

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Waduk

2.1.1 Umum

Pembangunan waduk adalah salah satu wujud dari usaha memenuhi kebutuhan air. Persediaan yang ada di waduk antara lain direncanakan untuk berbagai keperluan. Dalam pembangunan waduk yang paling diperhatikan adalah analisa tentang produksi dan kapasitas. Produksi adalah jumlah air yang dapat disediakan oleh waduk dalam jangka waktu tertentu. Dari produksi waduk yang direncanakan tersebut dapat ditetapkan seberapa besar kapasitas waduk yang diperlukan untuk dapat memenuhi kebutuhan dengan keandalan tertentu. Hal ini digunakan untuk keperluan perencanaan waduk.

Untuk keperluan operasi, hubungan antara kapasitas dan produksi diartikan sebagai besarnya kebutuhan yang dapat dilayani tiap satuan waktu sesuai dengan kapasitas yang ada. Pengkajian hubungan antara kapasitas dan produksi disebut penelaahan operasi. Penelaahan operasi yang dapat mengungkapkankarakteristik waduk berdasarkan kondisi musim keanekaragaman kebutuhan diperlukan suatu simulasi. Simulasi pengoperasian waduk dipakai untuk jangka waktu tertentu berdasarkan aturan yang ditetapkan.

Metode simulasi dan kurva massa digunakan untuk mencari kebutuham air serta melakukan analisis kapasitas waduk, sehingga dari hitungan ini dapat ditetapkan cara operasi optimal dengan meninjau hubungan antara ketersediaan air dengan kebutuhan air.

2.1.2 Karakteristik Waduk

Istilah-istilah pokok sebagai ciri fisik suatu waduk yang sesuai dengan kajian ini adalah sebagai berikut (montarcih, 1975:7), (gambar 2.1):

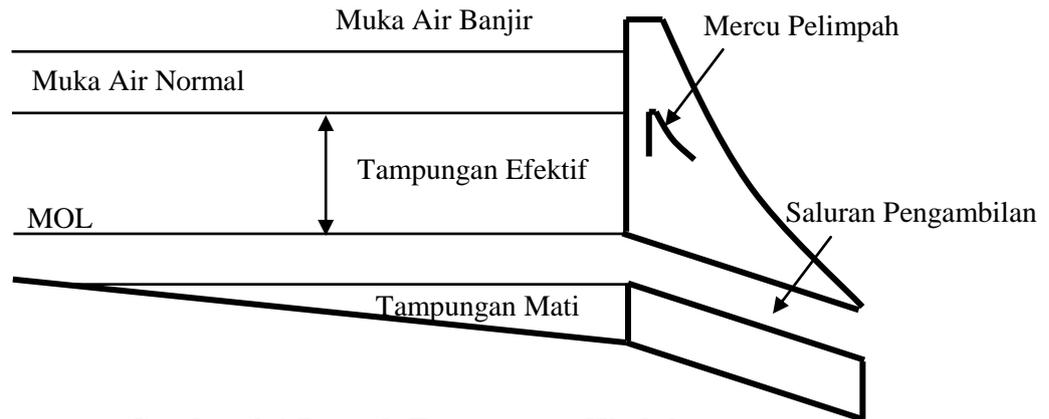
1. Permukaan genangan normal (Normal Water Level/NWL), merupakan elevasi maksimum yang dapat dicapai oleh permukaan air waduk saat kondisi operasi biasa atau disebut juga sebagai muka air operasi tertinggi (Full Suplly Level)
2. Permukaan genangan pada banjir rencana (Flood Water Level/FWL), merupakan elevasi muka air tertinggi yang terjadi selama banjir maksimum yang direncanakan atau biasa disebut Muka Air Banjir (MAB).

3. Permukaan genangan minimum (Low Water Level/LWL), merupakan elevasi terendah yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan. Permukaan ini ditentukan oleh elevasi bangunan pengambilan (intake). Kondisi muka air ini disebut juga dengan muka air minimum (Minimum Operation Level/MOL).
4. Tampungan aktif (active Storage), yaitu tampungan yang dimanfaatkan secara aktif dalam kaitannya dengan pengoperasian waduk. Tampungan ini merupakan jumlah air yang ditampung di atas muka air terendah (LWL).
5. Tampungan mati (Dead Storage) adalah tampungan yang terletak di bawah permukaan genangan minimum (LWL), dan air yang ditampung tidak bias dimanfaatkan dalam pengoperasian waduk.
6. Tampungan tambahan/hf (Surcharge Storage) adalah volume air yang tertampung diantara permukaan genangan normal (NWL) dan muka air banjir (MAB) atau disebut juga dengan tampungan banjir.
7. Pelepasan (Release) atau disebut juga draft, yaitu volume air yang dilepaskan secara terkendali dari waduk selama kurun waktu tertentu (marsudi, 2001:3)
8. Periode kritis (Critical Period), yaitu periode dimana sebuah waduk berubah dari kondisi penuh ke kondisi kosong tanpa melimpas selama periode itu. Awal periode kritis adalah keadaan waduk penuh, dan akhir periode kritis adalah waduk pertama kali dalam periode pengosongan (Marsudi, 2001:3).

2.1.3 Fungsi Waduk

Berdasarkan tujuan pemakaian (Hoesein,1995:2), waduk dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Waduk serbaguna (*Multi Purpose Reservoir*), direncanakan dan dioperasikan untuk melayani lebih dari satu tujuan, jadi prinsipnya adalah mengkombinasikan fungsi tunggal waduk yang mana masing-masing fungsinya dapat dikompromikan sehingga semua tujuan pemakaian air dapat disesuaikan dengan batasab-batasan fisik waduk dan penyediaan air yang ada.
2. Waduk tunggal (*Single Purpose Reservoir*), dimaksudkan untuk memenuhi satu kepentingan saja. Pada waduk untuk irigasi, pemenuhan kebutuhan hanya difokuskan untuk memenuhi kebutuhan air irigasi sepanjang tahun.



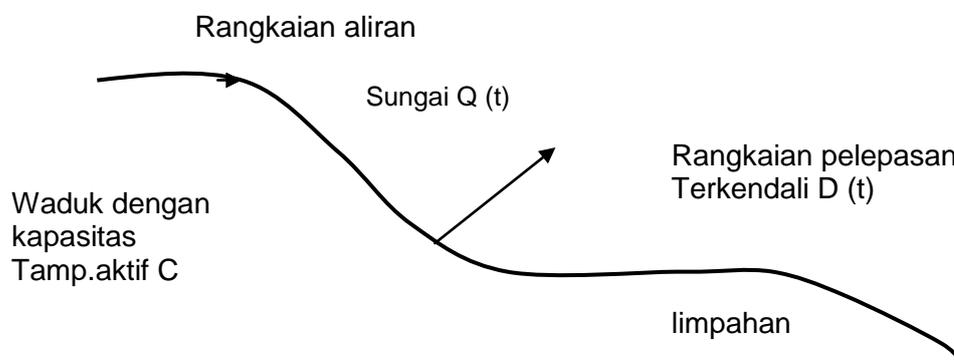
Gambar 2.1 Daerah Tampungan Waduk

2.1.4 Tampungan Waduk

Tampungan yang dibutuhkan di suatu waduk untuk memenuhi permintaan tertentu (Mc Mahon, 1978:1), bergantung pada tiga faktor, yaitu:

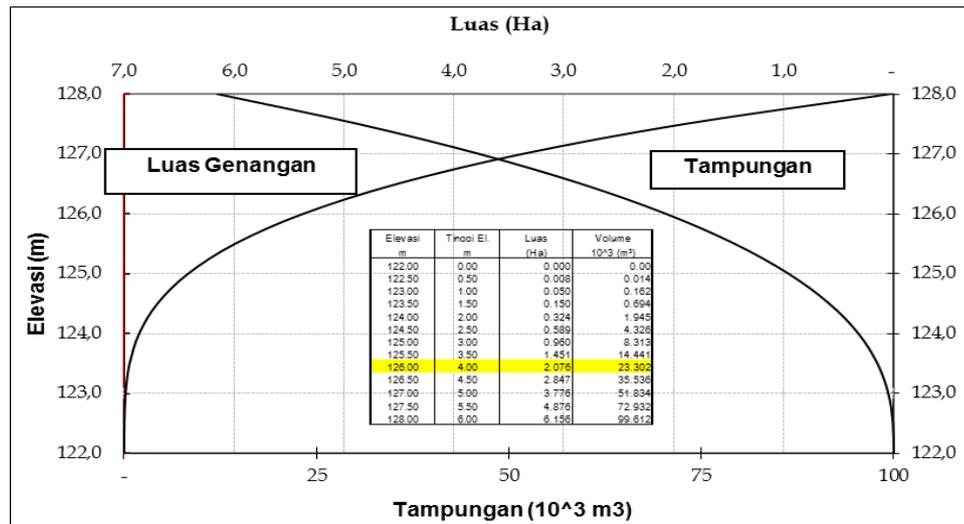
1. Variabilitas aliran air sungai.
2. Ukuran permintaan.
3. Tingkat keandalan dari pemenuhan permintaan.

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



Gambar 2.2. Idealisasi masalah kapasitas kemampuan waduk

Tampungan waduk dapat diketahui dari kurva/lengkung kapasitas waduk. Lengkung kapasitas waduk (*Storage Capacity Curve of Reservoir*) adalah suatu kurva yang menggambarkan hubungan antara luas muka air (*Reservoir area*), volume (*Storage Capacity*) dengan elevasi (*Reservoir Water Level*), sehingga dapat diketahui berapa besar tampungan pada elevasi tertentu. Contoh lengkung kapasitas waduk dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Contoh lengkung kapasitas waduk

2.2 Kebutuhan Air Irigasi

2.2.1 Jadwal Tanam

Tujuan penyusunan jadwal tanam adalah agar air yang tersedia (dari sungai) dapat dimanfaatkan dengan efektif untuk irigasi, sesuai dengan jumlah yang dibutuhkan tiap lahan. Pada musim kemarau, kekurangan jumlah air dapat diatasi dengan mengatur pola tata tanam sesuai tempat, jenis tanaman dan luas lahan.

Penentuan jadwal tata tanam harus disesuaikan dengan jadwal penanaman yang ditetapkan dalam periode musim hujan dan musim kemarau.

2.2.2 Pola Tanaman

Dalam satu tahun terdapat dua kali masa tanaman, yaitu musim hujan (Oktober-Maret) dan musim kemarau (April-September). Batasan waktu tersebut digunakan untuk menentukan awal penanaman padi (di musim hujan), demikian pula untuk tanaman lainnya.

2.2.3 Pola Tata Tanam

Pola tata tanam merupakan cara yang terpenting dalam perencanaan tata tanam. Maksud disediakannya tata tanam adalah untuk mengatur waktu, tempat, jenis dan luas tanaman pada daerah irigasi. Tujuan tata tanam adalah untuk memanfaatkan persediaan air irigasi seefisien dan seefektif mungkin, sehingga tanaman dapat tumbuh baik.

Dua hal pokok yang mendasari diperlukannya tata tanam adalah :

1. Persediaan air irigasi (dari sungai) di musim kemarau yang terbatas.
2. Air yang terbatas harus dimanfaatkan sebaik-baiknya sehingga tiap petak mendapatkan air secukupnya sesuai jumlah yang dibutuhkan.

Berdasarkan pengertian tata tanam seperti di atas, ada empat faktor yang harus diatur, yaitu :

1. Waktu

Pengaturan waktu dalam perencanaan tata tanam merupakan hal yang pokok. Sebagai contoh bila hendak mengusahakan padi rendeng pertama-tama adalah melakukan pengolahan tanah untuk pembibitan. Pada waktu mulai tanam biasanya musim hujan mulai turun sehingga persediaan air relatif kecil. Untuk menghindari hal-hal yang tidak diinginkan maka waktu penggarapan dan urutan tata tanam diatur sebaik-baiknya.

2. Tempat

Pengaturan tempat masalahnya hampir sama dengan pengaturan waktu. Dengan dasar pemikiran bahwa tanaman membutuhkan air dan persediaan air yang ada dipergunakan bagi tanaman. Untuk dapat mencapai hal itu tanaman diatur tempat penanamannya, agar pelayanan irigasi dapat lebih mudah.

3. Pengaturan jenis tanaman

Tanaman yang diusahakan antara lain padi, palawija dan lain-lain. Tiap jenis tanaman mempunyai tingkat kebutuhan air yang berlainan. Berdasarkan hal tersebut, jenis tanaman yang diusahakan harus diatur sedemikian rupa sehingga kebutuhan air dapat terpenuhi. Misalnya jika persediaan air sedikit diusahakan dengan menanam tanaman yang membutuhkan air relatif sedikit. Sebagai contoh adalah penanaman padi, gandum dan palawija di musim kemarau. Pada musim kemarau persediaan air sedikit, untuk menghindari terjadinya lahan yang tidak terpakai areal tanaman harus dibatasi luasnya dengan menanamnya palawija. Berarti sudah memanfaatkan areal dan meningkatkan produksi pangan.

4. Pengaturan luas tanaman

Pengaturan luas tanaman hampir sama dengan pengaturan jenis tanaman. Pengaturan pada pembatasan luas tanaman akan membatasi besarnya kebutuhan air bagi tanaman yang bersangkutan. Pengaturan ini hanya terjadi pada daerah yang airnya terbatas, misalnya jika air irigasi yang sedikit, petani hanya boleh menanam palawija.

2.2.4 Koefisien Tanaman

Kebutuhan air tanaman sebagai penganti konsumtif ditentukan oleh koefisien tanaman dan evaporasi potensial, yaitu dalam hubungan :

$$ET_c = k \times ET_o \quad (2 - 1)$$

dengan:

ET_c : Evaporasi sebenarnya

k : koefisien tanaman

ET_o : Evaporasi potensial

Notasi k adalah koefisien tanaman (sering juga disebut koefisien evapotranspirasi tanaman). K merupakan angka pengali untuk menjadikan evaporasi potensial (ET_o) menjadi evaporasi sebenarnya (ET_c).

Besarnya koefisien tanaman ini berhubungan dengan :

- Jenis tanaman (contoh : padi, palawija)
- Varietas tanaman (contoh : padi PB 5, padi IR 12)
- Umur pertumbuhan tanaman

Usaha memperkecil kebutuhan air tanaman, tidak dapat dengan memperkecil nilai ET_o (karena berhubungan dengan iklim) namun hanya dapat dilakukan dengan memperkecil nilai k .

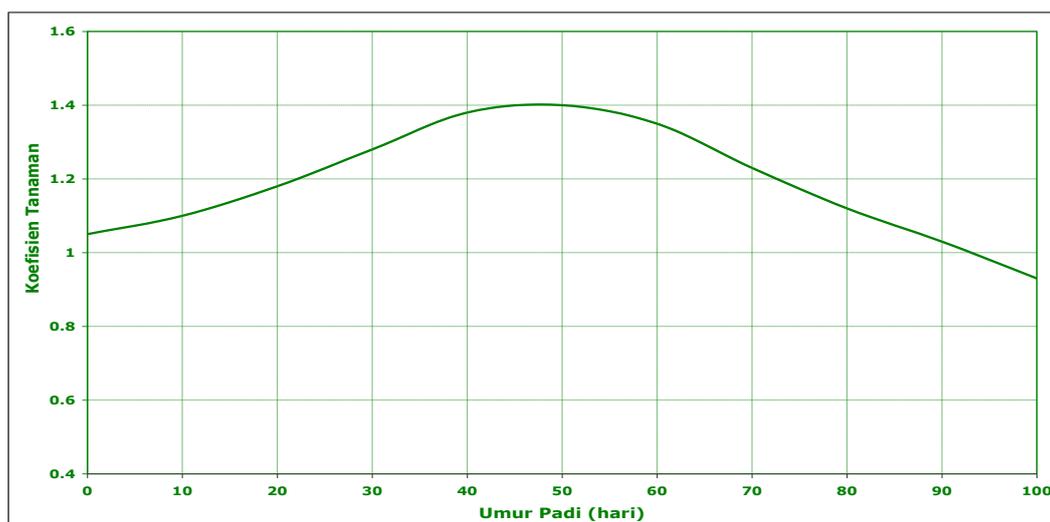
Mengubah faktor k berarti mengubah jenis, varietas atau umur pertumbuhan tanaman. Contohnya memilih tanaman jagung sebagai pengganti padi atau mengubah saat tanam pada bulan-bulan tertentu.

Harga koefisien tanaman padi tertera pada **Tabel 2.1** dan **Gambar 2.4** sedangkan tanaman non padi dapat dilihat pada **Tabel 2.2** dan **Gambar 2.5**

Tabel 2.1 Harga koefisien Tanaman Padi

Bulan	Nedeco/Prosida		FAO	
	Varietas Biasa	Varietas Unggul	Varietas Biasa	Varietas Unggul
0,5	1,2	1,2	1,1	1,1
1	1,2	1,27	1,1	1,1
1,5	1,32	1,33	1,1	1,05
2	1,4	1,3	1,1	1,05
2,5	1,35	1,3	1,1	0,95
3	1,24	0	1,05	0
3,5	1,12		0,95	

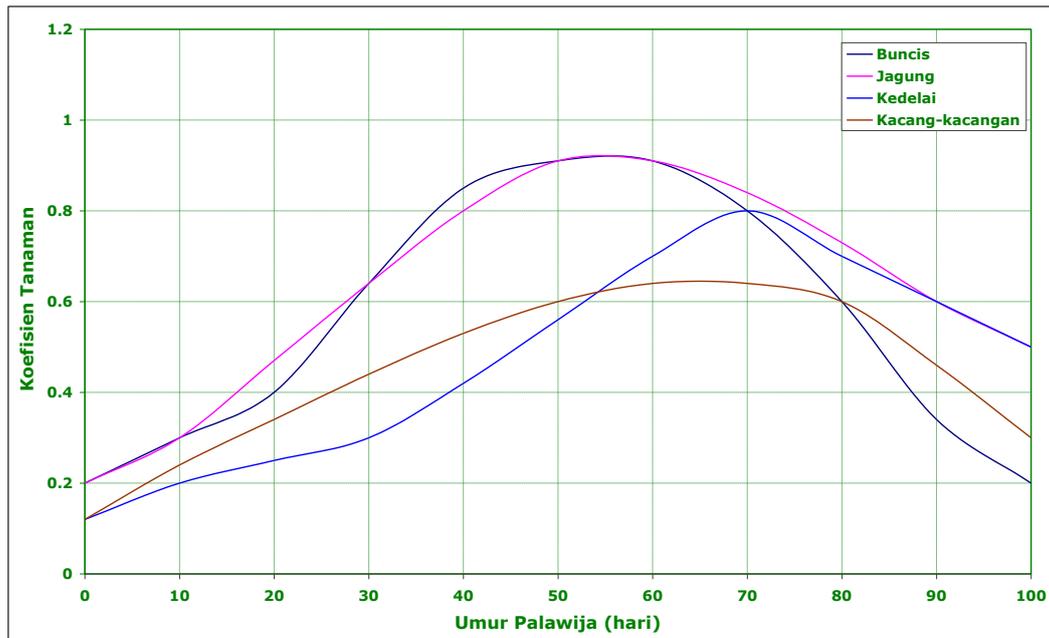
Sumber: Dirjen Pengairan, Bina Program PSA 010,1985



Gambar 2.4 Nilai Koefisien Tanaman Padi

Tabel 2.2 Harga koefisien Tanaman Palawija

Tanaman	Kedelai	Jagung	Kc.tanah	Bawang	Buncis	Kapas
Jangka						
Tumbuh/hari	85	80	130	70	75	195
1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
2	0,75	0,59	0,51	0,51	0,64	0,5
3	1	0,96	0,66	0,69	0,89	0,58
4	1	1,05	0,85	0,9	0,95	0,75
5	0,82	1,02	0,95	0,95*	0,88	0,91
6	0,45	0,95	0,95	0	0	1,04
7	0	0	0,95	0	0	1,05
8	0	0	0,55	0	0	1,05
9	0	0	0,55*	0	0	1,05
10	0	0	0	0	0	0,78
11	0	0	0	0	0	0,65
12	0	0	0	0	0	0,65
13	0	0	0	0	0	0,65



Gambar 2.5 Nilai Koefisien Tanaman Palawija

2.2.5 Evapotranspirasi

2.2.5.1 Evaporasi

Evaporasi (penguapan) merupakan peristiwa berubahnya air menjadi uap dan bergerak dari permukaan tanah dan permukaan air ke udara (Sosrodarsono, 1976: 57). Evaporasi merupakan faktor penting dalam studi tentang pengembangan sumber-sumber daya air. Evaporasi sangat mempengaruhi debit sungai, besarnya kapasitas waduk, besarnya kapasitas pompa untuk irigasi, penggunaan konsumtif (consumptive use) untuk tanaman dan lain-lain.

Air akan menguap dari tanah, baik tanah gundul atau yang tertutup oleh tanaman dan pepohonan, pada permukaan yang tidak tembus air seperti atap dan jalan raya, air bebas mengalir. Laju evaporasi atau penguapan akan berubah-ubah menurut warna dan sifat pemantulan permukaan (albedo) dan hal lain juga akan berbeda untuk permukaan yang langsung tersinari oleh matahari dan yang terlindungi dari sinar matahari.

Besarnya faktor meteorologi yang mempengaruhi besarnya evaporasi adalah sebagai berikut (Soemarto, 1986: 43):

1. Radiasi matahari

Evaporasi merupakan konversi air ke dalam uap air. Proses ini terjadi hampir tanpa berhenti di siang hari dan kerap kali juga di malam hari. Perubahan dari keadaan cair menjadi gas ini memerlukan energi berupa panas latent untuk

evaporasi. Proses evaporasi akan sangat aktif jika ada penyinaran langsung dari matahari.

2. Angin

Jika air menguap ke atmosfer maka lapisan batas antara permukaan tanah dan udara menjadi jenuh oleh uap air sehingga proses evaporasi berhenti. Agar proses tersebut berjalan terus lapisan jenuh harus diganti dengan udara kering. Pergantian itu hanya dimungkinkan jika ada angin. Jadi, kecepatan angin memegang peranan penting dalam proses evaporasi.

3. Kelembaban (*humiditas*) relatif

Faktor lain yang mempengaruhi evaporasi adalah kelembaban relatif udara. Jika kelembaban relatif naik, maka kemampuan udara untuk menyerap air akan berkurang sehingga laju evaporasinya akan menurun. Penggantian lapisan udara pada batas tanah dan udara dengan udara yang sama kelembaban relatifnya tidak akan menolong untuk memperbesar laju evaporasi. Ini hanya dimungkinkan jika diganti dengan udara yang lebih kering.

4. Suhu (temperatur)

Energi sangat diperlukan agar evaporasi berjalan terus. Jika suhu udara dan tanah cukup tinggi, proses evaporasi akan berjalan lebih cepat dibandingkan jika suhu udara dan tanah rendah karena adanya energi panas yang tersedia. Karena kemampuan udara untuk menyerap uap air akan naik jika suhunya naik, maka suhu udara mempunyai efek ganda terhadap besarnya evaporasi, sedangkan suhu tanah dan air hanya mempunyai efek tunggal.

2.2.5.2 Transpirasi

Transpirasi adalah suatu proses yang air di dalam tumbuhan dilimpahkan ke dalam atmosfer sebagai uap air (Subarkah, 1980:39).

Faktor-faktor yang mempengaruhi transpirasi adalah :

1. Iklim, yang sangat berpengaruh adalah penyinaran matahari, karena transpirasi tidak akan berlangsung jika tidak ada sinar matahari. Proses transpirasi terhenti pada malam hari (Soemarto, 1987:44).
2. Varietas tanaman, tanaman yang sejenis namun varietasnya berbeda (misalnya varietas unggul dengan varietas biasa), maka transpirasinya akan lain.
3. Jenis tanaman, tiap jenis tanaman akan melakukan proses transpirasi yang berbeda besarnya, misalnya transpirasi tanaman padi berbeda dengan tanaman jagung.

4. Umur tanaman, pada waktu masa pertumbuhan menuju pematangan akan membutuhkan proses transpirasi yang lebih besar dibandingkan dengan awal tanaman atau mendekati proses panen.

Dalam kondisi lapangan (field condition) tidaklah mungkin untuk membedakan antara evaporasi dan transpirasi jika tanahnya tertutup tumbuh-tumbuhan. Kedua proses tersebut saling berkaitan sehingga dinamakan evapotranspirasi.

2.2.5.3 Evapotranspirasi

Evapotranspirasi adalah gabungan dari proses penguapan air bebas (evaporasi) dan penguapan air melalui tanaman (transpirasi) (Suhardjono, 1994:11). Evapotranspirasi merupakan faktor dasar untuk menentukan kebutuhan air dalam rencana irigasi dan merupakan proses yang penting dalam siklus hidrologi.

Jumlah kadar air yang hilang dari tanah oleh evapotranspirasi tergantung kepada:

1. Adanya persediaan air yang cukup (hujan dan lain-lain)
2. Faktor-faktor iklim seperti suhu, kelembaban dan lain-lain.
3. Tipe dan cara kultivasi tumbuh-tumbuhan tersebut.

Data-data yang diperoleh dari stasiun klimatologi adalah letak lintang, temperatur rata-rata (t), kecepatan angin rata-rata (u), kecerahan matahari (n/N) dan kelembaban relative (R_h). Yang dapat dijelaskan sebagai berikut (Suhardjono, 1994:30)

1. Temperatur rata-rata (t)

Rata-rata temperatur udara bulanan di Indonesia berkisar antara $24 - 29^{\circ}\text{C}$ dan tidak terlalu berbeda dari bulan yang satu dengan bulan yang lain.

2. Kecepatan angin rata-rata (u)

Data kecepatan angin diukur berdasarkan tiupan angin pada ketinggian 200m di atas permukaan tanah. Dari data pengukuran kecepatan angin di Indonesia menunjukkan bahwa besarnya kecepatan angin bulanan rata-rata berkisar antara $0,5 - 4,5 \text{ m/dt}$ atau sekitar $2 - 15 \text{ km/jam}$.

3. Kecerahan matahari rata-rata (n/N)

Kecerahan matahari adalah perbandingan antara n dan N atau disebut rasio keawanan. Nilai n merupakan jumlah jam nyata matahari bersinar dalam sehari sedangkan nilai N merupakan jumlah jam potensial matahari yang bersinar dalam satu hari. Untuk daerah khatulistiwa besarnya N adalah sekitar 12 jam setiap harinya dan tidak jauh berbeda antara bulan yang satu dengan yang lainnya.

Besarnya n berhubungan erat dengan keadaan awan, makin banyak awan makin kecil nilai n . harga rata-rata bulanan kecerahan matahari

4. Kelembaban relative rata-rata (Rh)

Kelembaban relatif atau *relative humidity* (dalam prosentase), merupakan perbandingan tekanan uap air dengan tekanan uap air jenuh. Data pengukuran di Indonesia menunjukkan besar kelembaban relatif berkisar antara 65-84%. Hal ini berarti Indonesia adalah daerah dengan kelembaban udara yang tinggi. Pada musim penghujan (Oktober-Maret) kelembaban relatif lebih tinggi daripada musim kemarau (April-September).

Dalam menghitung besarnya evapotraspirasi kita bisa menggunakan beberapa rumus empiris seperti Penman Modifikasi, Blane-Cliddle. Dalam studi ini perhitungan besarnya evaporasi dipakai rumus empiris Penman Modifikasi sebagai berikut :

$$ET_0^* = W \cdot (0,75 R_s - R_{n1}) + (1 - W) \cdot f_{(u)} \cdot (e_a - e_d) \quad (2 - 2)$$

dengan :

- t : suhu bulanan rata-rata ($^{\circ}\text{C}$)
- RH : kelembaban relatif bulanan rata-rata (%)
- $\frac{n}{N}$: kecerahan matahari bulanan (%)
- u : kecepatan angin bulanan rata-rata (m/dt)
- Letak lintang daerah yang ditinjau
- Angka koreksi c
- W : faktor yang berhubungan dengan suhu dan elevasi
- R_s : radiasi gelombang pendek dalam setahun evaporasi ekivalen (mm/hari)
= $(0,25 + 0,54 n/N) R_a$
- R : radiasi gelombang pendek yang memenuhi batas luar atmosfer atau angka angot (mm/hari)
- R_{n1} : radiasi bersih gelombang panjang (mm/hari)
: $f_{(t)} \cdot f_{(ed)} \cdot f_{(n/N)}$
- $f_{(t)}$: fungsi suhu
: $\sigma \cdot T_a^4$
- $f_{(ed)}$: fungsi tekanan uap
: $0,34 - (0,44 \cdot e_d^{0,5})$
- $f_{(n/N)}$: $0,1 + (0,9 \cdot n/N)$

- $f(u)$: fungsi kecepatan angin pada ketinggian 2 meter (m/dt)
: $0,27 (1 + 0,864 U)$
- ea : tekanan uap jenuh dengan tekanan uap yang sebenarnya
- ed : $ea \cdot RH$
- RH : kelembaban udara relatif (%)

Setelah harga ET_0 didapat, maka besar harga evapotranspirasi potensial (ET_0) dapat dihitung dengan rumus :

$$ET_0 = c \cdot ET_0^* \quad (2 - 3)$$

dengan:

c : angka koreksi Penman yang besarnya mempertimbangkan perbedaan cuaca

Prosedur perhitungan ET_0 berdasar rumus Penman adalah sebagai berikut :

1. Mencari data suhu bulanan rata-rata (t)
2. Mencari besaran (ea), (W), ($W - 1$) dan $f_{(t)}$ dari tabel yang berdasarkan nilai (t)
3. Mencari data kelembaban relatif (RH)
4. Mencari besaran ed berdasarkan nilai ea dan RH
5. Mencari $f_{(ed)}$ dari tabel berdasarkan nilai ed
6. Mencari data letak lintang daerah yang ditinjau
7. Mencari besaran (R_a) dari tabel R. 2 berdasarkan letak lintang
8. Mencari data kecerahan matahari (n/N)
9. Mencari besaran R_s dari tabel R. 3 atau dari perhitungan berdasarkan nilai R_a dan (n/N)
10. Mencari besaran $f_{(n/N)}$ berdasarkan nilai (n/N)
11. Mencari data kecepatan angin rata-rata bulanan (U)
12. Mencari besaran $f_{(U)}$ berdasarkan nilai (U)
13. Menghitung besar $Rn_1 = f_{(t)} \cdot f_{(ed)} \cdot f_{(n/N)}$
14. Mencari besar angka koreksi (c) dari tabel
15. Menghitung besar ET_0 , dengan rumus :
$$ET_0^* = W \cdot (0,75 R_s - Rn_1) + (1 - W) \cdot f_{(u)} \cdot (ea - ed)$$
16. Hitung $ET_0 = c \cdot ET_0^*$

2.2.6 Pengolahan Lahan

Kebutuhan air untuk pengolahan lahan biasanya lebih besar dari kebutuhan air untuk pertumbuhan tanaman, yaitu antara 200 mm sampai dengan 300 mm. Waktu pengolahan lahan di Indonesia 30 hari sampai dengan 45 hari dengan waktu

pelaksanaan pemberian air sebaiknya digunakan waktu pengolahan yang sesuai dengan kondisi lahan setempat.

Besarnya kebutuhan air untuk pengolahan tanah didekati dengan metode yang dikembangkan oleh Van de Goor dan Zijlstra. Metode tersebut didasarkan pada laju air konstan dalam l/dt selama periode penyimpanan lahan, dengan persamaan sebagai berikut (KP 01, 1986:160):

$$IR = \frac{Mxe^k}{e^k - 1} \quad (2 - 4)$$

dengan:

IR = Kebutuhan air untuk pengolahan lahan (mm/hari)

M = Kebutuhan air untuk penggantian kehilangan air akibat evaporasi dan perkolasi di sawah yang sudah dijenuhkan (mm/hari)

M = $E_o + P$ (mm/hari)

E_o = evaporasi air terbuka yang diambil 1,1 E_{to} selama penyiapan lahan (mm/hari)

P = Perkolasi (mm/hari)

K = $(M \times T) / S$

T = Jangka waktu penyiapan lahan (hari)

S = Kebutuhan air untuk penjenuhan yang besarnya berdasar dari tekstur tanah

e = Bilangan eksponensial (2,71828)

2.2.7 Perkolasi

Perkolasi adalah gerakan air ke bawah dari daerah tidak jenuh (antara permukaan tanah ke permukaan air tanah) ke dalam daerah jenuh (daerah di bawah permukaan air tanah). Kondisi ini akan mempengaruhi kebutuhan air yang akan diberikan oleh tanaman. Sedangkan yang disebut daya perkolasi adalah laju perkolasi maksimum yang dimungkinkan, yang besarnya dipengaruhi oleh kondisi tanah dengan muka air tanah.

Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya perkolasi adalah sebagai berikut:

1. Tekstur tanah

Tekstur tanah yang halus daya perkolasinya kecil.

2. Permeabilitas tanah

Permeabilitas tanah adalah gaya yang merembes lewat ruang antar butiri tanah. Pada tanah lempung berat dengan karakteristik yang baik, laju perkolasi dapat mencapai 1-3 mm/hr (KP 01, 1986:165). Semakin besar permeabilitas tanah, semakin kecil daya perkolasinya.

3. Tebal lapisan tanah
Semakin tipis lapisan tanah bagian atas, semakin kecil gaya perkolasi.
4. Tanaman penutup
Lindungan tumbuh-tumbuhan yang padat menyebabkan daya infiltrasi semakin besar sehingga daya perkolasi juga besar.
5. Letak permukaan air tanah
Semakin tinggi air tanah semakin rendah perkolasi.

Tabel 2.3 Tingkat Perkolasi

Jenis Tanah	Angka Perkolasi	
	Padi (mm/hari)	Palawija (mm/hari)
Tekstur Berat	1	2
Tekstur Sedang	2	4
Tekstur Ringan	5	10

2.2.8 Penggantian Lapisan Air / Water Layer Requirement (WLR)

Pergantian lapisan air erat hubungannya dengan kesuburan tanah. Beberapa saat setelah penanaman, air yang digenangkan di permukaan sawah akan kotor dan mengandung zat-zat yang tidak lagi diperlukan tanaman, bahkan akan merusak. Air genangan ini perlu dibuang agar tidak merusak tanaman di lahan. Saat pembuangan lapisan genangan, sampah-sampah yang ada di permukaan air akan tertinggal, demikian pula lumpur yang terbawa dari saluran saat pengairan. Air genangan yang dibuang perlu diganti dengan air baru yang bersih.

Adapun ketentuan-ketentuan dalam WLR adalah sebagai berikut:

1. WLR diperlukan saat terjadi pemupukan maupun penyiangan, yaitu 1-2 bulan dari transplating.
2. WLR=50 mm (diperlukan penggantian lapisan air, diasumsikan = 50 mm, hal itu sesuai dengan KP Bagian Penunjang)
3. Jangka waktu WLR=1,5 bulan (selama 1,5 bulan air digunakan untuk WLR sebesar 50 mm).

Contoh:

Periode pemberian air 15 harian

WLR = 50 mm selama 45 hari

didapat $WLR/15 \text{ hari} = 50 \text{ mm}/15 \text{ hari}$
 $= 3,3 \text{ mm/hari}$

Untuk WLR/hari = 50 mm/45 hari
 = 1,1 mm/hari

2.2.9 Analisis Curah Hujan

2.2.9.1 Uji Konsistensi Data Curah Hujan

Uji konsistensi adalah uji kesesuaian data curah hujan pada suatu stasiun hujan. Jika data tidak konsisten dapat diakibatkan oleh berubahnya atau terganggunya lingkungan disekitar tempat penakar hujan dipasang, maka seolah-olah terjadi penyimpangan terhadap tren semula. Terganggunya lingkungan antara lain disebabkan penakar hujan terlindung oleh pohon, terletak berdekatan dengan gedung tinggi, pemindahan letak penakar dan sebagainya (Soemarto, 1986:38).

2.2.9.2 Curah Hujan Rerata Daerah

Curah hujan yang diperlukan untuk suatu pemanfaatan air yang salah satunya seperti alokasi air irigasi adalah curah hujan rata-rata di seluruh daerah yang bersangkutan, curah hujan inidisebut curah hujan wilayah atau daerah. Curah hujan wilayah atau daerah harus diperkirakan dari beberapa titik pengamatan curah hujan (Sosrodarsono, 1976:27).

Untuk menentukan besarnya curah hujan daerah, ada 3 cara yang umum dipakai, yaitu:

1. Cara Rata-rata Hitung
2. Cara-cara Poligon Thiessen
3. Cara Isohyet.

Pada umumnya untuk menghitung curah hujan daerah dapat digunakan standar luas daerah sebagai berikut (Sosrodarsono, 1976:27):

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

2.2.9.3 Curah Hujan Efektif

Tidak semua curah hujan yang jatuh di atas tanah dapat dimanfaatkan tanaman untuk pertumbuhannya, ada sebagian yang menguap dan mengalir sebagai limpasan permukaan. Air hujan yang jatuh di atas permukaan dapat dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Curah hujan nyata, yaitu sejumlah air yang jatuh pada periode tertentu.
2. Curah hujan efektif, yaitu sejumlah curah hujan yang jatuh pada suatu daerah atau petak sawah semasa pertumbuhan tanaman dan dapat dipakai untuk memenuhi kebutuhannya.

Dasar perhitungan kebutuhan tanaman, perkolasi dan lain-lain berdasarkan curah hujan efektif, sedangkan jumlah hujan yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman tergantung dari jenis tanaman tersebut dan jenis tanah.

Beberapa proyek irigasi di Indonesia menentukan curah hujan efektif untuk perencanaan kebutuhan air irigasi dengan menggunakan persamaan kemungkinan ulangan terjadinya curah hujan tertentu dan berdasarkan curah hujan harian dari tahun perencanaan dan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Metode *Basic Year*) :

$$R_{80} = \left(\frac{n}{5}\right) + 1 \quad (2 - 4)$$

dengan :

R_{80} = Tingkat hujan yang terjadi dengan tingkat kepercayaan = 80%

R = Curah hujan bulanan

n = Jumlah data curah hujan bulanan

Caranya :

1. Curah hujan tahunan selama n tahun diurut dari kecil ke besar.
2. Dengan rumus di atas didapat urutan curah hujan diambil sebagai curah hujan efektif.

A. Curah hujan efektif tanaman padi

Besarnya curah hujan efektif untuk tanaman padi sawah ditentukan dengan berdasarkan 70% dari hujan andalan 80% dengan peluang kegagalan sebesar 20%. Curah hujan efektif diperoleh dari 70% x R_{80} periode pengamatan sehingga persamaannya adalah sebagai berikut:

$$Re_{\text{padi}} = 0,7 \times R_{80} \quad (2 - 5)$$

dengan :

R_{80} = Tingkat hujan yang terjadi dengan tingkat kepercayaan = 80%

$Re_{padi} =$ Curah hujan efektif untuk padi sawah (mm/hari)

B. Curah hujan efektif tanaman palawija

Curah hujan efektif untuk tanaman palawija ditentukan berdasarkan hujan andalan 50% (Q_{50}) dengan peluang kegagalan 50%. Q_{50} diperoleh dengan Metode Basic Year

$$R_{50} = \left(\frac{n}{2}\right) + 1 \quad (2 - 6)$$

dengan :

R_{50} = Tingkat hujan yang terjadi dengan tingkat kepercayaan = 50%

R = Curah hujan bulanan

n = Jumlah data curah hujan bulanan

Caranya :

1. Curah hujan tahunan selama n tahun diurut dari kecil ke besar.
2. Dengan rumus di atas didapat urutan curah hujan diambil sebagai curah hujan efektif.
3. R_{50} yang didapat merupakan tahun dasar perencanaan.

Besarnya curah hujan andalan 50% (R_{50}) dipakai sebagai curah hujan efektif tanaman palawija.

$$Re_{palawija} = R_{50} \quad (2 - 7)$$

2.2.10 Efisiensi Irigasi dan Sungai

Sebelum sampai di petak sawah, air harus dialirkan melalui saluran-saluran induk, sekunder dan tersier. Di dalam sistem saluran terjadi kehilangan-kehilangan debit yang disebabkan rembesan, perkolasi dan kekurangtelitian di dalam eksploitasi. Kehilangan air irigasi dinamakan efisiensi irigasi yang besarnya adalah perbandingan antara jumlah air yang nyata bermanfaat bagi pertumbuhan tanaman ditambah perkolasi lahan dengan jumlah air yang dikeluarkan dari pintu pengambilan. Efisiensi dinyatakan dalam prosentase.

Kehilangan yang ditentukan oleh pelaksanaan eksploitasi ada tiga tingkatan, yaitu:

1. Kehilangan air di tingkat tersier, melalui kehilangan air di sawah, di saluran kuarter dan saluran tersier.
2. Kehilangan air di tingkat primer, melalui kehilangan air di saluran primer.
3. Kehilangan air di tingkat sekunder, melalui kehilangan air di saluran sekunder.

Faktor yang mempengaruhi kehilangan air di tiap tingkatan saluran adalah:

1. Kehilangan air di tingkat tersier dan sawah
 - a. Kebocoran pematang
 - b. Kehilangan karena pemakaian
 - Kerja sama tingkat pemakai air
 - Tingkat pengawasan pemakai air
 - c. Pemberian air yang tidak dilaksanakan
 - d. Tidak sempurnanya bangunan pelimpah dan pintu
 - e. Rembesan pada saluran tersier dan kuarter
 - Tekstur tanah
 - Permeabilitas tanah
 - Umur saluran
 - Kepadatan tanggul
 - f. Kebocoran pada saluran tersier dan kuarter
 - Tingkat pemeliharaan saluran
 - Penyadap-penyadap liar
2. Kehilangan air di tingkat saluran primer dan sekunder yang terdiri dari:
 - a. Rembesan
 - b. Penyadap liar
 - c. Kebocoran
 - d. Pengaruh pemeliharaan saluran dan tanggul
 - e. Pengaruh pemeliharaan pintu

Namun secara umum faktor-faktor yang mempengaruhi kehilangan air adalah:

1. Panjang saluran
Makin panjang saluran, kemungkinan kehilangan air makin besar.
2. Keliling basah saluran
Makin besar keliling basah saluran, makin besar kehilangan air.
3. Lapisan saluran
Saluran yang tidak di lining lapisan pengerasan akan terjadi genangan air. Inidisebabkan karena rembesan dan perkolasi.
4. Kedudukan air tanah
Makin tinggi kedudukan air tanah, makin kecil pula faktor perembesannya.
5. Luas permukaan air pada saluran
Makin luas permukaan yang terjadi karena adanya penguapan.

Pengoperasian pengaliran air melalui suatu jaringan irigasi dibagi atas 3 (tiga) macam operasi, yaitu di jaringan utama, di jaringan tersier dan di tingkat usaha tani. Efisiensi dari penggunaan air selain pada masing-masing operasi tersebut, juga efisiensi gabungan antara jaringan tersier di tingkat usaha tani/lahan dan efisiensi daerah irigasi/seluruh jaringan.

Efisiensi berkisar antara 35% pada musim hujan sampai 60% pada musim kemarau, penyebab rendahnya efisiensi pada musim hujan karena ketidakmampuan memberikan air secara pasti sesuai yang dibutuhkan, akibat pertimbangan curah hujan efektif.

Besarnya efisiensi irigasi di daerah studi adalah :

1. Jaringan tersier = 80%
2. Jaringan sekunder = 90%
3. Jaringan primer = 90%

2.2.11 Kebutuhan Bersih Air di Sawah (Netto Farm Requirement /NFR)

2.2.11.1 Metode Kriteria Perencanaan PU

A. Kebutuhan air di sawah:

$$NFR = Etc + P - R_{eff} + WLR \quad (2 - 8)$$

dengan:

NFR : kebutuhan air bersih di sawah (ml/dt/hari)

Etc : evapotranspirasi potensial (mm / hari)

P : perkolasi (mm / hari)

R_{eff} : curah hujan efektif (mm/hari)

WLR : pergantian lapisan air (mm)

B. Kebutuhan air irigasi untuk tanaman padi

$$IR = \frac{NFR}{eff} \quad (2 - 9)$$

dengan:

eff : efisiensi irigasi

C. Kebutuhan air irigasi untuk tanaman palawija

$$IR = \frac{ET - Re_{ff}}{eff} \quad (2 - 10)$$

dengan:

ET : kebutuhan Air Tanaman (mm/hari)

R_{eff} : curah hujan efektif (mm/hari)

eff : efisiensi irigasi

D. Kebutuhan air irigasi untuk penyiapan lahan adalah:

$$IR = \frac{Me^k}{(e^k - 1)} \quad (2 - 11)$$

dengan:

IR : kebutuhan air untuk penyiapan lahan ($m^3/dt/hari$)

M : kebutuhan air untuk mengganti air yang hilang akibat evaporasi dan perkolasi di sawah yang telah dijenuhkan (mm/hari)

K : MT/S

T : jangka waktu penyiapan lahan (hari)

S : air yang dibutuhkan untuk penjenuhan ditambah dengan 50 mm

E. Kebutuhan air di intake :

$$DR = (WR \times A \times T) / (Ki \times 1000) \quad (2 - 12)$$

dengan :

DR = kebutuhan air di intake

WR = kebutuhan air di sawah
 $= Cu + P + WLR + Pd - Re$

A = luas sawah yang diairi (m^2)

Ki = efisiensi irigasi

T = periode pemberian air

= jumlah hari dalam satu periode x 24 jam x 3600 detik

2.2.11.2 Metode Water Balance

Kebutuhan air irigasi di sawah:

a. Untuk tanaman padi:

$$NFR = Cu + Pd + NR + P - R_{eff} \quad (2 - 13)$$

b. Untuk tanaman palawija

$$NFR = Cu + P - R_{eff} \quad (2 - 14)$$

dengan:

NFR : kebutuhan air di sawah ($1 \text{ mm/hari} \times 10.000/24 \times 60 \times 60 = 1$)
 ($l/dt/ha$)

Cu : kebutuhan air tanaman (mm/hari)

- Pd : kebutuhan air untuk pengolahan tanah (mm/hari)
 NR : kebutuhan air untuk pembibitan (mm/hari)
 P : perkolasi (mm/hari)
 R_{eff} : curah hujan efektif (mm/hari)

2.2.12 Kebutuhan Air Irigasi di Bangunan Utama

Kebutuhan air irigasi di bangunan utama diperoleh dengan membagi kebutuhan air di intake dengan koefisien di saluran tersier, sekunder dan primer. Kebutuhan air irigasi tersebut seperti pada rumus berikut:

$$DR = \frac{NFR}{eff_{tersier} * eff_{sekunder} * eff_{primer} * eff_{aliranairsungai}} \quad (2 - 15)$$

dengan:

- DR : (*Diversion Requirement*) kebutuhan air irigasi di bangunan utama (l/dt)
 NFR : Kebutuhan air bersih di sawah (l/dt/ha)
 eff : efisiensi irigasi (%)

2.3 Volume air irigasi

Analisa volume dimaksudkan untuk menghitung luas lahan yang dapat ditanami dari persediaan air irigasi yang ada. Volume air irigasi meliputi volume air yang dibutuhkan, yaitu dari perhitungan kebutuhan air irigasi pada masing-masing petak pada daerah irigasi dan volume air yang tersedia dari setiap perubahan debit pada tiap musim tanam.

2.3.1 Volume Air yang Dibutuhkan

Untuk mengetahui volume air yang dibutuhkan pada tiap petak dalam satu periode, harus diketahui terlebih dahulu volume air yang dibutuhkan pada tiap 15 harian yaitu dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$V_B = \frac{q \times n \times 86400}{1000} \quad (2 - 16)$$

Dengan:

- V_B : volume air yang dibutuhkan untuk irigasi (m³/Ha)
 q : kebutuhan air irigasi tiap periode pada masing-masing petak (l/dt/ha)
 n : jumlah hari tiap periode (misal: 10 hari)

2.3.2 Volume Air yang Tersedia

Luas lahan yang ditanami tergantung dari debit yang ada atau debit yang tersedia. Debit yang ada pada setiap saluran tidak selamanya tetap. Hal ini terjadi karena adanya perubahan musim.

Volume air dari debit yang ada selama periode tanam mengacu pada debit rerata dari debit andalan. Perhitungan volume irigasi dari setiap perubahan debit selama satu musim tanam menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$V_T = Q_{80} \times n \times 24 \times 60 \times 60 \quad (2 - 17)$$

Dengan:

V_T : volume air tersedia untuk irigasi (m^3)

Q_{80} : debit andalan berdasarkan grid (m^3/dt)

n : jumlah hari dalam satu musim tanam

: (1 musim tanam: 4 bulan x 30 hari = 120 hari)

2.4 Luas Lahan Yang Dapat Ditanami

Luas lahan yang dapat ditanami dari debit yang tersedia dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$L = \frac{V_T}{V_B} \quad (2 - 17)$$

Dengan:

L : luas lahan yang dapat ditanam (Ha)

V_T : volume air tersedia untuk irigasi (m^3)

V_B : volume air yang dibutuhkan untuk irigasi (m^3/Ha)

2.5 Biaya Produksi dan Manfaat Bersih Per Hektar dari Pemakai Irigasi

Biaya produksi adalah semua pengeluaran yang dikeluarkan untuk memperoleh hasil dari aktivitas nilai produksi. Besarnya biaya produksi pertanian tergantung dari faktor-faktor produksi yang digunakan. Faktor-faktor yang mempengaruhi biaya produksi adalah:

- ✓ Bibit
- ✓ Pupuk
- ✓ Obat-obatan dan insektisida
- ✓ Tenaga kerja manusia, hewan dan traktor
- ✓ Lain-lain.

Persamaan yang digunakan untuk menghitung biaya produksi pertanian dan tambak adalah sebagai berikut:

$$\text{Biaya Produksi} = \text{volume} \times \text{harga satuan} \quad (2 - 18)$$

Dengan:

Biaya produksi : (Rp/Ha)

Volume : (satuan/Ha)

Harga satuan : (Rp/satuan)

Catatan : satuan dalam Kg, liter dan lain-lain

Sebelum mendapatkan manfaat kotor, diketahui terlebih dahulu produksi tanaman (ton/Ha) dan harga jual tanaman (Rp/ton). Persamaan untuk menghitung manfaat kotor adalah sebagai berikut:

$$\text{Manfaat kotor} = \text{produksi tanaman} \times \text{harga jual tanaman} \quad (2 - 19)$$

dengan:

Manfaat kotor : (Rp/Ha)

Produksi tanaman : (ton/Ha)

Harga jual tanaman : (Rp/ton)

Sedangkan manfaat bersih (Rp/Ha) dari air irigasi adalah besarnya keuntungan yang diperoleh dari penjualan hasil pertanian dikurangi dengan biaya produksi yang diperlukan selama masa tanam.

$$\text{Manfaat bersih} = \text{manfaat kotor} - \text{biaya produksi} \quad (2 - 20)$$

Dengan:

Manfaat bersih : (Rp/Ha)

Manfaat kotor : (Rp/Ha)

Biaya produksi : (Rp/Ha)

2.6 Keuntungan Sebagai Fungsi Debit

Debit irigasi yang tersedia pada jaringan irigasi merupakan air yang mengalir pada pintu pengambilan atau intake untuk didistribusikan ke petak tersier. Keuntungan sebagai fungsi debit merupakan debit yang dialirkan pada tiap petak tersier selanjutnya dapat diketahui berapa luas yang terairi dengan membandingkan antara air yang dialirkan dengan kebutuhan air sawah. Setelah didapat luas sawah yang terairi (Ha) maka dengan mengalikan manfaat bersih produksi (Rp/Ha) didapat keuntungan.

$$\text{Keuntungan sebagai fungsi debit} = L \times \text{manfaat bersih produksi} \quad (2 - 21)$$

dengan:

Keuntungan sebagai fungsi debit	= (Rp)
L	= Luas lahan terairi (Ha)
Manfaat bersih produksi	= (Rp/Ha)

2.7 Model Optimasi

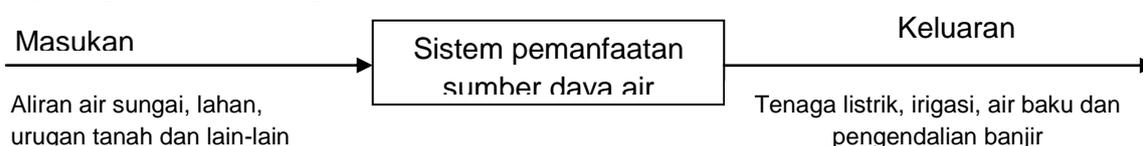
Yang dimaksud dengan model optimasi adalah penyusunan suatu model yang sesuai dengan kenyataan yang nantinya diubah ke dalam model matematik dengan pemisahan elemen pokok supaya penyelesaian yang sesuai dengan sasaran pengambilan keputusan dapat tercapai.

Penyelesaian suatu model optimasi umumnya mempunyai banyak alternative. Setiap penyelesaian harus bersifat layak (*feasible*) yang artinya masih berada dalam batas-batas kendala (*constraint*). Diantara penyelesaian-penyelesaian yang layak tersebut maka dipilih yang optimal.

2.8 Dasar Optimasi

Dalam optimasi terdapat suatu proses untuk memilih atau mencari nilai-nilai variabel agar mendapatkan nilai optimal dari fungsi tujuan serta memenuhi kendala-kendala yang ada. Model matematik mengasumsikan seluruh variabel, parameter-parameter dan kendala system ke bentuk sasaran yang dapat diukur atau dikuantitaskan.

Proses pemanfaatan sumber daya air akan mempunyai arti mengubah macam-macam material baku sebagai masukan menjadi sesuatu yang lebih bermanfaat sebagai keluaran untuk mencapai suatu keputusan (*decision*) yang optimal. Keluaran yang diharapkan dari suatu proses pemanfaatan sumber daya air adalah air irigasi, pengurangan akibat bahaya banjir, tenaga listrik dan lain-lain beberapa masukan seperti lahan, urugan tanah, aliran air sungai dan lain-lain. Proses pemanfaatan sumber daya air dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.6 Sistem pemanfaatan sumber daya air

2.9 Program Dinamik

Dalam masalah optimasi, dicoba untuk melakukan maksimal atau minimalis dari suatu fungsi numeric dengan sejumlah peubah atau fungsi yang membatasi. Banyak sekali alternative yang mungkin dapat digunakan dalam masalah optimasi pemenuhan kebutuhan air irigasi. Dimana setiap alternative mempunyai kekurangan dan kelebihan

sesuai dengan karakteristik dan fungsi utamanya. Dalam studi ini metode yang dipilih adalah program dinamik karena program ini mampu menganalisis masalah-masalah yang bertahap baik menurut waktu maupun tempatnya.

Program dinamik (Dynamic Programming/DP) dirumuskan dan diperkenalkan oleh Richard Bellman pada tahun 1957. Program dinamik memberikan prosedur yang sistematis untuk penentuan kombinasi pengambilan keputusan yang memaksimalkan keseluruhan efektifitasnya. Dalam program dinamik tidak ada rumusan matematis yang standar, karena lebih merupakan suatu tipe pendekatan umum untuk memecahkan masalah.

Optimasi penggunaan air irigasi dalam studi ini dimaksudkan sebagai pengaturan debit air serta luas lahan optimal yang dapat terairi di beberapa daerah dengan memperhatikan beberapa kendala, sehingga didapatkan manfaat sebesar-besarnya. Manfaat optimasi yaitu berupa hasil produksi pertanian yang dihasilkan dengan adanya air irigasi tersebut.

2.9.1 Teknik Dasar Perhitungan Program Dinamik

Teknik perhitungan program dinamik terutama didasarkan pada prinsip optimasi rekursif atau bersifat pengulangan yang diketahui sebagai prinsip optimalisasi (*principle optimally*). Prinsip ini mengandung arti bahwa bila dibuat keputusan yang terdiri dari banyak tahap mulai pada tahap tertentu, kebijakan optimal untuk tahap-tahap selanjutnya tergantung pada ketetapan tahap permulaan tanpa menghiraukan bagaimana diperoleh suatu ketetapan tertentu tersebut.

Persamaan rekursif dapat digunakan baik untuk perhitungan ke depan maupun kebelakang dalam pemecahan masalah-masalah yang multi tahap. Bila keputusan dibuat dari tahap awal bergerak kedepan sampai tahap terakhir, prosedur perhitungannya disebut metode *forward recursif*. Prosedur kebalikannya disebut *backward recursif*. Kedua metode ini mengarahkan ke penyelesaian optimal yang sama dari suatu masalah programisasi dinamis. Setiap penyelesaian dari submasalah digunakan sebagai masukan (input) untuk penyelesaian submasalah berikutnya, baik itu bergerak kedepan maupun kebelakang. Jadi, prosedur perhitungannya meliputi dua aspek yaitu submasalah sekarang yang sedang dalam perhitungan dan hasil perhitungan submasalah yang persis sebelumnya.

2.9.2 Pernyataan Matematis Program Dinamik

Program dinamik tidak mempunyai rumusan matematik yang standar, akan tetapi dapat dijelaskan dalam bentuk rumusan matematik secara umum. Pada gambar

Akibat Tahap ↑

Tahap

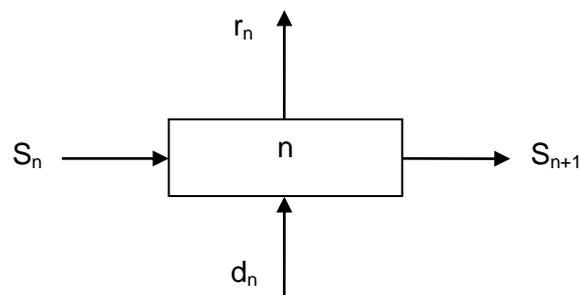
disajikan suatu bentuk keputusan yang dibuat sebagai sebuah tahap dan input parameter sebagai ketetapan.

Gambar 2.7 Proses optimasi satu tahap

Setiap keputusan yang dibuat dalam setiap tahap mempunyai harga relatif. Untuk sejumlah tahap keputusan yang dihubungkan melalui beberapa fungsi transisi mempunyai bentuk umum sebagai berikut:

$$S_{n+1} = t(S_n, d_n) \quad (2 - 22)$$

Secara fungsional untuk setiap tahap dapat disajikan pada gambar berikut.



Gambar 2.8 Sistem n tahap

Dengan:

S_{n+1} : *output* ketetapan

S_n : *input*

N : tahap (1,2,3,...n)

d_n : keputusan

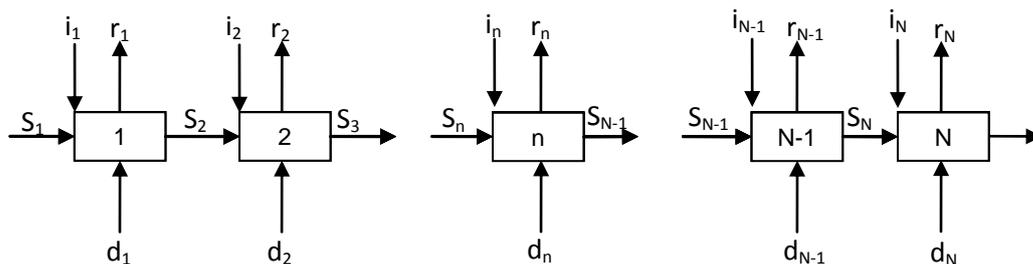
r_n : fungsi pengembalian

Untuk penerapan program dinamik deterministik pada kajian ini dilakukan berbagai penyelesaian sebagai berikut:

1. Tahap yang digunakan berupa bulan
2. Optimasi deterministik dilakukan untuk satu tahun dengan jumlah ada 3 tahap (masing-masing 4 bulanan/1 musim tanam)
3. State berupa volume air yang ada di waduk (kapasitas tampungan efektif waduk)
4. Untuk mempermudah perhitungan dilakukan diskritisasi dan penyeragaman unit variabel-variabel berikut:

- State tampungan air waduk
 - Volume debit inflow pertahap (dari data yang merupakan debit andalan)
 - Volume debit lepasan waduk pertahap (keputusan kebijakan operasi waduk)
5. Dengan mempertimbangkan pertimbangan antara ketelitian dan waktu perhitungan komputer, maka diambil satu unit volume = 10 juta m³.

Untuk n tahap dimana keputusan harus dibuat, fungsi transaksi atau fungsi-fungsi lainnya akan saling berhubungan. Pada gambar 2.9 disajikan suatu sistem n tahap dimana fungsi transisi atau fungsi-fungsi lainnya saling berkaitan.



Gambar 2.9 Elemen-elemen program dinamik

Keterangan:

S_n : tampungan awal tahap ke- n

S_{n+1} : tampungan akhir tahap ke- n

: tampungan awal tahap ke- $n+1$

i_n : inflow tahap ke- n

r_n : keuntungan produksi pertanian

d_n : kebijakan release 4 bulanan (1musim tanam) tahap ke- n

untuk lebih jelasnya dapat dilihat variabel yang digunakan dan penjelasan sebagai berikut:

a. Tahap atau *Stage* (n)

Merupakan bagian dari problem dimana keputusan (*decision*) diambil. Jika suatu problem dapat dipecah-pecah menjadi n sub-problem, maka ada n tahap dalam formulasi program dinamik tersebut.

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

Merupakan keputusan (*decision*) yang diambil pada setiap tahap. Variabel keputusan dalam operasi waduk bisa berupa besarnya lepasan debit yang dilakukan untuk tahap tertentu.

c. *State Variable* (S_n)

Merupakan variabel yang mewakili/menjelaskan state dari sistem yang berhubungan dengan tahap-n. fungsi dari *state variable* adalah menghubungkan tahap yang satu dengan yang lain. *State variable* ini merupakan keluaran dari satu tahap yang menjadi masukan bagi tahap berikutnya. *State variable* dalam operasi waduk adalah tampungan awal ditambah *inflow*.

d. *Stage Return* (r_n)

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

$$r_n = r(S_n, S_{n+1}, d_n)$$

e. *Stage Transformation atau Stage Transition* (t_n)

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

$$S_{n+1} = t_n(S_n, d_n)$$

Stage Transformation dalam studi ini adalah persamaan keseimbangan air waduk (*water balance*).

f. *Inflow / Debit Andalan* (i_n)

Debit andalan digunakan sebagai sumber air yang tersedia bagi tampungan waduk.

2.9.3 Karakteristik Dasar Program Dinamik

Karakteristik dasar program dinamik dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Persoalan dapat dibagi menjadi beberapa tahap, dimana masing-masing tahap diperlukan adanya suatu keputusan
2. Masing-masing tahap terdiri atas sejumlah keputusan yang berhubungan dengan tahap yang bersangkutan.
3. Hasil keputusan yang diambil pada setiap tahap ditransformasikan ke tahap berikutnya.
4. Keputusan terbaik pada suatu tahap tidak tergantung terhadap keputusan yang dilakukan pada tahap sebelumnya.
5. Prosedur pemecahan persoalan dimulai dengan mendapatkan keputusan terbaik dari tahap terakhir (Dimiyati, 1987;225)
6. Penyelesaian program dinamik dimulai dari tahap awal dan bergerak ke tahap akhir (*forward recursive*) atau sebaliknya, dimulai dari tahap akhir bergerak ke tahap awal (*backward recursive*).

7. Setelah semua tahap di optimasi kemudian dilakukan pelacakan balik (*back tracking*) untuk mendapatkan jalur tiap tahap yang optimal.

Pada forward recursive, untuk setiap tahap ditentukan kebijakan optimal berdasarkan kebijakan optimal dari tahap sebelumnya dan fungsi tujuan. Persamaan forward recursive dapat ditulis sebagai berikut:

$$f^*_n(S_n) = \text{opt}_{d_n}[r_n(S_n, d_n) \ O \ f^*_{n-1}(S_{n-1})] \quad (2 - 23)$$

dengan O menyatakan suatu operasi aljabar yang bisa berupa penambahan, pengurangan, perkalian ataupun lainnya sesuai dengan yang dimaksudkan dalam problem yang bersangkutan.

Untuk prosedur backward recursive persamaannya sebagai berikut:

$$f^*_n(S_n) = \text{opt}_{d_n}[r_n(S_n, d_n) \ O \ f^*_{n+1}(S_{n+1})] \quad (2 - 24)$$

Dengan melihat beberapa karakteristik di atas, maka dapat dikatakan dasar program dinamik adalah membagi persoalan menjadi beberapa bagian lebih kecil yang disebut tahap. Kemudian tiap tahap dipecahkan dengan mengoptimalkan keputusan atas tiap tahap sampai seluruh persoalan telah dipecahkan. Keputusan optimal atas seluruh persoalan merupakan kumpulan dari sejumlah keputusan optimal seluruh tahap dan disebut kebijakan optimal.