

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Umum

Waduk adalah tampungan untuk menyimpan air pada waktu kelebihan agar dapat dipakai pada waktu yang diperlukan (Soediby, 1993:7). Manajemen air (*water management*) di waduk merupakan usaha untuk mengatur dan mengendalikan jumlah air yang masuk dan keluar dari waduk. Pengaturan bertujuan agar penggunaan air untuk berbagai kepentingan manusia dapat diatur dengan baik, dan menunjang kesejahteraan manusia. Air yang dikendalikan adalah air hasil tampungan waduk dari air hujan maupun sungai yang memasok debit ke dalam waduk, sehingga air dapat disediakan dalam waktu atau tempat yang tepat dalam jumlah yang diperlukan.

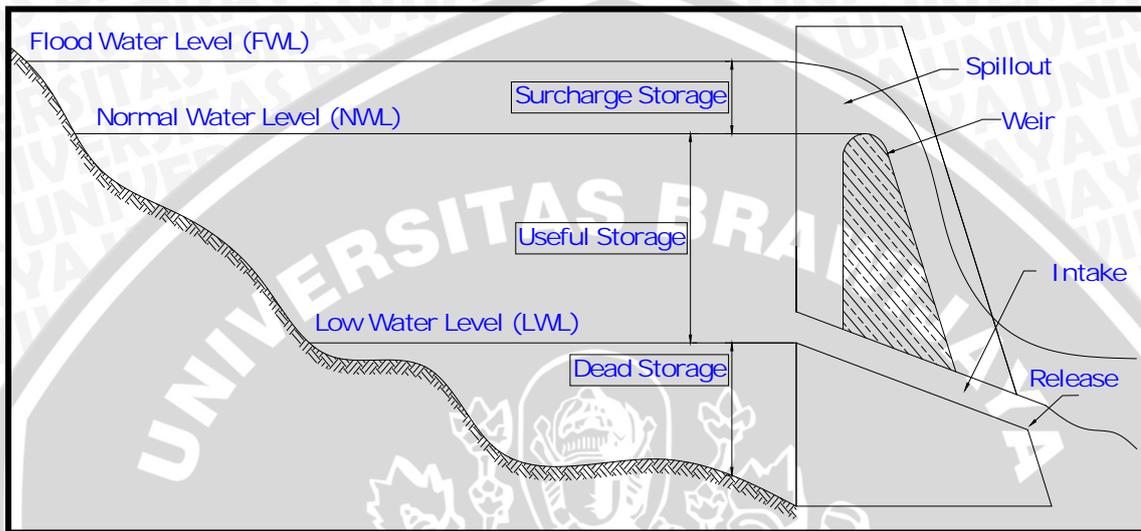
Pembangunan waduk perlu memperhatikan analisa tentang produksi dan kapasitas. Produksi adalah jumlah air yang dapat disediakan oleh waduk dalam jangka waktu tertentu. Perencanaan produksi waduk menetapkan seberapa besar kapasitas tampungan waduk yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan dengan keandalan tertentu.

2.1.1. Ciri Fisik Waduk

Ciri fisik suatu waduk atau bagian-bagian pokok waduk adalah sebagai berikut :

1. Tampungan efektif atau Kapasitas Berguna (*useful storage*), adalah volume tampungan diantara Muka air Minimum (*Low Water Level/LWL*) dan muka air normal (*Normally Water Level/NWL*).
2. Tampungan banjir (*Surcharge storage*), adalah volume air diatas muka air normal selama banjir. Untuk beberapa saat debit meluap melalui pelimpah kapasitas tambahan ini umumnya tidak terkendali, dengan pengertian adanya hanya pada waktu banjir dan tidak dapat dipertahankan untuk penggunaan selanjutnya.
3. Tampungan Mati (*dead storage*) adalah volume air yang terletak di bawah muka air minimum dan air ini tidak dimanfaatkan dalam pengoperasian waduk.
4. Muka Air Minimum (*Low Water Level/ LWL*) adalah elevasi air terendah bila tampungan dilepaskan pada kondisi normal, permukaan ini dapat ditentukan oleh elevasi dari bangunan pelepas yang terendah.
5. Muka air pada banjir rencana adalah elevasi air selama banjir maksimum drencanakan terjadi (*Flood Water level/ FWL*).

6. Pelepasan (*release*) adalah volume air yang dilepaskan secara terkendali dari suatu waduk selama kurun waktu tertentu.
7. Limpasan (*spillout*), dianggap aliran tidak terkendali dari waduk dan hanya terjadi kalau air yang ditampung dalam waduk melebihi tinggi muka air maksimum.
8. Periode Kritis (*critical periode*) adalah periode dimana sebuah waduk berubah dari kondisi penuh ke kondisi kosong tanpa melimpah selama periode tersebut.

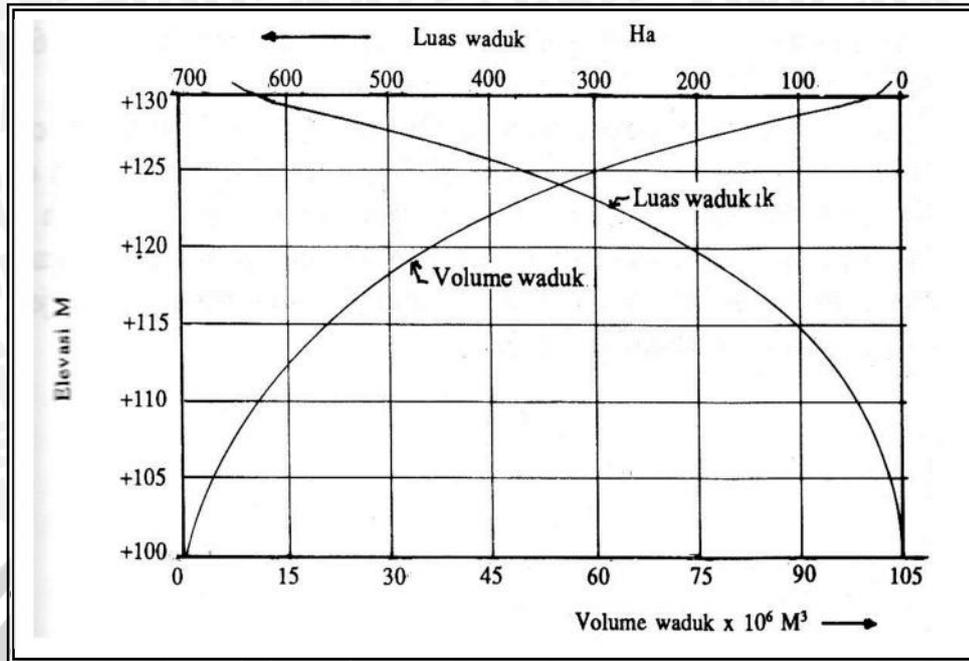


Gambar 2.1. Macam Zona Tampungan Waduk

Sumber : Sudjarwadi, 1988 : 4

2.1.2. 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. Kurva ini juga dipergunakan untuk menentukan besarnya kehilangan air akibat perkolasi yang dipengaruhi oleh luas muka air pada elevasi tertentu.



Gambar 2.2. Lengkung kapasitas waduk

Sumber : Sudjarwadi, 1988 : 5

Dari persamaan lengkung kapasitas waduk dapat ditentukan persamaan luas genangan waduk menurut persamaan :

$$A = Ch \cdot S \quad (2-1)$$

dengan

A = luas muka air waduk (km²)

S = volume tampungan total (m³)

Ch = koefisien (di dapatkan dari persamaan lengkung kapasitas $y = axb$)

2.2. Distribusi Curah Hujan Wilayah/Daerah (*Regional Distribution*)

Analisa curah hujan dilakukan untuk menentukan besarnya curah hujan efektif guna menghitung kebutuhan air irigasi. Sebelum menghitung curah hujan efektif harus menganalisa data curah hujan. Curah hujan yang diperlukan untuk penyusunan suatu rancangan pemanfaatan air dan rancangan pengendalian banjir adalah curah hujan rata-rata di seluruh daerah yang bersangkutan, bukan curah hujan pada suatu titik tertentu. Curah hujan ini disebut curah hujan wilayah/daerah dan dinyatakan dalam mm. Curah hujan daerah ini harus diperkirakan dari beberapa titik pengamatan curah hujan. Cara-cara perhitungan curah hujan daerah dari pengamatan curah hujan di beberapa titik adalah sebagai berikut.

1. Cara Rata-rata Aljabar

Cara ini adalah perhitungan rata-rata secara aljabar curah hujan d dalam dan sekitar daerah yang bersangkutan.

2. Cara Thiessen

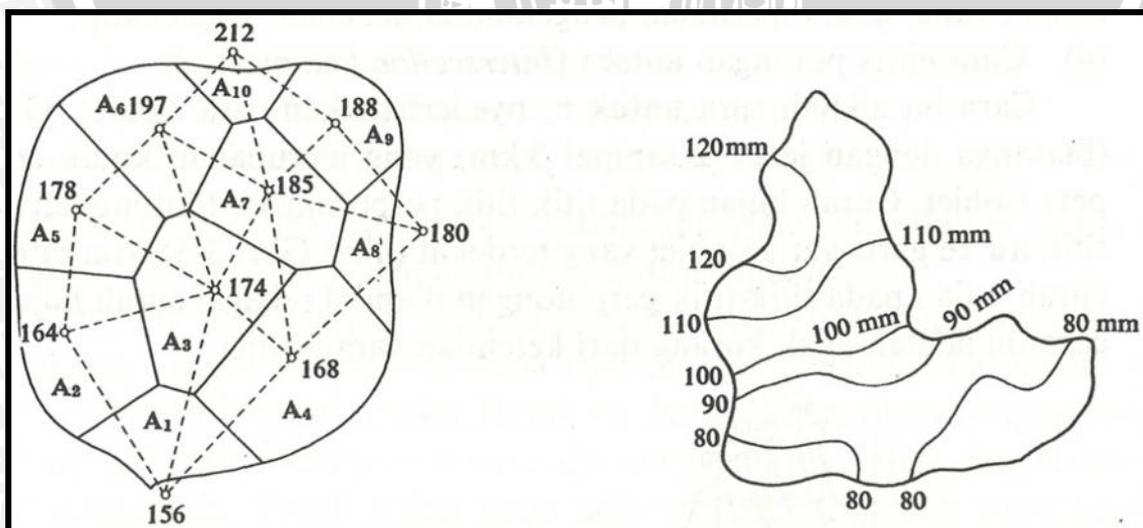
Jika titik pengamatan di dalam daerah itu tidak tersebar secara merata, maka cara perhitungan curah hujan rata-rata itu dilakukan dengan memperhitungkan daerah pengaruh tiap titik pengamatan.

3. Cara Garis Isohiet

Perhitungan dengan cara ini adalah dengan membandingkan luas daerah dibatasi oleh garis isohiet

Curah hujan daerah atau wilayah harus diperkirakan dari beberapa titik pengamatan stasiun hujan. Untuk menghitung curah hujan daerah dapat digunakan pendekatan sebagai berikut (Sosrodarsono, 2003:27) :

1. Daerah dengan luas 250 Ha yang mempunyai variasi topografi yang kecil, dapat diwakili oleh sebuah alat ukur curah hujan.
2. Daerah dengan luas 250 Ha sampai 50.000 Ha dengan dua atau tiga titik pengamatan hujan dapat digunakan cara Rerata Aljabar.
3. Daerah dengan luas 120.000 Ha sampai 500.000 Ha yang mempunyai titik pengamatan yang tersebar cukup merata dimana data curah hujannya tidak terlalu dipengaruhi kondisi topografi tersebar, dapat digunakan cara rerata aljabar. Jika titik pengamatan tidak merata digunakan cara Thiessen.
4. Daerah dengan luas lebih besar dari 500.000 Ha digunakan cara Isohiet.



Gambar 2.3. Pembagian Daerah Metode Thiessen dan Cara Isohiet

Sumber : Sri Harto, 1993 : 56-57

2.3. Debit Andalan Metode DR. F.J. Mock

Debit andalan adalah banyaknya air yang tersedia untuk keperluan tertentu (seperti irigasi, air minum dan lain-lain) sepanjang tahun dengan resiko kegagalan yang telah diperhitungkan. Jadi kalau misalnya ditetapkan andalan sebesar 80% berarti akan dihadapi resiko adanya kegagalan debit-debit lebih kecil dari debit tersebut sebesar 20% banyaknya pengamatan.

Menurut pengamatan, besarnya debit andalan yang diambil untuk penyelesaian optimum penggunaan air di beberapa macam proyek adalah sebagai berikut (Soemarto, 1987 :214)

Tabel 2.1. Besarnya Debit Untuk Berbagai Keperluan

Kegunaan	Keandalan
1. Penyediaan air minum	99%
2. Penyediaan air industri	95%-98%
3. Penyediaan air irigasi untuk	
- daerah beriklim setengah lembab	70%-85%
- daerah beriklim kering	80%-95%
4. Pusat Listrik Tenaga Air	85%-90%

Sumber: Soemarto, 1987

Debit andalan dapat ditentukan dengan berbagai metode, masing-masing cara mempunyai cirri khas sendiri-sendiri. Pemilihan metode yang sesuai umumnya didasarkan atas pertimbangan data yang tersedia, jenis kepentingan, dan pengalaman. Metode-metode untuk analisis debit andalan tersebut antara lain :

a. Metode karakteristik aliran (*flow characteristic*)

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

1. Daerah pengaliran Sungai (DPS) dengan fluktuasi maksimum dan minimumnya relatif besar dari tahun ke tahun
2. Kebutuhan yang relatif tidak konstan sepanjang tahun
3. Data yang tersedia cukup panjang.

Karakteristik aliran dalam hal ini dihubungkan dengan kriteria sebagai berikut:

1. Tahun normal, jika debit rata-rata tahunnya sama dengan atau mendekati debit rata-rata dari tahun ke tahun
2. Tahun kering, jika debit rata-rata tahunnya dibawah debit rata-rata dari tahun ke tahun

3. Tahun basah, jika debit rata-ratanya diatas debit rata-rata dari tahun ke tahun.

b. Metode tahun penentu (*basic year*)

Penentuan debit andalan dengan metode ini, antara lain dengan menentukan suatu tahun tertentu sebagai dasar perencanaan

c. Metode bulan penentu (*basic month*)

Metode ini adalah menentukan bulan tertentu sebagai dasar perencanaan.

d. Metode Q rata-rata minimum

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

1. DPS dengan fluktuasi debit maksimum dan minimum tidak terlalu besar dari tahun ke tahun

2. Kebutuhan relative konstanm sepanjang tahun.

Dalam studi ini perhitungan debit andalan dilakukan dengan metode tahun dasar (*basic year*), yaitu mengambil suatu pola debit dari tahun ke tahun tertentu. Metode *basic year* biasa digunakan untuk merencanakan atau pengelolaan irigasi.

Prosedur perhitungan debit andalan adalah sebagai berikut :

1. Menghitung debit rata-rata bulanan untuk tahun rencana

2. Merangking data mulai yang terbesar sampai yang terkecil

3. Menghitung probabilitas untuk masing-masing data

Menurut Suyono Sosrodarsono (2003:204), terminologi debit dinyatakan sebagai berikut :

1. Debit air cukup (*affluent*), yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 95 hari dalam setahun (peluang keandalan 26,02%)

2. Debit air normal, yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 185 hari dalam setahun (peluang keandalan 50,68%)

3. Debit air rendah, yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 275 hari dalam setahun (peluang keandalan 75,34%)

4. Debit air kering, yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 355 hari dalam setahun (peluang keandalan 97,30%).

Selain empat keandalan debit tersebut, juga dihitung debit dengan keandalan 80% sesuai dengan standar perencanaan irigasi.

Analisis debit andalan menggunakan metodetahun dasar perencanaan biasanya digunakan dalam perencanaan dan pengelolaan irigasi. Umumnya di bidang irigasi

dipakai debit dengan keandalan 80%, sehingga rumus untuk menentukan tahun dasar perencanaan adalah sebagai berikut (Montarcih L, 2010:102)

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

Dengan :

n = Jumlah Data

R_{80} = Debit yang terjadi < R_{80} adalah 20 %, dan R_{80}

(Angka 5 didapat dari $\frac{100\%}{(100\% - 80\%)} = 5$, jadi jika akan dicari

$$R_{90} \text{ berarti } = \left[\frac{n}{(100\% / (100\% - 90\%))} + 1 \right]$$

Dengan metode *Water Balance* dari DR.F.J Mock dapat diperoleh suatu estimasi empiris untuk mendapatkan debit andalan. Metode ini didasarkan pada parameter data hujan, evapotranspirasi dan karakteristik DAS setempat. Untuk mendapatkan debit bulanan, pada pertimbangan hidrologi daerah irigasi digunakan metode Dr. F.J. Mock dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Hitung Evapotranspirasi Potensial.
2. Hitung *Limited* Evapotranspirasi.
3. Hitung *Water Balance*.
4. Hitung Aliran Dasar dan Limpasan Langsung.

Berikut adalah data-data yang digunakan dalam perhitungan debit andalan metode F.J.Mock :

a. Data Curah Hujan

Data curah hujan digunakan adalah curah hujan efektif bulanan yang berada dalam DPS. Stasiun curah hujan yang dipakai adalah stasiun yang dianggap mewakili kondisi hujan di daerah tersebut.

b. Evapotranspirasi Terbatas (Et)

Evapotranspirasi terbatas adalah evapotranspirasi aktual dengan mempertimbangkan kondisi vegetasi dan permukaan tanah serta frekwensi curah hujan. Untuk menghitung evapotranspirasi terbatas diperlukan data :

1. Curah hujan tengah bulanan (P).
2. Jumlah hari hujan tengah bulanan (n).
3. Jumlah permukaan kering setengah bulanan (d), dihitung dengan asumsi bahwa tanah dalam suatu hari hanya mampu menahan air 12 mm dan selalu menguap sebesar 4 mm.

Exposed surface (m%), ditaksir berdasarkan peta tata guna lahan, atau dengan asumsi.

m = 0 % untuk lahan dengan hutan lebat

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

m = 10 % - 40 % untuk lahan yang tererosi

m = 20 % - 50 % untuk lahan pertanian yang diolah

Secara matematis evapotranspirasi terbatas dirumuskan sebagai berikut :

$$ET = E_p - E$$

$$E = E_p \cdot (m/20) \cdot (18-n) \quad (2-3)$$

dimana :

E = Beda antara evapotranspirasi potensial dengan evapotranspirasi terbatas (mm)

ET= Evapotranspirasi terbatas (mm)

E_p = Evapotranspirasi potensial (mm)

m = Singkapan lahan (*Exposed surface* (%))

n = Jumlah hari hujan dalam sebulan

c. Faktor Karakteristik Hidrologi

➤ Faktor bukaan lahan

m = 0 % untuk lahan dengan hutan lebat

m = 10 – 40 % untuk lahan tererosi

m = 30 – 50 % untuk lahan pertanian yang diolah

Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan untuk seluruh daerah studi yang merupakan daerah terbuka berbatu dapat diasumsikan untuk faktor m diambil 20 % - 40 %.

➤ Luas Daerah Pengaliran

Semakin besar daerah pengaliran dari suatu aliran kemungkinan akan semakin besar pula ketersediaan debitnya.

➤ Kapasitas Kelembaban Tanah (SMC)

Soil moisture capacity adalah kapasitas kandungan air pada lapisan tanah permukaan (*surface soil*) per m². Besarnya *Soil Moisture Capacity* untuk perhitungan ketersediaan air ini diperkirakan berdasarkan kondisi porositas lapisan tanah permukaan dari DPS. Semakin besar porositas tanah, akan semakin besar pula *Soil Moisture Capacity* yang ada. Dalam perhitungan ini nilai SMC diambil antara 50 mm sampai dengan 250 mm.

Persamaan yang digunakan untuk besarnya kapasitas kelembaban tanah adalah :

$$SMC(n) = SMC(n-1) + IS(n)$$

$$W_s = A_s - IS \quad (2-4)$$

dimana:

SMC = Kelembaban tanah (diambil 50mm/205mm)

SMC(n) = Kelembaban tanah bulan ke n

SMC(n-1) = Kelembaban tanah bulan ke n - 1

IS = Tampunguan awal (*initial storage*) mm

A_s = Air hujan yang mencapai permukaan tanah

d. Keseimbangan air di permukaan tanah

Keseimbangan air permukaan tanah di permukaan tanah dipengaruhi oleh faktor-faktor sebagai berikut :

➤ Air Hujan (A_s)

Air hujan yang mencapai permukaan tanah dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$A_s = P - E_t \quad (2-5)$$

di mana :

A_s = air hujan mencapai permukaan tanah

P = Curah hujan bulanan

E_t = Evapotranspirasi

➤ Kandungan air tanah

Besar kandungan tanah tergantung dari harga A_s, bila harga A_s negatif, maka kapasitas kelembaban tanah akan berkurang dan bila A_s positif maka kelembaban tanah akan bertambah.

e. Aliran dan Penyimpangan Air Tanah (*run off & ground water storage*)

Nilai run off dan ground water tergantung dari keseimbangan air dan kondisi tanahnya. Data-data yang diperlukan untuk menentukan besarnya aliran air tanah adalah sebagai berikut :

➤ Koefisien Infiltrasi

Koefisien nilai infiltrasi diperkirakan berdasarkan kondisi porositas tanah dan kemiringan DPS. Lahan DPS yang porous memiliki koefisien infiltrasi yang besar. Sedangkan lahan yang terjal memiliki koefisien infiltrasi yang kecil, karena air akan sulit terinfiltrasi ke dalam tanah. Batasan koefisien infiltrasi adalah 0-1.

➤ Faktor Resesi Aliran Tanah (k)

Faktor resesi adalah perbandingan antara aliran air tanah pada bulan ke-n dengan aliran air tanah pada awal bulan tersebut. Faktor resesi aliran tanah dipengaruhi oleh sifat geologi DPS. Dalam perhitungan ketersediaan air dengan metode MOCK, besarnya nilai k didapat dengan cara coba-coba (*trial*), sehingga dapat dihasilkan aliran seperti yang diharapkan.

➤ *Initial Storage* (IS)

Initial Storage atau tampungan awal adalah perkiraan besarnya volume air pada awal perhitungan.

➤ Penyimpanan Air Tanah (*Ground Water Storage*)

Penyimpanan air tanah besarnya tergantung dari kondisi geologi setempat dan waktu. Sebagai permulaan dari simulasi harus ditentukan penyimpanan awal (*initial storage*) terlebih dahulu.

Persamaan yang dipergunakan dalam perhitungan penyimpanan air tanah adalah sebagai berikut :

$$V_n = k * V_{(n-1)} + 0.5 (1 + k) I_n$$

$$\Delta V_n = V_n - V_{(n-1)} \quad (2-6)$$

dimana :

V_n = Volume air tanah bulan ke n

K = q_t/q_0 = faktor resesi aliran tanah

q_t = aliran air tanah pada waktu bulan ke t

q_0 = aliran air tanah pada awal bulan (bulan ke 0)

v_{n-1} = volume air tanah bulan ke (n-1)

Δv_n = Perubahan volume aliran air tanah

f. Aliran Sungai

- Aliran Dasar = infiltrasi - Perubahan aliran air dalam tanah
- Aliran permukaan = volume air lebih - infiltrasi
- Aliran sungai = aliran permukaan + aliran dasar
- Debit andalan = $\frac{\text{Aliran sungai} * \text{Luas DAS}}{1 \text{ bulan dalam detik}}$ (2-7)

Air yang mengalir di sungai merupakan jumlah dari aliran langsung (*direct run off*), aliran dalam tanah (*interflow*), dan aliran tanah (*base flow*).

Besarnya masing-masing aliran tersebut adalah :

Interflow = infiltrasi - volume air tanah

Direct run off = *water surplus* - infiltrasi

Base flow = aliran yang selalu ada sepanjang tahun

Run off = *interflow* + *direct run off* + *base flow*

(repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/31903/4/Chapter%2011.pdf. diakses

(8 Januari 2014).

2.4. Operasi dan Pola Operasi Waduk

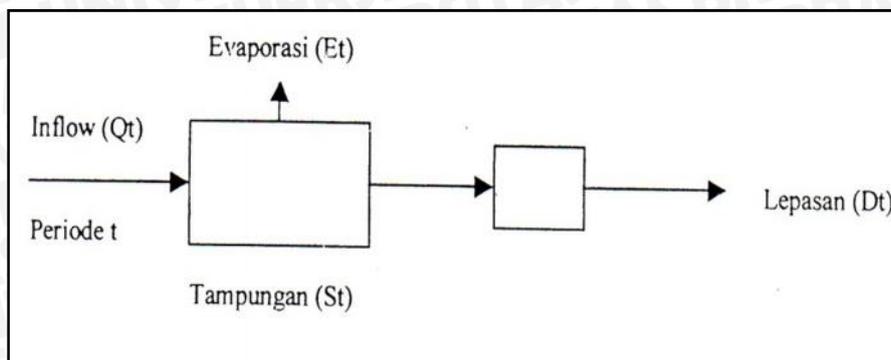
Operasi waduk (*reservoir operation*) adalah penampungan aliran air sungai ke dalam sebuah waduk (*reservoir*) dan pelepasan daripada air yang telah ditampung tersebut untuk berbagai tujuan tertentu. (Soetopo W,2010:2) Sedangkan Pola operasi adalah patokan operasional periode suati waduk dimana debit air yang dikeluarkan oleh waduk harus mengikuti ketentuan agar elevasinya terjaga sesuai dengan rancangan. Ini direncanakan dengan cara menganalisa perilaku operasi waduk yang bertujuan membuat keseimbangan antara volume tampungan, debit masukan (*inflow*) dan keluaran (*outflow*). Dalam studi ini akan menggunakan analisa perilaku operasi waduk dengan model simulasi

2.4.1. Simulasi

Lingkup waktu dari simulasi mencakup 1 tahun operasi atau lebih tergantung dari kebutuhannya. Salah satu operasi dibagi-bagi menjadi sejumlah periode, misalnya bulanan, 15 harian, 10 harian, mingguan, maupun harian. Persamaan umum simulasi operasi waduk adalah Neraca Keseimbangan Air (*water balance*).

Dalam situasi atau analisa perilaku operasi waduk bertujuan untuk mengetahui perubahan kapasitas tampungan waduk. Persamaan yang digunakan adalah kontinuitas

tampungan (*mass storage equation*) yang memberi hubungan antara masukan, keluaran, dan perubahan tampungan.



Gambar 2.4. Model Simulasi

Sumber : Anonim

Persamaan secara matematika dinyatakan sebagai berikut (Mc.Mahon and Mein, 1978:24) :

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - D_t - E_t - L_t \quad (2-8)$$

Dengan kendala $0 \leq S_{t+1} \leq C$

Dengan :

- S_{t+1} = Tampungan waktu pada akhir interval waktu
- t = Interval waktu yang digunakan
- S_t = Tampungan waduk pada awal interval waktu
- Q_t = Aliran masuk selama interval waktu t
- D_t = Lepasan air selama interval waktu t
- E_t = Evaporasi selama interval waktu t
- L_t = Kehilangan-kehilangan air lain dari waduk selama interval waktu t , mempunyai harga yang kecil dan dapat diabaikan
- C = Tampungan aktif (tampungan efektif).

Kapasitas tampungan harus dapat menjamin pasokan air dengan keandalan pemenuhan yang telah direncanakan.

Dengan mempertimbangkan luas genangan waduk yang bervariasi terhadap waktu, maka lebih lanjut persamaan ditulis sebagai berikut :

$$S_{t+1} = S_t + Q_t + R_t(A) - O_t - E_t - P_t - S P_t(A) \quad (2-9)$$

Dengan :

$R_t(A)$ = Hujan yang jatuh ke waduk pada interval waktu t , sebagai fungsi luas permukaan air waduk

O_t = Pengambilan air waduk selama interval dari t

$E_t(A)$ = Evaporasi selama interval waktu t , sebagai fungsi luas permukaan di waduk

P_t = Limpahan yang melewati bangunan pelimpah selama interval waktu t

$SP_t(A)$ = Rembesan keluar dari waduk selama interval waktu, sebagai fungsi luas permukaan air waduk mempunyai harga yang kecil dan dapat diabaikan.

Aturan umum dalam simulasi waduk adalah :

1. Air waduk tidak boleh turun di bawah tampungan aktif. Dalam banyak keadaan, maka batas bawah tampungan aktif ini ditentukan oleh tingginya lubang *outlet* waduk.
2. Air waduk tidak dapat melebihi batas atas tampungan aktif. Dalam banyak keadaan maka batas atas tampungan aktif ini ditentukan oleh puncak *spillway*. Apabila terjadi kelebihan air, maka kelebihan ini akan melimpah (*spillout*).
3. Ada beberapa waduk (waduk multiguna) yang memiliki batasan debit yang dikeluarkan (*outflow*), baik debit maksimum atau debit minimum.

2.4.2. Pendekatan Operasi Waduk

Pendekatan yang digunakan dalam operasi waduk adalah pola operasi dengan pendekatan tahunan (*one year return*) artinya waduk pada awal operasi dalam kondisi penuh dan untuk periode satu tahun operasi waduk diusahakan kembali penuh

2.4.3. Kegagalan dan Keandalan Waduk

Penilaian kuantitatif kegagalan waduk dapat didasarkan pada kegagalan menurut jumlah kejadian (*occurrence based probability*) maupun jumlah kekurangan air (*volume based probability*). Kegagalan yang dimaksud adalah besaran debit yang yang dikeluarkan waduk. Debit yang keluar dari waduk adalah hasil perencanaan.

Peluang kegagalan didefinisikan sebagai banyaknya kejadian waduk mengalami kegagalan selama operasinya dalam kurun waktu yang ditinjau. Persamaan matematisnya sebagai berikut (Mc.Mahon and Mein, 1978:17) :

$$P_e = \frac{P}{N} \quad (2-10)$$

Dimana :

Pe = Peluang kegagalan

P = Banyaknya waduk mengalami kekosongan

N = Total satuan waktu yang ditinjau

Keandalan dari suatu waduk adalah berapa persen dari interval waktu operasi waduk berhasil memenuhi kebutuhan yang direncanakan. Dapat dinyatakan dalam persen atau fraksi 1 (satu). Dalam realitasnya tidak ada keandalan waduk 100%.

Hubungan antara keandalan dan peluang kegagalan dirumuskan sebagai berikut :

$$R = 1 - Pe \quad (2-11)$$

Dimana :

R = Peluang keandalan

Besarnya kegagalan waduk dinyatakan dalam bentuk prosentase daripada rerata debit *inflow*, biasanya berkisar antara 50%-75% dan jarang diatas 90% (Soetopo, 2009:10). Berdasarkan pertimbangan bahwa debit yang tersedia dapat dimaksimalkan, maka keandalan yang direncanakan pada studi ini adalah 80%. Sedangkan kegagalan yang direncanakan sebesar 20%.

2.5. Pedoman Lepas Pola Operasi Waduk (*Rule Curve*)

Volume air yang dilepaskan dari waduk umumnya sama dengan volume kebutuhan air. Hal ini akan memungkinkan pada suatu saat elevasi muka air waduk menjadi sangat rendah (dibawah elevasi operasional minimum) sehingga tidak dapat melayani kebutuhan, kecuali bila ada kebijakan yang mengatur bahwa hanya sebagian kebutuhan air yang dilayani dari waduk (Mc.Mahon and Mein, 1978:16) Cara mengontrol pelepasan air ini disebut pedoman operasi waduk.

Pedoman pelepasan tersebut dibuat dengan mengadakan pembatasan pelepasan air jika muka air waduk mulai turun, untuk menghindari kegagalan akibat waduk kosong jauh sebelum datangnya musim hujan. Pembatasan-pembatasan tersebut biasanya diberikan dalam suatu diagram yang sering disebut *rule curve*. Dengan *rule curve* waduk diatur agar tidak kosong dan tetap dapat memberikan pelayanan pemberian air walau tidak secara penuh. *Rule curve* tidak dimaksudkan sebagai suatu batas yang kaku untuk setiap waktu, tetapi lebih merupakan petunjuk yang didasarkan pada analisis dari semua pencatatan terakhir untuk membantu operator waduk agar dapat mencapai efisiensi yang maksimal.

Rule curve, antar lain berbentuk tabel atau grafik, seperti yang digambarkan oleh para ahli atas dasar data terdahulu, mencerminkan tampungan maksimum waduk yang

dicapai pada waktu yang berbeda pada musim hujan. Seperti sebuah kurva, mencerminkan zona yang kosong yang dilewatkan di waduk pada hari atau minggu pada musim hujan.

Pihak operator waduk diharapkan untuk mengikuti *Rule Curve* ini sedekat mungkin, sementara mencoba untuk memenuhi berbagai kebutuhan di wilayah hilir dari waduk. Cara penerapan *Rule Curve* ini pada dasarnya adalah jika tampungan waduk cenderung menuju ke sebelah atas dari *Rule Curve*, maka lepasan ditambah besarnya. Sebaliknya jika tampungan waduk cenderung menuju ke sebelah bawah dari *Rule Curve*, maka lepasan dikurangi besarnya (Soetopo W, 2010:16)

2.6. Model Hidrologi Matematik

2.6.1. Umum

Dalam perencanaan bangunan air yang memerlukan data yang banyak masih sering ditemukan banyak kendala, seperti sulitnya para teknisi mengumpulkan data debit sungai berupa deret angka yang cukup panjang.

Walaupun demikian dari pencatatan curah hujan harian yang relatif mudah dapat ditentukan debit harian. Hal ini dapat ditempuh dengan cara simulasi yang menggunakan model matematik. Dengan cara tersebut kita bahkan dapat meramal kedepan dalam hal deret data debit bulanan berdasarkan deret data debit bulanan masa lampau. Peramalan debit tersebut diperlukan dalam membuat pola eksploitasi waduk untuk tahun berikutnya (Soemarto, 1987:439)

Model- model matematik dalam ilmu Hidrologi Umumnya ada 2 kelompok :

1. Deterministik
2. Stokastik

Jika ada diantara variabel-variabel acak (random) yang mempunyai distribusi dalam probabilitas maka model tersebut dinamakan model stokastik., dalam kelompok stokastik variabel-variabel hidrologi yang digunakan lebih ditekankan ketergantungan kepada waktu. Jika variabel-variabelnya bebas dari keragaman acak, sehingga tidak ada yang mempunyai distribusi dalam probabilitas, maka model tersebut dipandang sebagai model deterministik. Dibawah ini akan ditampilkan beberapa perbedaan yang mendasar mengenai model deterministik dan stokastik.

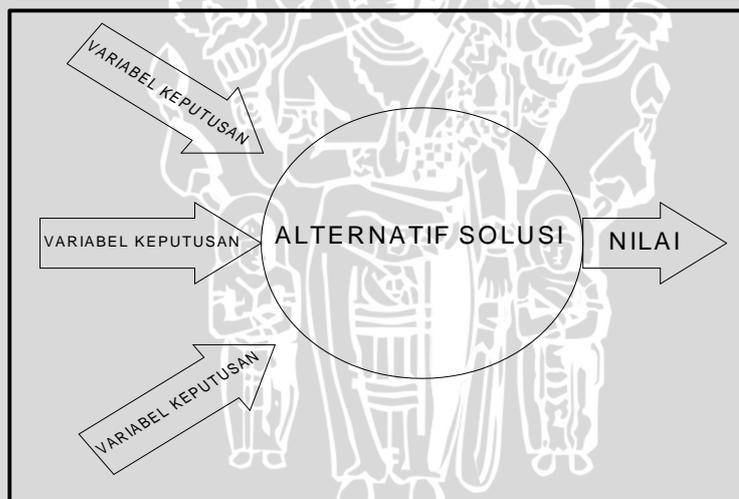
2.6.2. Perbedaan Model Deterministik dan Stokastik

Tabel 2.2. Perbedaan Model Deterministik dan Skokastik

Model Deterministik	Model Stokastik
1. Tidak bergantung pada peluang	1. Bergantung pada peluang
2. Tidak berubah karena waktu	2. Bergantung pada waktu
3. Tidak ada unsur random	3. Ada unsur random (acak)
4. Perubahan variabel (mengikuti hukum kepastian)	4. Perubahan variabel (merupakan faktor peluang)
5. Tidak mempunyai kecenderungan (trend)	5. Mempunyai kecenderungan (trend)

2.7. Model Optimasi Secara Umum

Secara umum model Optimasi adalah suatu proses pemilihan alternatif solusi yang terbaik di antara sejumlah alternatif-alternatif solusi yang tersedia. Adapun suatu alternatif solusi dapat diilustrasikan sebagai gambar 2.6. berikut ini



Gambar 2.5. Alternatif Solusi

Sumber: Soetopo W, 2012:71

Jadi suatu alternatif solusi menerima input berupa sejumlah nilai-nilai daripada variable keputusan (*Decision Variabe*) dan menghasilkan suatu nilai output yang merupakan ukuran kinerja daripada alternatif solusi yang bersangkutan. Nilai output bisa merupakan keuntungan (misalnya produksi PLTA, produksi daerah irigasi) ataupun merupakan kerugian (misalnya kerusakan akibat banjir). Ada 3 Optimasi yaitu Optimasi dengan Random Search, Optimasi dengan Simulated Annealing dan Optimasi dengan Algoritma Genetik (AG).

2.8. Optimasi dengan Algoritma Genetik (AG)

Algoritma Genetik adalah salah satu metode dari kelompok Simulasi untuk optimasi. Prosedur jenis ini cenderung untuk efektif terutama dalam mengeksplorasi berbagai bagian-bagian daripada wilayah yang layak (*feasible*) dan secara gradual bergerak menuju solusi-solusi layak yang terbaik. Prosedur AG belakangan sangat populer untuk digunakan dalam menyelesaikan problem-problem optimasi dengan tingkat kesulitan yang tinggi.

Model AG berpusat pada struktur daripada kromosom yang mewakili alternatif solusi. Jadi sebuah kromosom merupakan sekumpulan variabel-variabel keputusan sebagai gambar berikut.

VAR-1	VAR-2	VAR-3	VAR-4		VAR-P
--------------	--------------	--------------	--------------	--	--------------

Gambar 2.6. Kromosom sebagai Alternatif Solusi

Sumber: Soetopo W, 2012:85

Sebuah alternatif solusi mempunyai nilai kinerja. Karena sebuah kromosom itu adalah juga merupakan alternatif solusi, maka setiap kromosom mempunyai nilai kinerja. Karenanya model optimasi AG bertujuan untuk mendapatkan kromosom terbaik yang mempunyai nilai kinerja terbaik pula.

Model optimasi AG adalah proses optimasi yang secara iteratif mengembangkan suatu populasi daripada kromosom-kromosom (alternatif-alternatif solusi) sehingga tercapailah suatu populasi homogeny daripada kromosom (alternatif solusi) yang terbaik. Pada contoh kasus ini maka besarnya populasi kromosom itu ditetapkan sebanyak 780 buah kromosom.

Secara garis besar maka proses pengembangan populasi kromosom dengan cara AG itu terdiri dari pada 3 komponen berikut ini.

1. Reproduksi
2. Crossover
3. Mutasi

Reproduksi adalah proses seleksi terhadap kromosom yang terdapat pada suatu populasi berdasarkan nilai kinerja dari masing-masing kromosom dan dilanjutkan dengan proses copy ini merupakan generasi turunan yang berikutnya. Pada contoh kasus ini, maka proses seleksi adalah memilih 40 kromosom terbaik (berdasarkan nilai kinerja

tiap kromosom) dari populasi kromosom sebesar 780. Jadi besarnya (setiap) generasi turunan berikutnya adalah sebanyak 40 kromosom.

Crossover adalah persilangan diantara kromosom-kromosom yang ada pada suatu generasi turunan. Hasil persilangan ini membentuk populasi dari generasi berikutnya (yang dalam contoh kasus ini sebanyak 780 kromosom). Pada contoh kasus ini, maka persilangan antara dua kromosom generasi turunan akan menghasilkan satu kromosom baru. Pada persilangan ini, maka setiap variabel dari kromosom baru merupakan gabungan antara dua variabel dari kedua kromosom generasi turunan. Untuk variabel ke- i , maka rumus stokastik penggabungan adalah sebagai berikut.

$$V_i = V_{1i} \cdot U [0,1] + V_{2i} \cdot (1-U [0,1]) \quad (2-12)$$

Dengan V_i adalah variabel dari kromosom baru gabungan, V_{1i} dan V_{2i} adalah variabel masing-masing dari kedua kromosom generasi turunan, dan $U [0,1]$ adalah bilangan acak uniform antara 0 dan 1.

Jadi semua variabel V_i dari sebuah kromosom baru dibentuk dengan pers. (2-11) tersebut. Pada contoh kasus ini maka pembentukan kromosom baru dilakukan oleh setiap pasangan yang berbeda dari kromosom generasi turunan (40 kromosom) sehingga terbentuklah suatu populasi baru kromosom dari generasi berikutnya (780 kromosom).

Mutasi adalah perubahan yang terkadang terjadi diantara variabel-variabel dari kromosom. Perubahan ini terjadi secara acak dan mempunyai probabilitas yang kecil. Proses optimasi AG terutama dilakukan oleh reproduksi dan crossover secara bergantian menghasilkan generasi turunan dari kromosom yang semakin baik dan juga semakin homogeny. Akan tetapi dalam kondisi homogen ini maka dapat terjadi hilangnya informasi penting pada kromosom yang sebetulnya masih dapat digunakan. Mutasi ini berfungsi untuk menjaga agar informasi penting semacam itu tidak terlewatkan. Pada contoh kasus ini, maka proses mutasi tidak diikutsertakan (Soetopo W, 2012 : 86).

2.9. Bahasa Pemrograman Untuk Simulasi Stokastik

Apabila proses simulasi deterministik masih dimungkinkan untuk dilakukan secara manual, maka untuk dapat melakukan Simulasi Stokastik secara praktis harus menggunakan perangkat computer. Hal ini terkait dengan keharusan untuk membangkitkan seri bilangan acak dalam proses Simulasi Stokastik. Perangkat computer yang ada pada era sekarang ini memang mampu untuk menyediakan seri-seri bilangan acak secara cepat.

Setiap bahasa pemrograman dapat digunakan untuk model Simulasi Stokastik asalkan mempunyai fungsi yang dapat menghasilkan seri-seri bilangan acak dengan cepat. Dalam studi maka yang digunakan untuk membuat contoh-contoh model Simulasi Stokastik yang ditampilkan adalah program spreadsheet Excel dari Microsoft Office versi 2010 (atau disingkat MS-Exel 2010 atau MS. Excel saja).

Program MS Excel 2010 adalah program spreadsheet yang terdiri dari lembar-lembar woeksheet untuk tampilanya dan prosedur Macro dengan Visual Basic untuk mengontrol jalanya program. Program MS Excel ini cukup canggih untuk digunakan dalam pembuatan model-model Simulasi Stokastik yang kompleks.

Pada lembar-lembar worksheet terdiri dari matrik dua dimensi dari cell-cell, maka dapat ditampilkan data input dan output serta berbagai grafik dari data tersebut. Pada setiap cell dapat dimasukkan berbagai fungsi-fungsi yang tersembunyi dibalik nilai hasil fungsi-fungsi tersebut. Fungsi-fungsi worksheet jumlahnya sangat banyak dan bervariasi.

Pada prosedur macro maka dapat dibuat baris-baris dari pernyataan-pernyataan(statement) bahasa Visual Basic untuk mengontrol jalanya proses perhitungan di lemarm-lembar worksheet. Prosedur macro juga mempunyai fungsi-fungsi walaupun jumlahnya tidak banyak. Jadi ide dari pemrograman dengan spreadsheet MS Excel ini adalah dengan mendapatkan perhitungan mendetail di lembar-lembar worksheet, sementara menempatkan control jalanya program di prosedur-prosedur macro.

Baik pada worksheet maupun prosedur macro masing-masingnya ada tersedia fungsi yang dapat menghasilkan bilangan acak. Bilangan acak ini merupakan bagian yang sangat penting dalam model Simulasi Stokastik.

- Pada worksheet maka fungsi bilangan acak adalah = RAND().
- Pada prosedur macro maka fungsi bilangan acak adalah Rnd().

Mengenai fungsi mana yang akan digunakan tergantung dari situasi masalah yang dihadapi.