

## BAB II LANDASAN TEORI

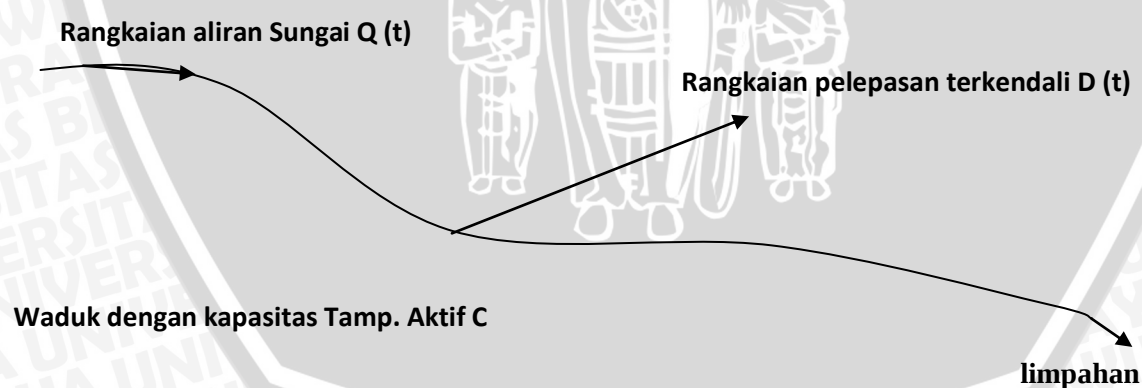
### 2.1. Umum

Fungsi utama waduk secara prinsip adalah menampung kelebihan air pada periode debit tinggi untuk digunakan pada saat debit rendah. Disamping menampung air untuk pemanfaatan dikemudian hari, penampungan air dapat memperkecil kerusakan akibat banjir di bagian hilirnya. Berdasarkan pengertian ini maka waduk dapat membuat modifikasi dari distribusi air yang alami dan menciptakan distribusi buatan.

Pengendalian aliran suatu waduk pada dasarnya mempunyai 2 fungsi yaitu:

1. Menambah aliran dalam periode rendah
2. Mengendalikan aliran pada saat banjir

Berdasarkan jumlah kegunaannya terdapat dua jenis waduk, yaitu waduk tunggal guna dan waduk serba guna. Waduk tunggal adalah waduk yang dibangun dengan maksud untuk satu kepentingan saja, misalnya untuk pengendali banjir saja, untuk memenuhi kebutuhan air irigasi saja, atau untuk keperluan lainnya. Waduk serba guna adalah waduk yang dibangun dengan maksud lebih dari satu kepentingan, misalnya sebagai pengendali banjir sekaligus pembangkit listrik. Dalam bentuk yang paling sederhana, masalah waduk yang ditangani dapat digambarkan sebagai berikut:



**Gambar 2.1. Idealisasi Masalah Kapasitas Kemampuan Waduk**

Sumber: McMahon, 1978

Rangkaian aliran di sungai  $Q(t)$  akan dimanfaatkan untuk memenuhi permintaan air dengan kebutuhan yang tertentu  $D(t)$ . Dengan demikian pertanyaan yang muncul dapat berupa, berapa besar kapasitas waduk ( $C$ ) yang harus disediakan bagi suatu pelepasan yang

terkendali (*release*) dengan tingkat keandalan yang dapat 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*), kapasitas waduk, pelepasan yang terkendali (*release*) dan keandalan yang ditemukan.

## 2.2. Waduk

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

### 1. Irigasi

Pada saat musim penghujan, hujan yang turun di daerah tangkapan air sebagian besar akan mengalir ke sungai. Kelebihan air yang terjadi dapat di tampung waduk sebagai persediaan sehingga pada saat musim kemarau tiba air tersebut dapat digunakan untuk berbagai keperluan antara lain irigasi lahan pertanian.

### 2. PLTA

Dalam menjalankan fungsinya sebagai PLTA, waduk dikelola untuk mendapatkan kapasitas listrik yang dibutuhkan. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) adalah suatu system pembangkit listrik yang biasanya terintegrasi dalam bendungan dengan memanfaatkan energi mekanis aliran air untuk memutar turbin yang kemudian akan diubah menjadi tenaga listrik oleh generator.

### 3. Penyediaan air baku

Air baku adalah air bersih yang dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan air minum dan air rumah tangga. Waduk selain sebagai sumber pengairan persawahan juga dimanfaatkan sebagai sumber penyediaan air baku untuk bahan baku air minum dan air rumah tangga. Air yang dipakai harus memenuhi persyaratan sesuai kegunaannya.

#### 2.2.1. Klasifikasi Penggunaan 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

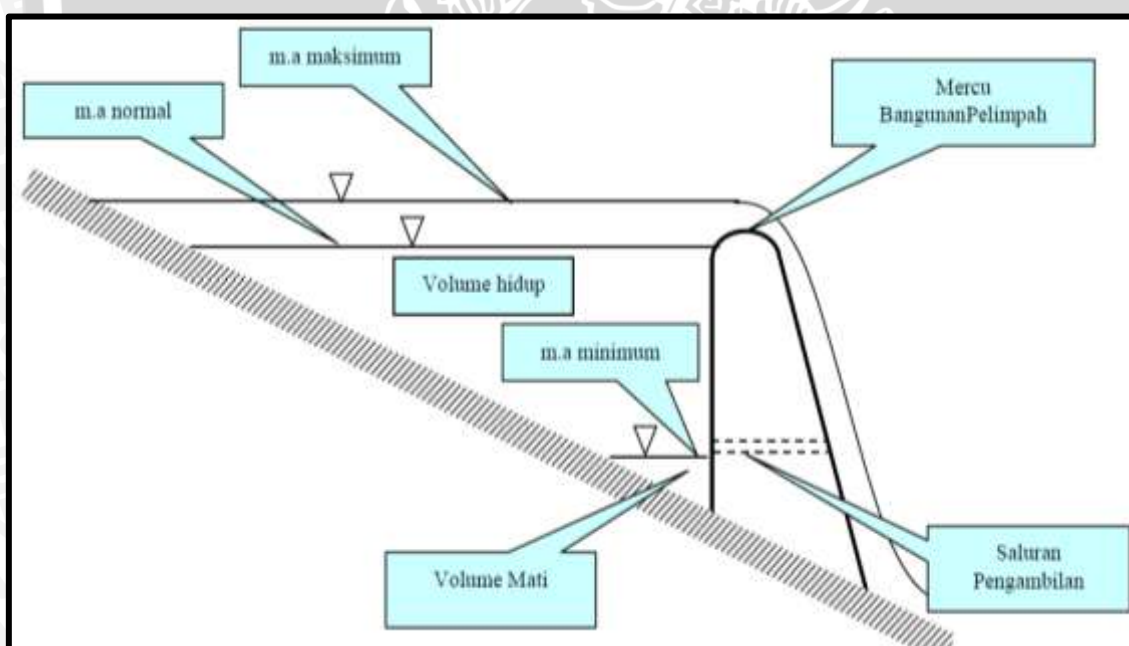
waduk eka guna lebih mudah dibandingkan dengan waduk multi guna dikarenakan tidak adanya konflik kepentingan di dalam. Pada waduk eka guna pengoperasian yang dilakukan hanya mempertimbangkan pemenuhan satu kebutuhan.

## 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.

### 2.2.2. Karakteristik Waduk

Karakteristik suatu waduk merupakan bagian pokok dari waduk yaitu volume hidup (*live storage*), volume mati (*dead storage*), tinggi muka air (TMA) maksimum, TMA minimum, tinggi mercu bangunan pelimpah berdasarkan debit rencana. Dari karakteristik fisik waduk tersebut didapatkan hubungan antara elevasi dan volume tampungan yang disebut juga liku kapasitas waduk. Liku kapasitas tampungan waduk merupakan data yang menggambarkan volume tampungan air di dalam waduk pada setiap ketinggian muka air.



**Gambar 2.2. Karakteristik Waduk**

Sumber: Anonim

### 2.3. 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 suatu 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*).

#### 2.3.1. Persamaan Keseimbangan Waduk

Prinsip dasar daripada suatu operasi waduk adalah Persamaan Keseimbangan Waduk. Pada dasarnya persamaan keseimbangan waduk merupakan inventaris untuk suatu periode tertentu mengenai banyak air yang masuk ke waduk (pertambahan) dan keluar dari waduk (pengurangan) serta pengaruhnya terhadap tampungan (status volume air di waduk). Dalam satuan volume, maka persamaan keseimbangan waduk ini dinyatakan sebagai berikut:

$$S_{t+1} = S_t + I - O \quad (2.1)$$

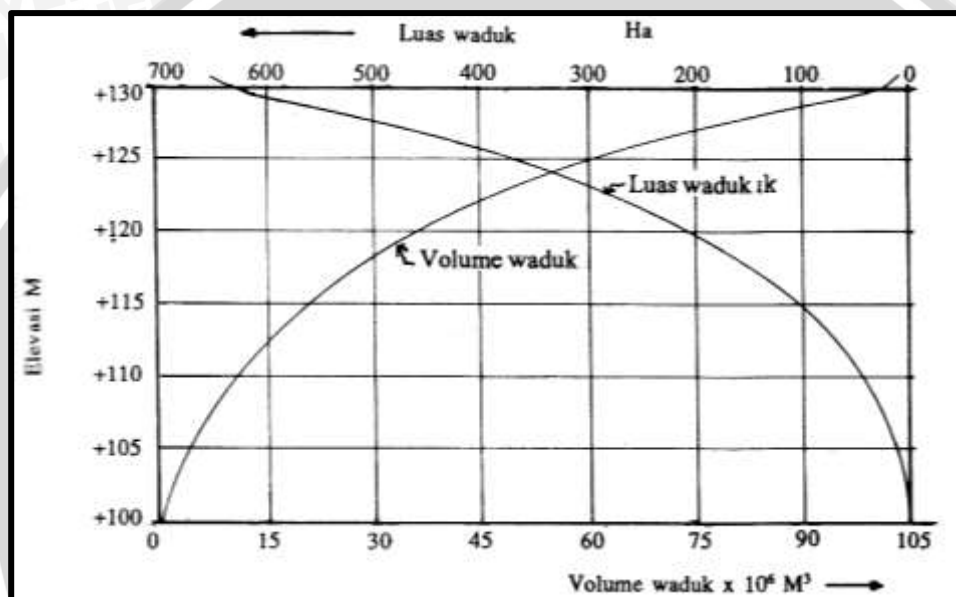
Dengan  $S_{t+1}$  adalah tampungan pada akhir periode  $t$ ,  $S_t$  adalah tampungan pada awal periode  $t$ ,  $I$  adalah total volume debit *inflow* yang masuk ke waduk selama periode  $t$ , dan  $O$  adalah total volume debit *outflow* yang keluar dari waduk selama periode  $t$ . Persamaan (1) tersebut dapat diartikan bahwa  $I$  adalah total volume debit *inflow* yang masuk ke waduk, atau bahwa debit *inflow* selain dari sungai (yaitu curah hujan di waduk dan aliran bawah permukaan masuk waduk) diabaikan besarnya. Demikian pula dapat diartikan bahwa  $O$  adalah total volume debit *outflow* yang keluar dari waduk, atau bahwa debit *outflow* selain yang keluar dari bangunan-bangunan pelengkap waduk (yaitu evaporasi dan rembesan) diabaikan besarnya. Apabila aliran debit minor ini ikut diperhitungkan, maka Persamaan (2.2) dapat ditulis secara lebih spesifik sebagai berikut:

$$S_{t+1} = S_t + I - R - S_p - L \quad (2.2)$$

Dengan  $R$  adalah volume debit lepasan terkontrol,  $S_p$  adalah volume debit limpahan (tak terkontrol), dan  $L$  adalah total bersih volume debit minor kehilangan yang keluar waduk (evaporasi + rembesan - curah hujan di waduk - aliran bawah permukaan masuk waduk).

### 2.3.2. 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 tertentu, kurva ini juga dipergunakan untuk menentukan besarnya kehilangan air akibat perkolasi yang dipengaruhi oleh luas muka air pada elevasi tertentu.



**Gambar 2.3. Lengkung Kapasitas Waduk**

Sumber: Sudjarwadi, 1988: 5

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

$$H = C_h \cdot S^{0,5} \quad (2.3)$$

dengan:

$H$  = tinggi muka air waduk (m)

$S$  = volume tampungan total ( $m^3$ )

$C_h$  = koefesien

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

$$A = C_a \cdot S^{0,5} \quad (2.4)$$

dengan:

- $A$  = luas muka air waduk ( $\text{km}^2$ )  
 $S$  = volume tampungan total ( $\text{m}^3$ )  
 $C_a$  = koefisien

### 2.3.3. Pola Operasi Waduk

Pola operasi waduk adalah patokan operasional bulanan suatu waduk dimana debit air yang dikeluarkan oleh waduk harus sesuai dengan ketentuan agar elevasinya terjaga sesuai dengan rencana. Pola operasi waduk disepakati bersama oleh para pemanfaat air dan pengelola melalui Panitia Tata Pengaturan Air (PTPA). Tujuan dari disusunnya pola operasi waduk adalah untuk memanfaatkan air secara optimal demi tercapainya kemampuan maksimal waduk dengan cara mengalokasikan secara proporsional sehingga tidak terjadi konflik antar kepentingan. Jenis pola operasi waduk Dalam satu tahun dibuat 2 (dua) jenis pola operasi waduk yaitu:

- a. Pola Operasi waduk musim hujan, berlaku saat pengisian waduk (Desember sampai dengan Mei).
- b. Pola operasi waduk musim kemarau, berlaku saat pengosongan waduk (Juni sampai November)

Pengoperasian waduk secara efisien dan optimal merupakan permasalahan yang kompleks karena melibatkan beberapa faktor seperti:

1. Operasional *policy*, pola kebijakan pengoperasian waduk.
2. Debit *inflow* yang akan masuk ke waduk yang tergantung dari ketepatan perencanaan debit yang akan masuk ke waduk tersebut.
3. Demand, kebutuhan air untuk irigasi, air baku, dan PLTA.
4. Keandalan peralatan monitoring tinggi muka waduk, debit aliran dan curah hujan.
5. Koordinasi antara instansi yang terkait.
6. Kemampuan Operasional.

Kebijakan pola pengoperasian waduk dapat dibedakan menjadi 5, yaitu:

1. *Standard Operating Policy (SOP)*

Kebijakan pola pengoperasian waduk berdasarkan SOP adalah dengan menentukan *outflow* terlebih dahulu berdasarkan ketersediaan air di waduk dikurangi kehilangan air. Sejauh mungkin *outflow* yang dihasilkan dapat memenuhi seluruh kebutuhan / *demand* dengan syarat air berada dalam zona kapasitas / tampungan efektif. Besarnya pelepasan dapat ditentukan sebagai berikut:

$$RL_t = I_t + S_{t-1} - E_t - S_{\text{maks}}, \text{ apabila } I_t + S_{t-1} - E_t - D_t > S_{\text{maks}}$$

$RL_t = I_t + S_{t-1} - E_t - S_{\min}$ , apabila  $I_t + S_{t-1} - E_t - D_t < S_{\min}$

$RL_t = D_t$ , apabila  $S_{\min} > I_t + S_{t-1} - E_t - D_t > S_{\max}$

## 2. Dinamik Program Deterministik Ataupun Implisit Stokastik

Asumsi bahwa semua parameter atau variabel yang terdapat dalam model program linier dapat diperkirakan dengan pasti (*non stochastic*), meskipun tidak dengan tepat. Pada model Deterministik, debit *inflow* pada masing-masing interfal waktu telah ditentukan. Secara sederhana, model ini menggunakan nilai harapan (*expected value*) dari sebuah variabel abstrak yang diskrit.

## 3. Dinamik Program Stokastik

Pada model Stokastik, debit *inflow* diperoleh dari suatu proses stokastik dari data-data yang ada dan cara pendekatannya adalah sebagai suatu proses Markov yang ditampilkan dengan sebuah matrik probabilitas transisi. Dapat disimpulkan bahwa, program dinamik stokastik menggunakan probabilitas *inflow* bersyarat yang diperoleh dari matrik probabilitas transisi dan nilai yang diharapkan yang diperoleh dari fungsi tujuan yang berulang perhitungannya (*recursive objective fuction*).

## 4. Program Linier

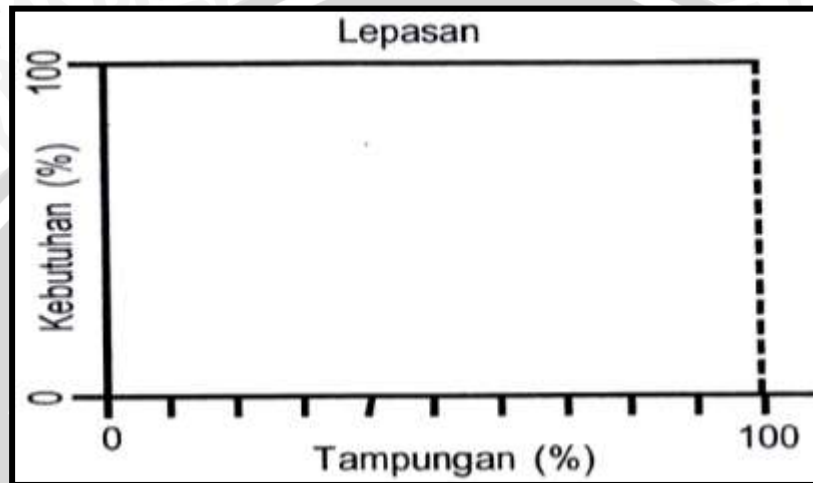
Program Linier banyak dipakai dalam program optimasi pendayagunaan sumber daya air, baik untuk permasalahan operasi dan pengelolaan yang sederhana sampai permasalahan yang kompleks. Teknik program linier dapat dipakai apabila terdapat hubungan linier antara variabel-variabel yang dioptimasi, baik dalam fungsi tujuan (*objective function*) maupun kendala (*constraint function*). Apabila permasalahan yang ditinjau bersifat non linier, seperti yang umum dijumpai dalam sumber daya air, maka hubungan antar variabel diubah menjadi bentuk linier atau persamaan-persamaan non linier pada fungsi sasaran dan kendala dipecah menjadi beberapa persaman linier dan diselesaikan dengan metode iterasi dan aproksimasi. Keunggulan program linier adalah kemudahannya untuk penyelesaian permasalahan optimasi berdimensi besar, sedangkan kelemahannya adalah kemungkinan terjadinya kesalahan dan kekeliruan dari program ini sangat besar karena pendekatan yang dilakukan melinierisasi fenomena non linier pada beberapa variabel tidak tepat. Oleh karena itu kendala program linier tergantung pada tingkat pendekatan dalam linierisasi hubungan antara variabel.

### 2.3.4. Lepasn Operasi Waduk

Aturan Lepasn Operasi Waduk merupakan pedoman dalam melepaskan jumlah air dari waduk untuk memenuhi berbagai kebutuhan sesuai dengan kondisi yang berlaku. Aturan Operasi Waduk yang paling sederhana adalah:

"Lepasn air sesuai dengan kebutuhan selama masih ada air yang tersedia di waduk".

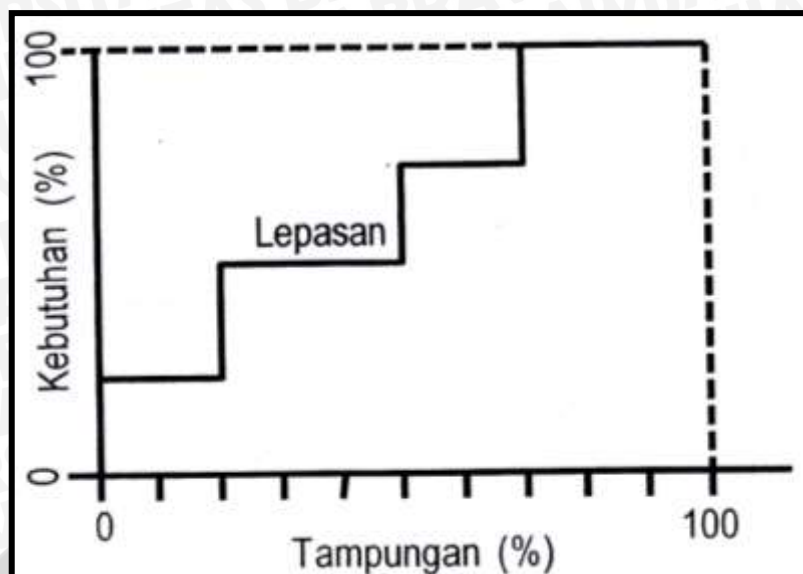
Dengan kata lain maka lepasn air waduk tidak tergantung pada berapa tampungan di waduk (volume air yang tersisa di waduk), seperti dinyatakan pada Gambar berikut.



**Gambar 2.4. Lepasn Tak Tergantung Tampungan**

Sumber: Soetopo W, 2010:13

Apabila tampungan waduk sudah mencapai nilai nol (waduk kosong) atau pada operasi minimum (MOL: *minimum operation level*) maka pemenuhan kebutuhan hanya tergantung pada besarnya debit *inflow* ke waduk. Lepasn tak tergantung tampungan dapat dilakukan untuk waduk dengan debit *inflow* yang relatif konstan besarnya. Untuk waduk dengan debit *inflow* yang mempunyai fluktuasi besar, maka akan lebih sesuai untuk menggunakan Aturan Operasi Waduk dengan Lepasn yang tergantung tampungan seperti dinyatakan pada Gambar berikut.



**Gambar 2.5. Lepasan Tergantung Tampungan**

Sumber: Soetopo W, 2010:14

Pada aturan lepasan yang tergantung tampungan tersebut maka besarnya lepasan diukur dengan prosentase pemenuhan kebutuhan (sumbu tegak) sementara besarnya tampungan diukur dengan prosentase tampungan waduk terhadap kapasitas tampungan aktif (sumbu mendatar). Seperti dapat dilihat pada kurva lepasan pada gambar di atas, maka besarnya lepasan akan semakin kecil apabila tampungan waduk semakin kecil pula dan sebaliknya.

Parameter yang digunakan dalam penerapan pedoman lepasan operasi waduk berdasarkan tampungan adalah sebagai berikut:

1. Tampungan Waduk (%)

Besarnya tampungan waduk diukur dengan prosentase tampungan terhadap kapasitas tampungan aktif.

2. Lepasan Kebutuhan (%)

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

Dalam penerapan lepasan berdasarkan tampungan adalah sebagai berikut:

1. Untuk operasi waduk aturan lepasan berdasarkan tampungan diterapkan pembatasan minimum tampungan waduk.

Tabel. 2.1. Lepasn Berdasarkan Tampungn

| No. Kisaran | Batas Minimum<br>Tampungn Waduk (%) | Lepasn (%) |
|-------------|-------------------------------------|------------|
| 1           | 0                                   | 10         |
| 2           | 20                                  | 40         |
| 3           | 40                                  | 75         |
| 4           | 60                                  | 90         |
| 5           | 80                                  | 100        |

Sumber: Soetopo W, 2010: 34

2. Untuk menentukan prosentase pemenuhan kebutuhan, lepasn (%) dapat diganti dengan cara coba-coba. Dalam proses penentuan lepasn dengan coba-coba untuk mempermudah perhitungan dibuat suatu formula dalam simulasi waduk. Berikut lepasn berdasarkan Tampungn:

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

Nilai lepasn dapat diganti (coba-coba) untuk kondisi tertentu dengan dasar dan pertimbangan sebagai berikut:

- Kondisi tampungn menurun, maka lepasn juga berkurang.
- Tujuan dari coba-coba lepasn ini adalah untuk mendapatkan kondisi optimal dari berbagai alternatif nilai lepasn yang telah dicoba dalam proses simulasi waduk yang akan dipakai sebagai lepasn(%) adalah nilai lepasn dengan hasil limpahan (spillout) paling kecil.

3. Untuk operasi waduk aturan lepasn berdasarkan tampungn pemenuhan tampungn tidak selalu 100%.

Dengan cara diatas setelah dilakukan beberapa alternatif nilai lepasn (%) maka didapatkan nilai yang optimal.

## 2.4. Operasi Waduk Yang Optimal

Pengertian optimasi berhubungan erat dengan maksimasi tetapi dengan batasan (*constraint*). Mengoptimumkan identik dengan sumberdaya terbatas. Untuk mengambil manfaat yang sebesar-besarnya, maka waduk harus dioperasikan secara optimal. Sudah sejak lama *Rule Curve* merupakan alat yang diperlukan dalam pengoperasian waduk. *Rule*

*Curve* yang dihasilkan oleh suatu studi optimasi diasumsikan merupakan panduan operasi waduk yang optimal. Pihak operator waduk diharapkan untuk mengikuti *Rule Curve* ini sedekat mungkin, sementara mencoba untuk memenuhi berbagai kebutuhan di wilayah hilir dari waduk. 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. Operasi waduk yang demikian membutuhkan operator yang berpengalaman dengan memiliki pertimbangan yang baik. Jelasnya bahwa operasi waduk yang bersifat deterministik semacam itu menjadi tidak fleksibel apabila menghadapi situasi-situasi tak terduga. Situasi-situasi tak terduga semacam ini terutama bersumber dari sifat fluktuatif seri debit *inflow*.

Operasi waduk yang optimal adalah merupakan hasil daripada suatu studi optimasi yang kompleks. Secara umum maka tujuan daripada optimasi operasi waduk adalah untuk mencapai salah satu dari yang berikut ini:

- a. Memaksimumkan keuntungan daripada salah satu tujuan waduk sementara memenuhi batas persyaratan-persyaratan tertentu untuk masing-masing dari tujuan-tujuan yang lain.
- b. Memaksimumkan total keuntungan daripada semua tujuan-tujuan waduk yang bersangkutan, sementara memenuhi batas persyaratan-persyaratan tertentu untuk masing-masing dari semua tujuan-tujuan.
- c. Meminimumkan kerugian daripada salah satu tujuan waduk sementara memenuhi persyaratan-persyaratan tertentu untuk masing-masing dari tujuan-tujuan yang lain.
- d. Meminimumkan total kerugian daripada semua tujuan-tujuan waduk yang bersangkutan, sementara memenuhi batas persyaratan-persyaratan tertentu untuk masing-masing dari semua tujuan-tujuan. (Soetopo W, 2010: 15)

## 2.5. Optimasi Operasi Waduk

Operasi waduk tunggal mempunyai sifat yang kompleks, apabila kalau menyangkut suatu sistem waduk-waduk. Hal ini dikarenakan baik aliran debit *inflow* kewaduk maupun kebutuhan yang harus dilayani oleh waduk, keduanya merupakan runtun waktu yang bersifat probabilistik. Salah satu cara untuk melakukan analisa pengoperasian waduk adalah dengan metode optimasi.

Secara definitif model optimasi memang ditunjukkan untuk mencapai penyelesaian yang optimal secara global. Model-model optimasi digunakan untuk lebih memfokuskan pencaharian terhadap kombinasi-kombinasi yang bagus dari variabel-variabel keputusan (Nandalal & Bogardi, 2007). Secara sistematis cara optimasi akan menuju ke arah penyelesaian optimal secara global. Akan tetapi model-model optimasi dalam lingkup sumberdaya air dibentuk hampir selalu berdasarkan model-model yang sangat sederhana daripada sistem sumberdaya air.

Model optimasi operasi waduk dapat berupa Program Linier (*linear programming*) dan Program Dinamik (*dynamic programming*). Apabila menyangkut hanya hubungan-hubungan yang bersifat linier, seperti alokasi air irigasi secara spasial, maka dapat digunakan model optimasi Program Linier. Tetapi apabila sudah menyertakan hubungan-hubungan yang nonlinier, seperti alokasi air irigasi secara temporal (skedul pemberian air irigasi), dan alokasi air untuk P.L.T.A, maka dapat digunakan model optimasi Program Dinamik.

Pada tahap perencanaan dan perancangan, dapat digunakan model optimasi deterministik (baik linier maupun dinamik). Hal ini disebabkan oleh karena pada tahap ini masih digunakannya nilai-nilai agregat (*aggregate*). Tetapi memasuki tahap operasional, dimana sudah digunakan nilai-nilai riil (termasuk aliran debit *inflow* dan kebutuhan), maka harus digunakan model optimasi stokastik (baik linier maupun dinamik). Model-model optimasi stokastik ini, yang jelas lebih kompleks apabila dibandingkan dengan model-model optimasi deterministik, akan memberikan hasil yang lebih fleksibel dalam menangani kondisi debit *inflow* dan kebutuhan yang bersifat probabilistik. (Soetopo W, 2010:20)

## **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

Jadi 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-variabel bebas dari keseragaman 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 Model Stokastik

| Model Deterministik                               | Model Stokastik                                  |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 1. Tidak tergantung 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. Arti dan Lingkup Simulasi Stokastik

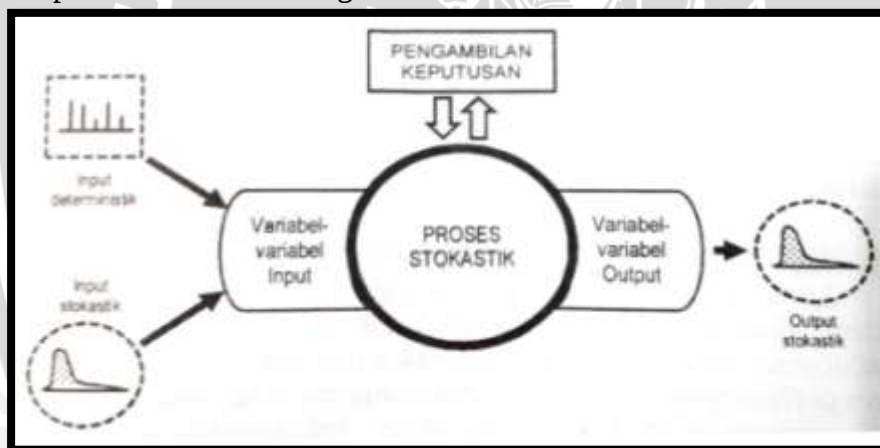
Sebagian besar dari sistem-sistem itu bersifat probabilistik (Watson & Blackstone, 1989). Model-model simulasi untuk sistem-sistem yang bersifat probabilistik adalah model-model simulasi stokastik. Jika suatu sistem mendapat masukan berupa kajian-kajian input yang acak, atau membangkitkannya secara internal, maka model tersebut dikatakan sebagai stokastik, paling tidak secara parsial (Loucksdkk, 1981). Seperti halnya dengan model-model optimasi, maka model-model simulasi dapat bersifat deterministik maupun stokastik, yang tergantung dari pada situasi yang dihadapi. Jadi dalam kondisi tertentu

modal semacam itu akan berlaku sebagai model deterministik, sementara dalam kondisi yang lain model akan berlaku sebagai model stokastik.

Simulasi bukanlah suatu prosedur optimasi (Loucksdkk, 1981), melainkan lebih condong merupakan prosedur yang cepat untuk mengevaluasi kinerja yang diharapkan dari suatu sistem. Algoritma Genetik (*Genetic Algorithm*) merupakan salah satu prosedur simulasi stokastik yang dapat digunakan untuk berbagai tujuan optimasi.

## 2.8. Model Stokastik

Model-model stokastik mempunyai output yang bersifat acak paling tidak secara parsial (May & Tung, 1992). Sementara input dari model-model stokastik dapat dianggap sebagai Proses Stokastik dengan lingkup yang lebih besar yang mengandung komponen pengambilan keputusan. Jadi proses didalam model itu sendiri adalah proses stokastik yang berinteraksi dengan komponen pengambilan keputusan. Secara umum maka model stokastik dapat diilustrasikan sebagai Gambar berikut ini.



**Gambar 2.6. Model Stokastik**

Sumber: Soetopo W, 2012:3

Jadi karena mengandung proses stokastik didalamnya, maka suatu model stokastik juga akan menghasilkan runtun waktu sebagai salah satu dari outputnya.

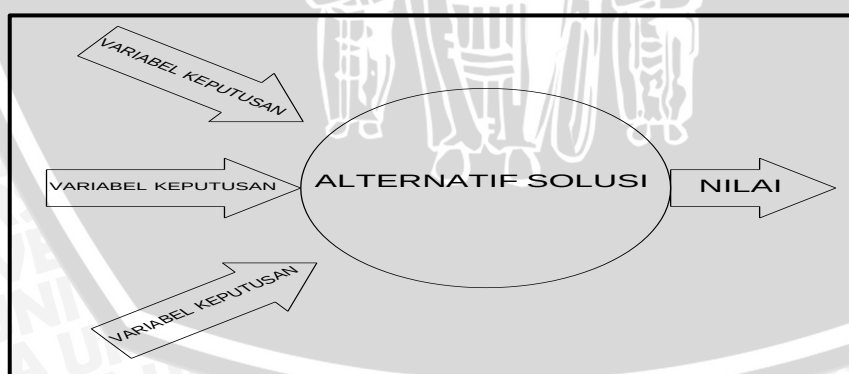
## 2.9. Kegunaan Simulasi Stokastik

Simulasi stokastik mempunyai kegunaan yang sangat luas. Hal ini disebabkan oleh karena model simulasi stokastik mempunyai kemampuan untuk menirukan sistem riil secara realistis. Apabila dengan pesatnya perkembangan dari perangkat komputer yang sangat mendukung kemampuan dari pada model-model simulasi stokastik ini. Khususnya dalam sistem sumberdaya air, simulasi stokastik mempunyai berbagai kegunaan sebagai berikut:

- Menentukan tingkat keandalan sistem SDA. Misalnya nilai tingkat keandalan dari suatu aturan operasi waduk dapat dihitung berdasarkan runtun waktu yang dihasilkan oleh model simulasi stokastik.
- Melakukan analisa resiko. Misalnya nilai resiko daripada suatu proyek pengendali banjir dapat dihitung berdasarkan runtun waktu yang dihasilkan oleh model simulasi stokastik.
- Membangkitkan seri sintesis. Runtun waktu sintesis yang dihasilkan oleh model-model simulasi stokastik dapat berupa nilai-nilai hujan ataupun debit, berdasarkan dari runtun yang berasal dari data tercatat ataupun runtun waktu keluaran dari model-model simulasi deterministik. Nilai-nilai data sintesis ini selanjutnya dapat digunakan sebagai input pada model-model evaluasi sistem SDA.
- Melakukan optimasi. Dalam hal ini maka solusi yang dihasilkan akan cenderung merupakan solusi yang mendekati optimal (*near-optimal*), yang dalam kebanyakan kasus sudah cukup memuaskan. Apalagi jika model-model optimasi analitik seperti Program Linier atau Program Dinamik ternyata tidak mungkin untuk diterapkan.

## 2.10. 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 2.11. berikut ini:



**Gambar 2.7. 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).

## 2.11. Optimasi dengan Algoritma Genetik (AG)

Algoritma Genetik adalah salah satu metode dari kelompok simulasi untuk optimasi. Prosedur jenis ini cenderung 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.

### 2.11.1. Model Optimasi Algoritma Genetik

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 2.8. 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 homogen 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.

$$V_i = V_{1i} \bullet U[0,1] + V_{2i} \bullet (1-U[0,1]) \quad (2-19)$$

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).

## 2.12. 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 komputer. Hal ini terkait dengan keharusan untuk membangkitkan

seri bilangan acak dalam proses Simulasi Stokastik. Perangkat komputer 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 2007 (atau disingkat MS-Excel 2007 atau MS. Excel saja).

Program MS Excel 2007 adalah program spreadsheet yang terdiri dari lembar-lembar worksheet 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 lembar-lembar *worksheet*. Prosedur makro 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 kontrol jalannya program di prosedur-prosedur makro.

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 makro maka fungsi bilangan acak adalah Rnd().

Mengenai fungsi mana yang akan digunakan tergantung dari situasi masalah yang dihadapi. (Soetopo W, 2012:5)