

OPTIMASI POLA OPERASI WADUK MADURAN KABUPATEN LAMONGAN PROVINSI JAWA TIMUR

Renaldi Aditya Rosandi¹, Soepriyono^{2*}, Titien Setiyo Rini³

^{1,2,3} Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Wijaya Kusuma Surabaya

Jl. Dukuh Kupang XXV No.54, Kota Surabaya, 60225, Jawa Timur, Indonesia

E-mail: ¹ renaldiaditya25@gmail.com, ^{2*} soepriyono@uwks.ac.id, ³ titiensetiyorini@uwks.ac.id

(*) Penulis Koresponden

ABSTRAK: Waduk Maduran yang dibangun di Kecamatan Maduran, Kabupaten Lamongan pada tahun 2014 diharapkan bisa mencukupi keperluan air irigasi pada Daerah Irigasi Waduk Maduran. Akan tetapi, terjadi kekurangan tingkat pelayanan akibat tidak adanya pola operasi yang diterapkan. Untuk itu, diperlukan suatu aturan supaya keandalan operasi waduk dapat dioptimalkan dan kebutuhan air pada daerah irigasi dapat terpenuhi. Diantara teknik mengoperasikan waduk guna memperoleh perolehan maksimal ialah melalui penerapan simulasi pola operasi waduk model stokastik melalui pertolongan aplikasi *solver*. Pengimplementasian optimasi model stokastik menghasilkan keandalan debit waduk lebih baik dibanding dengan pola operasi waduk eksisting, sehingga luas lahan yang dapat dilayani mengalami peningkatan, dan intensitas tanam bertambah hingga 93,61% dari yang sebelumnya hanya 1002,63 ha lahan yang dapat dipanen, menjadi 1940,81 ha lahan yang dapat dipanen setelah diterapkannya optimasi, dan evaluasi kinerja menunjukkan bahwasanya waduk dapat mencapai keandalan 100% untuk mencukupi keperluan air irigasi.

KATA KUNCI : Keandalan, Pola Operasi, Waduk

1. PENDAHULUAN

Sumber daya air yang melimpah di Indonesia dan kebutuhan masyarakat akan ketersediaan air menjadi alasan dibangunnya waduk. Awalnya, waduk hanya ditujukan untuk memenuhi kebutuhan irigasi. Namun, seiring berkembangnya laju pertumbuhan masyarakat yang selaras dengan kemajuan perekonomian mendorong adanya peningkatan kebutuhan air untuk sektor lain. Hal tersebut yang mendasari perubahan fungsi bangunan waduk menjadi lebih beragam, misalnya sebagai pembangkit listrik, penyediaan air bersih, maupun pengendalian banjir. (Ardiansyah & Sriyana, 2021)

Perubahan iklim global perlahan memengaruhi siklus hidrologi dan curah hujan dunia termasuk di Indonesia. Akibatnya ketersediaan air tidak menentu, sehingga perlu adanya pemanfaatan sumber daya air yang tersedia untuk kemaslahatan hajat hidup masyarakat. Hal ini dapat dilakukan dengan aplikasi teknologi irigasi seperti pembangunan waduk yang dapat membendung kelebihan air di musim hujan sekaligus menampung air untuk digunakan saat kekeringan pada musim kemarau. (Shiamah, 2020)

Selaras dengan maksud pembangunan nasional, pembangunan sarana perairan dimaksudkan untuk memberikan peningkatan kemakmuran khalayak terlebih dengan sektor irigasi guna memberikan peningkatan produksi pertanian.

Salah satunya melalui pembangunan waduk di daerah yang memerlukan adanya sentuhan pengembangan teknologi bangunan air seperti di Kecamatan Maduran, Kabupaten Lamongan yang masyarakatnya hidup di atas tanah kering sekitar Sub DAS Bengawan Solo Hilir yang melalui Kecamatan Maduran, sehingga masyarakat seringkali terkena dampak kekeringan saat musim kemarau, sementara mayoritas masyarakatnya bergantung sebagai petani yang membutuhkan pasokan air secara konsisten. (Novandi et al, 2019)

Waduk Maduran dibangun dengan struktur tanggul timbunan tanah dan berlokasi di sebelah timur aliran Sungai Sengguling, yang termasuk dalam DAS Bengawan Solo Hilir. Kendala yang dihadapi pada Daerah Irigasi Waduk Maduran ini adalah tidak tercukupinya keperluan air total hingga kerap kali memengaruhi perolehan memanen petani. Sehingga perlu adanya operasional waduk yang sesuai kapabilitas tampungan serta kebutuhan air yang terdapat, hingga maksud pembangunan waduk guna pencukupan keperluan air irigasi dapat tercapai.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Pengumpulan Data

Pendataan yang digunakan guna proses hitung optimasi waduk pada studi ini ialah:

- Data primer

OPTIMASI POLA OPERASI WADUK MADURAN KABUPATEN LAMONGAN PROVINSI JAWA TIMUR

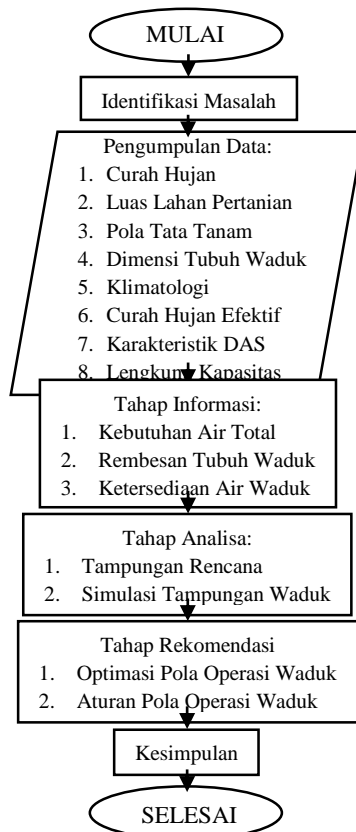
(Renaldi Aditya Rosandi, Soepriyono, Titien Setiyo Rini)

Data didapat dari wawancara langsung kepada ketua kelompok tani terkait ukuran lahan, kategori tumbuhan, jadwal tumbuhan, system penyaluran air, dan permasalahan dalam kegiatan pengolahan tanaman.

- Data sekunder

Data diperoleh melalui jurnal, pengkajian relevan, serta studi literatur yang diantaranya pendataan luas daerah irigasi, pendataan hujan, serta data klimatologi.

2.2. Diagram Alur Penelitian



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

3. ANALISIS DAN PERHITUNGAN

3.1. Analisis Curah Hujan Efektif (Re)

Menggunakan teknik *Basic Year*, dilakukan ranking data curah hujan rerata 10 harian dari nilai tertinggi, dicari curah hujan dengan keandalan 80% untuk padi dan 50% untuk palawija, kemudian menentukan nilai Re.

- $Re \text{ padi} = 0,7 \frac{R_{80}}{n}$
- $Re \text{ palawija} = \frac{R_{50}}{n}$

Dengan n = jumlah hari dalam periode

Tabel 1. Perhitungan Curah Hujan Efektif

Bulan	Periode	Hari	Padi	Palawija
			Re	Re

			(mm/hari)	(mm/hari)
			I	II
Jan	I	10	3,64	12,20
	II	10	2,31	5,20
	III	11	4,01	12,73
Feb	I	10	1,19	9,00
	II	10	2,38	7,70
	III	8	1,84	8,50
Mar	I	10	2,31	6,20
	II	10	0,49	6,30
	III	11	0,83	3,45
Apr	I	10	1,05	6,60
	II	10	0,00	5,60
	III	10	0,63	3,70
Mei	I	10	0,00	4,50
	II	10	0,00	2,50
	III	11	0,32	3,18
Jun	I	10	0,00	1,70
	II	10	0,00	4,80
	III	10	0,00	0,90
Jul	I	10	0,00	1,10
	II	10	0,00	0,40
	III	11	0,00	0,55
Agu	I	10	0,00	0,80
	II	10	0,00	0,00
	III	11	0,00	0,00
Sep	I	10	0,00	0,00
	II	10	0,00	0,00
	III	10	0,00	3,00
Okt	I	10	0,00	0,80
	II	10	0,00	0,50
	III	11	0,00	0,64
Nov	I	10	0,35	6,50
	II	10	0,00	5,20
	III	10	1,05	6,00
Des	I	10	2,03	8,80
	II	10	2,03	9,00
	III	11	4,90	12,73

3.2. Analisis Evapotranspirasi Potensial (ET₀)

Analisis evapotranspirasi potensial dilaksanakan dengan teknik Penman Modifikasi. Pendataan yang dibutuhkan guna proses hitung analisis ini diantaranya:

- Data korelasi suhu rerata (T), angka $e\gamma$, w, serta fungsi suhu f(t)
- Kelembaban relatif (RH)
- Tekanan uap (e_d) dan fungsinya f(e_d)
- Angka angot ($R\gamma$)
- Kecerahan matahari (n/N) dan fungsinya f(n/N)
- Nilai radiasi (R_s)
- Kecepatan angin (u) dan fungsinya f(u)
- Angka koreksi (C)

Dari perhitungan evapotranspirasi potensial selama 12 tahun, didapat hasil rerata ET₀:

Tabel 2. Analisis Evapotranspirasi Potensial

Bulan	Eto (mm/hari)
Januari	4,989
Februari	5,313
Maret	5,823
April	4,503
Mei	4,239
Juni	5,217
Juli	5,569
Agustus	6,893
September	7,856
Oktober	7,306
November	6,144
Desember	5,141

3.3. Kebutuhan Air Penyiapan Lahan

Proses hitung keperluan air guna menyiapkan lahan diambil contoh bulan Januari periode I:

- Evapotranspirasi Potensial (ET_0) = 4,989 mm/hari
- Evaporasi air terbuka (E_0)
 $E_0 = 1,10 \times ET_0$
 $= 1,10 \times 4,989$
 $= 5,488$ mm/hari
- Perkolasi (P) = 2 mm/hari
- Kebutuhan air pengganti (M)
 $M = E_0 + P$
 $= 5,488 + 2$
 $= 7,488$ mm/hari
- Periode waktu pengolahan tanah (T) = 30 hari
- Keperluan air penjemuran (S) = 250 mm
- Konstanta (K)
 $K = M \times (T/S)$
 $= 7,488 (30/250)$
 $= 0,899$
- Keperluan Air Irigasi (IR)
 $IR = M \times \frac{e^k}{(e^k - 1)}$
 $= 7,488 \times \frac{e^{0,899}}{(e^{0,899} - 1)}$
 $= 12,63$ mm/hari

3.4. Pergantian Lapisan Air (WLR)

Menurut Tolak Ukur Perancangan Irigasi, pergantian dilakukan asumsi sebanyak 50 mm serta dilaksanakan sepanjang 30 hari, Jadi, WLR sebanyak:

$$WLR = 50 \text{ mm} / 30 \text{ hari}$$

$$= 1,667 \text{ mm/hari}$$

3.5. Efisiensi Irigasi

Berdasarkan kriteria perencanaan irigasi, ditetapkan efisiensi saluran irigasi dibawah ini:

- Efisiensi saluran primer sejumlah 90%
- Efisiensi saluran sekunder sejumlah 90%
- Efisiensi saluran tersier sejumlah 80%

Sehingga, efisiensi saluran dengan keseluruhan ialah sejumlah 65%.

3.6. Kebutuhan Air Irigasi

Kebutuhan air irigasi direncanakan berdasar pola tata tanam berikut:

- PTT I = padi – padi – palawija
- PTT II = padi – palawija – padi
- PTT III = palawija – padi – padi

Proses hitung kebutuhan air irigasi dilaksanakan melalui penggambaran Kepolaan Tata Tanam selaras pada kategori serta periode waktu tanam diikuti dengan memasukkan data sesuai urutan berikut:

- Menetapkan koefisien tumbuhan selaras waktu usia tumbuhan.
 - Rata-rata koefisien tumbuhan melalui membagi nilai koefisien dengan jumlah koefisien.
 - Menginputkan harga evaporasi potensial rerata melalui perolehan proses hitung rumus Penman Modifikasi.
 - Menghitung Penggunaan Air Konsumtif (PAK) = $C \times ET_0$
 - Perkolasi (P) = 2,00 mm/hari
 - Rasio Luas Tanaman
 - Menjumlah (PAK) + (P)
 - Menghitung Kebutuhan Air Tanaman = Rasio Luas Tanaman ((PAK) + (P))
 - Keperluan air guna LP, didapat dari nilai IR pada proses hitung keperluan air guna melakukan tata kelola lahan.
 - Menghitung kebutuhan Pergantian Lapisan Air (WLR) = 1,67 mm/hari (khusus untuk masa WLR).
 - Rasio luas WLR
 - Menghitung WLR x Rasio Luas WLR
 - Melakukan Proses Hitung Keperluan Air Kotor = Keperluan Air Tanaman + (LP x Rasio Luas LP) + (WLR x Rasio Luas WLR)
 - Masukkan nilai curah hujan efektif selaras pada kepolaan tata tanam yang dihitung.
 - Melakukan perhitungan Rasio Luas Total.
 - Menghitung NFR = (Keperluan Air Kotor – Re) $\frac{10000}{24 \times 60 \times 60}$
 - Masukkan nilai efisiensi saluran = 0,65
 - Menghitung Kebutuhan Air Irigasi di intake (Kebutuhan Air Bersih / Efisiensi Irigasi)
- Dari hasil perhitungan keperluan air irigasi tersebut didapat hasil seperti berikut:

Tabel 3. Kebutuhan Air Irigasi

Bulan	Periode	PTT I	PTT II	PTT III
		(lt/det/ha)	(lt/det/ha)	(lt/det/ha)
Jan	I	0,95	1,81	1,37
	II	0,00	0,00	0,82
	III	0,00	0,00	0,00
Feb	I	1,09	2,18	0,00

OPTIMASI POLA OPERASI WADUK MADURAN KABUPATEN LAMONGAN PROVINSI JAWA TIMUR

(Renaldi Aditya Rosandi, Soepriyono, Titien Setiyo Rini)

	II	1,05	1,98	0,00
	III	0,71	1,59	0,00
Mar	I	0,01	1,22	0,00
	II	0,17	1,41	0,00
	III	0,00	0,00	0,00
Apr	I	1,15	1,15	0,00
	II	1,19	1,19	0,14
	III	0,69	0,69	0,00
Mei	I	1,28	0,89	0,00
	II	1,36	0,22	0,05
	III	1,80	0,00	0,50
Jun	I	1,79	0,00	1,79
	II	1,84	0,00	1,84
	III	1,56	0,03	1,56
Jul	I	1,25	0,00	1,25
	II	1,61	0,04	1,61
	III	1,61	0,43	1,61
Agu	I	1,62	0,24	1,62
	II	1,43	0,51	1,43
	III	1,17	0,24	1,20
Sep	I	1,07	0,64	1,48
	II	0,63	0,55	1,77
	III	0,21	1,84	2,11
Okt	I	0,09	2,16	2,13
	II	0,33	1,88	1,86
	III	0,62	1,66	1,65
Nov	I	1,14	1,98	1,98
	II	1,40	2,20	2,20
	III	1,47	2,32	2,32
Des	I	1,63	2,49	2,49
	II	1,48	2,23	2,23
	III	0,66	1,93	1,93
Jumlah		36,07	37,71	40,94
Minimum		0,00	0,00	0,00
Maksimum		1,84	2,49	2,49
Rata-rata		1,00	1,05	1,14

3.7. Kehilangan Air Waduk Akibat Rembesan

Kehilangan air waduk akibat rembesan dalam bendungan diberikan pengaruh melalui kapabilitas aliran filtrasi. Guna memprediksi besar kapabilitas filtrasi bisa dilaksanakan melalui jaringan trayektori. Dari data dimensi tubuh bendung dapat dilakukan perhitungan seperti berikut:

- $K = 7,8 \times 10^{-7}$ m/det
- $h = 7,00$ m
- $L_1 = 15,75$ m
- $L_2 = 26,25$ m
- $D = L_2 + 0,3L_1$
 $= 26,25 + (0,3 \times 15,75)$
 $= 30,975$ m
- Ketinggian air hilir (y_0)
 $y_0 = \sqrt{(h^2 + d^2)} - d$
 $= \sqrt{(7^2 + 30,975^2)} - 30,975$
 $= 0,78$ m
- Menghitung koordinat garis depresi dengan persamaan:
 $y = \sqrt{2y_0x + y_0^2}$
 $= \sqrt{2(0,78)x + 0,78^2}$
 $y = \sqrt{1,56x + 0,61}$

Dengan cara *trial and error* didapat koordinat garis depresi seperti berikut:

Tabel 4. Koordinat Garis Depresi

y	x
0,00	-0,391
1,00	0,250
2,00	2,173
3,00	5,378
4,00	9,865
5,00	15,635
6,00	22,686
7,00	31,019

Selanjutnya, jaringan trayektori digambar dan dilakukan modifikasi dengan cara berikut:

- Sudut kemiringan hilir 24° , karena kurang dari 30° maka:

$$a = \frac{d}{\cos a} - \sqrt{\left(\frac{d}{\cos a}\right)^2 - \left(\frac{h}{\sin a}\right)^2}$$

$$a = \frac{30,975}{\cos 24} - \sqrt{\left(\frac{30,975}{\cos 24}\right)^2 - \left(\frac{20}{\sin 24}\right)^2}$$

$$a = 9,6$$

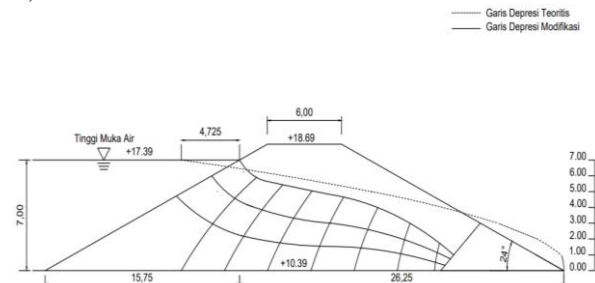
- Menghitung

$$a + \Delta a = \frac{y_0}{1 - \cos a}$$

$$9,6 + \Delta a = \frac{0,78}{1 - \cos 24}$$

$$\text{Maka } \Delta a = 11,107 - 9,6 = 1,507$$

Garis depresi perlu digeser/dimodifikasi sebesar 1,507 m



Gambar 2. Jaringan Trayektori (*Flow Net*)

Dari jaringan trayektori didapatkan data:

$$N_f = 3$$

$$N_p = 7$$

Memprediksi besaran kapabilitas filtrasi menurut trayektori aliran berumus:

$$Q_f = \frac{N_f}{N_p} K.H.L$$

$$= \frac{3}{7} (7,8 \times 10^{-7}) \cdot 7 \cdot 42$$

$$= 9,828 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{det}$$

$$= 8,491 \text{ m}^3/\text{hari}$$

Dengan:

K : Koefisien rembesan tanah isotropis

H : Tinggi permukaan air maksimal

L : Lebar bawah tubuh bendung waduk

3.8. Analisis Debit dengan Metode FJ. Mock

Analisis debit digunakan guna memprediksi besarnya debit sebuah aliran sungai melalui pendataan curah hujan yang ada. Data-data yang diperlukan untuk memperkirakan besar debit diantaranya:

- Data curah hujan
- Data evapotranspirasi potensial
- Persentase lahan tidak tertutup vegetasi (m), diambil 30% (Sinaro, 1987:2)
- SMC diambil sejumlah 140 mm
- Koefisien infiltrasi (i) sebesar 0,9
- Faktor resesi air tanah (k) sebesar 0,9
- IS sejumlah 100 mm
- DPS seluas $A = 174820 \text{ m}^2$

Langkah-langkah perhitungan (data bulan Januari 2021 periode 1):

- Curah hujan (R) 10 harian sebesar 126 mm
- Total hari hujan (n) sepanjang 8 hari
- Memasukkan nilai $ET_0 = 4,9 \text{ mm}$
- Menetapkan selisih antar evapotranspirasi potensial dan evapotranspirasi terbatas:

$$E = ET_0 [(m/20)(18-n)]$$

$$= 4,9 [(0,3/20)(18-8)]$$

$$= 0,735 \text{ mm/hari}$$

$$Et = ET_0 - E$$

$$= 4,9 - 0,735$$

$$= 4,165 \text{ mm/hari}$$
- Menghitung volume air masuk permukaan tanah (D_s)

$$R - Et = 126 - 4,165$$

$$= 121,835 \text{ mm}$$
- Kandungan air tanah = 0,00
- Water Surplus (WS)

$$WS = D_s - \text{Kandungan air tanah}$$

$$= 121,835 - 0,00$$

$$= 121,835 \text{ mm}$$
- Menentukan infiltrasi (I) = $WS \cdot i$

$$I = 121,835 \times 0,90 = 109,652 \text{ mm}$$
- Melakukan perhitungan $[0,5 (1+k) I]$

$$= [0,5 (1+0,9) 109,625] = 104,169 \text{ mm}$$
- Menghitung $[k \cdot V_{(n-1)}]$

$$= [0,9 \cdot 100] = 90 \text{ mm}$$
- Melakukan perhitungan V_n

$$V_n = 90 + 104,169 = 194,169 \text{ mm}$$
- Menghitung selisih volume simpanan sebelumnya (IS) dengan volume simpanan pada periode terkait:

$$V_n' = V_n - V_{(n-1)}$$

$$= 194,169 - 100$$

$$= 94,169 \text{ mm}$$
- Melakukan perhitungan BF

$$BF = I - V_n'$$

$$= 109,625 - 94,169 = 15,483$$
- Menghitung aliran langsung (DR)

$$DR = WS - I$$

$$= 121,835 - 109,625 = 12,184$$

- Menghitung aliran yang terjadi (R)

$$R = BF + DR$$

$$= 15,483 + 12,184 = 27,666$$

- Melakukan perhitungan Q

$$Q = R.A. \frac{1}{\text{hari} \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}$$

$$= 27,666 \cdot 174820 \left(\frac{1}{10 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60} \right)$$

$$= 5,598 \text{ m}^3/\text{detik}$$

3.9. Debit Andalan

Proses hitung debit andalan memakai analisis periode *basic year*. Keandalan debit yang dipakai sejumlah 26,02%, 50,68%, 75,34%, serta 97,30%. Kemudian guna kebutuhan irigasi melalui keandalan 80% pun dilakukan perhitungan. Pendataan yang dipakai ialah perolehan analisis debit melalui teknik FJ. Mock dalam analisis sebelumnya. Prosedur untuk analisis debit andalan metode *basic year* adalah:

- Urutkanlah pendataan debit dari yang kecil ke yang besar
- Hitung angka probabilitas melalui rumus:

$$R_{x\%} = [n / \{100\% / (100\% - x\%)\}] + 1$$

$$R_{97,30} = [n / \{100\% / (100\% - 97,30\%)\}] + 1$$

$$= (12 / 37,037) + 1$$

$$= 1,324 \text{ dibulatkan menjadi } 1$$

$$R_{80} = [n / \{100\% / (100\% - 80\%)\}] + 1$$

$$= (12 / 5) + 1$$

$$= 3,4 \text{ dibulatkan menjadi } 3$$

$$R_{75,34} = [n / \{100\% / (100\% - 75,34\%)\}] + 1$$

$$= (12 / 4,055) + 1$$

$$= 3,96 \text{ dibulatkan menjadi } 3$$

$$R_{50,68} = [n / \{100\% / (100\% - 50,68\%)\}] + 1$$

$$= (12 / 2,028) + 1$$

$$= 6,917 \text{ dibulatkan menjadi } 6$$

$$R_{26,02} = [n / \{100\% / (100\% - 26,02\%)\}] + 1$$

$$= (12 / 1,352) + 1$$

$$= 9,875 \text{ dibulatkan menjadi } 9$$

Tabel 5. Debit Andalan sebagai *Inflow* Waduk

Bulan	Periode	Debit Sungai (m ³ /detik)				
		R97,30	R80	R75,34	R50,68	R26,02
Jan	I	5,577	3,172	3,172	5,481	5,479
	II	2,882	2,935	2,935	3,398	3,396
	III	2,618	5,467	5,467	6,043	6,043
Feb	I	2,433	7,498	7,498	3,335	2,081
	II	4,333	4,278	4,278	3,981	2,920
	III	3,704	3,666	3,666	3,151	4,867
Mar	I	2,862	3,495	3,495	2,273	3,358
	II	3,502	5,904	5,904	4,380	6,135
	III	2,015	2,356	2,356	1,959	2,066
Apr	I	2,308	1,993	1,993	2,594	2,363
	II	2,777	1,993	1,993	4,122	3,711
	III	3,010	1,993	1,993	2,743	2,658
Mei	I	2,077	1,995	1,995	2,539	2,313
	II	2,427	1,995	1,995	1,995	5,241
	III	1,888	1,814	1,814	2,710	2,686
Jun	I	2,026	2,025	2,025	3,482	4,371
	II	3,725	1,988	1,988	2,554	3,547
	III	2,172	1,988	1,988	5,890	2,439
Jul	I	1,986	1,987	1,987	1,986	2,684
	II	1,988	1,988	1,988	2,014	4,417
	III	1,997	1,841	1,841	2,075	2,444
Agu	I	2,223	1,977	1,977	1,977	2,106

OPTIMASI POLA OPERASI WADUK MADURAN KABUPATEN LAMONGAN PROVINSI JAWA TIMUR

(Renaldi Aditya Rosandi, Soepriyono, Titien Setiyo Rini)

	II	2,024	2,024	2,024	2,024	2,169
	III	1,840	1,840	1,840	1,840	1,841
Sep	I	1,970	1,970	1,970	1,970	1,971
	II	1,970	1,970	1,970	1,970	1,971
	III	1,970	1,970	1,970	2,729	1,971
Okt	I	2,024	2,022	2,022	2,248	2,022
	II	1,979	1,978	1,978	2,984	1,977
	III	1,840	1,838	1,838	1,886	2,018
Nov	I	1,982	2,242	2,242	1,999	3,787
	II	3,408	2,300	2,300	3,964	3,435
	III	2,322	2,180	2,180	5,340	2,525
Des	I	1,988	3,741	3,741	2,751	6,210
	II	2,822	3,311	3,311	4,538	4,626
	III	7,543	6,708	6,708	4,395	2,318

3.10. Kegagalan dan Keandalan Waduk

Kegagalan waduk diputuskan melalui persentase total kegagalan melalui jumlah periode simulasi, adapun keandalan diputuskan melalui persentase total kesuksesan pada total periode simulasi. Kegagalan yang direncanakan pada studi ini diberi batas maksimal 20% sehingga didapat persentase keandalan waduk 80%.

Contoh proses hitung keandalan waduk melalui pendataan keandalan debit 50,68% guna Pola Tata Tanam I, dengan kegagalan dari total periode yang tidak dapat melepaskan 100% keperluan air irigasi:

$$P = 5$$

$$N = 36$$

$$Pe = \frac{P}{N} = \frac{5}{36} = 0,138$$

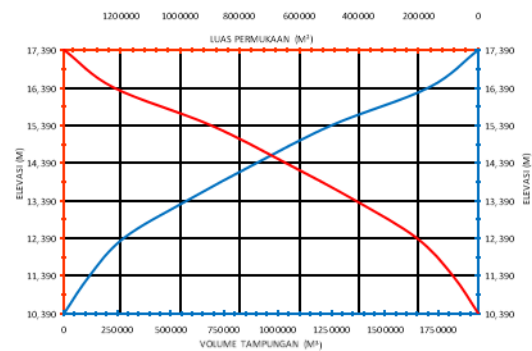
$$R = 1 - 0,138 = 0,861$$

Dari perhitungan di atas, didapat keandalan waduk senilai 86,1% dengan jumlah kegagalan simulasi sebanyak 5 kali.

3.11. Perhitungan Simulasi Operasi Waduk

Data-data yang perlu diketahui:

- Luas daerah irigasi = 2172,1 ha
- Volume tampungan total = 1.936.594 m³
- Volume tampungan mati = 178.594 m³
- Elevasi puncak tampungan total +17,39 mdpl
- Elevasi puncak tampungan mati +11,64 mdpl
- Elevasi *spillway* +17,89 mdpl
- Volume tampungan awal operasi (S) 1.558.000 m³
- Kegagalan simulasi operasi waduk diputuskan dalam volume tampungan mati.
- Hubungan elevasi, luas permukaan, dan volume tampungan waduk.



Gambar 3. Grafik Hubungan Elevasi, Luas Permukaan, dan Volume Tampungan

Tabel 6. Hubungan Elevasi, Luas Permukaan, dan Volume Tampungan Waduk Maduran

No	Elevasi	Luas Permukaan (m ²)	Volume Tampungan Kumulatif (m ³)
0	10,39	0	0
1	11,39	85501	118844
2	12,39	206342	278167
3	13,39	413241	574398
4	14,39	647899	900567
5	15,39	899531	1250331
6	16,39	1225532	1703467
7	17,39	1391385	1934000

Langkah perhitungan simulasi operasi waduk dengan contoh perhitungan bulan November periode III, Pola Tata Tanam I, dan keandalan debit 97,30% disajikan seperti berikut:

- Menetapkan bulan serta periode selaras pada Pola Tata Tanam
- Memasukkan data debit *inflow* (juta m³)

$$Inflow = 2,32 \times \frac{10 \times 24 \times 60 \times 60}{1000000} = 2,01$$
- Memasukkan data debit *outflow* (juta m³)

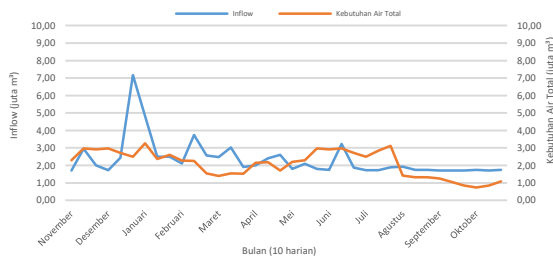
$$Outflow = 1,47 \times \frac{2172,1}{1000} = 2,76$$
- Menghitung nilai evaporasi (Eo) (juta m³)

$$Eo = A \times \frac{(hari \text{ dalam periode}) \times 1000}{1000000} \times 6,759$$

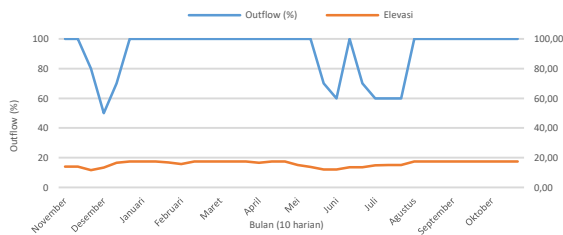
$$= 1,39 \times \frac{10 \times 1000}{1000000} \times 6,759 = 0,23$$
- Menghitung besar rembesan yang terjadi

$$= 8,491 \times \frac{10}{1000000} = 0,00008491 \text{ juta m}^3$$

Dari perhitungan di atas, didapat hubungan debit *inflow* dan kebutuhan air beserta hubungan elevasi dan *outflow* yang terjadi pada Waduk Maduran pada kondisi debit air musim kering (97,30%) dengan Pola Tata Tanam I seperti pada grafik berikut:



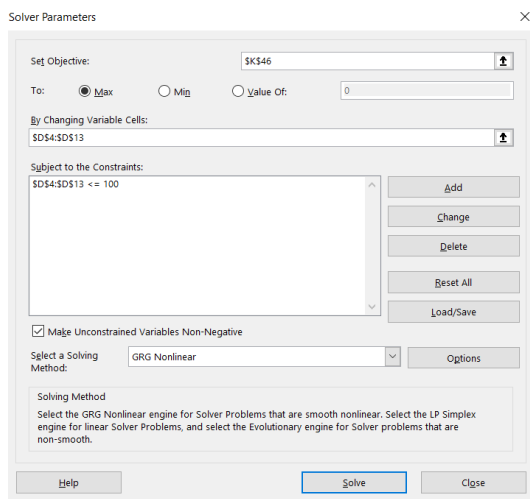
Gambar 4. Hubungan Debit *Inflow* dan Kebutuhan Air Total



Gambar 5. Hubungan *Outflow* dan Elevasi

3.12. Optimasi Pola Operasi Waduk Maduran

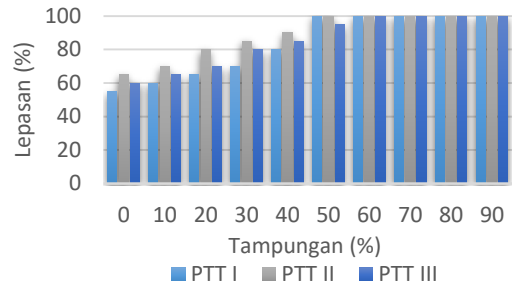
Metode optimasi untuk menentukan pedoman lepasan pola operasi dilaksanakan melalui teknik *trial and error* memakai aplikasi *Solver* yang merupakan *add-ins* dalam aplikasi Microsoft Excel. Program *Solver* bekerja dengan cara menyelaraskan angka-angka pada sel variabel keputusan guna mencukupi batasan sel kendala serta memberikan perolehan yang dibutuhkan ke sel tujuan. Tata cara pengisian kolom pada program *Solver* dijelaskan seperti berikut:



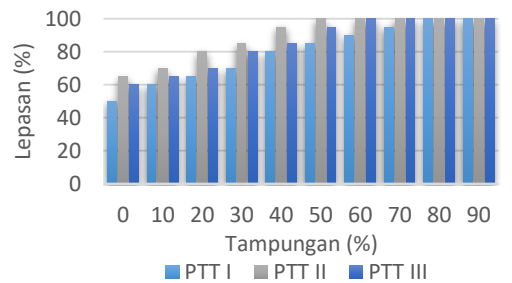
Gambar 6. Program *Solver* dalam Aplikasi Microsoft Excel

Objek nilai maksimum yang dimasukkan ialah nilai jumlah *outflow*. Sementara kolom *changing variable cells* diisi melalui hasil percobaan persentase *outflow*. Untuk *constraint* diisi dengan nilai batas tampungan mati (*dead*

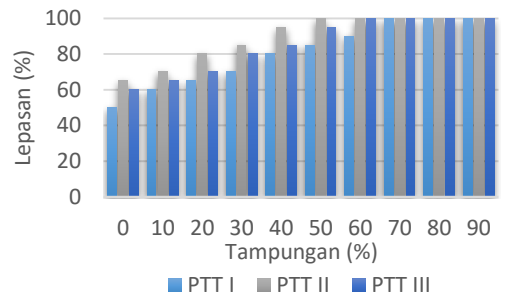
storage) ≤ tampungan efektif ≤ *S* akhir periode. Dari data tersebut dilakukan optimasi untuk mendapat hasil persentase optimal lepasan waduk dengan nilai batas minimum tampungan tertentu seperti berikut:



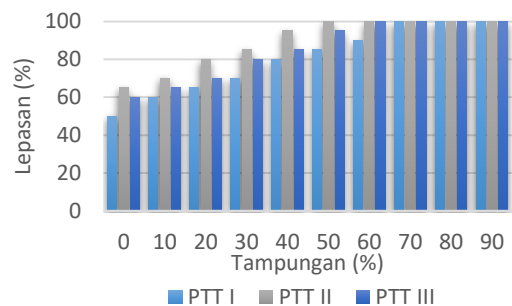
Gambar 7. Aturan Lepasannya Kondisi Debit 97,30%



Gambar 8. Aturan Lepasannya Kondisi Debit 75,34%



Gambar 9. Aturan Lepasannya Kondisi Debit 50,68%



Gambar 10. Aturan Lepasannya Kondisi Debit 26,02%

OPTIMASI POLA OPERASI WADUK MADURAN KABUPATEN LAMONGAN PROVINSI JAWA TIMUR

(Renaldi Aditya Rosandi, Soepriyono, Titien Setiyo Rini)

Dari hasil perhitungan persentase lepasan optimal menggunakan program *Solver* didapat acuan nilai lepasan yang dapat dilayani oleh Waduk Maduran sesuai dengan kondisi debit air musim kering dengan probabilitas 97,20% karena nilai akumulasi persentase lepasan tertinggi yang mampu dilayani waduk ada pada kondisi ini, sehingga diharapkan dapat mengairi lahan pertanian dengan jangkauan yang lebih luas sehingga dapat lebih menguntungkan petani.

3.13. Perbandingan Pola Operasi Eksisting dengan Hasil Optimasi

Perbandingan dilakukan untuk evaluasi efektifitas hasil optimasi yang dilakukan. Aspek yang menjadi acuan perbandingan adalah intensitas luas lahan pertanian yang dapat dilayani seluruh kebutuhannya.

Tabel 7. Perbandingan Intensitas Luas Lahan Terlayani Sebelum dan Sesudah Optimasi

Kondisi	Debit Air Musim Kering	Debit Air Rendah dan Irigasi	Debit Air Normal	Debit Air Cukup	Rata-rata
Debit Andalan (%)	97,30	80 dan 75,34	50,68	26,02	
Eksisting (ha)	1002,63	1002,63	1002,63	1002,63	1002,63
Intensitas (%)	46,16	46,16	46,16	46,16	46,16
Optimasi (ha)	1810,08	1769,86	2031,32	2151,99	1940,81
Intensitas (%)	83,33	81,48	93,52	99,07	89,35

Data tersebut menunjukkan bahwa dengan menggunakan pola operasi hasil optimasi dapat meningkatkan luasan lahan pertanian yang dapat dilayani sepenuhnya rata-rata sebesar 93,6% dari 1002,63 ha menjadi 1940,81 ha.

3.14. Contoh Penerapan *Rule Curve* Waduk Maduran

Sebagai contoh pengimplementasian petunjuk kepolaan operasi waduk, diambil melalui dari simulasi keandalan debit 97,30% guna Pola Tata Tanam I dengan pengimplementasian *rule curve* guna operasi bulan November periode II. Diketahui tampungan awal sebesar 0,97 juta m³ dengan elevasi +13,90 mdpl atau sebanyak 43% dari kapasitas tampungan efektif waduk. Jadi, dengan melihat pedoman lepasan pola operasi waduk, pada bulan November periode III dilakukan lepasan sebesar 80% (dibawah kebutuhan)

Apabila pada keadaan khusus *rule curve* menjadi tidaklah praktis melalui debit *inflow* tidak mencukupi keperluan yang dibutuhkan, sehingga dibutuhkan kebijaksanaan imbuhan guna lepasan yang kemudian dikeluarkan dengan berpedoman pada *rule curve* yang lebih rendah dari pedoman seharusnya.

4. KESIMPULAN

1. Besar kebutuhan air irigasi yang diperlukan untuk melayani keseluruhan lahan pertanian pada Daerah Irigasi Waduk Maduran dalam satu tahun berkisar antara 0,00 – 1,984 liter/detik/ha, dengan rata-rata kebutuhan 1,120 liter/detik/ha untuk PTT I, 0,00 – 2,498 liter/detik/ha, melalui rerata kebutuhan 1,294 liter/detik/ha untuk PTT II, dan 0,00 – 2,498 liter/detik/ha, melalui rerata kebutuhan 1,216 liter/detik/ha untuk PTT III.
2. Besar debit *inflow* pada Waduk Maduran adalah 1,841 – 6,210 m³/detik, dengan debit rerata 3,227 m³/detik untuk keandalan debit air cukup (26,02%), 1,840 – 6,043 m³/detik, melalui debit rerata 3,092 m³/detik untuk debit air normal (50,68%), 1,814 – 7,498 m³/detik, melalui debit rerata 2,790 m³/detik untuk debit air rendah (75,34%) dan debit air standar irigasi (80%), dan 1,840 – 7,543 m³/detik, melalui debit rerata 2,673 m³/detik untuk debit air musim kering (97,30%).
3. Besaran debit *outflow* yang wajib dikeluarkan guna Daerah Irigasi yang dilayani oleh Waduk Maduran berkisar antara 0,897 – 4,301 m³/detik, melalui rerata 2,765 m³/detik untuk PTT I, 1,166 – 4,301 m³/detik, melalui rerata 2,304 m³/detik untuk PTT II, dan 1,238 – 3,640 m³/detik, melalui rerata 2,501 m³/detik untuk PTT III.
4. Keandalan operasi Waduk Maduran melalui perolehan simulasi yang dilaksanakan pada bermacam kondisi debit *inflow*, golongan Pola Tata Tanam, serta jumlah lahan yang didapati berkisar antara 97,22% - 100% untuk debit air cukup (26,02%), 86,11% - 100% untuk debit air normal (50,68%), 69,44% - 97,22% untuk debit air rendah (75,34%) serta debit air irigasi (80%), 75% - 97,22% guna debit air musim kering (97,30%).
5. Acuan ideal pola operasi Waduk Maduran untuk setiap Pola Tata Tanam menggunakan pedoman lepasan (*rule curve*) dengan Debit Air Musim Kering (97,30%).

5. UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan puji syukur dan terima kasih kepada Tuhan Yang Maha Esa. Selanjutnya untuk kedua Orang Tua dan

kepada seluruh dosen program studi Teknik Sipil Universitas Wijaya Kusuma Surabaya yang senantiasa memberi dukungan dan bantuan dalam penyelesaian penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Abel, Y. P., Rispingingati, & Soetopo W. (2015). "Optimasi Pola Operasi Waduk Sutami Menggunakan Model Pemrograman Linier Kabur (Fuzzy Linear Programming)". *Jurnal Teknik Pengairan*, 6(1), 95-107.
- Ardiansyah, R. H., & Sriyana, I. (2021). "Evaluasi Debit Rembesan dari Data Bacaan V-Notch pada Bendungan Benel". *Jurnal Pengembangan Teknik Sipil*, 26(2), 209-221.
- Bolota, I. (2016). *Studi Optimasi Pola Operasi Waduk Seulimeum Kecamatan Seulimeum Kabupaten Aceh Besar*. Disertasi PhD. Malang: Universitas Brawijaya.
- Cedergren, H. (1967). *Seepage, Drainage and Flownet*. New York: John Wiley and Sons.
- McMahon, T., & Mein, R. G. (1978). *Reservoir Capacity and Yield*. Amsterdam: Elsevier.
- Novandi, A. S., Wasino, W., & Jayusman, J. (2019). "Dampak Pembangunan Waduk Kedung Ombo Terhadap Kehidupan Sosial Ekonomi Masyarakat Petani di Kabupaten Grobogan". *Indonesian Journal of Conservation*, 8(2).
- Shiamah, N. L. (2021). *Pengaruh Bendungan Wlingi Terhadap Lingkungan dan Ekonomi Masyarakat di Sepanjang Saluran Irigasi Lodoyo Tulungagung*. Jember: Universitas Jember.
- Soemarto, C. D. (1986). *Hidrologi Teknik Edisi 1*. Surabaya: Penerbit Usaha Nasional.
- Soetopo, W. (2010). *Operasi Waduk Tunggal*. Malang: Citra Malang.
- Triadi, I. N. S., Winaya, I. N. A. O., & Sudiasa, I. W. (2017). "Optimalisasi Kebutuhan Air Irigasi di Daerah Irigasi Sengempel Kabupaten Badung". *Logic: Jurnal Rancang Bangun dan Teknologi*, 17(2), 80-85.

**OPTIMASI POLA OPERASI WADUK MADURAN KABUPATEN LAMONGAN
PROVINSI JAWA TIMUR**

(Renaldi Aditya Rosandi, Soepriyono, Titien Setiyo Rini)

Halaman ini sengaja dikosongkan

Halaman ini sengaja dikosongkan