

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Waduk

Waduk menurut pengertian umum adalah tempat pada permukaan tanah yang digunakan untuk menampung air saat terjadi kelebihan air atau saat musim penghujan sehingga air itu dapat dimanfaatkan pada musim kering. Sumber air waduk terutama berasal dari aliran permukaan ditambah dengan air hujan secara langsung.

Tujuan dari pembangunan suatu waduk adalah merubah pola alami aliran menjadi pola aliran yang bermanfaat bagi manusia (Kreuze, J.F.P., 1978). Waduk dibangun dengan membendung sungai pada suatu titik tertentu di lembah sungai sehingga waduk berperan sebagai penyangga atau penyeimbang antara kebutuhan dan ketersediaan air. Maksud dari pembangunan waduk adalah untuk memenuhi kebutuhan air yang secara garis besar dikelompokkan menjadi 4, yaitu (Kreuze, J.F.P., 1978):

1. Alokasi air, sering disebut juga konservasi. Termasuk dalam alokasi ini adalah irigasi, domestik, industri, serta pengelontoran untuk memperbaiki kualitas air.
2. Pembangkit listrik.
3. Pengendali banjir.
4. Lain-lain, seperti pariwisata dan perikanan.

2.1.1. Klasifikasi Waduk

Berdasarkan fungsinya, waduk diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu :

1. Waduk eka guna (*single purpose*)

Waduk eka guna adalah waduk yang dioperasikan untuk memenuhi satu kebutuhan saja, misalnya untuk kebutuhan air irigasi, air baku atau PLTA. Pengoperasian waduk eka guna lebih mudah dibandingkan dengan waduk multi guna dikarenakan tidak adanya konflik kepentingan di dalam. Pada waduk eka guna pengoperasian yang dilakukan hanya mempertimbangkan pemenuhan satu kebutuhan saja.

2. Waduk multi guna (*multi purpose*)

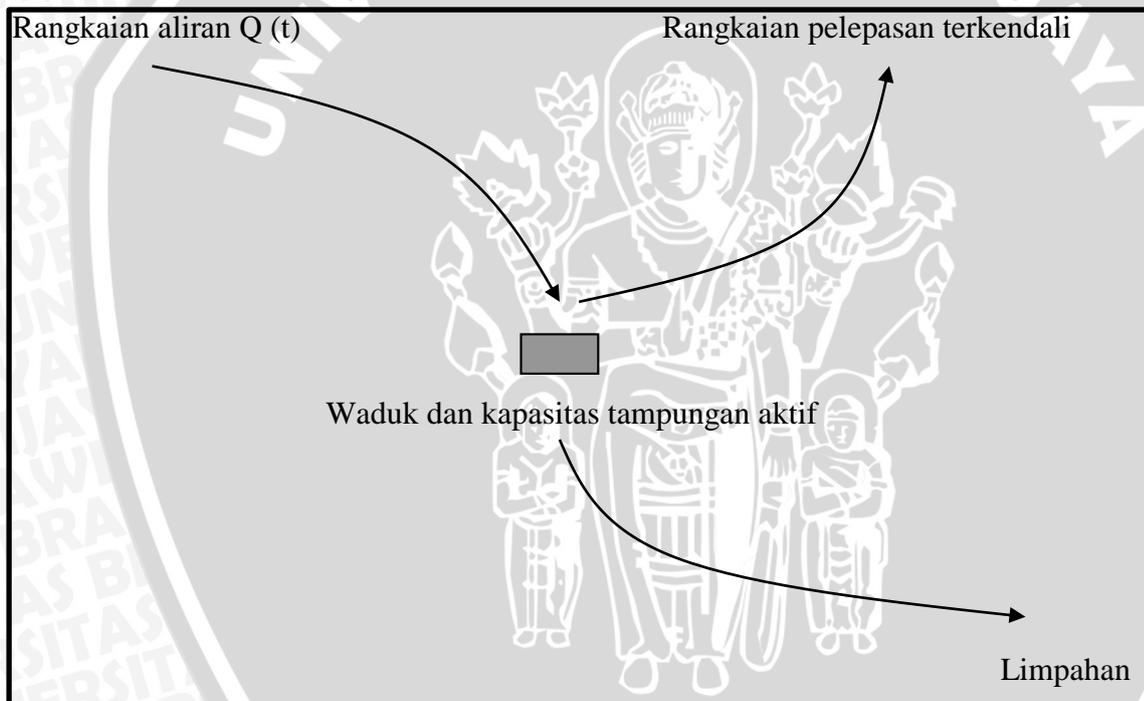
Waduk multi guna adalah waduk yang berfungsi untuk memenuhi berbagai kebutuhan, misalnya waduk untuk memenuhi kebutuhan air, irigasi, air baku dan PLTA. Kombinasi dari berbagai kebutuhan ini dimaksudkan untuk dapat mengoptimalkan fungsi waduk dan meningkatkan kelayakan pembangunan suatu waduk

2.1.2. Karakteristik Waduk

Karakteristik waduk yang diperlukan dalam penyusunan pola operasi suatu waduk adalah data fisik waduk (lebar dan elevasi pelimpah, ada atau tidaknya pintu di atas pelimpah, data *outlet* dari waduk, data elevasi maksimum pengoperasian, data tampungan mati, dan tampungan efektif). Karakteristik yang sangat penting adalah kapasitas tampungan, tampungan yang dibutuhkan untuk memenuhi permintaan tertentu tergantung dari 3 faktor yaitu (Mc.Mahon, 1978) :

1. Variabilitas aliran sungai
2. Ukuran permintaan
3. Tingkat keandalan dari pemenuhan permintaan

Dalam bentuk sederhana, idealisasi masalah kapasitas dan kemampuan waduk dapat digambarkan pada gambar berikut ini.



Gambar 2.1 Idealisasi Masalah Kapasitas dan Kemampuan Waduk

Sumber: Mc. Mahon, 1978

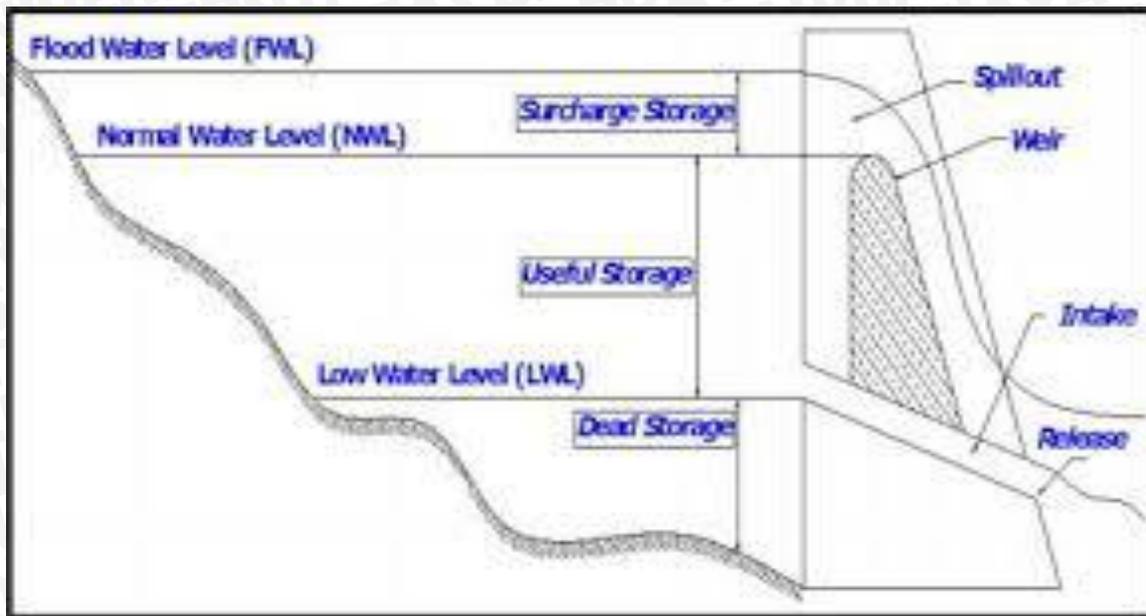
Rangkaian aliran sungai $Q(t)$ akan dimanfaatkan untuk memenuhi permintaan air dengan kebutuhan yang tertentu $D(t)$, dalam hal ini mungkin periode aliran rendah (*low flow*) dari sungai itu perlu diperbesar. Dengan demikian pertanyaan yang diajukan dapat berupa berapa besarnya kapasitas waduk (C) yang harus disediakan bagi suatu pelepasan atau draft yang terkendali $D(t)$ dengan tingkat keandalan yang bisa diterima, mungkin ada variasi lain dari pertanyaan ini misalnya menentukan pelepasan bagi suatu kapasitas

tertentu, tetapi masalah dasarnya tetap sama, yaitu hubungan antara karakteristik aliran masuk (*inflow*), pelepasan yang terkendali dan keandalan harus ditemukan

2.1.3. Tampungan-tampungan Dalam Waduk

Bagian-bagian pokok sebagai ciri fisik suatu waduk adalah sebagai berikut:

1. *Usefull Storage* atau tampungan efektif, adalah volume tampungan diantara muka air minimum (MAM) dan muka air normal (MAN).
2. *Surcharge Storage* (tampungan banjir) adalah volume air diatas genangan normal selama banjir. Untuk beberapa saat debit meluap melalui pelimpah. Kapasitas tambahan ini biasanya tidak terkendali, artinya tampungan ini hanya digunakan pada waktu banjir dan tidak dapat dipertahankan untuk penggunaan selanjutnya (Linsey, 1985:65).
3. *Dead Storage* (tampungan mati) adalah volume air yang terletak dibawah muka air minimum (MAM), volume tampungan ini diperuntukkan untuk sedimen dan air ini tidak dimanfaatkan dalam pengoperasian waduk.
4. *Normal Water Level (NWL)* atau Muka air normal (MAN), adalah elevasi maksimum yang dicapai oleh kenaikan muka air waduk pada kondisi operasi biasa yang ditentukan oleh elevasi mercu pelimpah.
5. *Low Water Level (LWL)* atau Muka air minimum (MAM), adalah elevasi terendah yang diperoleh bila tampungan dilepaskan pada kondisi normal, permukaan ini dapat ditentukan oleh elevasi dari bangunan pelepasan yang terendah.
6. *Flood Water Level (FWL)* atau Muka air banjir (MAB), adalah elevasi air waduk selama banjir maksimum direncanakan terjadi (hanya terjadi pada periode banjir)
7. *Realse* (pelepasan), adalah volume air yang dilepaskan secara terkendali dari suatu waduk selama kurun waktu tertentu.
8. *Spillout* (limpasan), dianggap aliran tidak terkendali dari waduk dan hanya terjadi jika air yang ditampung dalam waduk melebihi tinggi muka air normal.
9. *Critical Periode* (periode kritis), adalah periode dimana sebuah waduk berubah dari kondisi penuh ke kondisi kosong tanpa melimpah selama periode itu. Awal periode kritis adalah keadaan waduk penuh dan akhir periode kritis adalah ketika waduk pertama kali kosong.



Gambar 2.2 Macam Zona Tampunguan Waduk
Sumber: Sudjarwadi (1998:4)

2.1.4. Lengkung Kapasitas Waduk

Lengkung kapasitas waduk (*storage capacity curve of reservoir*) merupakan suatu kurva yang menggambarkan hubungan antara luas muka air (*reservoir area*), volume (*storage capacity*) dengan elevasi (*reservoir water level*). Dari lengkung kapasitas waduk ini akan diketahui berapa besarnya tampungan pada elevasi tertentu, sehingga dapat ditentukan ketinggian muka air yang diperlukan untuk mendapatkan besarnya volume tampungan pada suatu elevasi tertentu, kurva ini juga dipergunakan untuk menentukan besarnya kehilangan air akibat perkolasi yang dipengaruhi oleh luas muka air pada elevasi tertentu.

Dari persamaan lengkung kapasitas dapat ditentukan tinggi muka air waduk dengan persamaan:

$$H = Ch \cdot S^{0.5} \quad (2-1)$$

dengan:

H : tinggi muka air waduk (m)

S : volume tampungan total (m³)

Ch : koefisien

jika kehilangan turut diperhitungkan, kehilangan ini dikalikan luasan untuk mendapatkan volume kehilangan. Persamaan lengkung kapasitas luasan waduk dapat dinyatakan:

$$A = Ca \cdot S^{0.5} \quad (2-2)$$

dengan:

- A : luas muka air waduk (km²)
 S : volume tampungan total (m³)
 Ca : koefisien

2.2. Analisa Hujan Rata-rata Daerah

2.2.1. Curah Hujan Rerata

Untuk menentukan besarnya curah hujan daerah, ada 3 cara yang umum dipakai, yaitu (Suripin, 2004:26):

1. Metode rata-rata hitung (rata-rata aljabar)

Merupakan metode yang paling sederhana dalam perhitungan hujan kawasan karena didasarkan pada asumsi bahwa semua penakar hujan mempunyai pengaruh yang setara. Cara ini cocok untuk kawasan dengan topografi rata atau datar, alat penakar tersebut merata, dan harga individual curah hujan untuk tidak terlalu jauh dari harga rata-ratanya. Curah hujan rerata daerah diperoleh dari persamaan :

$$P = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n}{n} \quad (2-3)$$

dengan:

P_1, P_2, \dots, P_n : curah hujan yang tercatat di pos penakar hujan 1, 2, ..., n
 n : banyaknya pos penakar hujan.

2. Metode Poligon Thiessen

Metode ini dikenal juga sebagai metode rata-rata timbang (*weighted mean*). Cara ini memberikan proporsi luasan daerah pengaruh pos penakar hujan untuk mengakomodasi ketidakseragaman jarak. Daerah pengaruh dibentuk dengan menggambarkan garis-garis sumbu tegak lurus terhadap garis penghubung antara dua pos yang satu dengan lainnya adalah linier atau bahwa sembarang pos dianggap dapat mewakili kawasan terdekat.

Hasil metode poligon Thiessen lebih akurat dibandingkan dengan metode rata-rata aljabar. Cara ini cocok untuk daerah datar dengan luas 500 – 5.000 km², dan jumlah pos penakar hujan terbatas dibandingkan luasnya.

Prosedur penerapan metode ini meliputi langkah-langkah sebagai berikut:

- 1) Lokasi pos penakar hujan diplot pada peta DAS. Antar pos penakar dibuat garis lurus penghubung.
- 2) Tarik garis tegak lurus di tengah-tengah tiap garis penghubung sedemikian rupa, sehingga membentuk poligon Thiessen. Semua titik dalam satu poligon akan mempunyai jarak terdekat dengan pos penakar yang ada didalamnya dibandingkan

dengan jarak terhadap pos lainnya. Selanjutnya, curah hujan pada pos tersebut dianggap representasi hujan kawasan dalam poligon yang bersangkutan.

- 3) Luas areal pada tiap-tiap poligon dapat di ukur dengan planimeter dan luas total DAS (A), curah hujan rerata daerah dapat diketahui dengan persamaan berikut (Suripin, 2004:27) :

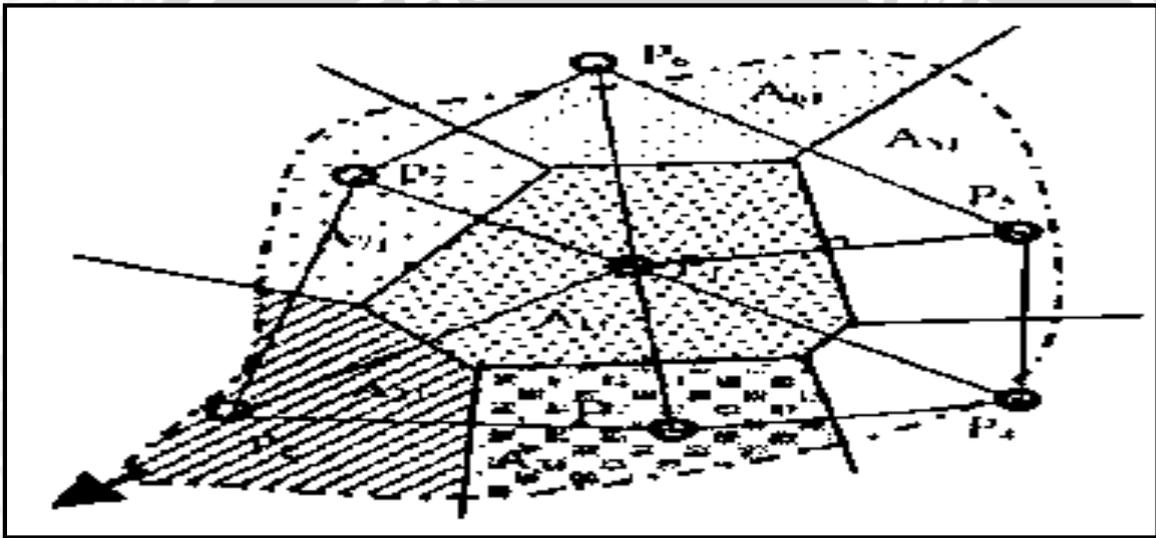
$$P = \frac{A_1P_1 + A_2P_2 + \dots + A_nP_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} \quad (2-4)$$

dengan :

P : tinggi hujan rata-rata DAS (mm)

$P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$: tinggi curah hujan di pos 1, 2, 3, ..., n (mm)

$A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$: luas daerah pengaruh pos 1, 2, 3, ..., n (km^2)



Gambar 2.3 Poligon thiessen
Sumber: Suripin, 2004:28

3. Metode Isohyet

Metode ini merupakan metode yang paling akurat untuk menentukan hujan rata-rata, namun diperlukan keahlian dan pengalaman. Cara ini memperhitungkan secara aktual pengaruh tiap-tiap pos penakar hujan. Dengan kata lain asumsi metode Thiessen menganggap bahwa tiap-tiap pos penakar mencatat kedalaman yang sama untuk daerah sekitarnya dapat dikoreksi.

Metode Isohyet terdiri dari beberapa langkah sebagai berikut:

- 1) Plot data kedalaman air hujan untuk tiap pos penakar hujan pada peta.
- 2) Gambar kontur area antara dua garis Isohyet dengan menggunakan planimeter. Kalikan masing-masing luas areal dengan rata-rata hujan antara dua Isohyet yang berdekatan.

Perhitungan hujan rata-rata DAS dengan persamaan berikut (Suripin, 2004:30) :

$$P = \frac{A_1 \frac{P_0+P_1}{2} + A_2 \frac{P_1+P_2}{2} + \dots + A_n \frac{P_n+P_{n+1}}{2}}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (2-5)$$

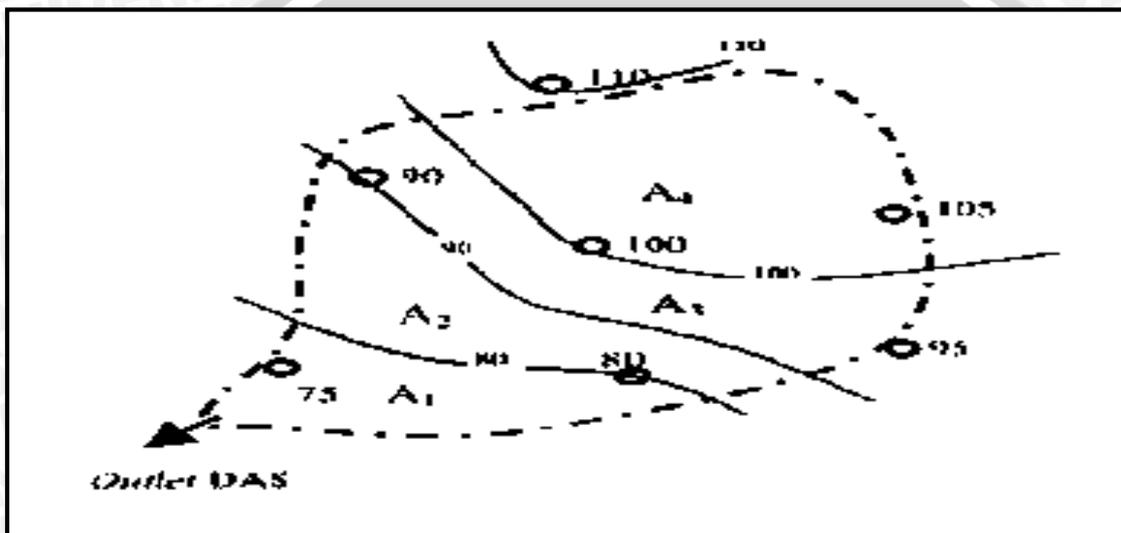
dengan :

$A_1+A_2+\dots+A_n$: luas areal (km²)

P : tinggi curah hujan rata – rata DAS (mm)

P_0, P_1, \dots, P_n : curah hujan pada Isohyet 0, 1, 2, ..., n (mm)

A_1, A_2, \dots, A_n : luas bagian areal yang dibatasi oleh isohyet-isohyet yang bersangkutan (km²)



Gambar 2.4 Isohyet
Sumber: Suripin, 2004:29

Ada beberapa kelebihan dan kekurangan dari ketiga metode diatas dalam pemilihan metode yang cocok untuk menentukan curah hujan rerata daerah yang cocok dengan mempertimbangkan beberapa faktor berikut:

- a. Jaring-jaring pos penakar hujan

Tabel 2.1 Pemilihan Metode Penentuan Curah Hujan Rerata Berdasarkan Jumlah Pos Penakar Hujan

Jumlah Pos Penakar Hujan	Metode
Cukup	Isohyet, poligon Thiessen atau Rata-rata hitung
Terbatas	Rata-rata hitung atau poligon Thiessen
Tunggal	Hujan Titik

Sumber: Suripin, 2004:31

b. Luas DAS

Tabel 2.2 Pemilihan Metode Penentuan Curah Hujan Rerata Berdasarkan Luas DAS

Luas DAS	Metode
DAS besar ($> 5000 \text{ km}^2$)	Isohyet
DAS sedang ($500 \text{ s/d } 5000 \text{ km}^2$)	Poligon Thiessen
DAS kecil ($< 500 \text{ km}^2$)	Rata-rata Hitung

Sumber: Suripin, 2004:31

c. Topografi DAS

Tabel 2.3 Pemilihan Metode Penentuan Curah Hujan Rerata Berdasarkan Topografi

Topografi	Metode
Pegunungan	Rata-rata Hitung
Daratan	Poligon Thiessen
Berbukit dan tidak beraturan	Isohyet

Sumber: Suripin, 2004:32

Pada studi ini, metode penentuan curah hujan yang digunakan adalah menggunakan metode Rata-rata hitung. Metode ini dipilih dengan mempertimbangkan 3 faktor yaitu :

- 1) Jumlah penakar hujan yang terbilang cukup (3 stasiun hujan) sehingga metode yang cocok digunakan adalah metode Isohyet, Poligon Thiessen atau Rata-rata hitung.
- 2) Luas DAS Bajulmati adalah $98,43 \text{ km}^2$ (termasuk DAS kecil) sehingga metode yang cocok digunakan untuk luas DAS yang kecil adalah metode Rata-rata hitung.
- 3) Topografi atau morfologi pada daerah studi dilihat dari peta morfologi (Lampiran 1) adalah berupa pegunungan sehingga metode yang cocok digunakan adalah metode Rata-rata hitung.

2.2.2. Uji Konsistensi Data Curah Hujan

Sebelum digunakan dalam analisa, data curah hujan terlebih dahulu diuji konsistensinya. Uji konsistensi dilakukan dengan metode lengkung massa ganda (*double mass curve*), merupakan pengujian konsistensi dengan menggunakan data komulatif hujan tahunan dalam jangka waktu yang panjang dari suatu stasiun penakar hujan dibandingkan dengan data komulatif rata-rata sekelompok stasiun penakar hujan lain dengan jangka waktu yang sama yang diilustrasikan dalam suatu kurva. Dari pengujian tersebut dapat diketahui apakah terjadi perubahan lingkungan atau perubahan cara menakar. Jika hasil uji menyatakan data hujan di suatu stasiun penakar hujan konsisten, berarti pada daerah pengaruh stasiun tersebut tidak terjadi perubahan lingkungan dan cara menakar selama pencatatan data tersebut dan sebaliknya.

2.3. Evapotranspirasi

Evaporasi dan transpirasi merupakan faktor dalam studi pengembangan sumberdaya air. Evaporasi adalah proses fisik yang mengubah suatu cairan zat padat menjadi suatu gas. Sedangkan transpirasi merupakan penguapan yang terjadi pada suatu tumbuhan. Jika proses dari evaporasi dan transpirasi saling berkaitan disebut evapotranspirasi. Ada beberapa rumus yang telah dikembangkan untuk menghitung besarnya evapotranspirasi potensial, yaitu Metode Radiasi, Metode Blaney-Criddle, dan Metode Penman, dan lain-lain. Pada dasarnya, ketiga metode tersebut memiliki prinsip umum yang sama yaitu :

$$ET_0 = c \times ET_0^* \quad (2-6)$$

dengan :

ET_0 : evapotranspirasi potensial (mm/hari)

c : faktor koreksi

ET_0^* : evaporasi (mm/hari)

Perbedaan dari ketiga metode tersebut adalah dalam penentuan angka koreksi (c) dan evaporasi (ET_0^*). Perbedaan tersebut dapat dijelaskan dalam tabel berikut :

Tabel 2.4 Data Terukur untuk Perhitungan Evaporasi (ET_0^*)

Metode	Data terukur yang dibutuhkan
Radiasi	Letak Lintang (LL) Suhu rata-rata bulanan (t) ($^{\circ}$ C) Kecerahan matahari ($\frac{n}{N}$) (%)
Blaney-Criddle	Letak Lintang (LL) Suhu rata-rata bulanan (t) ($^{\circ}$ C)
Penman	Letak Lintang (LL) Suhu rata-rata bulanan (t) ($^{\circ}$ C) Kecerahan matahari ($\frac{n}{N}$) (%) Perbedaan kecepatan angin siang dan malam (u) (mm/dt) Kelembaban relatif (RH) (%)

Sumber: Montarchi, 2010:22

Tabel 2.5 Penyesuaian Angka Koreksi untuk Perhitungan Evaporasi Potensial (ET_0)

Metode	Data terukur yang dibutuhkan
Radiasi	Perbedaan kecepatan angin siang dan malam (u) (mm/dt) Kelembaban relatif (RH) (%)
Blaney-Criddle	Kecerahan matahari ($\frac{n}{N}$) (%) Perbedaan kecepatan angin siang dan malam (u) (mm/dt) Kelembaban relatif (RH) (%)
Penman	Perbedaan kecepatan angin siang dan malam (u) (mm/dt)

Sumber: Montarich, 2010:22

1. Radiasi

Data yang diperlukan untuk perhitungan evapotranspirasi potensial dengan menggunakan metode radiasi antara lain letak lintang, suhu udara, dan kecerahan matahari.

Persamaan yang digunakan adalah :

$$ET_0^* = R_s \times w \quad (2-7)$$

$$R_s = (0,25 + 0,54 \left(\frac{n}{N}\right)) R_a \quad (2-8)$$

dengan :

ET_0^* : evaporasi (mm/hari)

R_s : radiasi gelombang pendek yang diterima bumi (mm/hari)

w : faktor pengaruh suhu dan elevasi ketinggian daerah

R_a : radiasi gelombang pendek yang memenuhi batas luar atmosfer \approx angka angot
(bergantung pada letak lintang daerah)

Tabel 2.6 Angka Koreksi (c) untuk Metode Radiasi

Bulan	Angka Koreksi (c)
Januari	0,80
Februari	0,80
Maret	0,75
April	0,75
Mei	0,75
Juni	0,75

Lanjutan Tabel 2.6 Angka Koreksi (c) untuk Metode Radiasi

Bulan	Angka Koreksi (c)
Juli	0,75
Agustus	0,80
September	0,80
Oktober	0,80
November	0,80
Desember	0,80

Sumber : Montarcih, 2010:26

Tabel 2.7 Hubungan suhu (t) dan w

Suhu (t)	W	Suhu (t)	W
24,0	0,735	27,0	0,765
24,2	0,737	27,2	0,767
24,4	0,739	27,4	0,769
24,6	0,741	27,6	0,771
24,8	0,743	27,8	0,773
25,0	0,745	28,0	0,775
25,2	0,747	28,2	0,777
25,4	0,749	28,4	0,779
25,6	0,751	28,6	0,781
25,8	0,753	28,8	0,783
26,0	0,755	29,0	0,785
26,2	0,757	29,2	0,787
26,4	0,759	29,4	0,789
26,6	0,761	29,6	0,791
26,8	0,763	29,8	0,793

Sumber : Montarcih, 2010:26

Tabel 2.8 Harga Ra untuk Indonesia, 5⁰ LU s/d 10⁰ LS

Bulan	LU			0	LS				
	5	4	2		2	4	6	8	10
Januari	13,0	14,3	14,7	15,0	15,3	15,5	15,8	16,1	16,1
Februari	14,0	15,0	15,3	15,5	15,7	15,8	16,0	16,1	16,0
Maret	15,0	15,5	15,6	15,7	15,7	15,6	15,6	15,1	15,3
April	15,1	15,5	15,3	15,3	15,1	14,9	14,7	14,1	14,0

Lanjutan Tabel 2.8 Harga Ra untuk Indonesia, 5⁰ LU s/d 10⁰ LS

Bulan	LU			0	LS				
	5	4	2		2	4	6	8	10
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
Agustus	15,3	15,1	14,9	14,8	14,8	14,3	14,0	13,7	12,2
September	15,1	15,3	15,3	15,3	15,3	15,1	15,0	14,9	13,1
Oktober	15,7	15,1	15,3	15,4	15,4	15,6	15,7	15,8	14,6
November	14,8	14,5	14,8	15,1	15,1	15,5	15,8	16,0	15,6
Desember	14,6	14,1	14,4	14,8	14,8	15,4	15,7	16,0	16,0

Sumber: Montarcih, 2010:27

2. Blaney-Criddle

Data terukur yang diperlukan dalam Rumus Blaney-Criddle adalah letak lintang, suhu udara, dan angka koreksi (c). Persamaan yang digunakan adalah :

$$ET_0^* = P (0,457 t + 8,13) \quad (2-9)$$

dengan :

P : prosentasi rata-rata jam siang malam (bergantung pada letak LL)

t : suhu udara (°C)

Tabel 2.9 Angka Koreksi (c) Menurut Blaney-Criddle

Bulan	Angka Koreksi
Januari	0,80
Februari	0,80
Maret	0,75
April	0,70
Mei	0,70
Juni	0,70
Juli	0,70
Agustus	0,75
September	0,80
Oktober	0,80
November	0,80
Desember	0,80

Sumber : Montarcih, 2010:23

Tabel 2.10 Hubungan P dan LL untuk Indonesia (5^0 LU s/d 10^0 LS)

Lintang	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des
5,0 Utara	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27
2,5 Utara	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27
0	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
2,5 Selatan	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
5,0 Selatan	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
7,5 Selatan	0,29	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,29
10 Selatan	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,28	0,29

Sumber : Montarcih, 2010:23

3. Penman

Dalam kajian studi ini yang digunakan adalah rumus Penman. Rumus Penman membutuhkan banyak data terukur, yaitu suhu udara bulanan rerata, kelembapan relatif bulanan, kecerahan matahari bulanan, kecepatan angin bulanan rerata, dan letak lintang daerah yang ditinjau. Untuk perhitungan pada daerah di Indonesia rumus yang digunakan sebagai berikut (Suhardjono, 1994:54):

$$ET_0^* = w (0,75R_s - R_{n-1} + (1 - w)f(u)(e_a - e_d) \quad (2-10)$$

dengan :

ET_0^* : besaran evapotranspirasi potensial sebelum dikoreksi (mm/hari)

w : faktor yang berhubungan dengan temperature (t) dan elevasi daerah

untuk daerah Indonesia dengan elevasi antara 0 – 500 m, hubungan t dan w seperti pada tabel 2.13.

$$R_s = \left(0,25 + 0,54 \frac{n}{N}\right) R_a \quad (2-11)$$

dengan:

R_s : radiasi gelombang pendek dalam suatu evaporasi (mm/hari)

R_a : radiasi gelombang pendek yang memenuhi batas luar atmosfer (angka angot) yang dipengaruhi oleh letak lintang daerah (mm/hari). (Tabel 2.11 dan tabel 2.12)

$$R_{n-1} = f(t) \cdot f(ed) \cdot f(n/N) \quad (2-12)$$

dengan:

R_{n-1} : radiasi bersih gelombang panjang (mm/hari)

$f(t)$: fungsi suhu

$f(ed)$: fungsi tekanan uap

$$= 0,34 - (0,044 \times 0,5ed) \quad (2-13)$$

$f(n/N)$: fungsi kecerahan

$$= 0,1 + (0,9 \cdot n/N) \quad (2-14)$$

N : jumlah jam yang sebenarnya dalam 1 hari matahari bersinar terang (jam)

$f(u)$: fungsi dari kecepatan angin pada ketinggian 2 m dalam satuan (m/dt)

$$= 0,27 (1 + 0,864 u) \quad (2-15)$$

u : kecepatan angin (m/dt)

$(ea-ed)$: perbedaan tekanan uap jenuh dengan tekanan uap yang sebenarnya

$$Ed = ea - Rh \quad (2-16)$$

Rh : kelembaban relatif (%)

ea : tekanan uap jenuh (mbar)

ed : tekanan uap sebenarnya (mbar)

Tabel 2.11 Nilai (R_a Radiasi) Ekstraterrestrial (Angot) Setara Penguapan (mm/hari) untuk Lintang Utara

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Lintang Utara												
10	13,2	14,2	15,3	15,7	15,5	15,3	15,3	15,5	15,3	14,7	13,6	12,9
8	13,6	14,5	15,3	15,6	15,3	15,0	15,1	15,4	15,3	14,8	13,9	13,3
6	13,9	14,8	15,4	15,4	15,1	14,7	14,9	15,2	15,3	15,0	14,2	13,7
4	14,3	15,0	15,5	15,5	14,9	14,4	14,6	15,1	15,3	15,1	14,5	14,1
2	14,7	15,3	15,6	15,3	14,6	14,2	14,3	14,9	15,3	15,3	14,8	14,4
0	15,0	15,5	15,7	15,3	14,4	13,9	14,1	14,8	15,3	15,4	15,1	14,8

Sumber: Suhardjono, 1994:46

Tabel 2.12 Nilai (R_a Radiasi) Ekstraterrestrial (Angot) Setara Penguapan (mm/hari) untuk Lintang Selatan

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Lintang Selatan												
0	15,0	15,5	15,7	15,3	14,4	13,9	14,1	14,8	15,3	15,4	15,1	14,8
2	15,3	15,7	15,7	15,1	14,1	13,5	13,7	14,5	15,2	15,5	15,3	15,1
4	15,5	15,8	15,6	14,9	13,8	13,2	13,4	14,3	15,1	15,6	15,5	15,4
6	15,8	16,0	15,6	14,7	13,4	12,8	13,1	14,0	15,0	15,7	15,8	15,7
8	16,1	16,1	15,5	14,4	13,1	12,4	12,7	13,7	14,9	15,8	16,0	16,0
10	16,4	16,3	15,5	14,2	13,8	12,0	12,4	13,5	14,8	15,9	16,2	16,2

Sumber: Suhardjono, 1994:46

Tabel 2.13 Hubungan Suhu (t) dengan Nilai ea (mbar), w, (1-w) dan f(t)

Suhu (t)	Ea (mbar)	W	1-w	f(t)
24.0	29.845	0.735	0.265	15.400
24.2	30.273	0.737	0.263	15.455
24.4	30.581	0.739	0.261	15.491
24.6	30.950	0.741	0.259	15.536
24.8	31.319	0.743	0.257	15.581
25.0	31.688	0.745	0.255	15.627
25.2	32.073	0.747	0.253	15.672
25.4	31.458	0.749	0.251	15.717
25.6	32.844	0.751	0.249	15.763
25.8	33.230	0.753	0.247	15.808
26.0	33.617	0.755	0.245	15.853
26.2	34.024	0.757	0.243	15.898
26.4	34.431	0.759	0.241	15.944
26.6	34.839	0.761	0.239	15.989
26.8	35.247	0.763	0.237	16.034
27.0	35.656	0.765	0.235	16.079
27.2	36.085	0.767	0.233	16.124
27.4	36.515	0.769	0.231	16.170
27.6	36.945	0.771	0.229	16.215
27.8	37.376	0.773	0.227	16.260
28.0	37.907	0.775	0.225	16.305
28.2	38.259	0.777	0.223	16.350
28.4	38.711	0.779	0.221	16.395
28.6	39.163	0.781	0.219	16.440
28.8	39.616	0.783	0.217	16.485
29.0	40.070	0.785	0.215	16.530
29.2	40.544	0.787	0.213	16.575
29.4	41.019	0.789	0.211	16.620
29.6	41.494	0.791	0.209	16.666
29.8	41.969	0.793	0.207	16.711
30.0	42.445	0.795	0.205	16.755

Sumber: Suhardjono, 1994:58

Tabel 2.14 Besar Angka Koreksi (c) Bulanan

Bulan	Angka Koreksi (c)		
	Blaney-cridel	Radiasi	Penman
Januari	0.800	0.800	1.100
Februari	0.800	0.800	1.100
Maret	0.750	0.750	1.000
April	0.750	0.750	1.000
Mei	0.700	0.700	0.950
Juni	0.700	0.700	0.950
Juli	0.750	0.750	1.000
Agustus	0.750	0.750	1.000
September	0.800	0.800	1.100
Oktober	0.800	0.800	1.100
November	0.825	0.825	1.150
Desember	0.825	0.825	1.150

Sumber: Suhardjono, 1994:64

2.4. Debit Aliran F.J. Mock

Metode ini menganggap bahwa hujan yang jatuh pada *catchment area* sebagian akan hilang sebagai evapotranspirasi, sebagian akan langsung menjadi *direct run off* dan sebagian lagi akan masuk ke dalam tanah (infiltrasi). Infiltrasi ini pertama-tama akan menjenuhkan *top-soil* dulu baru kemudian menjadi perkolasi ke tampungan air tanah yang nantinya akan keluar ke sungai sebagai *base flow*. Dalam hal ini harus ada keseimbangan antara hujan yang jatuh dengan evapotranspirasi, *direct run off* dan infiltrasi sebagai *soil moisture* dan *water discharge*. Aliran dalam sungai adalah jumlah aliran yang langsung di permukaan tanah (*direct run off*) dan *base flow*.

Metode Mock mempunyai dua prinsip pendekatan perhitungan aliran permukaan yang terjadi di sungai, yaitu neraca air di atas permukaan tanah dan neraca air bawah tanah yang semua berdasarkan hujan, iklim dan kondisi tanah. Adapun prosedur perhitungan FJ Mock sebagai berikut (Hadisusanto, 2010:230):

1. Hujan

Nilai hujan 10 harian atau curah hujan (P) dan Jumlah hari hujan didapat dari pencatat data hujan 10 harian (mm) dan jumlah hari hujan pada bulan yang bersangkutan.

2. Evapotranspirasi Terbatas

Evapotranspirasi terbatas adalah evapotranspirasi aktual dengan mempertimbangkan kondisi vegetasi dan permukaan tanah. Sehingga persamaan sebagai berikut:

$$E = ET_0 \times \frac{d}{30} \times m \quad (2-17)$$

dengan:

E : perbedaan antara evapotranspirasi potensial dan evapotranspirasi terbatas (mm).

ET_0^* : evapotranspirasi potensial (mm).

d : jumlah hari kering atau hari tanpa hujan dalam 1 bulan.

m : presentase lahan yang tidak tertutup vegetasi, ditaksir dari peta tata guna lahan

Berdasarkan frekuensi curah hujan di Indonesia dan sifat infiltrasi serta penguapan dari tanah permukaan, didapat hubungan:

$$d = \frac{3}{2} (18 - h) \quad (2-18)$$

$$\text{atau } d = 27 - \frac{3}{2} h \quad (2-19)$$

dengan :

h : jumlah hari hujan dalam sebulan

Selanjutnya substansi antara persamaan (2-20) dan (2-21) diperoleh persamaan:

$$\frac{E}{ET_0} = \left(\frac{m}{20}\right) \times (18 - h) \quad (2-20)$$

$$Et = ET_0 - E \quad (2-21)$$

dengan:

Et : evapotranspirasi terbatas (mm)

Soil water surplus = $(P - Et) - \text{soil storage}$

Soil water surplus = 0 jika deficit, yaitu: $(P - Et) > \text{soil storage}$

Soil water surplus adalah volume air yang akan masuk ke permukaan, sedangkan

Initial storage adalah besarnya volume air pada saat permulaan perhitungan.

3. Keseimbangan air di permukaan tanah

Keseimbangan air di permukaan tanah dihitung berdasarkan besarnya curah hujan bulanan dikurangi nilai evapotranspirasi terbatas rata-rata bulanan sehingga diperoleh persamaan:

$$Ds = P - Et \quad (2-22)$$

$$WS = Ds - SMC \quad (2-23)$$

dengan:

Ds : perubahan tampungan kandungan air tanah (*soil storage*)

Ds nilainya positif apabila $P > Et$, maka air akan masuk ke dalam tanah bila kapasitas kelembaban tanah belum terpenuhi, dan sebaliknya melimpas bila kondisi tanah jenuh.

Ds nilainya negatif apabila $P < Et$, maka sebagian air yang masuk ke dalam tanah (air tanah) akan keluar dan terjadi kekurangan (defisit).

SMC : kelembaban tanah (mm)

WS : kelebihan air (mm)

4. Simpanan air tanah (*ground water storage*)

Nilai *run off* dan *ground water* besarnya tergantung dari keseimbangan air dan kondisi tanahnya. Data yang diperlukan adalah:

Koefisien infiltrasi = I diambil 0,2 – 0,5

Faktor resesi aliran air tanah = k diambil 0,4 – 0,7

Persamaan

$$I_n = WS \times I \quad (2-24)$$

$$V_n = k \cdot V_{(n-1)} + 0,5 (1 + k) I_n \quad (2-25)$$

$$DV_n = V_n - V_{(n-1)} \quad (2-26)$$

dengan:

- I_n : Infiltrasi volume air yang masuk ke dalam tanah
 V_n : Volume air tanah
 A : Volume tampungan per bulan
 DV_n : Perubahan volume air tanah bulan ke-n
 $V_{(n-1)}$: Volume air tanah bulan ke (n-1)
 I : Koefisien infiltrasi

5. Aliran Sungai

$$\text{Aliran dasar} = \text{infiltrasi} - \text{volume air tanah (m}^3/10\text{hari)} \quad (2-27)$$

$$\text{Aliran Langsung} = \text{water surplus} - \text{infiltrasi (m}^3/10\text{hari)} \quad (2-28)$$

$$\text{Aliran} = \text{aliran dasar} + \text{aliran langsung} \quad (2-29)$$

$$\text{Debit aliran} = \text{aliran sungai dinyatakan dalam m}^3/10\text{hari} \quad (2-30)$$

Pada model FJ. Mock ada lima parameter yang menggambarkan karakteristik DAS yang besar pengaruhnya terhadap keluaran sistem, yaitu:

1. Singkapan lahan

Singkapan lahan disesuaikan dengan penggunaan tata guna lahan. Prosentase singkapan lahan ini berpengaruh terhadap evapotranspirasi.

Tabel 2.15 Singkapan Lahan Sesuai Tata Guna Lahan

No	Jenis Penggunaan Lahan	m (%)
1	Hutan lebat	0
2	Lahan yang tererosi	10 – 40
3	Lahan pertanian yang diolah	30 – 50

Sumber: Hadisusanto, 2010:231

Dengan catatan bahwa pada musim kemarau nilai m semakin besar 10% dari nilai m pada musim hujan.

2. Koefisien Infiltrasi

Koefisien infiltrasi ditentukan berdasarkan porositas tanah, kemiringan daerah pengaliran dan keadaan geologi. Dalam simulasi FJ Mock, infiltrasi tinggi pada permulaan hujan dan mengecil setelah kandungan air pada tanah meningkat pada satu kejadian hujan. Infiltrasi yang diperhitungkan adalah dari beberapa kejadian hujan dalam satu bulan.

Tabel 2.16 Koefisien Infiltrasi Berdasarkan Jenis Batuan (Ci)

No	Jenis Batuan	Ci
1	Vulkanik muda	0,30 – 0,50
2	Vulkanik tua, muda dan sedimen	0,15 – 0,25
3	Batu pasir	0,15
4	Sedimen lanau, batu cukup kedap	0,15
5	Batu gamping	0,30 – 0,50

Sumber: Kurniawan, 2009:14

3. Kapasitas kelembapan tanah (SMC)

Kapasitas kelembapan tanah adalah banyaknya air yang dapat dikandung oleh tanah (Sosrodarsono, 1987:72). Besarnya kapasitas ditentukan berdasarkan kondisi porositas lapisan tanah per 1m². Pada simulasi Mock besarnya kapasitas kelembapan ditentukan berdasarkan kelembapan tanah tersebut. Misalnya untuk tanah dengan kelembapan tanah maksimum 25% maka kapasitas kelembapan tanah tersebut 25 cm air pada tanah seluas 1 m². Biasanya kelembapan tanah ditaksir berkisar antara 50 sampai 250 mm per m². Jika porositas tanah lapisan atas makin besar, maka kapasitas kelembapan tanah akan makin besar pula.

Tabel 2.17 Angka Kedalaman Kelembaban Tanah (diadaptasi dari Shaw, 1985)

No	Tipe Vegetasi	SMC (mm)
1	Padang Rumput	75
2	Umbi akar (Kentang)	100
3	Tanaman padi gandum dan sejenisnya	140
4	Tegalan	200

Sumber: Asdak, 2004:139

4. *Initial Storage*

Initial Storage adalah besarnya volume air pada saat awal perhitungan

5. Faktor Resesi Air Tanah

Dalam perhitungan kandungan air tanah terdapat faktor resesi air tanah (k), yakni perbandingan air tanah pada suatu bulan dengan aliran air tanah pada awal bulan.

2.5. Analisa Korelasi Sederhana

Korelasi merupakan asosiasi atau hubungan (*measures of association*) dan digunakan untuk mengukur kekuatan atau keeratan hubungan antara 2 variabel. Korelasi mengukur derajat hubungan antara 2 atau lebih variabel. Hubungan antara 2 variabel acak

(random variable) x_i dan y_i disebut sebagai Hubungan Korelatif Sederhana (*Simple Correlative Association*). Analisis korelasi sederhana (*Bivariate Correlation*) digunakan untuk mengetahui keeratan hubungan antara dua variabel dan untuk mengetahui arah hubungan yang terjadi. Koefisien korelasi sederhana menunjukkan seberapa besar hubungan yang terjadi antara 2 variabel. Dalam SPSS, ada tiga metode korelasi sederhana diantaranya *Pearson Correlation*, *Kendall's tau-b*, dan *Spearman Correlation*. *Pearson Correlation* digunakan untuk data berskala interval atau rasio, sedangkan *Kendall's tau-b*, dan *Spearman Correlation* lebih cocok untuk data berskala ordinal. Karena dalam studi ini variabel yang diuji merupakan data berskala rasio maka metode yang digunakan adalah *Pearson Correlation*. Rumus koefisien korelasi yang disimbolkan (r) atau (ρ) adalah sebagai berikut (Montarich, L dan Soetopo, W, 2009:51):

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] * \left[n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}} \quad (2-31)$$

Dengan:

r = koefisien korelasi

X = Curah hujan tahunan (mm)

Y = Debit tahunan (m^3)

n = Banyak data

Nilai r besarnya berkisar antara -1 dan 1. Apabila nilai koefisien korelasi mendekati +1 (positif satu) berarti pasangan data variabel X dan variabel Y memiliki korelasi linear positif yang kuat atau erat, apabila nilai koefisien korelasi mendekati -1 (negatif satu) maka hal ini menunjukkan pasangan data variabel X dan variabel Y memiliki korelasi linear negatif yang kuat atau erat, sedangkan apabila nilai koefisien korelasi mendekati 0 (Nol) berarti pasangan data variabel X dan variabel Y memiliki korelasi yang sangat lemah atau berkemungkinan tidak berkorelasi.

Meskipun telah diperoleh nilai koefisien korelasi dari hasil perhitungan, namun keberartian (signifikansi) nilai tersebut perlu diuji secara statistik. Hipotesis yang diuji adalah sebagai berikut :

H_0 : koefisien korelasi (r) = 0 (pasangan data variabel X dan variabel Y memiliki korelasi yang sangat lemah atau berkemungkinan tidak berkorelasi)

H_a : koefisien korelasi (r) \neq 0 atau signifikan

Pengujian koefisien ini dilakukan dengan uji-t, yang dirumuskan sebagai berikut

$$t = \frac{|r| \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (2-32)$$

Dengan:

r = koefisien korelasi

n = Banyak data

Nilai t tersebut kemudian dibandingkan dengan harga kritis t_{cr} dari tabel 2.18 untuk derajat bebas (df) (dalam tabel 2.18 ditunjukkan dengan symbol ν) = n - k dan α (*Level of Significant*). Semakin tinggi nilai α yang dipilih, akan semakin bagus. Apabila $t < t_{cr}$, maka H_0 diterima, dan jika sebaliknya H_0 ditolak.

Tabel 2.18 Derajat Bebas

ν	$t_{0.995}$	$t_{0.99}$	$t_{0.975}$	$t_{0.95}$	$t_{0.90}$	$t_{0.80}$	$t_{0.75}$	$t_{0.70}$	$t_{0.60}$	$t_{0.55}$
1	63,66	31,82	12,71	6,31	3,08	1,376	1,000	0,727	0,325	0,158
2	9,92	6,96	4,30	2,92	1,89	1,061	0,816	0,617	0,289	0,142
3	5,84	4,54	3,18	2,35	1,64	0,978	0,765	0,584	0,277	0,137
4	4,60	3,75	2,78	2,13	1,53	0,941	0,741	0,569	0,271	0,134
5	4,03	3,36	2,57	2,02	1,48	0,920	0,727	0,559	0,267	0,132
6	3,71	3,14	2,45	1,94	1,44	0,906	0,718	0,553	0,255	0,131
7	3,50	3,00	2,36	1,90	1,42	0,896	0,711	0,519	0,263	0,130
8	3,36	2,90	2,31	1,86	1,40	0,889	0,706	0,546	0,202	0,130
9	3,25	2,82	2,26	1,83	1,38	0,883	0,703	0,543	0,261	0,129
10	3,17	2,76	2,23	1,81	1,37	0,879	0,700	0,542	0,260	0,129
11	3,11	2,72	2,20	1,80	1,36	0,876	0,697	0,540	0,260	0,129
12	3,06	2,68	2,18	1,78	1,36	0,873	0,695	0,539	0,259	0,128
13	3,01	2,66	2,16	1,77	1,35	0,870	0,694	0,538	0,259	0,128
14	2,98	2,62	2,14	1,76	1,34	0,868	0,692	0,537	0,258	0,128
15	2,95	2,60	2,13	1,75	1,34	0,866	0,691	0,536	0,258	0,128
16	2,92	2,58	2,12	1,75	1,34	0,865	0,690	0,535	0,258	0,128
17	2,90	2,57	2,11	1,74	1,33	0,863	0,689	0,534	0,257	0,128
18	2,88	2,55	2,10	1,73	1,33	0,862	0,688	0,534	0,257	0,127
19	2,86	2,54	2,09	1,73	1,33	0,861	0,688	0,533	0,257	0,127
20	2,84	2,53	2,09	1,72	1,32	0,860	0,687	0,533	0,257	0,127
21	2,83	2,52	2,08	1,72	1,32	0,859	0,686	0,532	0,257	0,127
22	2,82	2,51	2,07	1,72	1,32	0,858	0,686	0,532	0,256	0,127
23	2,81	2,50	2,07	1,71	1,32	0,858	0,685	0,532	0,256	0,127
24	2,80	2,49	2,06	1,71	1,32	0,857	0,685	0,531	0,256	0,127
25	2,79	2,48	2,06	1,71	1,32	0,856	0,684	0,531	0,256	0,127
26	2,78	2,48	2,06	1,71	1,32	0,856	0,684	0,531	0,256	0,127
27	2,77	2,47	2,05	1,70	1,31	0,855	0,684	0,531	0,256	0,127
28	2,76	2,47	2,05	1,70	1,31	0,855	0,683	0,530	0,256	0,127
29	2,76	2,46	2,04	1,70	1,31	0,854	0,683	0,530	0,256	0,127
30	2,75	2,46	2,04	1,70	1,31	0,854	0,683	0,530	0,256	0,127
40	2,70	2,42	2,02	1,68	1,30	0,851	0,681	0,529	0,255	0,126
60	2,66	2,39	2,00	1,67	1,30	0,848	0,679	0,527	0,254	0,126
120	2,62	2,36	1,98	1,66	1,29	0,845	0,677	0,526	0,254	0,126
**	2,58	2,33	1,86	1,645	1,28	0,842	0,674	0,524	0,253	0,126

Sumber: Montarcih. L dan Soetop W, 2009:8

2.6. Debit Andalan

Debit andalan adalah debit yang tersedia sepanjang tahun dengan besarnya resiko kegagalan tertentu. Debit andalan diartikan sebagai debit yang tersedia untuk keperluan tertentu (seperti irigasi, PLTA, air baku, dan lain-lain) sepanjang tahun, dengan resiko kegagalan yang telah diperhitungkan. Beberapa debit andalan untuk berbagai tujuan, antara lain (Soemarto, 1987:214):

1. Penyediaan air minum 99%
2. Penyediaan air industri 95% - 98%

3. Penyediaan air irigasi untuk
 - a. Daerah beriklim setengah lembab 70% - 85%
 - b. Daerah beriklim kering 80% - 95%
4. Pusat Listrik Tenaga Air 85% - 90%

Debit andalan dapat ditentukan dengan berbagai metode, masing – masing cara mempunyai ciri khas sendiri-sendiri. Pemilihan metode yang sesuai umumnya didasarkan atas pertimbangan data yang tersedia, jenis kepentingan, dan pengalaman. Ada 4 metode untuk analisis debit andalan antara lain: (1) Metode Debit Rata-rata Minimum; (2) Metode Bulan Dasar Perencanaan; (3) Metode Tahun Dasar Perencanaan; dan (4) Metode *Flow Characteristic*. Masing-masing metode mempunyai karakteristik sendiri-sendiri sesuai dengan kebutuhan.

2.6.1. Metode Debit Rata-rata Minimum

Penentuan debit andalan dengan metode ini berdasarkan pada data debit rata-rata bulanan yang minimum, biasanya dipakai untuk :

1. DAS dengan fluktuasi debit maksimum dan minimumnya tidak terlalu besar dari tahun ke tahunnya.
2. Kebutuhan relatif konstan sepanjang tahun.

Karakteristik metode debit rata-rata minimum adalah bahwa dalam satu tahun hanya diambil satu data (data debit rata-rata harian dalam satu tahun). Analisis debit andalan berdasarkan metode debit rata-rata minimum menggunakan analisis frekuensi (Metode Gumbel, data dianggap memenuhi persyaratan Gumbel dan Log Pearson Type III).

Debit andalan yang dianalisis menggunakan metode ini ditentukan berdasarkan data debit bulanan yang minimum dari tiap-tiap tahun yang tersedia. Prosedur yang digunakan dalam metode debit rata-rata minimum antara lain:

1. Menghitung debit rata-rata bulanan tiap tahun.
2. Menentukan debit rata-rata bulanan yang minimum untuk masing-masing bulan
3. Merangking data (sebanyak n tersebut) mulai yang terbesar sampai terkecil dan menghitung probabilitas untuk masing-masing data.

$$P = \frac{m}{n} + 1 \quad (2-33)$$

dengan:

m : nomor urut (rangking)

n : jumlah data

4. Memplot data diatas dengan probabilitas sebagai absis, dan data debit sebagai ordinat.

- Menentukan probabilitas yang dikehendaki, memplot pada grafik yang tersedia, dan membaca debit andalan yang terjadi.

2.6.2. Metode Bulan Dasar Perencanaan

Analisis debit andalan menggunakan metode bulan dasar perencanaan hampir sama dengan metode *flow characteristic* yang dianalisis untuk bulan-bulan tertentu. Metode ini paling sering dipakai karena keandalan debit dihitung mulai bulan januari sampai desember sehingga dapat menggambarkan keandalan pada musim kemarau dan musim penghujan (Montarcih, 2010:104).

2.6.3. Metode Tahun Dasar Perencanaan

Analisis debit andalan menggunakan metode tahun dasar perencanaan biasanya digunakan dalam perencanaan atau pengelolaan irigasi. Umumnya di bidang irigasi dipakai debit dengan keandalan 80% sehingga untuk menentukan tahun dasar perencanaan dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R_{80} = \left(\frac{n}{5} + 1 \right) \quad (2-34)$$

dengan:

R_{80} : debit dengan keandalan 80%

n : kala ulang

2.6.4. Metode *Flow Characteristic*

Perhitungan debit andalan dengan metode ini memakai data yang didapatkan berdasarkan karakteristik alirannya. Metode ini dipakai untuk:

- Daerah Aliran Sungai (DAS) dengan fluktuasi maksimum dan minimumnya relatif besar dari tahun ke tahun
- Kebutuhan yang relatif tidak konstan sepanjang tahun
- Data yang tersedia cukup panjang

Karakteristik aliran dalam hal ini dihubungkan dengan kriteria sebagai berikut:

- Tahun normal, jika debit rata-rata tahunnya sama dengan atau mendekati debit rata-rata dari tahun ke tahun.
- Tahun kering, jika debit rata-rata tahunannya dibawah debit rata-rata dari tahun ke tahun.
- Tahun basah, jika debit rata-rata tahunannya di atas debit rata-rata dari tahun ke tahun.

Prosedur yang digunakan dalam metode ini antara lain:

- Menghitung debit rata-rata bulanan untuk semua tahun.

2. Menggolongkan sejumlah data dengan kriteria tahun normal (n_1), tahun basah (n_2), dan tahun kering (n_3) dengan $n = n_1 + n_2 + n_3$.
3. Merangking data (sebanyak n tersebut) mulai yang terbesar sampai terkecil untuk masing-masing kelompok bulan (Januari sampai Desember) sesuai dengan kriteria tahun dan menghitung probabilitas untuk masing-masing data.
4. Memplot data diatas dengan probabilitas sebagai absis, dan debit sebagai ordinat.
5. Menentukan probabilitas yang dikehendaki, memplot pada grafik yang tersedia dan membaca debit andalan yang terjadi sehingga didapat 12 macam debit andalan dalam satu tahun.

Dalam studi ini, perhitungan debit andalan dilakukan dengan menggunakan metode *Basic Year*. Menurut (Suyono Sosrodarsono, 1978), keandalan berdasar kondisi debit dibedakan menjadi 4, antara lain:

1. Debit air musim kering, yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 355 hari dalam 1 tahun sehingga nilai keandalannya adalah $\left(\frac{355}{365}\right) \times 100\% = 97,3\%$
2. Debit air rendah, yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 275 hari dalam 1 tahun sehingga nilai keandalannya adalah $\left(\frac{275}{365}\right) \times 100\% = 75,3\%$
3. Debit air normal, yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 185 hari dalam 1 tahun sehingga keandalannya adalah $\left(\frac{185}{365}\right) \times 100\% = 50,7\%$
4. Debit air cukup, yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 95 hari dalam 1 tahun sehingga keandalannya adalah $\left(\frac{95}{365}\right) \times 100\% = 26,0\%$

Peluang kejadian debit dihitung dengan rumus probabilitas dari persamaan *Weibull*. Cara menghitung rerata debit dalam satu tahun untuk tiap tahun data yang diketahui adalah:

1. Mengurutkan data dari yang terbesar ke yang terkecil.
2. Menghitung probabilitas untuk masing-masing data dengan menggunakan persamaan *Weibull* :

$$P = \frac{m}{n+1} \times 100\% \quad (2-35)$$

dengan:

P = Probabilitas (%)

m = Nomor urut data debit

n = Jumlah data pengamatan debit

2.7. Pembangkit Tenaga Listrik

PLTA di waduk adalah PLTA yang mempunyai tampungan air yang ukurannya cukup untuk memungkinkan untuk menampung air pada musim hujan untuk persediaan di musim kemarau. Air lepasan dari waduk pada debit tertentu digunakan untuk memutar turbin untuk menghasilkan daya dan energi. Pada waduk yang mempunyai tampungan efektif tertentu, daya PLTA dibangkitkan sesuai dengan debit *outflow* yang tersedia. Rumus pembangkitan tenaga PLTA adalah sebagai berikut :

$$P_w = 9,8 \times Q \times H_e \times \text{Eff}_{\text{PLTA}} \quad (2-36)$$

dengan :

P_w : daya pembangkit PLTA (kw).

Eff_{PLTA} : efisiensi PLTA (%).

Q : debit *outflow* yang lewat PLTA (m^3/det).

H_e : *head* efektif (tinggi jatuh) dari PLTA (m).

Head efektif suatu PLTA dapat dicari dari hubungan berikut :

$$H_e = \text{El.MAW} - \text{El.TWL} - \text{Head loss} \quad (2-37)$$

dengan :

El.MAW : elevasi Muka Air Waduk (m).

El. TWL : elevasi *Tail Water Level* di saluran *tailrace* (m).

Head loss : kehilangan tinggi di *penstock* dan *waterway*.

Sedangkan untuk nilai efisiensi PLTA ditentukan berdasarkan jenis turbin dan jumlah putaran per menit (ns) yang dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2.19 Efisiensi Turbin Francis dan Kaplan

ns	Daya Maksimum (%)	Efisiensi Maksimum (%)
60	86,5	89,0
90	88,0	90,0
120	88,5	90,5
150	89,0	91,0
190	89,2	91,2
250	88,5	91,0
300	87,5	90,5
350	88,0	90,0
400	88,5	90,5
450	88,8	90,8
560	89,0	91,0
660	87,5	90,0

Sumber : Arismunandar, 1982 : 55-56

Produksi energi dihitung berdasarkan tenaga andalan. Tenaga andalan dihitung berdasarkan debit andalan yang tersedia untuk pembangkitan listrik yang berupa debit

outflow dengan periode n harian (arismunandar, 2005:19), yang dinyatakan dalam persamaan :

$$\begin{aligned} E &= 9,8 \times Q \times H_e \times \text{Eff}_{\text{PLTA}} \times 24 \times n \\ &= P_w \times 24 \times n \end{aligned} \quad (2-38)$$

dengan :

n : jumlah hari dalam satu periode

2.8. Pengantar Operasi Waduk

Pada dasarnya operasi waduk (*reservoir operation*) adalah proses penampungan aliran air sungai kedalam sebuah waduk (*reservoir*) dan pelepasan daripada air yang telah ditampung tersebut untuk tujuan tertentu. Sedangkan pedoman pengoperasian waduk adalah bagaimana caranya memanfaatkan kapasitas tampungan waduk dalam melakukan pengaturan terhadap aliran sungai untuk tujuan tertentu. Tujuan tersebut adalah :

- Pasokan air irigasi, yang umumnya merupakan pengguna air terbesar dari segi kuantitas
- Pasokan air untuk penggunaan konsumtif selain irigasi (*water supply*), yaitu untuk wilayah perkotaan dan industri
- Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), dalam hal ini instalasi tidak mengkonsumsi volume air namun hanya mengambil energi jatuhnya.

Sebuah waduk apabila hanya melayani salah satu fungsi saja disebut sebagai Waduk Tunggal Guna (*Single Purpose Reservoir*), sedangkan apabila waduk melayani lebih dari satu tujuan disebut sebagai Waduk Multiguna (*Multi Purpose Reservoir*). Dalam studi ini, waduk Bajulmati merupakan Waduk Multiguna (*Multi Purpose Reservoir*), yaitu penggunaan air untuk keperluan irigasi, air baku, dan PLTA.

Dalam prakteknya, waduk multiguna tidak harus melayani semua tujuan-tujuan yang ada, tetapi melayani lebih dari satu tujuan dengan memanfaatkan ruang tampungan waduk yang ada. Dalam pengoperasiannya sebaiknya tidak terjadi konflik kepentingan antara tujuan-tujuan tersebut, maka dari itu studi ini cukup menarik karena menyangkut beberapa aspek dan kepentingan.

Pasokan air untuk irigasi bervariasi menurut musim, kebutuhan ini akan besar di musim kering dan kecil di musim basah. Dengan demikian tampungan waduk dibuat tinggi di musim basah dan dikosongkan di musim kering, sementara kebutuhan air untuk tujuan pasokan air ke wilayah perkotaan dan industri cenderung relatif konstan terhadap musim, dan besarnya kebutuhan ini juga relatif kecil dibandingkan dengan pasokan air

untuk irigasi. Untuk tujuan PLTA, pada dasarnya diinginkan tampungan yang tinggi supaya didapatkan energi yang tinggi per satuan volume lepasan debit untuk mempertahankan produktivitas instalasi pembangkit listrik. Tetapi dengan bervariasinya debit *inflow* secara musiman yang cenderung besar di musim basah dan kecil di musim kering, maka dilakukan kebijakan menampung air di musim basah dan melepaskannya di musim kering. Hal ini dimaksudkan agar produksi PLTA relatif konstan besarnya sepanjang tahun. Karena instalasi PLTA hanya mengambil tinggi jatuh dan tidak membutuhkan volume air, maka debit yang keluar setelah digunakan untuk PLTA selanjutnya dapat digunakan untuk tujuan pasokan air (irigasi, air baku). Dengan demikian maka tujuan PLTA dan tujuan pasokan air adalah tidak berbenturan satu sama lain. Jadi tujuan-tujuan irigasi dan air baku masing-masing membutuhkan alokasi air tersendiri, karenanya proyek multiguna harus menetapkan alokasi yang jelas untuk masing-masing tujuan ini. Suatu rencana kerja harus disusun sehingga setiap tujuan dapat beroperasi secara cukup efisien, walaupun tidak harus tercapai efisiensi yang maksimum pada masing-masing tujuan (Soetopo W, 2010:75).

2.9. Aturan Operasi Waduk

Pada aturan operasi waduk dimana lepasan berdasarkan status tampungan waduk, maka dilakukan pembatasan terhadap lepasan apabila tampungan waduk menurun besarnya. Aturan lepasan berdasarkan status tampungan waduk ini dapat dilihat pada gambar 2.5 (Soetopo, 2010:34). Parameter yang digunakan dalam penerapan pedoman operasi waduk aturan lepasan berdasarkan tampungan adalah sebagai berikut:

1. Tampungan waduk (%)

Besarnya tampungan waduk diukur dengan prosentase tampungan terhadap kapasitas tampungan aktif

2. Lepasannya (%)

Besarnya pemenuhan kebutuhan diukur dengan melihat kondisi/status tampungan waduk. Artinya, apabila kondisi tampungan waduk menurun maka prosentase lepasan sesuai kebutuhan juga menurun.

Kebijaksanaan *release* waduk dalam penerapan pedoman pola operasi (Soetopo, 2010:34), adalah sebagai berikut:

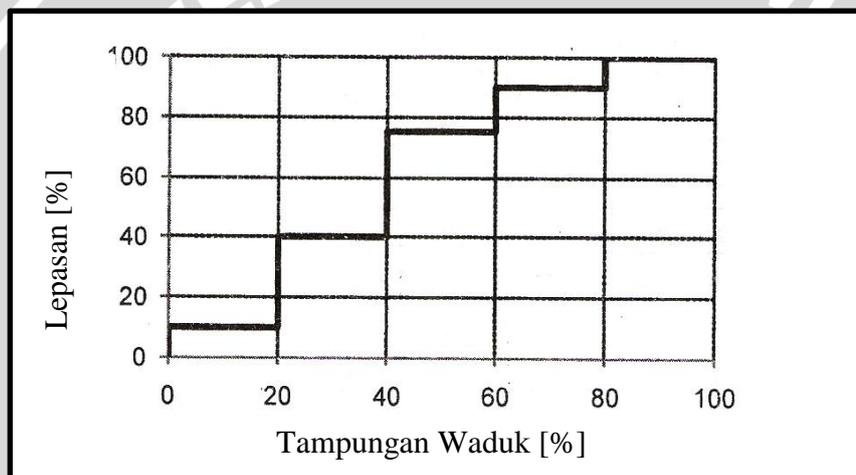
1. Untuk operasi waduk aturan lepasan berdasarkan tampungan diterapkan pembatasan minimum tampungan waduk lihat pada tabel 2.20 berikut:

Tabel 2.20 Lepasannya Berdasarkan Tampungannya Waduk.

No. Kisaran	Batas minimum Tampungannya waduk [%]	Lepasannya [%]
1	0	10
2	20	40
3	40	75
4	60	90
5	80	100

Sumber : Soetopo, 2010:34

Apabila dinyatakan dalam bentuk grafik, maka aturan lepasannya berdasarkan tampungannya waduk ini dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2.5 Lepasannya Berdasarkan Tampungannya Waduk

Sumber : Soetopo, 2010:34

2. Untuk menentukan prosentase pemenuhan kebutuhan, lepasannya (%) dapat diganti dengan cara coba-coba. Dalam proses penentuan lepasannya dengan coba-coba untuk mempermudah perhitungan dibuat suatu formula dalam simulasi waduk, misalnya untuk kasus pedoman pola operasi waduk (tabel 2.19) maka proses pengerjaannya sebagai berikut:

- Jika (S_{akhir}) < 20%, maka lepasannya 10%
- Jika (S_{akhir}) < 40%, maka lepasannya 40%
- Jika (S_{akhir}) < 60%, maka lepasannya 75%
- Jika (S_{akhir}) < 80%, maka lepasannya 90%
- Jika (S_{akhir}) > 80%, maka lepasannya 100%

Nilai lepasannya dapat diganti-ganti (coba-coba) untuk kondisi tertentu dengan dasar pertimbangan/ketentuan sebagai berikut:

- a. Kondisi tampungan menurun, maka lepasan juga berkurang
- b. Tujuan dari pergantian nilai lepasan (coba-coba) ini adalah untuk mendapatkan kondisi yang optimal maksudnya, dari berbagai kelas nilai lepasan yang telah dicoba dalam proses simulasi waduk yang akan dipakai sebagai lepasan (%) adalah nilai lepasan dengan hasil pemenuhan kebutuhan air yang paling optimal dan *spillout* yang paling minimum.

2.10. Program Dinamik (*Dynamic Programming*)

Program dinamik yang dikembangkan pertama kali oleh Bellman pada tahun 1957 (Bogardi, 1988; Yeh, 1985) adalah suatu prosedur untuk mengoptimasikan suatu proses keputusan berangakai (*multi stage*) dalam penyelesaian suatu masalah karena program ini memecahkan satu permasalahan menjadi beberapa tahapan pemecahan masalah (*sub problem*).

Program dinamik ini mengoptimasikan suatu proses pengambilan keputusan berangakai dengan memberikan suatu ketetapan rangkaian keputusan yang saling berkaitan satu dengan yang lain, yang merupakan fungsi tempat dan waktu. Dengan dibandingkan dengan teknik lainnya, program dinamik memiliki sejumlah keuntungan dalam pemakaiannya untuk optimasi pendayagunaan sumber air, keuntungan tersebut yaitu dapat merangkum tujuan dan kendala yang bersifat non linier, dan dapat mengakomodir sifat stokastik sistem, dimana sifat tersebut terkait dalam setiap permasalahan sistem sumber daya air (Hall, W. A dan Nathan Buras, 1969).

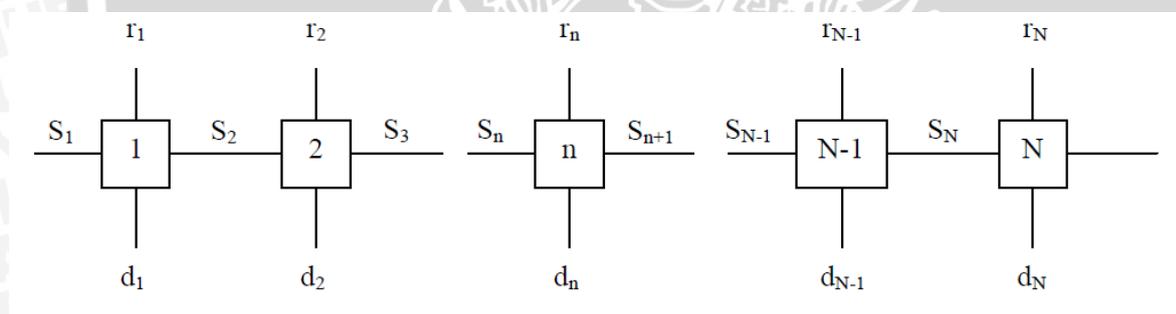
Program dinamik memiliki kumpulan teknik-teknik program matematik yang digunakan untuk pengambilan keputusan yang terdiri dari banyak tahap. Suatu pengambilan keputusan yang terdiri dari banyak tahap dipisahkan menjadi suatu seri masalah atau sub masalah yang berurutan dan berhubungan. Program dinamik memberikan prosedur yang sistematis untuk penentuan kombinasi pengambilan keputusan yang memaksimalkan keseluruhan efektifitas. dalam program ini, tidak ada rumusan matematis yang standar karena lebih merupakan suatu tipe pendekatan umum untuk pemecahan masalah. Persamaan-persamaan khusus yang digunakan harus dikembangkan sesuai dengan setiap situasi dan bentuk permasalahannya. Beberapa karakteristik dasar yang menjadi ciri persoalan program dinamik adalah sebagai berikut (Dimiyati, 1987:225-229):

- a. Persoalan dapat dibagi menjadi beberapa tahap, dimana masing-masing tahap diperlukan adanya satu keputusan.

- b. Masing-masing tahap terdiri atas sejumlah keputusan yang berhubungan dengan tahap yang bersangkutan.
- c. Hasil keputusan yang diambil pada setiap tahap ditransformasikan ke tahap berikutnya.
- d. Keputusan terbaik pada suatu tahap tidak bergantung terhadap keputusan yang dilakukan pada tahap sebelumnya.
- e. Prosedur pemecahan persoalan dimulai dengan mendapatkan keputusan terbaik dari tahap terakhir.

Dengan melihat berbagai karakteristik tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa dasar dalam program dinamik adalah membagi persoalan menjadi beberapa bagian kecil yang disebut tahap. Kemudian tiap tahap dipecahkan dengan mengoptimalkan keputusan pada tiap tahap sampai seluruh persoalan terpecahkan. Keputusan optimal atas seluruh persoalan merupakan kumpulan dari sejumlah keputusan optimal seluruh tahap yang disebut sebagai kebijakan optimal.

Elemen-elemen dari program dinamik dapat digambarkan seperti gambar dibawah ini (Montarcih. L dan Soetopo. W, 2010:43)



Gambar 2.6. Elemen Program Dinamik

Keterangan:

1. Tahap atau *Stage* (n)

Tahap atau *stage* merupakan bagian dari problem dimana keputusan (*decision*) diambil. Jika suatu problem dapat dipecah-pecah menjadi n sub-problem, maka ada n tahap dalam formulasi program dinamik tersebut. Tahapan yang dimaksudkan dalam studi ini adalah periode (10 harian).

2. Variabel Keputusan atau *Decision Variable* (d_n)

Merupakan besaran keputusan atau tindakan yang diambil pada setiap tahap. Banyaknya variabel keputusan pada tiap tahap bisa lebih dari satu. Variabel

keputusan dalam studi ini adalah besarnya tampungan awal dan volume yang dialokasikan untuk irigasi, air baku dan PLTA, serta keuntungan yang diperoleh.

3. *State Variable* (S_n)

Merupakan variabel yang mewakili atau menjelaskan status (*state*) dari sistem yang berhubungan dengan tahap ke- n . Fungsi dari *state variable* adalah untuk menghubungkan tahap-tahap satu dengan yang lain secara berurutan sehingga apabila tahap dioptimasi secara terpisah maka keputusan yang dihasilkan adalah layak (*feasible*) untuk semua problem. lebih lanjut, keputusan-keputusan optimal dapat diambil untuk tahap tersisa tanpa harus melakukan cek pada akibat dari keputusan berikutnya terhadap keputusan yang telah diambil terdahulu. *State variable* ini merupakan keluaran dari satu tahap yang menjadi masukan bagi tahap berikutnya. Dalam studi ini, variabel statusnya berupa volume air di waduk Bajulmati.

4. *Stage Return* (r_n)

Merupakan ukuran skala dari hasil keputusan yang diambil pada setiap tahap dan merupakan fungsi dari S_n , S_{n+1} , dan d_n :

$$r_n = r(S_n, S_{n+1}, d_n) \quad (2-39)$$

dalam studi ini, *Stage Return* merupakan keuntungan yang diperoleh pada kondisi volume atau tampungan tertentu.

5. *Stage Transformation* atau *State Transition* (t_n)

Merupakan fungsi dalam program dinamik yang menghubungkan satu tahap dengan tahap yang lain, sehingga merupakan *output* dari tahap selanjutnya yang menjadi *input* bagi tahap selanjutnya. Dapat dinyatakan dengan:

$$S_{n+1} = t_n(S_n, d_n) \quad (2-40)$$

2.11. Simulasi Untuk Program Dinamik

Simulasi dalam hal ini digunakan untuk mengevaluasi hasil pola operasi waduk yang dihasilkan dari program dinamik. Tinjauan kegagalan atau keberhasilan pengoperasian tersebut dievaluasi dengan simulasi melalui kajian tentang unjuk kerja (*performance*) dari waduk. Simulasi ini bertujuan untuk meninjau sejauh mana tingkat keandalan dan kegagalan yang terjadi dari perilaku sistem pengoperasian waduk dalam memenuhi pelayanannya. Model simulasi akan menganalisis probabilitas keandalan atau kegagalan rencana operasi yang telah ditetapkan.

Simulasi dalam hal ini digunakan untuk mengetahui peluang kegagalan dari masing-masing pola kebijakan operasi waduk. Pola operasi waduk yang paling optimal

dapat diketahui dari simulasi ini, yakni dengan kriteria jumlah periode gagal yang paling minimum (berdasarkan simulasi) dan pemenuhan kebutuhan akan air irigasi dan air baku yang mencukupi.

