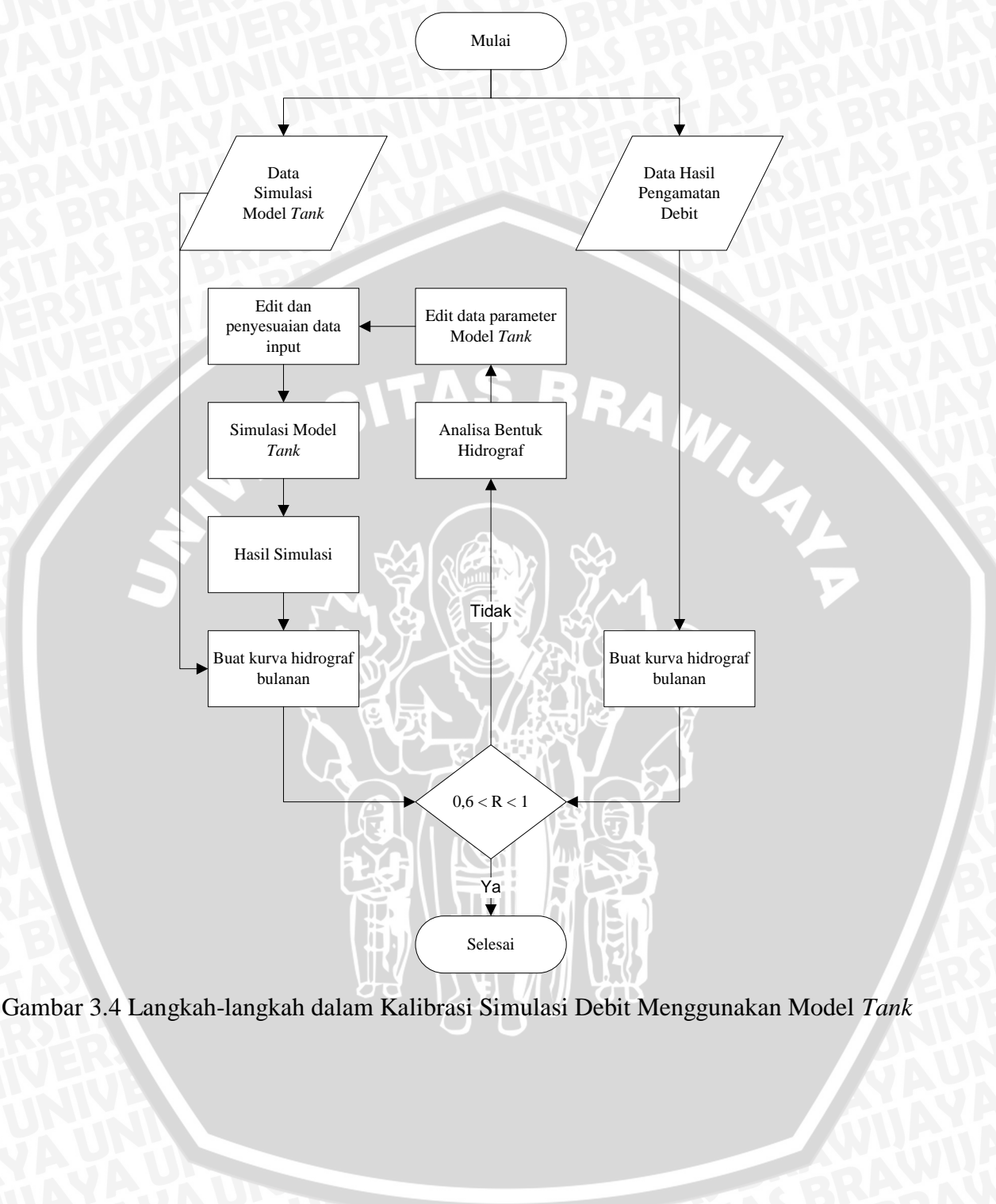
- Daya : 2 x 6,26 MW



Gambar 3.2 Prosedur Perhitungan Debit Metode Model Tangki



Gambar 3.3 Diagram Alir Penyelesaian Skripsi



Gambar 3.4 Langkah-langkah dalam Kalibrasi Simulasi Debit Menggunakan Model Tank

*Halaman ini sengaja dikosongkan*





## BAB IV

### ANALISA PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Menambah Data Hujan yang Hilang

Untuk keperluan analisis hujan daerah diperlukan data yang lengkap dari masing-masing stasiun. Seringkali pada suatu daerah (DAS) ada pencatatan data hujan yang tidak lengkap atau hilang datanya. Jika ini terjadi, maka data hujan yang hilang tersebut harus dilengkapi terlebih dahulu. Metode yang digunakan pada studi ini adalah *Normal Ratio Method*.

##### 4.1.1 Data Hujan yang Hilang di Stasiun Balige Tahun 2012, 2013

Tabel 4.1. Data Hujan Stasiun Sarula dan Sibolga

No.kelas	Curah Hujan Tahunan			
	Tahun	Stasiun Sarula (mm)	Stasiun Sibolga (mm)	Stasiun Balige (mm)
1	2004	1763	3650	1606
2	2005	1226	4721	2947,6
3	2006	2606	4774	3541,1
4	2007	1295	5667	3716,7
5	2008	3113	4513	3981,3
6	2009	2471	4368	3249,6
7	2010	940	5378	2106,8
8	2011	1695	5424	1917,6
9	2012	1489	4771	
10	2013	1319	3682,2	
	Jumlah	17917	46948,2	23066,7

Sumber: Hasil Perhitungan

Keterangan:

- Data yang hilang pada stasiun balige tahun 2012
- Data yang hilang pada stasiun balige tahun 2013

Tabel 4.2. Data Hujan Stasiun Sarula, Sibolga dan Hujan Tahunan

Pos Hujan	Curah Hujan (mm)	Hujan Tahunan (mm)
Sarula	1489	17917
Sibolga	4771	46948,2
Balige		23066,7

Sumber: Hasil Perhitungan

Analisa perhitungan data yang hilang di stasiun hujan Balige:

$$Dx = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \frac{An_x}{An_i}$$

$$Dx = \frac{1}{3} \left[ \frac{23066,7}{46948,2} \times 4771 \right] + \left[ \frac{23066,7}{17917} \times 1489 \right]$$

$$= 2130,5 \text{ mm}$$

Jadi, data yang hilang di stasiun hujan Balige pada tahun 2012 adalah 2130,5 mm.

Tabel 4.3. Data Hujan Stasiun Sarula dan Sibolga

No.kelas	Curah Hujan Tahunan			
	Tahun	Stasiun Sarula (mm)	Stasiun Sibolga (mm)	Stasiun Balige (mm)
1	2004	1763	3650	1606
2	2005	1226	4721	2947,6
3	2006	2606	4774	3541,1
4	2007	1295	5667	3716,7
5	2008	3113	4513	3981,3
6	2009	2471	4368	3249,6
7	2010	940	5378	2106,8
8	2011	1695	5424	1917,6
9	2012	1489	4771	2130,5
10	2013	1319	3682,2	
	Jumlah	17917	46948,2	25197,2

Sumber: Hasil Perhitungan

Keterangan:

  Data yang hilang pada stasiun balige tahun 2013

Tabel 4.4. Data Hujan Stasiun Sarula, Sibolga dan Hujan Tahunan

Pos Hujan	Curah Hujan (mm)	Hujan Tahunan (mm)
Sarula	1319	17917
Sibolga	3682,2	46948,2
Balige		25197,2

Sumber: Hasil Perhitungan

Analisa perhitungan data yang hilang di stasiun hujan Balige:

$$Dx = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \frac{An_x}{An_i}$$

$$Dx = \frac{1}{3} \left[ \frac{25197,2}{46948,2} \times 3682,2 \right] + \left[ \frac{25197,2}{17917} \times 1319 \right]$$

$$= 1915,6 \text{ mm}$$

Jadi, data yang hilang di stasiun Balige pada tahun 2013 adalah 1915,6 mm.

#### 4.2 Uji Konsistensi Data Curah Hujan

Sebelum data curah hujan digunakan untuk analisa data lebih lanjut, maka terlebih dahulu dilakukan uji konsistensi terhadap data curah hujan pada stasiun-stasiun penakar hujan yang dipakai. Pengujian konsistensi dilakukan dengan menggunakan cara kurva massa ganda (*double mass curve*). Langkah pertama yaitu mengakumulasi curah hujan tahunan pada stasiun hujan yang diuji. Data hujan tahunan untuk masing-masing stasiun hujan disajikan pada tabel 4.5.

Tabel 4.5. Curah Hujan Tahunan Stasiun Hujan yang Diuji

Tahun	Stasiun Hujan Sarulla (mm)	Stasiun Hujan Sibolga (mm)	Stasiun Hujan Balige (mm)
2004	1763	3650	1606
2005	1226	4721	2947,6
2006	2606	4774	3541,1
2007	1295	5667	3716,7
2008	3113	4513	3981,3
2009	2471	4368	3249,6
2010	940	5378	2106,8
2011	1695	5424	1917,6
2012	1489	4771	2130,5
2013	1319	3682,2	1655,3

Sumber: Hasil Perhitungan

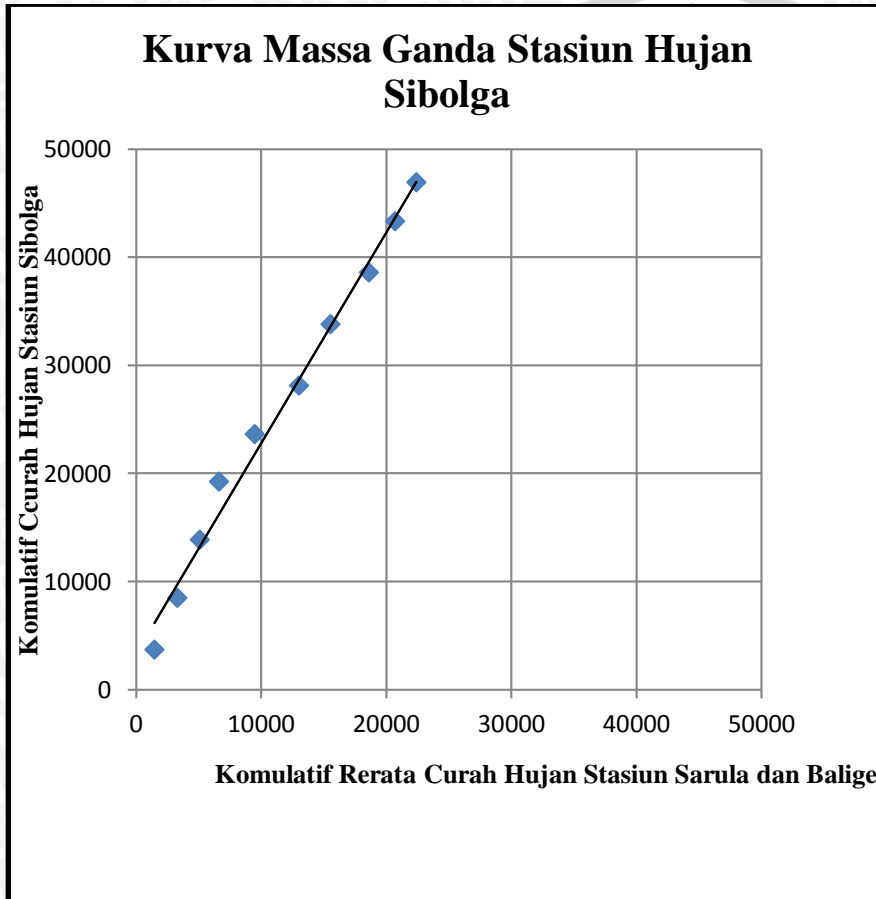
Setelah didapatkan curah hujan tahunan pada masing-masing stasiun hujan, kemudian membandingkan harga pada suatu stasiun yang diuji dengan harga pada stasiun sekitar dengan melakukan pengeplotan pada kurva massa ganda (*double mass curve*). Data hujan tahunan disusun mulai tahun terbaru (acuan pada pencatatan data terbaru).

Tabel 4.6. Uji Konsistensi Komulatif Rerata Stasiun Hujan Sarula, Balige dengan Komulatif Stasiun Hujan Sibolga.

Tahun	Hujan Tahunan (mm)			Rerata St Sarula, Balige	Komulatif Rerata St Sarula, Balige	Komulatif Sibolga
	Sarula	Sibolga	Balige			
2013	1319	3682	1655	1487	1487	3682
2012	1489	4771	2131	1810	3297	8453
2011	1695	5424	1918	1806,5	5103,5	13877
2010	940	5378	2107	1523,5	6627	19255
2009	2471	4368	3250	2860,5	9487,5	23623
2008	3113	4513	3981	3547	13034,5	28136
2007	1295	5667	3717	2506	15540,5	33803

Hujan Tahunan (mm)				Rerata St Sarula, Balige	Kumulatif Rerata St Sarula, Balige	Kumulatif Sibolga
Tahun	Sarula	Sibolga	Balige			
2006	2606	4774	3541	3073,5	18614	38577
2005	1226	4721	2947	2086,5	20700,5	43298
2004	1763	3650	1606	1684,5	22385	46948

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.1. Kurva Massa Ganda Hubungan Antara Kumulatif Rerata Stasiun Hujan Sarula, Balige dengan Kumulatif Stasiun Hujan Sibolga.

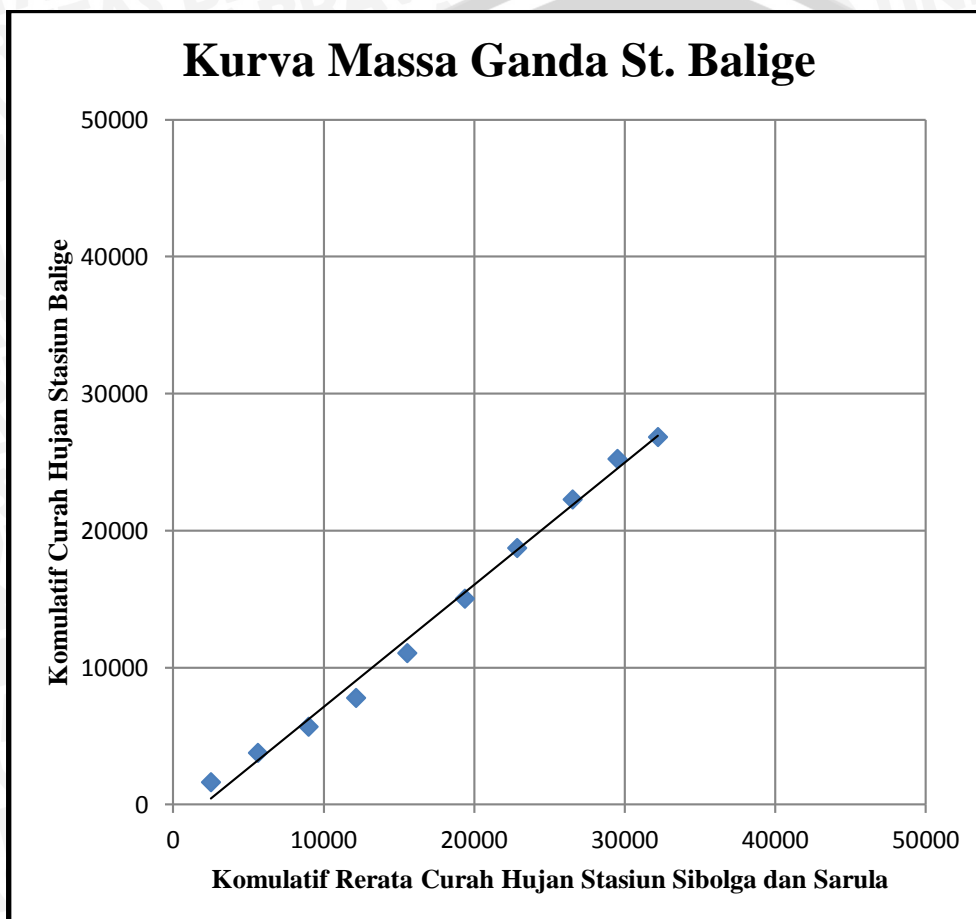
Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.7. Uji Konsistensi Kumulatif Rerata Stasiun Hujan Sarula, Sibolga dengan Kumulatif Stasiun Hujan Balige.

Hujan Tahunan (mm)				Rerata St Sarula, Sibolga	Kumulatif Rerata St Sarula, Sibolga	Kumulatif Balige
Tahun	Sarula	Sibolga	Balige			
2013	1319	3682	1655	2501	2501	1655
2012	1489	4771	2131	3130	5631	3786
2011	1268	5424	1918	3346	8977	5703
2010	940	5378	2107	3159	12136	7810
2009	2471	4368	3250	3420	15555	11060
2008	3113	4513	3981	3813	19368	15041

Hujan Tahunan (mm)				Rerata St Sarula, Sibolga	Komulatif Rerata St Sarula, Sibolga	Komulatif Balige
Tahun	Sarula	Sibolga	Balige			
2007	1295	5667	3717	3481	22849	18758
2006	2606	4774	3541	3690	26539	22299
2005	1226	4721	2948	2974	29513	25246
2004	1763	3650	1606	2707	32219	26852

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.2. Kurva Massa Ganda Hubungan Antara Kumulatif Rerata Stasiun Hujan Sibolga, Sarula dengan Kumulatif Stasiun Hujan Balige.

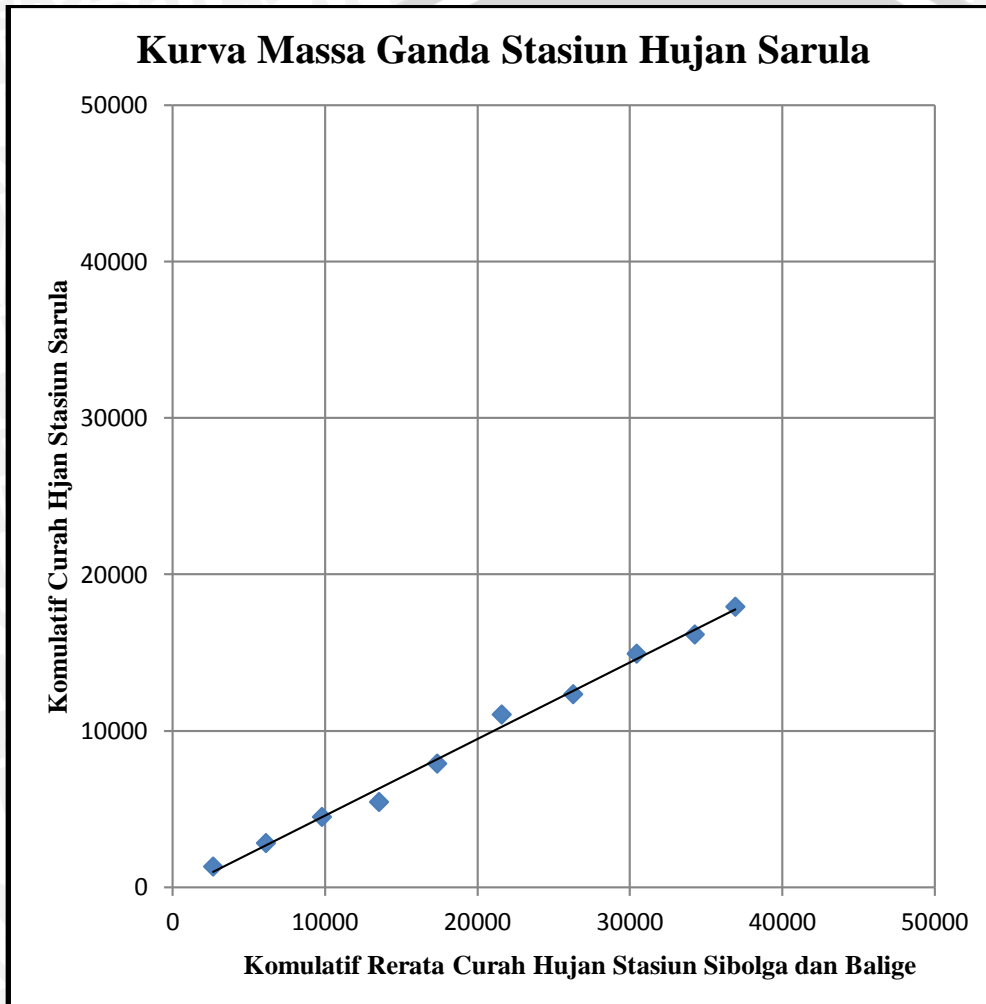
Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4.8. Uji Konsistensi Kumulatif Rerata Stasiun Hujan Sibolga, Balige dengan Kumulatif Stasiun Hujan Sarula.

Hujan Tahunan (mm)				Rerata St Sibolga, Balige	Komulatif Rerata St Sibolga, Balige	Komulatif Sarula
Tahun	Sarula	Sibolga	Balige			
2013	1319	3682	1655	2669	2669	1319
2012	1489	4771	2131	3451	6220	2808
2011	1695	5424	1918	3671	9791	4503
2010	940	5378	2107	3743	13533	5443
2009	2471	4368	3250	3809	17342	7914

Hujan Tahunan (mm)				Rerata St Sibolga, Balige	Kumulatif Rerata St Sibolga, Balige	Kumulatif Sarula
Tahun	Sarula	Sibolga	Balige			
2008	3113	4513	3981	4247	21589	11027
2007	1295	5667	3717	4692	26281	12322
2006	2606	4774	3541	4158	30439	14928
2005	1226	4721	2947	3834	34273	16154
2004	1763	3650	1606	2628	36901	17917

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.3. Kurva Massa Ganda Hubungan Antara Kumulatif Rerata Stasiun Hujan Sibolga, Balige dengan Kumulatif Stasiun Hujan Sarula.

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari data hasil kurva massa ganda pada setiap stasiun hujan yang diuji tidak didapatkan penyimpangan, oleh karena itu data hujan pada semua stasiun yang diuji dinyatakan konsisten dan layak dipergunakan untuk simulasi lebih lanjut.

### 4.3 Curah Hujan Rerata Daerah

Dalam studi ini perhitungan curah hujan rerata daerah menggunakan metode rata-rata aljabar karena luas DAS Sibundong kurang dari 50.000 ha.

Tabel 4.9 Data Curah Hujan Stasiun Hujan Sarula

Tahun	jan	feb	mar	apr	mei	jun	jul	ags	sep	okt	Nov	des
2004	49	137	151	114	124	145	151	149	206	204	137	196
2005	98	56	126	48	27	59	54	98	71	208	223	158
2006	430	152	323	332	108	206	120	221	275	119	227	93
2007	65	65	62	62	59	114	203	66	66	254	156	123
2008	376	84	260	330	141	267	83	261	213	358	401	339
2009	195	111	368	215	73	137	101	216	186	264	308	297
2010	96	148	108	105	53	49	30	34	86	69	88	74
2011	313	117	57	128	92	67	101	110	89	78	258	285
2012	89	56	105	90	117	154	78	33	224	192	249	102
2013	139	39	30	121	132	108	91	95	68	211	167	118

Sumber: BMKG Sumatra Utara

Tabel 4.10 Data Curah Hujan Stasiun Hujan Sibolga

Tahun	Jan	feb	mar	apr	mei	jun	jul	ags	sep	okt	Nov	des
2004	383	191	458	373	284	129	209	286	408	191	458	280
2005	220	193	274	172	117	177	328	767	311	1058	612	492
2006	463	427	370	477	191	187	223	366	500	597	438	535
2007	409	390	343	275	296	249	1177	227	514	945	548	294
2008	310	303	103	171	284	230	466	382	588	602	397	677
2009	387	241	516	344	220	210	254	477	528	410	467	314
2010	298	429	688	354	413	425	363	414	497	357	809	331
2011	334	276	416	491	207	156	232	414	323	765	852	958
2012	113	480	322	450	196	286	476	361	461	282	660	684
2013	210,5	190	203,1	375,1	310,1	146,6	134,2	423,6	286,4	525,7	603,9	273

Sumber: BMKG Sumatra Utara

Tabel 4.11 Data Curah Hujan Stasiun Balige

Tahun	Jan	feb	mar	apr	Mei	jun	jul	ags	sep	okt	Nov	des
2004	245	91,2	143,3	79,1	59,2	49,8	145,4	109,3	201,7	80,8	244,1	157,1
2005	140,6	77	120,5	132,4	46	98,1	270,9	556,5	223,5	698,9	322,5	260,7
2006	228,4	327,2	203,4	265,8	146,3	155,2	120,3	284,6	508,1	479,9	433,6	388,3
2007	356,7	289,1	203,2	204,7	232,3	185,9	444,5	107,9	388,3	731	416,3	156,8
2008	235,2	188,7	456,1	374,7	67,6	171,2	435	338,9	536,2	517,6	273,8	386,3
2009	280,5	167,8	346,9	218,4	71,8	89	130,8	380,9	465,9	335	429,6	333
2010	211,3	122,7	56,1	169,9	19,5	113,3	118,9	404	127,2	413,8	132,7	217,4
2011	115,1	253,7	125,3	88,6	382,6	40	63,7	80,2	155,1	115,2	379,3	118,8

Sumber: BMKG Sumatra Utara

Tabel 4.12 Data Curah Hujan dengan Metode Rata-rata Aljabar

Tahun	Jan	feb	mar	apr	mei	jun	jul	ags	sep	okt	nov	des
2004	225,7	139,7	250,8	188,7	155,7	107,9	168,5	181,4	271,9	158,6	279,7	211,0
2005	152,9	108,7	173,5	117,5	63,3	111,4	217,6	473,8	201,8	655,0	385,8	303,6
2006	373,8	302,1	298,8	358,3	148,4	182,7	154,4	290,5	427,7	398,6	366,2	338,8
2007	276,9	248,0	202,7	180,6	195,8	183,0	608,2	133,6	322,8	643,3	373,4	191,3
2008	307,1	191,9	273,0	291,9	164,2	222,7	328,0	327,3	445,7	492,5	357,3	467,4
2009	287,5	173,3	410,3	259,1	121,6	145,3	161,9	358,0	393,3	336,3	401,5	314,7
2010	201,8	233,2	284,0	209,6	161,8	195,8	170,6	284,0	236,7	279,9	343,2	207,5
2011	254,0	215,6	199,4	235,9	227,2	87,7	132,2	201,4	189,0	319,4	496,4	453,9
2012	67,3	178,7	142,3	180,0	104,3	146,7	184,7	131,3	228,3	158,0	303,0	262,0
2013	116,5	76,3	77,7	165,4	147,4	84,9	75,1	172,9	118,1	245,6	257,0	130,3

Sumber: Hasil Perhitungan

Contoh Perhitungan:

- Pada Tahun 2004 bulan Januari

Jumlah curah hujan = Curah hujan stasiun Sibolga + curah hujan stasiun Sarula +  
curah hujan stasiun Balige

$$= 49 + 383 + 245$$

$$= 677 \text{ mm}$$

Rerata =  $\frac{\text{jumlah curah hujan}}{3}$

$$= 225,7 \text{ mm}$$

#### 4.4 Perhitungan Evapotranspirasi

Perhitungan evapotranspirasi potensial menggunakan metode Penman. Data klimatologi diambil dari Stasiun Balige. Data klimatologi yang digunakan adalah data dari tahun (2004-2013). Berikut ini adalah contoh analisa perhitungan evapotranspirasi pada bulan Januari tahun 2004:

- Temperatur (t) = 27° C
- Kecepatan angin (u) = 0,47 m/dt
- Kelembaban Relatif (RH) = 83,3 %
- Kecerahan Matahari = 49 %



Tabel 4.13. Harga Ry untuk Indonesia (5°LU - 10°LS)

Bulan	LU			0	LS				
	5	4	2		2	4	6	8	10
Jan	13,0	14,3	14,7	15,0	15,3	15,5	15,8	16,1	16,1
Feb	14,0	15,0	15,3	15,5	15,7	15,8	16,0	16,1	16,0
Mar	15,0	15,5	15,6	15,7	15,7	15,6	15,6	15,1	15,3
Apr	15,1	15,5	15,3	15,3	15,1	14,9	14,7	14,1	14,0
Mei	15,3	14,9	14,6	14,4	14,1	13,8	13,4	13,1	12,6
Juni	15,0	14,4	14,2	13,9	13,9	13,2	12,8	12,4	12,6
Juli	15,1	14,6	14,3	14,1	14,1	13,4	13,1	12,7	11,8
Ags	15,3	15,1	14,9	14,8	14,8	14,3	14,0	13,7	12,2
Sep	15,1	15,3	15,3	15,3	15,3	15,1	15,0	14,9	13,1
Okt	15,7	15,1	15,3	15,3	15,4	15,6	15,7	15,8	14,6
Nov	14,8	14,5	14,8	14,8	15,1	15,5	15,8	16,0	15,6
Des	14,6	14,1	14,4	14,4	14,8	15,4	15,7	16,0	16,0

Sumber: Montarich (2010:31)

Tabel 4.14. Hubungan Suhu dengan Besarnya Tekanan Uap

Suhu (t) °C	$e_{\gamma}$ mbar	w mbar	f(t)
24	29,85	0,735	15,4
24,1	30,03	0,736	15,425
24,2	30,21	0,737	15,45
24,3	30,39	0,738	15,475
24,4	30,57	0,739	15,5
24,5	30,76	0,740	15,525
24,6	30,94	0,741	15,55
24,7	31,13	0,742	15,575
24,8	31,31	0,743	15,6
24,9	31,50	0,744	15,625
25	31,69	0,745	15,65
25,1	31,88	0,746	15,675
25,2	32,06	0,747	15,7
25,3	32,26	0,748	15,725

Suhu (t) °C	$\epsilon\gamma$ mbar	w mbar	f(t)
25,4	32,45	0,749	15,75
25,5	32,64	0,750	15,775
25,6	32,83	0,751	15,8
25,7	33,03	0,752	15,825
25,8	33,22	0,753	15,85
25,9	33,42	0,754	15,875
26	33,62	0,755	15,9
26,1	33,82	0,756	15,920
26,2	34,02	0,757	15,94
26,3	34,22	0,758	15,960
26,4	34,42	0,759	15,98
26,5	34,63	0,760	16,000
26,6	34,83	0,761	16,02
26,7	35,04	0,762	16,040
26,8	35,25	0,763	16,06
26,9	35,46	0,764	16,080
27	35,66	0,765	16,1
27,1	35,88	0,766	16,120
27,2	36,09	0,767	16,14
27,3	36,30	0,768	16,160
27,4	36,50	0,769	16,18
27,5	36,72	0,770	16,200
27,6	36,94	0,771	16,22
27,7	37,16	0,772	16,240
27,8	37,37	0,773	16,26
27,9	37,59	0,774	16,280
28	37,81	0,775	16,3
28,1	38,03	0,776	16,320
28,2	38,25	0,777	16,34
28,3	38,48	0,778	16,360
28,4	38,70	0,779	16,38

Suhu (t) °C	$\epsilon\gamma$ mbar	w mbar	f(t)
28,5	38,92	0,780	16,400
28,6	39,14	0,781	16,42
28,7	39,38	0,782	16,440
28,8	39,61	0,783	16,46
28,9	39,84	0,784	16,480
29	40,06	0,785	16,5
29,1	40,29	0,786	16,520
29,2	40,51	0,787	16,54
29,3	40,74	0,788	16,560
29,4	40,96	0,789	16,58
29,5	41,19	0,790	16,600
29,6	41,41	0,791	16,62
29,7	41,64	0,792	16,640
29,8	41,86	0,793	16,66
29,9	42,09	0,794	16,680
30	42,31	0,795	16,7
30,1	42,54	0,796	16,720
30,2	42,76	0,797	16,74
30,3	42,99	0,798	16,760
30,4	43,21	0,799	16,78
30,5	43,44	0,800	16,800
30,6	43,66	0,801	16,82
30,7	43,89	0,802	16,840
30,8	44,11	0,803	16,86
30,9	44,34	0,804	16,880
31	44,56	0,805	16,9

Sumber: Montarcih (2010:31)

Tabel 4.15. Angka Koreksi ( c ) Menurut Rumus Penman

Bulan	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun
C	1,10	1,10	1,10	0,90	0 90	0 90
Bulan	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des
c	0 90	1,00	1,10	1,10	1,10	1,10

Sumber: Montarcih (2010:34)

1. Dari tabel 4.13. hubungan lintang dan nilai angot didapatkan nilai  $R\gamma = 14,70$  mm/hr

2. Dari tabel 4.14. hubungan antara suhu dengan tekanan uap jenuh ( $\epsilon\gamma$ ) didapatkan nilai

$$\epsilon\gamma = 35,66$$

$$w = 0,77$$

3. Tekanan uap nyata ( $\epsilon d$ ) didapatkan dari perkalian antara tekanan uap jenuh ( $\epsilon\gamma$ ) dengan kelembaban relatif (RH)

$$\begin{aligned}\epsilon d &= \epsilon\gamma \cdot RH \\ &= 35,66 \times 0,85 \\ &= 30,31 \text{ mbar}\end{aligned}$$

4. Radiasi gelombang pendek ( $R_s$ )

$$\begin{aligned}R_s &= [0,25 + (0,54 \times (n/N)/100)] \times R\gamma \\ &= [0,25 + (0,54 \times 49)] \times 14,7 \\ &= 7,565 \text{ mm/hr}\end{aligned}$$

5. Fungsi suhu [ $f(t)$ ] didapatkan dari tabel 4.14.

$$f(t) = 16,10$$

6. Fungsi tekanan uap [ $f(\epsilon d)$ ]

$$\begin{aligned}f(\epsilon d) &= 0,34 - [0,044 \times (\epsilon d)^{0,5}] \\ &= 0,34 - [0,044 \times (30,31)^{0,5}] \\ &= 0,10\end{aligned}$$

7. Fungsi kecerahan matahari [ $f(n/N)$ ]

$$\begin{aligned}f(n/N) &= 0,1 + (0,9 \times (n/N)/100) \\ &= 0,1 + (0,9 \times 49) \\ &= 0,541\end{aligned}$$

8. Radiasi gelombang panjang ( $R_n$ )

$$\begin{aligned}R_n &= f(t) \times f(\epsilon d) \times f(n/N) \\ &= 16,10 \times 0,10 \times 0,541 \\ &= 0,851\end{aligned}$$

## 9. Fungsi angin [f(u)]

$$\begin{aligned} f(u) &= 0,27 \times [1 + (0,864 \times u)] \\ &= 0,27 \times [1 + (0,864 \times 0,47)] \\ &= 0,380 \end{aligned}$$

10. Evapotranspirasi ( $E_{t0}^*$ )

$$\begin{aligned} E_{t0}^* &= w \times (0,75 \times R_s - R_n) + (1 - w) \times f(u) \times (\epsilon\gamma - \epsilon_d) \\ &= 0,77 \times (0,75 \times 7,565 - 0,851) + (1 - 0,77) \times 0,380 \times (35,66 - 30,31) \\ &= 4,054 \text{ mm/hr} \end{aligned}$$

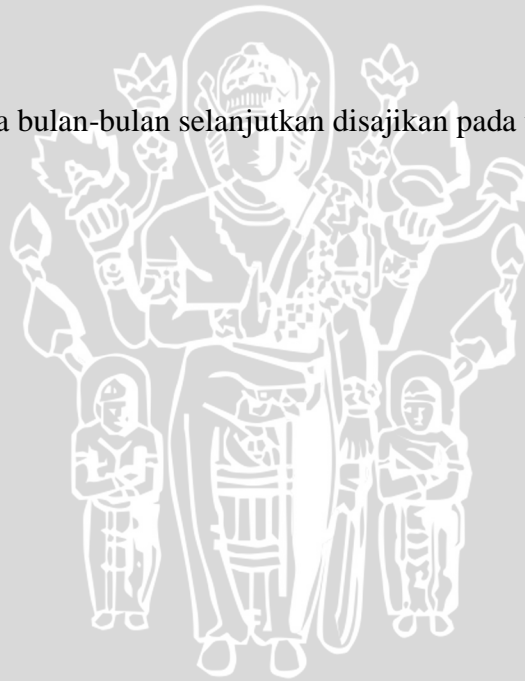
## 11. Angka koreksi (c) untuk bulan Januari Metode Penman dari tabel 4.15. didapatkan:

$$c = 1,1$$

12. Evapotranspirasi potensial ( $E_{t0}$ )

$$\begin{aligned} E_{t0} &= E_{t0}^* \times c \\ &= 4,054 \times 1,1 \\ &= 4,459 \text{ mm/hr} \end{aligned}$$

Untuk hasil perhitungan pada bulan-bulan selanjutnya disajikan pada tabel 4.16.



Tabel 4.16. Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2004

Parameter	Satuan	Bulan											
		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni	Juli	Agu	Sept	Okt	Nov	Des
<b>Data</b>													
a. Temperatur, t	°C	27,0	26,7	26,8	26,8	26,6	26,8	26,0	25,9	26,0	26,5	26,0	26,1
b. Kelembaban Relatif, RH	%	0,85	0,86	0,83	0,83	0,81	0,76	0,84	0,82	0,83	0,85	0,84	0,85
c. Kecerahan matahari, n/N	%	49	52	60	50	58	53	31	48	46	48	49	32
d. Kecepatan angin, u	m/dt	0,47	0,38	0,50	0,37	0,41	0,31	0,29	0,32	0,39	0,43	0,49	0,43
<b>Perhitungan</b>													
1. w	mbar	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,75	0,76	0,76	0,76	0,76
2. Angka Angot (R <sub>γ</sub> )	mm/hr	14,7	15,3	15,6	15,3	14,6	14,2	14,3	14,9	15,3	15,3	14,8	14,4
3. Radiasi gel.pendek, R <sub>s</sub>	mm/hr	7,565	8,121	8,954	7,956	8,223	7,614	5,969	7,587	7,626	7,791	7,616	6,088
4. Fungsi suhu, f(t)		16,10	16,04	16,06	16,06	16,02	16,06	15,90	15,88	15,90	16,00	15,90	15,92
5. Tekanan uap jenuh (ε <sub>γ</sub> )	mbar	35,66	35,04	35,25	35,25	34,83	35,25	33,62	33,42	33,62	34,63	33,62	33,82
6. Tekanan uap nyata (ε <sub>d</sub> )	mbar	30,31	30,13	35,25	35,25	34,83	35,25	33,62	33,42	33,62	34,63	33,62	33,82
7. Fungsi tekanan uap f(ε <sub>d</sub> )		0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,11	0,10
8. Fungsi kecerahan matahari, f(n/N)		0,541	0,568	0,640	0,550	0,622	0,577	0,379	0,532	0,514	0,532	0,541	0,388
9. Radiasi gel. Panjang, R <sub>n1</sub>		0,851	0,897	1,048	0,901	1,059	1,040	0,640	0,926	0,879	0,862	0,913	0,643
10. Fungsi angin, f(u)	m/dt	0,380	0,359	0,387	0,356	0,366	0,342	0,338	0,345	0,361	0,370	0,384	0,370
11. Evapotranspirasi, E <sub>To</sub> *	mm/hr	4,054	4,277	4,743	4,251	4,327	4,087	3,233	3,977	4,036	4,136	4,005	3,313
12. Angka koreksi, c		1,1	1,1	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
13. Evapotranspirasi potensial, E <sub>To</sub>	mm/hr	4,459	4,704	5,217	3,826	3,894	3,678	2,909	3,977	4,439	4,550	4,406	3,644

Sumber: Hasil Perhitungan

Keterangan:

- |                               |                                |  |   |                         |
|-------------------------------|--------------------------------|--|---|-------------------------|
| 1. Tabel lampiran             | 4. Tabel lampiran              | 7. $0,34 - 0,044 \epsilon_d^{0,5}$           | 10. $0,27 (1 + 0,864u)$   | 13. $c \times E_{to}^*$ |
| 2. Tabel lampiran             | 5. Tabel lampiran              | 8. $0,1 + 0,9 n/N$                           | 11. $w(0,75R_s - R_{n1}) + (1 - w) \times F(u) \times (\epsilon_\gamma - \epsilon_d)$ |                         |
| 3. $(0,25 + 0,54n/N)R_\gamma$ | 6. $\epsilon_\gamma \times RH$ | 9. $f(t) \times f(\epsilon_d) \times f(n/N)$ | 12. Tabel 4.10  |                         |

Tabel 4.17. Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2005

Parameter	Satuan	Bulan											
		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni	Juli	Agu	Sept	Okt	Nov	Des
<b>Data</b>													
a. Temperatur, t	°C	26,6	27,3	26,9	27,2	27,0	26,7	26,2	26,2	26,6	25,9	25,7	26,1
b. Kelembaban Relatif, RH	%	0,82	0,80	0,84	0,83	0,82	0,82	0,83	0,84	0,82	0,835	0,85	0,84
c. Kecerahan matahari, n/N	%	51	53	51	45	52	34	61	55	58	34	41	35
d. Kecepatan angin, u	m/dt	0,48	0,52	0,50	0,48	0,45	0,39	0,41	0,38	0,36	0,45	0,57	0,43
<b>Perhitungan</b>													
1. w	mbar	0,76	0,77	0,76	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76	0,75	0,75	0,76
2. Angka Angot (R <sub>y</sub> )	mm/hr	14,7	15,3	15,6	15,3	14,6	14,2	14,3	14,9	15,3	15,3	14,8	14,4
3. Radiasi gel.pendek, R <sub>s</sub>	mm/hr	7,723	8,204	8,196	7,543	7,750	6,157	8,285	8,150	8,617	6,634	6,977	6,322
4. Fungsi suhu, f(t)		16,02	16,16	16,08	16,14	16,10	16,04	15,94	15,94	16,02	15,88	15,83	15,92
5. Tekanan uap jenuh (ε <sub>γ</sub> )	mbar	34,83	36,30	35,46	36,09	35,66	35,04	34,02	34,02	34,83	33,42	33,03	33,82
6. Tekanan uap nyata (ε <sub>d</sub> )	mbar	28,56	29,04	35,46	36,09	35,66	35,04	34,02	34,02	34,83	33,42	33,03	33,82
7. Fungsi tekanan uap f(ε <sub>d</sub> )		0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11
8. Fungsi kecerahan matahari, f(n/N)		0,559	0,577	0,559	0,505	0,568	0,406	0,649	0,595	0,622	0,406	0,469	0,415
9. Radiasi gel. Panjang, R <sub>n1</sub>		0,939	0,960	0,898	0,808	0,933	0,678	1,099	0,994	1,045	0,693	0,793	0,697
10. Fungsi angin, f(u)	m/dt	0,382	0,391	0,387	0,382	0,375	0,361	0,366	0,359	0,354	0,375	0,403	0,370
11. Evapotranspirasi, E <sub>To</sub> *	mm/hr	4,129	4,495	4,406	4,138	4,165	3,415	4,261	4,234	4,527	3,612	3,711	3,427
12. Angka koreksi, c		1,1	1,1	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
13. Evapotranspirasi potensial, E <sub>To</sub>	mm/hr	4,542	4,944	4,847	3,724	3,749	3,073	3,835	4,234	4,979	3,974	4,082	3,770

Sumber: Hasil Perhitungan

Keterangan:

- |                        |                               |  |  |                         |
|------------------------|-------------------------------|--|--|-------------------------|
| 1. Tabel lampiran      | 4. Tabel lampiran             | 7. $0,34 - 0,044 \epsilon d^{0,5}$           | 10. $0,27 (1 + 0,864u)$  | 13. $c \times E_{to}^*$ |
| 2. Tabel lampiran      | 5. Tabel lampiran             | 8. $0,1 + 0,9 n/N$                           | 11. $w(0,75R_s - R_{n1}) + (1 - w) \times F(u) \times (\epsilon\gamma - \epsilon d)$ |                         |
| 3. $(0,25+0,54n/N)R_y$ | 6. $\epsilon\gamma \times RH$ | 9. $f(t) \times f(\epsilon d) \times f(n/N)$ | 12. Tabel 4.10   |                         |

Tabel 4.18. Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2006

Parameter	Satuan	Bulan											
		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni	Juli	Agu	Sept	Okt	Nov	Des
<b>Data</b>													
a. Temperatur, t	°C	26,4	26,8	26,9	27,0	27,3	26,8	26,3	25,6	25,6	26,0	26,0	26,2
b. Kelembaban Relatif, RH	%	0,83	0,80	0,82	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,86	0,86	0,86	0,85
c. Kecerahan matahari, n/N	%	48	58	52	44	46	51	65	49	57	42	49	50
d. Kecepatan angin, u	m/dt	0,35	0,44	0,39	0,56	0,50	0,57	0,39	0,43	0,45	0,52	0,49	0,48
<b>Perhitungan</b>													
1. w	mbar	0,76	0,76	0,76	0,77	0,77	0,76	0,76	0,75	0,75	0,76	0,76	0,76
2. Angka Angot (Ry)	mm/hr	14,7	15,3	15,6	15,3	14,6	14,2	14,3	14,9	15,3	15,3	14,8	14,4
3. Radiasi gel.pendek, Rs	mm/hr	7,485	8,617	8,280	7,460	7,277	7,461	8,594	7,668	8,534	7,295	7,616	7,488
4. Fungsi suhu, f(t)		15,98	16,06	16,08	16,10	16,16	16,06	15,96	15,80	15,80	15,90	15,90	15,94
5. Tekanan uap jenuh (εγ)	mbar	34,42	35,25	35,46	35,66	36,30	35,25	34,22	32,83	32,83	33,62	33,62	34,02
6. Tekanan uap nyata (εδ)	mbar	28,57	28,20	35,46	35,66	36,30	35,25	34,22	32,83	32,83	33,62	33,62	34,02
7. Fungsi tekanan uap f(εδ)		0,10	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10
8. Fungsi kecerahan matahari, f(n/N)		0,532	0,622	0,568	0,496	0,514	0,559	0,685	0,541	0,613	0,478	0,541	0,550
9. Radiasi gel. Panjang, Rn1		0,891	1,062	0,939	0,792	0,818	0,916	1,169	0,955	1,029	0,786	0,890	0,906
10. Fungsi angin, f(u)	m/dt	0,352	0,373	0,361	0,401	0,387	0,403	0,361	0,370	0,375	0,391	0,384	0,382
11. Evapotranspirasi, ETo*	mm/hr	3,961	4,596	4,443	4,085	3,988	4,007	4,408	4,011	4,357	3,878	3,976	3,924
12. Angka koreksi, c		1,1	1,1	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
13. Evapotranspirasi potensial, ETo	mm/hr	4,357	5,055	4,887	3,677	3,589	3,607	3,967	4,011	4,792	4,266	4,373	4,316

Sumber: Hasil Perhitungan

Keterangan:

- |                              |                               |  |  |                      |
|------------------------------|-------------------------------|--|--|----------------------|
| 1. Tabel lampiran            | 4. Tabel lampiran             | 7. $0,34 - 0,044 \epsilon d^{0,5}$           | 10. $0,27 (1 + 0,864u)$  | 13. $c \times Eto^*$ |
| 2. Tabel lampiran            | 5. Tabel lampiran             | 8. $0,1 + 0,9 n/N$                           | 11. $w(0,75Rs - Rn1) + (1 - w) \times F(u) \times (\epsilon\gamma - \epsilon d)$ |                      |
| 3. $(0,25 + 0,54n/N)R\gamma$ | 6. $\epsilon\gamma \times RH$ | 9. $f(t) \times f(\epsilon d) \times f(n/N)$ | 12. Tabel 4.10   |                      |



Tabel 4.19. Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2007

Parameter	Satuan	Bulan											
		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni	Juli	Agu	Sept	Okt	Nov	Des
<b>Data</b>													
a. Temperatur, t	°C	26,2	26,3	26,6	26,7	27,2	26,7	26,1	26,2	26,0	25,5	25,7	26,0
b. Kelembaban Relatif, RH	%	0,83	0,84	0,86	0,86	0,83	0,84	0,82	0,84	0,83	0,86	0,86	0,83
c. Kecerahan matahari, n/N	%	46	51	55	48	45	39	58	49	38	41	47	41
d. Kecepatan angin, u	m/dt	0,70	0,58	0,37	0,49	0,55	0,46	0,61	0,81	0,59	0,50	0,56	0,62
<b>Perhitungan</b>													
1. w	mbar	0,76	0,76	0,76	0,76	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76	0,75	0,75	0,76
2. Angka Angot (R <sub>γ</sub> )	mm/hr	14,7	15,3	15,6	15,3	14,6	14,2	14,3	14,9	15,3	15,3	14,8	14,4
3. Radiasi gel.pendek, R <sub>s</sub>	mm/hr	7,326	8,039	8,533	7,791	7,198	6,541	8,054	7,668	6,965	7,212	7,456	6,788
4. Fungsi suhu, f(t)		15,94	15,96	16,02	16,04	16,14	16,04	15,92	15,94	15,90	15,78	15,83	15,90
5. Tekanan uap jenuh (ε <sub>γ</sub> )	mbar	34,02	34,22	34,83	35,04	36,09	35,04	33,82	34,02	33,62	32,64	33,03	33,62
6. Tekanan uap nyata (ε <sub>d</sub> )	mbar	28,24	28,74	34,83	35,04	36,09	35,04	33,82	34,02	33,62	32,64	33,03	33,62
7. Fungsi tekanan uap f(ε <sub>d</sub> )		0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11
8. Fungsi kecerahan matahari, f(n/N)		0,514	0,559	0,595	0,532	0,505	0,451	0,622	0,541	0,442	0,469	0,523	0,469
9. Radiasi gel. Panjang, R <sub>n1</sub>		0,870	0,929	0,945	0,840	0,808	0,733	1,072	0,904	0,756	0,791	0,873	0,802
10. Fungsi angin, f(u)	m/dt	0,433	0,405	0,356	0,384	0,398	0,377	0,412	0,459	0,408	0,387	0,401	0,415
11. Evapotranspirasi, E <sub>To</sub> *	mm/hr	3,962	4,273	4,467	4,154	3,957	3,563	4,219	4,129	3,804	3,795	3,894	3,677
12. Angka koreksi, c		1,1	1,1	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
13. Evapotranspirasi potensial, E <sub>To</sub>	mm/hr	4,358	4,700	4,914	3,739	3,561	3,207	3,797	4,129	4,184	4,175	4,283	4,044

Sumber: Hasil Perhitungan

Keterangan:

- |                             |                                |  |   |                         |
|-----------------------------|--------------------------------|--|---|-------------------------|
| 1. Tabel lampiran           | 4. Tabel lampiran              | 7. $0,34 - 0,044 \epsilon_d^{0,5}$           | 10. $0,27 (1 + 0,864u)$   | 13. $c \times E_{To}^*$ |
| 2. Tabel lampiran           | 5. Tabel lampiran              | 8. $0,1 + 0,9 n/N$                           | 11. $w(0,75R_s - R_{n1}) + (1 - w) \times F(u) \times (\epsilon_\gamma - \epsilon_d)$ |                         |
| 3. $(0,25+0,54n/N)R_\gamma$ | 6. $\epsilon_\gamma \times RH$ | 9. $f(t) \times f(\epsilon_d) \times f(n/N)$ | 12. Tabel 4.10  |                         |

Tabel 4.20. Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2008

Parameter	Satuan	Bulan											
		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni	Juli	Agu	Sept	Okt	Nov	Des
<b>Data</b>													
a. Temperatur, t	°C	26,3	26,6	25,9	26,5	26,6	25,9	25,7	26,2	25,8	26,1	26,1	25,8
b. Kelembaban Relatif, RH	%	0,84	0,82	0,87	0,88	0,86	0,87	0,85	0,84	0,85	0,86	0,87	0,87
c. Kecerahan matahari, n/N	%	46	51	60	49	53	44	55	51	42	41	30	34
d. Kecepatan angin, u	m/dt	0,56	0,60	0,48	0,55	0,65	0,43	0,58	0,72	0,90	0,61	0,60	0,61
<b>Perhitungan</b>													
1. w	mbar	0,76	0,76	0,75	0,76	0,76	0,75	0,75	0,76	0,75	0,76	0,76	0,75
2. Angka Angot (R <sub>γ</sub> )	mm/hr	14,7	15,3	15,6	15,3	14,6	14,2	14,3	14,9	15,3	15,3	14,8	14,4
3. Radiasi gel.pendek, R <sub>s</sub>	mm/hr	7,326	8,039	8,954	7,873	7,829	6,924	7,822	7,828	7,295	7,212	6,098	6,244
4. Fungsi suhu, f(t)		15,96	16,02	15,88	16,00	16,02	15,88	15,83	15,94	15,85	15,92	15,92	15,85
5. Tekanan uap jenuh (ε <sub>γ</sub> )	mbar	34,22	34,83	33,42	34,63	34,83	33,42	33,03	34,02	33,22	33,82	33,82	33,22
6. Tekanan uap nyata (ε <sub>d</sub> )	mbar	28,74	28,56	33,42	34,63	34,83	33,42	33,03	34,02	33,22	33,82	33,82	33,22
7. Fungsi tekanan uap f(ε <sub>d</sub> )		0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,11	0,10	0,10	0,10
8. Fungsi kecerahan matahari, f(n/N)		0,514	0,559	0,640	0,541	0,577	0,496	0,595	0,559	0,478	0,469	0,370	0,406
9. Radiasi gel. Panjang, R <sub>n1</sub>		0,854	0,939	1,044	0,841	0,917	0,809	1,006	0,934	0,805	0,767	0,597	0,666
10. Fungsi angin, f(u)	m/dt	0,401	0,410	0,382	0,398	0,422	0,370	0,405	0,438	0,480	0,412	0,410	0,412
11. Evapotranspirasi, E <sub>To</sub> *	mm/hr	3,920	4,341	4,584	4,151	4,144	3,604	4,029	4,176	3,959	3,870	3,339	3,356
12. Angka koreksi, c		1,1	1,1	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
13. Evapotranspirasi potensial, E <sub>To</sub>	mm/hr	4,312	4,775	5,043	3,736	3,730	3,244	3,626	4,176	4,355	4,257	3,672	3,692

Sumber: Hasil Perhitungan

Keterangan:

- |                               |                                |  |   |                         |
|-------------------------------|--------------------------------|--|---|-------------------------|
| 1. Tabel lampiran             | 4. Tabel lampiran              | 7. $0,34 - 0,044 \epsilon_d^{0,5}$           | 10. $0,27 (1 + 0,864u)$   | 13. $c \times E_{To}^*$ |
| 2. Tabel lampiran             | 5. Tabel lampiran              | 8. $0,1 + 0,9 n/N$                           | 11. $w(0,75R_s - R_{n1}) + (1 - w) \times F(u) \times (\epsilon_\gamma - \epsilon_d)$ |                         |
| 3. $(0,25 + 0,54n/N)R_\gamma$ | 6. $\epsilon_\gamma \times RH$ | 9. $f(t) \times f(\epsilon_d) \times f(n/N)$ | 12. Tabel 4.10  |                         |

Tabel 4.21. Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2009

Parameter	Satuan	Bulan											
		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni	Juli	Agu	Sept	Okt	Nov	Des
<b>Data</b>													
a. Temperatur, t	°C	26,2	26,1	26,4	26,8	27,0	26,4	26,1	26,0	26,2	26,2	26,0	26,4
b. Kelembaban Relatif, RH	%	0,85	0,84	0,85	0,87	0,84	0,83	0,83	0,86	0,85	0,85	0,87	0,86
c. Kecerahan matahari, n/N	%	43	56	49	50	64	53	54	36	57	53	30	41
d. Kecepatan angin, u	m/dt	0,61	0,67	0,73	0,65	0,81	0,78	0,99	0,77	0,54	0,51	0,55	0,57
<b>Perhitungan</b>													
1. w	mbar	0,76	0,76	0,76	0,76	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
2. Angka Angot (R <sub>y</sub> )	mm/hr	14,7	15,3	15,6	15,3	14,6	14,2	14,3	14,9	15,3	15,3	14,8	14,4
3. Radiasi gel.pendek, R <sub>s</sub>	mm/hr	7,088	8,452	8,028	7,956	8,696	7,614	7,745	6,622	8,534	8,204	6,098	6,788
4. Fungsi suhu, f(t)		15,94	15,92	15,98	16,06	16,10	15,98	15,92	15,90	15,94	15,94	15,90	15,98
5. Tekanan uap jenuh (ε <sub>γ</sub> )	mbar	34,02	33,82	34,42	35,25	35,66	34,42	33,82	33,62	34,02	34,02	33,62	34,42
6. Tekanan uap nyata (ε <sub>d</sub> )	mbar	28,92	28,41	34,42	35,25	35,66	34,42	33,82	33,62	34,02	34,02	33,62	34,42
7. Fungsi tekanan uap f(ε <sub>d</sub> )		0,10	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
8. Fungsi kecerahan matahari, f(n/N)		0,487	0,604	0,541	0,550	0,676	0,577	0,586	0,424	0,613	0,577	0,370	0,469
9. Radiasi gel. Panjang, R <sub>n1</sub>		0,803	1,014	0,882	0,851	1,079	0,967	0,997	0,697	1,010	0,951	0,600	0,754
10. Fungsi angin, f(u)	m/dt	0,412	0,426	0,440	0,422	0,459	0,452	0,501	0,450	0,396	0,389	0,398	0,403
11. Evapotranspirasi, E <sub>To</sub> *	mm/hr	3,804	4,451	4,316	4,253	4,634	4,084	4,169	3,615	4,452	4,303	3,322	3,647
12. Angka koreksi, c		1,1	1,1	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
13. Evapotranspirasi potensial, E <sub>To</sub>	mm/hr	4,184	4,896	4,748	3,828	4,171	3,676	3,752	3,615	4,898	4,733	3,654	4,012

Sumber: Hasil Perhitungan

Keterangan:

- |                          |                                |  |   |                         |
|--------------------------|--------------------------------|--|---|-------------------------|
| 1. Tabel lampiran        | 4. Tabel lampiran              | 7. $0,34 - 0,044 \epsilon_d^{0,5}$           | 10. $0,27 (1 + 0,864u)$   | 13. $c \times E_{To}^*$ |
| 2. Tabel lampiran        | 5. Tabel lampiran              | 8. $0,1 + 0,9 n/N$                           | 11. $w(0,75R_s - R_{n1}) + (1 - w) \times F(u) \times (\epsilon_\gamma - \epsilon_d)$ |                         |
| 3. $(0,25 + 0,54n/N)R_y$ | 6. $\epsilon_\gamma \times RH$ | 9. $f(t) \times f(\epsilon_d) \times f(n/N)$ | 12. Tabel 4.10  |                         |

Tabel 4.22. Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2010

Parameter	Satuan	Bulan											
		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni	Juli	Agu	Sept	Okt	Nov	Des
<b>Data</b>													
a. Temperatur, t	°C	27,2	27,0	26,8	27,1	27,2	26,8	26,6	26,2	26,0	26,5	25,8	26,3
b. Kelembaban Relatif, RH	%	0,83	0,82	0,82	0,84	0,82	0,83	0,80	0,81	0,85	0,85	0,87	0,85
c. Kecerahan matahari, n/N	%	42	50	51	44	56	47	51	51	55	47	45	36
d. Kecepatan angin, u	m/dt	0,70	0,70	1,00	0,80	0,60	0,40	0,50	0,50	0,40	0,30	0,60	0,40
<b>Perhitungan</b>													
1. w	mbar	0,77	0,77	0,76	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,75	0,76
2. Angka Angot (R <sub>y</sub> )	mm/hr	14,7	15,3	15,6	15,3	14,6	14,2	14,3	14,9	15,3	15,3	14,8	14,4
3. Radiasi gel.pendek, R <sub>s</sub>	mm/hr	7,009	7,956	8,196	7,460	8,065	7,154	7,513	7,828	8,369	7,708	7,296	6,399
4. Fungsi suhu, f(t)		16,14	16,10	16,06	16,12	16,14	16,06	16,02	15,94	15,90	16,00	15,85	15,96
5. Tekanan uap jenuh (ε <sub>γ</sub> )	mbar	36,09	35,66	35,25	35,88	36,09	35,25	34,83	34,02	33,62	34,63	33,22	34,22
6. Tekanan uap nyata (ε <sub>d</sub> )	mbar	29,95	29,24	35,25	35,88	36,09	35,25	34,83	34,02	33,62	34,63	33,22	34,22
7. Fungsi tekanan uap f(ε <sub>d</sub> )		0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10
8. Fungsi kecerahan matahari, f(n/N)		0,478	0,550	0,559	0,496	0,604	0,523	0,559	0,559	0,595	0,523	0,505	0,424
9. Radiasi gel. Panjang, R <sub>n1</sub>		0,765	0,904	0,929	0,787	0,981	0,857	0,965	0,971	0,991	0,848	0,828	0,695
10. Fungsi angin, f(u)	m/dt	0,433	0,433	0,503	0,457	0,410	0,363	0,387	0,387	0,363	0,340	0,410	0,363
11. Evapotranspirasi, E <sub>To</sub> *	mm/hr	3,920	4,373	4,559	4,153	4,363	3,834	4,044	4,169	4,329	4,072	3,826	3,453
12. Angka koreksi, c		1,1	1,1	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
13. Evapotranspirasi potensial, E <sub>To</sub>	mm/hr	4,312	4,811	5,015	3,737	3,927	3,450	3,639	4,169	4,762	4,479	4,209	3,799

Sumber: Hasil Perhitungan

Keterangan:

- |                               |                                |  |   |                         |
|-------------------------------|--------------------------------|--|---|-------------------------|
| 1. Tabel lampiran             | 4. Tabel lampiran              | 7. $0,34 - 0,044 \epsilon_d^{0,5}$           | 10. $0,27 (1 + 0,864u)$   | 13. $c \times E_{To}^*$ |
| 2. Tabel lampiran             | 5. Tabel lampiran              | 8. $0,1 + 0,9 n/N$                           | 11. $w(0,75R_s - R_{n1}) + (1 - w) \times F(u) \times (\epsilon_\gamma - \epsilon_d)$ |                         |
| 3. $(0,25 + 0,54n/N)R_\gamma$ | 6. $\epsilon_\gamma \times RH$ | 9. $f(t) \times f(\epsilon_d) \times f(n/N)$ | 12. Tabel 4.10  |                         |

Tabel 4.23. Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2011

Parameter	Satuan	Bulan											
		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni	Juli	Agu	Sept	Okt	Nov	Des
<b>Data</b>													
a. Temperatur, t	°C	26,4	26,7	26,8	26,6	27,0	26,6	26,4	26,1	26,4	26,1	26,0	26,4
b. Kelembaban Relatif, RH	%	0,84	0,86	0,82	0,85	0,79	0,84	0,85	0,85	0,84	0,85	0,87	0,85
c. Kecerahan matahari, n/N	%	47	41	50	52	57	48	59	49	45	31	42	39
d. Kecepatan angin, u	m/dt	0,50	0,80	0,50	0,40	0,20	0,50	0,40	0,50	0,30	0,60	1,00	0,70
<b>Perhitungan</b>													
1. w	mbar	0,76	0,76	0,76	0,76	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
2. Angka Angot (R <sub>y</sub> )	mm/hr	14,7	15,3	15,6	15,3	14,6	14,2	14,3	14,9	15,3	15,3	14,8	14,4
3. Radiasi gel.pendek, R <sub>s</sub>	mm/hr	7,406	7,212	8,112	8,121	8,144	7,231	8,131	7,668	7,543	6,386	7,057	6,633
4. Fungsi suhu, f(t)		15,98	16,04	16,06	16,02	16,10	16,02	15,98	15,92	15,98	15,92	15,90	15,98
5. Tekanan uap jenuh (ε <sub>y</sub> )	mbar	34,42	35,04	35,25	34,83	35,66	34,83	34,42	33,82	34,42	33,82	33,62	34,42
6. Tekanan uap nyata (ε <sub>d</sub> )	mbar	28,91	30,13	35,25	34,83	35,66	34,83	34,42	33,82	34,42	33,82	33,62	34,42
7. Fungsi tekanan uap f(ε <sub>d</sub> )		0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
8. Fungsi kecerahan matahari, f(n/N)		0,523	0,469	0,550	0,568	0,613	0,532	0,631	0,541	0,505	0,379	0,478	0,451
9. Radiasi gel. Panjang, R <sub>n1</sub>		0,864	0,741	0,914	0,915	1,051	0,869	1,029	0,896	0,835	0,628	0,775	0,735
10. Fungsi angin, f(u)	m/dt	0,387	0,457	0,387	0,363	0,317	0,387	0,363	0,387	0,340	0,410	0,503	0,433
11. Evapotranspirasi, E <sub>To</sub> *	mm/hr	3,949	3,964	4,389	4,284	4,295	3,857	4,191	4,032	4,003	3,530	3,817	3,627
12. Angka koreksi, c		1,1	1,1	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
13. Evapotranspirasi potensial, E <sub>To</sub>	mm/hr	4,344	4,360	4,827	3,855	3,866	3,471	3,772	4,032	4,403	3,883	4,199	3,990

Sumber: Hasil Perhitungan

Keterangan:

- |                        |                           |  |  |                         |
|------------------------|---------------------------|--|--|-------------------------|
| 1. Tabel lampiran      | 4. Tabel lampiran         | 7. $0,34 - 0,044 \epsilon_d^{0,5}$           | 10. $0,27 (1 + 0,864u)$  | 13. $c \times E_{To}^*$ |
| 2. Tabel lampiran      | 5. Tabel lampiran         | 8. $0,1 + 0,9 n/N$                           | 11. $w(0,75R_s - R_{n1}) + (1 - w) \times F(u) \times (\epsilon_y - \epsilon_d)$ |                         |
| 3. $(0,25+0,54n/N)R_y$ | 6. $\epsilon_y \times RH$ | 9. $f(t) \times f(\epsilon_d) \times f(n/N)$ | 12. Tabel 4.10   |                         |

Tabel 4.24. Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2012

Parameter	Satuan	Bulan											
		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni	Juli	Agu	Sept	Okt	Nov	Des
<b>Data</b>													
a. Temperatur, t	°C	26,3	26,5	26,9	26,7	27,8	26,1	26,6	26,4	26,5	26,0	26,6	26,5
b. Kelembaban Relatif, RH	%	0,83	0,81	0,76	0,87	0,84	0,83	0,80	0,81	0,77	0,85	0,83	0,86
c. Kecerahan matahari, n/N	%	49	50	52	64	53	48	59	60	49	42	49	50
d. Kecepatan angin, u	m/dt	0,55	0,65	0,43	0,77	0,54	0,51	0,55	0,65	0,43	0,45	0,57	0,70
<b>Perhitungan</b>													
1. w	mbar	0,76	0,76	0,76	0,76	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
2. Angka Angot (R <sub>y</sub> )	mm/hr	14,7	15,3	15,6	15,3	14,6	14,2	14,3	14,9	15,3	15,3	14,8	14,4
3. Radiasi gel.pendek, R <sub>s</sub>	mm/hr	7,565	7,956	8,280	9,113	7,829	7,231	8,131	8,553	7,873	7,295	7,616	7,488
4. Fungsi suhu, f(t)		15,96	16,00	16,08	16,04	16,26	15,92	16,02	15,98	16,00	15,90	16,02	16,00
5. Tekanan uap jenuh (ε <sub>γ</sub> )	mbar	34,22	34,63	35,46	35,04	37,37	33,82	34,83	34,42	34,63	33,62	34,83	34,63
6. Tekanan uap nyata (ε <sub>d</sub> )	mbar	28,40	28,05	35,46	35,04	37,37	33,82	34,83	34,42	34,63	33,62	34,83	34,63
7. Fungsi tekanan uap f(ε <sub>d</sub> )		0,11	0,11	0,11	0,10	0,09	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10
8. Fungsi kecerahan matahari, f(n/N)		0,541	0,550	0,568	0,676	0,577	0,532	0,631	0,640	0,541	0,478	0,541	0,550
9. Radiasi gel. Panjang, R <sub>n1</sub>		0,911	0,941	1,019	1,052	0,877	0,905	1,089	1,101	0,976	0,796	0,896	0,879
10. Fungsi angin, f(u)	m/dt	0,398	0,422	0,370	0,450	0,396	0,389	0,398	0,422	0,370	0,375	0,403	0,433
11. Evapotranspirasi, E <sub>To</sub> *	mm/hr	4,035	4,325	4,534	4,777	4,276	3,828	4,317	4,537	4,284	3,879	4,099	3,983
12. Angka koreksi, c		1,1	1,1	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
13. Evapotranspirasi potensial, E <sub>To</sub>	mm/hr	4,439	4,758	4,988	4,300	3,848	3,445	3,885	4,537	4,712	4,267	4,509	4,381

Sumber: Hasil Perhitungan

Keterangan:

- |                          |                                |  |   |                         |
|--------------------------|--------------------------------|--|---|-------------------------|
| 1. Tabel lampiran        | 4. Tabel lampiran              | 7. $0,34 - 0,044 \epsilon_d^{0,5}$           | 10. $0,27 (1 + 0,864u)$   | 13. $c \times E_{To}^*$ |
| 2. Tabel lampiran        | 5. Tabel lampiran              | 8. $0,1 + 0,9 n/N$                           | 11. $w(0,75R_s - R_{n1}) + (1 - w) \times F(u) \times (\epsilon_\gamma - \epsilon_d)$ |                         |
| 3. $(0,25 + 0,54n/N)R_y$ | 6. $\epsilon_\gamma \times RH$ | 9. $f(t) \times f(\epsilon_d) \times f(n/N)$ | 12. Tabel 4.10  |                         |

Tabel 4.25. Perhitungan Evapotranspirasi Metode Penman Tahun 2013

Parameter	Satuan	Bulan											
		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni	Juli	Agu	Sept	Okt	Nov	Des
<b>Data</b>													
a. Temperatur, t	°C	26,4	26,5	26,9	26,4	27,2	26,4	25,9	25,6	26,2	26,2	26,2	26,5
b. Kelembaban Relatif, RH	%	0,84	0,85	0,85	0,84	0,82	0,87	0,88	0,82	0,8	0,84	0,83	0,84
c. Kecerahan matahari, n/N	%	41	50	48	59	48	59	60	58	49	38	42	55
d. Kecepatan angin, u	m/dt	0,55	0,46	0,61	0,40	0,50	0,50	0,73	0,65	0,81	0,52	0,50	0,48
<b>Perhitungan</b>													
1. w	mbar	0,76	0,76	0,76	0,76	0,77	0,76	0,75	0,75	0,76	0,76	0,76	0,76
2. Angka Angot (R <sub>γ</sub> )	mm/hr	14,7	15,3	15,6	15,3	14,6	14,2	14,3	14,9	15,3	15,3	14,8	14,4
3. Radiasi gel.pendek, R <sub>s</sub>	mm/hr	6,930	7,956	7,944	8,700	7,434	8,074	8,208	8,392	7,873	6,965	7,057	7,877
4. Fungsi suhu, f(t)		15,98	16,00	16,08	15,98	16,14	15,98	15,88	15,80	15,94	15,94	15,94	16,00
5. Tekanan uap jenuh (ε <sub>γ</sub> )	mbar	34,42	34,63	35,46	34,42	36,09	34,42	33,42	32,83	34,02	34,02	34,02	34,63
6. Tekanan uap nyata (ε <sub>d</sub> )	mbar	28,91	29,43	35,46	34,42	36,09	34,42	33,42	32,83	34,02	34,02	34,02	34,63
7. Fungsi tekanan uap f(ε <sub>d</sub> )		0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,10	0,11	0,10
8. Fungsi kecerahan matahari, f(n/N)		0,469	0,550	0,532	0,631	0,532	0,631	0,640	0,622	0,541	0,442	0,478	0,595
9. Radiasi gel. Panjang, R <sub>n1</sub>		0,775	0,891	0,842	1,043	0,864	1,000	1,030	1,098	0,953	0,738	0,809	0,978
10. Fungsi angin, f(u)	m/dt	0,398	0,377	0,412	0,363	0,387	0,387	0,440	0,422	0,459	0,391	0,387	0,382
11. Evapotranspirasi, ETo*	mm/hr	3,758	4,215	4,304	4,527	4,063	4,153	4,193	4,368	4,323	3,787	3,805	4,133
12. Angka koreksi, c		1,1	1,1	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
13. Evapotranspirasi potensial, ETo	mm/hr	4,133	4,636	4,734	4,074	3,656	3,738	3,773	4,368	4,756	4,166	4,186	4,546

Sumber: Hasil Perhitungan

Keterangan:

- |                             |                                |  |   |                      |
|-----------------------------|--------------------------------|--|---|----------------------|
| 1. Tabel lampiran           | 4. Tabel lampiran              | 7. $0,34 - 0,044 \epsilon_d^{0,5}$           | 10. $0,27 (1 + 0,864u)$   | 13. $c \times Eto^*$ |
| 2. Tabel lampiran           | 5. Tabel lampiran              | 8. $0,1 + 0,9 n/N$                           | 11. $w(0,75R_s - R_{n1}) + (1 - w) \times F(u) \times (\epsilon_\gamma - \epsilon_d)$ |                      |
| 3. $(0,25+0,54n/N)R_\gamma$ | 6. $\epsilon_\gamma \times RH$ | 9. $f(t) \times f(\epsilon_d) \times f(n/N)$ | 12. Tabel 4.10  |                      |

#### 4.5 Simulasi Debit Metode Model Tangki

Pada tahap simulasi ini akan dibagi menjadi dua tahapan. Yaitu tahap 1 dan tahap 2, dimana simulasi tahap 1 menggunakan luas sub das dolok sanggul dengan luas das 50 m<sup>2</sup> dikarenakan pada das sibundong tidak memiliki stasiun AWLR sehingga menggunakan luas sub das dolok sanggul. Adapun tahapan simulasi yaitu sebagai berikut.

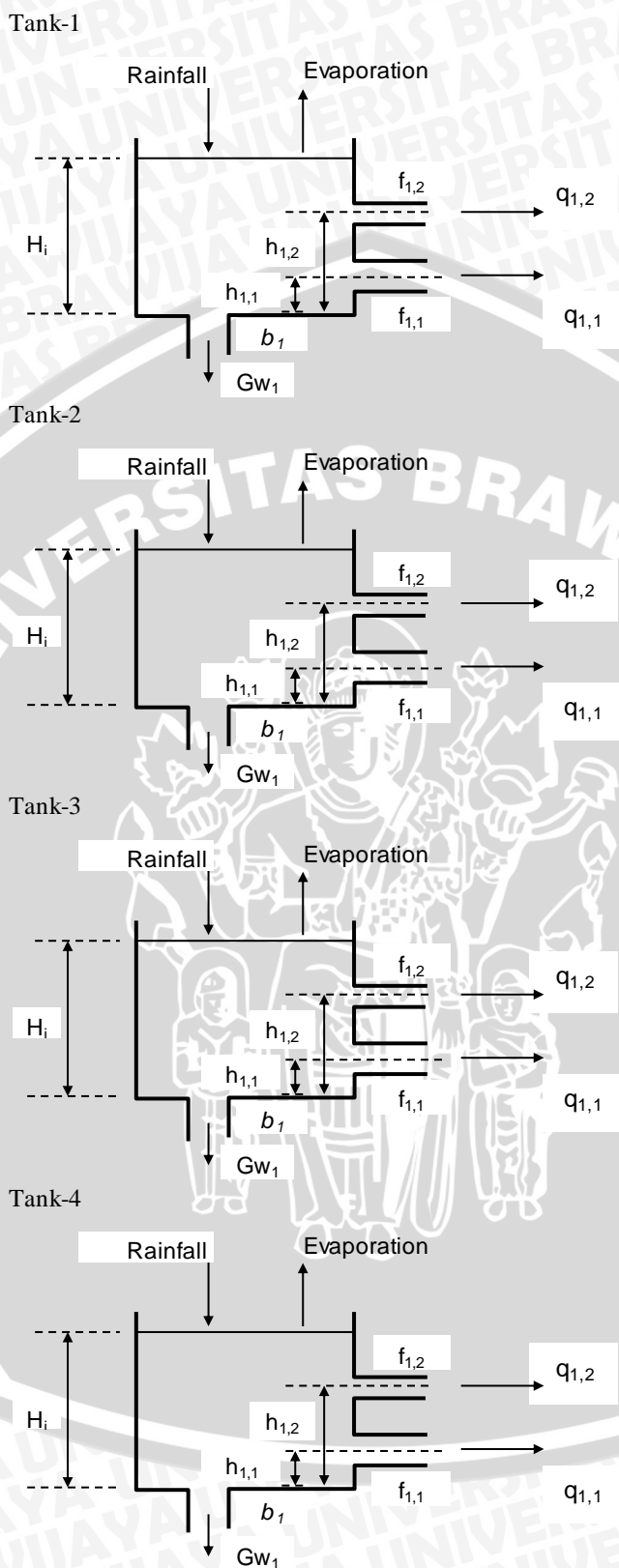
Tahapan simulasi 1:

1. Memakai luas das dolok sanggul dengan luas das 50 m<sup>2</sup>.
2. Memasukkan Curah hujan rerata selama 6 tahun (2006-2011).
3. Memasukkan debit AWLR dolok sanggul 6 tahun (2006-2011).
4. Memasukkan Eto.
5. Didapatkan nilai Hi untuk Tank 1 dengan cara coba-coba pada program solver excel berdasarkan parameter-parameter yang ada.
6. Mencari q<sub>1,2</sub>, q<sub>1,1</sub>, gw<sub>1</sub>, He<sub>1</sub>.
7. Didapatkan nilai Hi untuk Tank 2 dengan cara coba-coba pada program solver excel berdasarkan parameter-parameter yang ada.
8. Menghitung Nilai q<sub>1,2</sub>, q<sub>1,1</sub>, Infiltrasi, He<sub>2</sub>.
9. Didapatkan nilai Hi untuk Tank 3 dengan cara coba-coba pada program solver excel berdasarkan parameter-parameter yang ada.
10. Menghitung Nilai q<sub>02</sub>, q<sub>01</sub>, Perkolasi, He<sub>3</sub>.
11. Didapatkan nilai Hi untuk Tank 4 dengan cara coba-coba pada program solver excel berdasarkan parameter-parameter yang ada.
12. Menghitung Nilai q<sub>02</sub>, q<sub>01</sub>, Perkolasi, He<sub>4</sub>.
13. Menghitung total Limpasan.
14. Menghitung Debit Simulasi.
15. Dikalibrasikan dengan debit pengamatan dengan metode *Nasch-Sutcliffe*.
16. Selesai

Untuk perhitungan detailnya disajikan pada tabel 4.28.



Contoh perhitungan simulasi debit model tangki tahap 1 pada tahun 2006 bulan Januari:



Gambar 4.4. Susunan Model Tangki Simulasi Debit Sungai

Sumber: Perhitungan



Dimana dengan analisa simulasi yang sudah terkalibrasi dengan bantuan program solver pada excel diperoleh nilai parameter koefisien tangki dapat dilihat pada tabel. 4.26. adapun batasan *constraints* yang digunakan pada perhitungan dengan program solver sebagai berikut:

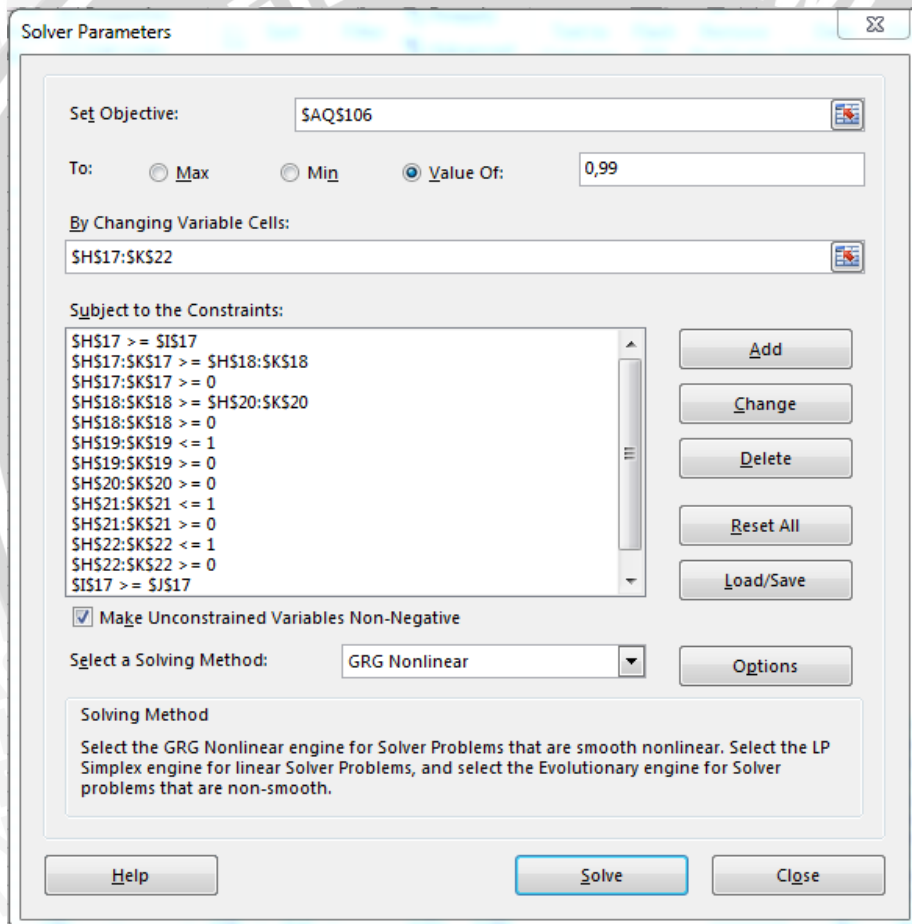
$$Hi \geq 0, hi_2 \geq 0, hi_1 \geq 0$$

$$Hi \geq hi_2 \geq hi_1 \geq 0$$

$$1 \geq fi_1 \geq 0$$

$$1 \geq fi_2 \geq 0$$

$$1 \geq b_1 \geq 0$$



Gambar 4.5 Program Solver pada Excel

Tabel 4.26. Parameter dan Koefisien Model Tangki

	<i>tank-1</i>	<i>tank-2</i>	<i>tank-3</i>	<i>tank-4</i>
$H_i$	9817,461	4776,958	4695,886	373,288
$h_{i,2}$	218,549	249,233	158,691	140,803
$f_{i,2}$	0,005	0,002	0,001	0,001
$h_{i,1}$	48,977	23,278	11,298	0
$f_{i,1}$	0,002	0,023	0,133	0,253
$b_i$	0,249	0,610	0,998	0,987

Sumber: Perhitungan

A. Contoh Perhitungan *Tank-1*

$$\begin{aligned} q_{1,2} &= (H_i - h_{i,2}) \times f_{i,2} \\ &= (9817,461 - 218,549) \times 0,005 \\ &= 44,7 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{1,1} &= (H_i - h_{i,1}) \times f_{i,1} \\ &= (9817,461 - 48,977) \times 0,002 \\ &= 21,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Gw_i &= H_i \times b_i \\ &= 9817,461 \times 0,249 \\ &= 2447,6 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} He1 &= H_i - q_{1,2} - q_{1,1} - Gw_i \\ &= 9817,461 - 44,7 - 21,4 - 2447,6 \\ &= 7303,7 \text{ mm} \end{aligned}$$

B. Contoh Perhitungan *Tank-2*

$$\begin{aligned} q_{1,2} &= (H_{i2} - h_{i,2}) \times f_{i,2} \\ &= (4777 - 249,233) \times 0,002 \\ &= 9,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{1,1} &= (H_i - h_{i,1}) \times f_{i,1} \\ &= (4777 - 23,278) \times 0,023 \\ &= 110,8 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Infiltrasi} &= H_i \times b_i \\ &= 4777 \times 0,61 \\ &= 2915,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} He2 &= H_i - q_{1,2} - q_{1,1} - \text{Infiltrasi} \\ &= 4777 - 9,4 - 110,8 - 2915,4 \\ &= 1741,3 \text{ mm} \end{aligned}$$

C. Contoh Perhitungan *Tank-3*

$$\begin{aligned} q_{02} &= (H_{i3} - h_{i,2}) \times f_{i,2} \\ &= (4695,9 - 158,691) \times 0,001 \\ &= 6,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{01} &= (H_i - h_{i,1}) \times f_{i,1} \\ &= (4595,9 - 11,298) \times 0,133 \\ &= 623,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Perkolasi} &= H_{i3} \times b_1 \\ &= 4695,9 \times 0,998 \\ &= 4685,9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{e3} &= H_i - q_{02} - q_{01} - \text{perkolasi} \\ &= 4695,9 - 6,4 - 623,4 - 4685,9 \\ &= 619,8 \text{ mm} \end{aligned}$$

D. Contoh Perhitungan *Tank-4*

$$\begin{aligned} q_{02} &= (H_{i4} - h_{i,2}) \times f_{i,2} \\ &= (373,3 - 140,803) \times 0,001 \\ &= 0,2 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{01} &= (H_{i4} - h_{i,1}) \times f_{i,1} \\ &= (373,3 - 0) \times 0,253 \\ &= 94,6 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Perkolasi} &= H_i \times b_1 \\ &= 373,3 \times 0,987 \\ &= 368,4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{e4} &= H_i - q_{02} - q_{01} - \text{perkolasi} \\ &= 373,3 - 0,2 - 94,6 - 368,4 \\ &= 90 \text{ mm} \end{aligned}$$

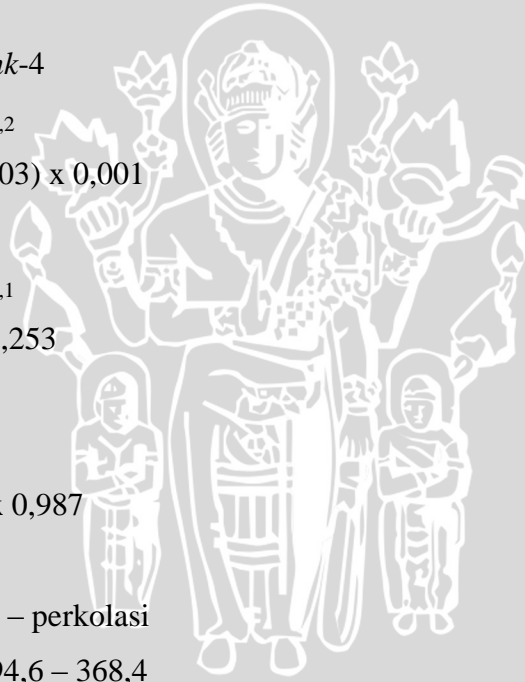
## E. Limpasan

$$\begin{aligned} q &= \sum q_0 \\ &= 911 \text{ mm/bulan} \\ &= 0,0003 \text{ mm/dt} \end{aligned}$$

## F. Debit Simulasi

$$\begin{aligned} &= \sum q_0 \times A \\ &= 0,0003 \times 50 \times 10^6 = 17 \text{ m}^3/\text{dt} \end{aligned}$$

Perhitungan pada selanjutnya ditampilkan pada tabel 4.28.



#### 4.6 Perhitungan Nilai Korelasi *Nash-Sutcliffe* untuk Kalibrasi

Kalibrasi perhitungan Simulasi dianalisis dengan cara Kombinasi. Dalam hal ini, kalibrasi dilakukan untuk menentukan kisaran (*range*) nilai suatu parameter yang mana pada studi ini digunakan hubungan korelasi (R) metode *Nash-Sutcliffe*, adapun parameter yang selanjutnya digunakan *trial and error* untuk menentukan detail kombinasi yang optimal adalah parameter  $H_i$ ,  $h_{i1}$ ,  $h_{i2}$ ,  $f_{i1}$ ,  $f_{i2}$  dan  $b_1$ .

metode *Nash-Sutcliffe* :

$$\text{Nash-Sutcliffe} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{si} - Q_{mi})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{Q} - Q_{mi})^2}$$

Dengan:

$Q_{si}$  = *run-off* terhitung pada interval waktu  $i$

$Q_{mi}$  = *run-off* terukur pada interval waktu  $i$

$\bar{Q}$  = *run-off* terukur rerata untuk periode yang digunakan

$i$  = interval waktu

$N$  = jumlah interval waktu

Nilai korelasi *Nash-Sutcliffe* simulasi tahap 1:

$$\begin{aligned} \text{Nash-Sutcliffe} &= 1 - \frac{78,98}{636,55} \\ &= 0,88 \end{aligned}$$

Nilai korelasi *Nash-Sutcliffe* simulasi tahap 2:

$$\begin{aligned} \text{Nash-Sutcliffe} &= 1 - \frac{3331,37}{23604,45} \\ &= 0,86 \end{aligned}$$

Berdasarkan kriteria yang disyaratkan *Nash-Sutcliffe* untuk nilai korelasi (R) simulasi pada tahap 1 = 0,88 dan nilai korelasi (R) simulasi pada tahap 2 = 0,86 maka nilai korelasinya masuk dalam kategori  $0,6 < R < 1$  sehingga dinyatakan hubungan langsung positif baik.

Untuk simulasi tahapan 2 sama seperti simulasi tahap 1 hanya saja pada tahap kedua, luas das yang digunakan adalah luas das sibundong yaitu 282 km<sup>2</sup>. Untuk mendapatkan debit pengamatan di das sibundong pada studi ini digunakan metode perbandingan luas.

#### 4.7. Metode Perbandingan Luas

Dengan diketahuinya debit aliran sungai Sibundong di bagian hulu pada stasiun Dolok Sanggul dengan luas DAS 50 km<sup>2</sup>, sedangkan luas DAS Sibundong 282 km<sup>2</sup>. Dengan asumsi karakteristik DAS dan klimatloginya sama, maka dapat dilakukan perhitungan debit aliran sungai Sibundong.

Pada metode perbandingan Luas, konsep yang dipakai adalah metode rasional. Contoh perhitungan metode perbandingan luas pada bulan Januari 2006:

$$Q_I = C_I \cdot I_I \cdot A_I$$

$$Q_{II} = C_{II} \cdot I_{II} \cdot A_{II}$$

$$17,01 = 50$$

$$Q_{II} = 282$$

$$Q_{II} = 95,93 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Perhitungan pada bulan-bulan selanjutnya ditampilkan pada tabel 4.27.

Tabel 4.27 Metode Perbandingan Luas

Tahun	Bulan	Debit AWLR Dolok Sanggul	Debit AWLR Sibundong
2006	Januari	17,01	95,93
	Februari	15,29	86,24
	Maret	11,19	63,12
	April	8,70	49,04
	Mei	6,72	37,93
	Juni	5,48	30,91
	Juli	4,74	26,73
	Agustus	3,82	21,55
	September	2,88	16,23
	Oktober	4,08	23,02
	November	4,47	25,19
	Desember	0,00	0,00
2007	Januari	2,44	13,75
	Februari	1,35	7,61
	Maret	1,77	9,97
	April	4,34	24,45
	Mei	1,87	10,57
	Juni	1,79	10,08
	Juli	1,14	6,43
	Agustus	1,04	5,88
	September	0,00	0,00
	Oktober	0,00	0,00
	November	0,00	0,00

Tahun	Bulan	Debit AWLR Dolok Sanggul	Debit AWLR Sibundong
2008	Desember	0,00	0,00
	Januari	1,64	9,27
	Februari	1,22	6,86
	Maret	2,56	14,45
	April	4,58	25,84
	Mei	1,66	9,34
	Juni	1,59	8,94
	Juli	1,41	7,98
	Agustus	1,40	7,90
	September	1,28	7,24
	Oktober	2,76	15,56
	November	2,98	16,83
	Desember	6,08	34,27
2009	Januari	2,38	13,42
	Februari	1,92	10,81
	Maret	2,17	12,26
	April	2,96	16,69
	Mei	1,41	7,93
	Juni	0,99	5,56
	Juli	0,96	5,43
	Agustus	1,22	6,87
	September	1,28	7,22
	Oktober	1,93	10,89
	November	1,49	8,39
	Desember	4,30	24,28
	2010	Januari	1,36
Februari		1,72	9,71
Maret		1,45	8,17
April		2,47	13,93
Mei		1,49	8,39
Juni		0,94	5,32
Juli		1,04	5,86
Agustus		1,00	5,64
September		1,38	7,77
Oktober		1,71	9,64
November		1,75	9,88
Desember		1,69	9,54
2011		Januari	1,32
	Februari	1,50	8,48
	Maret	2,57	14,50
	April	2,61	14,74

Tahun	Bulan	Debit AWLR Dolok Sanggul	Debit AWLR Sibundong
	Mei	1,40	7,88
	Juni	1,30	7,34
	Juli	0,73	4,12
	Agustus	1,11	6,28
	September	1,44	8,10
	Oktober	1,05	5,95
	November	2,23	12,58
	Desember	3,96	22,35

Sumber: Perhitungan

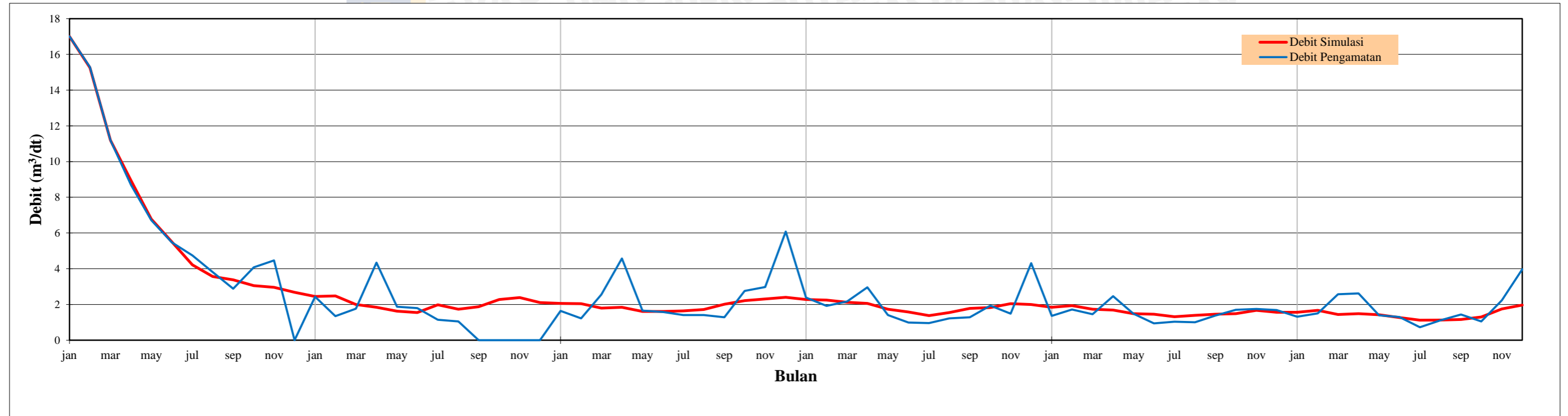




Tabel 4.28 Simulasi Debit Model Tank

Table with 32 columns: Tahun, Bulan, Hari, Curah Hujan Rerata (mm/bulan, mm/hari), ET0, Tank-1 H1, Q1.2, Q1.1, Gw1, He1, Tank-2 H2, Q1.2, Q1.1, Infiltrasi, He2, Tank-3 H3, Q1.2, Q1.1, Perkolasi, He3, Tank-4 H4, Q1.2, Q1.1, Perkolasi, He4, Total Limpasan (mm/bulan, mm/dt), Debit Simulasi (m3/dt), Debit Pengamatan (m3/dt), Perhitungan Nash, and KAR (%). Rows represent monthly data for years 2006, 2007, 2008, 2009, and 2010.

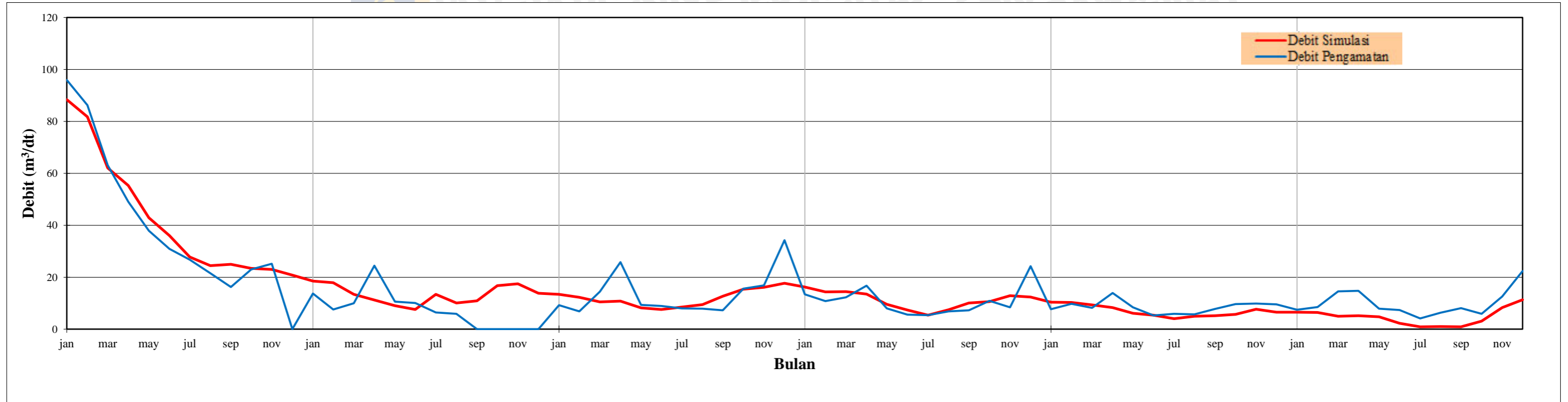




Gambar 4.6 Grafik Hasil Perbandingan Debit Simulasi Dan Debit Pengamatan

Tabel 4.29 Simulasi Debit Model Tank

Table with 32 columns: Tahun, Bulan, Hari, Curah Hujan Rerata, ETo, Tank-1 H1, Tank-2 H2, Tank-3 H3, Tank-4 H4, Total Limpasan, Debit Simulasi, Debit Pengamatan, Perhitungan Nash, and KAR. The table contains monthly simulation data for the years 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, and 2011.



Gambar 4.7 Grafik Hasil Debit Simulasi



Keterangan pada tabel 4.28 dan tabel 4.29:

- [1] = Tahun
- [2] = Bulan
- [3] = Hari
- [4] = Curah hujan rerata (mm/bulan)
- [5] = Evapotranspirasi (mm/bulan)
- [6] = Tinggi tampungan tangki 1 (mm)
- [7] =  $(H_i - h_{1,2}) \times f_{i,2}$  tangki 1 (mm)
- [8] =  $(H_i - h_{1,1}) \times f_{i,1}$  tangki 1 (mm)
- [9] =  $H_i \times b_1$  tangki 1 (mm)
- [10] =  $[6] - [7] - [8] - [9]$  (mm)
- [11] = Tinggi tampungan tangki 2 (mm)
- [12] =  $(H_{i2} - h_{1,2}) \times f_{i,2}$  tangki 2 (mm)
- [13] =  $(H_{i2} - h_{1,1}) \times f_{i,1}$  tangki 2 (mm)
- [14] =  $H_{i2} \times b_1$  tangki 2 (mm)
- [15] =  $[11] - [12] - [13] - [14]$  (mm)
- [16] = Tinggi tampungan tangki 3 (mm)
- [17] =  $(H_{i3} - h_{1,2}) \times f_{i,2}$  tangki 3 (mm)
- [18] =  $(H_{i3} - h_{1,1}) \times f_{i,1}$  tangki 3 (mm)
- [19] =  $H_{i3} \times b_1$  tangki 3 (mm)
- [20] =  $[16] - [17] - [18] - [19]$  (mm)
- [21] = Tinggi tampungan tangki 4 (mm)
- [22] =  $(H_{b4} - h_{1,2}) \times f_{i,2}$  tangki 4 (mm)
- [23] =  $(H_{b4} - h_{1,1}) \times f_{i,1}$  tangki 4 (mm)
- [24] =  $H_{b4} \times b_1$  tangki 4 (mm)
- [25] =  $[21] - [22] - [23] - [24]$  (mm)
- [26] =  $\{[7]+[8]\} + \{[12]+[13]\} + \{[17]+[18]\} + \{[22]+[23]\}$  mm/bulan
- [27] =  $[26] / \{[3] \times 24 \times 3600\}$  (mm/dt)
- [28] =  $\{[27]/10^3\} \times (\text{luas DAS} \times 10^6) \times 0,45$  (m<sup>3</sup>/dt)
- [29] = Debit pengamatan (m<sup>3</sup>/dt)
- [30] =  $([28]-[29])^2$
- [31] =  $(\sum [30]-[29])^2$
- [32] =  $\{([28]-[29])/[29]\}$  (%)

#### 4.8 Kurva Durasi Aliran

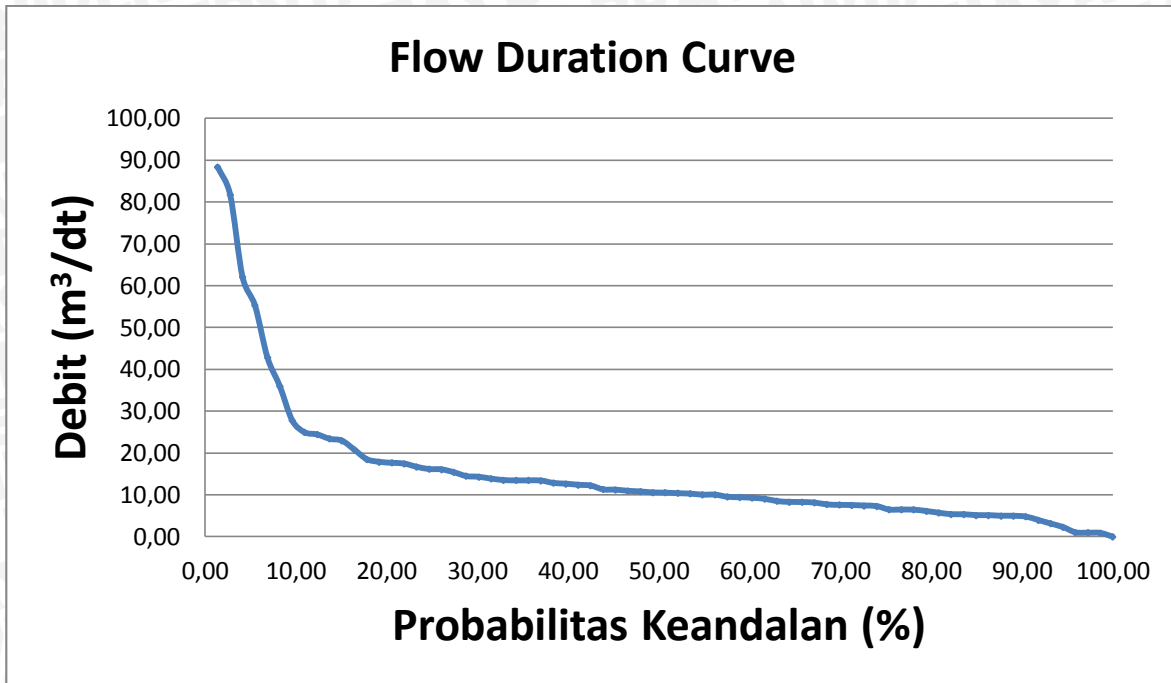
Untuk mendapatkan besarnya debit andalan pada Sungai Sibudong maka digunakanlah Kurva Durasi Aliran/ *Flow Duration Curve* (FDC). Kurva Durasi Aliran dihitung menggunakan persamaan Weibull dengan masukan data hasil simulasi debit metode Model Tank. Hasil perhitungan kurva durasi aliran adalah sebagai berikut:

Tabel 4.30. Data Debit Berdasarkan Keandalan

Final Calibration		
m	P=m/(n+1)	Q (m <sup>3</sup> /dt)
1	1,37%	88,375
2	2,74%	81,794
3	4,11%	62,043
4	5,48%	55,278
5	6,85%	42,852
6	8,22%	35,967
7	9,59%	27,764
8	10,96%	24,944
9	12,33%	24,439
10	13,70%	23,394
11	15,07%	22,955
12	16,44%	20,773
13	17,81%	18,511
14	19,18%	17,889
15	20,55%	17,651
16	21,92%	17,469
17	23,29%	16,703
18	24,66%	16,164
19	26,03%	16,088
20	27,40%	15,395
21	28,77%	14,481
22	30,14%	14,315
23	31,51%	13,865
24	32,88%	13,530
25	34,25%	13,447
26	35,62%	13,444
27	36,99%	13,429
28	38,36%	12,835
29	39,73%	12,669
30	41,10%	12,395
31	42,47%	12,220
32	43,84%	11,294
33	45,21%	11,230

Final Calibration		
m	$P=m/(n+1)$	Q (m <sup>3</sup> /dt)
34	46,58%	10,951
35	47,95%	10,802
36	49,32%	10,561
37	50,68%	10,519
38	52,05%	10,379
39	53,42%	10,282
40	54,79%	10,037
41	56,16%	10,033
42	57,53%	9,537
43	58,90%	9,421
44	60,27%	9,291
45	61,64%	9,046
46	63,01%	8,490
47	64,38%	8,313
48	65,75%	8,272
49	67,12%	8,150
50	68,49%	7,701
51	69,86%	7,591
52	71,23%	7,562
53	72,60%	7,429
54	73,97%	7,309
55	75,34%	6,487
56	76,71%	6,472
57	78,08%	6,444
58	79,45%	6,115
59	80,82%	5,724
60	82,19%	5,363
61	83,56%	5,358
62	84,93%	5,140
63	86,30%	5,133
64	87,67%	4,996
65	89,04%	4,986
66	90,41%	4,799
67	91,78%	3,984
68	93,15%	3,130
69	94,52%	2,285
70	95,89%	1,026
71	97,26%	0,945
72	98,63%	0,887

Sumber: Perhitungan

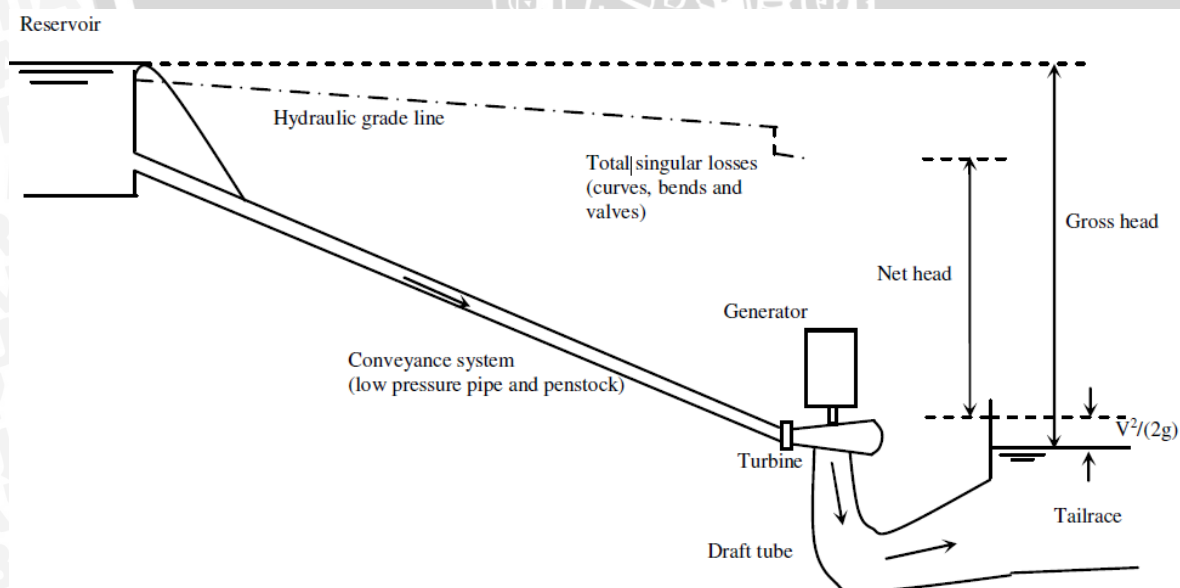


Gambar 4.8. *Flow Duration Curve* Sungai Sibundong

Sumber: Perhitungan

#### 4.9 Tinggi Jatuh Efektif (*Net Head*)

Untuk menghitung tinggi jatuh efektif diperlukan data tinggi jatuh kotor dan kehilangan tinggi tekan. Tinggi jatuh efektif adalah tinggi jatuh kotor dikurangi kehilangan tinggi tekan. Maka tinggi jatuh efektifnya =  $155,27 - 6,33 = 148,94$  m



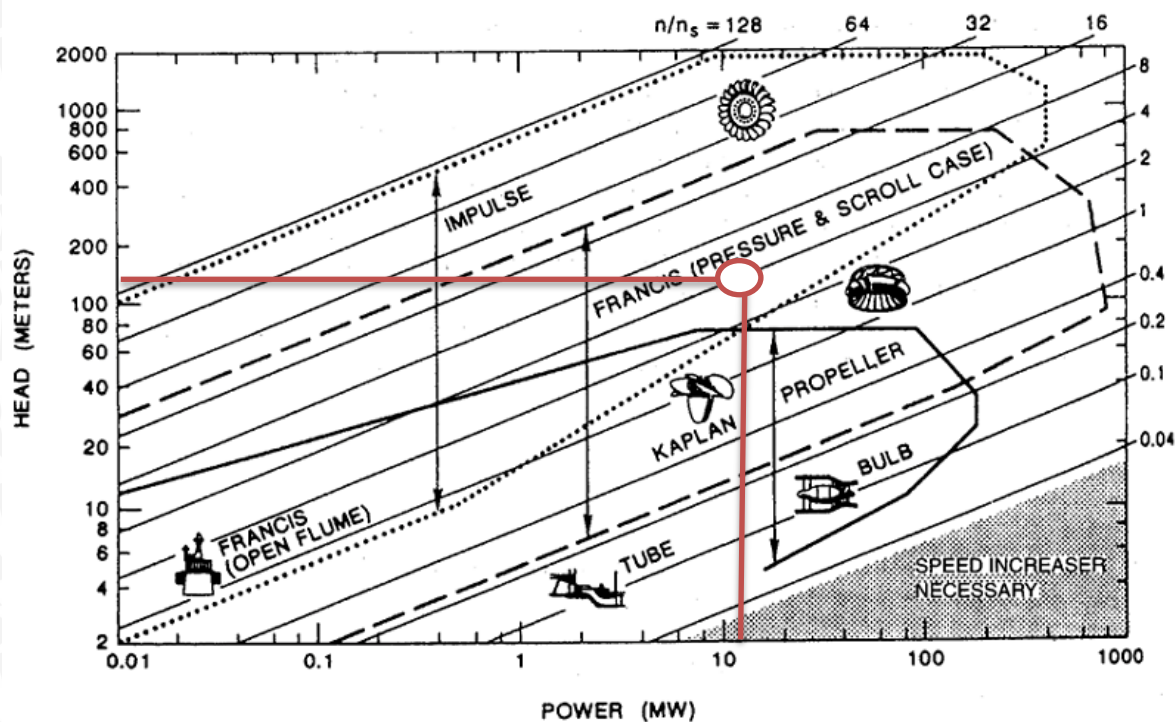
Gambar 4.9. Sketsa Tinggi Jatuh

Sumber: Ramos (2000:61)



#### 4.10 Pemilihan Tipe Turbin

Dengan parameter besarnya debit desain dan tinggi jatuh maka dapat dipilih tipe turbin yang dapat digunakan untuk PLTA Sibundong, berdasarkan kapasitas daya terpasang dan data tinggi jatuh dengan grafik berikut:



Gambar 4.10. Grafik Pemilihan Tipe Turbin

Sumber: Perhitungan

Dari gambar di atas diketahui bahwa dengan tinggi jatuh efektif 148,94 m dan daya sebesar 2 x 6,26 MW, maka dipilih turbin tipe Francis.

#### 4.11 Analisa Debit Pembangkitan

Dengan rencana kapasitas daya terpasang 2 x 6,26 MW dan besar tinggi jatuh maka dapat diketahui besarnya debit pembangkit yang dibutuhkan untuk menjangkau kapasitas daya terpasang, perhitungan kebutuhan debit pembangkit adalah sebagai berikut:

$$\text{Tinggi jatuh kotor (H}_{\text{gross}}) = 155,27 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Asumsi kehilangan tinggi (H}_{\text{loss}}) &= 4,08 \% \times \text{H}_{\text{gross}} \\ &= 4,08 \% \times 155,27 \\ &= 6,33 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tinggi jatuh efektif (H}_{\text{eff}}) &= \text{H}_{\text{gross}} - \text{H}_{\text{loss}} \\ &= 155,27 - 6,33 \\ &= 148,94 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Efisiensi turbin } (\eta_T) = 96 \%$$

$$\text{Efisiensi generator } (\eta_G) = 96 \%$$

Maka:

$$\text{Daya, } P = 9,81 \times Q \times H \times \eta$$

$$\begin{aligned} \text{Debit pembangkit, } Q &= P / (9,81 \times H \times \eta) \\ &= 13400 / (9,81 \times 148,94 \times 96 \% \times 96\%) \\ &= 9,29 \text{ m}^3/\text{dt} \end{aligned}$$

Dari hasil analisa debit pembangkit, maka dapat dilakukan analisa probabilitas keandalan debit berdasarkan Kurva Durasi Aliran sebagai berikut:

$$Q = 9,29 \text{ m}^3/\text{dt}, P = 60 \%$$

#### 4.11 Analisa Daya dan Energi Listrik

Analisa daya PLTA Sibundong debit pembangkit dapat disusun draft operasi turbin berdasarkan probabilitas keandalan debit. Draft disusun berdasarkan kemampuan dan kepekaan turbin terhadap variasi debit operasi, turbin Francis memiliki kepekaan variasi operasi mulai 35% sampai 105% dari debit desain pembangkit, pola debit draft operasi turbin ditentukan antara 60% sampai 100% dengan pertimbangan keandalan debit sungai, pola draft direncanakan sebagai berikut:

Tabel 4.31 Debit Draft Operasi Turbin PLTA Sibundong

Pola	Total Debit m <sup>3</sup> /dt	Probabilitas (%)	Pola Operasi	
			Turbin 1 m <sup>3</sup> /dt	Turbin 2 m <sup>3</sup> /dt
1,0 Q	9,29	60%	4,65	4,65
0,9 Q	8,36	70%	4,65	3,72
0,8 Q	7,43	77%	3,72	3,72
0,7 Q	6,50	86%	3,25	3,25
0,6 Q	5,57	93%	2,79	2,79
0,5 Q	4,65	97%	2,32	2,32
0,4 Q	3,72	99%	3,72	0,00

Sumber: Perhitungan

Tabel di atas menunjukkan dengan pola 1,0 Q total debit = 9,29 m<sup>3</sup>/dt didapatkan probabilitas 60 % dari tabel 4.30. Pola operasi turbin 1 dan turbin 2 nilai debit dibagi 2 dengan total debit sehingga debit turbin 1 = 4,65 m<sup>3</sup>/dt dan debit turbin 2 = 4,65 m<sup>3</sup>/dt.

Tabel 4.32 Perhitungan Produksi Energi Listrik PLTA Sibundong 2 x 6,26 MW

Probability	Debit			Debit sisa	Head eff	Eff Turbin	Eff Generator	Daya	Daya	Operasi Unit 1		Operasi Unit 2		Energi	Energi
	FDC	Unit 1	Unit 2					Unit 1	Unit 2	hari	jam	hari	jam		
%	Q (m <sup>3</sup> /dt)	Q (m <sup>3</sup> /dt)	Q (m <sup>3</sup> /dt)	Q (m <sup>3</sup> /dt)	(m)	(%)	(%)	(MW)	(MW)					GWh	kWh/hari
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]
1%	88,37	4,65	4,65	79,08	148,94	96%	96%	6,26	6,26	5,00	120,00	5,00	120,00	0,75	150,13
3%	81,79	4,65	4,65	72,50	148,94	96%	96%	6,26	6,26	10,00	240,00	10,00	240,00	1,50	150,13
4%	62,04	4,65	4,65	52,75	148,94	96%	96%	6,26	6,26	15,00	360,00	15,00	360,00	2,25	150,13
5%	55,28	4,65	4,65	45,99	148,94	96%	96%	6,26	6,26	20,00	480,00	20,00	480,00	3,00	150,13
7%	42,85	4,65	4,65	33,56	148,94	96%	96%	6,26	6,26	25,00	600,00	25,00	600,00	3,75	150,13
8%	35,97	4,65	4,65	26,68	148,94	96%	96%	6,26	6,26	30,00	720,00	30,00	720,00	4,50	150,13
10%	27,76	4,65	4,65	18,47	148,94	96%	96%	6,26	6,26	35,00	840,00	35,00	840,00	5,25	150,13
11%	24,94	4,65	4,65	15,65	148,94	96%	96%	6,26	6,26	40,00	960,00	40,00	960,00	6,01	150,13
12%	24,44	4,65	4,65	15,15	148,94	96%	96%	6,26	6,26	45,00	1080,00	45,00	1080,00	6,76	150,13
14%	23,39	4,65	4,65	14,10	148,94	96%	96%	6,26	6,26	50,00	1200,00	50,00	1200,00	7,51	150,13
15%	22,95	4,65	4,65	13,66	148,94	96%	96%	6,26	6,26	55,00	1320,00	55,00	1320,00	8,26	150,13
16%	20,77	4,65	4,65	11,48	148,94	96%	96%	6,26	6,26	60,00	1440,00	60,00	1440,00	9,01	150,13
18%	18,51	4,65	4,65	9,22	148,94	96%	96%	6,26	6,26	65,00	1560,00	65,00	1560,00	9,76	150,13
19%	17,89	4,65	4,65	8,60	148,94	96%	96%	6,26	6,26	70,00	1680,00	70,00	1680,00	10,51	150,13
21%	17,65	4,65	4,65	8,36	148,94	96%	96%	6,26	6,26	75,00	1800,00	75,00	1800,00	11,26	150,13
22%	17,47	4,65	4,65	8,18	148,94	96%	96%	6,26	6,26	80,00	1920,00	80,00	1920,00	12,01	150,13
23%	16,70	4,65	4,65	7,41	148,94	96%	96%	6,26	6,26	85,00	2040,00	85,00	2040,00	12,76	150,13
25%	16,16	4,65	4,65	6,87	148,94	96%	96%	6,26	6,26	90,00	2160,00	90,00	2160,00	13,51	150,13
26%	16,09	4,65	4,65	6,80	148,94	96%	96%	6,26	6,26	95,00	2280,00	95,00	2280,00	14,26	150,13
27%	15,40	4,65	4,65	6,10	148,94	96%	96%	6,26	6,26	100,00	2400,00	100,00	2400,00	15,01	150,13
29%	14,48	4,65	4,65	5,19	148,94	96%	96%	6,26	6,26	105,00	2520,00	105,00	2520,00	15,76	150,13
30%	14,31	4,65	4,65	5,02	148,94	96%	96%	6,26	6,26	110,00	2640,00	110,00	2640,00	16,51	150,13
32%	13,86	4,65	4,65	4,57	148,94	96%	96%	6,26	6,26	115,00	2760,00	115,00	2760,00	17,26	150,13
33%	13,53	4,65	4,65	4,24	148,94	96%	96%	6,26	6,26	120,00	2880,00	120,00	2880,00	18,02	150,13

Probability	Debit			Debit sisa	Head eff	Eff Turbin	Eff Generator	Daya		Operasi Unit 1		Operasi Unit 2		Energi	Energi
	FDC	Unit 1	Unit 2					Unit 1	Unit 2	hari	jam	hari	jam		
%	Q (m <sup>3</sup> /dt)	Q (m <sup>3</sup> /dt)	Q (m <sup>3</sup> /dt)	Q (m <sup>3</sup> /dt)	(m)	(%)	(%)	(MW)	(MW)	hari	jam	hari	jam	GWh	kWh/hari
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]
34%	13,45	4,65	4,65	4,16	148,94	96%	96%	6,26	6,26	125,00	3000,00	125,00	3000,00	18,77	150,13
36%	13,44	4,65	4,65	4,15	148,94	96%	96%	6,26	6,26	130,00	3120,00	130,00	3120,00	19,52	150,13
37%	13,43	4,65	4,65	4,14	148,94	96%	96%	6,26	6,26	135,00	3240,00	135,00	3240,00	20,27	150,13
38%	12,83	4,65	4,65	3,54	148,94	96%	96%	6,26	6,26	140,00	3360,00	140,00	3360,00	21,02	150,13
40%	12,67	4,65	4,65	3,38	148,94	96%	96%	6,26	6,26	145,00	3480,00	145,00	3480,00	21,77	150,13
41%	12,40	4,65	4,65	3,10	148,94	96%	96%	6,26	6,26	150,00	3600,00	150,00	3600,00	22,52	150,13
42%	12,22	4,65	4,65	2,93	148,94	96%	96%	6,26	6,26	155,00	3720,00	155,00	3720,00	23,27	150,13
44%	11,29	4,65	4,65	2,00	148,94	96%	96%	6,26	6,26	160,00	3840,00	160,00	3840,00	24,02	150,13
45%	11,23	4,65	4,65	1,94	148,94	96%	96%	6,26	6,26	165,00	3960,00	165,00	3960,00	24,77	150,13
47%	10,95	4,65	4,65	1,66	148,94	96%	96%	6,26	6,26	170,00	4080,00	170,00	4080,00	25,52	150,13
48%	10,80	4,65	4,65	1,51	148,94	96%	96%	6,26	6,26	175,00	4200,00	175,00	4200,00	26,27	150,13
49%	10,56	4,65	4,65	1,27	148,94	96%	96%	6,26	6,26	180,00	4320,00	180,00	4320,00	27,02	150,13
51%	10,52	4,65	4,65	1,23	148,94	96%	96%	6,26	6,26	185,00	4440,00	185,00	4440,00	27,77	150,13
52%	10,38	4,65	4,65	1,09	148,94	96%	96%	6,26	6,26	190,00	4560,00	190,00	4560,00	28,52	150,13
53%	10,28	4,65	4,65	0,99	148,94	96%	96%	6,26	6,26	195,00	4680,00	195,00	4680,00	29,28	150,13
55%	10,04	4,65	4,65	0,75	148,94	96%	96%	6,26	6,26	200,00	4800,00	200,00	4800,00	30,03	150,13
56%	10,03	4,65	4,65	0,74	148,94	96%	96%	6,26	6,26	205,00	4920,00	205,00	4920,00	30,78	150,13
58%	9,54	4,65	4,65	0,25	148,94	96%	96%	6,26	6,26	210,00	5040,00	210,00	5040,00	31,53	150,13
59%	9,42	4,65	4,65	0,13	148,94	96%	96%	6,26	6,26	215,00	5160,00	215,00	5160,00	32,28	150,13
60%	9,29	4,65	4,65	0,00	148,94	96%	96%	6,26	6,26	220,00	5280,00	220,00	5280,00	33,03	150,13
62%	9,05	4,52	4,52	0,00	148,94	96%	96%	6,09	6,09	225,00	5400,00	225,00	5400,00	32,89	146,17
63%	8,49	4,24	4,24	0,00	148,94	96%	96%	5,72	5,72	230,00	5520,00	230,00	5520,00	31,55	137,19
64%	8,31	4,16	4,16	0,00	148,94	96%	96%	5,60	5,60	235,00	5640,00	235,00	5640,00	31,57	134,33
66%	8,27	4,14	4,14	0,00	148,94	96%	96%	5,57	5,57	240,00	5760,00	240,00	5760,00	32,08	133,67
67%	8,15	4,07	4,07	0,00	148,94	96%	96%	5,49	5,49	245,00	5880,00	245,00	5880,00	32,26	131,69
68%	7,70	3,85	3,85	0,00	148,94	96%	96%	5,18	5,18	250,00	6000,00	250,00	6000,00	31,11	124,44
70%	7,59	3,80	3,80	0,00	148,94	96%	96%	5,11	5,11	255,00	6120,00	255,00	6120,00	31,28	122,65
71%	7,56	3,78	3,78	0,00	148,94	96%	96%	5,09	5,09	260,00	6240,00	260,00	6240,00	31,77	122,19

Probability	Debit			Debit sisa	Head eff	Eff Turbin	Eff Generator	Daya		Operasi Unit 1		Operasi Unit 2		Energi	Energi
	FDC	Unit 1	Unit 2					Unit 1	Unit 2	hari	jam	hari	jam		
%	Q (m <sup>3</sup> /dt)	Q (m <sup>3</sup> /dt)	Q (m <sup>3</sup> /dt)	Q (m <sup>3</sup> /dt)	(m)	(%)	(%)	(MW)	(MW)					GWh	kWh/hari
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]
73%	7,43	3,71	3,71	0,00	148,94	96%	96%	5,00	5,00	265,00	6360,00	265,00	6360,00	31,81	120,05
74%	7,31	3,65	3,65	0,00	148,94	96%	96%	4,92	4,92	270,00	6480,00	270,00	6480,00	31,89	118,11
75%	6,49	3,24	3,24	0,00	148,94	96%	96%	4,37	4,37	275,00	6600,00	275,00	6600,00	28,83	104,82
77%	6,47	3,24	3,24	0,00	148,94	96%	96%	4,36	4,36	280,00	6720,00	280,00	6720,00	29,28	104,59
78%	6,44	3,22	3,22	0,00	148,94	96%	96%	4,34	4,34	285,00	6840,00	285,00	6840,00	29,68	104,13
79%	6,12	3,06	3,06	0,00	148,94	96%	96%	4,12	4,12	290,00	6960,00	290,00	6960,00	28,66	98,81
81%	5,72	2,86	2,86	0,00	148,94	96%	96%	3,85	3,85	295,00	7080,00	295,00	7080,00	27,28	92,49
82%	5,36	2,68	2,68	0,00	148,94	96%	96%	3,61	3,61	300,00	7200,00	300,00	7200,00	26,00	86,65
84%	5,36	2,68	2,68	0,00	148,94	96%	96%	3,61	3,61	305,00	7320,00	305,00	7320,00	26,41	86,58
85%	5,14	2,57	2,57	0,00	148,94	96%	96%	3,46	3,46	310,00	7440,00	310,00	7440,00	25,75	83,06
86%	5,13	2,57	2,57	0,00	148,94	96%	96%	3,46	3,46	315,00	7560,00	315,00	7560,00	26,13	82,94
88%	5,00	2,50	2,50	0,00	148,94	96%	96%	3,36	3,36	320,00	7680,00	320,00	7680,00	25,83	80,72
89%	4,99	2,49	2,49	0,00	148,94	96%	96%	3,36	3,36	325,00	7800,00	325,00	7800,00	26,19	80,57
90%	4,80	2,40	2,40	0,00	148,94	96%	96%	3,23	3,23	330,00	7920,00	330,00	7920,00	25,59	77,55
92%	3,98	3,98	0,00	0,00	148,94	96%	96%	5,36	0,00	335,00	8040,00	335,00	8040,00	43,13	128,74
93%	3,13	3,13	0,00	0,00	148,94	96%	96%	4,21	0,00	340,00	8160,00	340,00	8160,00	34,39	101,16
95%	2,28	2,28	0,00	0,00	148,94	96%	96%	3,08	0,00	345,00	8280,00	345,00	8280,00	25,47	73,83
96%	1,03	0,00	0,00	0,00	148,94	96%	96%	0,00	0,00	350,00	8400,00	350,00	8400,00	0,00	0,00
97%	0,94	0,00	0,00	0,00	148,94	96%	96%	0,00	0,00	355,00	8520,00	355,00	8520,00	0,00	0,00
99%	0,89	0,00	0,00	0,00	148,94	96%	96%	0,00	0,00	360,00	8640,00	360,00	8640,00	0,00	0,00
												Jumlah		1489,96	1489960,75

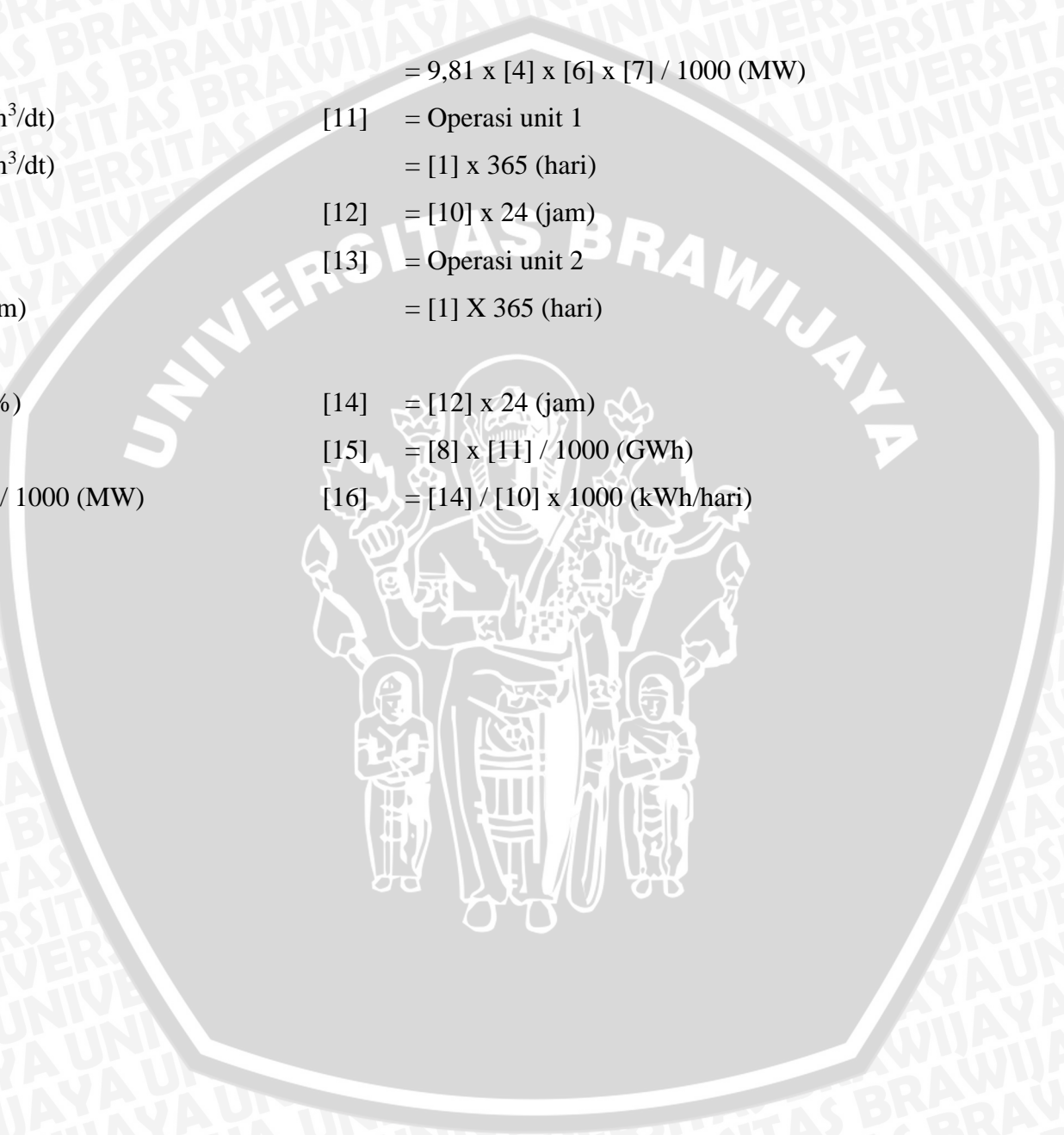
Sumber: Perhitungan

Keterangan:

[1] = Probabilitas (%)

[10] = Daya unit 2

- [2] = Debit (m<sup>3</sup>/dt) = 9,81 x [4] x [6] x [7] / 1000 (MW)
- [3] = Debit turbin unit 1 (m<sup>3</sup>/dt) [11] = Operasi unit 1
- [4] = Debit turbin unit 2 (m<sup>3</sup>/dt) = [1] x 365 (hari)
- [5] = Debit sisa (m<sup>3</sup>/dt) [12] = [10] x 24 (jam)
- = [2] – [3] – [4] [13] = Operasi unit 2
- [6] = Tinggi jatuh efektif (m) = [1] X 365 (hari)
- [7] = Efisiensi turbin (%)
- [8] = Efisiensi generator (%) [14] = [12] x 24 (jam)
- [9] = Daya unit 1 [15] = [8] x [11] / 1000 (GWh)
- = 9,81 x [3] x [6] x [7] / 1000 (MW) [16] = [14] / [10] x 1000 (kWh/hari)



Dengan pertimbangan hasil perhitungan tersebut dalam tabel, maka dapat dihitung besarnya *Capacity Factor* (CF) dari hasil tersebut sebagai berikut:

Produksi energi listrik = 8609,96 GWh/tahun

$$\text{Capacity Factor (CF)} = \frac{\text{Annual Energy (MWh)}}{(\text{installed capacity} \times \text{lama hari operasi} \times \text{durasi operasi})} \%$$

$$\text{Capacity Factor (CF)} = \frac{1489960,75}{(6,26 \times 365 \times 24)} = 27,17 \%$$



*Halaman ini sengaja dikosongkan*





**BAB V**  
**PENUTUP**

**5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil analisa dan perhitungan yang telah dilakukan dengan pada bab sebelumnya, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil simulasi debit dengan menggunakan model tangki pada tahap 1:

Tahun	Bulan	Debit Simulasi
		m <sup>3</sup> /dt
2006	jan	17,0
	feb	15,3
	mar	11,2
	apr	8,9
	may	6,8
	jun	5,5
	jul	4,2
	aug	3,6
	sep	3,4
	oct	3,0
	nov	3,0
	dec	2,7
2007	jan	2,5
	feb	2,5
	mar	2,0
	apr	1,8
	may	1,6
	jun	1,6
	jul	2,0
	aug	1,7
	sep	1,9
	oct	2,3
	nov	2,4
	dec	2,1
2008	jan	2,1
	feb	2,0
	mar	1,8
	apr	1,8
	may	1,6
	jun	1,6
	jul	1,6
	aug	1,7
	sep	2,0
	oct	2,2
	nov	2,3
	dec	2,4
2009	jan	2,3



Tahun	Bulan	Debit Simulasi
		m <sup>3</sup> /dt
	feb	2,2
	mar	2,1
	apr	2,1
	may	1,7
	jun	1,6
	jul	1,4
	aug	1,5
	sep	1,8
	oct	1,8
	nov	2,0
	dec	2,0
	2010	jan
feb		1,9
mar		1,7
apr		1,7
may		1,5
jun		1,5
jul		1,3
aug		1,4
sep		1,5
oct		1,5
nov		1,7
dec		1,6
2011	jan	1,6
	feb	1,7
	mar	1,4
	apr	1,5
	may	1,4
	jun	1,3
	jul	1,1
	aug	1,1
	sep	1,2
	oct	1,3
	nov	1,7
	dec	2,0

Hasil simulasi debit dengan menggunakan model tangki pada tahap 2:

Tahun	Bulan	Debit Simulasi
		m <sup>3</sup> /dt
2006	jan	88,4
	feb	81,8
	mar	62,0
	apr	55,3
	may	42,9

Tahun	Bulan	Debit Simulasi
		m <sup>3</sup> /dt
	jun	36,0
	jul	27,8
	aug	24,4
	sep	24,9
	oct	23,4
	nov	23,0
	dec	20,8
2007	jan	18,5
	feb	17,9
	mar	13,4
	apr	11,2
	may	9,0
	jun	7,6
	jul	13,4
	aug	10,0
	sep	11,0
	oct	16,7
	nov	17,5
	dec	13,9
2008	jan	13,4
	feb	12,2
	mar	10,5
	apr	10,8
	may	8,1
	jun	7,6
	jul	8,5
	aug	9,4
	sep	12,7
	oct	15,4
	nov	16,1
	dec	17,7
2009	jan	16,2
	feb	14,3
	mar	14,5
	apr	13,5
	may	9,5
	jun	7,3
	jul	5,4
	aug	7,4
	sep	10,0
	oct	10,6
nov	12,8	



Tahun	Bulan	Debit Simulasi
		m <sup>3</sup> /dt
2010	dec	12,4
	jan	10,4
	feb	10,3
	mar	9,3
	apr	8,3
	may	6,1
	jun	5,4
	jul	4,0
	aug	5,0
	sep	5,1
	oct	5,7
	nov	7,7
2011	dec	6,5
	jan	6,5
	feb	6,4
	mar	5,0
	apr	5,1
	may	4,8
	jun	2,3
	jul	0,9
	aug	1,0
	sep	0,9
	oct	3,1
	nov	8,3
dec	11,3	

2. Proses kalibrasi antara debit model tangki dengan hasil pengukuran berdasarkan perhitungan *Nash-Sutcliffe* simulasi pada tahap 1 didapatkan nilai korelasi ( $R$ ) = 0,88 dan nilai korelasi ( $R$ ) simulasi pada tahap 2 = 0,86. Berdasarkan kriteria yang disyaratkan *Nash-Sutcliffe* nilai korelasi masuk dalam kategori  $0,6 < R < 1$  sehingga dinyatakan hubungan langsung positif baik.

3. Besar potensi daya yang bisa dihasilkan untuk pola pengoperasian PLTA adalah 2 x 6,26 MW dan energi listrik 1489,96 GWh/tahun.

## 5.2 Saran

1. Untuk menunjang hasil analisis pada aspek hidrologi yang lebih teliti, perlu diupayakan pemasangan stasiun klimatologi, alat ukur hujan manual dan otomatis (*Automatic Rainfall Recorder*) serta pencatatan duga muka air secara otomatis

(*Automatic Water Level Recorder*) di lokasi PLTA Sibudong. Sehingga dengan ketersediaan data ini dapat menambah data hidrologi yang lebih teliti pada saat pelaksanaan pekerjaan pada tahap Studi Simulasi.



*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR PUSTAKA

- Asdak, C. 1995. *Hidrologi dan Pengelolaan DAS*. Yogyakarta: University Press, Gajah Mada.
- Dandekar, MM dan K.N. Sharma. 1991. *Pembangkit Listrik Tenaga Air*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Indarto. 2010. *Hidrologi Dasar Teori dan Contoh Aplikasi Model Hidrologi*. Jember: Penerbit Bumi Aksara.
- McKinney. 1983. *Microhydropower Handbook Volume One*. Amerika Serikat: U.S. Department of Energy Idaho Operations Office.
- Mosonyi, Emil. 1963. *Water Power Development Volume One Low Head Power Plant*. Budapest: Akademia Kiado.
- Limantara L.M. 2010. *Hidrologi Teknik Dasar*. Malang: Penerbit CV.Citra Malang.
- Linsley, R.K.JR., Max A.K., and Joseph, L.H.P. 1989. *Hidrologi Untuk Insinyur*. Terjemahan Hermawan. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Patty, O.F. 1995. *Tenaga Air*. Erlangga: Surabaya.
- Penche, Celso. 2004. *Guidebook on How to Develop a Small Hydro Site*. Belgia: ESHA (European Small Hydropower Association).
- Ramos H. 2000. *Guideline for Design of Small Hydropower Plants*. North Ireland: WREAN (Western Regional Energy Agency & Network) and DED (Department of Economic Development).
- Soemarto, C.D. 1986. *Hidrologi Teknik*. Surabaya: Penerbit: Usaha Nasional.
- Soewarno. 1991. – *Pengukuran dan Pengolahan Data Aliran Sungai – Hidrometri*. Bandung: Nova.
- Sugawara, M. 1974. *Automatic calibration of the tank model*. *Hydrol. Sci. Bull.*
- Triatmodjo, B. 2010. *Hidrologi Terapan*. Yogyakarta: Beta Offset Yogyakarta.