

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Karakteristik Waduk

2.1.1. Umum

Waduk adalah tampungan untuk menyimpan air pada waktu kelebihan agar dapat dipakai pada waktu yang diperlukan (Soedibyo,1993). Air yang ditampung itu dapat dipergunakan dan dimanfaatkan untuk berbagai keperluan dan kebutuhan makhluk hidup. Berdasarkan tujuan penggunaannya, waduk dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

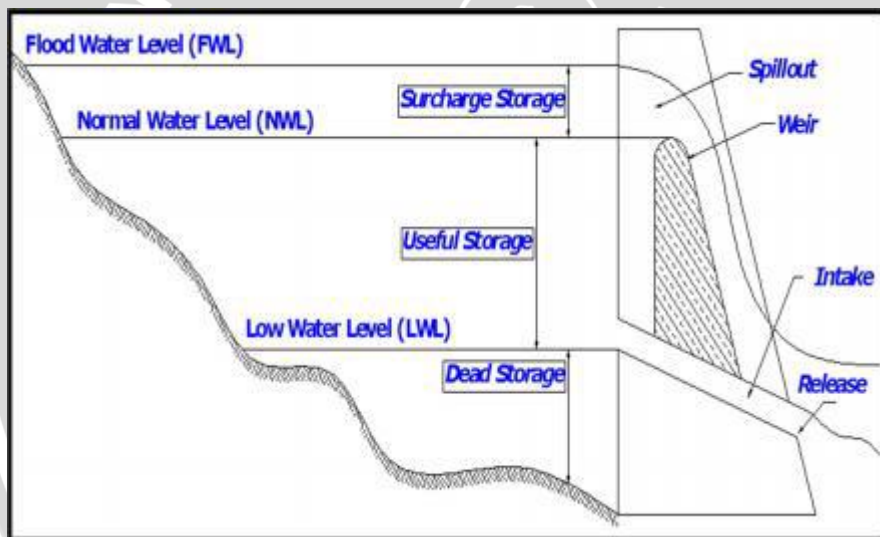
- a. Waduk dengan tujuan tunggal (*single purpose reservoir*) adalah waduk yang dibangun untuk memenuhi satu tujuan saja, misalnya untuk pembangkit tenaga listrik, irigasi, pengendali banjir atau tujuan lainnya tetapi hanya untuk satu tujuan saja.
- b. Waduk serbaguna (*multipurpose reservoir*) adalah waduk yang dibangun untuk memenuhi beberapa tujuan, misalnya: pembangkit tenaga listrik (PLTA) dan irigasi, pengendali banjir dan PLTA, air minum dan irigasi, air baku, PLTA dan irigasi dan lain sebagainya.

2.1.2. Tampungan-Tampungan Dalam Waduk

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

1. Tampungan berguna (*usefull storage*), menurut Seyhan (Seyhan, 1979:24), adalah volume tampungan diantara permukaan genangan minimum (*Low Water Level = LWL*) dan permukaan genangan normal (*Normal Water Level = NWL*).
2. Tampungan tambahan (*surcharge storage*) adalah volume air diatas genangan normal selama banjir. Untuk beberapa saat debit meluap melalui pelimpah. Kapasitas tambahan ini biasanya tidak terkendali, dengan pengertian adanya hanya pada waktu banjir dan tidak dapat dipertahankan untuk penggunaan selanjutnya (Linsey, 1985).
3. Tampungan mati (*dead storage*) adalah volume air yang terletak dibawah permukaan genangan minimum, dan air ini tidak dimanfaatkan dalam pengoperasian waduk.
4. Tampungan tebing (*valley storage*) adalah banyaknya air yang terkandung di dalam susunan tanah *pervious* dari tebing dan lembah sungai. Kandungan air tersebut tergantung dari keadaan geologi tanah.

5. Permukaan genangan normal (*normal water level/NWL*), adalah elevasi maksimum yang dicapai oleh permukaan air waduk.
6. Permukaan genangan minimum (*low water level/LWL*), adalah elevasi terendah bila tampungan dilepaskan pada kondisi normal, permukaan ini dapat ditentukan oleh elevasi dari bangunan pelepasan yang terendah.
7. Permukaan genangan pada banjir rencana adalah elevasi air selama banjir maksimum direncanakan terjadi (*flood water level/FWL*).
8. Pelepasan (*release*), adalah volume air yang dilepaskan secara terkendali dari suatu waduk selama kurun waktu tertentu.
9. Periode kritis (*critical periode*), 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.



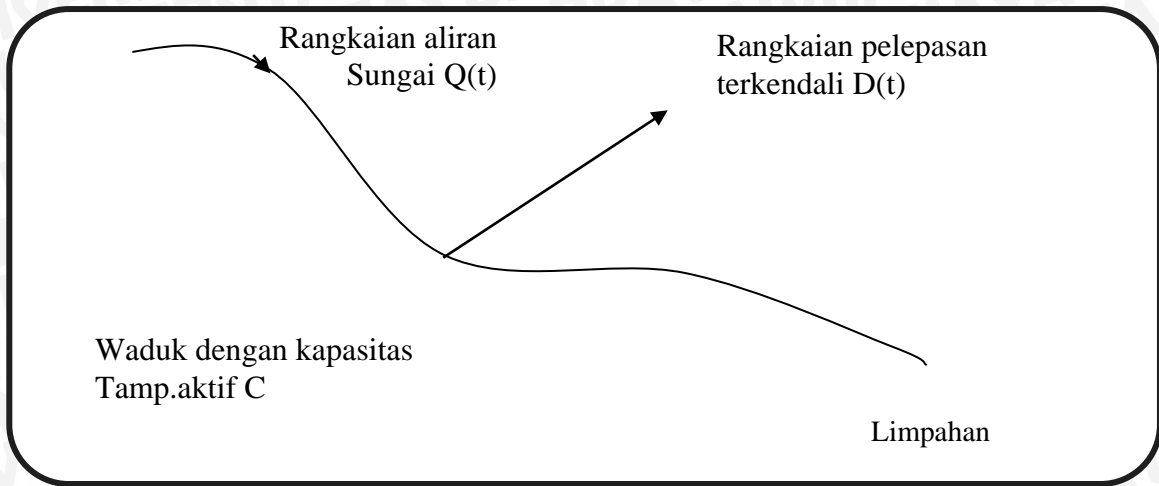
Gambar 2.1 Zona-Zona Tampungan Waduk
Sumber: Sudjarwadi, 1988

2.1.3. Unsur-Unsur Kapasitas Waduk

Tampungan yang dibutuhkan di suatu sungai untuk memenuhi permintaan tertentu bergantung pada tiga faktor (Mc.Mahon, 1976) , yaitu:

1. Unsur-unsur aliran sungai
2. Ukuran permintaan
3. Tingkat keandalan dari pemenuhan permintaan

Dalam bentuknya yang paling sederhana, masalah yang ditangani dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.2. Idealisasi Masalah Kapasitas Kemampuan Waduk
 Sumber: Soedibyo, 2003

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 (Soedibyo, 2003).

2.2. 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.

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

$$H = Ch.S^{0.5} \tag{2.1}$$

dengan:

- A = luas muka air waduk (Km²)
- 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

2.3. Inflow Tampungan Waduk

2.3.1. Umum

Rangkaian air yang memberikan kontribusi sebagai debit *inflow* sungai antara lain adalah berasal dari presipitasi (atau saluran) langsung, debit air tanah, dan termasuk juga limpasan permukaan dan limpasan bawah permukaan.

Faktor-faktor yang mempengaruhi volume total limpasan:

1. Faktor-faktor iklim:
 - a. Banyaknya presepitasi.
 - b. Banyaknya evapotranspirasi.
2. Faktor-faktor DAS:
 - a. Ukuran daerah aliran sungai.
 - b. Tinggi tempat rata-rata daerah aliran sungai (pengaruh orografis).

Faktor-faktor yang mempengaruhi aliran waktu limpasan:

1. Faktor-faktor meteorologis:
 - a. Presipitasi.
 - b. Intensitas curah hujan.
 - c. Lamanya curah hujan.
 - d. Distribusi curah hujan dalam daerah pengaliran.
 - e. Arah pergerakan curah hujan.
 - f. Curah hujan terdahulu dan kelembaban tanah.
 - g. Kondisi-kondisi meteorologi yang lain.

2. Faktor-faktor daerah aliran sungai:
 - a. Topografi.
 - b. Geologi.
 - c. Tipe tanah.
 - d. Vegetasi.
 - e. Jaringan drainasi.
3. Faktor-faktor manusiawi:
 - a. Struktur hidrolik.
 - b. Teknik-teknik pertanian.
 - c. Urbanisasi.

2.3.2. Macam Limpasan

2.3.2.1. Limpasan Permukaan

Limpasan permukaan merupakan limpasan air yang mengalir di atas permukaan tanah. Limpasan permukaan berasal dari air hujan yang terus mengalir karena tidak ada tanaman yang menghambatnya. Limpasan permukaan disebut juga *run off*.

2.3.2.2. Limpasan Bawah Permukaan

Limpasan air yang selalu mengalir di bawah permukaan tanah, dan pada waktu meninggalkan daerah pengaliran pada pelepasannya berupa aliran permukaan.

2.3.3. Debit Andalan

Debit andalan diartikan sebagai debit yang tersedia sepanjang tahun untuk keperluan tertentu (seperti irigasi, PLTA, air minum dan lain-lain) sepanjang tahun, dengan resiko kegagalan yang telah diperhitungkan.

Menurut pengamatan, besarnya andalan yang diambil untuk mengoptimalkan penggunaan air dibeberapa macam proyek adalah sebagai berikut (CD.Soemarto,1986:214)

Tabel 2.1 Besarnya Andalan Untuk Berbagai Kegunaan

Kegunaan	Keandalan
1. Penyediaan air minum	99 %
2. Penyediaan air industri	95 – 98 %
3. Penyediaan air irigasi untuk	
- Daerah iklim setengah lembab	75 – 85 %
- Daerah iklim kering	80 – 95 %
4. Pembangkit listrik tenaga air (PLTA)	85 – 90 %

Sumber : C.D. Soemarto (1986:214)

Ada berbagai cara untuk menentukan debit andalan, masing-masing cara mempunyai ciri 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 berikut:

a. Metode Karakteristik aliran (*flow characteristic*)

Perhitungan debit andalan dengan metode ini antara lain memakai data yang didapatkan berdasar karakteristik alirannya.

Metode ini umumnya 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 tahunannya sama dengan atau mendekati debit rata-rata dari tahun ke tahun.
2. Tahun kering, jika debit rata-rata tahunannya di bawah debit rata-rata dari tahun ketahun.
3. Tahun basah, jika debit rata-rata tahunannya diatas debit rata-rata dari tahun ketahun.

b. Metode tahun penentu (*basic year*).

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

c. Metode bulan penentu.

Metode ini seperti pada karakteristik aliran tetapi hanya dipilih bulan tertentu sebagai dasar perencanaan.

d. Metode Q rata-rata minimum.

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

1. DPS dengan fluktuasi debit maksimum dan minimum tidak terlalu besar dari tahun ke tahun.
2. Kebutuhan relatif konstan sepanjang tahun.

Menurut Suyono Sosrodarsono (1980:204), terminologi debit dinyatakan sebagai berikut:

- a) Debit air cukup (*affluent*), yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 95 hari dalam setahun (peluang keandalan 26,02%).
- b) Debit air normal, yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 185 hari dalam setahun (peluang keandalan 50,68%).
- c) Debit air rendah, yaitu debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 275 hari dalam setahun (peluang keandalan 75,34%).

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

2.4. Pembangkitan Data *Inflow*

Terdapat tiga model yang digunakan dalam perhitungan-perhitungan hidrologi yaitu model deterministik, model probabilistik, model stokastik. Model stokastik mampu mengisi kekosongan di antara kedua model tersebut, yaitu mempertahankan sifat-sifat peluang yang berhubungan dengan runtun waktu kejadiannya. Termasuk dalam model stokastik adalah proses perpanjangan runtun data.

Sedangkan dasar-dasar teknik pembangkitan data dapat dijelaskan seperti berikut, dasar proses perpanjangan runtun data (*generated*) adalah bahwa prosesnya tidak berubah, dalam arti sifat-sifat statistik proses terhadap runtun data historis tidak berubah terhadap waktu sehingga sifat-sifat kejadian sesungguhnya dapat dipakai untuk membuat runtun data sintetis yang panjang. Kegunaan pembangkitan data debit sungai adalah:

- a. Untuk memenuhi kebutuhan tampungan waduk dengan data sintetis.
- b. Untuk membantu perancangan waduk akibat data kurang panjang.
- c. Untuk simulasi pengoperasian waduk.

Pembangkitan data dalam hal ini memerlukan proses dimana kekuatan-kekuatan yang saling bersangkutan dan menimbulkan pengaruh bertindak menghasilkan suatu rangkaian waktu (*time series*). Proses terbaik adalah yang sesuai dengan karakteristik fisik dari rangkaian waktu tersebut. Sedangkan dari segi pandang stokastik, aliran sungai bisa dipandang dari empat komponen yaitu:

- a. Komponen kecenderungan (T_t).
- b. Komponen periodik atau musiman (St).
- c. Komponen korelasi (Kt).
- d. Komponen acak (t).

Yang dapat dikombinasikan secara sederhana sebagai berikut :

$$X_t = T_t + St + Kt + \epsilon t \quad (2.3)$$

Konsep dari metode stokastik adalah pembangkitan data dengan cara mempertahankan karakteristik data debit historis, melalui parameter rerata data, standar deviasi dan koefisien korelasi antar waktu.

2.4.1. Bilangan Random

Data debit historis dan sintetik memiliki urutan terjadi berdasarkan proses acak, serta terletak dalam interval waktu tertentu. Urutan nilai ini sering disebut rangkaian waktu (*time series*). Secara umum nilai ke- i dari variabel X yang merupakan anggota dari suatu rangkaian waktu adalah jumlah dari 2 komponen.

$$X_i = d_i + e_i \quad (2.4)$$

Dimana komponen deterministik diperoleh dari nilai parameter-parameternya dan nilai sebelumnya dari proses, seperti X_{i+1} , X_{i+2} dan seterusnya. Komponen bilangan acak *uniform* dengan cara sebagai berikut :

$$t_1 = (u_1 + u_2 + u_3 + \dots + u_{12}) - 6 : \text{dst} \quad (2.5)$$

dengan:

t_1 dan t_2 = bilangan acak normal.

u_1, u_2, u_3 = bilangan acak *uniform*.

Metode lain untuk memperoleh bilangan acak normal dengan persamaan *Box Muller*, yaitu :

$$t_1 = (-2 \ln u_1)^{1/2} \cdot \cos (2 \cdot u_2) \quad (2.6)$$

$$t_2 = (-2 \ln u_1)^{1/2} \cdot \sin (2 \cdot u_2) \quad (2.7)$$

dengan :

t_1 dan t_2 = bilangan acak normal.

u_1, u_2, u_3 = bilangan acak *uniform*.

2.4.2. Uji Stasioner Data

Uji stasioner dilakukan untuk menguji kestabilan nilai varian dan rata-rata dari deret berkala. Pengujian nilai varian berkala dapat dilakukan dengan uji F. Apabila hasil pengujian menunjukkan hipotesa nol ditolak, berarti nilai varian data tersebut tidak homogen. Deret berkala yang tidak homogen berarti deret berkala tersebut tidak stasioner dan tidak perlu dilakukan pengujian lanjutan. Namun apabila nilai varian tersebut stasioner, maka pengujian selanjutnya adalah menguji kestabilan nilai rata-ratanya dengan uji T. Dengan memperhatikan hasil Uji F dan Uji T maka suatu data dapat digolongkan dalam keadaan stasioner.

2.4.2.1. Uji F

Uji analisis pada dasarnya adalah menghitung *F score*, lalu membandingkan dengan *F* tabel. Yang diuji adalah ketidak tergantungan (*independence*) atau keseragaman (*homogenitas*). Uji analisis variansi dapat bersifat satu arah atau dua arah.

Prinsip uji hipotesis ini adalah membandingkan variansi gabungan antara kelompok sampel (*variance between group*) dengan varian kombinasi seluruh kelompok.

$$F \text{ hitung} = \frac{S1^2}{S2^2}, (S1^2 > S2^2) \quad (2.8)$$

$$F \text{ hitung} = \frac{S2^2}{S1^2}, (S1^2 < S2^2) \quad (2.9)$$

dengan:

$$S1^2 = \text{variansi sampel 1 (debit historis)} = \frac{n_1 Sd_1^2}{n_1 - 1}$$

$$S2^2 = \text{variansi sampel 2 (debit sintetis)} = \frac{n_2 Sd_2^2}{n_2 - 1}$$

Harga *F* kritis = (α, n_1-1, n_2-1)

dengan:

n_1 = jumlah sampel 1 (debit historis).

n_2 = jumlah sampel 2 (debit sintetis).

H_0 diterima jika harga *F* hitung < *F* kritis.

H_0 ditolak jika harga *F* hitung > *F* kritis.

Untuk pengaman selanjutnya akan digunakan uji *F* dengan analisa variansi yang bersifat dua arah, dengan hipotesa sebagai berikut:

Hipotesa 1 : H_0 = hujan homogen dari bulan ke bulan.

H_1 = hujan tidak homogen dari bulan ke bulan.

Hipotesa 2 : H_0 = hujan homogen dari tahun ke tahun.

H_1 = hujan tidak homogen dari tahun ke tahun.

Ada dua *F score* dihitung dengan rumus-rumus berikut:

$$F_1 = \frac{(n-1) \sum_{i=1}^k n (\bar{x}_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i - \bar{x}_j + \bar{x})^2} \quad (2.10)$$

$$F_2 = \frac{(k-1) \sum_{i=1}^k k (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i - \bar{x}_j + \bar{x})^2} \quad (2.11)$$

dengan:

- X_i = harga rata-rata untuk bulan i .
- X_j = harga rata-rata untuk bulan j .
- X = harga rata-rata untuk keseluruhan.
- X_{ij} = pengamatan untuk bulan i pada tahun j .
- n = banyak pengamatan perbulan (tahun).
- k = banyak bulan.

2.4.2.2. Uji T

Uji T termasuk jenis uji untuk sampel kecil. Sampel kecil adalah dimana ukuran sampel $n < 30$. Untuk mengetahui apakah 2 sampel x_1 dan x_2 berasal dari populasi yang sama, maka dihitung t score dengan rumus:

$$t = \frac{[x_1 - x_2]}{\sigma \cdot \sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}} \quad (2.12)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(N_1 - 1) \cdot s_1^2 + (N_2 - 1) \cdot s_2^2}{N_1 + N_2 - 2}} \quad (2.13)$$

- dengan :
- \bar{x}_1 = rerata dari sampel x_1
 - \bar{x}_2 = rerata dari sampel x_2
 - s_1 = simpangan baku dari sampel x_1
 - s_2 = simpangan baku dari sampel x_2
 - N_1 = ukuran dari sampel x_1
 - N_2 = ukuran dari sampel x_2

Hipotesa :

H_0 : sampel x_1 dan x_2 berasal dari populasi yang sama

H_1 : sampel x_1 dan x_2 tidak berasal dari populasi yang sama

Harga t tabel dicari pada tabel *distribusi student's t* untuk derajat bebas $\nu = N_1 + N_2 - 2$ dan α = (Level of Significance) misal 5%.

Apabila t score $<$ t tabel, maka H_0 diterima, dan jika sebaliknya maka H_0 ditolak.

2.5. Simulasi Pola Operasi Waduk

Cara lain untuk melakukan analisa pengoperasian waduk adalah dengan model simulasi. Simulasi operasi waduk selain dapat digunakan untuk tujuan optimasi, juga berguna apabila ingin diketahui karakteristik-karakteristik dari pengoperasian waduk. Oleh karenanya model-model simulasi dapat dibentuk berdasarkan model-model sistem sumber daya air baik yang sederhana maupun yang mempunyai kompleksitas yang tinggi. (Soetopo, 2010:21)

2.5.1. Simulasi Kapasitas Tampungan Waduk

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.

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

$$St + 1 = St + Qt - Dt - Et - Lt \quad (2.14)$$

Dengan kendala $0 \leq St + 1 \leq C$

dengan:

t = interval waktu yang digunakan.

St = tampungan waduk pada awal interval waktu.

$St+1$ = tampungan waktu pada akhir interval waktu

Qt = aliran masuk selama interval waktu t .

Dt = lepasan air selama interval waktu t .

Et = evaporasi selama interval waktu t .

Lt = 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 100%.

2.5.2. Simulasi Luas Lahan yang Dapat Diairi

Simulasi luas lahan yang dapat diairi diizinkan dengan peluang kegagalan maksimum sebesar 20%, untuk pemenuhan seluruh kebutuhan air dari kapasitas tampungan yang ada.

Dengan mempertimbangkan luas genangan waduk yang bervariasi terhadap waktu, maka lebih lanjut persamaan ditulis sebagai berikut (Sudjarwadi, 1990):

$$St + 1 = St + Qt + Rt(A) - Ot - Et - Pt - SPt(A) \quad (2.15)$$

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 .

$S_{Pt}(A)$ = rembesan keluar dari waduk selama interval waktu, sebagai fungsi luas permukaan air waduk mempunyai harga yang kecil dan dapat diabaikan.

2.6. Outflow Tampungan Waduk

2.6.1. Outflow Melalui Pelimpah

Bendung pelimpah (*over flow weir*) merupakan salah satu komponen dalam saluran pengatur aliran dibuat untuk lebih meningkatkan pengaturan serta memperbesar debit air yang akan melintasi bangunan pelimpah. (Sosrodarsono 2002 : 181)

Dimensi dari bendung pelimpah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan hidrolika sebagai berikut:

$$Q = C.L.H^{\frac{3}{2}} \quad (2.16)$$

dengan:

Q = Debit (m^3/dt)

C = Koefisien limpahan

L = Lebar efektif mercu bendung (m)

H = Total tinggi tekanan air di atas mercu bendung (m)

Koefisien limpahan pada bendung tersebut biasanya berkisar antara angka 2,0 – 2,2 yang dipengaruhi oleh beberapa faktor sebagai berikut:

- Kedalaman air di dalam saluran pengarah aliran
- Kemiringan lereng udik bendung
- Tinggi air di atas mercu bendung
- Perbedaan antara tinggi air rencana pada saluran pengatur aliran yang bersangkutan

2.6.2. Kehilangan Air di Waduk Akibat Evaporasi

Evaporasi adalah proses perubahan fisik yang mengubah suatu cairan atau bahan padat menjadi gas melalui proses perpindahan panas. Besarnya harga evaporasi sangat

dipengaruhi oleh kondisi lingkungan yang terkadang tidak merata di seluruh daerah (Suyono, 1980:57).

Volume kehilangan air di waduk karena evaporasi dihitung dengan rumus:

$$V_{ew} = E_v(t) \times A(t) \times t \times 10 \quad (2.17)$$

dengan:

V_{ew} = volume evaporasi di waduk (m^3).

$E_v(t)$ = evaporasi rata-rata yang tercatat di alat ukur (mm/hari).

$A(t)$ = luas genangan waduk (km^2).

t = jumlah hari (hari).

Sedangkan kehilangan air di sungai karena evaporasi diperhitungkan dengan asumsi bahwa keliling basah pada penampang sungai dalam kondisi jenuh dan bersifat impermeabel. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$V_{es} = E_v(t) \times L(t) \times P \times t \quad (2.18)$$

dengan:

V_{es} = volume evaporasi di sungai (m^3).

$E_v(t)$ = evaporasi rata-rata yang tercatat di alat ukur (mm/hari).

$L(t)$ = lebar muka air sungai (m).

P = panjang alur sungai (km).

T = jumlah hari (hari).

2.6.2.1. Pengambilan Data Evaporasi di Waduk

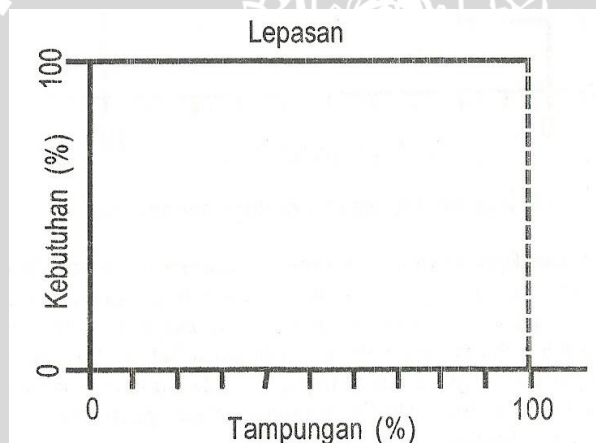
Relatif hanya sedikit waduk-waduk yang mempunyai perhitungan-perhitungan penguapan yang dapat diandalkan untuk bisa dijabarkan dari *budget* air secara kontinyu, tetapi nilai-nilai dari periode tertentu sering dapat mengecek atau mengkalibrasikan teknik-teknik lainnya. Bila kondisinya sedemikian rupa sehingga hasil-hasil yang memuaskan tidak diperoleh dengan menggunakan *budget* air, penguapan dari waduk yang ada dapat ditentukan baik dengan pendekatan aerodinamis empiris maupun *budget* energi. Kedua metode ini sebaiknya dipakai dalam jangka pendek, mengingat mahalnya biaya yang diperlukan.

Pengoperasian stasiun panci (di dekat waduk, tapi tak cukup dekat untuk terpengaruh secara materiil olehnya) untuk pengambilan data, relatif tidak mahal dan akan memberikan hasil-hasil evaporasi waduk yang sebenarnya. Beberapa reabilitas akan diperoleh jika *adveksi* waduk bersihnya dihitung, tetapi *item* ini jarang sangat penting kecuali evaporasi musiman atau bulanan dari penguapan tahunannya diperlukan.

Untuk studi-studi desain waduk, semua data yang berhubungan bagi daerah tersebut harus dianalisa dengan menggunakan semua teknik untuk mana datanya cocok bila aspek-aspek ekonomi perencanaan sangat memungkinkan, jarang terdapat alasan-alasan yang dapat dibenarkan untuk membangun waduk yang besar sebelum diperoleh pengumpulan data yang sekurang-kurangnya 1 atau 2 tahun dari panci dan data meteorologi yang berhubungan dengan lokasi proyek.

2.7. Aturan Operasi Waduk

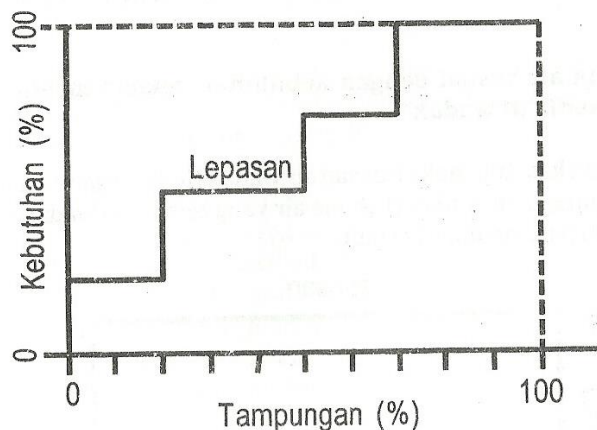
Aturan operasi waduk merupakan pedoman dalam melepaskan jumlah air dari waduk untuk memenuhi berbagai kebutuhan sesuai dengan kondisi yang berlaku. Aturan operasi waduk yang paling sederhana adalah “Lepasan air sesuai dengan kebutuhan selama masih ada air yang tersedia di waduk”. Dengan kata lain maka lepasan air waduk tidak tergantung pada berapa tampungan di waduk (volume air yang tersisa di waduk), seperti dinyatakan pada gambar berikut. (Soetopo, 2010:13)



Gambar 2.3 Lepasan tak tergantung tampungan

Sumber: Soetopo, 2010:13

Apabila tampungan waduk sudah mencapai nilai nol (waduk kosong), maka pemenuhan kebutuhan hanya tergantung pada besarnya debit inflow ke waduk. Lepasan tak tergantung tampungan dapat dilakukan untuk waduk dengan debit outflow yang relatif konstan besarnya. Untuk waduk dengan debit inflow yang mempunyai fluktuasi besar, maka akan lebih sesuai untuk menggunakan aturan operasi waduk dengan lepasan yang tergantung tampungan seperti dinyatakan pada gambar berikut (Soetopo, 2010:14):



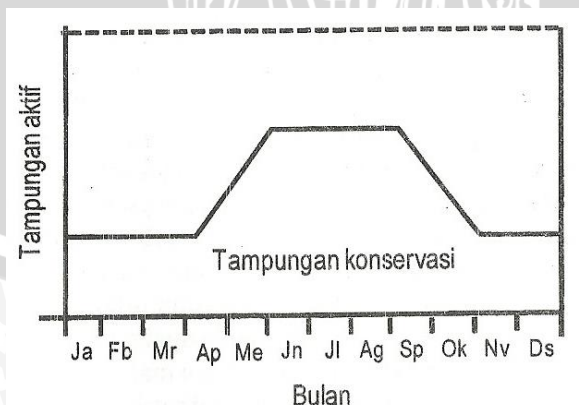
Gambar 2.4 Lepasan tergantung tampungan

Sumber: Soetopo, 2010:14

Pada aturan lepasan yang tergantung pada 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 gambar kurva lepasan diatas, maka besarnya lepasan akan semakin kecil apabila tampungan waduk semakin kecil pula dan sebaliknya.

2.8. Rule Curve

Untuk waduk musiman (*seasonal reservoir*), maka *rule curve* adalah pedoman praktis untuk melaksanakan operasi waduk. *Rule curve* adalah aturan operasi yang menyatakan nilai-nilai tampungan yang ideal dan menyediakan suatu mekanisme bagi aturan lepasan yang dispesifikasikan sebagai suatu fungsi tampungan (Soetopo, 2010:15).



Gambar 2.5 Contoh Rule Curve

Sumber: Soetopo, 2010:15

Pada contoh tersebut, *rule curve* menyatakan batas atas daripada tampungan konservasi. Dapat dilihat bahwa contoh *rule curve* tersebut berfluktuasi secara musiman



(bulanan). *Rule curve* semacam ini dapat digunakan pada operasi waduk dengan tujuan pasokan untuk irigasi dan air baku.

2.9. Model Optimasi

Air merupakan kebutuhan pokok bagi makhluk hidup di bumi ini. Seiring dengan semakin meningkatnya keadaan sosial ekonomi masyarakat maka kebutuhan air semakin beragam jenisnya, juga jumlahnya semakin meningkat, disamping tuntutan ketersediaannya pada waktu dan tempat yang berbeda-beda pula. Sehingga dirasa perlu untuk mengelola sumber daya air yang ada dalam suatu sistem sumber daya air (*Water Resources System*) sedemikian sehingga diperoleh hasil yang optimal untuk tujuan tertentu dengan memanfaatkan sumber-sumber yang terbatas. Dalam hal ini kita harus merumuskan masalahnya dalam bentuk model optimasi sistem sumber daya air untuk kemudian diselesaikan dengan menggunakan metode-metode optimasi yang tersedia.

Yang dimaksud model optimasi adalah penyusunan suatu model sistem yang sesuai dengan keadaan nyata yang nantinya dapat diubah ke dalam model matematis dengan pemisahan elemen-elemen pokok agar suatu penyelesaian yang sesuai dengan sasaran atau tujuan pengambilan keputusan dapat tercapai. Hal ini melibatkan pandangan pada masalah dalam tautan keseluruhan sistem.

2.9.1. Operasi Waduk yang Optimal

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 optimal merupakan hasil daripada suatu studi optimasi yang kompleks. Secara umum maka tujuan dari optimasi pola operasi waduk adalah untuk salah satu pencapaian sebagai berikut (Soetopo, 2010:15) :

- a. Memaksimumkan keuntungan dari salah satu tujuan waduk
- b. Memaksimumkan total keuntungan dari semua tujuan waduk yang bersangkutan

- c. Meminimumkan kerugian dari salah satu tujuan waduk
- d. Meminimumkan total kekerugian dari semua tujuan waduk

2.9.2. Model stokastik

Pada ilmu pengetahuan stokastik, kata stokastik memang sinonim dengan acak (random), namun dalam hidrologi kata itu dipakai secara khusus yang menunjuk pada suatu rangkaian waktu dimana didalamnya hanya sebagian saja yang bersifat acak (Mays & Tung, 1992). Dalam hidrologi stokastik urutan waktu itu mutlak penting. Penyajian stokastik mempertahankan sifat-sifat peluang yang berhubungan dengan urutan kejadiannya. Setiap urutan masukan menghasilkan urutan keluaran dari sistem yang dipelajari.

Ada tiga jenis model sokastik yang masing-masing memasukkan variabilitas hidrologi dan ketidakpastian (Loucks, Stedinger dan Haith, 1981:321). Yang termasuk dalam model tersebut yaitu:

- a. Model yang mendefinisikan sejumlah kemungkinan diskrit dari debit aliran sungai dan volume tampungan, masing-masing dengan probabilitasnya.
- b. Model yang mengidentifikasi produksi air tetap tahunan, distribusinya dalam setahun dan keandalannya.
- c. Model *chance-constrained* yang mempunyai aturan-aturan yang menyatakan volume tampungan waduk yang tidak diketahui dan distribusi probabilitas lepasan sebagai fungsi linier daripada debit aliran sungai yang unregulated.

Berdasarkan uraian diatas dalam model stokastik, benar-benar diperhitungkan faktor ketidakpastian (*uncertainty*) dalam variabel-variabel hidrologi ataupun parameter-parameter model. Walaupun lebih kompleks, model ini hanya berperan sebagai penyaring bagi alternatif-alternatif yang jelas-jelas inferior.

Pada analisa ini model stokastik yang digunakan adalah model yang mendefinisikan sejumlah kemungkinan diskrit dari debit aliran sungai pada tahap (bulan) tertentu, masing-masing dengan probabilitasnya. Pada gilirannya akan dihasilkan sejumlah kemungkinan diskrit dari volume tampungan di waduk pada akhir tahap (bulan), masing-masing dengan probabilitasnya.

2.10. Kebutuhan Air Irigasi

Pengembangan sumber daya air dalam peningkatan produksi pangan merupakan hal yang penting dalam usaha pertanian, dimana irigasi merupakan salah satu bagian dari

program intensifikasi pertanian. Peningkatan efisiensi penggunaan air irigasi merupakan salah satu bentuk pengembangan sumber daya air bagi pertanian.

Penggunaan air irigasi ditetapkan dalam peraturan pemerintah no. 23 pasal 4 dan pasal 7 tahun 1992 tentang irigasi yaitu air irigasi digunakan untuk mengairi tanaman, selain itu digunakan untuk pemukiman, ternak dan sebagainya. Untuk memperoleh hasil produksi yang optimal pemberian air harus sesuai dengan jadwal dengan jumlah dan waktu yang diperlukan tanaman.

Dalam pembangunan proyek irigasi banyaknya air diperlukan untuk pertanian harus diketahui dengan tepat, sehingga pemberian air irigasi dapat diefisienkan dengan maksimal.

Faktor-faktor yang mempengaruhi banyaknya pemakaian air irigasi adalah:

- a. Jenis tanaman.
- b. Cara pemberian air.
- c. Jenis tanah.
- d. Cara pengolahan dan pemeliharaan saluran serta bangunan (dengan memperhitungkan kehilangan air berkisar 30% - 40%).
- e. Waktu tanam yang berturut-turut yang berselang lebih dari dua minggu sehingga memudahkan pergiliran air.
- f. Pengolahan tanah.
- g. Iklim dan cuaca, meliputi; curah hujan, angin, letak lintang, kelembaban, dan suhu udara.

2.10.1. Perhitungan Kebutuhan Air Irigasi

Kebutuhan total air irigasi yang diukur pada pintu pengambilan dalam satu periode adalah hasil kali kebutuhan air disawah dengan faktor efisien dan jumlah hari dalam satu periode penanaman.

Rumus yang digunakan:

$$DR = \frac{WR.A.T}{Ki.1000} \quad (2.19)$$

dengan:

DR = kebutuhan air irigasi pada pintu pengambilan (m^3).

WR = kebutuhan air disawah (mm/hari).

A = luas sawah yang diairi (ha).

Ki = efisiensi irigasi (%).

T = periode waktu pemberian air (hari).

= jumlah hari dalam 1 periode x 24 jam x 3600 detik.

Perkiraan kebutuhan air disawah:

- a. Untuk tanaman padi

$$\text{NFR} = \text{Cu} + \text{Pd} + \text{NR} + \text{P} - \text{Re} \quad (2.20)$$

- b. Untuk tanaman palawija

$$\text{NFR} = \text{Cu} + \text{P} - \text{Re} \quad (2.21)$$

dengan:

NFR = kebutuhan air bersih disawah (l/dt/ha).

Cu = kebutuhan air tanaman (mm/hari).

Pd = Kebutuhan air untuk kebutuhan tanah (mm/hari).

NR = Kebutuhan air untuk pembibitan (mm/hari).

P = Kebutuhan air karena perkolasi (mm/hari).

Re = hujan efektif (mm).

Perkiraan kebutuhan air irigasi:

- a. Untuk tanaman padi

$$\text{IR} = \text{NFR}/e \quad (2.22)$$

- b. Untuk tanaman palawija

$$\text{IR} = (\text{Etc} - \text{Re})/e \quad (2.23)$$

dengan:

Etc = penggunaan konsumtif (mm).

P = kehilangan air akibat perkolasi (mm/hari).

e = efisiensi irigasi secara keseluruhan (%).

Langkah-langkah dalam menentukan besarnya kebutuhan air bagi tanaman dapat ditentukan sebagai berikut:

1. Menghitung evaporasi potensial.
2. Menghitung kebutuhan air tanaman.
3. Menentukan laju perkolasi lahan.
4. Menentukan kebutuhan air untuk pengolahan lahan dan pertanian.
5. Menghitung curah hujan efektif.
6. Menentukan koefisien tanaman.
7. Menghitung kebutuhan air disawah.
8. Menentukan efisien irigasi.
9. Perhitungan kebutuhan air irigasi.

2.11. Model Sinus Perkalian sebagai Fungsi Produksi Lahan Irigasi

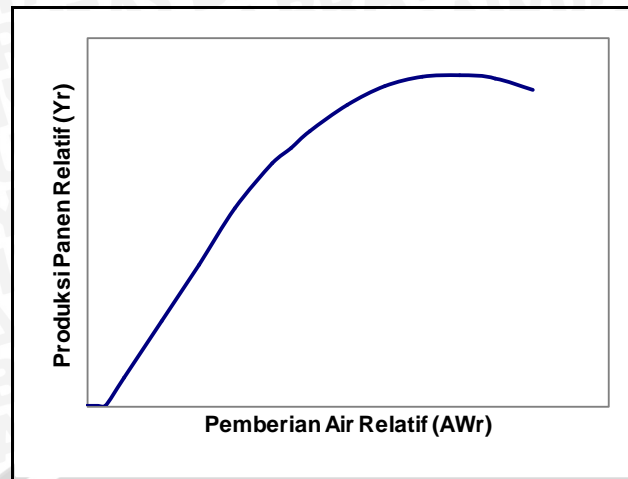
Berapapun ukuran waduknya atau apapun penggunaannya, maka fungsi daripada sebuah waduk adalah untuk menstabilkan aliran air sungai. Jadi karakteristik fisik yang paling penting daripada sebuah waduk adalah kapasitas tampungannya. Kapasitas tampungan ini biasanya ditampilkan sebagai lengkung kapasitas-elevasi waduk, yang dikombinasikan dengan lengkung kapasitas-luasan waduk.

Tujuan daripada aturan operasi (*operating rule*) untuk sistem-sistem sumberdaya air adalah untuk menspesifikasikan bagaimana air dikelola pada sistem tersebut (May & Tung, 1992). Aturan-aturan ini dispesifikasikan untuk mencapai kebutuhan-kebutuhan sistem sedemikian hingga memaksimalkan tujuan yang dinyatakan dalam bentuk nilai-nilai keuntungan. Aturan operasi mengatur bagaimana caranya air diregulasi dalam periode-periode operasi ke depan berdasarkan status sistem yang sekarang. Dalam aturan operasi, maka fungsi keuntungan (*benefit*) yang digunakan harus mengindikasikan bahwa kekurangan air berakibat amat buruk sementara kelebihan air hanya menambah keuntungan yang tidak seberapa.

Model-model perencanaan tipikal umumnya mengandung sedikitnya satu fungsi tujuan yang dimaksimalkan atau diminimumkan dan digunakan untuk mengurutkan solusi-solusi (rencana-rencana) alternatif (Louks dkk., 1981). Pada semua kasus, maka fungsi tujuan adalah fungsi skalar dan dimensi setiap termin adalah homogen, misalnya dalam bentuk nilai moneter. Selain fungsi tujuan, maka model-model perencanaan juga mengandung sejumlah persyaratan-persyaratan yang diformulasikan sebagai kendala-kendala. Solusi optimal daripada model perencanaan adalah suatu rencana yang mencapai nilai terbesar (atau terkecil) daripada tujuan sambil memenuhi semua kendala-kendala.

Penyediaan kapasitas tampungan pada suatu sistem sungai akan sangat meningkatkan debit andalan, dan dengan demikian akan memperluas peluang-peluang tujuan Irigasi (Kuiper, 1965). Jika terdapat tujuan-tujuan lain, seperti PLTA dan Pengendalian Banjir, maka boleh jadi akan menguntungkan secara ekonomis untuk membangun waduk-waduk berukuran besar. Pada sebuah waduk serbaguna semacam itu, maka tujuan irigasi akan mendapat alokasi volume tampungan waduk yang tertentu.

Untuk mengestimasi nilai produksi pada lahan-lahan irigasi, maka dapat digunakan model Sinus-Perkalian (Soetopo & Limantara, 2010). Adapun model Sinus-Perkalian ini berangkat dari bentuk umum dari hubungan antara air yang diterima tanaman dengan produksi panen (English, 2002), yang dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.6. Hubungan Air Diterima Tanaman versus Produksi Panen.
 Sumber: Soetopo & Limantara, 2010

Untuk satu musim tanam, Fungsi Produksi dapat ditulis sebagai berikut (Soetopo & Limantara, 2010).

$$Fungsi\ Produksi = Yr = Yr_1 \times Yr_2 \times Yr_3 \times \dots \times Yr_n \dots (2.24)$$

dengan Yr_i adalah Fungsi Produksi untuk periode i , dan n adalah banyaknya periode pemberian air irigasi selama musim tanam (=8 periode misalnya).

Selanjutnya Fungsi Produksi untuk tahap i dapat ditulis:

$$Yr_i = \left[\sin \left\{ \left[AWR_i - a \cdot \sin(AWR_i \cdot 2\pi) \right] \times \left[1 - b \cdot \sin(AWR_i \cdot \pi) \right]^c \right\}^d \cdot \pi / 2 \right]^e \dots (2.25)$$

Dengan AWR_i adalah pemberian air irigasi relatif untuk periode ke: i , dan a, b, c, d , dan e adalah parameter-parameter.

Model Sinus-Perkalian itu lalu digunakan untuk menghitung panen Yr (dalam persen) pada akhir setiap musim tanam. Masukan (*input*) adalah sekuen alokasi air ke lahan-lahan irigasi dalam persen dari kebutuhan air irigasi untuk setiap periode selama musim tanam. Keluaran (*output*) adalah produksi lahan-lahan irigasi pada saat panen diakhir musim tanam dalam persen dari produksi maksimum.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Kalamanan ini sengaja dikosongkan

