

OPTIMASI POLA OPERASI WADUK PELAPARADO DI KABUPATEN BIMA, PROPINSI NTB

Moh.Hilmi¹, Aniek Masrevaniah², Widandi Soetopo²

¹Mahasiswa Program Magister Teknik Pengairan Universitas Brawijaya Malang

²Dosen Jurusan Teknik Pengairan Universitas Brawijaya Malang.

Abstrak: Dalam memanfaatkan tampungan waduk harus diingat bahwa kuantitas air sangat terbatas, sehingga pemakaian air harus dilakukan sebaik mungkin. Untuk itu perlu dilakukan pengoperasian penggunaan air waduk yang optimal agar dapat memenuhi berbagai kebutuhan yang direncanakan. Salah satu cara untuk meningkatkan pemanfaatan air adalah dengan teknik optimasi dengan menggunakan program dinamik (Dynamic Program). Program dinamik dapat meniru kelakuan sistem dan dapat digunakan untuk membuat suatu keputusan dari serangkaian keputusan yang terkait. Hal ini sangat sesuai dengan problem optimasi waduk karena pola operasi waduk sangat tergantung dengan waktu sehingga perlu penyelesaian secara bertahap.

Pada studi ini proses optimasi dibagi menjadi 3 tahap, pada setiap tahap akan dialokasikan sejumlah volume air. Variabel yang menghubungkan antara tahap satu dengan yang lain adalah perubahan tampungan waduk sebelum maupun sesudah suatu tahap dengan grid 100 ribu m³, selain itu optimasi juga dilakukan beberapa alternatif dengan merubah perbandingan prosentase luas tanam antara padi dan palawija pada musim tanam II. Dalam optimasi variabel keputusannya (decision) adalah banyaknya volume air waduk yang digunakan yang menghasilkan keuntungan produksi pertanian yang optimal.

Hasil optimasi merupakan pelacakan balik sehingga diperoleh jalur optimal berupa pengalokasian tampungan waduk yang menyebabkan keuntungan produksi pertanian yang maksimal. Keuntungan yang maksimal didapat pada alternatif perbandingan luas tanam padi sebesar 10 % dan palawija sebesar 90 % pada musim tanam II dengan nilai Rp. 57.755.117.590,-. Volume air yang harus diberikan pada masing-masing periode berdasar kebutuhan dan ketersediaan air sehingga didapatkan keuntungan maksimum adalah musim tanam I sebesar 31.300 ribu m³, musim tanam II sebesar 22.300 ribu m³ dan musim tanam III sebesar 15.900 ribu m³. Luas lahan hasil optimasi adalah padi I = 3.806 Ha, padi II = 380 Ha, palawija II = 3.422 Ha dan palawija III = 2.327 Ha. Peningkatan keuntungan produksi pertanian sesudah dioptimasi dibandingkan sebelum dioptimasi adalah Rp. 57.755.117.590,- – Rp. 56.289.203.000,- = Rp. 1.465.914.590,-

Kata kunci: waduk, optimasi, dinamik

Abstract: In utilizing reservoir capacity, it should be notice that water quantity is highly limited, therefore water usage should be as efficient as possible. For this matter, it is necessary to optimize reservoir operation that related with reservoir water usage in order to fulfill all predetermined needs. One means to improve water utilization is by using optimization technique with Dynamic Program. Dynamic Program could imitate system behavior and therefore could be use to make decision from set of related decisions. This is in accord with reservoir optimization problem since reservoir operational pattern is highly dependent with time thus it should be resolve in gradual way.

In this study, optimization process is divided into 3 stages, in each stage there would be some water volume allocated. Variables that connecting each stages is reservoir capacity alteration before or after a stage with grid 100 thousand m³, other than this optimization also done using alternative method by altering comparison percentage in cultivating area between rice plant (paddy) and dry season crops in 2nd cultivating season. During optimization its decision variables is the amount of reservoir water volume that being used to produce optimum profit in agricultural production.

Optimization result is a back trace therefore we could gain optimal path in the form of reservoir capacity allocation that could raise maximum profit in agriculture production. Maximum profit that gained in alternative option for comparison of cultivating area between rice plant in 10% and dry season crop in 90% for second cultivating season with value of Rp. 57.755.117.590,-. Water volume that should be given toward each periods would based on water availability and needs, therefore maximum gain is cultivation season for 31.300 thousand m³, second cultivating season for 22.300 thousand m³, and third cultivating season for 15.900 thousand m³. Area resulted from optimization is paddy I=3.806 Ha, paddy II=380 Ha,

dry-crop II=3.422 Ha, and dry-crop III=2.327 Ha. Improvement in profit of agriculture production after optimization compared with before optimization are Rp. 57.755.117.590,- - Rp. 56.289.203.000,- = Rp. 1.465.914.590,-.

Keywords: *reservoir, optimization, dynamic*

Pembangunan waduk merupakan salah satu alternatif dari sistem penyediaan air. Waduk dibangun untuk menampung kelebihan air pada musim hujan dan nantinya dapat dipergunakan untuk memenuhi berbagai kebutuhan saat musim kemarau diantaranya adalah air baku dan air irigasi.

Dalam memanfaatkan tampungan waduk harus diingat bahwa kuantitas air sangat terbatas, sehingga pemakaian air harus dilakukan sebaik mungkin. Untuk itu perlu dilakukan pengoperasian penggunaan air waduk yang optimal agar dapat memenuhi berbagai kebutuhan yang direncanakan.

Berbagai cara dilakukan untuk meningkatkan pemanfaatan air, salah satunya adalah dengan teknik optimasi. Optimasi merupakan suatu ancangan dalam pemecahan masalah model-model perencanaan berdasarkan pada fungsi matematika dengan batasan-batasan tertentu sehingga merupakan suatu proses sistem untuk menghasilkan keputusan terbaik.

Waduk Pelaparado terletak di Desa Pela, Kecamatan Monta, Kabupaten Bima, Propinsi NTB, berjarak sekitar 48 km arah Selatan Kota Bima. Waduk Pelaparado mempunyai tampungan efektif 15,5 juta m³ dengan tinggi 61,5 m.

Secara umum kondisi fisik Waduk Pelaparado relatif masih baik dan terawat, akan tetapi dengan volume tampungan efektif waduk yang terbatas yaitu 15,5 juta m³ yang diharapkan bisa mencukupi kebutuhan air irigasi seluas 3.814 Ha. Selain untuk mengairi areal irigasi, saat ini Waduk Pelaparado juga dimanfaatkan untuk menyediakan air bersih untuk Kecamatan Monta, Woha dan Belo dengan kapasitas diizinkan sebesar 50 liter/detik. Oleh karena itu perlu adanya pola pengoperasian Waduk Pelaparado sehingga pengeluaran air untuk irigasi dapat diatur secara optimal.

Salah satu metode optimasi untuk penyelesaian masalah tersebut adalah dengan menggunakan program dinamik (*Dynamic Program*). Program dinamik dapat meniru kelakuan sistem dan dapat digunakan untuk membuat suatu keputusan dari serangkaian keputusan yang terkait. Hal ini sangat sesuai dengan problem optimasi waduk karena pola operasi waduk sangat tergantung dengan waktu sehingga perlu penyelesaian secara bertahap.

Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam studi ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Berapa volume air yang dapat dimanfaatkan untuk pemenuhan kebutuhan air irigasi di daerah layanan Waduk Pelaparado?.
2. Dengan penerapan program dinamik, berapa volume air yang dapat diberikan pada masing-masing periode berdasar kebutuhan dan ketersediaan air sehingga didapatkan keuntungan maksimum?.
3. Berapa peningkatan keuntungan produksi pertanian setelah dioptimasi?

Tujuan dan Manfaat

Tujuan dari studi ini adalah untuk memperoleh penjabatan air yang paling optimal pada masing-masing periode sehingga didapatkan keuntungan yang maksimal berdasar kebutuhan dan ketersediaan air yang ada.

Manfaat dari studi ini adalah untuk memberikan gambaran pembagian air yang tersedia di Waduk Pelaparado pada masing-masing periode dengan penerapan program dinamik

KAJIAN PUSTAKA

Kebutuhan Air Irigasi

Perhitungan kebutuhan air irigasi didasarkan pada prinsip keseimbangan air (*water balance*) yang dinyatakan dalam persamaan (Suhardjono, 1994:7):

$$\text{NFR} = (\text{ET} + \text{Pd} + \text{P\&I}) - \text{Reff} \quad (1)$$

dimana:

NFR = Kebutuhan air irigasi (mm/hari)

ET = Kebutuhan air untuk tanaman (mm/hari)

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

P&I = Perkolasi dan infiltrasi (mm/hari)

Reff = Curah hujan efektif (mm/hari)

Kebutuhan Air untuk Tanaman

Kebutuhan air tanaman dirumuskan sebagai berikut (Suhardjono, 1994:13):

$$Cu = c \cdot Eto \quad (2)$$

dimana:

Cu = Penggunaan konsumtif (consumptive use) atau dapat juga dinyatakan dengan ET (evapotranspirasi) (mm/hari)

c = Koefisien tanaman

Eto = Evapotranspirasi potensial (mm/hari)

Evapotranspirasi potensial

Persamaan-persamaan empiris dalam perhitungan evaporasi potensial metode Penman modifikasi ini adalah sebagai berikut:

$$ET_0 = C \times W \cdot Rn \cdot \left(1 - \frac{W}{f(u)}\right) \cdot \left(\frac{ea}{ed}\right)$$

dalam hal ini,

ET_0 = Evaporasi potensial (mm/hari)

C = Suatu faktor penyesuaian dari kondisi siang dan malam (angka koreksi).

W = Faktor yang tergantung pada temperatur rata-rata (suhu) dan ketinggian tempat (elevasi).

Rn = Jumlah radiasi netto (mm/hari)
 $= 0,75 \cdot Rs - Rn1$

Rs = Jumlah radiasi gelombang pendek yang sampai kepermukaan bumi (mm/hari) =

$$0,25 - 0,54 \cdot \frac{n}{N} \cdot Ra$$

Ra = Radiasi gelombang pendek yang memenuhi batas luar atmosfer bumi (angka angot), dalam (mm/hari).

n = Rata-rata lamanya matahari sebenarnya (mm/hari)

N = lamanya cahaya matahari yang dimungkinkan secara maksimum (mm/hari)

$Rn1$ = Radiasi gelombang panjang netto (mm/hari)
 $= f(t) \cdot f(ed) \cdot f(n/N)$

$f(t)$ = fungsi suhu dari tabel hubungan antara suhu (t) dengan nilai $f(t)$.

$f(ed)$ = fungsi tekanan uap
 $= 0,34 - 0,044 \sqrt{ed}$

$f(n/N)$ = fungsi kecerahan matahari

$$= 0,1 - 0,9 \cdot \frac{n}{N}$$

$f(u)$ = fungsi kecepatan angin rata-rata siang hari di ketinggian 2 meter (m/detik)
 $= 0,27 \cdot (1 + 0,864 \cdot U)$

U = kecepatan angin rerata (m/detik)

$ea-ed$ = defisit tekanan uap jenuh dengan tekanan uap sebenarnya pada suhu udara rata-rata (mbar)

$$ed = ea \times RH$$

ea = tekanan uap sebenarnya.

RH = Kelembaban relatif (%)

Kebutuhan Air untuk Pengolahan Lahan

Untuk perhitungan kebutuhan air irigasi selama penyiapan lahan, digunakan metode yang didasarkan pada laju air konstan selama periode penyiapan lahan dengan persamaan sebagai berikut (Anonim, 1986:160):

$$IR = M \cdot e^k / (e^k - 1) \quad (3)$$

$$M = Eo + P \quad (4)$$

$$K = MT/S \quad (5)$$

Dimana:

IR = Kebutuhan air irigasi selama masa penyiapan lahan (mm/hari)

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

Eo = Evaporasi air terbuka ($1,1 \times Eto$) selama proses penyiapan lahan (mm/hari)

P = Perkolasi

T = Jangka waktu penyiapan lahan (hari)

S = Kebutuhan air, untuk penjenjutan ditambah dengan lapisan air 50 mm

e = Bilangan eksponen ($e = 2.7183$)

Analisa Debit Andalan

Debit andalan (*dependable flow*) adalah debit perencanaan yang diharapkan tersedia untuk keperluan tertentu (irigasi, air minum dll) sepanjang tahun dengan resiko kegagalan yang telah diperhitungkan, jadi apabila ditetapkan peluang keandalan sebesar 80%, berarti akan dihadapi resiko adanya debit-debit yang lebih kecil dari debit andalan sebesar 20% pengamatan.

Mengingat ada beberapa seri data debit yang kurang, maka untuk melengkapi data debit tersebut dilakukan perhitungan transformasi data curah hujan menjadi data debit dengan metode FJ Mock.

Metode simulasi mock ini memperhitungkan data curah hujan, evapotranspirasi, dan karakteristik hidrologi daerah pengaliran sungai, dengan asumsi dan data yang diperlukan sebagai berikut:

a. Evapotranspirasi terbatas

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

- Curah hujan setengah bulanan (P)
- Jumlah hari hujan setengah bulanan (n)
- Jumlah permukaan kering setengah bulanan (d), dihitung dengan asumsi bahwa tanah dalam satu hari hanya mampu menahan air 12 mm dan selalu menguap sebesar 4 mm.
- Exposed surface (m %), ditaksir dari peta tata guna tanah, atau dengan asumsi:
m = 20-50% untuk lahan pertanian yang diolah.
Persamaan Evapotranspirasi terbatas sebagai berikut:

$$E_t = E_p - E \quad (6)$$

$$E_r = E_p (d/30) \quad (7)$$

Dari data n dan d stasiun hujan disekitar proyek akan diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$d = a n + b \quad (8)$$

Dimana a dan b adalah konstanta akibat hubungan n (jumlah hari hujan) dan d (jumlah permukaan kering). Substitusi dari persamaan (6) dan (7), diperoleh:

$$E_r/E_p = m/30 \cdot (a \cdot n + b) \quad (9)$$

b. Keseimbangan Air di permukaan Tanah

Keseimbangan air tanah dipengaruhi oleh jumlah air yang masuk ke dalam permukaan tanah dan kondisi tanah itu sendiri. Data yang diperlukan adalah:

- $P - E_t$, adalah perubahan air yang akan masuk ke permukaan tanah.
- *Soil storage*, adalah perubahan volume air yang ditahan oleh tanah yang besarnya tergantung pada ($P - E_t$), *soil storage* bulan sebelumnya.
- *Soil Moisture*, adalah volume air untuk melembabkan tanah yang besarnya tergantung ($P - E_t$), *soil storage*, dan *soil moisture* bulan sebelumnya.
- Kapasitas *soil moisture*, adalah volume air yang diperlukan untuk mencapai kapasitas kelengasan tanah.
- *Water Surplus*, adalah volume air yang akan masuk ke permukaan tanah, yaitu water surplus = ($P - E_t$) – *soil storage*, dan 0 jika ($P - E_t$) < *soil storage*.

c. Ground Water Storage

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

- Koefisien infiltrasi = I
- Faktor resesi aliran air tanah = k
- Initial storage, adalah volume air tanah yang tersedia di awal perhitungan.

Persamaan yang digunakan sebagai berikut:

$$I_n = \text{Water Surplus} \times I \quad (10)$$

$$V = k \cdot V_{(n-1)} + 0,5 (1+k) I_n \quad (11)$$

$$A = V_n - V_{n-1} \quad (12)$$

dimana:

I_n = infiltrasi volume air yang masuk ke dalam tanah

V = volume air tanah

dV_n = perubahan volume air tanah bulan ke-n

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

I = koefisien infiltrasi

A = volume tampungan per bulan

d. Aliran sungai

Faktor yang menentukan besarnya aliran sungai adalah:

- *Interflow* = *Infiltrasi* – Volume air tanah (mm)
- *Direct Run Off* = *Water Surplus* – *Infiltrasi* (mm)
- *Base Flow* = Aliran sungai yang selalu ada sepanjang tahun (m^3/dt)
- *Run Off* = *Interflow* + *Direct Run Off* + *Base Flow* (m^3/dt)

Setelah seri data debit lengkap, kemudian dilakukan perhitungan untuk menentukan debit andalan. Dalam studi ini, perhitungan debit andalan dilakukan dengan metode tahun penentu (*basic year*). Tahun dasar yang digunakan dalam studi ini adalah yang debitnya mempunyai keandalan 80% (Q_{80})

Kehilangan Air di Waduk

Besarnya volume kehilangan air akibat evaporasi dihitung dengan rumus (Sudjarwadi, 1990:185):

$$V_{ew} = E_v(t) \times A(t) \times t \quad (13)$$

dimana:

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

$E_v(t)$ = Evaporasi rata-rata dari perhitungan evaporasi metode Penmann modifikasi (mm/hr).

$A(t)$ = Luas permukaan genangan di waduk (km^2)

Sedangkan besarnya kehilangan akibat rembesan dalam studi ini digunakan rata-rata debit pengamatan yang diukur menggunakan alat ukur V-notch.

Model Optimasi

Pengertian optimasi berhubungan erat dengan maksimasi, tetapi dengan batasan (*constrain*). Mengoptimalkan identik dengan memaksimumkan dengan sumber daya terbatas.

Problem optimasi dalam pengelolaan sumber daya air lebih sering bersifat non-linier. Salah satu metode untuk menyelesaikannya adalah dengan menggunakan Program Dinamik (*Dynamic Programming*).

Elemen-elemen dari model program dinamik adalah (Limantara, L.M. dan Soetopo, W. 2011:43):

1. Tahap/stage (n)
2. Variabel keputusan/Decision Variable (d_n)
3. State variable (S_n)
4. Stage return (r_n)
5. *Stage transformation atau state transition* (t_n)

Sedangkan karakteristik operasional program dinamik dapat diuraikan sebagai berikut (Limantara, L.M. dan Soetopo, W. 2011:45):

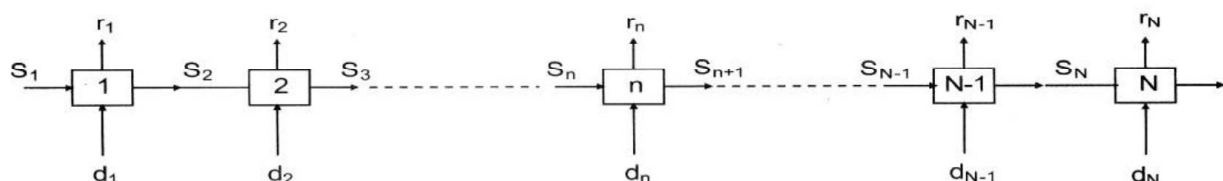
1. Problem dipecah menjadi tahap-tahap (*stage*) dan ada variabel keputusan pada setiap tahap.
2. Setiap tahap mempunyai sejumlah *state*.
3. Efek dari keputusan di tiap tahap adalah:
 - a. menghasilkan *return* berdasarkan fungsi *stage return*,
 - b. mentransformasikan *stage variable* untuk tahap berikutnya lewat *stage transformation*.
4. Keputusan untuk tahap berikutnya tidak tergantung dari keputusan yang telah diambil (pada tahap sebelumnya). Penyelesaian *Dynamic Programming* dimulai dari tahap awal dan bergerak ke tahap akhir (*forward recursive*) atau sebaliknya (*backward recursive*).

5. 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:

$$f'_n(S_n) = \text{opt} [r_n(S_n, d_n) \text{ O } f_{n-1}(S_{n-1})]$$

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 adalah:

$$f'_n(S_n) = \text{opt} [r_n(S_n, d_n) \text{ O } f_{n+1}(S_{n+1})]$$



Gambar 1. Model program dinamik sistem n tahap

Kondisi Daerah Studi

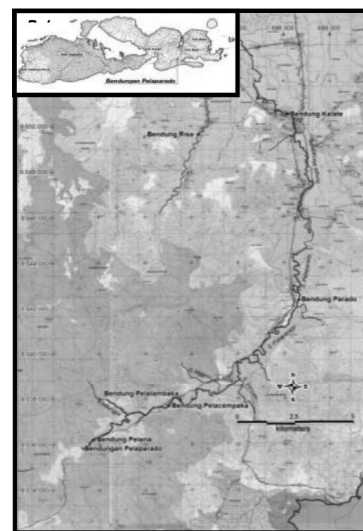
Waduk Pelaparado terletak di Desa Pela, Kecamatan Monta, Kabupaten Bima, Propinsi NTB, berjarak sekitar 48 km arah Selatan Kota Bima. Waduk Pelaparado mempunyai tampungan efektif 15,5 juta m³ dengan tinggi 61,5 m diharapkan mampu mensuplai kebutuhan air irigasi seluas 3.814 Ha.

Daerah layanan irigasi Waduk Pelaparado secara administratif terletak di wilayah Kabupaten Bima yang meliputi 11 (sebelas) desa pada 2 (dua) wilayah kecamatan yaitu: Monta dan Woha dengan total jumlah petani sekitar 15.400 jiwa. Sistem Jaringan irigasi Waduk Pelaparado terdiri dari 5 (lima) Daerah Irigasi (DI) yaitu: Pelaria (180 Ha), DI. Pelacempaka dan Pelambaka (528 Ha), DI Parado (936 Ha), DI Kalate (970 Ha) dan DI Risa (1.200 Ha). Sistem suplesi air irigasi ke masing-masing bendung melalui badan sungai secara seri.

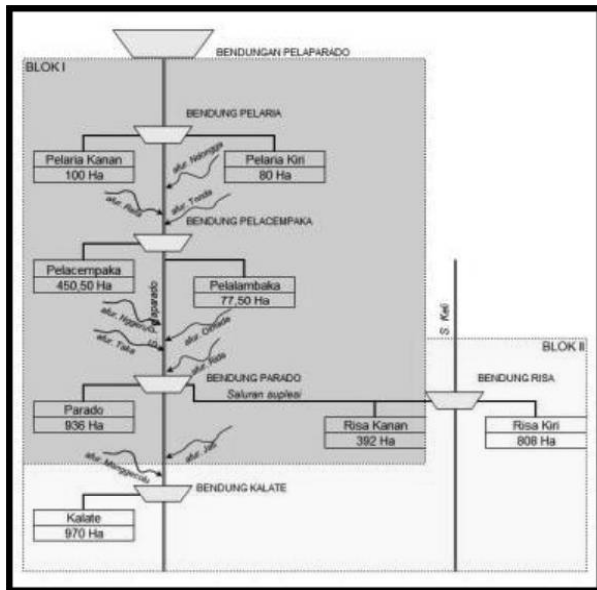
Pembagian Golongan DI Pelaparado Kompleks dibagi dalam sistem kecil maupun besar:

- a. Sistem kecil (lingkup per daerah irigasi), yakni setiap daerah irigasi terbagi dalam 3 golongan tanam (A, B, dan C). Awal tanam masing-masing golongan bergeser 2 mingguan.
- b. Pada Sistem besar (lingkup DI. Pelaparado Kompleks) dibagi dalam 2 Blok (I dan II).

Sedangkan jadwal tanam untuk masing-masing golongan dapat dilihat pada Tabel 1



Gambar 2. Peta Lokasi Studi



Gambar 3. Pembagian Golongan Daerah Irigasi Pelaparado Kompleks

Tabel 1: Jadwal Tanam masing-masing golongan

Blok	Daerah Irigasi	Areal (Ha)	Musim Tanam I	Musim Tanam II	Musim Tanam III
I	DI. Pelaria, DI. Pelacempaka, DI. Parado, dan DI. Risa Kanan	2.036,0			
	a. Golongan A1	739,0	Nop-II	April-I	Ags-I
	b. Golongan B1	537,5	Des-I	April-II	Ags-II
	c. Golongan C1	759,5	Des-II	Mei-I	Sep-I
II	DI. Risa Kiri dan DI. Kalate	1.778,0			
	a. Golongan A2	629,0	Des-I	April-II	Ags-II
	a. Golongan B2	498,0	Des-II	Mei-I	Sep-I
	a. Golongan C2	651,0	Jan-I	Mei-II	Sep-II

Sumber: Anonim. 2006

HASIL ANALISA

Analisa Manfaat

Operasi pemanfaatan potensi air untuk irigasi dapat diartikan sebagai pengaturan debit guna dialokasikan pada tiap-tiap periode tanam sesuai dengan kebutuhan. Dengan optimasi pemanfaatan air waduk pada suatu periode tertentu akan diperoleh manfaat berupa keuntungan produksi pertanian.

Manfaat air adalah besarnya pemberian air irigasi yang digunakan untuk menghasilkan hasil produksi pertanian. Untuk mendapatkan nilai manfaat air irigasi pada tiap pemberian air dapat dilakukan dengan perhitungan sebagai berikut:

1. Volume air yang ada di waduk mengacu pada debit andalan yang selanjutnya digunakan sebagai volume tersedia (Tabel 2).
2. Menghitung total kebutuhan air irigasi dan besar volume air dalam tiap periode tanam.

3. Data biaya produksi padi dan palawija digunakan untuk menghitung manfaat bersih tanaman (Tabel 3).
4. Menentukan keuntungan bersih air irigasi (Tabel 4).
5. Menghitung nilai keuntungan bersih air irigasi pada tiap pemberian air irigasi, untuk musim tanam II nilainya tergantung perbandingan luas padi dan palawija sebagai contoh untuk perbandingan luas padi (10%) dan palawija (90%) dapat dilihat pada Tabel 5.

Perumusan Fungsi Tujuan

Fungsi tujuan adalah suatu fungsi sasaran yang akan dicapai untuk dimaksimalkan atau diminimalkan. Dalam studi ini yang dimaksud dengan fungsi tujuan adalah memaksimalkan keuntungan produksi pertanian dengan mengalokasikan tampungan air di waduk untuk setiap musim tanam.

Perumusan Fungsi Kendala

Pada studi ini keterbatasan sumber daya berupa volume air waduk dan luas lahan yang dapat diairi. Untuk volume air yang tersedia diambil dari volume air waduk yang mengacu pada debit andalan selama periode pengoperasian, sedangkan luas lahan yang ditanami maksimal adalah seluas baku sawah yang ada yaitu sebesar 3.814 Ha. Bila debit yang bisa diberikan pada tiap musim tanam sudah mampu mengairi keseluruhan luas lahan yang tersedia, maka akan dialokasikan ke musim tanam berikutnya dan keuntungan produksinya adalah sama dengan keuntungan produksi ketika mengairi luas lahan yang maksimal. Batas maksimum pemberian air irigasi dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 2. Volume Air Tersedia

Bulan	Periode	Volume Andalan (ribu m3)	Kehilangan				Volume Tersedia (ribu m3)		
			Rembesan (ribu m3)	Evaporasi (ribu m3)	Air Baku (ribu m3)	Jumlah (ribu m3)	Musim Tanam I	Musim Tanam II	Musim Tanam III
Jan	I	5.618,33	21,08	62,42	64,80	148,30	5.470,03	-	-
	II	8.826,14	22,49	66,58	69,12	158,18	8.667,95	-	-
Feb	I	7.029,62	21,08	62,22	64,80	148,10	6.881,52	-	-
	II	6.955,69	18,27	53,92	56,16	128,35	6.827,33	-	-
Mar	I	6.812,28	21,08	56,30	64,80	142,18	6.670,10	-	-
	II	4.478,71	22,49	60,05	69,12	151,65	-	4.327,06	-
Apr	I	4.147,93	21,08	51,50	64,80	137,38	-	4.010,55	-
	II	3.412,27	21,08	51,50	64,80	137,38	-	3.274,88	-
May	I	3.134,95	21,08	51,50	64,80	137,38	-	2.997,57	-
	II	3.110,29	22,49	54,93	69,12	146,54	-	2.963,75	-
Jun	I	2.088,81	21,08	59,88	64,80	145,76	-	1.943,05	-
	II	1.671,05	21,08	59,88	64,80	145,76	-	1.525,29	-
Jul	I	1.336,84	21,08	59,20	64,80	145,08	-	1.191,75	-
	II	1.183,14	22,49	63,15	69,12	154,76	-	-	1.028,38
Aug	I	894,29	21,08	72,17	64,80	158,05	-	-	736,24
	II	715,43	22,49	76,98	69,12	168,58	-	-	546,84
Sep	I	572,34	21,08	95,48	64,80	181,36	-	-	390,99
	II	457,87	21,08	95,48	64,80	181,36	-	-	276,52
Oct	I	458,18	21,08	102,81	64,80	188,69	-	-	269,49
	II	324,33	22,49	109,66	69,12	201,27	-	-	123,06
Nov	I	259,46	21,08	84,16	64,80	170,04	-	-	89,42
	II	1.621,72	21,08	84,16	64,80	170,04	1.451,68	-	-
Dec	I	2.654,82	21,08	62,60	64,80	148,48	2.506,33	-	-
	II	5.462,76	22,49	66,78	69,12	158,38	5.304,37	-	-
Jumlah Volume Tersedia Tiap musim Tanam							43.779,33	22.233,90	3.460,94
Jumlah Volume Tersedia Tiap musim Tanam (dibulatkan)							43.800,00	22.200,00	3.500,00

Sumber: Perhitungan

Tabel 3. Manfaat Bersih Tanaman

Tanaman	Produksi Gabah/ Kedelai (ton/ha)	Produksi Beras Kedelai (ton/ha)	Harga Satuan (Rp/ton)	Total Harga Rp	Biaya Produksi Rp/ha	Manfaat Produksi Rp/ha
Padi	4,6	2,48	5.500.000	13.640.000	5.887.500	7.752.500
Palawija	1,2	1,2	7.200.000	8.640.000	4.240.000	4.400.000

Sumber: Perhitungan

Tabel 4. Keuntungan Bersih Air Irigasi

Musim Tanam	Tanaman	Manfaat Produksi (Rp/ha)	Volume Kebutuhan (m3/ha)						Volume Kebutuhan rata-rata (m3/ha)	Keuntungan Produksi (Rp./m3)
			Gol. A1	Gol. B1	Gol. C1	Gol. A2	Gol. B2	Gol. C2		
			739	537,5	759,5	629	498	651		
MT. I	Padi I	7.752.500	7.791	7.548	8.594	7.548	8.594	9.206	8.223,00	942,78
MT. II	Padi II 10%	7.752.500	14.691	15.530	16.579	15.530	16.579	16.995	15.963,39	485,64
	Palawija II 90%	4.400.000	3.736	4.421	5.093	4.421	5.093	5.781	4.742,15	927,85
	Rata-rata	4.735.250	4.831	5.532	6.242	5.532	6.242	6.903	5.864,27	807,47
MT. III	Palawija III	4.400.000	8.576	7.842	6.189	7.842	6.189	4.287	6.832,47	643,98

Sumber: Perhitungan

Tabel 5. Keuntungan Produksi pada Perubahan Pemberian Air Irigasi

Pemberian Air (ribu m ³)	Keuntungan produksi pertanian (ribu Rp)				
	Musim Tanam I	Musim Tanam II			Musim Tanam III
	Padi I	Padi II 10%	Palawija II 90%	Rata-rata	Palawija III
100	94.278,25	4.856,42	83.506,44	80.747,43	64.398,43
200	188.556,50	9.712,85	167.012,87	161.494,85	128.796,85
300	282.834,75	14.569,27	250.519,31	242.242,28	193.195,28
=====					
20.400	19.232.762,88	990.710,54	17.035.312,83	16.472.474,75	13.137.278,85
20.500	19.327.041,13	995.566,96	17.118.819,27	16.553.222,18	13.201.677,28

Sumber: Perhitungan

Tabel 6. Batas Maksimum Pemberian Air Irigasi

Musim Tanam	Tanaman	Batas Pemberian Air (ribu m ³)							Pembulatan
		Gol. A1	Gol. B1	Gol. C1	Gol. A2	Gol. B2	Gol. C2	Jumlah	
MT. I	Padi I	5.757,57	4.057,09	6.527,04	4.747,74	4.279,74	5.993,34	31.362,52	31.300
MT. II	Padi II	1.085,65	834,76	1.259,16	976,86	825,62	1.106,39	6.088,44	6.000
	Palawija II	2.484,73	2.138,70	3.481,59	2.502,78	2.282,86	3.387,25	16.277,90	16.200
	Jumlah	3.570,38	2.973,46	4.740,75	3.479,64	3.108,48	4.493,64	22.366,34	22.300
MT. II	Palawija III	6.337,85	4.214,96	4.700,63	4.932,49	3.082,18	2.790,91	26.059,02	26.000

Sumber: Perhitungan

Optimasi dengan Program Dinamik

Pada studi ini proses optimasi dibagi menjadi 3 tahap, pada setiap tahap akan dialokasikan sejumlah volume air. Variabel yang menghubungkan antara tahap satu dengan yang lain adalah perubahan tampungan waduk sebelum maupun sesudah suatu tahap dengan grid 100 ribu m³, selain itu optimasi juga dilakukan beberapa alternatif dengan merubah perbandingan prosentase luas tanam antara padi dan palawija pada musim tanam II. Dalam optimasi variabel keputusannya (*decision*) adalah banyaknya penggunaan volume air waduk yang menghasilkan keuntungan produksi pertanian yang optimal. Contoh perhitungan program dinamik untuk alternatif perbandingan luas padi (10 %) dan palawija (90 %) dapat dilihat pada Tabel 7, sedangkan rekapitulasi program dinamik untuk berbagai alternatif dapat dilihat pada Tabel 8.

Hasil Optimasi

Dengan memasukkan nilai-nilai fungsi sasaran dan fungsi kendala, akan diperoleh suatu keputusan. Keputusan tersebut, jika dilakukan pelacakan balik akan diperoleh jalur optimal berupa pengalokasian tampungan waduk yang menyebabkan keuntungan produksi pertanian yang maksimal. Hasil optimasi dapat dilihat pada Tabel 9.

Keseluruhan hasil pada program dinamik, jika dilakukan pelacakan balik akan mendapatkan jalur optimal pada masing-masing musim tanam. Jalur optimal yang dihasilkan adalah volume air waduk yang pada awal dan akhir tanam harus penuh yaitu sebesar 15.500 ribu m³, 15.400 ribu m³, 3.000 ribu m³ dan kembali pada volume 15.500 ribu m³.

Hasil yang dicapai dalam optimasi dapat dilihat pada diagram pada Gambar 4.

Dari perhitungan optimasi alokasi air dengan program dinamik tersebut, maka dapat dibandingkan keuntungan produksi sebelum dan sesudah optimasi seperti terlihat pada Tabel 10.

Dari perbandingan keuntungan tersebut dapat dihitung selisih keuntungan irigasi, yaitu keuntungan setelah optimasi dikurangi dengan keuntungan sebelum optimasi. Selisih keuntungan adalah Rp. 57.755.117.590,- – Rp. 56.289.203.000,- = Rp. 1.465.914.590,-

KESIMPULAN

Dari uraian hasil pembahasan pada bab sebelumnya dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Volume air yang dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan air irigasi di daerah layanan Waduk Pelaparado adalah sebesar 69.500 ribu m³.

Tabel 8. Rekapitulasi Hasil Program Dinamik

No	Musim Tanam II (Padi II + Palawija II)					Musim Tanam III (Palawija)			Keuntungan MT II + MT III (ribu Rp.)	Musim Tanam I (Padi I)			Jumlah Keuntungan (ribu Rp.)
	Padi	Palawija	Alokasi air (ribu m ³)	Keuntungan MT II (ribu Rp.)	Luas terairi (ha)	Alokasi air (ribu m ³)	Keuntungan MT III (ribu Rp.)	Luas terairi (ha)		Alokasi air (ribu m ³)	Keuntungan MT I (ribu Rp.)	Luas terairi (ha)	
1	0%	100%	18.000	16.701.287	3.795,75	16.000	28.936.988	2.341,76	27.005.035	31.300	29.509.092	3.806,40	56.514.127
2	10%	90%	22.300	18.006.676	3.802,69	15.900	10.239.350	2.327,12	28.246.026	31.300	29.509.092	3.806,40	57.755.118
3	20%	80%	26.500	19.232.837	3.793,08	11.700	7.534.616	1.712,41	26.767.453	31.300	29.509.092	3.806,40	56.276.545
4	30%	70%	30.900	20.600.262	3.810,81	7.300	4.701.085	1.068,43	25.301.347	31.300	29.509.092	3.806,40	54.810.439
5	40%	60%	22.200	13.807.289	2.405,03	16.000	10.303.748	2.341,76	24.111.037	31.300	29.509.092	3.806,40	53.620.129
6	50%	50%	22.200	13.029.628	2.144,35	16.000	10.303.748	2.341,76	23.333.376	31.300	29.509.092	3.806,40	52.842.468
7	60%	40%	22.200	12.404.062	1.934,66	16.000	10.303.748	2.341,76	22.707.810	31.300	29.509.092	3.806,40	52.216.902
8	70%	30%	22.200	11.889.944	1.762,32	16.000	10.303.748	2.341,76	22.193.692	31.300	29.509.092	3.806,40	51.702.784
9	80%	20%	22.200	11.459.929	1.618,18	16.000	10.303.748	2.341,76	21.763.677	31.300	29.509.092	3.806,40	51.272.769
10	90%	10%	22.200	11.094.939	1.495,83	16.000	10.303.748	2.341,76	21.398.687	31.300	29.509.092	3.806,40	50.907.779
11	100%	0%	22.200	10.781.262	1.390,68	16.000	10.303.748	2.341,76	21.085.010	31.300	29.509.092	3.806,40	50.594.102

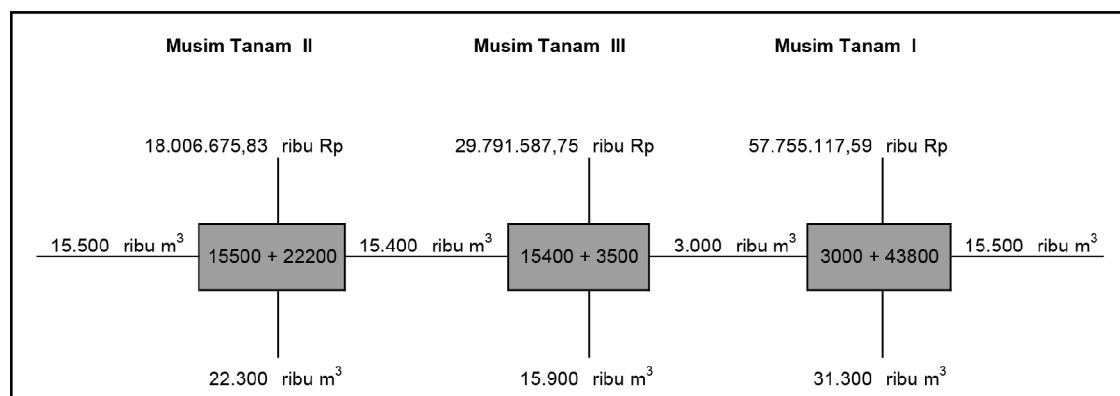
Sumber: Perhitungan

Tabel 9. Hasil Optimasi Pemanfaatan Air Waduk

No	Uraian	Satuan	MT. I	MT. II		MT. III
				Padi	Palawija	
1	Luas areal	ha	3.814,00	3.814,00		3.814,00
2	Tanaman		Padi I	Padi II + Palawija II		Palawija III
3	Alokasi pemberian air	ribu m3	31.300,00	22.300,00		15.900,00
4	Manfaat air irigasi	Rp/m3	942,78	807,47		643,98
5	Volume kebutuhan air irigasi	m3/ha	8.223,00	5.864,27		6.832,47
6	Luas terairi	ha	3.806,40	3.802,69		2.327,12
7	Total intensitas tanam	%	260,5%			
8	Manfaat air irigasi	ribu Rp/ha	7.752,50	4.735,25		4.400,00
9	Keuntungan produksi	ribu Rp	29.509.092,07	18.006.675,83		10.239.349,70
10	Keuntungan produksi total	ribu Rp	57.755.117,59			
11	Tampungan efektif waduk	ribu m3	3.000,00	15.500,00		15.400,00
14	Elevasi muka air waduk		+ 134,27	+ 150,00		+ 149,93

Tabel 10. Perbandingan Keuntungan Irigasi Sebelum dan Setelah Optimasi

Uraian	Satuan	Musim Tanam I	Musim Tanam II		Musim Tanam III
Luas areal	ha	3.814,00	3.814,00		3.814,00
Tanaman		Padi I	Padi	Palawija	Palawija
Alokasi pemberian air	ribu m3	31.300,00	22.300,00		15.900,00
Manfaat produksi	ribu Rp/ha	7.752,50	7.752,50	4.400,00	4.400,00
Volume kebutuhan air irigasi	m3/ha	8.223,00	15.963,39	4.742,15	6.832,47
Manfaat air irigasi	Rp/m3	942,78	485,64	927,85	643,98
Kondisi sebelum optimasi					
Luas tercapai	ha	3.814	1.491	2.323	1.123
Keuntungan irigasi	ribu Rp	29.568.035,00	11.560.528,00	10.220.320,00	4.940.320,00
Keuntungan produksi total	ribu Rp	56.289.203,00			
Kondisi sesudah optimasi					
Luas terairi	ha	3.806	380	3.422	2.327
Keuntungan produksi	ribu Rp	29.509.092,07	2.948.033,46	15.058.642,37	10.239.349,70
Keuntungan produksi total	ribu Rp	57.755.117,59			

**Gambar 4 Diagram Hasil Optimasi**

2. Volume air yang harus diberikan pada masing-masing periode berdasar kebutuhan dan ketersediaan air sehingga didapatkan keuntungan maksimum adalah:
 - a. Musim Tanam I sebesar 31.300 ribu m³
 - b. Musim Tanam II sebesar 22.300 ribu m³
 - c. Musim Tanam III sebesar 15.900 ribu m³
3. Peningkatan keuntungan produksi pertanian sesudah dioptimasi dibandingkan sebelum dioptimasi adalah: Rp. 57.755.117.590,- – Rp. 56.289.203.000,- = Rp. 1.465.914.590,-

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 1986. *Standar Perencanaan Irigasi, Kriteria Perencanaan (KP. 01)*. Departemen Pekerjaan Umum. Jakarta
- Anonim. 2006. *Buku Pedoman Pengoperasian Waduk Pelaparado*. Nippon Koei Co, Ltd
- Anonim. 2009. *Pedoman Analisa Usaha Tani Tanaman Pangan dan Hortikultura*. Dinas Pertanian Kabupaten Bima.
- Adib, A., and Ali, R.M.M. 2009. Optimization of Reservoir Volume by Yield Model and Simulation of it by Dynamic Programming and Markov Chain Method, *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 5 (6): 796-803
- Limantara, LM. 2007. *Optimasi Distribusi Air Irigasi dengan Program Dinamik*, Asrori, Malang
- Limantara, LM., dan Soetopo, W. 2011. *Manajemen Sumber Daya Air*. Bandung: Lubuk Agung.
- P. Liu, J. Zhao, Liping L, Y. Shen, 2012, *Optimal Reservoir Operation Using Stochastic Dynamic Programming*, *Journal of Water Resource and Protection*, 2012, 4, 342-345
- Sajjad, A., and Slobodan P.S. 2000. *System Dynamics Modeling of Reservoir Operations for Flood Management*, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 3
- Soemarto, CD. 1987. *Hidrologi Teknik*. Surabaya: Usaha Nasional.
- Sosrodarsono, S., dan Takeda, K.. 1987. *Hidrologi untuk Pengairan*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Suhardjono. 1994. *Kebutuhan Air Tanaman*. Institut Teknologi Nasional. Malang.

Tabel 7. Program Dinamik (Kondisi Musim Tanam II Palawija 90 % Padi -10 %)

Tahap I Program Dinamik

Tamp. Awal	Tamp. Awal				Tampungan akhir				Tampungan akhir			
Debit inflow (ribu m ³)	0	keuntungan	outflow	keuntungan	0	keuntungan	outflow	keuntungan	3000	keuntungan	outflow	keuntungan
15.500	22.300	37.700	22.300	18.006.676	22.300	18.006.676	22.300	18.006.676	22.300	18.006.676	22.300	18.006.676
Keuntungan	18.006.676		18.006.676		18.006.676		18.006.676		18.006.676		18.006.676	
Keputusan	15.500		15.500		15.500		15.500		15.500		15.500	

Tahap II Program Dinamik

Tamp. Awal	Tamp. Awal				Tampungan akhir				Tampungan akhir				Net benefit max periode lalu
Debit inflow (ribu m ³)	0	keuntungan	outflow	keuntungan	0	keuntungan	outflow	keuntungan	3000	keuntungan	outflow	keuntungan	
0	3.500	3.500	3.500	20.260.621	3.500	20.196.222	3.400	20.196.222	500	18.328.668	400	18.264.270	18.006.676
100	3.500	3.600	3.600	20.325.019	3.500	20.260.621	3.500	20.260.621	600	18.393.066	500	18.328.668	18.006.676
7.000	3.500	10.500	10.500	24.768.511	10.400	24.704.112	10.400	24.704.112	7.500	22.836.558	7.400	22.772.159	18.006.676
7.100	3.500	10.600	10.600	24.832.909	10.500	24.768.511	10.500	24.768.511	7.600	22.900.956	7.500	22.836.558	18.006.676

15.200	3.500	18.700	18.700	30.049.181	18.600	29.984.783	18.600	29.984.783	15.700	28.117.229	15.600	28.052.830	18.006.676
15.300	3.500	18.800	18.800	30.113.580	18.700	30.049.181	18.700	30.049.181	15.800	28.181.627	15.700	28.117.229	18.006.676
15.400	3.500	18.900	18.900	30.177.978	18.800	30.113.580	18.800	30.113.580	15.900	28.246.026	15.800	28.181.627	18.006.676
15.500	3.500	19.000	19.000	30.161.629	18.900	30.097.231	18.900	30.097.231	16.000	28.229.677	15.900	28.165.278	17.925.928
Keuntungan max		30.177.978		30.113.580					28.246.026		28.181.627		
Keputusan		15.400		15.400		15.400		15.400	15.400		15.400		

Tahap III Program Dinamik

Tamp. Awal	Tamp. Awal				Tampungan akhir				Tampungan akhir				Net benefit max periode lalu
Debit inflow (ribu m ³)	0	keuntungan	outflow	keuntungan	0	keuntungan	outflow	keuntungan	3000	keuntungan	outflow	keuntungan	
0	43.800	43.800	31.300	59.687.070	31.300	59.687.070	31.300	59.687.070	31.300	59.687.070	31.300	59.687.070	18.029.676
100	43.800	43.900	31.300	59.622.672	31.300	59.622.672	31.300	59.622.672	31.300	59.622.672	31.300	59.622.672	30.177.978

2.900	43.800	46.700	31.300	57.819.516	31.300	57.819.516	31.300	57.819.516	31.300	57.819.516	31.300	57.725.238	28.310.424
3.000	43.800	46.800	31.300	57.755.118	31.300	57.755.118	31.300	57.755.118	31.300	57.755.118	31.300	57.755.118	28.246.026
3.100	43.800	46.900	31.300	57.690.719	31.300	57.690.719	31.300	57.690.719	31.300	57.690.719	31.300	57.690.719	28.181.627

15.300	43.800	59.100	31.300	49.834.111	31.300	49.834.111	31.300	49.834.111	31.300	49.834.111	31.300	49.834.111	20.325.019
15.400	43.800	59.200	31.300	49.769.713	31.300	49.769.713	31.300	49.769.713	31.300	49.769.713	31.300	49.769.713	20.260.621
15.500	43.800	59.300	31.300	49.705.314	31.300	49.705.314	31.300	49.705.314	31.300	49.705.314	31.300	49.705.314	20.196.222
Keuntungan max				59.687.070		59.687.070		59.687.070		59.687.070		57.755.118	
Keputusan				0		0		0		2900		3000	