



OPTIMASI PEMANFAATAN AIR WADUK KEDUNG OMBO DENGAN PROGRAM LINIER

TESIS

Disusun Dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Persyaratan Penyelesaian
Pendidikan Program Magister Teknik Sipil
di Universitas Diponegoro

Oleh :

Nama : Abinentaras Tarigan

N I M : L4A 098 005

**MAGISTER TEKNIK SIPIL
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2001**

UPT-PUSTAK-UNDIP

LEMBAR PENGESAHAN

JUDUL TESIS

**OPTIMASI PEMANFAATAN
AIR WADUK KEDUNG OMBO DENGAN
PROGRAM LINIER**

diajukan oleh :

Nama : Abinentaras Tarigan

N I M : L4A 098 005

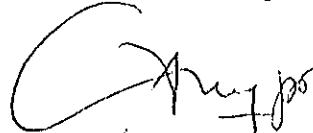
Telah disetujui oleh :

Pembimbing I




(Ir. Suharyanto, Msc)
NIP. 131780090

Pembimbing II



(Ir. Sumbogo Pranoto, MS)
NIP. 131596963

Pembimbing Utama



(Prof. Ir. J. Jetata Hadihardaja)
NIP. 130237471

LEMBAR PENGESAHAN

JUDUL TESIS

**OPTIMASI PEMANFAATAN
AIR WADUK KEDUNG OMBO DENGAN
PROGRAM LINIER**

diajukan oleh :

Nama : Abinentaras Tarigan
N I M : L4A 098 005

Dipertahankan di depan Tim Penguji pada tanggal :

25 Agustus 2001

TIM PENGUJI :

Semarang, Agustus 2001

Ketua :

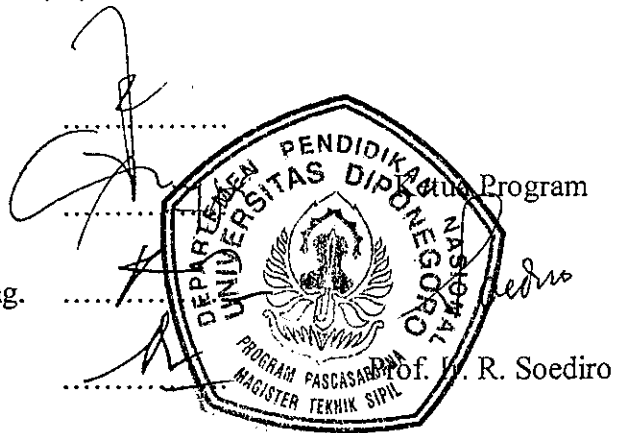
Prof. Ir. R. Soediro



Magister Teknik Sipil
Program Pasca Sarjana
Universitas Diponegoro

Anggota :

1. Prof. Ir. Joetata Hadihardaja
2. Ir. Sumbogo Pranoto, MS.
3. Dr. Ir. Robert J. Kodoatie, M. Eng.
4. Dr. Ir. Suripin, M. Eng.



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami ucapkan atas kemurahan Tuhan Yang Maha Kuasa. Berkat kemurahan-Nya Laporan Tesis ini dapat terselesaikan. Laporan ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan penyelesaian pendidikan Program Magister Teknik Sipil di Universitas Diponegoro, Semarang.

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada:

1. Prof. Ir. Eko Budiharjo, MSc., selaku Rektor Universitas Diponegoro
2. Prof. Ir. Soediro, selaku Ketua Program Magister Teknik Sipil
3. Prof. Ir. Joetata Hadihardaja, selaku Dosen Pembimbing Utama
4. Ir. Suharyanto, MSc., selaku Dosen Pembimbing Pertama
5. Ir. Sumbogo, MS., selaku Dosen Pembimbing Kedua
6. Dr. Ir. Robert J. Kodoatie, M.Eng, selaku Dosen Penguji
7. Dr. Ir. Suripin, M.Eng., selaku Dosen Penguji.
8. Semua Staf dan Dosen Magister Teknik Sipil
9. Dr. Ir. Robert J. Kodoatie, M.Eng dan keluarga atas dukungan moral dan material
10. Bapak dan Ibu yang sangat mengerti kondisi dan situasi anaknya

Selanjutnya harapan kami semoga Tesis ini dapat bermanfaat bagi kepentingan pendidikan dilingkungan Fakultas Teknik Sipil Universitas Diponegoro Semarang dan pihak yang memerlukan.

Semarang, Agustus 2001

Abinentaras Tarigan

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	ii
Kata Pengantar	iii
Daftar Isi	iv
Notasi	vi
Daftar Tabel	xi
Daftar Gambar	xiii
Daftar Lampiran	xiv
Abstraksi	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Sistem Suplesi Waduk Kedung Ombo	1
1.3. Tujuan Studi	4
1.4. Ruang Lingkup Studi	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1. Rangkaian data debit inflow waduk	8
2.1.1 Uji korelasi peringkat metode Spearman	8
2.1.2 Uji Man dan Whitney	10
2.1.3 Uji tanda dari Cox dan Stuart	11
2.1.4 Uji Stasioner	11
2.2. Operasi Waduk	13
2.3. Program Linier Dalam Pengelolaan Sumberdaya Air	14
2.4. Program Linier	15
2.4.1 Program Linier Metode Simplek	17
2.4.2 Spreadsheet Excel's TK-Solver	19
2.5. Simulasi Pengoperasian Waduk	24
2.6. Unjuk Kerja Pengoperasian Waduk	25
2.6.1 Keandalan (Reliability)	25
2.6.2 Kelentingan (Resiliency)	26
2.6.3 Kerawanan (Vulnerability)	28
2.7. Perumusan Model	28
2.7.1 Program Linier Operasi Waduk Kedung Ombo	29
2.7.1.1 Fungsi Kendala	30
2.7.1.2 Fungsi Tujuan	32
2.7.2 Simulasi Operasi Waduk Kedung Ombo	34
BAB III METODOLOGI	37
3.1. Lokasi Studi	37
3.2. Pendekatan Masalah	37
3.2.1 Skenario Pola Debit Inflow Tahunan Waduk	37
3.2.2 Pendekatan Program Linier Operasi Waduk Kedung Ombo	38
3.2.3 Pendekatan Simulasi Pengoperasian Waduk Kedung Ombo	39

3.2.4	Ketersediaan Air di Hilir Waduk Kedung Ombo	40
3.3.	Pengumpulan Data.....	44
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....		49
4.1.	Pengujian Statistik Rangkaian Data Debit Inflow Waduk.....	49
4.1.1	Uji ketidakadaan trend rangkai data debit inflow waduk.....	49
4.1.1.1	Uji korelasi peringkat metode Spearman	49
4.1.1.2	Uji Mann dan Whitney	51
4.1.1.3	Uji Tanda dari Cox dan Stuart.....	52
4.1.2	Uji Stasioner	52
4.2.	Data Masukan Optimasi Program Linier	53
4.2.1	Skenario Pola Debit Inflow Tahunan Waduk.....	53
4.2.2	Kehilangan Air waduk (losses).....	56
4.2.3	Analisis Kebutuhan Air Irigasi	57
4.2.3.1	Evapotranspirasi (Ep).....	58
4.2.3.2	Pergeseran awal pola tanam daerah irigasi.....	59
4.2.4	Nilai Ekonomi Air Waduk	60
4.2.4.1	Nilai Ekonomi Air Waduk untuk Irigasi	60
4.2.4.2	Nilai Ekonomi Air Waduk untuk PLTA	63
4.2.4.3	Nilai Ekonomi Air Waduk untuk Air Bersih.....	64
4.3.	Analisis Pengaruh Luasan Irigasi Ketersediaan Air di Hilir Waduk.....	65
4.4.	Persamaan Matematik Program Linier	66
4.4.1	Persamaan Program Linier Pada Kondisi Inflow Tahun Basah Sekali.....	67
4.4.1.1	Analisis Program Linier	71
4.4.1.2	Analisis Sensitivitas Program Linier.....	72
4.4.2	Evaluasi Hasil Optimasi Kondisi Inflow Tahun Basah Sekali	77
4.4.3	Evaluasi Kondisi Inflow Tahun Yang Lain.....	78
4.4.3.1	Kondisi Inflow Tahun Basah.....	78
4.4.3.2	Kondisi Inflow Tahun Normal.....	79
4.4.3.3	Kondisi Inflow Tahun Kering.....	80
4.4.3.4	Kondisi Inflow Tahun Kering Sekali	81
4.5.	Pola Pengoperasian Studi Optimasi.....	82
4.5.1	Fluktuasi Muka Air Waduk.....	83
4.5.2	Aplikasi Rule Curve.....	84
4.6.	Simulasi Pengoperasian Waduk Target Optimasi	85
4.7.	Simulasi Pengoperasian Waduk Studi Indra Karya.....	91
4.8.	Simulasi Pengoperasian Waduk Aktual (lapangan)	92
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		94
5.1.	Kesimpulan	94
5.2.	Saran	94
DAFTAR PUSTAKA		95
LAMPIRAN		99

NOTASI

a ... all	pendekatan nilai ekonomi air waduk yang melalui outlet turbin (Rp/m^3)
b	nilai ekonomi air waduk musim tanam padi 1 golongan I yang melalui outlet irigasi (Rp/m^3)
c	nilai ekonomi air waduk musim tanam padi 2 golongan I yang melalui outlet irigasi (Rp/m^3)
d	nilai ekonomi air waduk musim tanam palawija golongan I yang melalui outlet irigasi (Rp/m^3)
d_i^+	kelebihan suplesi kebutuhan air irigasi golongan I
d_i^-	kekurangan suplesi kebutuhan air irigasi golongan I
e	nilai ekonomi air waduk musim tanam padi 1 golongan II yang melalui outlet irigasi (Rp/m^3)
ea	Tekanan uap jenuh hasil konversi dari temperatur udara (mbar)
ed	Tekanan uap nyata (mbar)
f	nilai ekonomi air waduk musim tanam padi 2 golongan II yang melalui outlet irigasi (Rp/m^3)
$f(u)$	Nilai dari fungsi kecepatan angin
g	nilai ekonomi air waduk musim tanam palawija golongan II yang melalui outlet irigasi (Rp/m^3)
i	1, 2, 3, ..., m indeks, untuk jumlah persamaan kendala
j	1, 2, 3, ..., n indeks, untuk jumlah variabel putusan
n	jangka waktu pengoperasian
n/N	Penyinaran matahari (%)
ns	nomor urut data
p	persentase waktu disamai atau terlampui
q_t	pelepasan air melalui turbin untuk pembangkit energi listrik dalam satu jam
t	1, 2, 3, ..., 12
u	jumlah data
u1	jumlah data kelompok I
u2	jumlah data kelompok II
AB_t	pelepasan air baku melalui outlet turbin bulan ke-t (juta m^3)
A_{ij}	koefisien fungsi kendala untuk kendala ke-i variabel ke- j
B_m	nilai ruas kanan dari persamaan kendala ke-m
C_j	koefisien fungsi tujuan variabel ke-j
D_t	demand pada waktu ke-t
D_i^+	kelebihan suplesi kebutuhan air irigasi golongan II

D_i^-	kekurangan suplesi kebutuhan air irigasi golongan II
DR_{ISDKL}^1	kebutuhan daerah irigasi Sidorejo Kiri yang dapat disuplesi oleh ketersediaan air di Bendung Lanang bulan ke-t (juta m^3)
DR_{ISED}^1	kebutuhan daerah irigasi Sedadi yang dapat disuplesi oleh ketersediaan air di Bendung Sedadi bulan ke-t (juta m^3)
DR_{IKKA}^1	kebutuhan daerah irigasi Klambu Kanan yang dapat disuplesi oleh ketersediaan air di Bendung Klambu bulan ke-t (juta m^3)
DR_{IKKI}^1	kebutuhan daerah irigasi Klambu Kiri yang dapat disuplesi oleh ketersediaan air di Bendung Klambu bulan ke-t (juta m^3)
DR_{ITR}^1	kebutuhan daerah irigasi Tambak Romo yang dapat disuplai oleh ketersediaan air di Bendung Klambu bulan ke-t (juta m^3)
EL_t	pelepasan air melalui outlet turbin dimana ketinggian headnya untuk pembangkit energi listrik, airnya untuk air baku dan irigasi bulan ke-t (juta m^3)
EMWA	elevasi muka air waduk (m)
E_p	Evapotranspirasi (mm/hari)
EP_t	produksi energi listrik (Kwh/bulan)
	kekurangan suplesi kebutuhan air irigasi golongan I
E_t	kehilangan air bulan ke-t (juta m^3)
F	variabel-F hitung
H_{eff}	tinggi jatuh efektif (m)
H_f	$3,9 \times 10^{-4} \times Q^2$, kehilangan tinggi tekan (m)
I	inflow (m^3 /detik)
IN_t	skenario debit inflow waduk bulan ke-t (juta m^3)
I_t	debit inflow historis waduk bulan ke-t (juta m^3)
KPS	koefisien korelasi peringkat dari Spearman
LE_t	kehilangan air waduk akibat evaporasi bulan ke-t (juta m^3)
L_t	limpasan bulan ke-t (juta m^3)
M_t^+	bobot yang diberikan terhadap D_t^+
M_t^-	bobot yang diberikan terhadap D_t^-
N	jumlah data (tahun)
O	outflow (m^3 /detik)
P	daya (kW)
PAI_t	pelepasan irigasi golongan I melalui outlet turbin bulan ke-t (juta m^3)
PAS_t	kebutuhan air irigasi bulan ke-t (juta m^3)
PA_t	pelepasan air irigasi golongan I melalui outlet irigasi bulan ke-t (juta m^3)
PAT_t	$(PAT + PAI_t)$ jumlah pelepasan irigasi melalui outlet turbin dan outlet irigasi bulan ke-t (juta m^3)
PBI_t	pelepasan irigasi golongan II melalui outlet turbin bulan ke-t (juta m^3)
PB_t	pelepasan air irigasi golongan II melalui outlet irigasi bulan ke-t (juta m^3)

Q_{kdo}	debit rerata inflow bulan tersedia di waduk Kedung Ombo ($m^3/detik$).
Q_{klambu}	debit lateral di Bendung Klambu ($m^3/detik$).
Q_s	debit di Bendung Sedadi sebelum dibangun Waduk Kedung Ombo ($m^3/detik$)
Q_{sedadi}	debit lateral di Bendung Sedadi ($m^3/detik$)
Q'_{KL}	ketersediaan air Sungai Lanang di Bendung Lanang bulan ke-t (juta m^3)
Q'_{SKL}	ketersediaan air Sungai Lusi setelah dikurangi untuk suplesi irigasi di Bendung Dumpil bulan ke-t (juta m^3)
Q'_{LF1}	ketersediaan air <i>Lateral flow</i> di Bendung Sedadi bulan ke-t (juta m^3)
Q'_{LF2}	ketersediaan air <i>Lateral flow</i> di Bendung Klambu bulan ke-t (juta m^3)
R_a	Radiasi extra-terrestrial (mm/hari)
RH	Kelembaban relatif (%)
RL_t	total pelepasan waduk melalui pipa tekan bulan ke-t (juta m^3)
R_m	jumlah total dari nilai peringkat data kelompok I
R_{n1}	Efek temperatur $f(t)$ pada panjang gelombang radiasi
S	jumlah total tanda (+)
S_1	deviasi standart rangkaian data kelompok I
S_2	deviasi standart rangkaian data kelompok II
S_m	Slack atau surplus variabel untuk kendala ke-m
SP_t	limpasan bulan ke-t (juta m^3)
S_t	tampungan waduk akhir bulan ke-t (juta m^3)
S_{t-1}	tampungan waduk awal bulan ke-t (juta m^3)
T	satu musim tanam yaitu 4 bulan
T_{gagal}	jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal secara kontinyu.
T_t	peringkat urutan waktu koleksi data
TWL	tail water elevation (m)
U_2	Kecepatan angin rerata 2 meter diatas permukaan tanah (km/hari)
W_t^+	timbangan yang diberikan terhadap d_t^+
W_t^-	timbangan yang diberikan terhadap d_t^-
\bar{X}_1	rerata hitung rangkaian data kelompok I
\bar{X}_2	rerata hitung rangkaian data kelompok II
X_j	variabel putusan ke-j
Z	fungsi tujuan (juta rupiah)
Z_{hitung}	hitung uji Man – Whitney
α_1	keandalan waduk, gagal total jika kebutuhan tidak terpenuhi
α_2	keandalan waduk tidak gagal total jika waduk dapat mensuplai sebagian dari kebutuhannya
γ	unjuk kerja kelentingan.

η	efisiensi turbin diambil 87% (data proyek)
ΣPAS_t	total air dibutuhkan irigasi selama satu musim tanam yaitu 4 bulan (juta m^3)
ΣPAT_t	total pelepasan irigasi melalui outlet turbin dan outlet irigasi selama selama satu musim tanam yaitu 4 bulan (juta m^3)
$\sum_{t=1}^n Z_t^2$	jumlah total waktu waduk mampu memenuhi kebutuhan ($R_t \geq D_t$)
$\sum_{t=1}^n (1 - Z_t^2)$	jumlah total waktu waduk tidak mampu memenuhi kebutuhan ($R_t \leq D_t$)

DAFTAR TABEL

Tabel 1-1 Data layanan potensi daerah irigasi waduk Kedung Ombo dengan pola tanam padi-padi palawija	3
Tabel 3-1 Debit rerata Bulanan Sungai Lanang Di Bendung Lanang selama 41 tahun (1953-1993), <i>Catchment Area</i> 109 km ²	40
Tabel 3-2 Debit rerata bulanan Sungai Lusi di Bendung Dumpil selama 41 tahun (1953-1993), <i>catchment area</i> 893 km ²	41
Tabel 3-3 Debit rerata aliran lateral bulanan Sungai Serang Di Bendung Sedadi selama 41 tahun (1953-1993), <i>Catchment Area</i> 145 km ²	41
Tabel 3-4 Debit rerata aliran lateral bulanan Sungai Serang Di Bendung Klambu selama 41 tahun (1953-1993), <i>Catchment Area</i> 1319 km ²	42
Tabel 4-1 Data <i>debit rerata inflow</i> tahunan waduk Kedung Ombo (1953-1998)	49
Tabel 4-2 Perhitungan koefisien korelasi peringkat metode Spearman	50
Tabel 4-3 Perhitungan Uji Mann dan Whitney	51
Tabel 4-4 Perhitungan uji tanda Cox dan Stuart	52
Tabel 4-5 Pengelompokan tahun pola debit <i>inflow</i> waduk (46 tahun)	55
Tabel 4-6 Distribusi debit bulanan skenario pola debit <i>inflow</i> waduk (juta m ³)	56
Tabel 4-7 Data klimatologi dan <i>evaporasi</i> rerata bulanan DPS waduk Kedung Ombo ...	57
Tabel 4-8 Data evapotranspirasi di wilayah waduk Kedung Ombo	58
Tabel 4-9 Data potensi kebutuhan air daerah irigasi dengan luas 70.919 ha	60
Tabel 4-10 Data pendapatan bersih per-hektar setiap jenis tanaman	61
Tabel 4-11 Perhitungan nilai ekonomi (Rp/m ³) air waduk berdasarkan jenis tanaman dan volume kebutuhan air	62
Tabel 4-12 Data daftar tarip air minum	64
Tabel 4-13 Rekap nilai ekonomi air waduk untuk masing-masing kebutuhan	65
Tabel 4-14 Pengaruh luasan daerah irigasi suplesi dari debit rerata bulanan yang tersedia di Sungai lanang, Sungai Lusi dan Aliran lateral	65
Tabel 4-15 Kondisi kebutuhan air daerah irigasi setelah memperhitungkan ketersediaan air Sungai Lanang, Sungai Lusi dan aliran lateral (juta m ³)	66
Tabel 4-16 Kebutuhan air luasan dari waduk Kedung Ombo	66
Tabel 4-17 <i>Reduced cost</i> dan nilai optimal variable putusan pelepasan melalui turbin <i>outlet</i> (juta m ³)	74
Tabel 4-18 Sisa kapasitas dan nilai marginal dari kendala pelepasan kebutuhan air irigasi	74
Tabel 4-19 Interval perubahan koefisien fungsi tujuan atau nilai ekonomi air waduk melalui <i>outlet</i> turbin, juta rupiah per-juta m ³	75
Tabel 4-20 Interval perubahan Nilai Ruas Kanan (NRK) atau besarnya kebutuhan air untuk masing-masing tanaman (juta m ³) yang diijinkan program	76
Tabel 4-21 Kebutuhan yang mampu dipenuhi oleh ketersediaan air waduk Kedung Ombo pada kondisi tahun basah sekali	77

Tabel 4-22 Kebutuhan yang mampu dipenuhi oleh ketersediaan air waduk Kedung Ombo pada kondisi tahun basah	78
Tabel 4-23 Kebutuhan yang mampu dipenuhi oleh ketersediaan air waduk Kedung Ombo pada kondisi tahun Normal	79
Tabel 4-24 Kebutuhan yang mampu dipenuhi oleh ketersediaan air waduk Kedung Ombo pada kondisi tahun kering	80
Tabel 4-25 Kebutuhan yang mampu dipenuhi oleh ketersediaan air waduk Kedung Ombo pada kondisi tahun kering sekali	81
Tabel 4-26 Elevasi dan pelepasan pengoperasian waduk hasil optimasi program linier (pola pengoperasian)	82
Tabel 4-27 Kurva karakteristik waduk Kedung Ombo	86
Tabel 4-28 Indikator unjuk kerja simulasi operasi waduk	90
Tabel 4-29 Pelepasan total (irigasi dan air baku) hasil simulasi pengoperasian waduk Kedung Ombo studi Indra Karya	92
Tabel 4-30 Data debit <i>outflow</i> aktual pengoperasian waduk Kedung Ombo	92

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1-1 Peta lokasi waduk Kedung Ombo dan DPS Kali Serang	6
Gambar 1-2 Skema suplesi kebutuhan air dari waduk Kedung Ombo (Indra Karya, 1993)	7
Gambar 2-1 Nilai fungsi tujuan yang tidak terbatas dan tidak riil secara grafis	18
Gambar 2-2 <i>Spreadsheet (Excel's TK-Solver)</i> masukan dan keluaran optimasi dengan solver (Gottfried, 1998).....	23
Gambar 2-3 Bagan alir optimasi Waduk Kedung Ombo dengan Program Linier	34
Gambar 2-4 Bagan alir simulasi pengoperasian waduk Kedung Ombo target optimasi ...	36
Gambar 3-1 Alur logik dari proses simulasi target optimasi program linier.....	40
Gambar 3-2 Diagram sistem daerah irigasi waduk Kedung Ombo	43
Gambar 3-3 Pembagian Volume Tampung Waduk Kedung Ombo	46
Gambar 3-4 Detail skets saluran tekan (<i>pressure conduit</i>)	46
Gambar 3-5 Grafik <i>rule curve</i> rencana pengoperasian waduk Kedung Ombo	47
Gambar 3-6 Bagan alir optimasi pemanfaatan air waduk Kedung Ombo	48
Gambar 4-1 Hidrograf rangkaian data <i>debit rerata inflow</i> tahunan waduk	50
Gambar 4-2 Hasil visualisasi pengelompokan pola debit <i>inflow</i> waduk tahunan.....	54
Gambar 4-3 Grafik hasil distribusi debit bulanan skenario pola debit <i>inflow</i> waduk.....	56
Gambar 4-4 Grafik rerata kebutuhan air setiap tahun sesuai dengan awal pola tanam	59
Gambar 4-5 Tata tanam sistem golongan di wilayah daerah irigasi (padi-padi-palawija)	60
Gambar 4-6 Grafik menunjukkan pelepasan air irigasi dan air baku dimanfaatkan semaksimal mungkin untuk pembangkit energi listrik (tahun basah sekali).....	71
Gambar 4-7 Pendapatan maksimal total selama setahun untuk skenario pola debit <i>inflow</i> tahun basah sekali.....	73
Gambar 4-8 Pola pengoperasian pelepasan hasil studi optimasi waduk Kedung Ombo ...	82
Gambar 4-9 <i>Rule curve</i> studi optimasi pengoperasian waduk Kedung Ombo.....	83
Gambar 4-10 Kurva lengkung kapasitas waduk Kedung Ombo (<i>originil</i>)	87
Gambar 4-11 Grafik pelepasan total optimasi program linier dan simulai pengoperasian waduk target program linier.....	91

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 Hasil Analisis Optimasi Program Linier Skenario Pola Debit Inflow Tahun Basah Sekali	99
LAMPIRAN 2 Hasil Analisis Optimasi Program Linier Skenario Pola Debit Inflow Tahun Basah.....	105
LAMPIRAN 3 Hasil Analisis Optimasi Program Linier Skenario Pola Debit Inflow Tahun Normal	111
LAMPIRAN 4 Hasil Analisis Optimasi Program Linier Skenario Pola Debit Inflow Tahun Kering.....	117
LAMPIRAN 5 Hasil Analisis Optimasi Program Linier Skenario Pola Debit Inflow Tahun Kering Sekali	123
LAMPIRAN 6 Hasil Analisis Simulasi Pengoperasian Waduk Sepanjang 46Tahun Dengan Mengimplementasikan Pelepasan Hasil Optimasi	129
LAMPIRAN 7 Hasil Analisis Pergeseran Awal Pola Tanam Untuk Memperoleh Kebutuhan Air Irigasi Yang Paling Minimum (Pola Tanam Padi-Padi-Palawija)	142
LAMPIRAN 8 Tabel Distribusi-t dan Tabel Normal Standar Untuk Analisis Statistik.	155

ABSTRAK

Studi ini bertujuan untuk mengoptimalkan pemanfaatan air waduk Kedung Ombo untuk memenuhi kebutuhan Irigasi, Air Baku dan PLTA. Metode optimasi studi ini dengan mempergunakan program linier. Optimasi program linier mempergunakan data debit *inflow* waduk sepanjang 46 tahun (1953-1998).

Untuk keperluan analisis, data debit *inflow* waduk sepanjang 46 tahun di skenario menjadi 5 kelompok debit *inflow* waduk tahunan, dimana masing-masing kelompok terdiri dari sejumlah tahun tertentu. Skenario pola debit *inflow* waduk merupakan rerata bulanan dari beberapa jumlah tahun yang termasuk dalam satu kelompok jenis tahun tertentu. Kelompok tahun tersebut adalah : tahun basah sekali, tahun basah, tahun normal, tahun kering dan tahun kering sekali. Masing-masing dari skenario pola debit *inflow* waduk tahunan digunakan sebagai masukan/*input* pada program linier.

Karena optimasi program linier banyak menggunakan asumsi-asumsi maka simulasi dipergunakan untuk mengetahui unjuk kerja pengoperasian waduk seandainya waduk dioperasikan dengan menggunakan pelepasan hasil dari optimasi program linier. Pada studi ini proses simulasi pengoperasian waduk dilakukan sepanjang 46 tahun data debit yang terdiri dari lima kelompok debit *inflow* waduk tahunan. Sehingga simulasi tersebut merupakan gabungan dari ke lima skenario pola debit *inflow*. Simulasi pengoperasian waduk dengan *input* pelepasan hasil dari optimasi program linier diperoleh keandalan waduk sebesar 99,64%.

Hasil yang diperoleh dari pengoperasian waduk hasil studi untuk kondisi debit *inflow* Tahun Basah Sekali dapat mengairi luas daerah irigasi rerata 43.997,35 ha/tahun dengan debit air yang tersedia 1.030,61 juta m³/tahun, Tahun Basah rerata 37.826,82 ha/tahun dengan debit air yang tersedia 829,81 juta m³/tahun, Tahun Normal rerata 34.500,69 ha/tahun dengan debit air yang tersedia 735,40 juta m³/tahun, Tahun Kering rerata 29.432,88 ha/tahun dengan debit air yang tersedia 598,33 juta m³/tahun dan Tahun Kering Sekali rerata 22.914,00 ha/tahun dengan debit air yang tersedia 352,73 juta m³/tahun.

Hasil studi Indra Karya pada kondisi debit *inflow* Tahun Basah dapat mengairi luas daerah irigasi rerata 41.040,27 ha/tahun dengan debit air yang tersedia 929,26 juta m³/tahun, Tahun Normal rerata 33.180,79 ha/tahun dengan debit air yang tersedia 835,51 juta m³/tahun, Tahun Cukup rerata 24.284,95 ha/tahun dengan debit air yang tersedia 679,70 juta m³/tahun dan Tahun Kering rerata 14.164,42 ha/tahun dengan debit air yang tersedia 393,77 juta m³/tahun. Untuk kebutuhan air baku sebesar 15,94 juta m³/bulan dari hasil analisis kedua studi dapat terpenuhi.

Produksi energi listrik tahunan dari pemanfaatan air yang dilepaskan melalui katup turbin untuk hasil studi optimasi 73,17 GWh sedangkan hasil studi Indra Karya 65,76 GWh. Pendapatan rerata pemanfaatan air waduk hasil studi optimasi sebesar Rp. 409,05 miliar sedangkan hasil studi Indra Karya sebesar Rp. 369,46 miliar.

Sedangkan untuk perbandingan studi optimasi dengan pengoperasian aktual diambil reratanya. Dimana pelepasan rerata aktual sebesar 676,97 juta m³ setiap tahun sedangkan dari hasil studi optimasi dengan program linier memberikan pelepasan rerata sebesar 794,88 juta m³ setiap tahun. Dan pendapatan total dari studi optimasi sebesar Rp. 409,05 miliar sedangkan untuk pengoperasian aktual sebesar Rp. 349,89 miliar.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pembangunan waduk pada umumnya bertujuan untuk membantu mengatasi masalah kebutuhan sumberdaya air yang semakin meningkat dari waktu ke waktu sesuai dengan perkembangan suatu wilayah. Indra Karya pada tahun 1993 telah di tunjuk oleh Proyek Jratunseluna untuk melakukan studi ulang terhadap sistem operasi waduk dan menetapkan pola operasi waduk yang berupa *rule curve*, agar pengeluaran air waduk dapat dikontrol untuk memenuhi kebutuhan.

Sebagai parameter masukan studi Indra Karya meliputi: debit ketersediaan air Sungai Serang yang masuk ke Waduk Kedung Ombo sebagai debit andalan (*dependable discharge*), kebutuhan air irigasi yang ditentukan berdasarkan pola tanam padi-padi-palawija, luas daerah irigasi, kebutuhan air baku, dan *evaporasi*.

Dalam rangka pemenuhan kebutuhan irigasi dan air baku, air waduk Kedung Ombo didistribusikan dengan media Sungai Serang dan di hilir waduk terdapat beberapa bendung yang dipergunakan untuk menaikkan muka air sungai agar air dapat dialirkan secara gravitasi maupun dengan cara dipompa untuk memenuhi kebutuhan irigasi dan air baku. Bendung tersebut adalah Bendung Sidorejo yang dihilirnya terdapat Bendung Sedadi dan dihilir Bendung Sedadi terdapat Bendung Klambu (lihat Gambar 1-2).

1.2. Sistem Suplesi Waduk Kedung Ombo

Pada saat ini air waduk Kedung Ombo dipergunakan untuk memenuhi kebutuhan air irigasi, air baku dan PLTA. Untuk memenuhi kebutuhan di hilir, air waduk dialirkan melalui *inlet* yang mana *outlet*-nya terbagi menjadi dua. Kedua *outlet* tersebut adalah *outlet* irigasi dan *outlet* turbin. Diketahui pada saat ini air waduk Kedung Ombo diutamakan untuk memenuhi kebutuhan air irigasi dan air baku.

Debit air untuk memenuhi kebutuhan irigasi dan air baku dihilir waduk dimanfaatkan semaksimal mungkin untuk pembangkit listrik tenaga air (PLTA) dengan syarat debit tidak melebihi kapasitas maksimum *outlet* turbin. Tetapi jika kebutuhan di hilir masih belum terpenuhi dan debit yang mengalir sudah mencapai kapasitas maksimum *outlet*

turbin maka *outlet* irigasi dapat dibuka dengan syarat ketersediaan air di waduk masih mencukupi.

Kebutuhan air dari sistem waduk Kedung Ombo merupakan jumlah dari beberapa kebutuhan air irigasi daerah irigasi yang mendapat air dari waduk Kedung Ombo, dan kebutuhan air baku. Air yang dilepaskan dari waduk Kedung Ombo akan didistribusikan kebeberapa daerah irigasi dengan melalui Bendung Sidorejo, Bendung Sedadi dan Bendung Klambu sesuai dengan kebutuhannya pada masing-masing bendung. Perincian Kebutuhan air tersebut dapat disebutkan sebagai berikut:

1. Bendung Sidorejo

Bendung Sidorejo terletak tepat di hilir waduk Kedung Ombo. Luas daerah pengaliran antara Bendung Sidorejo dan waduk Kedung Ombo relatif kecil. Oleh karenanya aliran lateralnya diasumsikan nol. Sehingga ketersediaan air di Bendung Sidorejo hanya dari waduk Kedung Ombo. Air yang diambil di *Intake* bendung Sidorejo untuk memenuhi kebutuhan daerah irigasi Sidorejo seluas 5.186 ha, daerah irigasi Sidorejo Kiri seluas 1.818 ha dan kebutuhan air baku untuk kota Purwodadi 150 l/det. Kebutuhan air di daerah irigasi Sidorejo Kiri juga dapat tambahan suplesi dari Bendung Lanang.

2. Bendung Sedadi

Bendung Sedadi terletak dihilir Bendung Sidorejo dengan jarak sekitar 20 km. Mengingat Bendung Sedadi terletak cukup jauh dari Bendung Sidorejo dan luas daerah pengaliran antara Bendung Sedadi dan Bendung Sidorejo relatif luas, maka aliran lateral di hulu Bendung Sedadi diperhitungkan dengan pendekatan luas Daerah Pengaliran Sungai dan Hujan Tahunan. Besarnya debit lateral di ruas sungai Serang antara bendung Sidorejo-Sedadi adalah sebesar 0,18 dari debit yang tersedia di Bendung Sedadi sebelum waduk Kedung Ombo dibangun (Indra Karya, 1993), *intake* di bendung Sedadi untuk mengairi daerah irigasi Sedadi seluas 15.200 ha.

3. Bendung Klambu

Bendung Klambu terletak di hilir Bendung Sedadi dengan jarak sekitar 40 km. Sehingga aliran lateralnya mempunyai nilai yang cukup berarti untuk diperhitungkan. Ketersediaan aliran lateral di Bendung Klambu diperhitungkan sebesar 2,75 dari debit yang tersedia di Bendung Sedadi sebelum waduk Kedung Ombo dibangun (Indra Karya, 1993). Air yang diambil dari *intake* bendung Klambu digunakan untuk

memenuhi air di daerah irigasi Klambu Kiri seluas 21.457 ha, Klambu Kanan seluas 17.288, Tambak Romo seluas 9.970 ha, kebutuhan air baku kota Semarang 3.500 l/det, Rembang 700 l/det dan Demak 1.800 l/det. Kebutuhan air di daerah irigasi di Bendung Klambu juga mendapat tambahan dari Bendung Dumpil, sisa debit air setelah dipergunakan untuk mengairi daerah irigasi Dumpil Kiri dan Dumpil Kanan.

Tabel 1-1 Data layanan potensi daerah irigasi waduk Kedung Ombo dengan pola tanam padi-padi palawija.

Daerah Irigasi	Luas Ha	Golongan	Daerah Irigasi	Luas Ha	Golongan
Sidorejo	2.593	I	Sidorejo	2.593	II
Sidorejo Kiri	1.000	I	Sidorejo Kiri	818	II
Sedadi	7.260	I	Sedadi	7.940	II
Klambu Kanan	9.553	I	Klambu Kanan	7.735	II
Klambu Kiri	11.335	I	Klambu Kiri	10.122	II
Tambak Romo	5.644	I	Tambak Romo	4.326	II
Total Luas	37.385		Total Luas	33.534	

Sumber: Indra Karya, 1993

Data terakhir potensi luas lahan irigasi yang tersedia adalah total seluas 70.919 ha (lihat Tabel 1-1). Tabel 1-1 merupakan data potensi luas dari masing-masing daerah irigasi yang terdiri dari dua golongan. Di mana untuk golongan I awal musim tanam tahunan dimulai pada pertengahan bulan Oktober sedangkan golongan II pada awal bulan Nopember.

Untuk menentukan kebutuhan irigasi dari waduk Kedung Ombo, Indra Karya memperhitungkan ketersediaan air di hilir waduk yaitu: debit Sungai Lanang, Sungai Lusi dan ketersediaan aliran lateral pada DAS Bendung Sedadi, DAS Bendung Klambu. Sedangkan aliran lateral di DAS Bendung Sidorejo diasumsikan tidak ada (noI) karena Bendung Sidorejo terletak tepat di hilir waduk Kedung Ombo. Dan kekurangan kebutuhan irigasi disuplesi dari waduk Kedung Ombo.

Hasil dari studi Indra Karya menunjukkan luasan daerah irigasi yang dapat disuplesi dari waduk pada kondisi skenario Indra Karya debit inflow tahun basah rerata sebesar 41.040,27 ha setiap tahun, debit inflow tahun normal rerata sebesar 33.180,79 ha setiap tahun, debit inflow tahun cukup rerata sebesar 24.284,95 ha setiap tahun, dan debit inflow tahun kering rerata sebesar 14.164,42 ha setiap tahun. Sementara luasan daerah irigasi yang harus disuplesi oleh waduk rerata sebesar 46.007,47 ha setiap tahun. Sehingga masih ada kekurangan air untuk memenuhi kebutuhan air daerah irigasi pada setiap kondisi debit inflow skenario Indra Karya.

Studi Indra Karya tersebut menggunakan metode analisis keseimbangan air (*water balance*) yang mendasarkan pada kontinuitas massa aliran. Prinsip perencanaan seperti tersebut mengandalkan pada prinsip simulasi. Hal demikian kemungkinan hasil pola pengoperasian dan hasil perencanaan kurang optimal (maksimal). Karena simulasi bukan prosedur optimasi, tapi hanya sebagai evaluasi perilaku sistem terhadap berbagai skenario masukan pada sistem (Louck, dkk., 1981).

Oleh karena hal-hal di atas, maka perlu dilakukan kajian optimasi pemanfaatan air Waduk Kedung Ombo untuk mengevaluasi kembali hasil studi di atas dan pola pengoperasian yang ada dengan menggunakan optimasi program linier. Dalam studi ini, juga akan dilakukan simulasi pengoperasian dengan mengimplementasikan pola pengoperasian yang di dapat dari optimasi program linier untuk mengetahui unjuk kerja pengoperasian waduk secara lebih realistik.

1.3. Tujuan Studi

Tujuan studi adalah untuk:

1. Mengetahui seberapa besar kemampuan waduk Kedung Ombo untuk memenuhi kebutuhan air Daerah Irigasi, PLTA dan air baku berdasarkan kapasitas dan debit *inflow* yang ada.
2. Memaksimalkan pendapatan dari pemanfaatan air waduk Kedung Ombo yang dipergunakan untuk memenuhi kebutuhan Daerah Irigasi, PLTA dan Air Baku.

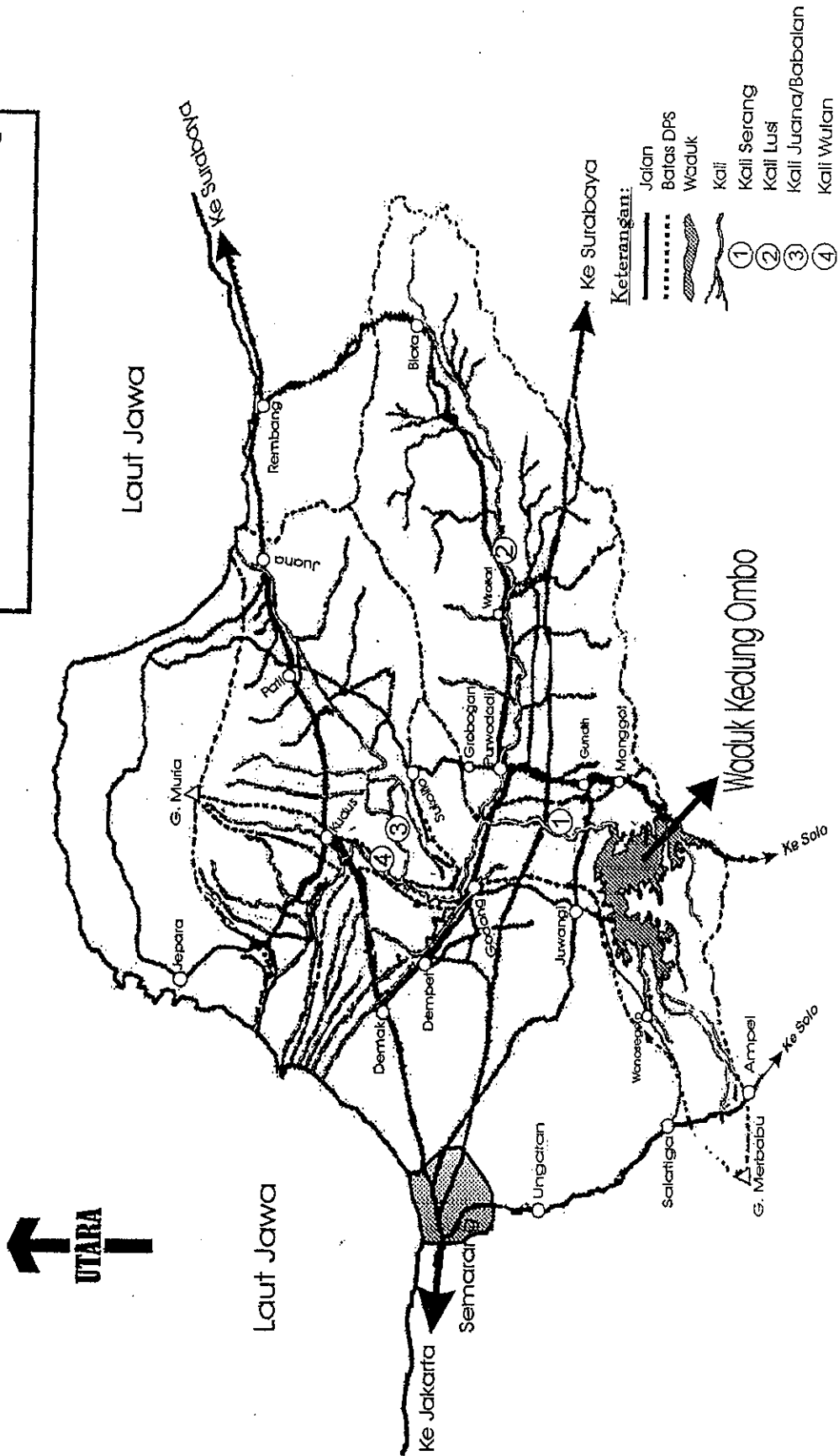
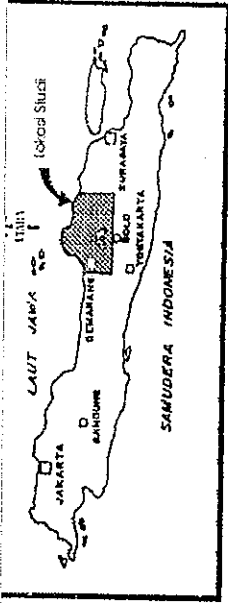
Studi ini didasarkan atas dua cara analisis yaitu: analisis dengan program optimasi yaitu dengan memaksimalkan pendapatan dari sistem untuk memperoleh pedoman pengoperasian yang optimal dan analisis dengan simulasi pengoperasian waduk untuk mengevaluasi unjuk kerja waduk dengan pola pengoperasian hasil dari program optimasi.

1.4. Ruang Lingkup Studi

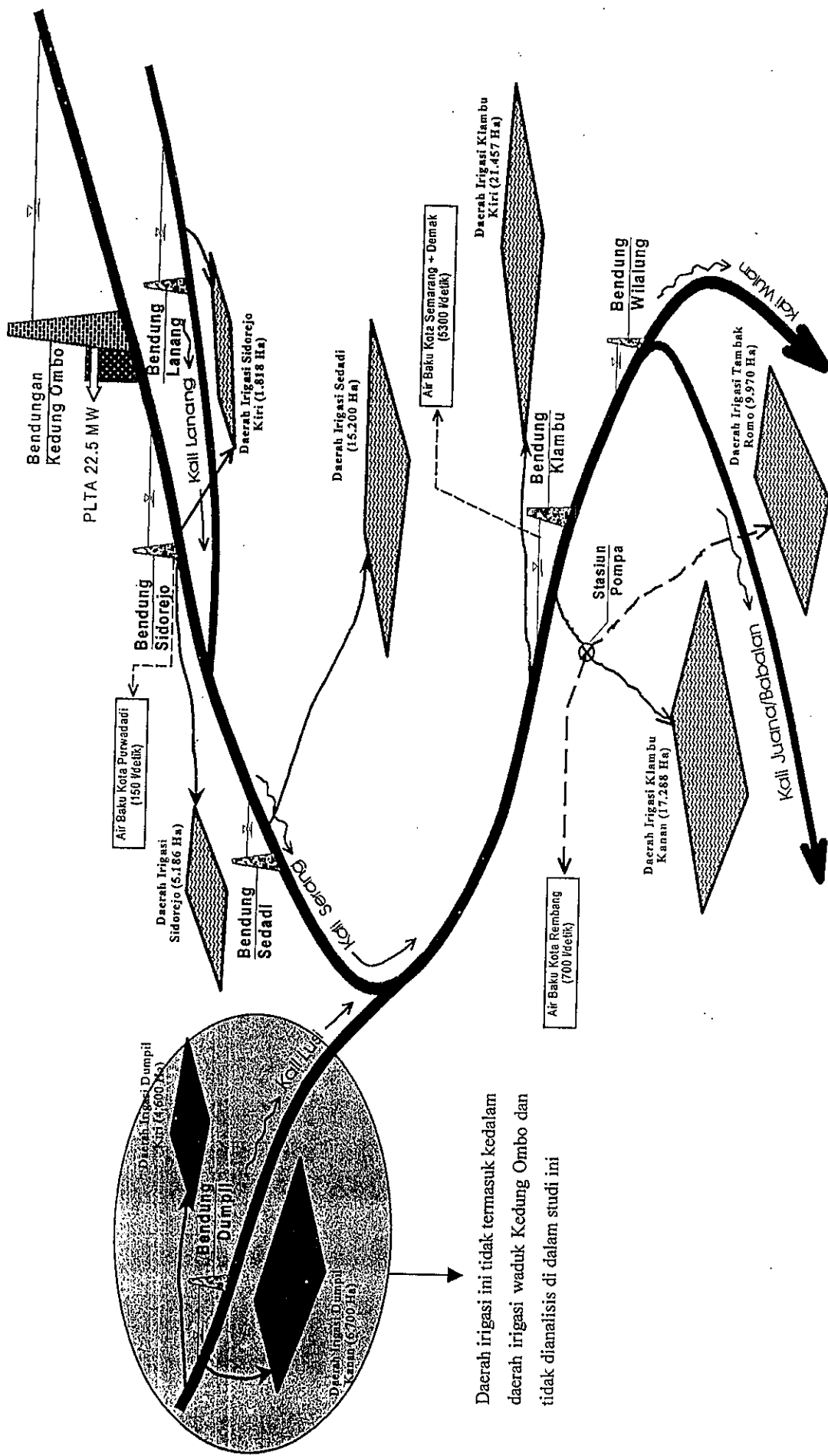
Studi yang dilakukan meliputi kegiatan-kegiatan sebagai berikut:

1. Pemodelan optimasi dibatasi dengan tujuan mengoptimalkan pemanfaatan air waduk Kedung Ombo untuk irigasi, air baku dan PLTA.
2. Pengaruh luasan daerah irigasi dari ketersediaan air Sungai Lanang, Sungai Lusi dan aliran lateral dihitung terpisah dari program linier.
3. Pengaruh pengurangan kapasitas tampungan waduk akibat sedimentasi diabaikan.
4. Pengaruh pengurangan volume air waduk akibat infiltrasi, rembesan diabaikan

5. Pola tanam yang dipergunakan adalah Padi-Padi-Palawija.
6. Simulasi pengoperasian waduk sepanjang 46 tahun dengan mengimplementasikan pedoman pelepasan hasil optimasi program linier.
7. Analisis unjuk kerja simulasi pengoperasian waduk sepanjang 46 tahun.



Gambar 1-1. Peta lokasi waduk Kedung Ombo dan DPS Kali Serang



Gambar 1-2 Skema suplesi kebutuhan air dari waduk Kedung Ombo (P.T. Indra Karya, 1993)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Rangkaian data debit *inflow* waduk

Data debit *inflow* historis waduk yang diperoleh harus diuji dahulu secara statistik. Hal ini dilakukan agar kita dapat mengetahui apakah data tersebut layak digunakan untuk analisis peluang maupun simulasi. Sebagai contoh apabila dalam rangkaian data debit dengan urutan sesuai waktu menunjukkan adanya trend maka datanya tidak disarankan digunakan untuk beberapa analisis, misalnya analisis peluang dan simulasi (Soewarno, 1995). Untuk maksud tersebut dapat kita lakukan dengan beberapa cara seperti yang dijelaskan pada sub-bab berikut.

Trend rangkaian data debit *inflow* merupakan gerakan nilai debit yang jangka panjang sesuai urutan waktu dan mempunyai kecenderungan menuju kesatu arah, arah menaik atau menurun (Salas dkk., 1980). Trend musim merupakan variasi musiman (*seasonal trend* atau *seasonal variation*) dan hanya menunjukkan gerakan dalam jangka tahunan (Pasaribu, 1975).

Rangkaian data debit yang kurang dari 10 tahun kadang-kadang sulit untuk digunakan dalam mengidentifikasi keberadaan suatu trend, karena gerakan yang diperoleh hanya menunjukkan suatu *cyclical time series* dari suatu trend. Sehingga sulit untuk menentukan apakah rangkaian data tersebut layak digunakan untuk analisis peluang dan simulasi. *Cyclical time series* adalah gerakan yang tidak teratur dari suatu trend (Salas dkk., 1980; Hoff, 1983; dan Soewarno, 1995). Ada beberapa metode statistik yang dapat digunakan untuk menguji ketidakadaan trend dalam rangkaian data debit *inflow* waduk.

2.1.1 Uji korelasi peringkat metode Spearman

Trend dipandang sebagai korelasi antara urutan waktu koleksi data dengan peringkat suatu variabel data misalnya debit *inflow*. Oleh karena itu koefisien korelasi Spearman dapat digunakan untuk menentukan ketidakadaan trend dari suatu rangkaian data. Koefisien korelasi Spearman dapat dirumuskan sebagai berikut (Soewarno, 1995; dan Supranto, 1996):

$$KPS = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^n (d_i)^2}{u^3 - u} \quad 2-1$$

$$t_{hitung} = KPS \cdot \left[\frac{u-2}{1-KPS^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad 2-2$$

dimana :

KPS = koefisien korelasi peringkat dari Spearman

u = jumlah data

d_i = $R_t - T_t$

T_t = peringkat urutan waktu koleksi data

R_t = peringkat nilai data debit *inflow*

Prosedur analisis korelasi peringkat metode Spearman adalah sebagai berikut :

1. Data diberi nomor urut sesuai dengan urutan waktu data (peringkat T_t)
2. Data diberi nomor urut sesuai dengan besarnya data (peringkat R_t) tanpa merubah urutan waktu.
3. Nomor urut sesuai dengan besarnya data (peringkat R_t) dikurangi dengan nomor urut waktu data (peringkat T_t).
4. Hasil dari point ke-3 (d_i) dikwadratkan kemudian ditotal sesuai dengan jumlah data (u).

Nilai KPS dapat diperoleh dengan memasukan nilai di atas pada persamaan 2-1. Uji " t_{tabel} " (nilai distribusi, pada derajat kebebasan $u-2$ (karena kita mempunyai dua variable yaitu peringkat waktu (T_t) dan peringkat rangkaian data debit (R_t)) dengan derajat kepercayaan (*level of confidence*) tertentu digunakan untuk menentukan apakah variabel waktu dan variabel rangkaian debit saling tergantung (*dependent*) atau tidak tergantung (*independent*). Jika $-t_{tabel} < t_{hitung} < +t_{tabel}$ maka R_t dan T_t independen di mana variabel waktu dan variabel rangkaian debit saling tidak tergantung (*independent*).

Dalam hal ini yang diuji adalah korelasi antara nilai peringkat dari rangkaian data debit (R_t) dan peringkat dari rangkaian waktu (T_t), bukan nilai aktual rangkaian data debit (Supranto, 1996). Jika dari analisis diperoleh kedua variabel (R_t dan T_t) independen atau saling bebas maka dapat dikatakan rangkaian data tidak menunjukkan adanya trend.

2.1.2 Uji Man dan Whitney

Uji Man dan Whitney untuk menguji apakah dua kelompok data berasal dari populasi yang sama. Uji ini dapat juga menunjukkan bahwa satu set sampel rangkaian data debit *inflow* ada trend atau tidak yaitu dengan membagi satu seri rangkaian data debit *inflow* menjadi dua kelompok.

Tahapan pengujian adalah sebagai berikut:

1. Buatlah peringkat dari satu set rangkaian data debit *inflow* yang tersedia
2. Setelah diberi peringkat, data debit *inflow* dibagi menjadi dua kelompok (I dan II).
3. Hitunglah jumlah peringkat dari masing-masing kelompok data debit *inflow* (I dan II).
4. Hitunglah parameter statistiknya dengan persamaannya dituliskan sebagai berikut (Soewarno, 1995):

$$U_1 = u_1 \cdot u_2 + \frac{u_1}{2} \cdot (u_1 + 1) - R_m \quad 2-3$$

$$U_2 = u_1 \cdot u_2 - U_1 \quad 2-4$$

5. Pilihlah nilai U_1 atau U_2 yang nilainya lebih kecil sebagai nilai U (Supranto, 1996)
6. Hitunglah Uji Mann-Whitney, sebagai nilai Z (Soewarno, 1995) :

$$Z_{hitung} = \frac{U - (u_1 \cdot u_2)}{2} \quad 2-5$$
$$\left[\frac{1}{12} \cdot (u_1 \cdot u_2 \cdot \{u_1 + u_2 + 1\}) \right]^{\frac{1}{2}}$$

dimana :

U_1, U_2 = parameter untuk penentuan nilai "U"

u_1 = jumlah data kelompok I

u_2 = jumlah data kelompok II

R_m = jumlah total dari nilai peringkat data kelompok I

Z_{hitung} = hitung uji Man - Whitney

7. Jika dari hasil pengujian distribusi normal dengan tingkat derajat kepercayaan (*level of confidence*) tertentu diperoleh bahwa $-Z_{tabel} < Z_{hitung} < +Z_{tabel}$ maka dapat dikatakan kelompok I dan II berasal dari populasi yang sama atau dengan kata lain tidak terjadi perubahan yang nyata nilai rata-ratanya sehingga dapat disimpulkan tidak menunjukkan adanya trend.

2.1.3 Uji tanda dari Cox dan Stuart

Pengujian keberadaan trend dapat juga ditunjukkan dengan uji tanda Cox dan Stuart. Nilai data urut waktu dibagi menjadi 3 (tiga) kelompok yang sama. Setiap kelompok diusahakan jumlahnya $u = u/3$. Jika sampel acak tidak dapat di bagi 3 kelompok yang sama maka bagian yang kedua jumlahnya dikurangi 2 atau 1 buah. Selanjutnya kita mengurangkan nilai data dari kelompok pertama pada data dari kelompok ketiga, dan memberi tanda (+) untuk nilai plus dan (-) untuk nilai yang negatif.

Persamaan Uji tanda dari Cox dan Stuart dituliskan sebagai berikut (Socwarno, 1995):

1. Untuk sampel besar ($u \geq 30$) :

$$Z_{hitung} = \frac{S - \frac{u}{6}}{\sqrt{\frac{u}{12}}} \quad 2-6$$

2. Untuk sampel kecil ($u < 30$) :

$$Z_{hitung} = \frac{S - \frac{u}{6} - 0,5}{\sqrt{\frac{u}{12}}} \quad 2-7$$

dimana :

S = jumlah total selisih yang bertanda (+)

u = jumlah data

Dengan uji satu sisi (distribusi normal) bandingkan nilai Z_{hitung} dengan Z_{tabel} , pada derajat kepercayaan tertentu (*level of confidential*) ditolak atau diterima. Jika $Z_{hitung} < Z_{tabel}$, maka dapat disimpulkan bahwa data tidak menunjukkan adanya trend.

2.1.4 Uji Stasioner

Jika rangkaian data debit *inflow* menunjukkan tidak ada trend, maka uji stasioner dilakukan untuk menguji kestabilan nilai varian dan rerata dari rangkaian data debit *inflow*. Pengujian rangkaian data debit *inflow* dengan membagi dua rangkaian data dengan menyatakan hipotesis sebagai berikut:

“ H_0 ” :

- Varian kedua kelompok tidak ada beda nyata pada derajat kepercayaan tertentu.

- Rerata kedua kelompok tidak ada beda nyata pada derajat kepercayaan tertentu.

“H₁” :

- Variannya berbeda.
- Rerata berbeda.

Jika rangkaian data debit *inflow* yang nilai variannya tidak stabil atau tidak homogen berarti rangkaian data debit *inflow* tersebut tidak stasioner, maka pengujian selanjutnya adalah menguji kestabilan nilai reratanya. Apabila dalam pengujian ternyata hipotesis nol ditolak (H₀), berarti nilai rerata dari dua kelompok rangkaian data debit *inflow* tidak homogen atau tidak stasioner pada derajat kepercayaan tertentu. Analisis peluang atau simulasi dapat dilanjutkan pada sebagian atau seluruh rangkaian data debit *inflow* yang tidak mengandung trend dan stasioner.

Tahapan pengujian adalah sebagai berikut:

- Rangkaian data sesuai urutan waktu dibagi menjadi dua kelompok data.
- Hitung deviasi standart dari masing-masing kelompok data.
- Hitung parameter statistik uji kestabilan varian dituliskan sebagai berikut (Soewarno, 1995):

$$F = \frac{u_1 \cdot S_1 \cdot (u_2 - 1)}{u_2 \cdot S_2^2 (u_1 - 1)} \quad 2-8$$

- Jika varian tidak stabil, hitung deviasi atau tidak homogen berarti rangkaian data debit *inflow* tersebut tidak stasioner, maka pengujian selanjutnya adalah menguji kestabilan nilai reratanya. Dituliskan sebagai berikut (Soewarno, 1995):

$$t_{\text{hitung}} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sigma \cdot \left(\frac{1}{u_1} - \frac{1}{u_2} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad 2-9$$

$$\sigma = \left(\frac{u_1 \cdot S_1^2 + u_2 \cdot S_2^2}{u_1 + u_2 - 2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 2-10$$

dimana :

- F = variabel-F hitung
- u₁ = jumlah rangkaian data kelompok I
- u₂ = jumlah rangkaian data kelompok II
- S₁ = deviasi standart rangkaian data kelompok I

S_2 = deviasi standart rangkaian data kelompok II

\bar{X}_1 = rerata hitung rangkaian data kelompok I

\bar{X}_2 = rerata hitung rangkaian data kelompok II

2.2. Operasi Waduk

Perencanaan operasi waduk merupakan usaha mendayagunakan air yang ditampung di waduk, diantaranya untuk irigasi, air baku dan PLTA. Pengaturan pola pemanfaatan air waduk didasarkan pertimbangan sumberdaya yang tersedia. Beberapa cara yang dapat diaplikasikan untuk menentukan pola pemanfaatan air waduk antara lain:

1. Program Linier

Program linier merupakan teknik optimasi yang banyak dipakai untuk permasalahan operasi dan pengelolaan pada sistem yang sederhana sampai sistem yang kompleks (Wurbs, 1996). Teknik program linier dapat dipakai apabila terdapat hubungan linier antara variabel-variabel yang dioptimasi, baik pada fungsi tujuan (*objective function*) maupun kendala (*constraint function*) (Asri dan Widayat, 1984; Sudjarwadi, 1988).

Namun demikian penerapan pada kondisi yang hubungannya tidak linier seperti sering di jumpai pada berbagai bentuk model operasi waduk seperti *Evaporasi*, perhitungan energi listrik dan perhitungan biaya/keuntungan masih dapat dilakukan. Hubungan variabel yang tidak linier perlu dilinierisasi. Oleh karena itu tingkat akurasi/keandalan hasil dari program linier juga terletak pada tingkat dipengaruhi oleh dalam linierisasi hubungan antara variabel.

Penggunaan program linier sangat membantu penyelesaian masalah-masalah pengembangan sumberdaya air yang kompleks, hal ini terbukti dengan banyaknya ahli yang menganalisis permasalahan sumberdaya air yang kompleks ke dalam bentuk kesamaan-kesamaan maupun ketidaksamaan matematis yang linier antara lain Loucks dan Dorfman (1975), Houck dkk. (1980), Loucks dkk. (1981) dan Joeres, dkk. (1981).

2. Teknik Simulasi

Simulasi adalah suatu teknik pemodelan untuk menirukan perilaku suatu sistem ke dalam suatu model (Qomariyah dan Hermono, 1995). Model simulasi digunakan untuk mengevaluasi apa yang akan terjadi di dalam sistem jika diberikan masukan-masukan tertentu. Dengan demikian pola pengelolaan sistem dapat dievaluasi sebelum benar-benar diterapkan dilapangan dengan mempelajari perilaku sistem terhadap berbagai skenario

masuk pada sistem. Akan tetapi, perlu diketahui bahwa simulasi bukan merupakan prosedur optimasi (Loucks, dkk., 1981). Oleh karena itu, simulasi dalam studi ini digunakan untuk mengevaluasi unjuk kerja sistem seandainya sistem dioperasikan dengan mengimplementasikan hasil optimasi. Penggunaan ke dua metode ini, (optimasi dan simulasi) dapat meningkatkan keandalan hasil analisis.

2.3. Program Linier Dalam Pengelolaan Sumberdaya Air

Venugopal dan Komarudin (1991) menggunakan model program linier untuk mencari solusi yang optimum dalam pengelolaan sumberdaya air yaitu untuk mendapatkan keuntungan yang layak/maksimal dari sistem proyek. Aplikasi ini diterapkan pada tiga waduk yaitu Waduk Saguling, Cirata dan Juanda, dimana Waduk Saguling dan Cirata dijadikan satu sistem untuk pembangkit tenaga listrik dan Waduk Juanda untuk multi tujuan termasuk suplesi air irigasi ke Jawa Barat. Pengembangan model optimasi program linier dipergunakan untuk memaksimalkan kombinasi pengoperasian dari ketiga waduk untuk membangkitkan energi listrik dan untuk meminimalkan limpasan yang terjadi.

Martsanto (1992) menggunakan program linier untuk memaksimalkan energi listrik yang dihasilkan oleh kombinasi Waduk Saguling dan Cirata menjadi satu sistem. Optimasi yang dihasilkan oleh program linier, digunakan sebagai masukan simulasi untuk mengevaluasi tingkat kegagalan hasil optimasi program linier.

Schleich dan White (1997) menggunakan program linier untuk meminimalkan biaya pengelolaan DPS *Fox-Wolf* yang tercemar oleh fosfor dan benda padat lainnya. Dimana aliran airnya ditampung pada 41 buah penampungan di beberapa lokasi yang berbeda untuk dibersihkan dan airnya akan dipergunakan untuk pertanian.

Simonovic dan Burn (1989) mengembangkan model pengoperasian waduk dalam jangka pendek (*short term*) dengan mengkombinasikan beberapa modul yaitu:

1. Memperpanjang data dengan menggunakan algoritma formula "Kalman Filter"
2. Model pengoperasian waduk jam-jaman (*real time*) dengan menggunakan linier program.
3. Menggunakan "*multi-objective Compromise programming*" untuk menilai kompromi terbaik antara kelayakan ramalan dan timbangan (*penalties*) pengoperasian waduk.

Hasil dari ketiga modul di atas disimulasi untuk mengetahui keandalan model tersebut. Kontribusi utama dari pengembangan model pengoperasian waduk *multipurpose* dalam jangka pendek (*short term*) adalah: performan pengoperasian akan bergerak kearah kondisi ideal.

2.4. Program Linier

Program linier merupakan suatu teknik pemodelan yang bersifat analitis, dimana analisis-analisisnya memakai model matematika, dengan tujuan menemukan penyelesaian masalah yang optimal (memaksimumkan atau meminimumkan). Dengan persyaratan-persyaratan yang dikehendaki oleh kendala (*constraint function*) dalam bentuk ketidaksamaan dan kesamaan fungsi yang linier.

Kedua fungsi dari program linier yaitu: Fungsi tujuan (*objective function*) dan fungsi kendala (*constraint function*) diekspresikan dalam bentuk matematik sebagai fungsi variabel putusan (*decision variable*). Persamaan baku (umum) dinyatakan dalam persamaan berikut (Haimes, 1977; Winston, 1987; dan Wurbs, 1996).

Fungsi tujuan:

$$\text{Maksimise } Z = \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad 2-11$$

Fungsi kendala:

$$\begin{array}{rcl} A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + \dots + A_{1n}X_n & (\leq \text{ atau } \geq) & B_1 \\ A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + \dots + A_{2n}X_n & (\leq \text{ atau } \geq) & B_2 \\ \vdots & & \vdots \\ A_{m1}X_1 + A_{m2}X_2 + \dots + A_{mn}X_n & (\leq \text{ atau } \geq) & B_m \end{array}$$

Dan syarat non-negatif,

$$X_j \geq 0 \text{ untuk } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad 2-12$$

di mana:

- C_j = koefisien fungsi tujuan variabel ke-j
- A_{ij} = koefisien fungsi kendala untuk kendala ke-i variabel ke-j
- B_m = nilai ruas kanan dari persamaan kendala ke-m
- X_j = variabel putusan ke-j
- j = 1, 2, 3, ..., n indeks, untuk jumlah variabel putusan

- $i = 1, 2, 3, \dots, m$ indeks, untuk jumlah persamaan kendala
- $Z =$ fungsi tujuan

Sistem persamaan dalam program linier di atas mempunyai fungsi kendala yang terdiri dari “ m ” set persamaan dan “ n ” variabel yang akan dicari nilainya. Apabila “ n ” variabel yang dicari nilainya lebih banyak dari “ m ” set persamaan, maka persamaan-persamaan dari sistem tidak dapat dihitung (Hall dan Dracup, 1975; Wurbs, 1996).

Sistem persamaan dalam program linier di atas mempunyai fungsi kendala yang terdiri dari “ m ” set persamaan dan “ n ” variabel yang akan dicari nilainya. Apabila “ n ” variabel yang dicari nilainya lebih banyak dari “ m ” set persamaan, maka persamaan-persamaan dari sistem tidak dapat dihitung (Hall dan Dracup, 1975; Wurbs, 1996). Program linier harus memenuhi lima macam asumsi. Asumsi-asumsi tersebut adalah sebagai berikut :

1. *Linieritas*

Asumsi ini menyatakan fungsi tujuan dan fungsi kendala harus dapat dinyatakan sebagai fungsi linier. Jika terdapat fungsi yang bersifat nonlinier perlu dilakukan linierisasi agar teknik program linier dapat diterapkan (Nasendi dan Anwar, 1985 dan de Neufville, 1990).

$$f(S_1X_1, \dots, S_nX_n) = S_1 \cdot f(X_1) + \dots + S_n \cdot f(X_n)$$

2. *Proporsional*

Asumsi ini menyatakan jika peubah pengambil keputusan (X_j) berubah maka dampak perubahannya akan menyebar dalam proporsi yang sama terhadap fungsi tujuan (C_jX_j) juga kendalanya ($A_{1j}X_j$) (Nasendi dan Anwar, 1985; Soemarto, 1986; dan Hiller dkk., 1990).

3. *Aditivitas*

Asumsi ini menyatakan nilai dari fungsi semua variabel putusan X_j mempunyai nilai yang sama dengan jumlah fungsi masing-masing individu variabel (Hiller dkk., 1990 de Neufville, 1990 dan Nasendi dan Anwar, 1985)

$$f(X_1, \dots, X_n) = f(X_1) + \dots + f(X_n)$$

4. *Divisibilitas*

Asumsi ini menyatakan peubah-peubah pengambilan keputusan X_j , harus dapat dibagi-bagi menjadi bentuk pecahan (sekecil-kecilnya), yaitu nilai-nilai X_j tidak harus integer (hanya 0 dan 1 atau bilangan bulat), tapi boleh non-integer (0,58 mobil; 3,8 pesawat dan sebagainya) (Buras, 1975 dan Nasendi dan Anwar, 1985).

5. *Deterministik*

Asumsi ini menghendaki semua parameter dalam model program linier tetap dan diketahui atau ditentukan secara pasti. Model-model program linier yang akan dipakai untuk program jangka panjang biasanya parameter penduga diramalkan terlebih dahulu dengan teknik statistik (Buras, 1975; Nasendi dan Anwar, 1985).

2.4.1 Program Linier Metode Simplek

Metode simplek pertama kali dikembangkan oleh Danzig (1947) seperti yang diuraikan dalam Siswanto (1992). Metode simplek digunakan untuk menganalisa permasalahan program linier yang kompleks dan tidak mungkin dianalisa dengan metode grafis (Siswanto, 1992).

Jika kasus program linier akan dianalisis dengan metode simplek maka persamaan kendala kasus tersebut terlebih dahulu harus dirubah ke dalam bentuk baku model persamaan simplek. Susunan kendala pertidaksamaan yang diubah ke dalam bentuk baku persamaan simplek. Persamaan baku (umum) simplek dituliskan sebagai berikut (Nasendi dan Anwar, 1985; Votruba, 1988; Siswanto, 1992).

Fungsi tujuan:

$$\text{Maksimise } Z = \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad 2-13$$

Fungsi kendala:

$$A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + \dots + A_{1n}X_n + \text{atau-}S_1 = B_1$$

$$A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + \dots + A_{2n}X_n + \text{atau-}S_2 = B_2$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$A_{m1}X_1 + A_{m2}X_2 + \dots + A_{mn}X_n + \text{atau-}S_m = B_m$$

di mana:

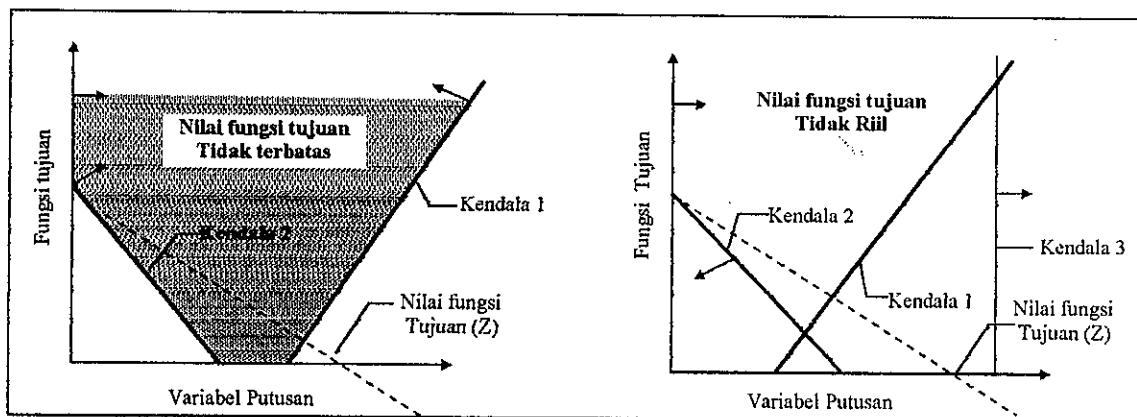
C_j = koefisien fungsi tujuan variabel ke-j

A_{ij} = koefisien fungsi kendala untuk kendala ke-i variabel ke- j

- B_m = nilai ruas kanan dari persamaan kendala ke- m
- X_j = variabel putusan ke- j
- S_m = *Slack* atau *surplus* variabel untuk kendala ke- m
- j = 1, 2, 3,, n indeks, untuk jumlah variabel putusan
- i = 1, 2, 3,, m indeks, untuk jumlah persamaan kendala
- Z = fungsi tujuan

Setiap kendala " \leq " dapat dirubah ke dalam bentuk baku persamaan dengan penambahan *slack* variabel yang berfungsi untuk mengurangi ruas kanan pertidaksamaan. Begitu juga halnya dengan kendala " \geq " dapat dirubah ke dalam bentuk baku persamaan dengan penambahan *surplus* variabel yang berfungsi untuk menambah ruas kanan pertidaksamaan. Sehingga dari ketidaksamaan berubah menjadi kesamaan " $=$ ".

Keluaran dari metode simplek memberikan informasi tambahan yang sangat penting antara lain mengenai situasi kendala yang berlebihan, nilai tujuan yang tidak riil (*infeasible solution*), nilai tujuan yang tidak terbatas (*unbounded solution*), nilai tambah fasilitas dan hal lain yang tidak mungkin dihasilkan dari penyelesaian dengan metode grafik (Siswanto, 1992).



Sumber : Nasendi dan Anwar, 1985

Gambar 2-1 Nilai fungsi tujuan yang tidak terbatas dan tidak riil secara grafis

Kondisi-kondisi program linier yang tidak dapat diselesaikan diatas disajikan pada Gambar 2-1. Secara grafis pada Gambar 2-1 ditunjukkan keadaan yang menghasilkan nilai fungsi tujuan tidak terbatas (*unbounded solution*) dan tidak riil (*infeasible solution*). Nilai fungsi tujuan tidak terbatas, berarti tidak terdapat suatu batas tertentu (*unlimited*) seberapa jauh nilai fungsi tujuan yang harus diperoleh. Dalam hal demikian model perlu dirumuskan kembali.

Nilai fungsi tujuan tidak riil dapat dijumpai jika tidak ada satu titikpun dari berbagai kombinasi variabel putusan yang memenuhi semua kendala. Jika hal ini terjadi (diketahui setelah adanya hasil komputasi), maka perumusan model program linier perlu dikaji dan dirumuskan kembali, misalnya menyangkut tanda-tanda ketidaksamaan fungsi-fungsi kendala sebagai syarat-ikatan.

Penyelesaian dari model-model program linier dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak (*software*) seperti LINDO, QSB, ..., Excel's TK-Solver. Dalam studi ini, penyelesaian program linier dilakukan dengan menggunakan Excel's TK-Solver.

2.4.2 *Spreadsheet Excel's TK-Solver*

Spreadsheet Excel TK-Solver ini dapat digunakan untuk menyelesaikan kasus-kasus persamaan program linier dari persamaan yang sederhana sampai dengan persamaan yang kompleks. Kasus-kasus memaksimumkan maupun meminimumkan dalam bentuk persamaan linier maupun non-linier dapat diselesaikan dengan mudah (Grottfried, 1998).

Informasi yang disajikan dari hasil pengolahan persamaan linier oleh *Spreadsheet Excel TK-Solver* ini dikelompokkan menjadi dua bagian pokok (Siswanto, 1992) yaitu:

I. Informasi Penyelesaian Optimal

1. Nilai tujuan

Spreadsheet Excel TK-Solver menyajikan nilai tujuan/sasaran persamaan program linier yang diolah berdasarkan persamaan fungsi tujuan dan kendala-kendala sebagai masukan.

2. Nilai variabel putusan dan "*Reduced cost*" nya

Informasi ini akan menyajikan nilai variabel putusan juga *reduced cost*-nya. *Reduced cost* merupakan analisis program yang menginformasikan situasi dari nilai variabel putusan, berkaitan dengan koefisien variabel putusan fungsi tujuan. *Reduced cost* akan bernilai nol bila nilai variabel putusan positif. Jika *reduced cost* dari nilai variabel putusan tertentu bernilai positif, maka penambahan nilai harus diberikan kepada koefisien fungsi tujuan variabel putusan agar jawab optimal variabel putusan bernilai positif.

3. Nilai *Slack or Surplus* dan *Dual Price* (nilai marginal)

Nilai *slack* atau *surplus* menunjukkan posisi kendala-kendala aktif atau tidak aktif. Persamaan kendala aktif adalah jika nilai *slack* atau *surplus*-nya nol. Dalam hal ini semua sumberdaya (nilai ruas kanan) dari kendala tersebut sudah habis. Istilah lain dari kondisi demikian adalah persamaan kendala yang "*binding*". Pada persamaan kendala aktif, setiap perubahan pada nilai variabel putusan akan merubah nilai/hasil fungsi tujuan. Nilai *slack* atau *surplus* positif merupakan kendala tidak aktif yang menginformasikan bahwa masih ada sisa sumberdaya yang tersisa untuk mencapai nilai tujuan.

Dual Price (nilai marginal) dari kendala aktif memberikan informasi bahwa penambahan atau pengurangan nilai ruas kanan (NRK) pada kendala tertentu akan merubah nilai fungsi tujuan. Karena perubahan tersebut merupakan fungsi dari perSungaian antara *dual price* (nilai marginal) dengan besar perubahan nilai ruas kanan kendala. Artinya jika *dual price* (nilai marginal) dari kendala aktif tertentu bernilai "x" dan nilai ruas kanan kendala tersebut ditambah sebesar "y" maka nilai fungsi tujuan akan bertambah sebesar x dikali y. Oleh karena itu perlu diperhatikan besar perubahan nilai ruas kanan. Program akan menampilkan batasan interval besarnya perubahan, hal ini akan dijelaskan pada analisis *sensitivitas* nilai ruas kanan.

II. Informasi Analisis *Sensitivitas*

1. Analisis *sensitivitas* koefisien fungsi tujuan

Pada analisis ini, *Spreadsheet Excel TK-Solver* menyajikan informasi batas interval penambahan maupun pengurangan koefisien fungsi tujuan dengan tanpa mempengaruhi hasil penyelesaian saat ini. Pengurangan maupun penambahan koefisien fungsi tujuan dari variabel putusan tertentu, jika tidak melebihi interval yang disajikan program, maka tidak akan merubah nilai variabel putusan optimal tapi berpengaruh pada Nilai Tujuan.

2. Analisis *sensitivitas* Nilai Ruas Kanan (NRK)

Pada analisis ini, *Spreadsheet Excel TK-Solver* akan menyajikan informasi mengenai kelonggaran untuk penambahan maupun pengurangan NRK pada batas interval tertentu. Karena penambahan maupun pengurangan nilai ruas kanan akan mempengaruhi kondisi kendala (aktif menjadi tidak aktif) dan nilai marginal (*dual*

price). Jika penambahan nilai ruas kanan kendala aktif tertentu masih di dalam batas interval *sensitivitas* maka kendala maka kondisi kendala tersebut akan tetap aktif dan nilai marginalnya juga tidak berubah. Tetapi nilai Fungsi Tujuan akan berubah sebesar penambahan NRK dikalikan dengan nilai Marginalnya.

Seperti penjelasan di atas, besar perubahan nilai ruas kanan akan dibatasi pada interval tertentu. Hal ini dikarenakan besar perubahan nilai ruas kanan kendala aktif yang melebihi batas interval, akan merubah kondisi dari kendala tersebut. Sedangkan untuk kendala-kendala tidak aktif penambahan nilai ruas kanan sampai pada batas sumberdaya yang belum terpakai tidak akan berpengaruh terhadap nilai fungsi tujuan. Tapi dengan adanya perubahan NRK akan berpengaruh terhadap nilai optimal variabel putusan.

Keluaran *Spreadsheet Excel TK-Solver* yang berupa informasi di atas sudah tentu akan sangat membantu kita dalam menganalisis alternatif-alternatif penyelesaian optimal dari perumusan persamaan linier yang di buat. Namun pemahaman yang baik dari kasus-kasus nyata untuk merumuskannya kebentuk persamaan linier sangat diperlukan.

Dibawah ini merupakan contoh sederhana aplikasi *Spreadsheet Excel TK-Solver*, masukan dan keluaran optimasi dengan Solver di atas, disajikan pada Gambar 2-2 (a sampai f). Persamaan fungsi tujuan dan fungsi kendala adalah sebagai berikut (Gottfried, 1998):

Fungsi tujuan (*objective function*) :

Maksimise $y = 60x_1 + 44x_2$ (persamaan target keuntungan)

Fungsi kendala (*constraint function*) :

- 1) $x_1 + x_2 \geq 1000$, jumlah minimal kebutuhan
- 2) $5x_1 + 3x_2 \leq 8000$, tenaga yang diperlukan untuk produksi dan yang tersedia
- 3) $x_1, x_2 \geq 0$, syarat non-negatif

dimana: x_1 = unit of A mfg. per month, x_2 = unit of B mfg. per month

a. Kondisi awal dari persamaan optimasi

Maximum Profit Production Schedule	
Units of A mfg. per month (x1):	1
Units of B mfg. per month (x2):	1
Profit (y):	104
Minimum Production Requirement (q1):	2
Labor Availability (q2):	8

b. Input persamaan fungsi tujuan dan fungsi kendala kondisi awal dari pers. optimasi

Maximum Profit Production Schedule	
Units of A mfg. per month (x1):	1
Units of B mfg. per month (x2):	1
Profit (y):	=B3*B4+C4*D4
Minimum Production Requirement (q1):	=B3+B4
Labor Availability (q2):	=E3+B4+C4

c. Input untuk parameter-parameter aplikasi solver

Maximum Profit Production Schedule	
Units of A mfg. per month (x1):	1
Units of B mfg. per month (x2):	1
Profit (y):	104
Minimum Production Requirement (q1):	2
Labor Availability (q2):	8

Solver Parameters

Set Objective: \$B\$4

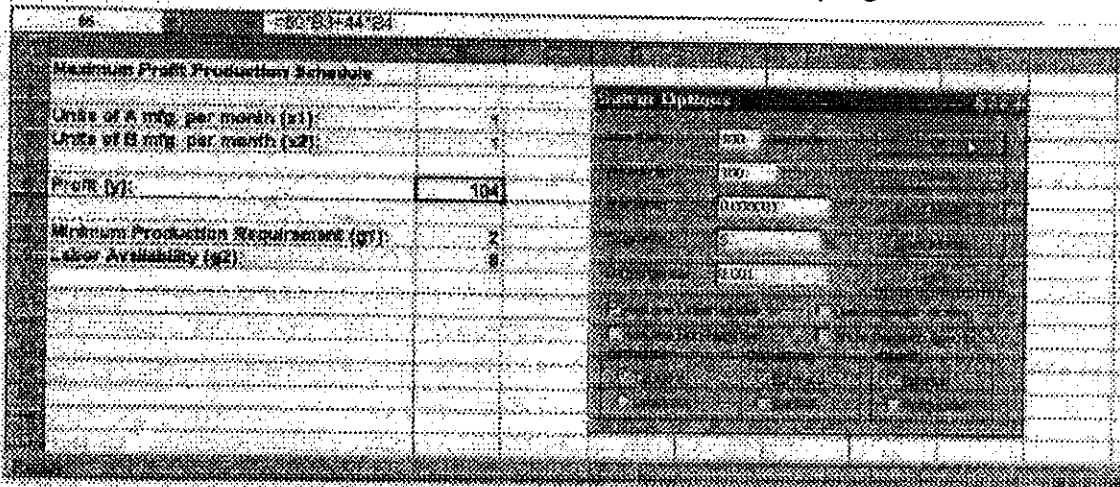
To: Of Max

By Changing Variable Cells: \$B\$3:\$C\$4

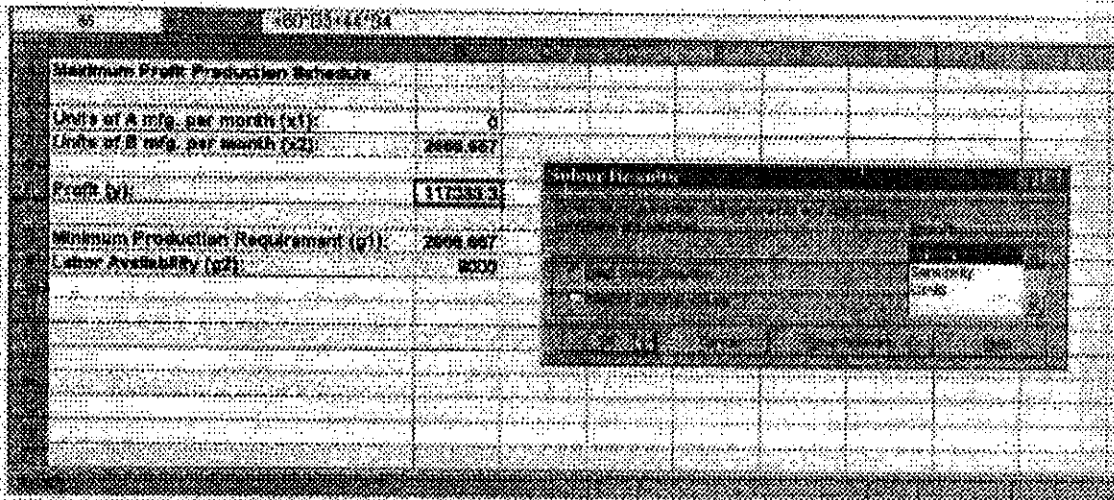
Load/Save: Save Solver Scenario

Solving Method: GRG Nonlinear Engine

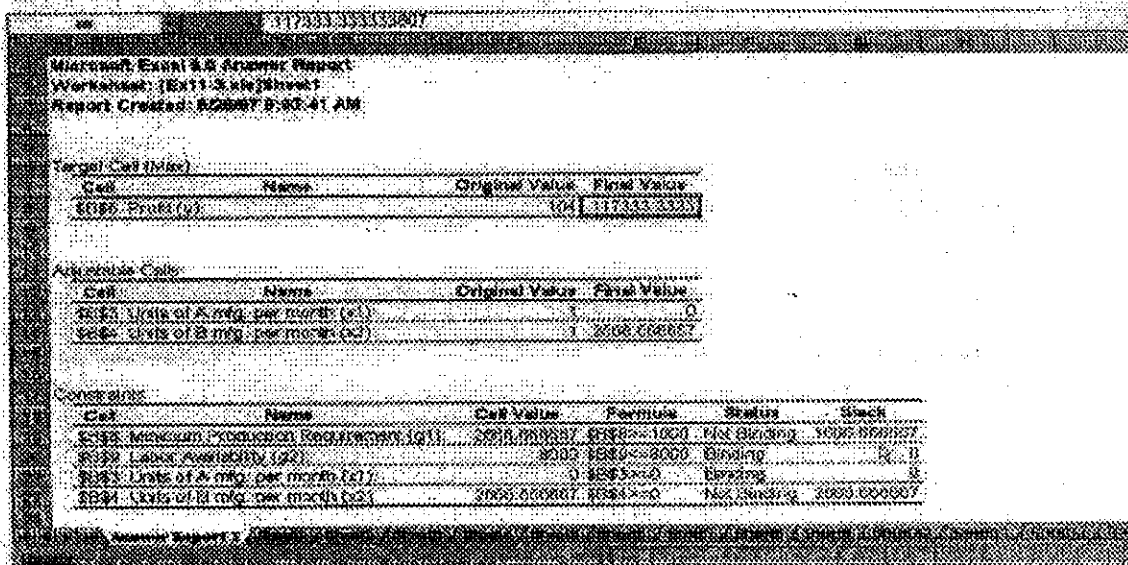
d. *Input solver mengenai asumsi model linier dan jumlah iterasi yang dikehendaki*



e. *Output dari hasil analisis solver*



f. *Tabel output dari answer report solver*



Gambar 2-2 Spreadsheet (Excel's TK-Solver) masukan dan keluaran optimasi dengan solver (Gottfried, 1998).

2.5. Simulasi Pengoperasian Waduk

Tujuan simulasi dalam studi ini adalah untuk meninjau kegagalan dari skenario target optimasi program linier. Model simulasi dapat menganalisis kemungkinan kegagalan target operasi yang telah ditetapkan optimasi program linier maupun model optimasi lainnya (Huang, 1996; Loucks dan Sigvaldason dalam Guibert, dkk., 1993).

Prinsip dasar simulasi menggunakan persamaan kontinuitas yang menggambarkan prinsip bahwa selang waktu tertentu, masukan air total pada ruang tertentu harus sama dengan keluaran total ditambah perubahan bersih dalam tampungan (Seyhan, 1977), persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad 2-14$$

di mana :

I = *inflow* ($m^3/detik$)

O = *outflow* ($m^3/detik$)

$\frac{dS}{dt}$ = perubahan tampungan terhadap waktu

Proses simulasi pengoperasian waduk dapat dilakukan dengan tersedianya data *inflow*, kebutuhan, losses dengan batasan-batasan kapasitas tampungan waduk sehingga diharapkan waduk dapat beroperasi sepanjang tahun. Simulasi operasi waduk dilakukan dengan menerapkan rumusan kesetimbangan air waduk, sehingga dari hasil simulasi diketahui apakah debit *inflow* yang tersedia dan kapasitas tampungan waduk mampu untuk memenuhi kebutuhan yang ditargetkan.

Rumusan sederhana dari persamaan kesetimbangan air waduk dapat dituliskan sebagai berikut:

$$I_t = E_t + R_t + L_t + S_t - S_{t-1} \quad 2-15$$

dimana:

S_{t-1} = tampungan waduk awal bulan ke-t (juta m^3)

I_t = debit *inflow* historis waduk bulan ke-t (juta m^3)

R_t = total pelepasan waduk bulan ke-t (juta m^3)

L_t = limpasan bulan ke-t (juta m^3)

E_t = kehilangan air bulan ke-t (juta m^3)

S_t = tampungan waduk akhir bulan ke- t (juta m^3)

t = 1, 2, 3, ..., 12

Untuk menilai kinerja hasil simulasi pengoperasian waduk perlu dilakukan analisis unjuk kerja waduk. Sehingga dapat diketahui keandalan dari pengoperasian waduk, seberapa lama kegagalan dapat terjadi atau jika terjadi kegagalan memerlukan waktu berapa lama untuk kembali menjadi sukses.

2.6. Unjuk Kerja Pengoperasian Waduk

Unjuk kerja merupakan indikator kinerja waduk dalam pengoperasiannya untuk memenuhi kebutuhan. Beberapa indikator untuk menilai besar *performance* operasi waduk dapat meliputi keandalan (*reliability*), kelentingan (*resiliency*), dan kerawanan (*vulnerability*) (Suharyanto, 1997).

2.6.1 Keandalan (*Reliability*)

Keandalan merupakan indikator seberapa sering waduk untuk dapat memenuhi kebutuhan yang ditargetkan selama masa pengoperasiannya. Untuk pengoperasian waduk, paling tidak ada dua macam definisi keandalan yaitu: (McMahon dan Russel, 1978 dalam Suharyanto, 1997):

1. Prosentase keadaan di mana waduk mampu memenuhi kebutuhannya. Sering Sungai pada definisi keandalan ini dapat dikaitkan dengan kegagalan. Dalam hal ini, waduk dianggap gagal jika waduk tidak dapat memenuhi kebutuhannya secara total.
2. Rerata persentase pelepasan waduk dibanding dengan kebutuhannya. Dalam definisi ini, meskipun suplesi waduk tidak dapat memenuhi kebutuhannya, waduk keseluruhan, tidak dianggap gagal total. Tetapi dianggap waduk hanya dapat mensuplai sebagian dari kebutuhannya.

Secara matematis, definisi di atas dapat dituliskan dengan menggunakan variabel " Z_t " yang nilainya ditentukan sesuai dengan dua definisi di atas dan disajikan dalam persamaan 2-15 dan 2-16.

$$Z_t^1 = \begin{cases} 1 & \text{untuk } R_t \geq D_t \\ 0 & \text{untuk } R_t \leq D_t \end{cases} \quad 2-16$$

$$Z_t^2 = \begin{cases} 1 & \text{untuk } R_t \geq D_t \\ \frac{R_t}{D_t} & \text{untuk } R_t \leq D_t \end{cases} \quad 2-17$$

Dalam jangka panjang, nilai keandalan sistem untuk definisi keandalan yang pertama dan yang kedua masing-masing dapat dituliskan dengan persamaan 2-18 dan 2-19 sebagai berikut:

$$\alpha_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Z_t^1 \quad 2-18$$

$$\alpha_2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Z_t^2 \quad 2-19$$

di mana:

n = jangka waktu pengoperasian

R_t = release pada waktu ke- t

D_t = demand pada waktu ke- t

α_1 = keandalan waduk, gagal total jika kebutuhan tidak terpenuhi

α_2 = keandalan waduk tidak gagal total jika waduk dapat mensuplai sebagian dari kebutuhannya

$\sum_{t=1}^n Z_t^2$ = jumlah total waktu waduk mampu memenuhi kebutuhan ($R_t \geq D_t$) untuk defenisi keandalan ke dua

$\sum_{t=1}^n (1 - Z_t^2)$ = jumlah total waktu waduk tidak mampu memenuhi kebutuhan ($R_t < D_t$) untuk defenisi keandalan ke dua

Dalam studi ini dipergunakan definisi keandalan yang pertama. Waduk dianggap gagal jika waduk tidak dapat mensuplai kebutuhan secara total. Kondisi tersebut dipergunakan untuk mengantisipasi pemenuhan kebutuhan air irigasi. Karena jika pemenuhan kebutuhan air irigasi kurang dari yang ditargetkan optimasi program linier maka luas tanam yang ditargetkan hasil analisis optimasi program linier tidak dapat dijamin terpenuhi. Selain itu hasil simulasi mempunyai nilai keandalan yang lebih kecil dari yang kondisi sebenarnya. Sehingga kondisi keandalan pertama diharapkan memberi lebih banyak nilai keamanan ketersediaan air.

2.6.2 Kelentingan (*Resiliency*)

Indikator ini untuk mengukur kemampuan waduk untuk kembali ke keadaan memuaskan dari keadaan gagal. Jika semakin cepat waduk kembali ke keadaan memuaskan maka dapat dikatakan bahwa waduk lebih lenting sehingga konsekuensi dari kegagalan lebih kecil. Dengan mempergunakan definisi kegagalan pertama, perhitungan

masa transisi dari keadaan gagal menjadi keadaan memuaskan dituliskan dengan variabel "W_t" sebagai berikut:

$$W_t = \begin{cases} 1 & \text{jika } R_{t-1} \leq D_{t-1} \text{ dan } R_t \geq D_t \\ 0 & \text{sebaliknya} \end{cases} \quad 2-20$$

Dalam jangka panjang, nilai rerata dari "W_t" akan menunjukkan jumlah rerata terjadinya transisi waduk dari keadaan gagal menjadi keadaan memuaskan. Jumlah rerata terjadinya transisi ini dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\rho = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n W_t \quad 2-21$$

dimana ρ menunjukkan probabilitas (rerata frekuensi) terjadinya transisi waduk dari keadaan gagal ke keadaan memuaskan. Jangka waktu rerata waduk dalam keadaan gagal secara kontinyu merupakan jumlah total waktu rerata waduk mengalami gagal dibagi dengan frekuensi rerata terjadinya transisi waduk dan secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T_{\text{gagal}} = \frac{\sum_{t=1}^n (1 - Z_t^1)}{\sum_{t=1}^n W_t} \quad 2-22$$

dimana:

T_{gagal} = jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal secara kontinyu.

Dalam jangka panjang, jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal secara kontinyu dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T_{\text{gagal}} = \frac{1 - \alpha_1}{\rho} \quad 2-23$$

Semakin lama jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal maka semakin kecil kelentingannya sebagai akibatnya maka konsekuensi dari keadaan gagal tersebut juga akan besar. Oleh karenanya indikator kelentingan didefinisikan sebagai γ₁ berikut:

$$\gamma_1 = \frac{1}{T_{\text{gagal}}} = \frac{\rho}{1 - \alpha_1} \quad 2-24$$

dimana :

γ₁ = unjuk kerja kelentingan.

2.6.3 Kerawanan (Vulnerability)

Kerawanan adalah besaran dari kegagalan yang didapat dari perbedaan antara kapasitas waduk dan jumlah air yang dibutuhkan, dibagi dengan jumlah air yang dibutuhkan (Qomariah, 1992).

Dalam hal ini jika terjadi kegagalan maka dapat diukur seberapa besar suatu kegagalan yang terjadi. Dalam studi ini, kerawanan didefinisikan sebagai nilai kekurangan (DEF_t) air pelepasan dari kebutuhannya, nilai DEF_t didefinisikan sebagai berikut:

$$DEF_t = \begin{cases} D_t - R_t & \text{jika } R_t \leq D_t \\ 0 & \text{jika } R_t \geq D_t \end{cases} \quad 2-25$$

Oleh karenanya unjuk kerja kerawanan tersebut dapat dirumuskan dengan berbagai penafsiran sebagai berikut (Suharyanto, 1997):

1. Nilai rerata "deficit ratio"

$$v_1 = \frac{\sum_{t=1}^n \left(\frac{DEF_t}{D_t} \right)}{\sum_{t=1}^n W_t} \quad 2-26$$

2. Nilai Maksimum "deficit ratio"

$$v_2 = \max_t \left\{ \frac{DEF_t}{D_t} \right\} \quad 2-27$$

3. Nilai maksimum "deficit"

$$v_3 = \max_t \{ DEF_t \} \quad 2-28$$

2.7. Perumusan Model

Perumusan model ini merupakan aplikasi dari persamaan matematik baku (umum) fungsi tujuan dan fungsi kendala dari program linier dan simulasi yang ditunjukkan oleh persamaan 2-11 sampai 2-14.

Model program linier dirumuskan dengan tujuan memaksimalkan pendapatan yang diperoleh dari ketersediaan air waduk Kedung Ombo yang dimanfaatkan untuk kebutuhan irigasi, air baku dan PLTA.

Sedangkan simulasi pengoperasian waduk dilakukan untuk mengetahui keandalan dari pengoperasian waduk, seandainya hasil dari optimasi program linier diimplementasikan. Untuk batasan-batasan dan asumsi yang diterapkan pada pemodelan ini akan dibahas lebih jauh pada bab metodologi dan bab analisis dan pembahasan.

2.7.1 Program Linier Operasi Waduk Kedung Ombo

Fungsi tujuan pengoperasian adalah untuk memaksimalkan pemanfaatan dan pendapatan dari pendistribusian air waduk dalam memenuhi kebutuhan air irigasi, pembangkit tenaga listrik (PLTA) dan Air Baku. Bagan alir optimasi Waduk Kedung Ombo dengan program linier seperti yang tercantum pada Gambar 2-3.

Semua fungsi kendala berkaitan erat dengan pengalihragaman (*transformation*) keberadaan debit *inflow* waduk misalnya untuk memenuhi kebutuhan irigasi, air baku maupun energi listrik. Dalam studi ini pengalihragaman sesuai dengan fungsi waduk yang ditentukan oleh 4. (empat) elemen yaitu:

- Tampung air Waduk Kedung Ombo
- Total pelepasan air (irigasi, PLTA dan air baku)
- Limpasan dari bangunan pelimpah
- Kehilangan air (*Evaporasi*)

Persamaannya sebagai berikut:

$$IN_t = RL_t + LE_t + SP_t + S_t - S_{t-1} \quad 2-29$$

$$S_{0(\text{awal})} = S_{12}$$

di mana:

- IN_t = skenario debit *inflow* waduk bulan ke-t (juta m^3)
- RL_t = total pelepasan waduk melalui pipa tekan bulan ke-t (juta m^3)
- SP_t = limpasan bulan ke-t (juta m^3)
- LE_t = kehilangan air waduk akibat *evaporasi* bulan ke-t (juta m^3)
- S_t = tampungan waduk akhir bulan ke-t (juta m^3)
- S_{t-1} = tampungan waduk awal bulan ke-t (juta m^3)
- t = 1, 2, 3, ..., 12

2.7.1.1 Fungsi Kendala

Fungsi kendala merupakan batasan-batasan yang akan membatasi pengoperasian waduk. Fungsi kendala sistem pengoperasian waduk Kedung Ombo yang dibagi menjadi beberapa persamaan sebagai berikut :

1. *Outlet* dari pada pipa tekan ini pada dasarnya terbagi menjadi dua (lihat Gambar 3-2) yaitu: *outlet* irigasi dan *outlet* turbin. Di mana pengoperasian dari waduk masing-masing dari *outlet* adalah sebagai berikut:

- a. Pelepasan total air waduk melalui pipa tekan yang mengacu pada pengoperasian waduk dengan elevasi lebih besar atau sama dengan MOL Irigasi (+67,5 m), yang setara dengan volume tampungan waduk antara lebih besar 18,70 sampai 634,6 juta m³, dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$RL_t - EL_t - PA_t - PB_t = 0 \quad 2-30$$

di mana:

PA_t = pelepasan air irigasi golongan I melalui *outlet* irigasi bulan ke-t (juta m³)

PB_t = pelepasan air irigasi golongan II melalui *outlet* irigasi bulan ke-t (juta m³)

EL_t = pelepasan air melalui *outlet* turbin dimana ketinggian headnya untuk pembangkit energi listrik, airnya untuk air baku dan irigasi bulan ke-t (juta m³)

RL_t = total pelepasan waduk melalui pipa tekan bulan ke-t (juta m³)

t = 1, 2, 3, ..., 12

Tetapi jika elevasi waduk berada pada elevasi lebih kecil MOL Irigasi (+67,5 m) dan lebih besar atau sama dengan MOL Air Baku dan PLTA (+64,5m) atau setara dengan volume tampungan waduk antara 0 sampai dengan 18,70 maka pelepasan dirumuskan sebagai berikut:

$$RL_t - EL_t = 0 \quad 2-31$$

di mana:

EL_t = pelepasan air melalui *outlet* turbin dimana ketinggian headnya untuk pembangkit energi listrik, airnya untuk air baku dan irigasi bulan ke-t (juta m³)

RL_t = total pelepasan waduk melalui pipa tekan bulan ke-t (juta m³)

t = 1, 2, 3, ..., 12

- b. Pelepasan air waduk yang melalui *outlet* turbin di mana ketinggian headnya dimanfaatkan untuk pembangkit listrik dan debitnya untuk memenuhi kebutuhan air baku dan sisanya dimanfaatkan untuk irigasi., dirumuskan sebagai berikut:

$$EL_t - PA1_t - PB1_t - AB_t = 0 \quad 2-32$$

di mana:

AB_t = pelepasan air baku melalui *outlet* turbin bulan ke-t (juta m^3)

$PA1_t$ = pelepasan irigasi golongan I melalui *outlet* turbin bulan ke-t (juta m^3)

$PB1_t$ = pelepasan irigasi golongan II melalui *outlet* turbin bulan ke-t (juta m^3)

2. Meminimumkan kekurangan pelepasan irigasi, direkomendasikan persamaan seperti di bawah ini. Dan akan berpengaruh pada fungsi tujuan terutama menyangkut timbangan atau finalti atau prioritas yang ditetapkan.

$$PAT_t - d_t^+ + d_t^- = PAS_t \quad 2-33$$

di mana:

PAT_t = $(PA_t + PA1_t)$ jumlah pelepasan irigasi melalui *outlet* turbin dan *outlet* irigasi bulan ke-t (juta m^3)

PAS_t = kebutuhan air irigasi bulan ke-t (juta m^3)

d_t^+ = kelebihan suplesi kebutuhan air irigasi golongan I

d_t^- = kekurangan suplesi kebutuhan air irigasi golongan I

3. Diketahui bahwa kebutuhan air daerah irigasi berbeda setiap bulannya, sedangkan luas lahan tetap sama, sehingga diperlukan suatu persamaan kendala untuk mengantisipasi kesalahan pola skala kebutuhan. Pendekatan persamaan pola skala kebutuhan dirumuskan sebagai berikut :

$$\frac{PAS_t}{\sum_{t=1}^{n=4} PAS_t} \left(\sum_{t=1}^{n=4} PAT_t \right) - PAT_t = 0 \quad 2-34$$

di mana:

ΣPAS_t = total air dibutuhkan irigasi selama satu musim tanam yaitu 4 bulan (juta m^3)

ΣPAT_t = total pelepasan irigasi melalui *outlet* turbin dan *outlet* irigasi selama selama satu musim tanam yaitu 4 bulan (juta m^3)

T = satu musim tanam yaitu 4 bulan

4. Kebutuhan air baku konstan sepanjang tahun dengan pelepasan sebesar 15,94 juta m^3 /bulan, pelepasan PLTA maksimal 160,19 juta m^3 /bulan dan pelepasan total melalui pipa tekan maksimal 455,65 juta m^3 /bulan.

$$AB_t = \text{konstan} \quad 2-35$$

$$EL_t \leq \text{kapasitas maksimum outlet turbin} \quad 2-36$$

$$RL_t \leq \text{kapasitas maksimum pipa tekan} \quad 2-37$$

5. Kendala kapasitas tampungan waduk berdasarkan point 1.a adalah sebagai berikut:

$$MOL \text{ Air Baku \& PLTA} \leq S_t < MOL \text{ Irigasi} \quad 2-38$$

$$MOL \text{ Irigasi} \leq S_t \leq \text{Kapasitas maksimum waduk} \quad 2-39$$

di mana:

$$S_t = \text{tampungan waduk akhir bulan ke-}t \text{ (juta } m^3/\text{bulan)}$$

$$t = 1, 2, 3, \dots, 12$$

6. Persamaan program mengijinkan adanya limpasan melalui bangunan pelimpah untuk mengantisipasi kelebihan debit *inflow* ke waduk.

$$SP_t \geq 0 \quad 2-40$$

di mana:

$$SP_t = \text{limpasan bulan ke-}t \text{ (juta } m^3/\text{bulan)}$$

$$t = 1, 2, 3, \dots, 12$$

7. Semua variabel putusan tidak boleh kurang dari nol atau bernilai negatif (persyaratan non-negatif).

$$d_t^+, d_t^-, D_t^+, D_t^- \geq 0 \quad 2-41$$

$$PA_t, PB_t, PA1_t, PB1_t, S_t, RL_t, EL_t \geq 0 \quad 2-42$$

2.7.1.2 Fungsi Tujuan

Bentuk umum fungsi sasaran dari pengoperasian Waduk Kedung Ombo adalah untuk memaksimalkan pendapatan Irigasi, air baku dan PLTA sebagai berikut:

Maksimise $Z = a_1 \cdot EL_1 + \dots + a_{11} \cdot EL_{11}$

$$+ \sum_{t=1}^{n=4} (bPA_t - W_t^+ d_t^+ - W_t^- d_t^-) + \sum_{t=5}^{n=8} (cPA_t - W_t^+ d_t^+ - W_t^- d_t^-) +$$

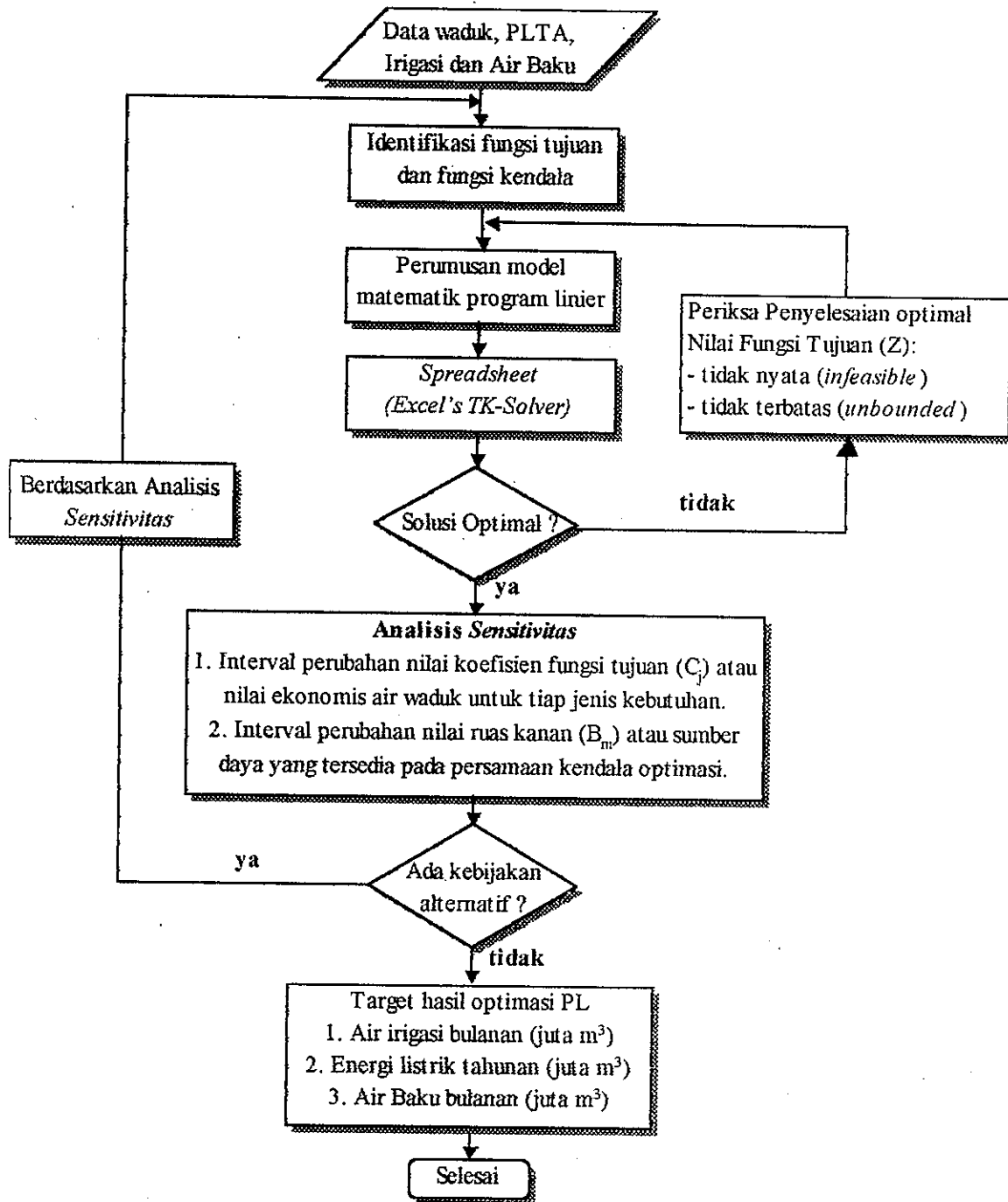
$$\sum_{t=9}^{n=12} (dPA_t - W_t^+ d_t^+ - W_t^- d_t^-) + \sum_{t=1}^{n=4} (ePB_t - M_t^+ D_t^+ - M_t^- D_t^-) + \sum_{t=5}^{n=8} (fPB_t - M_t^+ D_t^+ - M_t^- D_t^-) + \sum_{t=9}^{n=12} (gPB_t - M_t^+ D_t^+ - M_t^- D_t^-) \quad 2-43$$

di mana :

- EL_t = pelepasan air melalui *outlet* turbin dimana ketinggian headnya untuk pembangkit energi listrik, airnya untuk air baku dan irigasi bulan ke-t (juta m^3)
- PA_t = pelepasan air irigasi golongan I melalui *outlet* irigasi bulan ke-t (juta m^3)
- PB_t = pelepasan air irigasi golongan II melalui *outlet* irigasi bulan ke-t (juta m^3)
- W_t^+ = bobot yang diberikan terhadap d_t^+
- W_t^- = bobot yang diberikan terhadap d_t^-
- M_t^+ = bobot yang diberikan terhadap D_t^+
- M_t^- = bobot yang diberikan terhadap D_t^-
- d_t^+ = kelebihan suplesi kebutuhan air irigasi golongan I
- d_t^- = kekurangan suplesi kebutuhan air irigasi golongan I
- D_t^+ = kelebihan suplesi kebutuhan air irigasi golongan II
- D_t^- = kekurangan suplesi kebutuhan air irigasi golongan II
- a ... a11 = pendekatan nilai ekonomi air waduk yang melalui *outlet* turbin (Rp/ m^3)
- b = nilai ekonomi air waduk musim tanam padi 1 golongan I yang melalui *outlet* irigasi (Rp/ m^3)
- c = nilai ekonomi air waduk musim tanam padi 2 golongan I yang melalui *outlet* irigasi (Rp/ m^3)
- d = nilai ekonomi air waduk musim tanam palawija golongan I yang melalui *outlet* irigasi (Rp/ m^3)
- e = nilai ekonomi air waduk musim tanam padi 1 golongan II yang melalui *outlet* irigasi (Rp/ m^3)
- f = nilai ekonomi air waduk musim tanam padi 2 golongan II yang melalui *outlet* irigasi (Rp/ m^3)
- g = nilai ekonomi air waduk musim tanam palawija golongan II yang melalui *outlet* irigasi (Rp/ m^3)

t = 1, 2, 3,, 12

Z = fungsi tujuan (juta rupiah)



Gambar 2-3 Bagan alir optimasi Waduk Kedung Ombo dengan Program Linier

2.7.2 Simulasi Operasi Waduk Kedung Ombo

Setelah dari proses optimasi dengan program linier maka selanjutnya dilakukan simulasi pengoperasian untuk mengetahui unjuk kerja dari waduk. Simulasi pengoperasian waduk dilakukan berdasarkan dari pelepasan waduk target optimasi

sehingga dapat diketahui tingkat kegagalan yang mungkin terjadi jika hasil optimasi diimplementasikan pada pengoperasian waduk (lihat Gambar 2-4).

Proses simulasi dalam studi ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Neraca kesetimbangan air waduk

$$I_t = E_t + R_t + L_t + S_t - S_{t-1} \quad 2-44$$

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

di mana:

S_{t-1} = tampungan waduk awal bulan ke-t (juta m^3)

I_t = debit *inflow* historis waduk bulan ke-t (juta m^3)

R_t = total pelepasan waduk target optimasi bulan ke-t (juta m^3)

L_t = limpasan bulan ke-t (juta m^3)

E_t = kehilangan air bulan ke-t (juta m^3)

S_t = tampungan waduk akhir bulan ke-t (juta m^3)

t = 1, 2, 3, ..., 12

2. Energi listrik yang mampu dibangkitkan untuk proses simulasi merupakan fungsi dari elevasi dan sesuai dengan karakteristik turbin yang terpasang, sehingga dapat diperoleh hubungan sebagai berikut (Indra Karya, 1993; dan Pranoto, S., 1994) :

$$H_{\text{eff}} = \text{EMAW} - \left[10^{1,57} \cdot (Q - 4,5)^{0,00718} \right] - (3,9 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2) \quad 2-45$$

$$EP_t = \eta \cdot g \cdot Q \cdot H_{\text{eff}} \cdot 1 \text{ jam} \quad 2-46$$

$$Q = \frac{EP_t}{0,87 \cdot 9,81 \cdot H_{\text{eff}}}$$

$$q_t = Q \cdot 60 \cdot 60$$

$$q_t = 3600 \cdot \left[\frac{EP_t}{0,87 \cdot 9,81 \cdot H_{\text{eff}}} \right] \quad 2-47$$

di mana:

EMAW = elevasi muka air waduk (m)

H_{eff} = tinggi jatuh efektif (m)

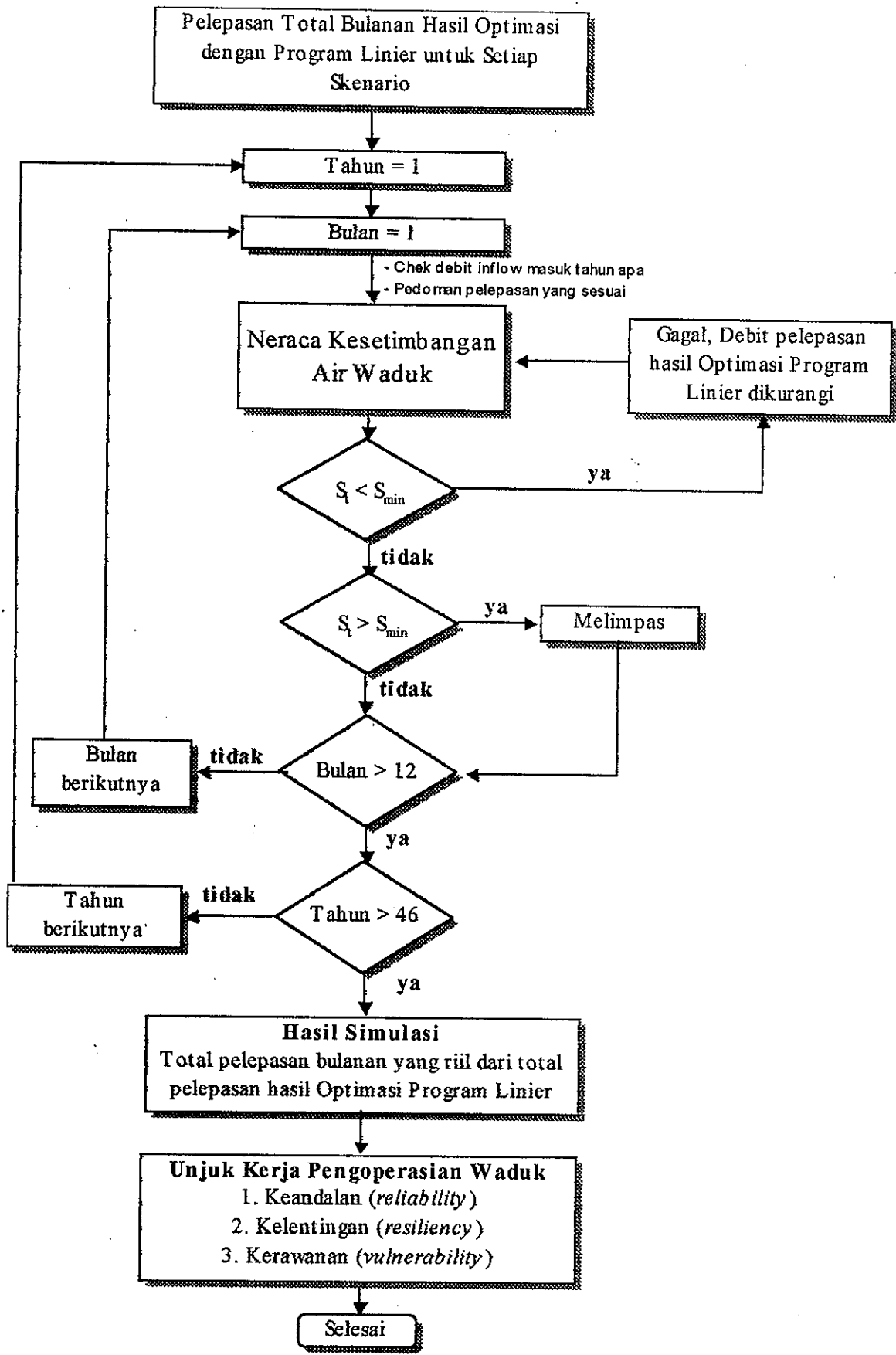
Q = debit pembangkit untuk PLTA (m^3/det)

g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m}/\text{det}^2$)

η = efisiensi turbin diambil 87% (data proyek)

q_t = pelepasan air melalui turbin untuk pembangkit energi listrik dalam 1 jam

EP_t = produksi energi listrik (Kwh/bulan)



Gambar 2-4 Bagan alir simulasi pengoperasian waduk Kedung Ombo target optimasi

BAB III

METODOLOGI

3.1. Lokasi Studi

Bendungan Kedung Ombo yang dibangun antara tahun 1986-1990 terletak di Kabupaten Grobogan. Daerah genangannya menyebar di tiga wilayah administratif kabupaten yaitu Kabupaten Grobogan, Kabupaten Boyolali dan Kabupaten Sragen (Najoan dan Surjadilaga, 1992). Luas Daerah Pengaliran Sungai (DPS) di lokasi bendungan adalah 614 Km². Sebagian besar luas DPS merupakan DPS Sungai Serang lihat Gambar 1-1 (Indra Karya, 1993).

3.2. Pendekatan Masalah

Proses analisis program linier dan simulasi dari studi ini memerlukan beberapa penyederhanaan dan pendekatan-pendekatan maupun yang mengacu pada kondisi dari sistem yang ada.

3.2.1 Skenario Pola Debit *Inflow* Tahunan Waduk

Skenario pola debit *inflow* tahunan waduk menjadi masukan optimasi program linier. Di mana data debit *inflow* waduk sepanjang 46 tahun di bagi menjadi 5 (lima) kelompok tahun debit *inflow*. Sebelum data dibagi ke dalam 5 kelompok tahun debit *inflow*, data debit rerata bulanan dijadikan debit rerata tahunan selama 46 tahun dan diurutkan dari yang terbesar ke yang terkecil (lihat Gambar 4-2).

Pembagian kelompok tahun debit *inflow* yaitu kelompok tahun basah sekali, kelompok tahun basah, kelompok tahun normal, kelompok tahun kering, dan kelompok tahun kering sekali dilakukan secara visual. Dari skenario tersebut akan diperoleh kelompok dari tahun-tahun yang termasuk ke dalam tahun basah sekali, tahun basah, tahun normal, tahun kering, dan tahun kering sekali.

Untuk memperoleh debit *inflow* bulanan yang mewakili suatu kelompok misalnya dari kelompok tahun basah sekali, diambil rerata bulanan dari jumlah tahun yang termasuk kedalam kelompok tahun basah sekali. Hal ini akan diperjelas pada sub. bab. 4.2.1 dan pola debit *inflow* waduk tahunan yang diperoleh, dianggap deterministik (pasti) dan masing-masing skenario pola debit *inflow* waduk digunakan sebagai masukan pada optimasi program linier (lihat Gambar 3-1).

3.2.2 Pendekatan Program Linier Operasi Waduk Kedung Ombo

Proses optimasi program linier dengan menggunakan masukan dari masing-masing skenario pola debit *inflow*, dianalisis secara tersendiri. Sehingga akan diperoleh hasil pelepasan air waduk yang optimum pada masing-masing skenario pola debit *inflow* waduk.

Penyelesaian optimal dengan menggunakan program linier diperlukan penyederhanaan dari sistem sumberdaya air yang kompleks, sehingga diperlukan beberapa asumsi dan pendekatan dari sistem yang ada. Hal ini berhubungan dengan berbagai permasalahan di dunia nyata yang harus didefinisikan dalam bentuk persamaan matematik linier (de Neufville, 1990), sehingga dimungkinkan untuk diselesaikan dengan metode Program Linier. Beberapa pendekatan studi ini untuk optimasi Waduk Kedung Ombo adalah sebagai berikut:

1. Debit *inflow* historis selama 46 tahun diskenario menjadi 5 kelompok pola debit *inflow* tahunan dan rerata dari masing-masing kelompok pola debit *inflow* tahunan yang diperoleh diasumsikan deterministik.
2. Kehilangan air bulanan diperoleh dari data proyek, yang didasarkan dari ketinggian *evaporasi* (mm/hari) dan dikalikan dengan luas muka air waduk *rule curve* hasil studi Indra Karya (Gambar 3-5).
3. Volume tampungan awal tahun pengoperasian dan volume tampungan akhir tahun pengoperasian sama.
4. Tampungan waduk diakhir bulan tidak diperkenankan kurang dari kapasitas minimum atau melebihi kapasitas maksimum (Huang, 1997).
5. Jika volume waduk melebihi kapasitas maksimum, maka kelebihan melimpas melalui bangunan pelimpah.
6. Air yang melimpas melalui bangunan pelimpah tidak diperhitungkan sebagai sumberdaya yang dapat dimanfaatkan atau diasumsikan hanya sebagai kelebihan (Martsanto, 1990).
7. Suplesi kebutuhan dari waduk diasumsikan sama dengan debit pembangkit energi listrik (Pantouw, 1988) atau pembangkit energi listrik sebagai fungsi dari elevasi diabaikan (Pranoto, 1944), dengan syarat debit keluaran tersebut tidak melebihi kapasitas pengaliran turbin maksimum.

8. Jika debit melebihi kapasitas pengaliran turbin maksimum dikarenakan kebutuhan air di hilir lebih besar dan air mencukupi maka *outlet* irigasi di buka jika elevasi waduk lebih besar atau sama dengan +67,5 m.
9. Kebutuhan air baku dianggap konstan sepanjang tahun yaitu sebesar 15,94 juta m³ per-bulan.
10. Berdasarkan pertimbangan faktor-faktor sosial ekonomi maka luas tanam harus dipenuhi untuk setiap musim tanam dengan batasan minimal 10% dari luas areal yang tersedia (Wijaya dan Anwar, 1995).

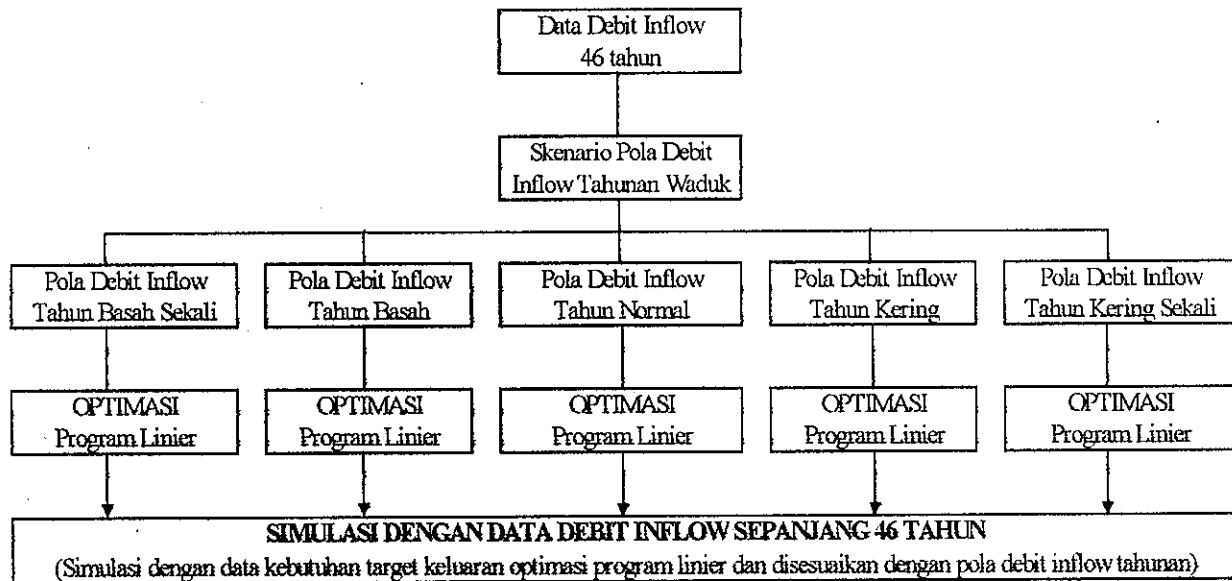
3.2.3 Pendekatan Simulasi Pengoperasian Waduk Kedung Ombo

Simulasi dengan mengimplementasikan pelepasan dari hasil optimasi program linier dilakukan dengan menggabungkan kelima skenario pola debit *inflow* waduk. Di mana diketahui bahwa dari kelima skenario pola debit *inflow* waduk, masing-masing skenario merupakan rerata dari beberapa kelompok tahun dari jumlah keseluruhan 46 tahun data debit *inflow*.

Pada proses simulasi pengoperasian waduk semua kelompok tahun dari skenario debit *inflow* optimasi harus dimasukkan dengan kondisi pelepasan air waduk yang sesuai, misalnya jika tahun 1953 termasuk kelompok tahun normal maka pelepasan waduk pada simulasi merupakan hasil dari optimasi program linier skenario pola debit *inflow* tahun normal, demikian juga untuk yang lainnya (lihat Gambar 3-1). Beberapa pendekatan dilakukan sebagai berikut:

1. Simulasi dilakukan sepanjang 46 tahun berdasarkan data debit *inflow* rerata bulanan dan dianggap sudah mewakili proses sebenarnya.
2. Kehilangan air bulanan (*Evaporasi*) merupakan fungsi dari luas genangan waduk dengan data ketinggian *evaporasi* data proyek.
3. Tampungannya pada awal tahun dilakukan dengan coba-coba (*try and error*) sehingga limpasan menjadi minimum/tidak terjadi (Garg, 1982).
4. Tampungannya waduk di akhir bulan tidak diperkenankan kurang dari kapasitas minimum dan melebihi kapasitas maksimum (Huang, 1997).
5. Air yang melimpas melalui bangunan pelimpah tidak diperhitungkan sebagai sumberdaya air yang dapat dimanfaatkan atau diasumsikan sebagai kelebihan (Martsanto, 1990).
6. Pembangkit energi listrik sebagai fungsi elevasi dan sesuai dengan karakteristik turbin yang terpasang pada Waduk Kedung Ombo.

7. Hasil simulasi dengan masukan target program linier, akan diperoleh tingkat kegagalan pengoperasian waduk pada bulan-bulan tertentu. Kegagalan terjadi apabila suplesi kebutuhan air yang diijinkan simulasi lebih kecil dari ditargetkan oleh program linier (Pranoto, 1994).



Gambar 3-1 Alur logik dari proses simulasi target optimasi program linier

3.2.4 Ketersediaan Air di Hilir Waduk Kedung Ombo

Ketersediaan air di hilir waduk Kedung Ombo diperhitungkan untuk mencukupi kebutuhan sistem daerah irigasi waduk Kedung Ombo (lihat gambar 3-2). Perhitungan dilakukan tersendiri atau diluar dari perhitungan optimasi dengan program linier dengan kondisi ketersediaan air diambil debit rerata bulanan.

1. Ketersediaan air Sungai Lanang

Debit air Sungai Lanang dapat dipergunakan untuk suplesi daerah irigasi Sidorejo Kiri di pintu pengambilan Bendung Lanang di mana diketahui luas daerah irigasi Sidorejo kiri 1.818 ha (lihat Gambar 1-1).

Tabel 3-1 Debit rerata Bulanan Sungai Lanang Di Bendung Lanang selama 41 tahun (1953-1993), *Catchment Area 109 km²*.

Keterangan	Satuan	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agt.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
Debit	m ³ /detik	4,71	5,00	4,30	3,02	2,00	0,74	0,62	0,32	0,37	0,72	1,90	3,63
Volume	juta m ³	12,21	12,95	11,13	7,83	5,18	1,93	1,61	0,83	0,96	1,87	4,93	9,42

Sumber : Indah Karya, 1995

2. Ketersediaan air Sungai Lusi

Debit air Sungai Lusi dapat dipergunakan untuk suplesi daerah irigasi Klambu Kanan, Klambu Kiri dan Tambak Romo di pintu pengambilan Bendung Klambu. Tetapi

sebelumnya ketersediaan debit air Sungai Lusi di Bendung Klambu terlebih dahulu akan dipergunakan untuk daerah irigasi Dumpil Kiri dan Dumpil Kanan di pintu pengambilan Bendung Dumpil. Luas keseluruhan daerah irigasi di Bendung Dumpil 11.300 ha. Sehingga dalam hal ini perlu diperhitungkan kebutuhan air dari di pintu pengambilan Bendung Dumpil dan sisanya dimanfaatkan di Bendung Klambu.

Tabel 3-2 Debit rerata bulanan Sungai Lusi di Bendung Dumpil selama 41 tahun (1953-1993), *catchment area* 893 km².

Keterangan	Satuan	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agt.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
Debit	m ³ /detik	29,90	22,24	26,96	16,74	8,63	3,93	4,77	2,18	2,05	6,45	12,78	23,94
Volume	juta m ³	77,49	57,65	69,88	43,38	22,37	10,18	12,37	5,66	5,31	16,72	33,13	62,06

Sumber: Indah Karya, 1995

3. Aliran Lateral (*Lateral flow*)

Berdasarkan data dari analisis Indra Karya ada dua bendung yang diperhitungkan aliran lateral yang terjadi yaitu Bendung Sedadi dan Bendung Klambu. Bendung Sidorejo aliran lateral dianggap nol karena Bendung Sidorejo terletak tepat di hilir Waduk Kedung Ombo (± 9 km).

Sedangkan untuk Bendung Sedadi terletak dihilir Bendung Sidorejo dengan jarak ± 20 km dan Bendung Klambu terletak di hilir Bendung Sedadi dengan jarak ± 40 km. Untuk keperluan perhitungan debit lateral di Bendung Sedadi digunakan perhitungan pendekatan luas daerah tampungan air Bendung Sedadi dan hujan tahunan sehingga diperoleh koefisien debit dengan persamaan sebagai berikut (Indra Karya, 1993) :

$$Q_{\text{sedadi}} = 0,18 Q_s$$

dimana:

$$Q_{\text{sedadi}} = \text{debit lateral hulu Bendung Sedadi (m}^3/\text{detik)}$$

$$Q_s = \text{debit di Bendung Sedadi sebelum dibangun Waduk Kedung Ombo (m}^3/\text{detik)}$$

Tabel 3-3 Debit rerata aliran lateral bulanan Sungai Serang Di Bendung Sedadi selama 41 tahun (1953-1993), *Catchment Area* 145 km².

Keterangan	Satuan	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agt.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
Debit	m ³ /detik	5,80	6,31	5,48	3,89	2,88	1,33	1,02	0,56	0,85	1,64	2,94	4,71
Volume	juta m ³	15,05	16,34	14,21	10,08	7,47	3,45	2,64	1,44	2,21	4,24	7,61	12,20

Sumber: Indah Karya, 1995

Untuk Perhitungan debit lateral yang terjadi di Bendung Klambu digunakan perhitungan pendekatan luas daerah tampungan air Bendung Sedadi dan hujan

tahunan sehingga diperoleh koefisien debit dengan persamaan sebagai berikut (SMEC dan Indah Karya, 1985) :

$$Q_{klambu} = 2,75 Q_s$$

dimana:

Q_{klambu} = debit lateral hulu Bendung Klambu

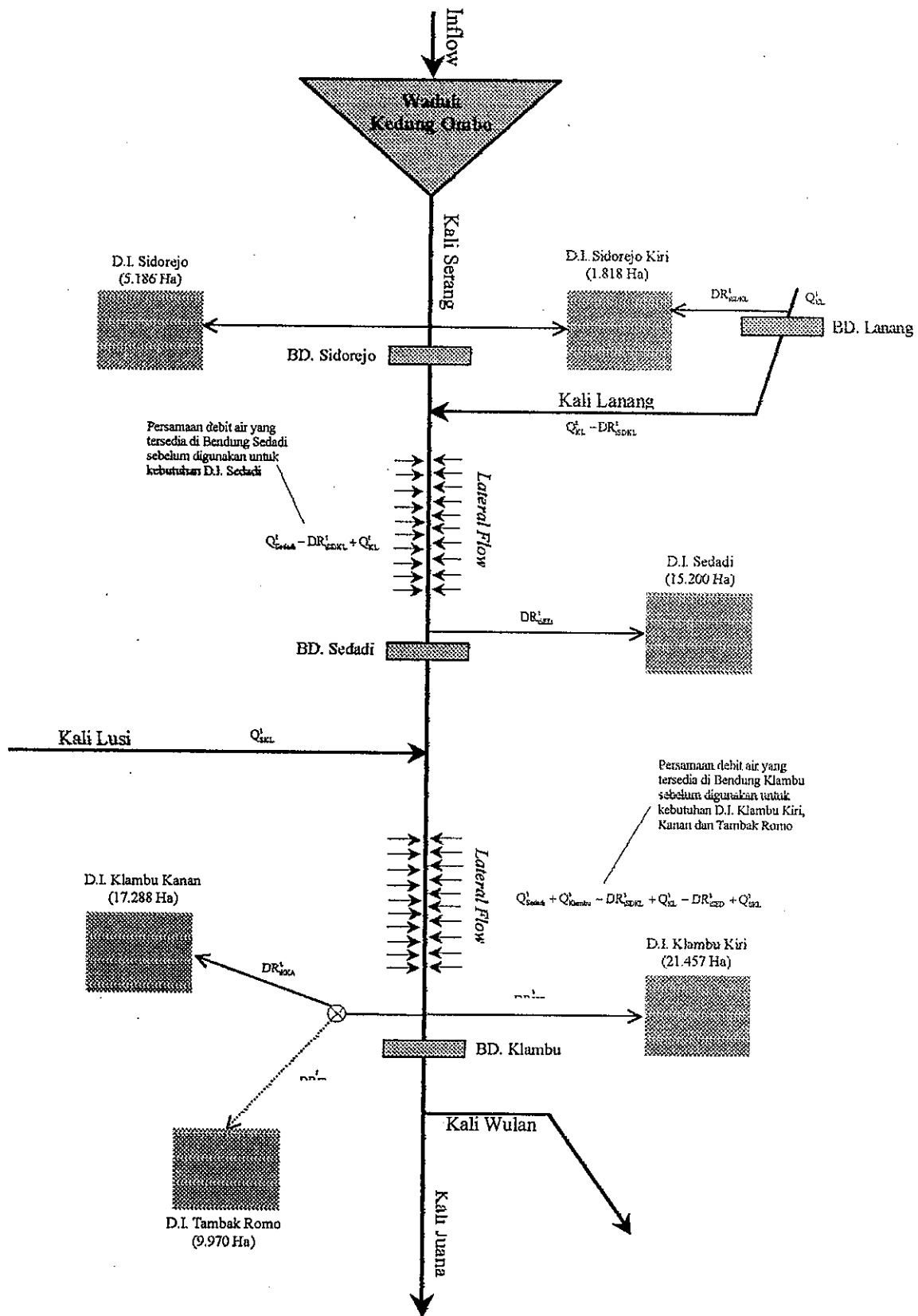
Q_s = debit di Bendung Sedadi sebelum dibangun Waduk Kedung Ombo (m³/detik)

Tabel 3-4 Debit rerata aliran lateral bulanan Sungai Serang Di Bendung Klambu selama 41 tahun (1953-1993), *Catchment Area 1319 km²*.

Keterangan	Satuan	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Agt.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
Debit	m ³ /detik	88,68	96,33	83,73	59,42	44,00	20,32	15,58	8,51	13,02	25,01	44,86	71,93
Volume	juta m ³	229,86	249,69	217,03	154,03	114,05	52,66	40,39	22,05	33,75	64,83	116,28	186,43

Sumber: Indah Karya, 1995

Fungsi luasan dari ketersediaan air pada sistem irigasi waduk Kedung Ombo terutama ketersediaan air dari Sungai Lanang, Sungai Lusi dan *Lateral flow* diperhitungkan secara tersendiri atau di luar perhitungan optimasi. Proses perhitungan dilakukan dengan menggunakan kesetimbangan masa air dengan urutan seperti pada Gambar 3-2.



Gambar 3-2 Diagram sistem daerah irigasi waduk Kedung Ombo

Keterangan gambar:

- DR_{ISDKL}^t =kebutuhan daerah irigasi Sidorejo Kiri yang dapat disuplesi oleh ketersediaan air di Bendung Lanang bulan ke-t (juta m^3)
- Q_{KL}^t = ketersediaan air Sungai Lanang di Bendung Lanang bulan ke-t (juta m^3)
- DR_{ISED}^t =kebutuhan daerah irigasi Sedadi yang dapat disuplesi oleh ketersediaan air di Bendung Sedadi bulan ke-t (juta m^3)
- Q_{SKL}^t =ketersediaan air Sungai Lusi setelah dikurangi untuk suplesi irigasi di Bendung Dumpil bulan ke-t (juta m^3)
- Q_{Sedadi}^t = ketersediaan air *Lateral flow* di Bendung Sedadi bulan ke-t (juta m^3)
- Q_{Klambu}^t = ketersediaan air *Lateral flow* di Bendung Klambu bulan ke-t (juta m^3)
- DR_{IKKA}^t =kebutuhan daerah irigasi Klambu Kanan yang dapat disuplesi oleh ketersediaan air di Bendung Klambu bulan ke-t (juta m^3)
- DR_{IKKI}^t =kebutuhan daerah irigasi Klambu Kiri yang dapat disuplesi oleh ketersediaan air di Bendung Klambu bulan ke-t (juta m^3)
- DR_{ITR}^t =kebutuhan daerah irigasi Tambak Romo yang dapat disuplesi oleh ketersediaan air di Bendung Klambu bulan ke-t (juta m^3)

3.3. Pengumpulan Data

Studi ini memerlukan data sebagai berikut:

1. Data irigasi

- Luas daerah layanan irigasi

Waduk Kedung Ombo ditambah dengan suplesi dari Sungai Lusi dan Sungai Lanang direncanakan untuk mengairi daerah irigasi seluas 59.425 ha. Namun data terakhir menunjukkan bahwa luas potensi daerah irigasi bertambah menjadi 70.919 ha (Indra Karya, 1993 dan informasi dari staf bagian Operasi dan Pemeliharaan Waduk Kedung Ombo, 2000).

- Pola tanam daerah irigasi

Pola tanam daerah irigasi pada saat ini adalah padi-padi-palawija dengan sistem golongan. Golongan pertama penanaman dimulai pada pertengahan bulan oktober dan golongan kedua dimulai pada awal bulan november. Sistem golongan dilakukan

untuk menghindari memuncaknya penggunaan air di tingkat petani (Wiratman, P.T dan *Association*, 2000).

□ Kebutuhan air irigasi

Data kebutuhan irigasi diperoleh dari hasil analisis Indra Karya, 1993. Kebutuhan air irigasi dihitung dengan menggunakan pola tanam padi-padi-palawija sistem golongan seperti yang sudah disebutkan di atas. Kebutuhan air dihitung dengan periode 15 harian. Kebutuhan irigasi dari waduk Kedung Ombo dialirkan melalui Sungai Serang dan didistribusikan melalui beberapa bendung yang ada di hilir bendungan waduk Kedung Ombo.

2. Data debit *inflow*

Data debit *inflow* waduk Kedung Ombo yang tersedia merupakan data debit rerata bulanan sepanjang 46 tahun. Data debit diperoleh dengan dua cara yaitu: pertama diestimasi dari bendung Sedadi mulai dari tahun 1953-1986 dengan persamaan sebagai berikut (Indra Karya, 1993) :

$$Q_{kdo} = 0,82 Q_s$$

dimana :

Q_{kdo} = debit rerata *inflow* bulan tersedia di waduk Kedung Ombo ($m^3/detik$).

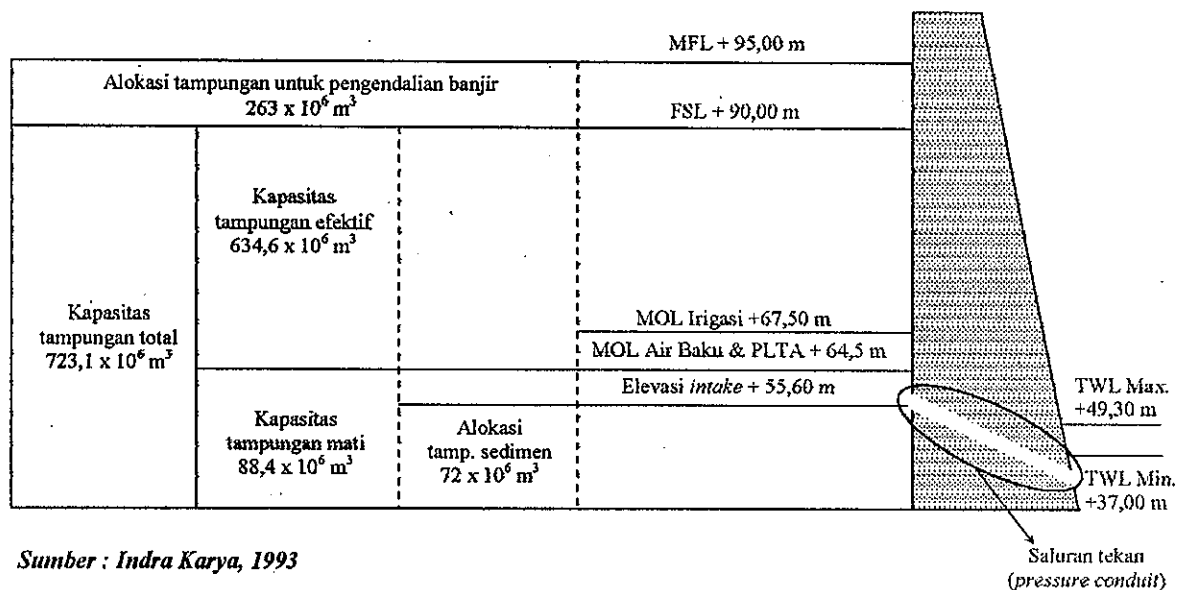
Q_s = debit rerata bulanan tercatat di hulu Bendung Sedadi sebelum dibangunnya waduk Kedung Ombo ($m^3/detik$).

Kedua dari tahun 1987-1998 merupakan debit rerata bulanan yang diperoleh di Bendung Kedung Ombo (Indah Karya, 1995 dan PPKSA Jratun Seluna, 2000).

3. Data waduk

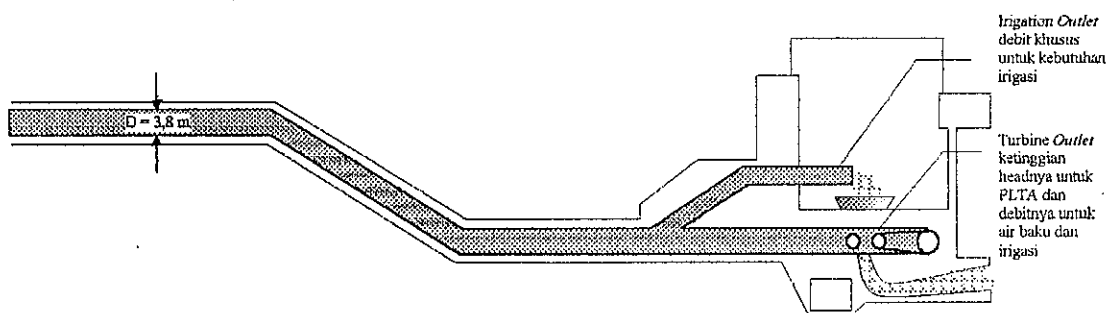
Waduk Kedung Ombo mempunyai kapasitas tampungan total (*Gross Storage Capacity*) sebesar 723 juta m^3 yang dicapai pada EL.+90 m. Volume tersebut terdiri dari 88,4 juta m^3 sebagai tampungan mati (*dead storage*) dan 634,6 juta m^3 sebagai kapasitas tampungan efektif waduk, seperti yang ditunjuk pada Gambar 3-3.

Full Supply Level (FSL) adalah elevasi muka air waduk operasi penuh (EL.+90 m) merupakan elevasi yang diharapkan tercapai pada awal sampai dengan pertengahan musim tanam sehingga tidak mengganggu pertumbuhan tanaman pada waktu musim kemarau.



Gambar 3-3 Pembagian Volume Tampungan Waduk Kedung Ombo

Tail Water Level (TWL) merupakan elevasi muka air di hilir stasiun pembangkit tenaga listrik yang mengalir melalui fasilitas *outlet* (*intake* irigasi dan PLTA). TWL ini berpengaruh terhadap tinggi jatuh efektif dari sistem pembangkit tenaga listrik.



Gambar 3-4 Detail skets saluran tekan (*pressure conduit*)

Saluran tekan berpenampang lingkaran yang terbuat dari baja dengan diameter 3,80 meter. Kecepatan air mengalir pada saluran tekan berkisar 21,5 m/detik sampai 31 m/detik atau setara dengan $121,92 \text{ m}^3/\text{detik}$ sampai $175,79 \text{ m}^3/\text{detik}$.

4. Data PLTA

Turbin yang dipasang pada Waduk Kedung Ombo adalah tipe "Kaplan". Kapasitas pengaliran turbin stasiun pembangkit tenaga listrik maksimum $61,80 \text{ m}^3/\text{detik}$ dan minimum $45 \text{ m}^3/\text{detik}$, kapasitas terpasang di pembangkit listrik tenaga air Kedung Ombo sebesar 22,5 MW, produksi energi tahunan rerata direncanakan mencapai 70 Gwh.

5. Data pelepasan air waduk aktual

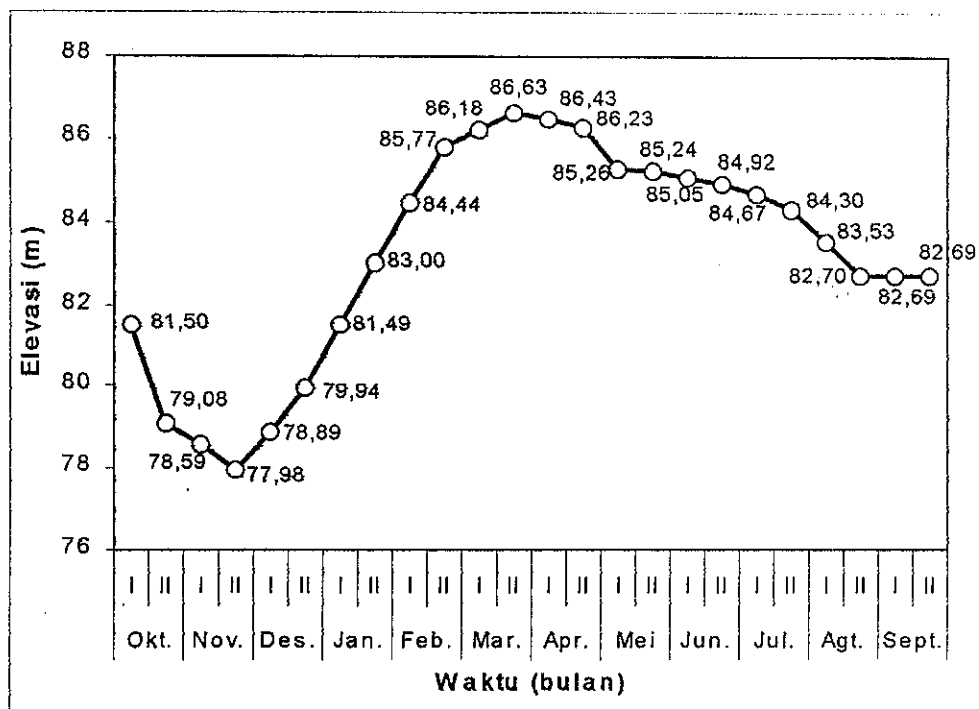
- Debit pelepasan air Waduk Kedung Ombo

Data debit rerata pelepasan waduk Kedung Ombo tersedia sepanjang 9 tahun yaitu: dari tahun 1990-1998.

- *Rule curve* rencana pengoperasian waduk Kedung Ombo

Rule curve rencana merupakan pengoperasian waduk didasarkan pada nilai-nilai hasil simulasi operasi waduk yang dapat mencapai nilai elevasi muka air waduk stasioner, yaitu: elevasi awal operasi sama dengan elevasi akhir operasi atau yang paling mendekati dalam satu tahun (Indra Karya, 1993).

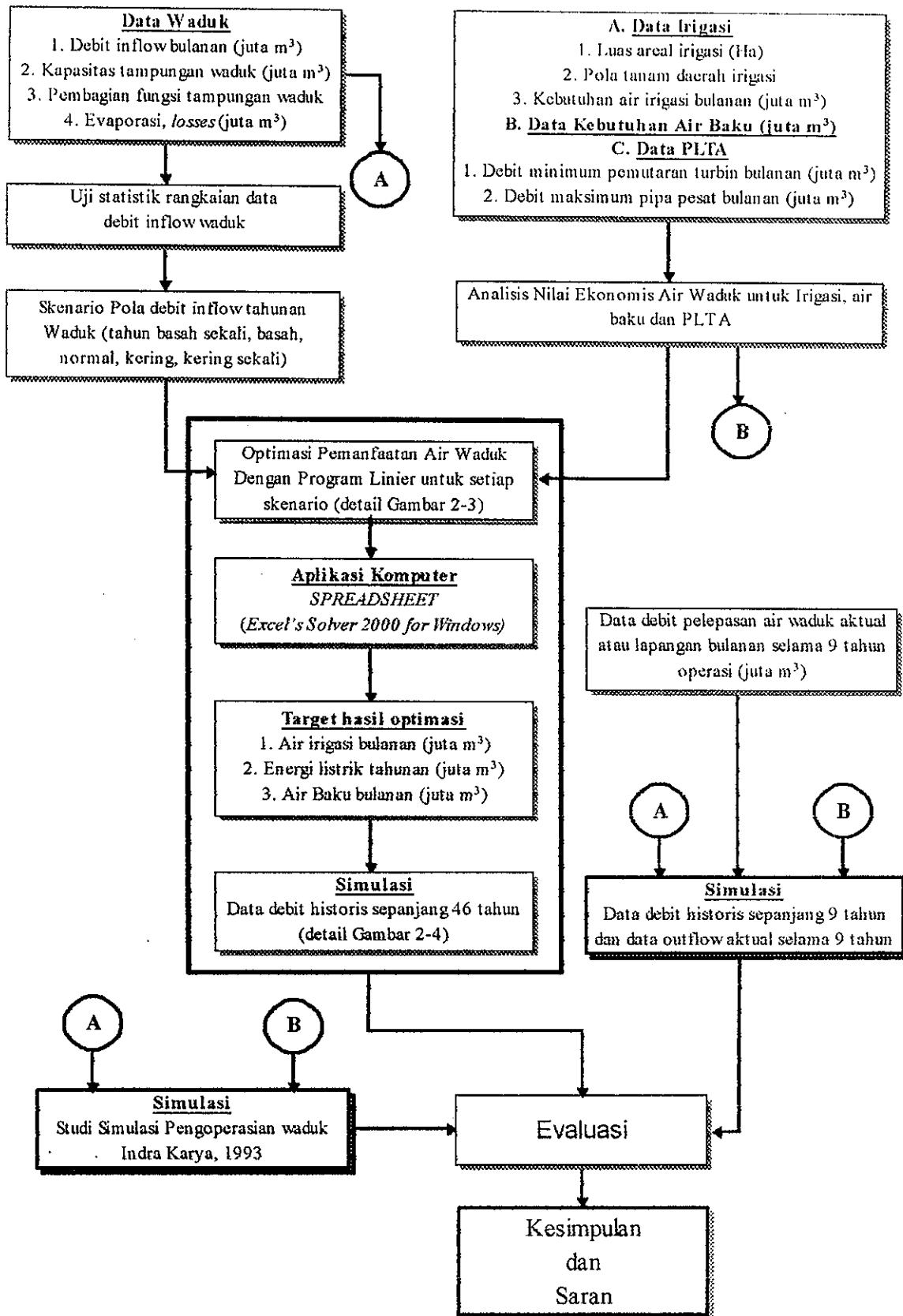
Dalam hal ini operasi waduk awal pengoperasian waduk Kedung Ombo elevasi +81,50 m atau setara dengan volume waduk 405,46 juta m³.



Sumber : Indra Karya, 1993 dan PPKSA Jratunseluna, 2000

Gambar 3-5 Grafik *rule curve* rencana pengoperasian waduk Kedung Ombo

Tata cara pelepasan air waduk Kedung Ombo saat ini berpedoman pada *rule curve* rencana di atas (lihat Gambar 3-5). Namun pada kenyataannya elevasi muka air waduk tidak akan pasti sama kondisinya dengan *rule curve* rencana sehingga harus diupayakan pengaturan menuju ke elevasi muka air waduk rencana (*rule curve* rencana).



Gambar 3-6 Bagan alir optimasi pemanfaatan air waduk Kedung Ombo

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengujian Statistik Rangkaian Data Debit *Inflow* Waduk

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui kondisi rangkaian data debit *inflow* waduk Kedung Ombo yang diperoleh, untuk digunakan dalam analisis simulasi. Pengujian kondisi rangkaian data debit *inflow* waduk, diambil nilai *debit rerata inflow* waduk tahunan selama 46 tahun. Seperti yang ditampilkan pada Tabel 4-1.

Tabel 4-1 Data *debit rerata inflow* tahunan waduk Kedung Ombo (1953-1998)

No	Tahun	Debit Inflow (m ³ /detik)	No	Tahun	Debit Inflow (m ³ /detik)	No	Tahun	Debit Inflow (m ³ /detik)
1	1953	24,91	16	1968	32,07	32	1984	12,06
2	1954	24,46	17	1969	24,80	33	1985	15,94
3	1955	29,62	18	1970	19,77	34	1986	11,71
4	1956	26,83	19	1971	26,76	35	1987	16,97
5	1957	26,43	20	1972	18,33	36	1988	23,43
6	1958	36,07	21	1973	28,71	37	1989	24,93
7	1959	38,97	22	1974	28,77	38	1990	19,82
8	1960	26,57	23	1975	36,23	39	1991	25,73
9	1961	21,08	24	1976	24,17	40	1992	26,45
10	1962	22,29	25	1977	21,25	41	1993	26,38
11	1963	25,40	26	1978	19,95	42	1994	23,19
12	1964	21,25	27	1979	25,33	43	1995	26,12
13	1965	23,30	28	1980	19,73	44	1996	23,94
14	1966	22,08	29	1981	26,19	45	1997	18,25
15	1967	25,79	30	1982	33,43	46	1998	29,92
			31	1983	5,66			

Sumber: Indra Karya, 1993, Indah Karya, 1995 dan PPKSA Jratunseluna, 2000

4.1.1 Uji ketidakadaan trend rangkai data debit *inflow* waduk

4.1.1.1 Uji korelasi peringkat metode Spearman

Perhitungan koefisien korelasi peringkat dari Spearman (KPS) dengan mempergunakan persamaan 2-1 dan nilai distribusi " t_{tabel} ", pada derajat kebebasan ($u-2$) karena kita mempunyai dua variable yaitu peringkat waktu (Tt) dan peringkat rangkaian data debit (Rt), dengan mempergunakan persamaan 2-2.

Menyatakan hipotesis :

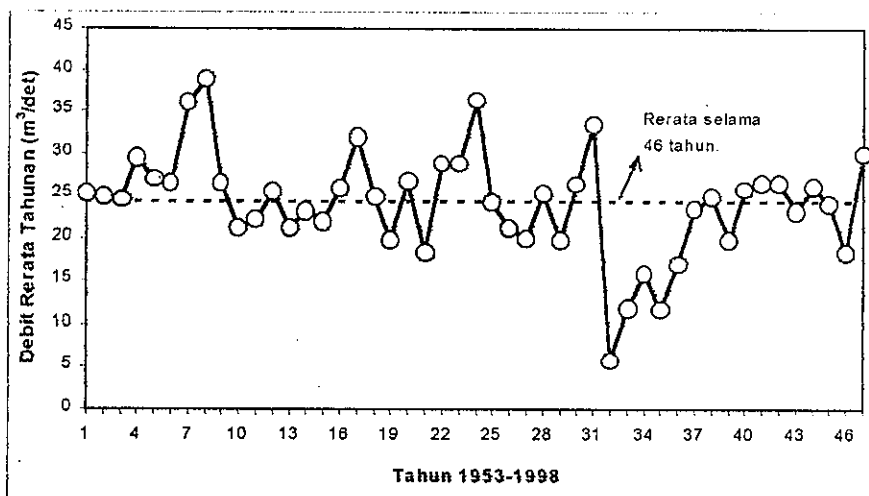
H_0 : Rt dan Tt independent jika $-t_{tabel} < t_{hitung} < t_{tabel}$

H_1 : Rt dan Tt tidak independent jika $-t_{tabel} > t_{hitung}$ atau $t_{tabel} < t_{hitung}$

Diketahui $n=46$, $\Sigma d^2=11833$ (lihat Tabel 4-2 sumber data dari Tabel 4-1) maka nilai masing diperoleh $KPS=0,27$ dan $t_{hitung}=1,862$. Pengujian dua sisi tabel "t" untuk derajat kepercayaan 5% ditolak pada derajat kebebasan $dk = n-2 = 44$, maka diperoleh $-t_{0,975} = -2,016 < t_{hitung} < t_{0,975} = +2,016$ (lihat Lampiran 8). Oleh karena itu tidak dapat menolak hipotesis nol rangkaian data debit *inflow* (Rt dan Tt) adalah independen dan tidak mungkin menunjukkan adanya trend. Analisis ini sesuai dengan analisis grafis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-1.

Tabel 4-2 Perhitungan koefisien korelasi peringkat metode Spearman

No	Tahun	Peringkat Tt	Rangkaian Data	Peringkat Rt	dt	dt ²	No	Tahun	Peringkat Tt	Rangkaian Data	Peringkat Rt	dt	dt ²					
1	1953	1	24,91	23	22	484	24	1976	24	24,17	26	2	4					
2	1954	2	24,46	25	23	529	25	1977	25	21,25	34	9	81					
3	1955	3	29,62	7	4	16	26	1978	26	19,95	36	10	100					
4	1956	4	26,83	10	6	36	27	1979	27	25,33	21	-6	36					
5	1957	5	26,43	14	9	81	28	1980	28	19,73	39	11	121					
6	1958	6	36,07	3	-3	9	29	1981	29	26,19	16	-13	169					
7	1959	7	38,97	1	-6	36	30	1982	30	33,43	4	-26	676					
8	1960	8	26,57	12	4	16	31	1983	31	5,66	46	15	225					
9	1961	9	21,08	35	26	676	32	1984	32	12,06	44	12	144					
10	1962	10	22,29	31	21	441	33	1985	33	15,94	43	10	100					
11	1963	11	25,40	20	9	81	34	1986	34	11,71	45	11	121					
12	1964	12	21,25	33	21	441	35	1987	35	16,97	42	7	49					
13	1965	13	23,30	29	16	256	36	1988	36	23,43	28	-8	64					
14	1966	14	22,08	32	18	324	37	1989	37	24,93	22	-15	225					
15	1967	15	25,79	18	3	9	38	1990	38	19,82	37	-1	1					
16	1968	16	32,07	5	-11	121	39	1991	39	25,73	19	-20	400					
17	1969	17	24,80	24	7	49	40	1992	40	26,45	13	-27	729					
18	1970	18	19,77	38	20	400	41	1993	41	26,38	15	-26	676					
19	1971	19	26,76	20	1	1	42	1994	42	23,19	30	-12	144					
20	1972	20	18,33	40	20	400	43	1995	43	26,12	17	-26	676					
21	1973	21	28,71	9	-12	144	44	1996	44	23,94	27	-17	289					
22	1974	22	28,77	8	-14	196	45	1997	45	18,25	41	-4	16					
23	1975	23	36,23	2	-21	441	46	1998	46	29,92	6	-40	1600					
							Jumlah							~	~	~	~	11833



Gambar 4-1 Hidrograf rangkaian data debit rerata inflow tahunan waduk

Gambar 4-1 menunjukkan rangkaian data debit *inflow* rerata tahunan waduk dari data Tabel 4-1 menunjukkan bahwa tidak ada trend. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa data yang diperoleh dapat dipergunakan untuk digunakan dalam analisis simulasi.

4.1.1.2 Uji Mann dan Whitney

Diketahui $N_1=23$, $N_2=23$, $R_{m1}= 467$ (lihat Tabel 4-3 sumber data dari Tabel 4-1) maka nilai masing-masing diperoleh parameter statistik $U_1= 338$ dan $U_2 = 191$ (persamaan 2-3 dan 2-4). Nilai yang dipilih untuk “U” dalam pengujian hipotesis adalah nilai yang paling kecil dari U_1 dan U_2 (Supranto, 1996) maka nilai hitung uji Mann-Whitney diperoleh, $Z_{hitung} = -1,615$ (persamaan 2-5).

Menyatakan hipotesis :

H_0 : kelompok I dan II dari populasi yang sama jika $-Z_{tabel} < Z_{hitung} < Z_{tabel}$

H_1 : kelompok I dan II bukan dari populasi yang sama jika $-Z_{tabel} > -Z_{hitung}$ atau $Z_{tabel} < Z_{hitung}$

Tabel 4-3 Perhitungan Uji Mann dan Whitney

No	Data Kelompok I	Peringkat Data	Data Kelompok II	Peringkat Data
1	24,91	23	24,17	26
2	24,46	25	21,25	34
3	29,62	7	19,95	36
4	26,83	10	25,33	21
5	26,43	14	19,73	39
6	36,07	3	26,19	16
7	38,97	1	33,43	4
8	26,57	12	5,66	46
9	21,08	35	12,06	44
10	22,29	31	15,94	43
11	25,40	20	11,71	45
12	21,25	33	16,97	42
13	23,30	29	23,43	28
14	22,08	32	24,93	22
15	25,79	18	19,82	37
16	32,07	5	25,73	19
17	24,80	24	26,45	13
18	19,77	38	26,38	15
19	26,76	20	23,19	30
20	18,33	40	26,12	17
21	28,71	9	23,94	27
22	28,77	8	18,25	41
23	36,23	2	29,92	6
Jumlah		467	~	623

Diperoleh dari tabel normal (lihat Lampiran 8) dengan uji satu sisi pada derajat kepercayaan 5% ditolak, maka diperoleh nilai $-Z_{tabel} = -1,645 < Z_{hitung} < Z_{tabel} = +1,645$ (lihat Lampiran 8), sehingga dari kondisi tersebut dapat dikatakan bahwa rangkaian data

debit kelompok I dan kelompok II berasal dari populasi yang sama atau tidak terjadi perubahan yang signifikan nilai rerata atau tidak menunjukkan adanya trend. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa data yang diperoleh dapat dipergunakan untuk digunakan dalam analisis simulasi.

4.1.1.3 Uji Tanda dari Cox dan Stuart

Diketahui $n = 46$ dan $S = 5$ (bertanda positif, lihat Tabel 4-4) maka uji tanda dari Cox dan Stuart diperoleh $Z_{hitung} = -1,432$ (persamaan 2-6).

Menyatakan hipotesis :

H_0 : tidak ada trend, kelompok I dan kelompok II independent jika $Z_{hitung} < Z_{tabel}$

H_1 : terdapat trend, kelompok I dan kelompok II tidak independent jika $Z_{hitung} > Z_{tabel}$

Dengan menggunakan derajat kepercayaan 5% ditolak maka dari tabel normal diperoleh $Z_{tabel} = 1,645$. Sehingga nilai $Z_{hitung} = -1,432 < Z_{tabel} = 1,645$ (lihat Lampiran 8). H_0 diterima, bahwa rangkaian data debit *inflow* menunjukkan tidak adanya trend.

Tabel 4-4 Perhitungan uji tanda Cox dan Stuart

No	(1)	(2)	(1) - (2)
	Data Kelompok I	Data Kelompok III	
1	24.91	5.66	-
2	24.46	12.06	-
3	29.62	15.94	-
4	26.83	11.71	-
5	26.43	16.97	-
6	36.07	23.43	-
7	38.97	24.93	-
8	26.57	19.82	-
9	21.08	25.73	-
10	22.29	26.45	+
11	25.40	26.38	+
12	21.25	23.19	-
13	23.30	26.12	+
14	22.08	23.94	+
15	25.79	18.25	-
16	32,07	29.92	+

4.1.2 Uji Stasioner

Setelah pengujian di atas menunjukkan tidak ada trend maka uji stasioner dimaksudkan untuk menguji kestabilan nilai varian dan rerata dari rangkaian data debit *inflow*.

Menyatakan hipotesis sebagai berikut :

H_0 :

□ nilai varian kelompok I dan II tidak ada beda nyata jika $F_{hitung} < F_{tabel}$

- nilai rerata kelompok I dan II tidak ada beda nyata jika $t_{hitung} < t_{tabel}$

H_1 :

- nilai varian kelompok I dan II berbeda jika $F_{hitung} > F_{tabel}$
- nilai rerata kelompok I dan II berbeda jika $t_{hitung} > t_{tabel}$

Diketahui bahwa data (Tabel 4-3) :

Kelompok I $n_1=23$; $\bar{X}_1=25,19$; dan $S_1=5,31$

Kelompok II $n_2=23$; $\bar{X}_2=21,76$; dan $S_2=6,30$

1. Uji kestabilan varian

Hasil perhitungan diperoleh $F_{hitung} = 0,71$ (persamaan 2-8) dan untuk F_{tabel} pada derajat kebebasan $dk_1 = n_1 - 1 = 22$ dan $dk_2 = n_2 - 1 = 22$ dengan derajat kepercayaan 5%, maka dari tabel diperoleh $F_{tabel} = 2,04$. Ternyata nilai F_{hitung} lebih kecil dari nilai F_{tabel} , maka varian kedua kelompok rangkaian data tidak ada bedanya atau rangkaian data debit stasioner.

2. Uji kestabilan nilai rerata

Hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan 2-9 dan 2-10 maka secara berturut-turut diperoleh $\sigma = 5,96$ dan $t = 1,953$. Untuk t_{tabel} dengan derajat kebebasan (*degree of freedom*) $dk = n_1 + n_2 - 2 = 44$ dan pengujian dua sisi untuk derajat kepercayaan 5% diperoleh nilai $t_{tabel} = 2,016$ (lihat Lampiran 8). Ternyata t_{hitung} lebih kecil dari pada t_{tabel} , maka dapat disimpulkan bahwa nilai rerata kelompok I dan II tidak ada beda nyata pada derajat kepercayaan 5% (stabil)

Hasil analisis di atas dapat disimpulkan bahwa rangkaian data debit rerata *inflow* tahunan waduk dapat digunakan untuk simulasi maupun peluang.

4.2. Data Masukan Optimasi Program Linier

Optimasi dengan program linier dianalisis dalam rentang 12 bulan (satu tahun), untuk mewakili kondisi selama 46 tahun. Data masukan (*input*) optimasi dengan program linier diperlukan asumsi-asumsi dari parameter ketersediaan air, fasilitas, dan kebutuhan selama 46 tahun.

4.2.1 Skenario Pola Debit *Inflow* Tahunan Waduk

Data debit *inflow* waduk sepanjang 46 tahun di bagi menjadi 5 (lima) kelompok tahun debit *inflow* waduk yaitu (lihat Gambar 4-2): kelompok tahun debit *inflow* basah

sekali, kelompok tahun debit *inflow* basah, kelompok tahun debit *inflow* normal, kelompok tahun debit *inflow* kering, kelompok tahun debit *inflow* kering sekali. Skenario pola debit *inflow* tahunan dilakukan sebagai berikut:

1. Debit rerata *inflow* bulanan dirubah menjadi rerata tahunan sepanjang 46 tahun.
2. Data rerata tahunan diurutkan dari nilai yang terbesar sampai dengan ke yang terkecil dengan rumusan persentase waktu disamai atau terlampaui sebagai berikut (Morel dan Seytoux, 1978; Subarkah, 1980):

$$p = \frac{ns}{N+1} \times 100\%$$

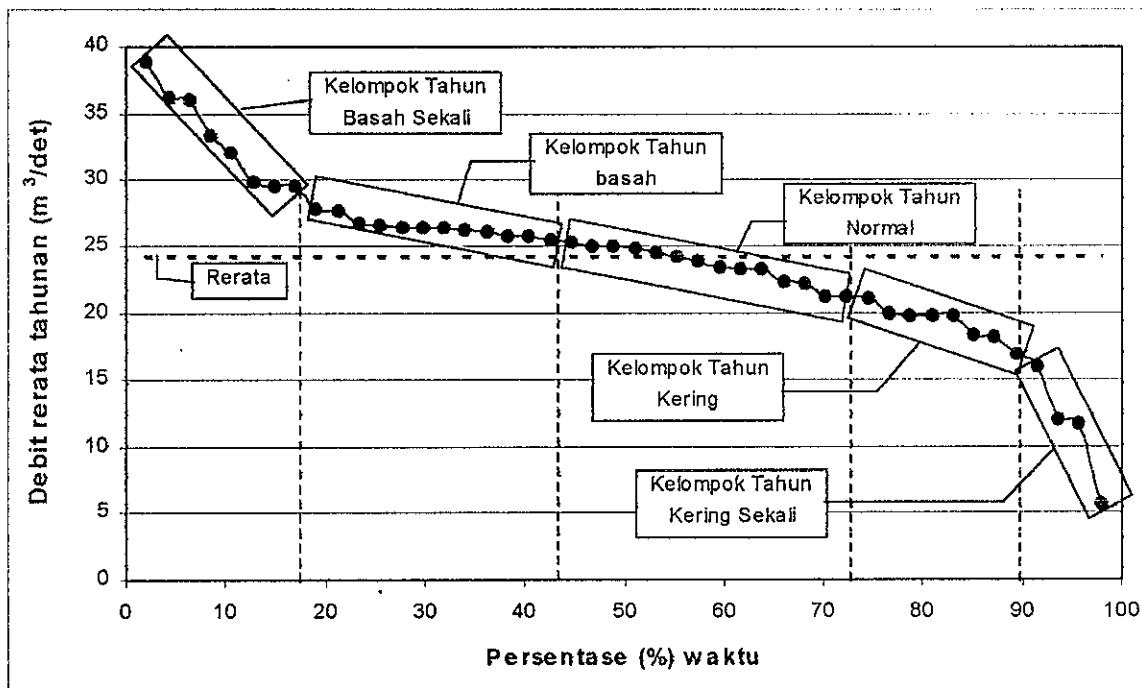
dimana:

p = persentase waktu disamai atau terlampaui

N = jumlah data (tahun)

ns = nomor urut data

3. Setelah data terurutkan, diplotkan dalam bentuk grafik dan secara visual dibagi menjadi 5 kelompok yang diasumsikan seperti gambar 4-2.



Gambar 4-2 Hasil visualisasi pengelompokan pola debit *inflow* waduk tahunan

4. Dari point 2 ke-5 kelompok skenario pola debit *inflow* waduk tahunan berdasarkan point 3 maka diperoleh persentase disamai atau terlampaui sepanjang 46 tahun sebagai berikut:

- Pola debit *inflow* waduk, tahun basah sekali dengan persentase waktu 0%-17,02% disamai atau terlampaui sepanjang 46 tahun.
 - Pola debit *inflow* waduk, tahun basah dengan persentase waktu 17,02%-42,55% disamai atau terlampaui sepanjang 46 tahun.
 - Pola debit *inflow* waduk, tahun normal dengan persentase waktu 42,55%-72,34% disamai atau terlampaui sepanjang 46 tahun.
 - Pola debit *inflow* waduk, tahun kering dengan persentase waktu 72,34%-89,36% disamai atau terlampaui sepanjang 46 tahun.
 - Pola debit *inflow* waduk, tahun kering sekali dengan persentase waktu 89,36%-100% disamai atau terlampaui sepanjang 46 tahun.
5. Pengelompokan tahun pola debit *inflow* waduk, untuk bulan yang sama dijumlahkan. Setelah dijumlahkan, dibagi dengan banyaknya tahun pada masing-masing kelompok pola debit *inflow* waduk (lihat tabel 4-5).
 6. Besaran yang diperoleh dari point 5, asumsi sebagai distribusi pola debit *inflow* bulanan untuk waduk Kedung Ombo (lihat Tabel 4-6).

Pola debit *inflow* waduk yang diperoleh, dianggap deterministik (pasti). Masing-masing skenario pola debit *inflow* waduk dioptimalkan dengan program linier. Gambar 4-2 dan Tabel 4-5 menunjukkan pengelompokan tahun dari 46 tahun data debit historis yang tersedia. Pengelompokan tahun tersebut merupakan skenario dari pola *inflow* tahunan waduk.

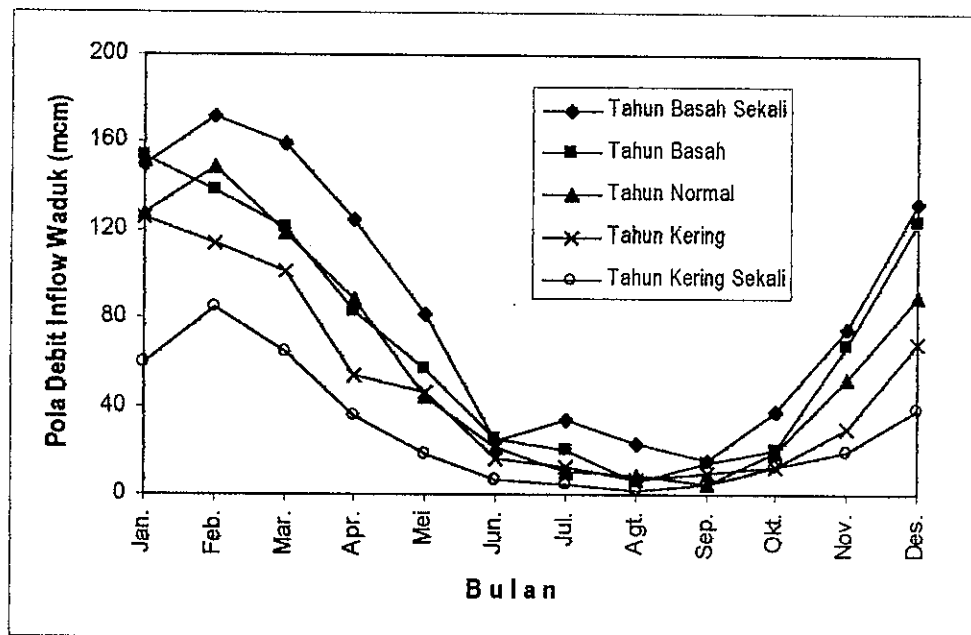
Tabel 4-5 Pengelompokan tahun pola debit *inflow* waduk (46 tahun)

Kelompok Skenario Pola Debit Inflow Waduk				
Basah Sekali	Basah	Normal	Kering	Kering Sekali
1959	1973	1979	1961	1985
1975	1956	1989	1978	1984
1958	1971	1953	1990	1986
1982	1960	1969	1970	1983
1968	1992	1954	1980	
1998	1957	1976	1972	
1955	1993	1996	1997	
1974	1981	1988	1987	
	1995	1965		
	1967	1994		
	1991	1962		
	1963	1966		
		1964		
		1977		

Tabel 4-6 dan Gambar 4-3 menunjukkan besarnya debit *inflow* waduk yang mewakili masing-masing pola debit *inflow* tahunan waduk. Masing-masing pola debit *inflow* merupakan rerata bulanan dari sejumlah tahun skenario persentase waktu terlampaui atau disamai selama 46 tahun.

Tabel 4-6 Distribusi debit bulanan skenario pola debit *inflow* waduk (juta m³)

Bulan	Tahun				
	Basah Sekali	Basah	Normal	Kering	Kering Sekali
Jan.	149,58	153,24	128,01	125,70	59,84
Feb.	172,21	138,12	148,58	114,29	84,87
Mar.	158,94	120,64	118,71	101,89	64,39
Apr.	124,74	83,57	89,13	54,11	36,18
Mei	82,28	57,27	44,50	46,01	18,44
Jun.	24,29	24,87	20,77	16,32	6,75
Jul.	33,45	20,00	10,86	12,88	5,08
Agt.	23,50	5,52	8,36	6,67	1,63
Sep.	15,71	14,40	4,52	10,06	4,56
Okt.	37,79	20,20	19,65	12,75	12,67
Nov.	75,49	67,91	52,05	29,49	19,39
Des.	132,65	124,06	90,26	68,13	38,95
Total	1030,61	829,81	735,40	598,33	352,73
Rerata	85,88	69,15	61,28	49,86	29,39
Maksimum	172,21	153,24	148,58	125,70	84,87
Minimum	15,71	5,52	4,52	6,67	1,63



Gambar 4-3 Grafik hasil distribusi debit bulanan skenario pola debit *inflow* waduk

4.2.2 Kehilangan Air waduk (losses)

Kehilangan air waduk dapat disebabkan oleh beberapa kejadian, diantaranya: *Evaporasi*, perkolasi dan rembesan pada tubuh bendungan. Pada studi ini, kehilangan air waduk diperhitungkan akibat dari *evaporasi* sedangkan perkolasi dan rembesan pada

tubuh bendungan diabaikan. Data ketinggian *evaporasi* waduk Kedung Ombo disajikan pada Tabel 4-7 dan akan digunakan sebagai *input* pada program linier dan simulasi. *Evaporasi* yang terjadi di waduk merupakan fungsi dari luas genangan permukaan air waduk.

Untuk analisis dengan program linier, *evaporasi* diasumsikan mengikuti luas genangan *rule curve* pengoperasian waduk Kedung Ombo. Dimana volume *evaporasi* yang diperoleh pada Tabel 4-7 akan menjadi masukan pada analisis optimasi program linier. Sedangkan pada analisis simulasi sesuai dengan kondisi luas genangan permukaan air waduk yang diperoleh dengan ketinggian *Evaporasi* (mm/hari).

Untuk memperoleh volume *evaporasi*, ketinggian *evaporasi* dikonversikan kedalam satuan meter/hari dan dikalikan dengan luas muka air waduk *rule curve*, dimana luas muka air waduk dikonversikan kedalam meter kuadrat (lihat Tabel 4-7).

Tabel 4-7. Data klimatologi dan *evaporasi* rerata bulanan DPS waduk Kedung Ombo

Bulan	Temperatur rerata	Kelembaban relatif	Kecepatan angin	Penyinaran matahari	Ketinggian Evaporasi	Luas muka air waduk	Volume Evaporasi
	°C	%	km/hari	%	mm/hari	km ²	juta m ³
Jan.	26,3	82,2	140	44	3,9	26,92	3,13
Peb.	26,7	82,5	110	50	3,8	32,10	3,65
Mar.	27,2	82,7	95	55	4,8	36,34	5,23
Apr.	27,8	79,8	75	66	4,3	38,99	5,05
Mei	27,7	78,2	75	68	4,0	40,48	4,89
Jun.	27,1	74,6	85	72	4,0	41,25	4,89
Jul.	27,0	72,1	115	79	4,3	39,99	5,13
Agt.	27,3	71,8	120	84	4,9	38,02	5,61
Sep.	27,8	71,1	120	76	5,0	36,89	5,51
Okt.	28,1	72,6	100	77	5,3	31,41	5,02
Nop.	27,8	75,7	75	65	4,7	21,64	3,04
Des.	27,3	79,4	85	52	4,2	20,85	2,61
Rerata	27,3	76,9	99,6	65,7	4,4	33,74	4,48
Min.	26,3	71,1	75,0	44,0	3,8	20,85	2,61
Maks.	28,1	82,7	140,0	84,0	5,3	41,25	5,61

Sumber : PPKSA Jratunseluna, 2000

4.2.3 Analisis Kebutuhan Air Irigasi

Kebutuhan air di daerah irigasi ditentukan oleh beberapa faktor terutama kondisi-kondisi meteorologi yaitu: suhu udara dan curah hujan di daerah bersangkutan dan kadar air yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman (BPPU, 1985; Sosrodarsono dan Takeda, 1987). Di dalam studi ini dilakukan analisis kebutuhan air irigasi dengan langkah sebagai berikut:

4.2.3.1 Evapotranspirasi (Ep)

Evapotranspirasi adalah penguapan air melalui daun-daun tanaman setelah air diabsorpsi oleh tanaman dari tanah dan diolah untuk keperluan pertumbuhan tanaman tersebut. Untuk keperluan analisis pergeseran awal pola tanam digunakan data evapotranspirasi untuk daerah layanan waduk Kedung Ombo diambil dari data SMEC 1985 dalam Indra Karya, 1993.

Tabel 4-8 Data evapotranspirasi di wilayah waduk Kedung Ombo

Keterangan	Satuan	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agt.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.
Temp.	oC	26,3	26,7	27,2	27,8	27,7	27,1	27,0	27,3	27,8	26,1	27,8	27,3
RH	%	82,2	82,5	82,7	79,8	78,2	74,6	72,1	71,8	71,1	72,6	75,7	79,4
U2	km/hari	140	110	95	75	75	85	115	120	120	100	75	85
n/N	%	44	50	55	66	68	72	79	84	76	77	65	52
ea	mbar	34,23	35,07	36,12	37,38	37,17	35,91	35,70	36,33	37,38	33,60	37,38	36,33
ed	mbar	28,14	28,93	29,87	29,83	29,07	26,79	25,74	26,08	26,58	24,39	28,30	28,85
f(u)	-	0,65	0,57	0,53	0,47	0,47	0,50	0,58	0,59	0,59	0,54	0,47	0,50
(1-w)	-	23,7	23,3	22,8	22,2	22,3	22,9	23,0	22,7	22,2	23,9	22,2	22,7
Ra	mm/hari	17,62	17,64	17,66	17,69	17,69	17,66	17,65	17,67	17,69	17,61	17,69	17,67
Rs	mm/hari	4,13	4,66	5,11	6,09	6,26	6,61	7,22	7,67	6,97	7,03	6,00	4,84
Rns	mm/hari	3,09	3,49	3,83	4,57	4,70	4,95	5,42	5,75	5,23	5,27	4,50	3,63
f(T)	-	15,96	16,04	16,14	16,26	16,24	16,12	16,10	16,16	16,26	15,92	16,26	16,16
f(ed)	-	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12	0,11	0,12	0,11	0,10
f(n/N)	-	0,50	0,55	0,60	0,69	0,71	0,75	0,81	0,86	0,78	0,79	0,69	0,57
Rn1	mm/hari	0,84	0,91	0,96	1,12	1,19	1,35	1,52	1,59	1,44	1,55	1,18	0,95
Rn	mm/hari	3,05	2,58	2,87	3,44	3,51	3,60	3,89	4,16	3,79	3,72	3,32	2,68
c	-	0,88	0,89	0,90	0,92	0,93	0,93	0,95	0,96	0,94	0,94	0,92	0,89
W	-	0,75	0,76	0,76	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76	0,77	0,75	0,77	0,76
Ep	mm/hari	3,27	2,80	2,97	3,47	3,58	3,83	4,35	4,61	4,40	4,03	3,55	2,93

Sumber: SMEC, 1985 dalam Indra Karya, 1993

dimana:

RH = Kelembaban relatif (%)

U2 = Kecepatan angin rerata 2 meter diatas permukaan tanah (km/hari)

n/N = Penyinaran matahari (%)

ea = Tekanan uap jenuh hasil konversi dari temperatur udara (mbar)

ed = Tekanan uap nyata (mbar)

f(u) = Nilai dari fungsi kecepatan angin

1-w = Nilai dari faktor ketinggian

Ra = Radiasi extra-terrestrial (mm/hari)

Rn1 = Efek temperatur f(t) pada panjang gelombang radiasi

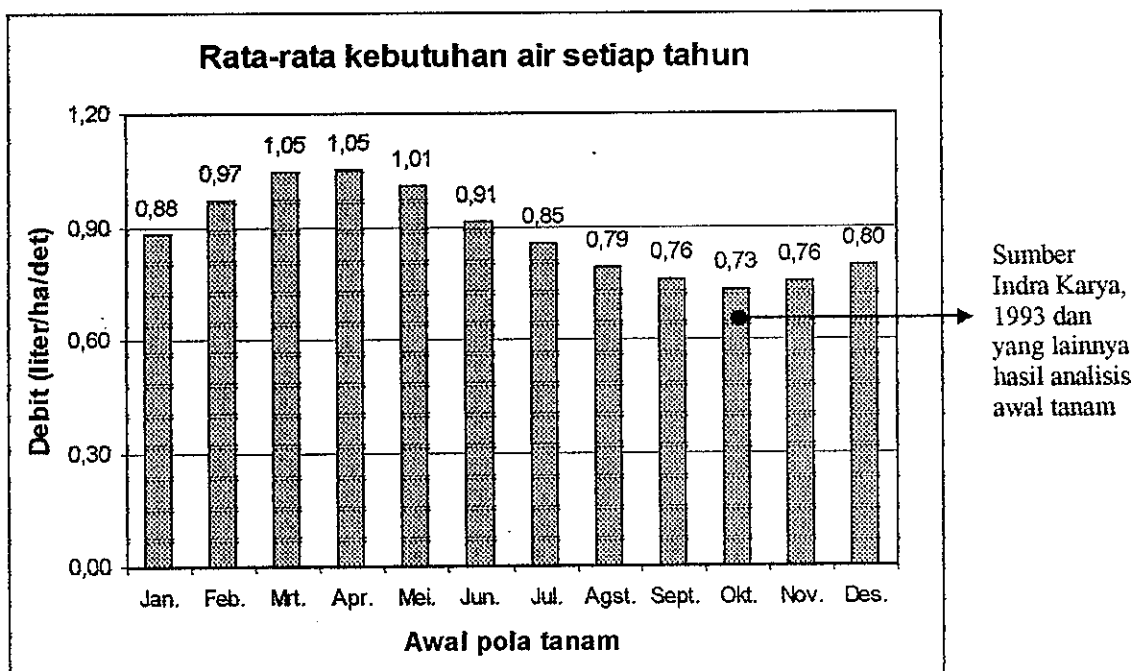
Ep = Evapotranspirasi (mm/hari)

4.2.3.2 Pergeseran awal pola tanam daerah irigasi

Pergeseran awal pola tanam dimaksudkan untuk mengetahui kebutuhan air irigasi paling minimum (dalam satu pola tanam yaitu padi-padi-palawija mengacu pada pola tanam setempat) dengan tujuan kebutuhan air yang paling minimum menjadi masukan optimasi dengan program linier. Untuk tujuan tersebut, awal tanam dari studi Indra Karya dievaluasi kembali dengan pergeseran awal pola tanam sehingga dapat diperoleh awal bulan tanam yang membutuhkan air paling minimum.

Pergeseran awal tanam setiap dilakukan setengah bulanan dalam satu jenis pola tanam (padi-padi-palawija). Sehingga awal tanam tergeser sebanyak 24 kali dalam satu tahun. Dengan tersedianya data-data evapotranspirasi, koefisien tanaman, kebutuhan air untuk penjemuran, perkolasi, pergantian lapisan air, hujan efektif, dan Efisiensi irigasi maka dapat diperoleh air yang harus disuplesi dari pintu pengambilan.

Hasil dari pergeseran awal pola tanam diperoleh bahwa kebutuhan air irigasi dengan awal bulan oktober mempunyai kebutuhan yang paling minimum (lihat Gambar 4-4), untuk tabel perhitungan lihat lampiran 7. Untuk kebutuhan air berdasarkan berdasarkan kebutuhan yang paling minimum dengan potensi luasan daerah irigasi 70919 ha lihat Tabel 4-9.



Gambar 4-4 Grafik rerata kebutuhan air setiap tahun sesuai dengan awal pola tanam

4.2.4 Nilai Ekonomi Air Waduk

Air dari waduk Kedung Ombo diutamakan untuk memenuhi kebutuhan air irigasi dan air baku. Kebutuhan air untuk PLTA menyesuaikan dengan debit air yang dilepaskan ke daerah hilir untuk kebutuhan irigasi dan air baku (PPKSA Jratunseluna, 2000).

Nilai air waduk ditetapkan dalam bentuk Rp/m³, dengan melihat hubungan antara sejumlah air (m³) yang dibutuhkan untuk menghasilkan produksi dari tanaman (misalnya: padi/ha, palawija/ha) dengan harga jual produksi tanaman tersebut. Nilai ekonomi air waduk merupakan koefisien variabel putusan pada fungsi tujuan program linier.

4.2.4.1 Nilai Ekonomi Air Waduk untuk Irigasi

Pada studi ini, kebutuhan air daerah irigasi mempergunakan hasil analisis pergeseran awal pola tanam dengan kebutuhan yang paling minimum dengan pola tanam padi-padi-palawija dengan sistem golongan, kebutuhan air irigasi seperti yang ditampilkan pada Tabel 4-9.

Tabel 4-9 Data potensi kebutuhan air daerah irigasi dengan luas 70.919 ha

No	Bulan	Volume (juta m ³)		
		Golongan I	Golongan II	Total
1	Oktober	161,76	2,54	164,30
2	November	126,94	168,00	294,94
3	Desember	85,11	86,98	172,10
4	Januari	0,00	24,63	24,63
5	Februari	67,98	8,59	76,57
6	Maret	78,60	84,38	162,98
7	April	131,06	116,91	247,97
8	Mei	31,65	91,99	123,65
9	Juni	16,72	9,05	25,77
10	Juli	19,89	12,74	32,63
11	Agustus	28,45	26,39	54,84
12	September	14,54	21,22	35,76
Total		762,69	653,42	1416,11

Sumber : Indra Karya, 1993

Bulan			Okt.	Nov.	Des.	Jan.	Feb.	Mrt.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agt.	Sept.
Luas	Satuan	Gol	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
37385	Ha	I	/	P.T	Pad I	P	P.T	Pad II	P	Palawija	/	/	/	/
33534	Ha	II	/	P.T	Pad I	P	P.T	Pad II	P	Palawija	/	/	/	/

Sumber : Indra Karya, 1993 dan Wiratman & Associates, 2000

Gambar 4-5 Tata tanam sistem golongan di wilayah daerah irigasi (padi-padi-palawija)

Keterangan :

P.T : persemaian dan pengolahan tanah

P : panen

Tata menanam dengan sistem golongan seperti yang ditampilkan pada Gambar 4-5, dimana sistem tersebut permulaan tanam tidak serentak, tetapi bergiliran menurut jadwal yang ditentukan, dengan maksud untuk menghindari memuncaknya penggunaan air oleh petani dan penggunaan air lebih efisien (Sudjarwadi, 1987).

Produksi daerah irigasi adalah padi dan palawija, palawija dalam hal ini adalah jagung. Data harga hasil produk tanaman, diperoleh dari Dinas pertanian (lihat Tabel 4-10), dimana rerata produksi pertanian padi 4,49 ton setiap hektar yang setara dengan nilai Rp 2.782.030,- dan palawija 3,00 ton setiap hektar yang setara dengan nilai Rp 767.307,-. Sehingga nilai ekonomi setiap meter kubik air waduk dapat dihitung (lihat Tabel 4-10).

Tabel 4-10 Data pendapatan bersih per-hektar setiap jenis tanaman

No	Uraian Pekerjaan	Komoditi			
		Padi/ha		Jagung/ha	
		Kg	Rupiah	Kg	Rupiah
1	Tenaga Kerja				
	a Luar Keluarga		642.787		259.779
	b Dalam Keluarga		185.497		93.241
2	Sarana Produksi				
	a Bibit	30	38.712	40	46.620
	b Urea	250	96.781	300	74.593
	c Za	100	38.712		
	d TSP	150	70.166	100	30.044
	e KCL	50	23.389		
	f Carbofuran	21	77.909		
	g Pestisida (ltr)	2	35.486	2	22.792
	h PPC	1	16.130		
3	Pengeluaran Lain-lain				
	a Sewa Tanah		300.000		300.000
	b Pajak Lahan		4.033		5.983
	c Iuran HIPPA		16.130		29.915
4	Biaya yang riil di bayar		1.060.236		469.726
5	Biaya total usaha		2.605.970		1.332.693
6	Penerimaan	4490	5.388.000	3000	2.100.000
7	Pendapatan Bersih		2.782.030		767.307

Sumber : Dinas Pertanian Propinsi Jawa Tengah, 2000

Catatan Tabel 10 :

1. Diperhitungkan dengan Produktivitas padi (GKG) = 4,49 ton/ha dan Jagung Pipilan Kering = 3,00 ton/ha
2. Harga Gabah Kering Giling (GKG) Rp. 1.200/kg dan Jagung Pipilan Kering Rp. 700/kg

3. Biaya yang riil di bayar adalah jumlah biaya sarana produksi, pajak lahan, iuran HIPPA dan biaya tenaga luar keluarga.
4. Biaya usaha total adalah jumlah dari biaya tenaga kerja, sarana produksi dan pengeluaran lain-lain.
5. Penerimaan adalah jumlah produksi (ton/ha) tanaman diSungaikan dengan harga tanaman tersebut.
6. Pendapatan bersih adalah penerimaan dikurangi dengan biaya total.

Perhitungan Tabel 4-11a, dijelaskan sebagai berikut : diketahui nilai produksi Padi I per-hektarnya setara dengan Rp 2.782.030,- dengan jumlah total kebutuhan air dari bulan 1-4 adalah 373,82 juta m³ (sampai dengan masa panen dan luas lahan 37.385 ha), sehingga rerata kebutuhan air setiap hektarnya 9,999 m³/ha selama 4 bulan yang setara dengan 0,96 l/det/ha.

Nilai ekonomi air waduk diperoleh dengan membagi nilai jual padi/ha dengan rerata kebutuhan air (sampai dengan masa panen, 4 bulan) setiap hektarnya, sehingga nilai ekonomi air waduk untuk Padi I golongan I setara dengan Rp 278,23/m³. Demikian juga untuk perhitungan dari bulan ke 5-8, bulan ke 9-12 dan golongan II.

Tabel 4-11 Perhitungan nilai ekonomi (Rp/m³) air waduk berdasarkan jenis tanaman dan volume kebutuhan air.

a. Golongan I

Pend. Padi I (Rp./ha)	2.782.030	Pend. Padi II (Rp./ha)	2.782.030	Pend. Palawija (Rp./ha)	767.307
Kebutuhan Air (m ³ /bulan)		Kebutuhan Air (m ³ /bulan)		Kebutuhan Air (m ³ /bulan)	
1 Oktober	1,62E+08	1 Februari	6,80E+07	1 Juni	1,67E+07
2 November	1,27E+08	2 Maret	7,86E+07	2 Juli	1,99E+07
3 Desember	8,51E+07	3 April	1,31E+08	3 Agustus	2,84E+07
4 Januari	0,00E+00	4 Mei	3,17E+07	4 September	1,45E+07
Total Kebutuhan Air (m ³)	3,74E+08	Total Kebutuhan Air (m ³)	3,09E+08	Total Kebutuhan Air (m ³)	7,96E+07
Luas areal irigasi (Ha)	37.385	Luas areal irigasi (Ha)	37.385	Luas areal irigasi (Ha)	37.385
Rerata Kebutuhan Air (m ³ /ha)	9.999,07	Rerata Kebutuhan Air (m ³ /ha)	8.273,23	Rerata Kebutuhan Air (m ³ /ha)	2.128,75
Harga Air (Rp./m ³)	278,23	Harga Air (Rp./m ³)	336,27	Harga Air (Rp./m ³)	360,45

b. Golongan II

Pend. Padi I (Rp./ha)	2.782.030	Pend. Padi II (Rp./ha)	2.782.030	Pend. Palawija (Rp./ha)	767.307
Kebutuhan Air (m ³ /bulan)		Kebutuhan Air (m ³ /bulan)		Kebutuhan Air (m ³ /bulan)	
1 November	1,68E+08	1 Maret	8,44E+07	1 Juli	1,27E+07
2 Desember	8,70E+07	2 April	1,17E+08	2 Agustus	2,64E+07
3 Januari	2,46E+07	3 Mei	9,20E+07	3 September	2,12E+07
4 Februari	8,59E+06	4 Juni	9,05E+06	4 Oktober	2,54E+06
Total Kebutuhan Air (m ³)	2,88E+08	Total Kebutuhan Air (m ³)	3,02E+08	Total Kebutuhan Air (m ³)	6,29E+07
Luas areal irigasi (Ha)	33.534	Luas areal irigasi (Ha)	33.534	Luas areal irigasi (Ha)	33.534
Rerata Kebutuhan Air (m ³ /ha)	8.594,06	Rerata Kebutuhan Air (m ³ /ha)	9.015,70	Rerata Kebutuhan Air (m ³ /ha)	1.875,46
Harga Air (Rp./m ³)	323,72	Harga Air (Rp./m ³)	308,58	Harga Air (Rp./m ³)	409,13

4.2.4.2 Nilai Ekonomi Air Waduk untuk PLTA

Operasi PLTA saat ini memaksimalkan pelepasan air untuk memenuhi kebutuhan irigasi dan air baku. Kapasitas stasiun pembangkit listrik terpasang 22,5 MW dan target produksi energi rerata tahunan 70 GWh dengan debit minimum pembangkit energi listrik 45 m³/detik dan debit maksimum 61,80 m³/detik.

Perhitungan energi listrik (Kwh) yang mampu dibangkitkan 1m³ (satu) air dan perhitungan harga (Rp/m³) air waduk diperoleh sebagai berikut (Indra Karya, 1993) :

HWL (high water level)	: 90 m
LWL (low water level)	: 64,5 m
TWL max (tail water level)	: 49,3 m
TWL min (tail water level)	: 37 m
Kapasitas stasiun pembangkit	: 22,5 MW
Debit maksimum	: 61,8 m ³ /detik
Lama beban puncak	: 4 jam/hari
Target energi rerata tahunan	: 70 juta Kwh

Perhitungan energi listrik yang dapat dibangkitkan oleh 1 (satu) m³ air, diasumsikan elevasi waduk dengan ketinggian rerata *rule curve* pengoperasian dari sistem operasi waduk Kedung Ombo dengan elevasi rerata 83,22 m.

Tinggi kotor (H _g)	: elevasi waduk rerata- TWL rerata
	: 83,22 – 38,23
	: 44,99 m
Kehilangan tinggi tekan rerata (H _L)	: 0,03 x 44,99 (3% x Tinggi kotor, Pranoto, 1994)
	: 1,35 m
H _{eff rerata}	: H _g – H _L
	: 44,99 – 1,35
	: 43,4 m
Effisiensi pembangkit (η)	: 0,87 (data proyek)
Daya (P)	: g x Q x η x H _{eff rerata} (kw)
Energi listrik (E)	: g x Q x η x H _{eff rerata} x 1 jam (Arismunandar dan Kuwuhara, 1982)
Debit (Q)	: 1 m ³ /detik dalam satu jam adalah 3.600 m ³
Energi listrik (E)	: 9,81 x 1 x 0,87 x 43,4 x 1 jam

: 347,37 Kwh (energi hasil 3.600 m³ air waduk)

sehingga :

347,37 Kwh \approx 3.600 m³

1 Kwh \approx 36.00/347,37

1 Kwh \approx 10,36 m³

1 m³ \approx 0,096 Kwh (energi dibangkitkan 1 m³ air waduk)

Data harga rerata energi listrik tanpa subsidi adalah Rp. 338,-/ Kwh (sumber PLN Cabang Semarang, 2000)

1 m³ \approx 0,096 Kwh

Rp 338,- \approx 1 Kwh

1 m³ \approx Rp. 338,- x 0,096

\approx Rp. 32,45,-

Jadi nilai ekonomi air waduk untuk PLTA adalah 32,45 rupiah/m³.

4.2.4.3 Nilai Ekonomi Air Waduk untuk Air Bersih

Daerah layanan air bersih waduk Kedung Ombo meliputi kota Purwodadi, Demak, Semarang dan Rembang. Dengan kapasitas debit maksimum sebesar 6.15 m³/detik, Indra Karya, 1993.

Tabel 4-12 Data daftar tarip air minum

Pelanggan		Satuan	Tarip dalam klasifikasi kubikasi			
			0-15	16-20	21-50	> 50
I Rumah Tangga/Non Niaga						
	1 Rumah Tangga I	Rp/m ³	300	425	545	1.045
	2 Rumah Tangga II	Rp/m ³	415	645	770	1.540
	3 Rumah Tangga III	Rp/m ³	575	800	1.100	1.850
	4 Rumah Tangga IV	Rp/m ³	650	895	1.275	2.175
	5 Rumah Tangga VI	Rp/m ³	725	1.050	1.525	2.595
II Rumah Tangga Semi Niaga						
	* Rumah Tangga dengan kegiatan usaha	Rp/m ³	500	750	1.100	1.540
Total		Rp/m ³	3.165	4.565	6.315	10.745
Rerata		Rp/m ³	528	761	1.053	1.791
Rerata klasifikas		Rp/m ³				1.033

Sumber : PDAM Kota Semarang, 1998

Harga air baku per-m³-nya ditetapkan berdasarkan data PDAM kota Semarang. Dengan konsumen terbesar adalah kelompok rumah tangga dengan persentase 82% (PDAM Semarang, 1998) dari keseluruhan pelanggan dengan tarif yang bervariasi untuk

per-m³ nya. Jadi nilai ekonomi air waduk untuk air baku setiap m³-nya adalah 1.033 rupiah.

Tabel 4-13 Rekap nilai ekonomi air waduk untuk masing-masing kebutuhan

Keterangan	Padi I	Padi II	Palawija	Listrik	Air Baku
	Rp/m ³	Rp/m ³	Rp/m ³	Rp/m ³	Rp/m ³
Golongan I	278,23	336,27	360,45	32,45	1032,92
Golongan II	323,72	308,58	409,13		

4.3. Analisis Pengaruh Luasan Irigasi Ketersediaan Air di Hilir Waduk

Hasil analisis luas daerah irigasi yang dapat diairi ketersediaan air Sungai Lanang, Sungai Lusi dan aliran lateral di Bendung bersangkutan (lihat Tabel 3-1, 3-2, 3-3, dan 3-4) ditampilkan pada Tabel 4-14. Analisis pengaruh luasan memberikan suatu angka bahwa ketersediaan air mempunyai potensi cukup besar untuk memenuhi kebutuhan air irigasi.

Tabel 4-14 Pengaruh luasan daerah irigasi suplesi dari debit rerata bulanan yang tersedia di Sungai lanang, Sungai Lusi dan Aliran lateral

Pengaruh luasan daerah irigasi Sidorejo Kiri dari ketersediaan air di Bendung Lanang														
Keterangan	Gol	satuan	Okt.	Nov.	Des.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agt.	Sep.
Suplesi	I	juta m ³	1,87	1,46	0,98	0,00	1,82	2,10	3,51	0,85	0,45	0,53	0,76	0,39
Luas D.I		ha	431	431	431	431	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Suplesi	II	juta m ³	0,00	3,46	1,79	0,51	0,18	2,06	2,85	2,24	0,22	0,00	0,00	0,00
Luas D.I		ha	0	691	691	691	691	818	818	818	818	0	0	0
Pengaruh luasan daerah irigasi Sedadi dari ketersediaan air di Bendung Sedadi														
Suplesi	I	juta m ³	4,24	3,33	2,23	0,00	6,00	6,93	11,56	2,79	0,89	1,06	1,52	0,77
Luas D.I		ha	981	981	981	981	3.298	3.298	3.298	3.298	1.992	1.992	1.992	1.992
Suplesi	II	juta m ³	0,00	4,28	2,22	0,63	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Luas D.I		ha	0	854	854	854	854	0	0	0	0	0	0	0
Pengaruh luasan daerah irigasi Klambu Kanan, Kiri dan Tambak Romo dari Ketersediaan Air di Bendung Klambu														
Suplesi	I	juta m ³	27,32	21,44	14,38	0,00	48,25	55,78	93,01	22,47	6,52	7,76	11,10	5,67
Luas D.I		ha	6.314	6.314	6.314	6.314	26.532	26.532	26.532	26.532	14.589	14.589	14.589	14.589
Suplesi	II	juta m ³	0,00	54,35	28,14	7,97	2,78	13,55	18,78	14,78	1,45	0,00	0,00	0,00
Luas D.I		ha	0	10.848	10.848	10.848	10.848	5.386	5.386	5.386	5.386	0	0	0
Total Luas daerah irigasi pengaruh dari ketersediaan air Kali Lanang, Kali Lusi dan Aliran Lateral														
Total Luas	I	ha	7.726	7.726	7.726	7.726	30.830	30.830	30.830	30.830	17.581	17.581	17.581	17.581
Total Luas	II	ha	0	12.393	12.393	12.393	12.393	6.204	6.204	6.204	6.204	0	0	0
Total suplesi	I	juta m ³	33,43	26,23	17,59	0,00	56,06	64,82	108,08	26,10	7,86	9,35	13,38	6,84
Total suplesi	II	juta m ³	0,00	62,09	32,15	9,10	3,17	15,61	21,63	17,02	1,68	0,00	0,00	0,00

Perhitungan luasan irigasi yang dapat dipenuhi ketersediaan air Sungai Lanang, Sungai Lusi dan aliran lateral diperoleh rerata seluas 24.912 ha (lihat Tabel 4-14) sehingga pada dasarnya potensi luas daerah irigasi (kebutuhan air) yang disuplesi oleh waduk Kedung Ombo sebesar 46.007 ha.

Tabel 4-15 Kondisi kebutuhan air daerah irigasi setelah memperhitungkan ketersediaan air Sungai Lanang, Sungai Lusi dan aliran lateral (juta m³).

Bulan	Kebutuhan Air Irigasi		Terpenuhi		Kekurangan		
	Golongan		Golongan		Golongan		
	I	II	I	II	I	II	I dan II
Okt.	161,76	2,54	33,43	0,00	128,33	2,54	130,87
Nov.	126,94	168,00	26,23	62,09	100,71	105,91	206,62
Des.	85,11	86,98	17,59	32,15	67,52	54,84	122,36
Jan.	0,00	24,63	0,00	9,10	0,00	15,53	15,53
Feb.	67,98	8,59	56,06	3,17	11,92	5,41	17,33
Mar.	78,60	84,38	64,82	15,61	13,78	68,77	82,55
Apr.	131,06	116,91	108,08	21,63	22,98	95,28	118,26
Mei	31,65	91,99	26,10	17,02	5,55	74,97	80,52
Jun.	16,72	9,05	7,86	1,68	8,85	7,38	16,23
Jul.	19,89	12,74	9,35	0,00	10,53	12,74	23,27
Agt.	28,45	26,39	13,38	0,00	15,07	26,39	41,46
Sep.	14,54	21,22	6,84	0,00	7,70	21,22	28,92
Total	762,69	653,42	369,74	162,45	392,95	490,97	883,92

Kondisi kekurangan kebutuhan air irigasi tersebut diharapkan dapat dipenuhi dari waduk Kedung Ombo (lihat Tabel 4-16). Untuk mengoptimalkan ketersediaan air waduk maka dilakukan optimasi dengan program linier.

Tabel 4-16 Kebutuhan air luasan dari waduk Kedung Ombo

Bulan	Kebutuhan air dari waduk				
	Daerah Irigasi				Air Baku juta m ³
	juta m ³	Golongan I (ha)	Golongan II (ha)	Total (ha)	
Okt.	130,87	29.658,72	33.534,00	63.192,72	15,94
Nov.	206,62	29.658,72	21.140,51	50.799,23	15,94
Des.	122,36	29.658,72	21.140,51	50.799,23	15,94
Jan.	15,53	29.658,72	21.140,51	50.799,23	15,94
Feb.	17,33	6.555,49	21.140,51	27.696,00	15,94
Mar.	82,55	6.555,49	27.329,79	33.885,28	15,94
Apr.	118,26	6.555,49	27.329,79	33.885,28	15,94
Mei	80,52	6.555,49	27.329,79	33.885,28	15,94
Jun.	16,23	19.803,91	27.329,79	47.133,70	15,94
Jul.	23,27	19.803,91	33.534,00	53.337,91	15,94
Agt.	41,46	19.803,91	33.534,00	53.337,91	15,94
Sep.	28,92	19.803,91	33.534,00	53.337,91	15,94

4.4. Persamaan Matematik Program Linier

Nilai ekonomi air waduk telah diperoleh sesuai dengan peruntukannya (lihat Tabel 4-13), menjadi koefisien variabel dari fungsi tujuan yang akan dioptimasi dengan program linier. Berdasarkan dari kondisi sistem pelepasan air waduk yang ada.

Kondisi sistem pelepasan menjelaskan bahwa ada dua *outlet* untuk memenuhi kebutuhan air di hilir waduk yaitu *outlet* irigasi dan *outlet* turbin, di mana *outlet* irigasi khusus hanya untuk memenuhi kebutuhan irigasi dan *outlet* turbin merupakan *outlet* yang mana ketinggian headnya dipergunakan untuk pembangkit energi listrik sedangkan debitnya dipergunakan untuk air baku dan air irigasi. Sehingga koefisien atau nilai ekonomi air yang melalui *outlet* turbin juga merupakan bagian dari nilai ekonomi air baku dan air irigasi. Untuk itu diperlukan pendekatan nilai ekonomi air yang melalui *outlet* turbin, pendekatan tersebut dilakukan sebagai berikut:

Sebagai contoh diketahui nilai ekonomi air setiap bulan untuk PLTA Rp. 32,45 juta per-juta m³, air baku Rp. 1033 juta per-juta m³ dan air irigasi golongan I Rp. 278,23 juta per-juta m³ dan golongan II Rp. 409,13 juta per-juta m³. Jika debit air yang melalui *outlet* turbin lebih kecil dari 160,19 juta m³, dan lebih besar dari 15 juta m³ maka dapat diperoleh persentase penambahan nilai ekonomi air yang melalui *outlet* turbin dengan mengambil rerata batasan di atas (sebesar 87,595 juta m³), dimana diketahui air baku konstan sepanjang tahun sebesar 15,94 juta m³ per-bulan.

Sehingga pendekatan persentase kebutuhan air baku dari pelepasan *outlet* turbin sebesar 0,182 dan persentase kebutuhan air irigasi sebesar 0,818 dari kapasitas rerata. Jadi nilai ekonomi air yang pelepasannya melalui *outlet* turbin adalah $Rp.32,45 + 0,182.(Rp.1033) + 0,818.((Rp.278,23 + Rp. 409,13)/2) = Rp. 501,57$ juta per-juta m³, demikian juga untuk nilai ekonomi pada bulan berikutnya.

4.4.1 Persamaan Program Linier Pada Kondisi Inflow Tahun Basah Sekali

Persamaan fungsi tujuan dan kendala dijabarkan sebagai berikut, contoh skenario pola debit *inflow* tahun basah sekali.

1. Fungsi Tujuan (lihat persamaan 2-43):

Berdasarkan penjelasan di atas maka persamaan fungsi tujuan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Maksimise } Z = & 501,57.EL_1 + 466,64.EL_2 + 466,64.EL_3 + 466,64.EL_4 + 490,37.EL_5 \\ & + 484,18.EL_6 + 484,18.EL_7 + 484,18.EL_8 + 494,07.EL_9 + \\ & 535,20.EL_{10} + 535,20.EL_{11} + 535,20.EL_{12} \\ & + \sum_{t=1}^{n=4} (278,23 \cdot PA_t - 139,11 \cdot d_t^+ - 278,23 \cdot d_t^-) \\ & + \sum_{t=5}^{n=8} (336,27 \cdot PA_t - 168,13 \cdot d_t^+ - 336,27 \cdot d_t^-) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{t=9}^{n=12} (360,45 \cdot PA_t - 180,22 \cdot d_t^+ - 360,45 \cdot d_t^-) \\
& + \sum_{t=12}^{n=3} (323,72 \cdot PB_t - 161,86 \cdot D_t^+ - 323,72 \cdot D_t^-) \\
& + \sum_{t=4}^{n=7} (308,58 \cdot PB_t - 154,29 \cdot D_t^+ - 308,58 \cdot D_t^-) \\
& + \sum_{t=8}^{n=11} (409,13 \cdot PB_t - 204,57 \cdot D_t^+ - 409,13 \cdot D_t^-)
\end{aligned}$$

2. Fungsi Kendala

- Persamaan kesetimbangan air waduk (lihat persamaan 2-29)

$$\begin{aligned}
S_0 - S_{12} &= 0 \\
RL_1 + SP_1 + S_1 - S_0 &= 37,79 \text{ juta m}^3 \\
RL_2 + SP_2 + S_2 - S_1 &= 75,49 \text{ juta m}^3 \\
RL_3 + SP_3 + S_3 - S_2 &= 132,65 \text{ juta m}^3 \\
RL_4 + SP_4 + S_4 - S_3 &= 149,58 \text{ juta m}^3 \\
RL_5 + SP_5 + S_5 - S_4 &= 172,21 \text{ juta m}^3 \\
RL_6 + SP_6 + S_6 - S_5 &= 158,94 \text{ juta m}^3 \\
RL_7 + SP_7 + S_7 - S_6 &= 124,74 \text{ juta m}^3 \\
RL_8 + SP_8 + S_8 - S_7 &= 82,28 \text{ juta m}^3 \\
RL_9 + SP_9 + S_9 - S_8 &= 24,29 \text{ juta m}^3 \\
RL_{10} + SP_{10} + S_{10} - S_9 &= 33,45 \text{ juta m}^3 \\
RL_{11} + SP_{11} + S_{11} - S_{10} &= 23,50 \text{ juta m}^3 \\
RL_{12} + SP_{12} + S_{12} - S_{11} &= 15,71 \text{ juta m}^3
\end{aligned}$$

- Pelepasan total waduk melalui pipa tekan (lihat persamaan 2-30) :

$$\begin{aligned}
RL_1 - EL_1 - PA_1 - PB_{12} &= 0 \\
RL_2 - EL_2 - PA_2 - PB_1 &= 0 \\
RL_3 - EL_3 - PA_3 - PB_2 &= 0 \\
RL_4 - EL_4 - PA_4 - PB_3 &= 0 \\
RL_5 - EL_5 - PA_5 - PB_4 &= 0 \\
RL_6 - EL_6 - PA_6 - PB_5 &= 0 \\
RL_7 - EL_7 - PA_7 - PB_6 &= 0 \\
RL_8 - EL_8 - PA_8 - PB_7 &= 0 \\
RL_9 - EL_9 - PA_9 - PB_8 &= 0 \\
RL_{10} - EL_{10} - PA_{10} - PB_9 &= 0 \\
RL_{11} - EL_{11} - PA_{11} - PB_{10} &= 0 \\
RL_{12} - EL_{12} - PA_{12} - PB_{11} &= 0
\end{aligned}$$

Pada kondisi tampungan waduk

$$18,70 \leq S_t \leq 634,6$$

- Pelepasan total waduk melalui pipa tekan (lihat persamaan 2-31) :

$$\begin{aligned}
RL_1 - EL_1 &= 0 \\
RL_2 - EL_2 &= 0 \\
RL_3 - EL_3 &= 0 \\
RL_4 - EL_4 &= 0 \\
RL_5 - EL_5 &= 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RL_6 - EL_6 &= 0 \\
RL_7 - EL_7 &= 0 \\
RL_8 - EL_8 &= 0 \\
RL_9 - EL_9 &= 0 \\
RL_{10} - EL_{10} &= 0 \\
RL_{11} - EL_{11} &= 0 \\
RL_{12} - EL_{12} &= 0
\end{aligned}$$

Pada kondisi tampungan waduk
 $0 \leq S_t < 18,70$

- Pelepasan air waduk melalui *outlet* turbin (lihat persamaan 2-32):

$$\begin{aligned}
EL_1 - PA1_1 - PBI_{12} - AB_1 &= 0 \\
EL_2 - PA1_2 - PBI_1 - AB_2 &= 0 \\
EL_3 - PA1_3 - PBI_2 - AB_3 &= 0 \\
EL_4 - PA1_4 - PBI_3 - AB_4 &= 0 \\
EL_5 - PA1_5 - PBI_4 - AB_5 &= 0 \\
EL_6 - PA1_6 - PBI_5 - AB_6 &= 0 \\
EL_7 - PA1_7 - PBI_6 - AB_7 &= 0 \\
EL_8 - PA1_8 - PBI_7 - AB_8 &= 0 \\
EL_9 - PA1_9 - PBI_8 - AB_9 &= 0 \\
EL_{10} - PA1_{10} - PBI_9 - AB_{10} &= 0 \\
EL_{11} - PA1_{11} - PBI_{10} - AB_{11} &= 0 \\
EL_{12} - PA1_{12} - PBI_{11} - AB_{12} &= 0
\end{aligned}$$

- Untuk meminimumkan kekurangan pelepasan irigasi (lihat persamaan 2-33).

$$\begin{aligned}
PAT_t &= PA_t + PA1_t \\
PBT_t &= PB_t + PBI_t
\end{aligned}$$

Golongan I

$$\begin{aligned}
PAT_1 - d_1^+ + d_1^- &= 128,33 \text{ juta m}^3 \\
PAT_2 - d_2^+ + d_2^- &= 100,71 \text{ juta m}^3 \\
PAT_3 - d_3^+ + d_3^- &= 67,52 \text{ juta m}^3 \\
PAT_4 - d_4^+ + d_4^- &= 0,00 \text{ juta m}^3 \\
PAT_5 - d_5^+ + d_5^- &= 11,92 \text{ juta m}^3 \\
PAT_6 - d_6^+ + d_6^- &= 13,78 \text{ juta m}^3 \\
PAT_7 - d_7^+ + d_7^- &= 22,98 \text{ juta m}^3 \\
PAT_8 - d_8^+ + d_8^- &= 5,55 \text{ juta m}^3 \\
PAT_9 - d_9^+ + d_9^- &= 8,85 \text{ juta m}^3 \\
PAT_{10} - d_{10}^+ + d_{10}^- &= 10,53 \text{ juta m}^3 \\
PAT_{11} - d_{11}^+ + d_{11}^- &= 15,07 \text{ juta m}^3 \\
PAT_{12} - d_{12}^+ + d_{12}^- &= 7,70 \text{ juta m}^3
\end{aligned}$$

Golongan II

$$PBT_{12} - D_{12}^+ + D_{12}^- = 2,54 \text{ juta m}^3$$

$$PBT_1 - D_1^+ + D_1^- = 105,91 \text{ juta m}^3$$

$$PBT_2 - D_2^+ + D_2^- = 54,84 \text{ juta m}^3$$

$$PBT_3 - D_3^+ + D_3^- = 15,53 \text{ juta m}^3$$

$$PBT_4 - D_4^+ + D_4^- = 5,41 \text{ juta m}^3$$

$$PBT_5 - D_5^+ + D_5^- = 68,77 \text{ juta m}^3$$

$$PBT_6 - D_6^+ + D_6^- = 95,28 \text{ juta m}^3$$

$$PBT_7 - D_7^+ + D_7^- = 74,97 \text{ juta m}^3$$

$$PBT_8 - D_8^+ + D_8^- = 7,38 \text{ juta m}^3$$

$$PBT_9 - D_9^+ + D_9^- = 12,74 \text{ juta m}^3$$

$$PBT_{10} - D_{10}^+ + D_{10}^- = 26,39 \text{ juta m}^3$$

$$PBT_{11} - D_{11}^+ + D_{11}^- = 21,22 \text{ juta m}^3$$

- Pendekatan persamaan skala kebutuhan dilakukan sebagai berikut (lihat persamaan 2-34) :

dimana :

$$PAT_t = PA_t + PAI_t$$

$$PBT_t = PB_t + PBI_t$$

Golongan I

$$0,43 \cdot (PAT_1 + PAT_2 + PAT_3 + PAT_4) - PAT_1 = 0$$

$$0,34 \cdot (PAT_1 + PAT_2 + PAT_3 + PAT_4) - PAT_2 = 0$$

$$0,23 \cdot (PAT_1 + PAT_2 + PAT_3 + PAT_4) - PAT_3 = 0$$

$$0,00 \cdot (PAT_1 + PAT_2 + PAT_3 + PAT_4) - PAT_4 = 0$$

$$0,22 \cdot (PAT_5 + PAT_6 + PAT_7 + PAT_8) - PAT_5 = 0$$

$$0,25 \cdot (PAT_5 + PAT_6 + PAT_7 + PAT_8) - PAT_6 = 0$$

$$0,42 \cdot (PAT_5 + PAT_6 + PAT_7 + PAT_8) - PAT_7 = 0$$

$$0,10 \cdot (PAT_5 + PAT_6 + PAT_7 + PAT_8) - PAT_8 = 0$$

$$0,21 \cdot (PAT_9 + PAT_{10} + PAT_{11} + PAT_{12}) - PAT_9 = 0$$

$$0,25 \cdot (PAT_9 + PAT_{10} + PAT_{11} + PAT_{12}) - PAT_{10} = 0$$

$$0,36 \cdot (PAT_9 + PAT_{10} + PAT_{11} + PAT_{12}) - PAT_{11} = 0$$

$$0,18 \cdot (PAT_9 + PAT_{10} + PAT_{11} + PAT_{12}) - PAT_{12} = 0$$

Golongan II

$$0,04 \cdot (PBT_9 + PBT_{10} + PBT_{11} + PBT_{12}) - PBT_{12} = 0$$

$$0,58 \cdot (PBT_1 + PBT_2 + PBT_3 + PBT_4) - PBT_1 = 0$$

$$0,30 \cdot (PBT_1 + PBT_2 + PBT_3 + PBT_4) - PBT_2 = 0$$

$$0,09 \cdot (PBT_1 + PBT_2 + PBT_3 + PBT_4) - PBT_3 = 0$$

$$0,03 \cdot (PBT_1 + PBT_2 + PBT_3 + PBT_4) - PBT_4 = 0$$

$$0,28 \cdot (PBT_5 + PBT_6 + PBT_7 + PBT_8) - PBT_5 = 0$$

$$0,39 \cdot (PBT_5 + PBT_6 + PBT_7 + PBT_8) - PBT_6 = 0$$

$$0,30 \cdot (PBT_5 + PBT_6 + PBT_7 + PBT_8) - PBT_7 = 0$$

$$0,03 \cdot (PBT_5 + PBT_6 + PBT_7 + PBT_8) - PBT_8 = 0$$

$$0,20 \cdot (PBT_9 + PBT_{10} + PBT_{11} + PBT_{12}) - PBT_9 = 0$$

$$0,42 \cdot (PBT_9 + PBT_{10} + PBT_{11} + PBT_{12}) - PBT_{10} = 0$$

$$0,34 \cdot (PBT_9 + PBT_{10} + PBT_{11} + PBT_{12}) - PBT_{11} = 0$$

- Batasan kebutuhan dan kapasitas pipa (saluran pelepasan) lihat persamaan 2-35 sampai 2-37.

$$AB_t = 15,94 \text{ juta m}^3$$

$$EL_t \leq 160,19 \text{ juta m}^3$$

$$RL_t \leq 455,65 \text{ juta m}^3$$

- Persamaan program mengijinkan adanya limpasan melalui bangun pelimpah untuk mengantisipasi kelebihan debit *inflow* ke waduk (lihat persamaan 2-40).

$$SP_t \geq 0$$

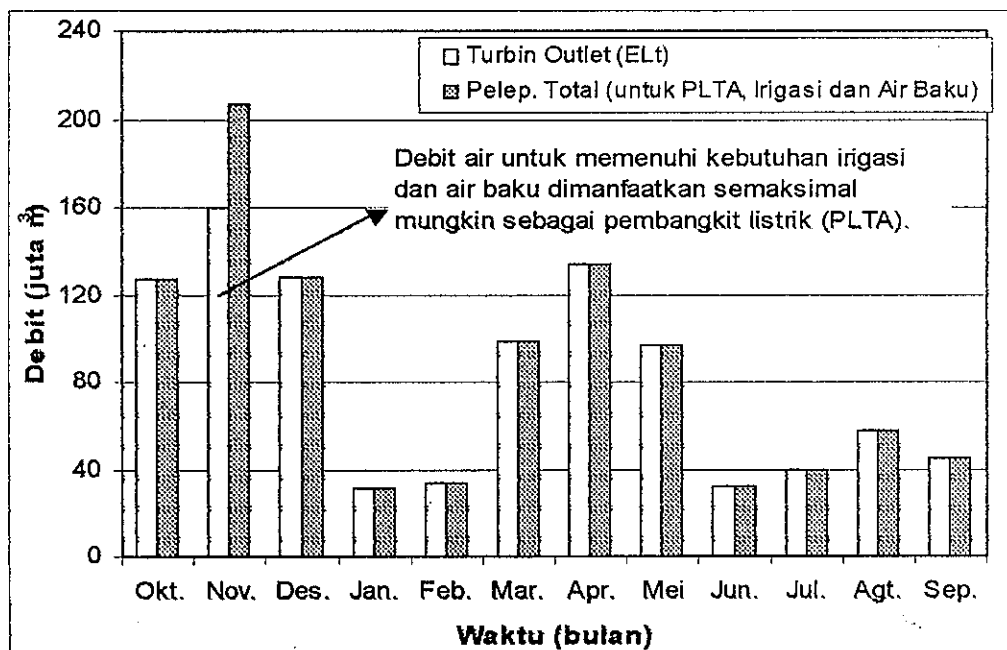
- persyaratan non-negatif, lihat persamaan 2-41 dan 2-42.

$$d_t^+, d_t^-, D_t^+, D_t^- \geq 0$$

$$PA_t, PB_t, PA_{1t}, PB_{1t}, S_t, RL_t, EL_t \geq 0$$

4.4.1.1 Analisis Program Linier

Hasil analisis program linier harus menunjukkan kesesuai dengan ketentuan-ketentuan yang diberlakukan pada persamaan-persamaan kendala. Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan antara lain skala kebutuhan irigasi, pelepasan air waduk.



Gambar 4-6 Grafik menunjukkan pelepasan air irigasi dan air baku dimanfaatkan semaksimal mungkin untuk pembangkit energi listrik (tahun basah sekali)

Pola skala kebutuhan irigasi merupakan perbandingan antara luas tanam dengan kebutuhan air. Artinya, jika program hanya mengizinkan pada awal bulan tanam Padi I Golongan I luas tanam 15.865 ha, maka untuk bulan-bulan berikutnya selama 4 bulan (sampai panen) luas tanamnya harus 15.865 ha dengan kebutuhan air yang berbeda setiap bulannya sesuai dengan usia tanaman.

Pelepasan air waduk pada saat ini diutamakan untuk mengairi daerah irigasi dan suplesi air baku, tetapi sebelumnya air dimanfaatkan terlebih dahulu semaksimal mungkin sebagai pembangkit energi listrik. Artinya, pelepasan terlebih dahulu dialirkan melalui katup turbin untuk memutar turbin, dengan persyaratan debit air tidak melebihi kapasitas maksimal turbin sebesar 160,19 juta m³/bulan.

Jika debit kebutuhan di hilir melebihi kapasitas maksimal turbin dan elevasi muka air waduk lebih besar atau sama dengan elevasi MOL irigasi (+64,5m) maka katup irigasi diijinkan dibuka untuk mengalirkan kekurangan air dihilir waduk. Kondisi tersebut dieskpresikan seperti pada Gambar 4-6. Tabel-tabel mengenai data *input* dan *output* kondisi hasil analisis program linier pada semua skenario debit *inflow* tahunan waduk selengkapnya lihat pada lampiran 1 s/d 5.

4.4.1.2 Analisis *Sensitivitas* Program Linier

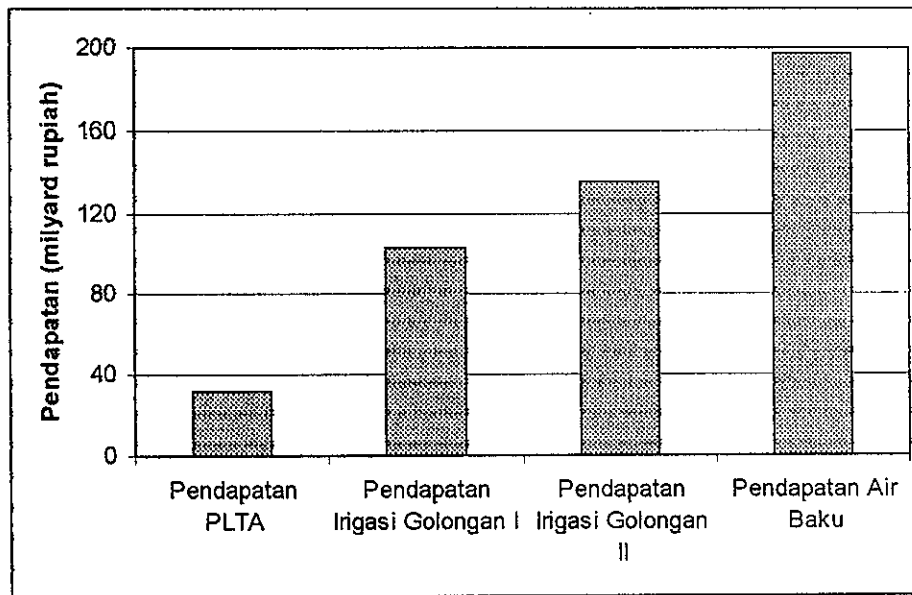
Jawaban optimal dari kasus Pemrograman Linier didasarkan pada asumsi-asumsi bahwa harga tetap, sumber-sumber tetap, kebutuhan air tetap (deterministik). Dengan asumsi-asumsi tersebut memungkinkan kita untuk memperoleh jawaban optimal. Tapi pada kenyataannya sering asumsi-asumsi tidak sesuai sejalan dengan waktu atau terjadi situasi diluar dari skenario yang direncanakan.

Oleh karena hal tersebut, hasil pengolahan program linier menampilkan analisis *sensitivitas* yang memberikan jawaban-jawaban yang memungkinkan perubahan boleh terjadi tanpa mempengaruhi optimalisasi penyelesaian yang sudah ada. Artinya kita bisa merubah nilai-nilai koefisien fungsi tujuan, koefisien variable putusan dan nilai ruas kanan (NRK) sampai pada interval tertentu.

Informasi yang disajikan dari hasil pengolahan program linier dapat dikelompokkan menjadi dua bagian pokok yaitu:

1. Informasi Penyelesaian Optimal

□ Nilai Fungsi Tujuan Maksimal



Gambar 4-7 Pendapatan maksimal total selama setahun untuk skenario pola debit *inflow* tahun basah sekali

Program menyajikan nilai tujuan persamaan linier yang diolah berdasarkan persamaan fungsi tujuan dan kendalanya. Nilai maksimal Fungsi Tujuan dari program linier diperoleh seperti yang tercantum pada Gambar 4-7.

Untuk hasil perhitungan dapat dilihat pada lampiran 1 dan untuk kondisi skenario pola debit *inflow* lainnya dapat dilihat pada lampiran 2, lampiran 3, lampiran 4 dan lampiran 5.

□ Nilai variabel putusan dan *Reduced cost*-nya

Termasuk variabel putusan ialah pelepasan kebutuhan untuk irigasi, Air Baku dan PLTA. Pada Tabel 4-17 di mana nilai variabel putusan pelepasan melalui *outlet* turbin yang dengan nilai *reduksi cost*-nya mengidentifikasi bahwa variabel putusan diajukan sebagai solusi optimal (maksimise), tetapi dapat kita lihat pada bulan November dimana *reduksi cost*-nya tidak nol. Kondisi ini mengidentifikasi bahwa pada kenyataannya masih ada air yang dapat dilepaskan melalui turbin *outlet* namun karena kondisi keterbatasan kapasitas pipa maka pelepasan maksimum hanya diijinkan sebesar 160,19 juta m³. Dan secara keseluruhan kondisi dari semua variabel keputusan Tabel 4-17 diajukan program sebagai solusi optimal.

Tabel 4-17 *Reduced cost* dan nilai optimal variable putusan pelepasan melalui turbin outlet (juta m³)

Bulan	Keterangan (turbin outlet)	Nilai Variabel putusan	<i>Reduced Cost</i>
Okt.	EL ₁	127,51	0,00
Nov.	EL ₂	160,19	466,64
Des.	EL ₃	128,15	0,00
Jan.	EL ₄	31,47	0,00
Feb.	EL ₅	33,27	0,00
Mar.	EL ₆	98,49	0,00
Apr.	EL ₇	134,20	0,00
Mei	EL ₈	96,46	0,00
Jun.	EL ₉	32,17	0,00
Jul.	EL ₁₀	39,21	0,00
Agt.	EL ₁₁	57,40	0,00
Sep.	EL ₁₂	44,86	0,00

Tabel-tabel kondisi hasil analisis program linier mengenai nilai variabel putusan dan *reduced cost*-nya selengkapnya pada lampiran 1 dan untuk kondisi skenario pola debit *inflow* lainnya dapat dilihat pada lampiran 2, lampiran 3, lampiran 4 dan lampiran 5.

- Nilai *slack* atau *surplus* dan *dual prices*

Tabel 4-18 menunjukkan semua kendala aktif, artinya kebutuhan air daerah irigasi sudah terpenuhi semaksimal mungkin dari keterbatasan air yang tersedia. Kendala aktif ditunjukkan oleh nilai *slack* dan *surplus* adalah nol.

Tabel 4-18 Sisa kapasitas dan nilai marginal dari kendala pelepasan kebutuhan air irigasi

Kendala	Sisa Kapasitas (<i>slack or surplus</i>)	Nilai Marginal (<i>dual prices</i>)
Golongan I-PAT ₁	0,00	-278,23
Golongan I-PAT ₂	0,00	-278,23
Golongan I-PAT ₃	0,00	-278,23
Golongan I-PAT ₄	0,00	139,11
Golongan I-PAT ₅	0,00	-336,27
Golongan I-PAT ₆	0,00	-336,27
Golongan I-PAT ₇	0,00	-208,40
Golongan I-PAT ₈	0,00	-336,27
Golongan I-PAT ₉	0,00	180,22
Golongan I-PAT ₁₀	0,00	-349,52
Golongan I-PAT ₁₁	0,00	-360,45
Golongan I-PAT ₁₂	0,00	-360,45

Nilai marjinal (*dual prices*) pada Tabel 4-18 terlihat nilainya ada yang negatif dan positif, artinya nilai marjinal (*dual prices*) positif (kendala Golongan I-PAT₄) adalah penambahan setiap unit kebutuhan daerah irigasi (NRK) akan mengakibatkan pengurangan nilai fungsi tujuan sebesar 139,11 dan sebaliknya untuk nilai marjinal (*dual prices*) negatif. Karena perubahan tersebut merupakan fungsi dari perkalian antara nilai marginal (*dual prices*) dengan besar perubahan nilai ruas kanan. Tetapi program linier akan memberikan toleransi penambahan NRK pada interval tertentu agar nilai marjinal (*dual prices*) tetap berada pada kisaran 139,11.

Tabel kondisi hasil analisis program linier pada semua skenario debit *inflow* tahunan waduk mengenai sisa kapasitas dan nilai marjinal (*dual prices*) selengkapnya pada lampiran 1 dan untuk kondisi skenario pola debit *inflow* lainnya dapat dilihat pada lampiran 2, lampiran 3, lampiran 4 dan lampiran 5.

2. Informasi Analisis *Sensitivitas*

□ *Sensitivitas* koefisien fungsi tujuan

Tabel 4-19 menunjukkan interval perubahan dari nilai ekonomi (rupiah) air waduk, di mana interval yang disajikan Tabel 4-19 bulan januari untuk variabel putusan pelepasan melalui *outlet* turbin bulan November adalah pengurangan dan penambahan tak terhingga. Hal ini mengindikasikan berapapun besarnya nilai ekonomi (rupiah) air waduk, jumlah suplesi air tidak berubah atau sama dengan distribusi optimalnya.

Tabel 4-19 Interval perubahan koefisien fungsi tujuan atau nilai ekonomi air waduk melalui *outlet* turbin, juta rupiah per-juta m³

Bulan	Keterangan (outlet turbin)	Nilai Saat ini	Interval Perubahan	
			Penambahan	Pengurangan
Okt.	EL1	501,57	2113,36	501,57
Nov.	EL2	466,64	<i>tak terhingga</i>	466,64
Des.	EL3	466,64	3736,87	449,95
Jan.	EL4	466,64	6159,29	466,64
Feb.	EL5	490,37	6472,51	490,37
Mar.	EL6	484,18	146,03	484,18
Apr.	EL7	484,18	<i>tak terhingga</i>	484,18
Mei	EL8	484,18	133,95	484,18
Jun.	EL9	494,07	4801,25	230,94
Jul.	EL10	535,2	1479,96	180,29
Agt.	EL11	535,2	714,26	126,04
Sep.	EL12	535,2	888,31	246,67

Pada bulan oktober penambahan nilai ekonomi air waduk dibatasi sebesar 2.113,36 juta rupiah sehingga menjadi 2.614,93 juta rupiah setiap juta m³. Untuk penambahan tak terhingga artinya walaupun air waduk harganya tidak terbatas pada bulan November, kebutuhan air pada bulan tersebut tetap akan hanya dipenuhi sejumlah distribusi optimalnya.

Tabel kondisi hasil analisis program linier pada semua skenario debit *inflow* tahunan waduk mengenai Interval perubahan koefisien fungsi tujuan selengkapnya pada lampiran 1 dan untuk kondisi skenario pola debit *inflow* lainnya dapat dilihat pada lampiran 2, lampiran 3, lampiran 4 dan lampiran 5.

□ *Sensitivitas* nilai ruas kanan (NRK)

Perubahan nilai ruas kanan (NRK) disajikan pada Tabel 4-20. Nilai ruas kanan disini merupakan jumlah dari kebutuhan air daerah irigasi untuk tanaman golongan I setiap bulannya. Pada bulan januari terlihat bahwa kebutuhan saat ini adalah nol, tetapi penambahan kebutuhan tidak diijinkan karena penambahan kebutuhan akan merubah semua nilai optimal variabel putusan.

Tabel 4-20 Interval perubahan Nilai Ruas Kanan (NRK) atau besarnya kebutuhan air untuk masing-masing tanaman (juta m³) yang diijinkan program

Bulan	Keterangan	Nilai Saat ini	Interval Perubahan	
			Penambahan	Pengurangan
Okt.	Golongan I-PAT ₁	128,33	<i>tak terhingga</i>	127,05
Nov.	Golongan I-PAT ₂	100,71	<i>tak terhingga</i>	99,70
Des.	Golongan I-PAT ₃	67,52	<i>tak terhingga</i>	66,85
Jan.	Golongan I-PAT ₄	0,00	0,00	<i>tak terhingga</i>
Feb.	Golongan I-PAT ₅	11,92	<i>tak terhingga</i>	0,00
Mar.	Golongan I-PAT ₆	13,78	<i>tak terhingga</i>	0,00
Apr.	Golongan I-PAT ₇	22,98	0,00	15,36
Mei	Golongan I-PAT ₈	5,55	<i>tak terhingga</i>	0,00
Jun.	Golongan I-PAT ₉	8,85	0,00	<i>tak terhingga</i>
Jul.	Golongan I-PAT ₁₀	10,53	0,00	0,00
Agt.	Golongan I-PAT ₁₁	15,07	<i>tak terhingga</i>	0,00
Sep.	Golongan I-PAT ₁₂	7,70	<i>tak terhingga</i>	0,00

Sedangkan pada bulan february penambahan kebutuhan diijinkan sampai dengan tak terhingga tetapi hal ini tidak berarti penambahan kebutuhan air sampai dengan tak terhingga terpenuhi. Karena nilai tak terhingga disini hanya mengisyaratkan bahwa perubahan (penambahan) tidak akan mempengaruhi besarnya suplesi optimal.

Tabel-tabel kondisi hasil analisis program linier mengenai interval perubahan nilai ruas kanan (NRK) selengkapnya pada lampiran 1 dan untuk kondisi skenario pola debit *inflow* lainnya dapat dilihat pada lampiran 2, lampiran 3, lampiran 4 dan lampiran 5.

4.4.2 Evaluasi Hasil Optimasi Kondisi Inflow Tahun Basah Sekali

Hasil dari perhitungan optimasi program linier untuk skenario pola debit *inflow* tahun basah sekali kebutuhan air daerah irigasi yang dapat disuplesi waduk sebesar 839,33 juta m³ dari kekurangan air sebesar 883,92 juta m³. Luasan daerah irigasi yang dapat diari pada kondisi tahun basah sekali rerata sebesar 43.997,35 ha/tahun sementara luas daerah irigasi yang harus disuplesi dari waduk Kedung Ombo 46.007,47 ha/tahun (lihat Tabel 4-16). Luas daerah irigasi yang tidak dapat diari oleh ketersediaan air pada sistem daerah irigasi waduk Kedung ombo adalah rerata seluas 2.010,12 ha/tahun.

Hal ini mengindikasikan bahwa ketersediaan air pada sistem daerah irigasi waduk Kedung Ombo tidak dapat memenuhi semua kebutuhan air potensi daerah irigasi seluas 70.919 ha. Kebutuhan air irigasi hanya dapat dipenuhi dengan luas daerah irigasi sebesar 68.908,88 ha/tahun untuk kondisi pada tahun basah sekali dari potensi luas daerah irigasi 70.919 ha. Sementara untuk kebutuhan air baku di suplesi sebesar 15,94 juta m³/bulan. (detail lihat Tabel 4-21)

Tabel 4-21 Kebutuhan yang mampu dipenuhi oleh ketersediaan air waduk Kedung Ombo pada kondisi tahun basah sekali

Bulan	Pelepasan air dari waduk					Output Energi
	Daerah Irigasi			Air Baku	Total	
	juta m ³	Golongan I (ha)	Golongan II (ha)	juta m ³	juta m ³	GWh
Okt.	111,57	25.199,40	33.534,00	15,94	127,51	13.883,78
Nov.	191,47	25.199,40	14.856,25	15,94	207,41	15.755,33
Des.	112,21	25.199,40	21.140,51	15,94	128,15	12.672,69
Jan.	15,53	25.199,40	21.140,51	15,94	31,47	3.405,27
Feb.	17,33	6.555,49	21.140,51	15,94	33,27	3.900,48
Mar.	82,55	6.555,49	27.329,79	15,94	98,49	11.885,67
Apr.	118,26	6.555,49	27.329,79	15,94	134,20	15.441,59
Mei	80,52	6.555,49	27.329,79	15,94	96,46	11.513,16
Jun.	16,23	19.803,91	27.329,79	15,94	32,17	3.825,65
Jul.	23,27	19.803,91	33.534,00	15,94	39,21	4.649,69
Agt.	41,46	19.803,91	33.534,00	15,94	57,40	6.692,44
Sep.	28,92	19.803,91	33.534,00	15,94	44,86	5.150,66

Output energi hasil optimasi dihitung berdasarkan debit air yang keluar melalui katup turbin dan volume air di waduk. Volume air waduk dikonversikan ke dalam elevasi berdasarkan persamaan 4-1 dan 4-2 dan *output* energi dihitung berdasarkan persamaan 4-

5 s/d 4-9. Dari perhitungan tersebut diperoleh *output* energi hasil optimasi pada tahun basah sekali rerata sebesar 9.064,70 GWh/bulan atau sebesar 108.776,43 GWh/tahun.

4.4.3 Evaluasi Kondisi Inflow Tahun Yang Lain

4.4.3.1 Kondisi Inflow Tahun Basah

Hasil dari perhitungan optimasi program linier untuk skenario pola debit *inflow* tahun basah diperoleh untuk kebutuhan air daerah irigasi yang dapat disuplesi waduk sebesar 638,53 juta m³ dari kekurangan air sebesar 883,92 juta m³. Luasan daerah irigasi yang dapat diari pada kondisi tahun basah rerata sebesar 37.826,62 ha/tahun sementara luas daerah irigasi yang harus disuplesi dari waduk Kedung Ombo 46.007,47 ha/tahun (lihat Tabel 4-16). Luas daerah irigasi yang tidak dapat diari oleh ketersediaan air pada sistem daerah irigasi waduk Kedung ombo adalah rerata seluas 8.180,85 ha/tahun.

Hal ini mengindikasikan bahwa ketersediaan air pada sistem daerah irigasi waduk Kedung Ombo tidak dapat memenuhi semua kebutuhan air potensi daerah irigasi seluas 70.919 ha. Kebutuhan air irigasi hanya dapat dipenuhi dengan luas daerah irigasi sebesar 62.738,35 ha/tahun untuk kondisi pada tahun basah dari potensi luas daerah irigasi 70.919 ha. Sementara untuk kebutuhan air baku di suplesi sebesar 15,94 juta m³/bulan. (detail lihat Tabel 4-22)

Tabel 4-22 Kebutuhan yang mampu dipenuhi oleh ketersediaan air waduk Kedung Ombo pada kondisi tahun basah

Bulan	Pelepasan air dari waduk				Output Energi	
	Daerah Irigasi			Air Baku		Total
	juta m ³	Golongan I (ha)	Golongan II (ha)	juta m ³	juta m ³	GWh
Okt.	24,68	5.116,77	33.534,00	15,94	40,62	4.337,25
Nov.	123,28	5.116,77	21.140,51	15,94	139,22	14.087,60
Des.	66,48	5.116,77	21.140,51	15,94	82,42	8.616,93
Jan.	15,53	5.116,77	21.140,51	15,94	31,47	3.559,59
Feb.	17,33	6.555,49	21.140,51	15,94	33,27	3.974,15
Mar.	82,55	6.555,49	27.329,79	15,94	98,49	11.885,67
Apr.	118,26	6.555,49	27.329,79	15,94	134,20	15.562,12
Mei	80,52	6.555,49	27.329,79	15,94	96,46	11.137,33
Jun.	16,23	19.803,91	27.329,79	15,94	32,17	3.700,29
Jul.	23,27	19.803,91	33.534,00	15,94	39,21	4.462,73
Agt.	41,46	19.803,91	33.534,00	15,94	57,40	6.337,25
Sep.	28,92	19.803,91	33.534,00	15,94	44,86	4.857,40

Output energi hasil optimasi dihitung berdasarkan debit air yang keluar melalui katup turbin dan volume air di waduk. Volume air waduk dikonversikan ke dalam elevasi berdasarkan persamaan 4-1 dan 4-2 dan *output* energi dihitung berdasarkan persamaan 4-

5 s/d 4-9. Dari perhitungan tersebut diperoleh *output* energi hasil optimasi pada tahun basah rerata sebesar 7.709,86 GWh/bulan atau sebesar 92.518,32 GWh/tahun.

4.4.3.2 Kondisi Inflow Tahun Normal

Hasil dari perhitungan optimasi program linier untuk skenario pola debit *inflow* tahun normal diperoleh untuk kebutuhan air daerah irigasi yang dapat disuplesi waduk sebesar 544,12 juta m³ dari kekurangan air sebesar 883,92 juta m³. Luasan daerah irigasi yang dapat diari pada kondisi tahun normal rerata sebesar 34.500,69 ha/tahun sementara luas daerah irigasi yang harus disuplesi dari waduk Kedung Ombo 46.007,47 ha/tahun (lihat Tabel 4-16). Luas daerah irigasi yang tidak dapat diari oleh ketersediaan air pada sistem daerah irigasi waduk Kedung ombo adalah rerata seluas 11.506,78 ha/tahun.

Hal ini mengindikasikan bahwa ketersediaan air pada sistem daerah irigasi waduk Kedung Ombo tidak dapat memenuhi semua kebutuhan air potensi daerah irigasi seluas 70.919 ha. Kebutuhan air irigasi hanya dapat dipenuhi dengan luas daerah irigasi sebesar 59.412,22 ha/tahun untuk kondisi pada tahun normal dari potensi luas daerah irigasi 70.919 ha. Sementara untuk kebutuhan air baku di suplesi sebesar 15,94 juta m³/bulan. (detail lihat Tabel 4-23)

Output energi hasil optimasi dihitung berdasarkan debit air yang keluar melalui katup turbin dan volume air di waduk. Volume air waduk dikonversikan ke dalam elevasi berdasarkan persamaan 4-1 dan 4-2 dan *output* energi dihitung berdasarkan persamaan 4-5 s/d 4-9. Dari perhitungan tersebut diperoleh *output* energi hasil optimasi pada tahun normal rerata sebesar 4.909,23 GWh/bulan atau sebesar 58.910,72 GWh/tahun.

Tabel 4-23 Kebutuhan yang mampu dipenuhi oleh ketersediaan air waduk Kedung Ombo pada kondisi tahun Normal

Bulan	Pelepasan air dari waduk					Output Energi GWh
	Daerah Irigasi			Air Baku	Total	
	juta m ³	Golongan I (ha)	Golongan II (ha)	juta m ³	juta m ³	
Okt.	5,10	593,80	33.534,00	15,94	21,04	1.557,54
Nov.	107,93	593,80	21.140,51	15,94	123,87	7.219,44
Des.	56,19	593,80	21.140,51	15,94	72,13	4.849,04
Jan.	15,53	593,80	21.140,51	15,94	31,47	2.496,51
Feb.	17,33	6.555,49	21.140,51	15,94	33,27	3.043,11
Mar.	68,82	6.555,49	21.874,34	15,94	84,76	8.010,59
Apr.	99,24	6.555,49	21.874,34	15,94	115,18	10.617,95
Mei	65,56	6.555,49	21.874,34	15,94	81,50	7.226,45
Jun.	14,76	19.803,91	21.874,34	15,94	30,70	2.691,93
Jul.	23,27	19.803,91	33.534,00	15,94	39,21	3.322,89
Agt.	41,46	19.803,91	33.534,00	15,94	57,40	4.546,77
Sep.	28,92	19.803,91	33.534,00	15,94	44,86	3.328,50

4.4.3.3 Kondisi Inflow Tahun Kering

Hasil dari perhitungan optimasi program linier untuk skenario pola debit *inflow* tahun kering diperoleh untuk kebutuhan air daerah irigasi yang dapat disuplesi waduk sebesar 407,05 juta m³ dari kekurangan air sebesar 883,92 juta m³. Luasan daerah irigasi yang dapat diari pada kondisi tahun kering rerata sebesar 29.432,88 ha/tahun sementara luas daerah irigasi yang harus disuplesi dari waduk Kedung Ombo 46.007,47 ha/tahun (lihat Tabel 4-16). Luas daerah irigasi yang tidak dapat diari oleh ketersediaan air pada sistem daerah irigasi waduk Kedung ombo adalah rerata seluas 16.574,59 ha/tahun.

Hal ini mengindikasikan bahwa ketersediaan air pada sistem daerah irigasi waduk Kedung Ombo tidak dapat memenuhi semua kebutuhan air potensi daerah irigasi seluas 70.919 ha. Kebutuhan air irigasi hanya dapat dipenuhi dengan luas daerah irigasi sebesar 54.344,41 ha/tahun untuk kondisi pada tahun kering dari potensi luas daerah irigasi 70.919 ha. Sementara untuk kebutuhan air baku di suplesi sebesar 15,94 juta m³/bulan. (detail lihat Tabel 4-24)

Output energi hasil optimasi dihitung berdasarkan debit air yang keluar melalui katup turbin dan volume air di waduk. Volume air waduk dikonversikan ke dalam elevasi berdasarkan persamaan 4-1 dan 4-2 dan *output* energi dihitung berdasarkan persamaan 4-5 s/d 4-9. Dari perhitungan tersebut diperoleh *output* energi hasil optimasi pada tahun kering rerata sebesar 3.873,32 GWh/bulan atau sebesar 46.479,84 GWh/tahun.

Tabel 4-24 Kebutuhan yang mampu dipenuhi oleh ketersediaan air waduk Kedung Ombo pada kondisi tahun kering

Bulan	Pelepasan air dari waduk					Output Energi
	Daerah Irigasi			Air Baku	Total	
	juta m ³	Golongan I (ha)	Golongan II (ha)	juta m ³	juta m ³	GWh
Okt.	5,10	593,80	33.534,00	15,94	21,04	1.628,25
Nov.	107,93	593,80	21.140,51	15,94	123,87	7.518,09
Des.	56,19	593,80	21.140,51	15,94	72,13	4.421,32
Jan.	15,53	593,80	21.140,51	15,94	31,47	2.418,50
Feb.	17,33	6.555,49	21.140,51	15,94	33,27	2.864,03
Mar.	30,57	6.555,49	6.670,91	15,94	46,51	4.256,37
Apr.	46,24	6.555,49	6.670,91	15,94	62,18	5.643,57
Mei	23,85	6.555,49	6.670,91	15,94	39,79	3.634,77
Jun.	10,66	19.803,91	6.670,91	15,94	26,60	2.403,76
Jul.	23,27	19.803,91	33.534,00	15,94	39,21	3.443,18
Agt.	41,46	19.803,91	33.534,00	15,94	57,40	4.731,58
Sep.	28,92	19.803,91	33.534,00	15,94	44,86	3.516,41

4.4.3.4 Kondisi Inflow Tahun Kering Sekali

Hasil dari perhitungan optimasi program linier untuk skenario pola debit *inflow* tahun kering sekali diperoleh untuk kebutuhan air daerah irigasi yang dapat disuplesi waduk sebesar 161,45 juta m³ dari kekurangan air sebesar 883,92 juta m³. Luasan daerah irigasi yang dapat diari pada kondisi tahun kering sekali rerata sebesar 22.914,00 ha/tahun sementara luas daerah irigasi yang harus disuplesi dari waduk Kedung Ombo 46.007,47 ha/tahun (lihat Tabel 4-16). Luas daerah irigasi yang tidak dapat diari oleh ketersediaan air pada sistem daerah irigasi waduk Kedung ombo adalah rerata seluas 23.093,47 ha/tahun.

Hal ini mengindikasikan bahwa ketersediaan air pada sistem daerah irigasi waduk Kedung Ombo tidak dapat memenuhi semua kebutuhan air potensi daerah irigasi seluas 70.919 ha. Kebutuhan air irigasi hanya dapat dipenuhi dengan luas daerah irigasi sebesar 47.825,53 ha/tahun untuk kondisi pada tahun kering sekali dari potensi luas daerah irigasi 70.919 ha. Sementara untuk kebutuhan air baku di suplesi sebesar 15,94 juta m³/bulan. (detail lihat Tabel 4-25)

Output energi hasil optimasi dihitung berdasarkan debit air yang keluar melalui katup turbin dan volume air di waduk. Volume air waduk dikonversikan ke dalam elevasi berdasarkan persamaan 4-1 dan 4-2 dan *output* energi dihitung berdasarkan persamaan 4-5 s/d 4-9. Dari perhitungan tersebut diperoleh *output* energi hasil optimasi pada tahun kering rerata sebesar 2.189,41 GWh/bulan atau sebesar 26.272,98 GWh/tahun.

Tabel 4-25 Kebutuhan yang mampu dipenuhi oleh ketersediaan air waduk Kedung Ombo pada kondisi tahun kering sekali

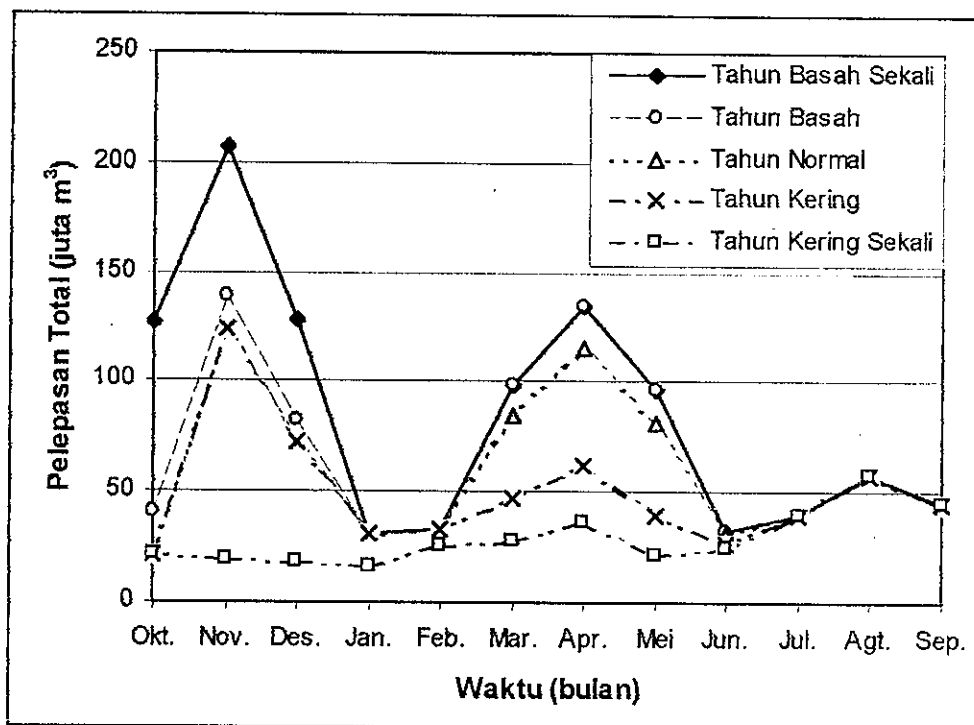
Bulan	Pelepasan air dari waduk					Output Energi GWh
	Daerah Irigasi			Air Baku	Total	
	juta m ³	Golongan I (ha)	Golongan II (ha)	juta m ³	juta m ³	
Okt.	5,10	373,85	33.534,00	15,94	21,04	1.290,00
Nov.	3,32	373,85	259,35	15,94	19,26	1.181,24
Des.	2,02	373,85	259,35	15,94	17,96	1.220,75
Jan.	0,19	373,85	259,35	15,94	16,13	1.179,05
Feb.	10,00	15.566,82	259,35	15,94	25,94	2.086,09
Mar.	12,33	15.566,82	335,28	15,94	28,27	2.387,59
Apr.	20,33	15.566,82	335,28	15,94	36,27	3.062,35
Mei	5,55	15.566,82	335,28	15,94	21,49	1.807,26
Jun.	8,95	18.672,71	335,28	15,94	24,89	2.043,21
Jul.	23,27	18.672,71	33.534,00	15,94	39,21	3.063,15
Agt.	41,46	18.672,71	33.534,00	15,94	57,40	4.071,15
Sep.	28,92	18.672,71	33.534,00	15,94	44,86	2.881,14

4.5. Pola Pengoperasian Studi Optimasi

Rencana pola pengoperasian pelepasan air waduk untuk ke lima kondisi debit *inflow* waduk dapat dilihat pada Tabel 4-26 dan Gambar 4-8. Pelepasan rencana diperoleh dari hasil optimasi waduk di mana elevasi awal pengoperasian waduk sama dengan elevasi akhir pengoperasian waduk dalam satu tahun.

Tabel 4-26 Elevasi dan pelepasan pengoperasian waduk hasil optimasi program linier (pola pengoperasian)

Bulan	Tahun Basah Sekali		Tahun Basah		Tahun Normal		Tahun Kering		Tahun Kering Sekali	
	Elevasi	Pelepasan	Elevasi	Pelepasan	Elevasi	Pelepasan	Elevasi	Pelepasan	Elevasi	Pelepasan
	m	Juta m ³	m	Juta m ³	m	Juta m ³	m	Juta m ³	m	Juta m ³
Okt.	85,38	127,51	84,56	40,62	70,47	21,04	71,96	21,04	64,82	21,04
Nov.	81,30	207,41	82,36	139,22	64,82	123,87	65,45	123,87	64,84	19,26
Des.	81,45	128,15	83,68	82,42	67,46	72,13	64,82	72,13	67,78	17,96
Jan.	85,12	31,47	87,05	31,47	72,83	31,47	71,74	31,47	70,07	16,13
Feb.	88,67	33,27	89,54	33,27	78,18	33,27	75,81	33,27	73,30	25,94
Mar.	90,03	98,49	90,03	98,49	79,52	84,76	78,21	46,51	75,09	28,27
Apr.	89,82	134,20	88,89	134,20	78,50	115,18	77,88	62,18	75,08	36,27
Mei	89,51	96,46	87,97	96,46	76,95	81,50	78,13	39,79	74,94	21,49
Jun.	89,33	32,17	87,79	32,17	76,52	30,70	77,71	26,60	74,05	24,89
Jul.	89,20	39,21	87,32	39,21	75,22	39,21	76,57	39,21	72,29	39,21
Agt.	88,41	57,40	85,98	57,40	72,77	57,40	74,20	57,40	69,10	57,40
Sep.	87,71	44,86	85,14	44,86	70,55	44,86	72,41	44,86	66,12	44,86

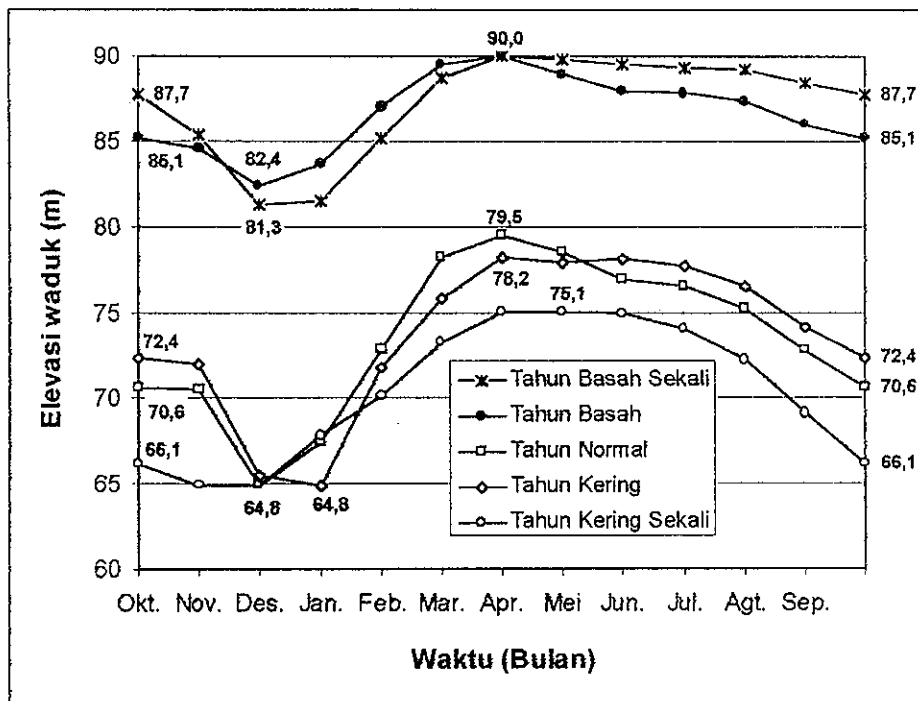


Gambar 4-8 Pola pengoperasian pelepasan hasil studi optimasi waduk Kedung Ombo

4.5.1 Fluktuasi Muka Air Waduk

Rule curve yang diperoleh dari hasil optimasi (Gambar 4-9) menunjukkan periode muka air waduk naik (pengisian) untuk Tahun Basah Sekali, Tahun Basah, Tahun Normal dan Tahun Kering Sekali mulai dari awal bulan Desember sampai dengan awal bulan april tahun berikutnya. Sedangkan untuk Tahun Kering periode muka air waduk naik (pengisian) mulai dari akhir bulan Desember sampai dengan awal bulan april tahun berikutnya.

Sedangkan untuk periode muka air waduk surut (pengosongan) untuk Tahun Basah Sekali, Tahun Basah, Tahun Normal dan Tahun Kering Sekali mulai dari awal bulan Mei sampai dengan awal bulan November. Sedangkan untuk Tahun Kering mulai dari awal bulan mei sampai dengan akhir bulan November.



Gambar 4-9 *Rule curve* studi optimasi pengoperasian waduk Kedung Ombo

Aturan dalam pengoperasian waduk untuk periode muka air waduk naik (pengisian waduk) dilakukan sebagai berikut:

1. Kondisi Tahun Kering Sekali, Kondisi pengoperasian pada akhir periode muka air waduk naik (pengisian waduk) diusahakan dan dilakukan pengaturan pelepasan air waduk sehingga dapat dicapai elevasi muka air waduk maksimum pada EL. 75,1 m.
2. Kondisi Tahun Kering, Kondisi pengoperasian pada akhir periode muka air waduk naik (pengisian waduk) diusahakan dan dilakukan pengaturan pelepasan air waduk sehingga dapat dicapai elevasi muka air waduk maksimum pada EL. 78,2 m.

3. Kondisi Tahun Normal, Kondisi pengoperasian pada akhir periode muka air waduk naik (pengisian waduk) diusahakan dan dilakukan pengaturan pelepasan air waduk sehingga dapat dicapai elevasi muka air waduk maksimum pada EL.79,5 m.
4. Kondisi Tahun Basah, Kondisi pengoperasian pada akhir periode muka air waduk naik (pengisian waduk) diusahakan dan dilakukan pengaturan pelepasan air waduk sehingga dapat dicapai elevasi muka air waduk maksimum pada EL.90,0 m.
5. Kondisi Tahun Basah Sekali, Kondisi pengoperasian pada akhir periode muka air waduk naik (pengisian waduk) diusahakan dan dilakukan pengaturan pelepasan air waduk sehingga dapat dicapai elevasi muka air waduk maksimum pada EL.90,0 m.

Aturan dalam pengoperasian waduk untuk periode muka air waduk surut (pengosongan waduk) dilakukan sebagai berikut:

1. Kondisi Tahun Kering Sekali, Kondisi pengoperasian pada akhir periode pengosongan waduk diusahakan dan dilakukan pengaturan pelepasan air waduk sehingga dapat dicapai elevasi muka air waduk minimum pada EL.64,8 m.
2. Kondisi Tahun Kering, Kondisi pengoperasian pada akhir periode pengosongan waduk diusahakan dan dilakukan pengaturan pelepasan air waduk sehingga dapat dicapai elevasi muka air waduk minimum pada EL.64,8 m.
3. Kondisi Tahun Normal, Kondisi pengoperasian pada akhir periode pengosongan waduk diusahakan dan dilakukan pengaturan pelepasan air waduk sehingga dapat dicapai elevasi muka air waduk minimum pada EL.64,8 m.
4. Kondisi Tahun Basah, Kondisi pengoperasian pada akhir periode pengosongan waduk naik diusahakan dan dilakukan pengaturan pelepasan air waduk sehingga dapat dicapai elevasi muka air waduk minimum pada EL.82,4 m.
5. Kondisi Tahun Basah Sekali, Kondisi pengoperasian pada akhir periode pengosongan waduk diusahakan dan dilakukan pengaturan pelepasan air waduk sehingga dapat dicapai elevasi muka air waduk minimum pada EL.81,3 m.

4.5.2 Aplikasi Rule Curve

Tata cara pelepasan air waduk Kedung Ombo jika studi ini diterapkan maka pedoman pengoperasian waduk harus berdasarkan *rule curve* rencana studi optimasi (lihat Gambar 4-8). Tapi pada kenyataannya elevasi muka air waduk tidak akan pasti sama kondisinya dengan *rule curve* rencana studi optimasi sehingga harus diupayakan pengaturan menuju ke elevasi muka air waduk rencana (*rule curve* rencana studi optimasi).

Jadi jika elevasi muka air waduk berada di bawah elevasi rencana maka rencana pelepasan harus diperkecil dengan nilai tertentu sampai diperoleh elevasi muka air waduk kenyataan sama dengan elevasi muka air waduk rencana. Tetapi jika elevasi muka air waduk berada diatas muka air waduk rencana maka rencana pelepasan boleh diperbesar dengan nilai tertentu sampai elevasi muka air waduk kenyataan sama dengan elevasi muka air waduk rencana.

4.6. Simulasi Pengoperasian Waduk Target Optimasi

Simulasi digunakan untuk menguji ketersediaan air di waduk Kedung Ombo, untuk memenuhi kebutuhan yang ditargetkan oleh optimasi program linier. Simulasi didasarkan pada hukum kesetimbangan air waduk persamaan 2-44.

Simulasi pengoperasian waduk Kedung Ombo dilakukan dengan periode waktu bulanan. Simulasi dipergunakan data debit historis yang tersedia sepanjang 46 tahun (1953-1998) (Lihat Lampiran 6). Batasan-batasan yang dipergunakan dalam perhitungan simulasi waduk sebagai berikut :

1. Awal pengoperasian pada bulan oktober, sesuai dengan pola tanam di daerah irigasi (padi-padi-palawija).
2. Kondisi tampungan di awal pengoperasian dengan *trial and error* untuk meminimalkan limpasan.
3. Pelepasan air waduk merupakan fungsi dari volume, luasan dan elevasi waduk. Hubungan volume antara elevasi dan volume antara luas genangan dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut (hasil rumusan dari tabel kurva karakteristik, Tabel 4-27).

- Volume tampungan (S) dan Elevasi (H)

untuk tampungan (S) $\leq 127,28$ juta m^3

$$H (m) = 40 + 0,94 \times S - 1,8 \times 10^{-2} \times S^2 + 1,7 \times 10^{-4} \times S^3 - 5,74 \times 10^{-7} \times S^4 \quad 4-1$$

untuk S > 127,28 juta m^3

$$H (m) = 59,324 + 8,23 \times S - 9,38 \times 10^{-5} \times S^2 + 6,63 \times 10^{-8} \times S^3 - 1,95 \times 10^{-11} \times S^4 \quad 4-2$$

- Volume tampungan (S) & Luas genangan (A)

untuk tampungan (S) $\leq 127,28$ juta m^3

$$A (km^2) = 0,33 + 0,257 \times S - 5,07 \times 10^{-3} \times S^2 + 5,7 \times 10^{-5} \times S^3 - 2,135 \times 10^{-7} \times S^4 \quad 4-3$$

untuk $S > 127,28 \text{ juta m}^3$

$$A \text{ (km}^2\text{)} = 8,738 + 3,2 \times 10^{-2} \times S + 9,2 \times 10^{-5} \times S^2 - 1,36 \times 10^{-7} \times S^3 + 6,5 \times 10^{-11} \times S^4 \quad 4-4$$

4. Waduk dapat dioperasikan dengan elevasi tidak kurang dari +64,5 m, jika elevasi berada di bawah +64,5 m akibat dari pelepasan waduk, maka pelepasan waduk dikurangi. Jika elevasi melebihi +90 m, maka air waduk melimpas.
5. Distribusi pelepasan kebutuhan air irigasi, air baku dan air PLTA ada beberapa aturan yaitu :

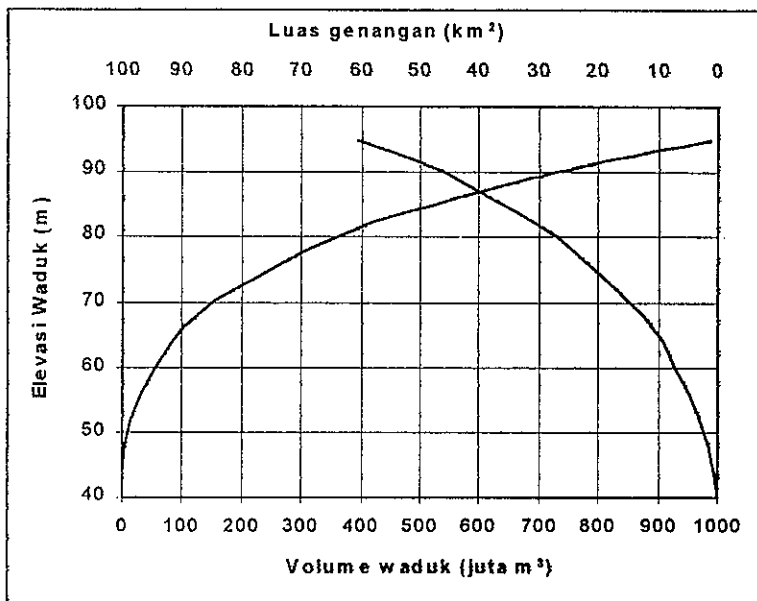
Kebutuhan irigasi dapat dipenuhi melalui 2 pelepasan (*outlet*). Pertama melalui pelepasan air untuk PLTA dan ke dua melalui katup irigasi. Katup irigasi dioperasikan jika dari pelepasan yang pertama tidak cukup, dengan persyaratan elevasi waduk tidak boleh kurang dari +67,5 m. Kebutuhan PLTA dan Air Baku dipenuhi jika elevasi waduk tidak kurang dari +64,5 m. Air yang tersisa dimanfaatkan untuk irigasi.

Evaporasi (penguapan) merupakan fungsi dari tampungan dan luas genangan air waduk. Data ketinggian *evaporasi* rerata DPS waduk Kedung Ombo dipergunakan dari Tabel 4-7, *evaporasi* dijadikan dari mm/hari ke juta m/bulan. Volume *evaporasi* bulanan waduk diperoleh dengan mengalikannya dengan luas genangan air awal pengoperasian waduk dan ketinggian *evaporasi*.

Tabel 4-27 Kurva karakteristik waduk Kedung Ombo

Volume Waduk (juta m ³)	Luas Genangan (km ²)	Elevasi (m)
0,00	0,00	40
0,98	0,58	44
5,06	1,55	48
13,96	3,09	52
29,64	4,84	56
53,24	7,15	60
83,64	9,35	64
127,28	12,57	68
186,26	17,02	72
264,20	21,85	76
361,68	26,88	80
483,32	34,04	84
635,16	41,97	88
723,16	46,03	90
820,08	50,90	92
986,06	60,40	95

Sumber : SMEC-Indah Karya, 1985



Sumber: SMEC-Indah Karya, P.T, 1985

Gambar 4-10 Kurva lengkung kapasitas waduk Kedung Ombo (*original*)

Daya listrik (kW) merupakan fungsi dari elevasi. Parameter-parameter pembangkit tenaga listrik dijelaskan sebagai berikut (Indra Karya, 1993):

1. Kapasitas Turbin

Kapasitas turbin maksimum 61,8 m³/detik, kapasitas turbin tersebut dihitung berdasarkan elevasi minimum nominal (*rated elevation*) elevasi +81,6 m. Rumus yang digunakan sebagai berikut:

- Di bawah elevasi +81,6 m:

$$Q = 18,4 \times (EMAW - 52,5)^{0,36} \tag{4-5}$$

- Di atas elevasi +81,6 m:

$$Q = - 1,49 \times (EMAW - 123,1) \tag{4-6}$$

di mana :

Q = debit pembangkitan untuk PLTA (m³/detik)

EMAW = elevasi muka air waduk (m)

- Elevasi muka air di hilir stasiun pembangkit energi listrik (*tailwater*)

$$TWL = 101,57 \times (Q - 4,5)^{0,00718} \tag{4-7}$$

di mana :

TWL = tail water elevation (m)

Q = debit pembangkitan untuk PLTA ($m^3/detik$)

- Tinggi jatuh efektif (*rated net head*)

Tinggi jatuh efektif di hitung berdasarkan elevasi muka air waduk dikurangi dengan elevasi TWL dan kehilangan energi akibat pemasukan, kekasaran pipa pesat, sistem pembangkit dan kehilangan pada bagian keluaran. Persamaan tinggi jatuh efektif dituliskan sebagai berikut:

$$H_{eff} = EMWA - TWL - H_L \quad 4-8$$

di mana :

H_L = $3,9 \times 10^{-4} \times Q^2$, kehilangan tinggi tekan (m)

H_{eff} = tinggi jatuh efektif (m)

EMWA = elevasi muka air waduk (m)

TWL = tail water elevation (m)

- Daya pembangkit energi listrik

$$P = \eta \times g \times Q \times H_{eff} \quad 4-9$$

di mana :

P = daya (kW)

Q = debit ($m^3/detik$)

g = percepatan gravitasi ($9,81 m/detik^2$)

η = efisiensi turbin diambil 87% (data proyek)

H_{eff} = tinggi jatuh efektif (m)

Dengan munculnya kondisi simulasi hasil optimasi, maka semua indikator unjuk kerja waduk Kedung Ombo yaitu: keandalan (*reliability*), kelentingan (*resiliency*), dan kerawanan (*vulnerability*) dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Keandalan (*reliability*)

Memperhatikan definisi keandalan yang pertama, di mana waduk dianggap gagal jika waduk tidak dapat mensuplai kebutuhannya secara total. Hasil simulasi dengan total bulan pengoperasian (n) = 552 bulan dan total bulan dalam keadaan sukses ($\sum Z_t$) = 550 bulan. Sehingga,

$$\alpha_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Z_t = \frac{550}{552} = 0,9964 \text{ (keandalan waduk 99,64\%)}$$

atau dapat dikatakan waduk dalam beroperasi selama 46 tahun (552 bulan) pernah mengalami kegagalan untuk memenuhi kebutuhan yaitu kebutuhan yang dipersyaratkan oleh pola pengoperasian optimasi program linier. Namun menurut Linsley dan Franzini, 1989, kegagalan suplesi air untuk kebutuhan daerah irigasi dapat ditoleransi sampai dengan 20% dari total kebutuhan yang ditargetkan.

2. Kelentingan (*resiliency*)

Kelentingan merupakan indikator unjuk kerja waduk untuk mengukur kemampuan waduk dari masa transisi dari keadaan gagal menjadi memuaskan atau sebaliknya. Hasil simulasi selama 46 tahun diperoleh frekwensi terjadi masa transisi dari sukses ke gagal atau sebaliknya ($\sum W_t$) = 1 peristiwa, dan total bulan terjadi kegagalan tersebut ($\sum (1-Z_t)$) = 2 bulan. Jangka waktu rerata waduk dalam keadaan gagal (T_{gagal}) adalah :

$$T_{gagal} = \frac{\sum_{t=1}^n (1-Z_t)}{\sum_{t=1}^n W_t} = \frac{2}{1} = 2$$

atau dengan kata lain, jika waduk mengalami kegagalan maka diperlukan waktu 2 bulan untuk kembali pada keadaan memuaskan.

Kelentingan waduk adalah :

$$\gamma_t = \frac{1}{T_{gagal}} = \frac{1}{2} = 0,5$$

Semakin besar kelentingan maka semakin cepat waduk menjadi kondisi tidak gagal atau sukses.

3. Kerawanan (*vulnerability*)

Tingkat kerawanan “kegagalan” di ukur dari seberapa besar terjadinya kekurangan (*deficit*). Unjuk kerja kerawanan mempunyai beberapa penafsiran yaitu : nilai rerata defisit rasio, nilai maksimum defisit rasio dan nilai maksimum defisit.

□ Nilai rerata *deficit* rasio (v_1)

Merupakan nilai rerata persentase kekurangan di mana terjadi kegagalan pada bulan-bulan tertentu.

nilai rerata *deficit ratio* adalah :

$$v_1 = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{DEF_t}{D_t}}{\sum_{t=1}^n W_t} = \frac{0,694}{1} = 0,694$$

Nilai 0,694 memberikan indikasi bahwa, jika terjadi kegagalan maka 69,4% dari kebutuhan tidak dapat dipenuhi dengan rerata defisit sebesar 66,55 juta m³/bulan setiap kejadian gagal.

- Nilai maksimum *deficit ratio* (v_2)

Merupakan nilai maksimum dari persentase kekurangan di mana terjadi kegagalan pada bulan-bulan tertentu, di dapat sebagai berikut :

$$v_2 = \max_t \left\{ \frac{DEF_t}{D_t} \right\} = 0,558 \text{ (tidak dapat ditoleransi)}$$

dalam hal ini waduk tidak dapat memenuhi kebutuhan 55,8% pada kejadian gagal pada bulan tertentu.

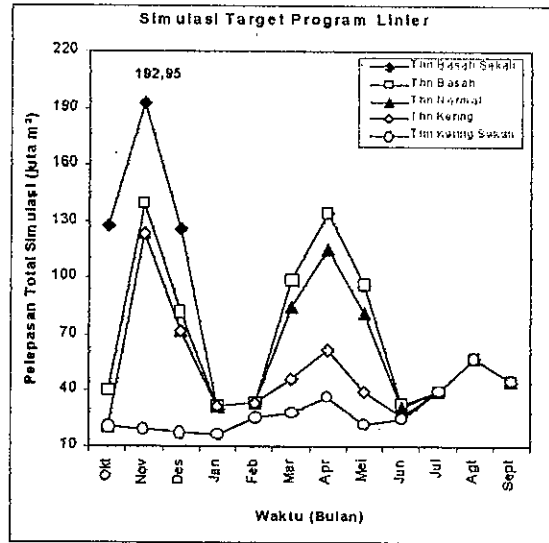
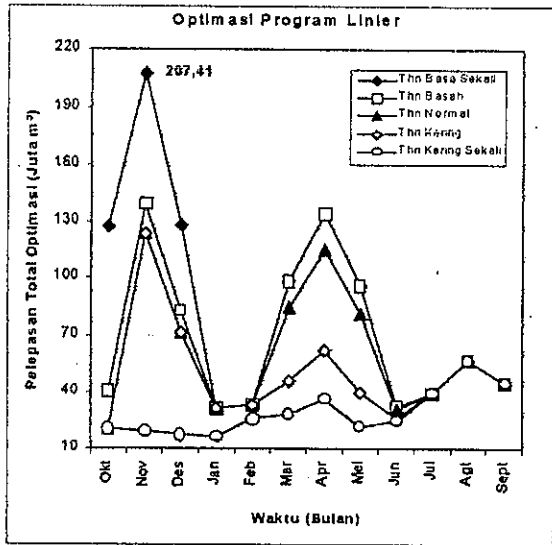
- Nilai maksimum *deficit* (v_3)

Merupakan nilai maksimum kekurangan yang terjadi kegagalan pada bulan tertentu, di dapat sebagai berikut :

$$v_3 = \max_t \{DEF_t\} = 115,68 \text{ juta m}^3, \text{ dari total kebutuhan bulan defisit } 207,41 \text{ juta m}^3.$$

Tabel 4-28 Indikator unjuk kerja simulasi operasi waduk

Keandalan (<i>reliability</i>)	Rerata kondisi gagal	Kelentingan (<i>resiliency</i>)	Kerawanan (<i>vulnerability</i>)		
			α_1	T_{gagal}	γ_1
99,64%	2	0,5	0,694	0,558	115,68



a. Hasil Optimasi

b. Hasil Simulasi

Gambar 4-11 Grafik pelepasan total optimasi program linier dan simulai pengoperasian waduk target program linier

Simulasi pola pengoperasian optimasi program linier selama 46 tahun memberikan indikasi bahwa waduk dapat beroperasi sepanjang tahun dengan keandalan 99,64%. Gambar 4-11 “point a” menunjukkan kondisi pelepasan hasil optimasi dan “point b” menunjukkan hasil simulasi jika kondisi pelepasan hasil optimasi (point a) diimplementasikan.

4.7. Simulasi Pengoperasian Waduk Studi Indra Karya

Data hasil studi Indra Karya diperoleh rerata kebutuhan bulanan yang harus disuplesi dari waduk Kedung Ombo setelah memperhitungkan ketersediaan air Sungai lanang, Sungai Lusi dan aliran lateral. Pelepasan bulanan merupakan hasil studi simulasi pengoperasian waduk Kedung Ombo oleh Indra Karya seperti yang ditampilkan pada Tabel 4-29.

Hasil studi Indra Karya pada kondisi debit inflow Tahun Basah dapat mengairi luas daerah irigasi rerata 41.040,27 ha/tahun dengan debit air yang tersedia 929,26 juta m³/tahun, Tahun Normal rerata 33.180,79 ha/tahun dengan debit air yang tersedia 835,51 juta m³/tahun, Tahun Cukup rerata 24.284,95 ha/tahun dengan debit air yang tersedia 679,70 juta m³/tahun dan Tahun Kering rerata 14.164,42 ha/tahun dengan debit air yang tersedia 393,77 juta m³/tahun.

Untuk kebutuhan air baku sebesar 15,94 juta m³/bulan dari hasil analisis studi Indra Karya dapat terpenuhi sepanjang tahun. Dan produksi energi tahunan pemanfaatan air

yang dilepaskan melalui katup turbin dari hasil studi Indra Karya rerata sebesar 65,76 GWh.

Tabel 4-29 Pelepasan total (irigasi dan air baku) hasil simulasi pengoperasian waduk Kedung Ombo studi Indra Karya

Bulan	Debit (juta m ³)			
	Basah	Normal	Rendah	Kering
Okt.	146,77	130,81	68,33	36,22
Nov.	222,50	197,30	98,66	47,96
Des.	138,27	123,34	64,93	34,90
Jan.	31,46	29,57	22,16	18,35
Feb.	24,67	24,69	30,20	20,19
Mar.	57,50	57,61	83,87	36,17
Apr.	75,48	75,64	113,25	44,92
Mei	56,48	56,59	82,20	35,67
Jun.	32,54	27,20	23,67	24,16
Jul.	39,74	32,08	27,03	27,72
Agt.	58,34	44,69	35,69	36,93
Sept.	45,52	35,99	29,72	30,58
Total	929,26	835,51	679,70	393,77

Sumber: Indra Karya, 1993

4.8. Simulasi Pengoperasian Waduk Aktual (lapangan)

Analisis simulasi dilakukan dengan masukan data debit *outflow* pengoperasian aktual (lapangan) sepanjang 9 tahun sesuai dengan data debit *inflow* 9 tahun terakhir (1990-1998) yang tersedia. Proses simulasi aktual ini dianalisis dengan asumsi target kebutuhan yang diperoleh dari hasil optimasi.

Tabel 4-30 Data debit *outflow* aktual pengoperasian waduk Kedung Ombo

Tahun	Bulan												Total
	Okt.	Nov.	Des.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mei	Jun.	Jul.	Agt.	Sept.	
	juta m ³												
1990	35,24	49,43	45,87	29,94	26,68	15,03	18,66	23,82	33,61	60,34	39,50	25,92	404,04
1991	83,70	85,96	43,82	85,96	51,78	12,96	0,00	48,99	99,36	148,83	53,56	0,00	714,92
1992	100,22	103,68	46,05	30,53	15,98	31,60	45,79	97,59	64,42	128,85	36,29	0,00	701,00
1993	88,89	88,98	35,52	27,76	76,55	129,02	0,00	0,00	0,00	0,00	19,34	2,16	468,22
1994	93,60	121,95	45,24	25,89	10,37	25,66	64,45	98,92	87,69	94,87	24,81	5,70	699,15
1995	93,74	73,22	130,74	13,31	13,31	18,39	44,15	75,34	42,42	31,18	33,81	5,61	575,22
1996	104,66	45,14	21,77	118,92	44,98	67,08	79,26	110,99	68,47	39,22	4,68	72,58	777,75
1997	136,08	98,26	28,12	14,26	13,21	30,00	46,23	64,80	48,38	53,84	4,25	86,79	624,22
1998	155,52	150,34	94,28	7,27	2,85	3,85	6,52	43,13	37,80	98,78	40,84	135,21	776,39
1999	140,84	68,04	54,00	27,89	116,64	180,14	133,70	106,27	46,22	51,84	2,16	101,09	1028,83

Sumber: PWS Jratunseluna, 2000

Hal ini dilakukan untuk mengecek kebenaran informasi yang diperoleh bahwa waduk mampu untuk melepaskan debit seperti pada Tabel 4-30, dengan elevasi waduk awal

pengoperasian 81,50 m atau setara dengan volume $\pm 405,46$ juta m^3 sesuai dengan *rule curve* (berdasarkan informasi O & P Waduk Kedung Ombo, 2000).

Hasil simulasi pengoperasian aktual diperoleh bahwa waduk tidak pernah mengalami kegagalan selama 9 tahun operasi, dengan debit *outflow* seperti pada Tabel 4-30. Artinya debit *inflow* waduk mampu untuk mengimbangi debit *outflow* dari pengoperasian waduk. Sementara hasil dari simulasi pengoperasian *outflow* aktual tidak dapat mencapai target 70 GWh tapi hanya sebesar 68,56 GWh.

Jika air waduk yang dilepaskan ditargetkan untuk memenuhi kebutuhan irigasi, air baku dan PLTA maka nilai ekonomi (rupiah) dari analisis simulasi pengoperasian waduk aktual diperoleh pendapatan dari irigasi rerata Rp 13,18 miliar setiap tahunnya. Air Baku pada pengoperasian aktual memperoleh pendapatan rerata sebesar Rp 14,25 miliar setiap tahunnya dan PLTA diperoleh pendapatan rerata sebesar Rp 1,72 miliar.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil studi ini dapat disimpulkan beberapa hal yaitu:

1. Hasil dari optimasi program linier menunjukkan tidak semua kebutuhan daerah irigasi dapat dipenuhi, di mana luas daerah irigasi yang tidak dapat dipenuhi rerata setiap musim tanam pada Tahun basah sekali 2.010,13 ha, Tahun Basah 8.180,65 ha, Tahun Normal 11.506,79 ha, Tahun Kering 16.574,60 ha dan Tahun Kering Sekali 23.093,47 ha. Sedangkan untuk kebutuhan air baku dapat dipenuhi setiap bulannya sebesar 15,94 juta m³.
2. Pendapatan total maksimal (irigasi, air baku dan PLTA) yang diperoleh dari pemanfaatan air waduk untuk Tahun Basah Sekali Rp 468,48 miliar/tahun, Tahun Basah Rp 432,75 miliar/tahun, Tahun Normal Rp 315,47 miliar/tahun, Tahun Kering Rp 306,58/tahun miliar, dan Tahun Kering Sekali Rp 284,57 miliar/tahun.
3. Simulasi dapat dipergunakan untuk mengetahui unjuk kerja pengoperasian waduk hasil optimasi program linier sebagai pedoman pengoperasian waduk, dimana diperoleh keandalan waduk hasil simulasi pengoperasian waduk sebesar 99,64%.

5.2. Saran

Pengembangan model dalam studi ini disarankan beberapa hal :

1. Studi ini banyak menyederhanakan fenomena alam, sehingga mengurangi realita kondisi sebenarnya. Seperti periode pengoperasian diasumsikan bulan, hal ini dapat dilakukan dengan periode 15 harian atau lebih pendek.
2. Fungsi tujuan optimasi program linier dapat dikembangkan selain untuk irigasi, air baku dan PLTA, misalnya untuk pengendalian banjir dihilir waduk, menghambat intrusi air laut di muara sungai.
3. Fungsi kendala optimasi program linier dapat diperluas dengan memasukkan fenomena alam yang lebih kompleks diantara dengan memperhitungkan pengurangan kapasitas tampungan waduk karena endapan sedimen (Budihardja, 1992); dapat juga ditinjau secara multiobjective misalnya sosial, lingkungan, ekonomi maupun sebagai pengendali banjir.

DAFTAR PUSTAKA

1. Arismunandar A., dan Kuwahara S., 1991. Teknik Listrik (Jilid I: Pembangkit dengan Tenaga Air), PT. Pradnya Paramita, Jakarta 168p.
2. Asri, M., dan Widayat, M., 1984. Linier Programming. Edisi Revisi, Badan Penerbit Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 127p.
3. Badan Penerbit Pekerjaan Umum (BPPU), 1985. Pedoman Kebutuhan Air untuk Tanaman Padi dan Tanaman Lain, Yayasan Badan Penerbit Pekerjaan Umum, Jakarta, 93p.
4. Budihardja, D., 1992. "Pengurangan Kapasitas Tampung Waduk Karena Endapan Sedimen", Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pengairan, No. 25 TH. 7 – KW III, pp. 65-71.
5. Buras, N., 1975. Scientific Allocation of Water Resources, Edisi ke dua, American Elsevier Publishing Company, Inc, New York, 398p.
6. de Neufville, R., 1990. Applied Systems Analysis Engineering Planning and Technology Management, McGraw-Hill Publishing Company, USA, 470p.
7. Garg, S. K., 1982. Water Resources and Hydrology, Khanna Publishers, 2-B, Nath Market, Nai Sarak, Delhi, 489p.
8. Gottfried, B. S., 1998. Spreadsheet Tools For Engineers, McGraw-Hill, International Book Company, USA, 373p.
9. Guibert, J.A., Jhonson, S.A., dan Stedinger, J.R., 1993. "Comparison of Two Approaches for Implementing Multireservoir Operating Policies Derived Using Stochastic Dynamic Programming", Water Resources Research, Vol. 29, No. 12, pp. 3969-3980.
10. Haimes, Y.Y., 1977. Hierarchical Analysis of Water Resources System, McGraw-Hill, International Book Company, USA, 478p.
11. Hall, W. A., dan Dracup J. A., 1975. Water Resources System Engineering, Tata McGraw Hill Publishing Company, USA, 372p.
12. Hiller, F. S., dan Lieberman, G. J., 1990. Pengantar Riset Operasi (Introduction To Operations Research), Edisi Bahasa Indonesia, Penerbit Erlangga, Jakarta, 605p.
13. Hoff, J. C., 1983. A Practical Guide to BOX-JENKINS Forecasting, Wadsworth, Inc, USA, 316p.

14. Houck, M. H., Cohon, J. L., dan Reville, C., 1980. "Linier Decision Rule in Reservoir Design and Management", Water Resources Research, Vol. 16, No. 1, pp. 196-200.
15. Huang, W. C., 1997. "Decision Support for Reservoir Operation", Water Resources Bulletin, Vol. 32, No. 6, pp. 1221-1231.
16. Indra Karya, 1993. Pekerjaan Studi Sistem Operasi Waduk Kedung Ombo dan Manual Pengoperasian, Laporan Akhir, Indra Karya, P.T., Semarang, 168p.
17. Indah Karya, 1995. Perencanaan Pola Tata Air Satuan Wilayah Sungai Jratunseluna, Laporan Penunjang, Indah Karya, P. T., Semarang, 83p.
18. Joeres, E. F., Seus, G. J., dan Engelmann, H. M., 1981. "The linier Decision Rule (LDR) Reservoir Problem with Correlated *Inflows*", Water Resources Research, Vol. 17, No. 1, pp. 18-24.
19. Linsley, R., K., dan Franzini, J., B., 1989. Teknik Sumber Daya Air, Penerbit Erlangga, Jakarta, 323p.
20. Loucks, D. P., dan Dorfman, P., 1975. "An Evaluation of Some Linier Decision Rules in Chance Constrained Model for Reservoir Planning and Operation". Water Resources Research, Vol. 11, No. 6, pp. 777-782.
21. Loucks, D. P., Stedinger, J. R., dan Haith, D. A., 1981. Water Resources System Planning and Analysis, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 559p.
22. Martsanto, D., 1992. Optimization of Jatiluhur Reservoir System by Using Linier Programming, Master Thesis, Asian Institute of Technology of Bangkok, Bangkok, 135p.
23. McMahon, T. A., dan Mein, R. G., 1978. Reservoir Capacity and Yield, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York, 211p.
24. Morel, H. J., 1978. Engineering Hydrology, Civil Engineering University of Fort Collins, Colorado, 160p.
25. Najoran, Th. F., dan Surjadilaga, R., 1992. "Perilaku Bendungan Kedung Ombo Pada Masa Pengisian Pertama", Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pengairan, No. 23 TH. 7 – KW I, pp. 34-41.
26. Nasendi, B. D., dan Anwar, F., 1985. Program Linier dan Variasinya, Gramedia, Jakarta, 324p.
27. Pantouw, J. P., 1988. Optimasi Potensi Air DAS Sebagai Satu Sistem dengan Program Linier, Tesis S-2, Fakultas Pasca Sarjana UGM, Yogyakarta, 121p.

28. Pasaribu, A., 1975. Pengantar Statistik, Penerbit, Ghalia Indonesia, Jakarta Timur, 542p.
29. PPKSAJ, 2000. "Hasil Pemantauan Data Klimatologi dan Debit Sungai Tahun 1994-1998 di Sub SWS Serang, Lusi, dan Junana", Laporan Hasil Pemantauan, PPKSAJ, Semarang, 198p.
30. Pranoto, S., 1994. "Kombinasi Analisa Program Linier dan Simulasi untuk Optimasi Pemanfaatan Air Daerah Aliran Sungai", Makalah Seminar Kelompok Hidro, Jurusan Sipil, 30 April 1994, UNDIP, Semarang, 31p.
31. Qomariyah, S., 1992. "Analisa Perhitungan Kapasitas Waduk Menggunakan Model Simulasi-Optimasi", Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pengairan, No. 25 TH. 7 – KW III, pp. 61-64.
32. Qomariyah, S., dan Hermono, S. B., 1995. "Analisa Sistem Dalam Perencanaan dan Pengembangan Sumberdaya Air", Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan, PIT XII HATHI 1995-Surabaya, pp. 8-16.
33. Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V., and Lane, W. L., 1980. Applied Modeling of Hydrologic Time Series, Water Resources Publications, USA, 484p.
34. Schleica, J. dan White, D., 1997. "Cost Minimization of Nutrient Reduction in Watershed Management Using Linier Programming", Journal of The American Water Resources Association, Vol. 33, No. 1, pp. 135-141.
35. Seyhan E., 1977. Fundamental of Hydrology, Revised edition, published by Geografisch Instituut der Rijksuniversiteit te Utrecht, Amsterdam, 379p.
36. Simonovic, S.P., dan Burn, D.H., 1989. "An Improved Methodology for Short-Time Operation of a Single Multipurpose Reservoir", Water Resources Research, Vol. 25, No. 1, pp. 1-8.
37. Sistwanto, 1992. Pemrograman Linier Lanjutan, Universitas Atmajaya, Yogyakarta, 316p.
38. SMEC dan Indah Karya, 1985. Review of Dam Design and Preliminary Design of Irrigation Works-Kedung Ombo Dam, Volume 3, Part A-Text, Hydrology and Operation Studies, SMEC dan Indah Karya, Semarang.
39. Soemarto, C. D., 1986. Hidrologi Teknik, Penerbit Pusat Pendidikan Manajemen dan Teknologi Terapan, Malang, 515p.
40. Soewarno, 1995. Aplikasi Metode Statistik untuk Analisa Data, Penerbit NOVA, Bandung. 271p.

41. Sosrodarsono, S., dan Takeda, K., 1987. Hidrologi untuk Pengairan, P. T., Pradnya Paramita, Jakarta, 226p.
42. Subarkah, I., 1980. Hidrologi untuk Perencanaan Bangunan Air, Penerbit Idea Dharma Bandung, Bandung, 239p.
43. Suharyanto, 1997. "Analisis Unjuk Kerja Pengoperasian Waduk", Media Komunikasi Teknik Sipil, Edisi VIII-1997, pp. 51-57.
44. Sujdarwadi, 1987. Dasar-dasar Teknik Irigasi, Biro Penerbit KMTS, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, 201p.
45. Sujdarwadi, 1988. Teknik Sumber Daya Air, Biro Penerbit KMTS, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, 201p.
46. Supranto, J., 1996. Teori dan Aplikasi Statistik, Jilid 2, Penerbit Erlangga, Ciracas, Jakarta, 462p.
47. Venugopal, K., dan Komarudin, I., 1991. "Optimal Allocation of Citårum River Basin System", Environmental Hydraulic, Lee & Cheung (eds), 1991 Balkema, Rotterdam, pp. 1637-1643.
48. Votruba, L., 1988. Analysis of Water Resources System, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo, pp. 217-218.
49. Wijaya, F., dan Anwar, N., 1995. "Analisa Optimasi Pengoperasian Waduk Pacal Menggunakan Programa Linier", Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan HATHI, PIT XII HATHI 1995, Surabaya, pp 319-325.
50. Winston, W. L., 1987. Operations Research: Application and Algorithms, PWS-KENT Publishing Company, Boston, 1025p.
51. Wiratman, dan Associates, 2000. Rencana Pengembangan Sumber Daya Air Wilayah Sungai Jratunseluna, Laporan Akhir, Semarang, 129p.
52. Wurbs, R. A., 1996. Modeling and Analysis of Reservoir System Operation, Prentice-Hall, Inc., United State of America, 356p.