

Penggunaan Program Dinamik Deterministik dalam Penentuan Kurva Pengatur Pengoperasian Waduk Berdasarkan Kondisi Musim Tahun Air

Mulyana Wangsadipura¹, Rachmat Suria Lubis²

ABSTRAK

Masalah yang dihadapi pada manajemen sumber daya air adalah ketidaktepatan dalam pengoperasian prasarana bangunan keairan sehingga tidak dapat mencapai hasil yang optimum. Makalah ini menampilkan suatu kajian pola pengoperasian suatu waduk serbaguna dengan menerapkan teknik optimasi. Salah satu teknik optimasi yang diterapkan dalam kajian Pengoperasian suatu Reservoir adalah Program Dinamik Deterministik untuk menetapkan koridor atau kurva pengatur (*rule curve*) sebagai batas pengoperasian berdasarkan tinjauan kondisi kritis musim dalam tahun air yaitu tahun basah, tahun normal dan tahun kering.

Studi kasus yang ditinjau dalam makalah ini adalah Waduk Darma sebagai waduk serbaguna untuk melayani irigasi dan air minum yang terletak di Kabupaten Kuningan Jawa Barat.

Hasil analisis menunjukkan pola pengoperasian waduk yang optimal untuk fungsi tujuan meminimalkan kekurangan air mengacu kepada posisi elevasi tampungan yang harus dicapai untuk setiap bulan, seperti yang tersaji dalam kurva pengatur bulanan.

Kata Kunci : Teknik optimasi, dinamik deterministik, nonlinier, pola operasi, kurva pengatur, manajemen sumber daya air.

ABSTRACT

The problem faced on water resources management is not proper in operating of hydraulic infrastructures, so that the optimum reservoir operation can not be achieved.

This paper presents a study of multiple purpose reservoir operation pattern using optimization technique. Dynamic Deterministic Programming is applied to analyze a rule curve as boundary of reservoir operation based on the critical water year conditions namely wet year, normal year and dry year.

The case study conducted in this paper is Darma Reservoir as multiple purpose reservoir for servicing irrigation and domestic water supply, located in Cisanggarung-Cimanuk river basin at Kuningan District, West Java.

The results of analysis show that the optimum Darma Reservoir operation for the objective function to minimize water shortage refer to the position of storage elevation which should be achieved for each month as presented in the monthly rule curve.

Keywords : *Optimization technique, dynamic deterministic, non linear, operation pattern, rule curve water resources management.*

1. Pendahuluan

Manajemen sumber daya air yang optimal merupakan aspek yang sangat penting dalam pendayagunaan sumber daya air khususnya pada perencanaan operasi waduk. Pola operasi semacam itu dapat dibuat dengan cara teknik optimasi. Model optimasi disebut juga sebagai model pengambilan atau penentuan keputusan, dimana pada dasarnya mempunyai sistematisa kerja yang membandingkan semua keputusan-keputusan yang dapat dilaksanakan dan akhirnya memilih satu alternatif yang terbaik. Ilustrasi skema model optimasi

dapat dilihat pada **Gambar 1**. Model optimasi biasanya dibentuk dengan cara mengkombinasikan perilaku sistem dengan fungsi tujuan dari sistem itu sendiri. Komponen perilaku sistem disebut kendala dan sistem objektif dibentuk menjadi fungsi tujuan, kemudian algoritma matematika yang cocok akan dipilih untuk kedalam model optimasi tersebut. Kadangkala untuk memenuhi persyaratan salah satu algoritma optimasi, model optimasi suatu sistem perlu disederhanakan ke dalam bentuk algoritma optimasi yang dipakai.

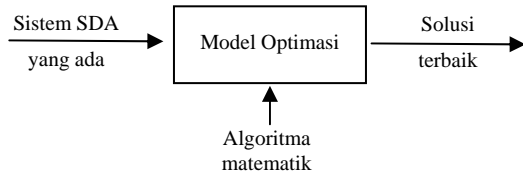
¹Staf Pengajar Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.

²Alumnus Pasca Sarjana, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.



Teknik optimasi mempunyai kelebihan, yaitu:

1. dapat memberikan solusi yang terbaik,
2. semua alternatif dapat dievaluasi secara bersamaan.



Gambar 1 Skema model optimasi

Teknik program dinamik yang dikembangkan pertama kali oleh BELLMAN (1957) merupakan suatu metode pendekatan untuk penyelesaian masalah. Teknik program dinamik mengoptimasikan suatu proses pengambilan keputusan berangkaian dengan memberikan suatu ketetapan rangkaian keputusan yang saling berkaitan satu dengan yang lain, yang merupakan fungsi tempat dan waktu. HALL dan DRACUP (1970) menyatakan bahwa dibandingkan dengan teknik optimasi lainnya, teknik program dinamik memiliki sejumlah keuntungan dalam pemakaiannya untuk optimasi pendayagunaan sumber daya air, keuntungan tersebut yaitu dapat digunakan untuk merangkum tujuan dan kendala yang bersifat non linier, *nonconvex*, dan tidak menerus serta dapat mengakomodir sifat stokastik sistem, dimana sifat tersebut terkait dalam setiap permasalahan sistem sumber daya air. Teknik optimasi program dinamik dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu program dinamik deterministik dan program dinamik stokastik.

Perbedaan antara program dinamik deterministik dan stokastik adalah pada program dinamik deterministik tahap dan status selanjutnya sepenuhnya ditentukan oleh status dan keputusan pada tahap sebelumnya, sedangkan pada program dinamik stokastik tahap dan status berikutnya ditentukan juga oleh distribusi kemungkinan, sehingga tidak sepenuhnya dikontrol oleh status dan keputusan tahap sebelumnya. Program dinamik deterministik memiliki kelebihan yaitu perhitungannya lebih mudah dibandingkan program dinamik stokastik tetapi program dinamik deterministik memiliki keterbatasan dalam memperhitungkan semua kemungkinan masukan (*inflow*), dimana pada program dinamik deterministik dalam mengoptimasi hanya menggunakan satu kemungkinan *inflow*, sehingga bila terdapat banyak kemungkinan maka harus dilakukan banyak perhitungan. Oleh karena itu diperlukan suatu batas pengoperasian yang digunakan sebagai koridor pengoperasian. Batas tersebut dapat dilakukan dengan pendekatan terhadap kemungkinan kejadian *inflow* yaitu dengan pembagian *inflow* yang dapat mewakili tahun basah, normal, dan kering.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Program Dinamik Deterministik

Pada program dinamik deterministik tahap dan status selanjutnya, sepenuhnya ditentukan oleh status dan keputusan pada tahap sebelumnya. Masalah yang dianalisis tidak mengikutsertakan komponen acak sehingga pada fungsi obyektif tidak terdapat faktor risiko.

Persamaan rekursif program dinamik deterministik:

$$f_i(S_b X_i) = \text{maksimal atau minimal } \{r_i(X_i) + f_{i+1}(S_{i+1}) \dots\dots\dots (1)$$

dimana:

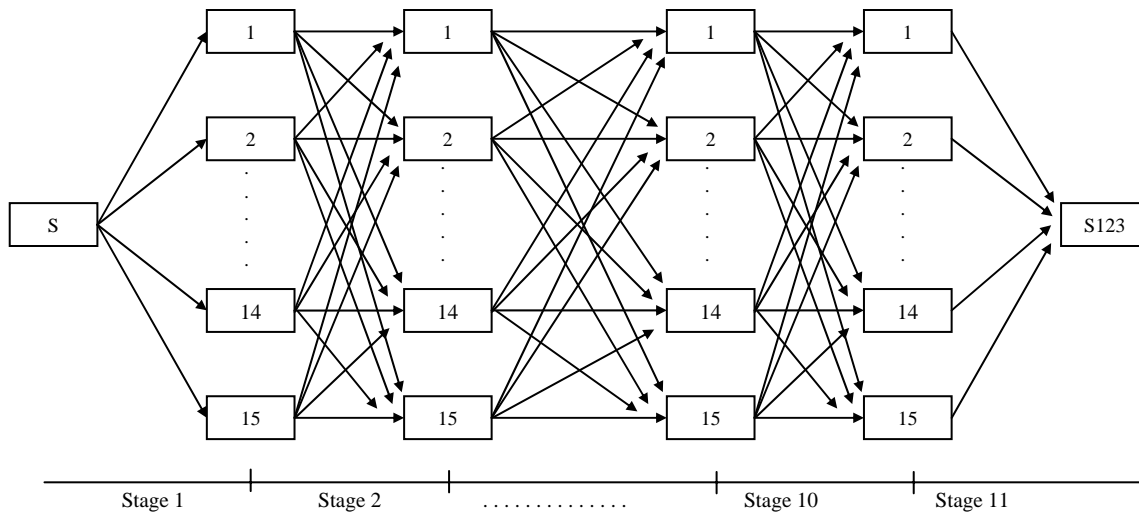
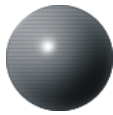
- f_i = fungsi tujuan
- S = *storage*
- i = tahap
- $r_i(X_i)$ = persamaan *return*

Prosedur optimasi tidak menggunakan probabilitas transisi, sehingga nilai rekursif dari tahap sebelumnya diambil yang paling minimal dari keseluruhan kemungkinan berdasarkan tampungan di $t (S_t)$. Nilai *inflow* yang digunakan berdasarkan pembagian jenis tahun dan pada setiap tahap digunakan hanya satu nilai *inflow*, sedangkan tampungan ditentukan pada bulan awal dan akhir. Perhitungan dilakukan secara *backward* dan hasilnya diuji secara *forward*. Hasil perhitungan operasi Waduk Darma antara program dinamik deterministik *forward* dan *backward* menghasilkan *shortage* kuadrat dalam satu siklus operasi yang sama.

Jika terjadi perbedaan pola operasi hal tersebut menunjukkan alternatif pola operasi, tetapi dengan pola operasi yang berbeda harus menghasilkan *shortage* kuadrat yang sama dalam satu siklus. Program ini tidak melakukan iterasi, sehingga perhitungan hanya dilakukan satu kali. Perhitungan baru dimulai dari bulan kedua, sehingga pada program dinamik deterministik hanya terdiri atas 11 tahap dalam satu siklus. Status sistem ditunjukkan dengan tampungan yang dinyatakan dengan kelas tampungan. Skema tahap pada program dinamik deterministik dapat dilihat pada **Gambar 2**.

2.2 Pembagian Kondisi Musim dalam Tahun

Dalam perencanaan pengoperasian waduk, yang bersifat deterministik perhitungan *inflow* didasarkan atas jenis musim dalam tahun, yaitu basah, kering, dan normal. Penentuan jenis musim tersebut berdasarkan tingkat peluang kejadian.



Gambar 2 Skema tahap pada program dinamik deterministik

Distribusi debit air masuk bulanan untuk pola tahun normal ditentukan berdasarkan peluang kejadian 50% dari seluruh data yang ada setelah diurutkan dari debit terkecil sampai debit terbesar atau sebaliknya. Distribusi debit air yang masuk pada tahun basah dan tahun kering dapat ditentukan dari semua data debit yang ada setelah dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu debit yang nilainya lebih besar daripada nilai debit rata-rata dari bulan yang bersangkutan dianggap mewakili pola tahun basah, sedangkan debit yang nilainya lebih kecil daripada nilai debit rata-rata dari bulan yang bersangkutan dianggap mewakili pola tahun kering. Semua debit yang mewakili pola tahun basah diurutkan dari nilai terbesar sampai nilai terkecil dan debit terbesar diberi nomor urut 1 dan seterusnya, untuk menentukan tingkat peluang kejadiannya.

Sebaliknya debit yang mewakili pola tahun kering diurutkan dari nilai debit terkecil sampai nilai terbesar dan debit terkecil diberi nomor urut 1 dan seterusnya untuk menentukan tingkat peluang kejadiannya. Selanjutnya, nilai debit air masuk untuk tahun basah maupun tahun kering ditetapkan pada tingkat peluang kejadian 80%. Didalam perencanaan tingkat peluang tersebut dianggap tidak terlalu optimis atau pesimis. Nomor urut *inflow* yang mewakili suatu jenis tahun ditentukan berdasarkan rumus Weibull (1939) dengan tingkat peluang kejadian berdasarkan jenis tahun.

Rumus Weibull (1939)

$$p = \frac{m}{N+1} \dots\dots\dots(2)$$

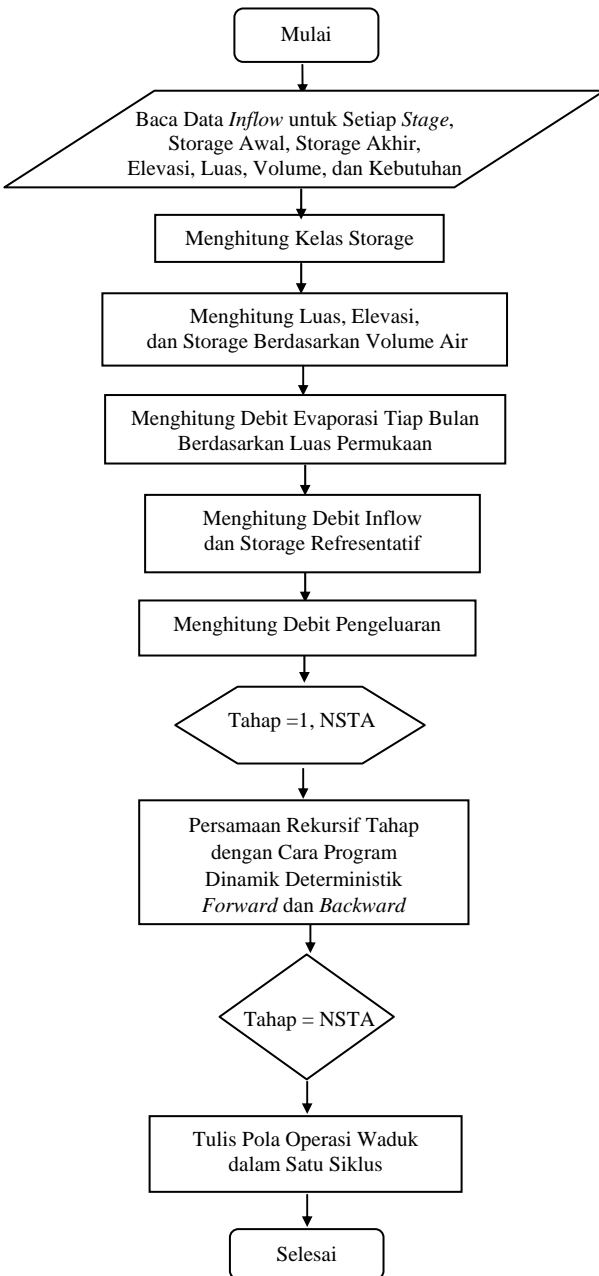
dimana: p = peluang
 m = nomor urut kejadian
 N = banyaknya data

3. PENGEMBANGAN MODEL

3.1 Program Dinamik Deterministik

Prosedur optimasi program dinamik deterministik tidak menggunakan probabilitas transisi, sehingga nilai rekursif dari tahap sebelumnya diambil yang paling minimal dari keseluruhan kemungkinan berdasarkan tampungan di t (S_t). Program ini menggunakan hanya satu nilai *inflow* pada setiap *stage* untuk satu kali perhitungan. Nilai *inflow* yang digunakan berdasarkan pembagian jenis musim dalam tahun. Optimasi operasi waduk dilakukan untuk operasi bulanan. Sedangkan tampungan ditentukan pada bulan awal dan bulan akhir. Perhitungan dilakukan secara *forward* dan *backward* dan dimulai dari bulan kedua, sehingga hanya terdiri dari 11 tahap dalam satu siklus. Status sistem ditunjukkan dengan tampungan yang dinyatakan dengan kelas tampungan. Bagan alir hitungan optimasi disajikan pada **Gambar 3**.

Hasil perhitungan operasi Waduk Darma antara program dinamik deterministik *forward* dan *backward* menghasilkan *shortage* kuadrat dalam satu siklus operasi yang sama. Jika terjadi perbedaan pola operasi hal tersebut menunjukkan alternatif pola operasi, tetapi dengan pola operasi yang berbeda harus menghasilkan *shortage* kuadrat yang sama dalam satu siklus. Pada program dinamik deterministik tidak dilakukan iterasi, sehingga perhitungan hanya dilakukan satu kali.



Gambar 3 Bagan alir model hitungan program dinamik deterministik

3.2 Fungsi Tujuan

Permasalahan dalam kasus operasi waduk multi fungsi adalah berapa besar debit air yang harus dilepaskan dari waduk agar hasil yang didapatkan optimal dalam suatu siklus operasi. Permasalahan tersebut dapat disusun menjadi suatu rangkaian tahap pengambilan keputusan, yaitu berapa jumlah air yang harus dilepas pada setiap tahap untuk mendapatkan hasil optimal dari suatu fungsi tujuan dalam satu siklus operasi. Secara

konkret, permasalahan tersebut dapat diterjemahkan sebagai keputusan melepaskan sejumlah air untuk memenuhi kebutuhan pada tahap tertentu dengan mempertimbangkan masukan, tampungan waduk, dan kendala yang ada. Maksimal atau minimal optimasi dilakukan pada masing-masing tahap, yang berarti memaksimalkan atau meminimalkan fungsi tujuan pada masing-masing tahap, sehingga didapatkan hasil optimal yang sesuai dengan fungsi tujuan dalam satu siklus. Apabila waktu satu tahun mencerminkan satu siklus operasi dan satu bulan merupakan satu tahap, maka permasalahan optimasi waduk dapat diuraikan menjadi optimasi fungsi tujuan bulanan untuk mendapatkan hasil optimal tahunan.

Fungsi tujuan optimasi dari setiap waduk dapat berbeda-beda tergantung dari permasalahan yang ada. Pada program dinamik deterministik untuk Waduk Darma menggunakan fungsi tujuan minimal kekurangan (*minimal shortage*). Persamaan tersebut rekursif untuk fungsi tujuan tersebut adalah:

$$f_i(S_i, X_i) = \text{minimal} \{ (R_i - Kb_i)^2 + f_{i+1}(S_{i+1}) \} \quad (\text{backward}) \dots\dots\dots (3)$$

sehingga,

$$\begin{aligned} f_{11}(S_{11}, X_{11}) &= \text{minimal} \{ (R_{11} - Kb_{11})^2 \} \\ f_{10}(S_{10}, X_{10}) &= \text{minimal} \{ (R_{10} - Kb_{10})^2 + f_{11}(S_{11}) \} \\ f_9(S_9, X_9) &= \text{minimal} \{ (R_9 - Kb_9)^2 + f_8(S_8) \} \\ &- &- \\ &- &- \\ &- &- \end{aligned}$$

$$f_1(S_1, X_1) = \text{minimal} \{ (R_1 - Kb_1)^2 + f_2(S_2) \}$$

sedangkan persamaan rekursif untuk *forward*

$$f_i(S_i, X_i) = \text{minimal} \{ (R_i - Kb_i)^2 + f_{i-1}(S_{i-1}) \} \dots (4)$$

sehingga,

$$\begin{aligned} f_1(S_1, X_1) &= \text{minimal} \{ (R_1 - Kb_1)^2 \} \\ f_2(S_2, X_2) &= \text{minimal} \{ (R_2 - Kb_2)^2 + f_1(S_1) \} \\ f_3(S_3, X_3) &= \text{minimal} \{ (R_3 - Kb_3)^2 + f_2(S_2) \} \\ &- &- \\ &- &- \\ &- &- \end{aligned}$$

$$f_{11}(S_{11}, X_{11}) = \text{minimal} \{ (R_{11} - Kb_{11})^2 + f_{10}(S_{10}) \}$$

dimana:

- R = Debit pelepasan (*release*)
- Kb = Kebutuhan bulanan untuk air irigasi dan air PDAM
- i = Stage (tahap)
- f = Fungsi tujuan
- S = Storage



3.3 Deskritisasi Tampungang

Pembagian kelas tampungan ditentukan berdasarkan pendekatan yang diinginkan terhadap kemungkinan kejadian tampungan. Untuk mewakili semua kemungkinan tampungan yang terjadi pada Waduk Darma, maka tampungan didiskritisasi menjadi 15 kelas tampungan. Selang nilai maksimal dan minimal volume tampungan aktif dibagi menjadi jumlah kelas tampungan (NSC) dengan selang kelas yang sama. Nilai yang mewakili setiap kelas disebut nilai representatif, dimana nilai tampungan representatif terkecil sama dengan nilai *dead storage* dan nilai maksimal sama dengan nilai *maximum storage*, sedangkan jarak antara nilai representatif yang berurutan dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$dx = (maximum\ storage - dead\ storage) / (N - 1) \dots\dots (5)$$

dimana:

- dx = selisih antara nilai tampungan representatif yang berurutan.
- N = jumlah kelas tampungan.

3.4 Fungsi Kendala

3.4.1 Maksimal dan Minimal Tampungan

Kendala (*constraint*) berlaku untuk tampungan waduk. Pada setiap tahap, volume tampungan waduk dibatasi oleh volume maksimal operasi dan volume minimal operasi.

$$S_{min} \leq S \leq S_{max}$$

dimana:

- S_{min} = Tampungan mati (*dead storage*)
- S_{max} = Tampungan maksimal

3.4.2 Persamaan Transformasi Status

Tampungang disuatu waduk pada tahap tertentu memiliki hubungan transformasi dengan tampungan pada tahap sebelumnya dengan suatu persamaan transformasi status (*state transformation equation*) yang didasarkan pada asas kekekalan.

$$S_t = S_{t-1} + Q_t - E_t - L_t - R_t \dots\dots\dots (6)$$

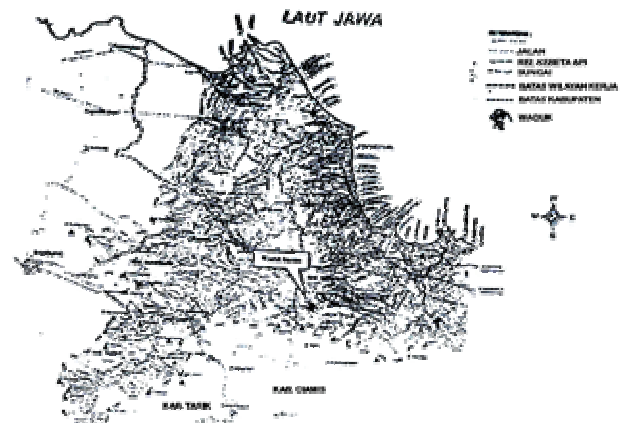
dimana :

- S_t = tampungan waduk pada akhir bulan t
- S_{t-1} = tampungan waduk pada akhir bulan t-1
- E_t = penguapan dari waduk selama bulan t
- Q_t = *inflow* kedalam waduk selama bulan t
- L_t = kehilangan air akibat kebocoran selama bulan t
- R_t = pelepasan dari Waduk Darma selama bulan t

Pada persamaan transformasi status *inflow* untuk program dinamik deterministik menggunakan *inflow* yang mewakili jenis tahun, yaitu basah, kering, dan normal. Evaporasi menggunakan pendekatan evaporasi pada bulan t dikalikan dengan luas permukaan *storage* pada bulan t. Perhitungan kebocoran berdasarkan kebocoran yang terjadi pada level *storage* di bulan t.

4. STUDI KASUS

Model optimasi operasi waduk sangat bergantung pada sistem yang ditinjau. Umumnya, model optimasi disusun khusus untuk sistem tersebut. Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik sistem waduk yang ditinjau sangat diperlukan. Dalam studi ini sistem yang ditinjau adalah sistem Waduk Darma yang terletak di Desa Darma Kecamatan Kadu Gede Kabupaten Kuningan, Propinsi Jawa Barat, kurang lebih 12 km arah barat daya kota Kuningan. Pembangunannya dimulai pada tahun 1959 dan selesai pada tahun 1962. Saat ini Waduk Darma dikelola oleh Badan PSDA. Wilayah kerja BPSDA dapat dilihat pada **Gambar 4**.

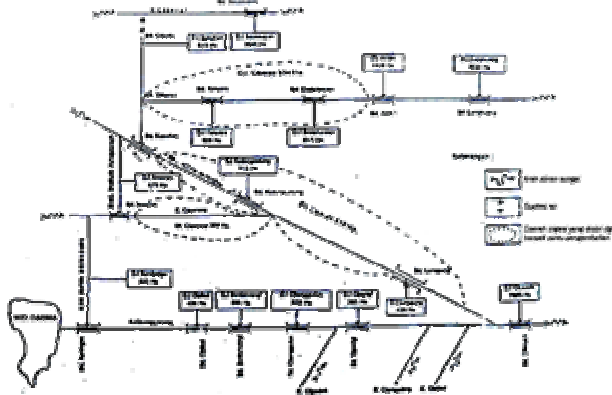


Gambar 4 Wilayah kerja BPSDA
 Sumber: BPSDA WS Cimanuk-Cisanggarung

Debit *inflow* yang masuk ke waduk berasal dari Sungai Cisanggarung dengan luas daerah aliran sungai (DAS) seluas 23,50 km². Kemiringan Sungai Cisanggarung dari kaki hilir bendungan sampai sekitar km 72,00 bervariasi dari 2,78% sampai 0,23% dan sampai ke Laut Jawa menjadi landai sekitar 0,05%. Keadaan topografi di sekitar Waduk Darma merupakan pegunungan dan perbukitan dengan elevasi sekitar ± 1.107 m. Bukit-bukit dengan kemiringan lereng yang cukup besar berada pada sisi kanan Sungai Cisanggarung, sedang pada sisi kiri lebih landai. Permukiman penduduk lebih banyak terdapat pada sisi kiri Sungai Cisanggarung.



Skema jaringan irigasi dari Waduk Darma disajikan pada **Gambar 5**.



Gambar 5 Skema irigasi
 Sumber: BPSDA WS Cimanuk-Cisanggarung

Data teknis Waduk Darma disajikan pada **Tabel 1**. Hubungan antara data elevasi dengan kapasitas tampungan suatu waduk sangat erat. Seringkali keduanya digambarkan secara grafis atau secara numerik. Tujuannya adalah untuk mengetahui kapasitas tampungan aktual suatu waduk pada tinggi duga muka air (DMA) tertentu. Kapasitas tampung suatu waduk cenderung berkurang dari tahun ke tahun yang diakibatkan oleh adanya pengendapan sedimen di dasar waduk.

Tabel 1. Data teknis Waduk Darma

Parameter	
Elevasi Maksimal (m)	+712,680
Volume Air Maksimal (m ³)	38.620.000
Elevasi Minimal (m)	+702,620
Volume Air Minimal (m ³)	31.080.000
Tile Water Level/TWL (m)	+694
Luas DAS Cisanggarung (Km ²)	23.5
Kebutuhan Air Minum (lt/det)	200

Sumber : BPSDA WS. Cimanuk-Cisanggarung

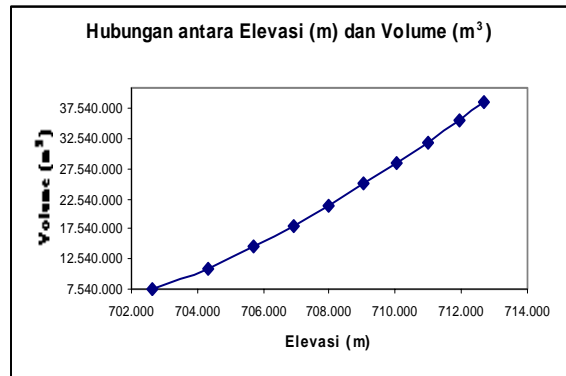
Data hubungan antara elevasi dengan luas permukaan waduk digunakan untuk mengetahui luas permukaan waduk secara langsung dengan membaca tinggi DMA disajikan pada **Tabel 2**. Grafik hubungan antara elevasi, volume, luas permukaan, dan kebocoran disajikan pada **Gambar 6, 7, 8** dan **9**. Debit *inflow* ke waduk tersedia untuk kurun waktu 21 tahun, dari tahun 1980 sampai dengan 2000.

Grafik debit rata-rata bulanan Waduk Darma untuk data debit dari tahun 1980 sampai dengan 2000 disajikan pada **Gambar 10**. Grafik curah hujan tahunan disajikan pada **Gambar 11**. Grafik data evaporasi setiap bulan disajikan pada **Gambar 12**. Grafik data evapotranspirasi potensial setiap bulan disajikan pada **Gambar 13**. Fungsi utama Waduk Darma adalah untuk memenuhi kebutuhan air irigasi dan air minum.

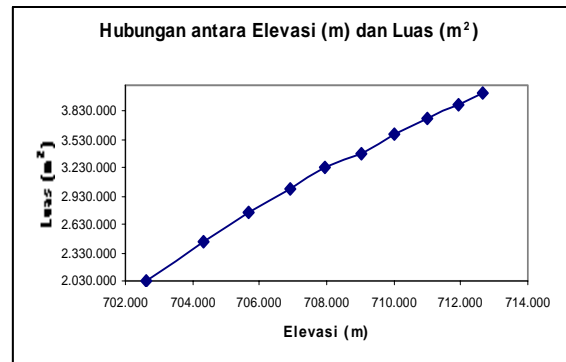
Tabel 2 Hubungan elevasi, volume, luas permukaan, dan kebocoran

Elevasi	Volume (m ³)	Luas (m ²)	Kebocoran (m ³ /detik)
702.620	7.540.000	2.030.000	0.008
704.313	11.040.000	2.453.333	0.008
705.697	14.540.000	2.746.633	0.008
706.913	18.040.000	3.000.467	0.011
707.960	21.540.000	3.230.800	0.014
709.014	25.040.000	3.382.857	0.020
710.013	28.540.000	3.582.133	0.025
711.010	32.040.000	3.741.450	0.030
711.935	35.540.000	3.900.000	0.053
712.680	38.620.000	4.018.000	0.060

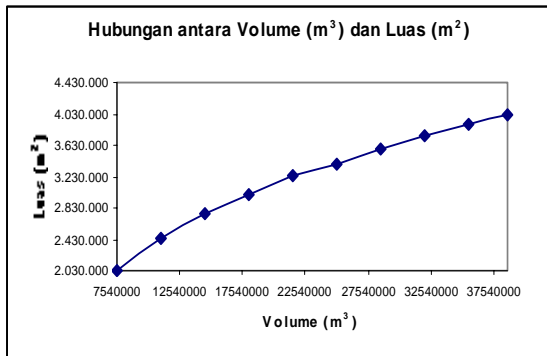
Sumber : BPSDA WS. Cimanuk-Cisanggarung



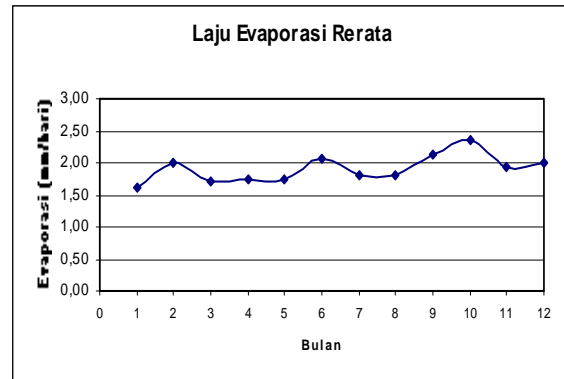
Gambar 6 Grafik hubungan antara elevasi (m) dan volume (m³)



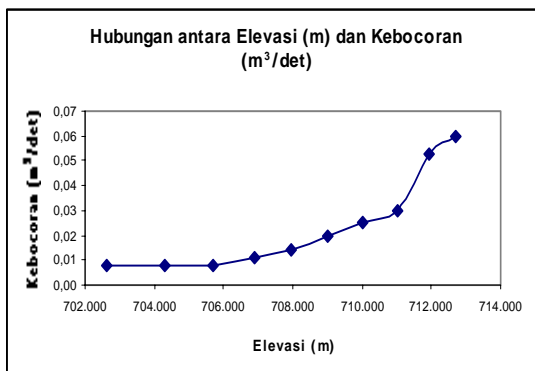
Gambar 7 Grafik hubungan antara elevasi (m) dan Luas (m²)



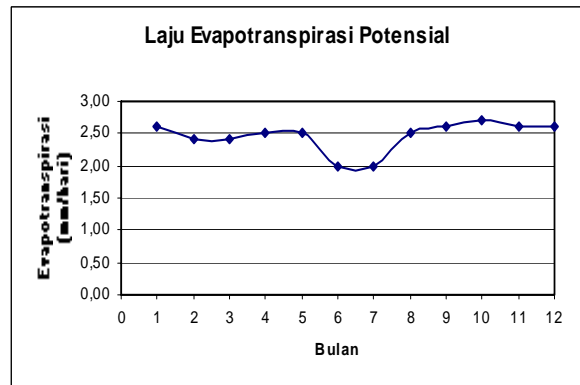
Gambar 8 Grafik hubungan antara volume (m³) dan luas (m²)



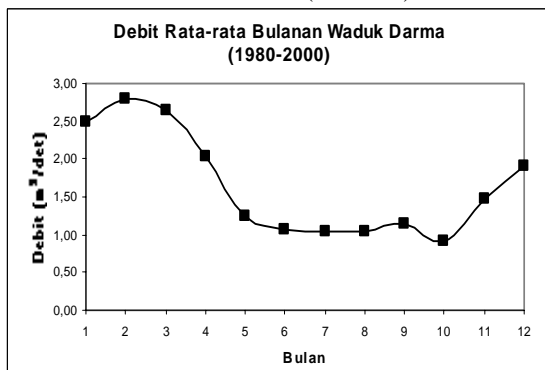
Gambar 12 Grafik laju evaporasi rerata



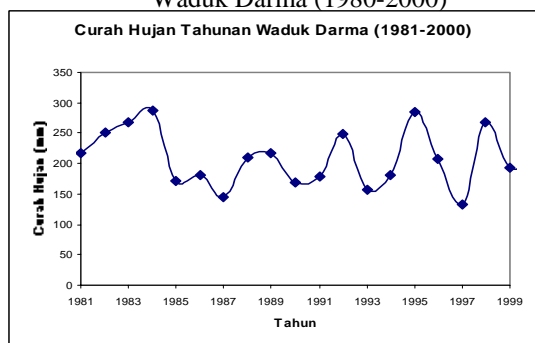
Gambar 9 Grafik hubungan antara elevasi (m) dan kebocoran (m³/detik)



Gambar 13 Laju evapotranspirasi potensial



Gambar 10 Grafik debit rata-rata bulanan Waduk Darma (1980-2000)



Gambar 11 Grafik curah hujan tahunan Waduk Darma (1981-2000)

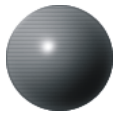
5. PEMBAHASAN DAN HASIL

5.1 Perhitungan Total Kebutuhan

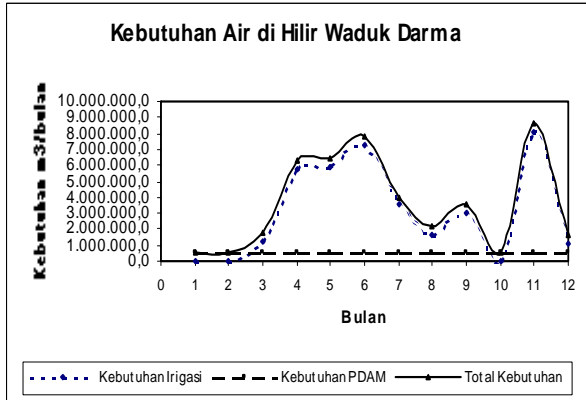
Waduk Darma adalah waduk yang berfungsi untuk memenuhi kebutuhan air minum dan irigasi. Sesuai dengan kebijaksanaan pemerintah daerah, Waduk Darma ditargetkan mensuplai debit air minum sebesar 200 liter/detik dan mengairi secara langsung daerah irigasi seluas 3.216 ha. Total kebutuhan disajikan pada **Tabel 3**. Grafik kebutuhan air di hilir Waduk Darma disajikan pada **Gambar 14**.

Tabel 3. Kebutuhan air di hilir Waduk Darma

Bulan	Kebutuhan Irigasi m ³ /bulan	Kebutuhan PDAM m ³ /bulan	Total Kebutuhan m ³ /bulan
1	0	518.400	518.400,0
2	0	518.400	518.400,0
3	1.214.884	518.400	1.733.284,4
4	5.738.137	518.400	6.256.536,6
5	5.927.777	518.400	6.446.177,1
6	7.323.291	518.400	7.841.691,4
7	3.519.223	518.400	4.037.622,9
8	1.639.011	518.400	2.157.411,4



Bulan	Kebutuhan Irigasi m ³ /bulan	Kebutuhan PDAM m ³ /bulan	Total Kebutuhan m ³ /bulan
9	3.068.983	518.400	3.587.382,9
10	0	518.400	518.400,0
11	8.082.183	518.400	8.600.582,6
12	1.130.611	518.400	1.649.011,3



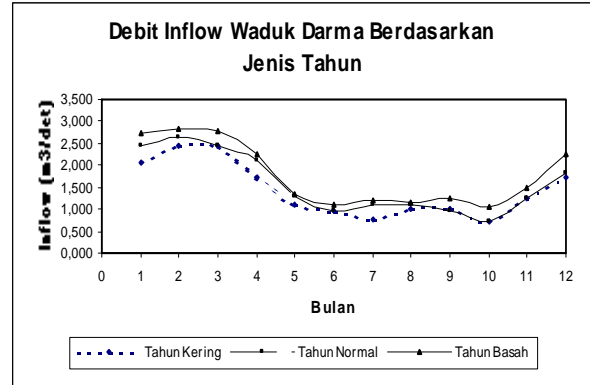
Gambar 14 Grafik kebutuhan air di hilir Waduk Darma.

5.2 Pembagian Jenis Musim dalam Tahun

Pada program dinamik deterministik *inflow* dibagi menjadi tiga berdasarkan jenis musim, yaitu tahun basah, kering, dan normal. Hasil perhitungan debit yang mewakili jenis musim untuk setiap bulan disajikan pada **Tabel 4**. Grafik debit yang masuk ke Waduk Darma berdasarkan jenis musim disajikan pada **Gambar 15**.

Tabel 4 Debit yang masuk ke Waduk Darma berdasarkan jenis musim dalam tahun

Bulan	Debit berdasarkan Jenis musim dalam Tahun (m ³ /detik)		
	Tahun Kering	Tahun Normal	Tahun Basah
Januari	2,047	2,453	2,709
Pebruari	2,460	2,615	2,847
Maret	2,422	2,428	2,801
April	1,713	2,094	2,257
Mei	1,087	1,316	1,363
Juni	0,946	0,946	1,125
Juli	0,785	1,106	1,179
Agustus	0,995	1,123	1,157
September	0,988	0,968	1,244
Oktober	0,720	0,720	1,067
November	1,246	1,246	1,505
Desember	1,705	1,845	2,252



Gambar 15 Grafik debit yang masuk ke Waduk Darma berdasarkan jenis tahun

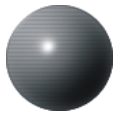
5.3 Diskritisasi Tampungan

Seperti halnya *inflow*, maka nilai tampungan dibagi menjadi beberapa kelas tampungan dengan selang yang sama. Untuk program dinamik deterministik, volume tampungan Waduk Darma dibagi menjadi 15 kelas. Nilai tampungan representatif untuk kelas tampungan dengan program dinamik deterministik disajikan pada **Tabel 5**.

Tabel 5 Nilai tampungan representatif kelas tampungan Waduk Darma dengan program dinamik deterministik (m³/detik)

Kelas Tampungan	Volume (m ³)
1	7.540.000
2	9.760.000
3	11.980.000
4	14.200.000
5	16.420.000
6	18.640.000
7	20.860.000
8	23.080.000
9	25.300.000
10	27.520.000
11	29.740.000
12	31.960.000
13	34.180.000
14	36.400.000
15	38.620.000

Untuk Waduk Darma dikarenakan memiliki nilai rata-rata debit yang kecil, maka diskritisasi tampungan harus besar, karena bila diskritisasi terlalu kecil maka pola operasi tidak dapat digambarkan. Walaupun demikian dalam mengoptimasi Waduk Darma dengan program dinamik harus diingat keterbatasan program tersebut dalam mengatasi dimensi yang besar, yaitu *the curse of dimensionality*.

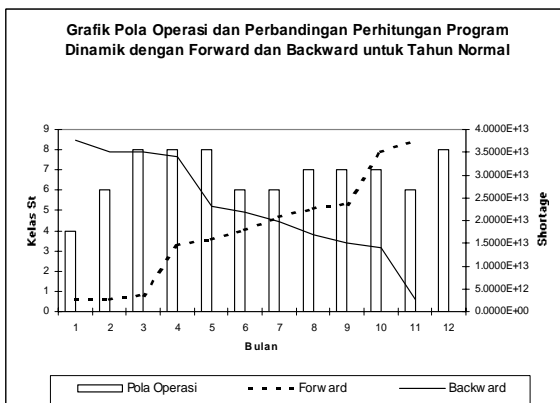


5.4 Hasil Optimasi Pengoperasian Waduk dengan Program Dinamik Deterministik

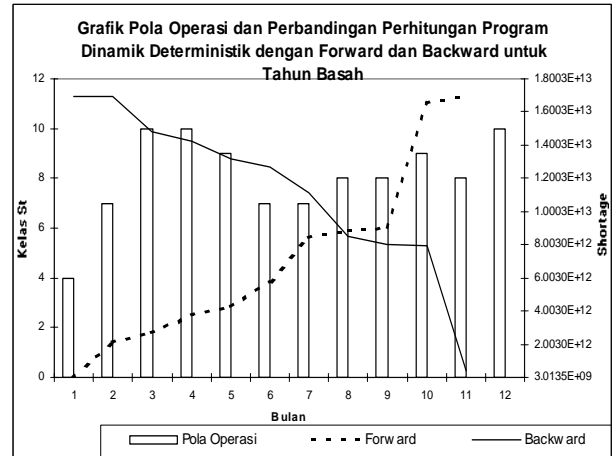
Hitungan optimasi operasi waduk dilakukan dengan model optimasi yang telah disusun sesuai dengan **Gambar 15**. Masukan pada program dinamik deterministik adalah data *inflow* untuk setiap *stage* berdasarkan jenis tahun, tampungan awal, tampungan akhir, elevasi, luas, volume, dan kebutuhan. Hasil optimasi dengan program dinamik deterministik adalah pola operasi yang akan meminimalkan kekurangan air (*water shortage*).

Pada program dinamik deterministik pola operasi ditunjukkan dengan elevasi yang harus dicapai pada setiap bulan untuk setiap jenis tahun. Untuk menguji hasil yang dihitung dengan menggunakan *backward*, maka dilakukan perhitungan dengan menggunakan *forward*. Hasil dari kedua perhitungan tersebut menghasilkan *shortage* kuadrat yang sama dalam satu siklus. Hasil pola operasi dan *shortage* kuadrat yang dihitung dengan *backward* dan *forward* untuk tahun normal, tahun basah, dan tahun kering disajikan pada **Gambar 16, 17, dan Gambar 18**.

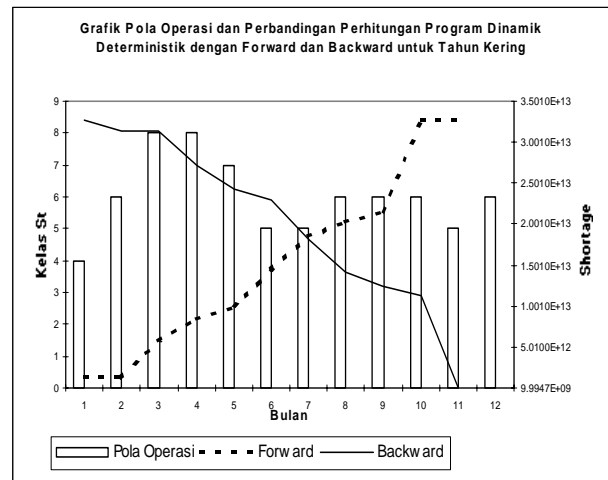
Dari **Gambar 16, 17, dan 18** dapat diketahui bahwa perhitungan dengan menggunakan program dinamik *backward* dan *forward* adalah sama, baik pola operasi maupun *shortage* kuadrat dalam satu siklus.



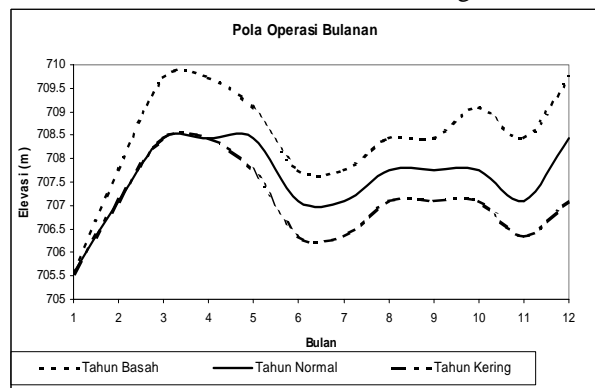
Gambar 16. Grafik pola operasi dan perbandingan perhitungan program dinamik deterministik dengan *forward* dan *backward* untuk tahun normal.



Gambar 17 Grafik pola operasi dan perbandingan perhitungan program dinamik deterministik dengan *forward* dan *backward* untuk tahun basah.



Gambar 18 Grafik pola operasi dan perbandingan perhitungan program dinamik deterministik dengan *forward* dan *backward* untuk tahun kering.



Gambar 19 Grafik pola operasi bulanan untuk tahun normal, tahun basah, dan tahun kering



5.5 Aplikasi Hasil Program Dinamik Deterministik

Dari **Gambar 19** dapat diketahui bahwa untuk tahun basah jika *storage* bulan Januari jatuh pada elevasi 705,563 m, maka *storage* pada bulan Desember akan jatuh pada elevasi 708,424 m. Untuk tahun normal jika *storage* pada bulan Januari jatuh pada elevasi 705,563 m, maka *storage* pada bulan Desember akan jatuh pada elevasi 707,757 m dan pada tahun kering jika *storage* pada bulan Januari jatuh pada elevasi 705,563 m *storage* maka bulan Desember akan jatuh pada elevasi 707,093 m.

Hasil perhitungan untuk tahun basah, kering, normal merupakan koridor pada pengoperasian waduk. Jika pengoperasian mengakibatkan elevasi tampungan mendekati atau melebihi batas tahun basah, hal tersebut harus diantisipasi karena akan membahayakan bila terjadi debit yang besar dimana waduk tidak mampu menampung kelebihan air, sedangkan jika elevasi tampungan mendekati atau lebih kecil dari batas tahun kering hal tersebut akan mengakibatkan waduk tidak dapat memenuhi kebutuhan air di hilir waduk untuk waktu yang akan datang.

5. KESIMPULAN

1. Kebutuhan air minum yang dapat dipasok dari Waduk Darma berdasarkan hasil analisis dan sesuai kebijakan PEMDA adalah 518400 m³/bulan atau $Q = 200$ l/detik, sedangkan banyaknya kebutuhan air maksimal yang dapat dipasok dari Waduk Darma sebesar $Q = 3$ m³/detik yang dapat mengairi daerah Irigasi seluas 3216 Ha.
2. Debit menurut kondisi musim dalam tahun yang disebut sebagai debit tahun kering, tahun normal dan tahun basah yang masuk ke Waduk Darma memperlihatkan kecenderungan menurun pada bulan Mei sampai Oktober, sebaliknya pada bulan November sampai dengan bulan Maret cenderung naik.
3. Hasil optimasi pengoperasian waduk dengan Program Dinamik Deterministik forward dan backward untuk kondisi tahun normal, tahun basah dan tahun kering dalam durasi satu siklus menunjukkan pola operasi yang serupa, begitu pula kondisi kuadrat shortagenya.
4. Hasil perhitungan untuk kondisi ketiga musim tahun basah, tahun normal dan tahun kering merupakan koridor pengoperasian optimal bulanan Waduk Darma. Untuk mengendalikannya elevasi waduk agar tidak lebih tinggi dari elevasi tahun basah atau tidak lebih rendah dari tahun kering sehingga tidak berdampak negatif, seperti terjadi

peristiwa *overtopping* maupun peristiwa kekurangan air (*water shortage*) terhadap pemenuhan kebutuhan air dihilir yaitu kebutuhan air irigasi atau kebutuhan pasokan air minum, maka pengoperasian Waduk Darma harus mengacu kepada pola tersebut.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Makalah ini ditulis berdasarkan hasil penelitian Tesis Program Magister Rachmat Suria Lubis M.T., Alumni Program Studi Teknik Sumber daya Air, Fakultas Pasca Sarjana-ITB. Penelitian tersebut dikerjakan atas bimbingan Ir. Muljana Wangsadipura, M.Eng. Penghargaan khusus disampaikan kepada Dr. Ir. Iwan K. Hadihardaja yang telah memberi petunjuk, saran dan perbaikan guna terwujudnya tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Bellman, R.E. 1957. *Dynamic Programming*. Pricenton University Press, Pricenton N.J.
- Bellman R.E and Drayfus SE, 1962. *Applied Dynamic Programming*. Pricenton University Press, Pricenton N.J.
- Cooper, Leon and Mary W., 1981. *Introduction to Dynamic Programming*. Pergamon Press, USA.
- Dracup, John A., Hall, Warren A 1970. *Water Resources Systems Engineering*. McGraw Hill, USA.
- Dept. PU, 1986. *Buku Petunjuk Perencanaan Irigasi*. Direktorat Jenderal Pengairan, Jakarta.
- Weillbull, 1939. *A-Statistical theory of the strength of material*. Ing. Vetenskaps Akad. Handl. 151, 15, Stockholm
- Hall. W.A and Nathan Buras, 1961. *The Dynamic Programming Approach to Water Resources Development*. J. Geophys, Res.66 (2) : 517-520 (1961).
- Hall. W.A and W.S Butcher and Esogbue, 1968. *Optimization of the Operational of a Multiple Purpose Reservoir by Dynamic Programming*. Water Resources Res 4 (3) : 471 – 477.
- Haan, Charles T., 1977. *Statistical Methods in Hidrology*. The Iowa State Univ. Press, Iowa.
- Wurbs, Ralph A., 1996. *Modeling and Analysis of Reservoir System Operations*. Prentice Hall, USA.
- Yevjevich, Vujica, 1970. *Probability and Statistics in Hydrology*. Water Resources Publications, Colorado, USA.