

OPTIMASI PEMANFAATAN AIR WADUK TUKUL MENGGUNAKAN MODEL SIMULASI OPERASI WADUK MULTI KRITERIA

Reinhart Hadthya^{1*}, Rachmad Jayadi², Endita Prima Ari Pratiwi²

¹Magister Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan,
Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No.2, Depok, Sleman, Yogyakarta, Indonesia

²Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No.2, Depok, Sleman, Yogyakarta, Indonesia

*Email: reinhart.hadthya@mail.ugm.ac.id

Abstrak

Pembangunan Waduk Tukul yang berlokasi di Desa Karanggede, Kecamatan Arjosari, Kabupaten Pacitan direncanakan memiliki manfaat untuk penyediaan air baku, penyediaan air irigasi dan pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Untuk menghasilkan pemanfaatan air waduk yang optimal, diperlukan kajian ilmiah tentang operasi waduk yang berorientasi multi kriteria. Pada penelitian ini dilakukan analisis ketersediaan air menggunakan model alihragam hujan aliran metode Mock, kebutuhan air irigasi dan kebutuhan air baku. Selanjutnya dilakukan simulasi pengaturan release air waduk berbasis neraca air menggunakan metode Standard Operating Rule (SOR). Kriteria pemanfaatan air optimum didasarkan pada intensitas tanam, faktor *k*, reliabilitas layanan air irigasi dan air baku. Berdasarkan hasil perhitungan neraca air terdapat defisit air tertinggi adalah sebesar 7,09 MCM, yaitu pada tengah bulan ke dua bulan Desember. Optimasi pemanfaatan air Waduk Tukul menghasilkan intensitas tanam 262,65% dengan rerata faktor *k* irigasi dan air baku sebesar 0,97 dan 0,88 serta reliabilitas layanan air irigasi dan air baku berturut-turut 93,99% dan 85,08%.

Kata kunci: Optimasi, neraca air, multi kriteria, reliabilitas

PENDAHULUAN

Bendungan/waduk merupakan salah satu metode paling efisien untuk pengelolaan sumber daya terintegrasi yang berfungsi untuk penyediaan air baku, penyediaan air irigasi, pengendalian banjir, dan/atau pembangkit listrik tenaga air [Zhou dan Guo, 2013]. Dalam pelaksanaannya, waduk memerlukan pedoman operasi. Pedoman operasi waduk bertujuan untuk mengatur dan mengelola agar air yang direlease dapat memberikan manfaat terbaik sesuai dengan fungsi bendungan tersebut, sejalan dengan *inflow* dan elevasi tampungan waduk [Chang dkk., 2005]. Untuk itu pedoman operasi masing-masing bendungan/waduk harus dibuat dan dilaksanakan oleh pengelola bendungan/ waduk dan harus direncanakan berdasarkan kondisi spesifik waduk.

Pembangunan Waduk Tukul yang berlokasi di Desa Karanggede, Kecamatan Arjosari, Kabupaten Pacitan direncanakan memiliki manfaat untuk penyediaan air baku, penyediaan air irigasi dan pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Waduk Tukul sebagai infrastruktur irigasi direncanakan untuk mendukung ketahanan pangan, sesuai Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) Prioritas Nasional kelima yaitu ketahanan pangan (*food security*). Pada proses perencanaan Waduk Tukul sudah ada pedoman operasi, namun penelitian ini memberikan alternatif dengan menggunakan data yang lebih baru, dan melakukan optimasi pemanfaatan air dengan menggunakan pendekatan model simulasi operasi waduk berorientasi multi kriteria.

METODOLOGI

Lokasi Penelitian

Penelitian Lokasi Waduk Tukul secara administratif termasuk di Desa Karanggede, Kecamatan Arjosari, Kabupaten Pacitan, Propinsi Jawa Timur. Secara geografis terletak di Kali Telu, cabang Sungai Grindulu yang terletak pada koordinat UTM X: 515564, Y : 9109045 atau 111°08'30" Bujur Timur dan 08°3'30" Lintang Selatan. Lokasi Waduk Tukul terletak kurang lebih 35 km utara kota Pacitan [Global, 2012].

Landasan Teori

Kebutuhan Air di Petak Sawah

Penentuan kebutuhan air di petak sawah terdiri dari kebutuhan air untuk penyiapan lahan, penggunaan konsumtif tanaman, perkolasi dan rembesan (hanya untuk padi), pergantian lapisan air (hanya untuk padi), dan curah hujan efektif. Persamaan 1, 2 dan 3 digunakan untuk menentukan kebutuhan air di petak sawah.

1. Kebutuhan pada masa pengolahan lahan

$$NFR = IR - Re \quad (1)$$

2. Kebutuhan pada masa pertumbuhan

$$NFR = ETc + W_{ir} - Re \quad (2)$$

3. Kebutuhan air sawah untuk tanaman palawija

$$NFR = ETc - Re \quad (3)$$

dengan:

$$\begin{aligned} NFR &= \text{kebutuhan bersih air tanaman di sawah (mm/hari),} \\ IR &= \text{kebutuhan air untuk penyiapan lahan (mm/hari),} \\ Re &= \text{hujan efektif (mm/hari),} \\ ETc &= \text{kebutuhan air untuk penggunaan konsumtif tanaman (mm/hari),} \\ W_{ir} &= \text{kebutuhan air untuk pergantian lapisan air (mm/hari),} \\ P &= \text{perkolasi (mm/hari).} \end{aligned}$$

Curah hujan efektif (Re) dapat dihitung dengan persamaan 4 dan 5 [Standar Kriteria Perencanaan Irigasi-01, 2013]

$$\text{Curah hujan efektif tanaman padi} = 0.7 \times \frac{R_{80}}{15} \quad (4)$$

$$\text{Curah hujan efektif tanaman palawija} = 0.7 \times \frac{R_{50}}{15} \quad (5)$$

dengan:

$$\begin{aligned} R_{80} &= \text{hujan tengah bulanan terlampaui 80\% (mm),} \\ R_{50} &= \text{hujan tengah bulanan terlampaui 50\% (mm).} \end{aligned}$$

Evapotranspirasi Potensial

Evapotranspirasi potensial adalah evapotranspirasi untuk memenuhi kebutuhan air untuk pertumbuhan tanaman tanpa sedikitpun kekurangan air (SNI 7745:2012). Pada penelitian ini dipilih metode *Penman-Monteith* karena memiliki tingkat akurasi yang baik (SNI 7745:2012).

Ketersediaan Air di Sungai

Analisis pendekatan ketersediaan air pada suatu DAS (Daerah Aliran Sungai) dapat menggunakan metode F.J. Mock (1973). Metode ini berfungsi untuk memprediksi ketersediaan air pada suatu DAS yang lazim digunakan sebagai data *inflow* rerata suatu tampungan untuk simulasi neraca air waduk.

Kebutuhan Air

Pada penelitian ini terdapat dua kebutuhan air, yaitu kebutuhan air irigasi dan kebutuhan air baku. Lahan irigasi berada di desa-desa di hilir Waduk Tukul dengan luas tanam 564 hektare. Pemanfaatan air Waduk Tukul untuk layanan baku diharapkan dapat memenuhi kebutuhan air di 3 kecamatan, yaitu Arjosari, Pacitan dan Kebonagung.

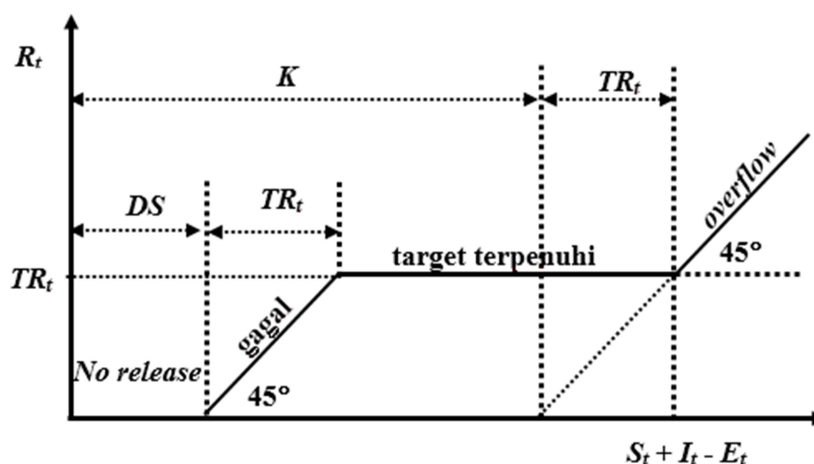
Skenario Pengelompokan Data Debit

Skenario pengelompokan debit dimaksudkan untuk mewakili jumlah data debit historis sepanjang 43 tahun dijadikan menjadi 3 kondisi aliran berdasarkan aspek hidrologi, yaitu tahun basah, tahun normal dan tahun kering. Skenario pola debit *inflow* dilakukan sebagai berikut [Subarkah. 1980]:

1. data debit rerata *inflow* tengah bulanan selama 43 tahun yaitu dari tahun 1975 sampai dengan tahun 2017 diubah menjadi debit rerata tahunan,
2. debit rerata tahunan di urutkan dari debit terbesar ke debit terkecil,
3. setelah data terurutkan, dibagi menjadi 3 bagian: tahun basah (antara 0% s/d 33,3%), tahun normal (antara 33,3% s/d 66,67%) dan tahun kering (antara 66,67% s/d 100%).

Optimasi Pengaturan Release Waduk

Fungsi tujuan optimasi adalah memaksimalkan hasil atau unjuk kerja yang diharapkan dari sistem secara keseluruhan [Samosir dkk., 2015] Metode yang digunakan dalam menghitung besarnya *release* waduk optimal adalah SOR. Dalam studi ini ada enam faktor yang diperhitungkan dalam operasi waduk untuk menentukan *actual release* yang optimal (R_t), yaitu tampungan air (S), tampungan air minimum (DS), *inflow* (I), total *release* air irigasi dan air baku (TR), evaporasi dari tampungan air waduk (E) dan limpasan dari pelimpah (SP). Skema metode SOR dijelaskan pada Gambar 1 [Jayadi, 2012] dengan menggunakan Persamaan 6 [Sudjarwadi, 2008].



Gambar 1. Skema Pengaturan Release Waduk Metode SOR

$$S_{t+1} = S_t + I_t - O_t - E_t - SP_t \quad (6)$$

dengan:

- S_{t+1} = tampungan waduk akhir tengah bulan ke- t (MCM),
- S_t = tampungan waduk awal tengah bulan ke- t (MCM),
- I_t = *inflow* tengah bulan ke- t (MCM),
- O_t = *outflow* waduk melalui saluran pengambilan pada tengah bulan ke- t (MCM),
- E_t = volume penguapan pada tengah bulan ke- t ,
- SP_t = limpasan pada pelimpah pada tengah bulan ke- t ,
- t = periode *release* tengah bulan ke- t .

Prinsip dari Gambar 1 adalah simulasi dilakukan dengan *trial* untuk nilai *release* waduk yang merupakan *outflow* sehingga kriteria optimal penggunaan air yang ditetapkan dapat dicapai. Berdasarkan Gambar 1 dapat diambil empat kondisi tampungan waduk yang dirumuskan pada Persamaan 7 sampai dengan Persamaan 10 sebagai berikut.

1. Kondisi tanpa *release*
 $AR_t = 0$, jika $S_t + I_t - E_t \leq DS$ (7)

2. Kondisi *release* tidak mencukupi
 $AR_t = S_t + I_t - E_t - DS$, jika $DS < S_t + I_t - E_t \leq DS + TR_t$ (8)

3. Kondisi *release* terpenuhi
 $AR_t = TR_t$, jika $DS + TR_t < S_t + I_t - E_t \leq K + TR_t$ (9)

4. Kondisi *overflow*

$$AR_t = S_t + I_t - E_t - K \text{ jika } S_t + I_t - E_t > K + TR_t \quad (10)$$

dengan:

- TR_t = target release periode t (MCM),
- AR_t = actual release yang terjadi periode t (MCM),
- S_t = volume tampungan periode t (MCM),
- I_t = inflow periode t (MCM),
- E_t = evaporasi periode t (MCM),
- DS = dead storage atau minimum storage (MCM),
- K = kapasitas tampungan waduk (MCM),
- t = periode release ke- t .

Dalam metode simulasi operasi waduk untuk mencapai hasil optimal, beberapa kriteria yang dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam optimasi alokasi air irigasi adalah sebagai berikut.

1. Pencapaian intensitas tanam pada Musim Tanam (MT) I, II dan III.
2. Faktor pemenuhan kebutuhan air dihitung dengan Persamaan 11.

$$k_t \text{ irigasi} = \frac{AR_t \text{ irigasi}}{TR_t \text{ irigasi}} \text{ dan } k_t \text{ air baku} = \frac{AR_t \text{ air baku}}{TR_t \text{ air baku}} \quad (11)$$

dengan:

- k = faktor pemenuhan kebutuhan air
- TR_t = target release periode t (MCM),
- AR_t = actual release yang terjadi periode t (MCM),
- t = periode release ke- t .

3. Tingkat keandalan waduk atau reliabilitas suplai air dihitung dengan Persamaan 12.

$$RI \text{ irigasi} = \frac{n \text{ irigasi}}{N} \times 100\% \text{ dan } RI \text{ air baku} = \frac{n \text{ air baku}}{N} \times 100\% \quad (12)$$

dengan:

- RI = tingkat keandalan operasi waduk (%),
- n = jumlah kejadian target release tercapai selama periode simulasi,
- N = panjang data periode simulasi.

Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan sebagai berikut ini.

1. Melakukan pengumpulan data luas potensial lahan irigasi, karakteristik waduk, data klimatologi, data hujan termasuk juga data penunjang seperti studi terdahulu.
2. Melakukan pengolahan data untuk mendapatkan analisis ketersediaan dan kebutuhan air.
3. Melakukan skenario pola debit aliran sungai untuk kondisi tahun basah, tahun normal dan tahun kering.
4. Melakukan optimasi pengaturan release air waduk dengan rumusan sebagai berikut ini.
 - a. Variabel keputusan (*decision variables*), berupa luas lahan irigasi yang dapat diairi oleh air yang tersedia, pada tiap musim tanam:
 - A_i = luas tanam pada musim tanam i (ha),
 - i = indeks musim tanam dengan $i = 1, 2, 3$.
 - b. Fungsi tujuan (*objective function*) optimasi pada penelitian ini adalah memaksimalkan intensitas tanam yang dapat dicapai dalam setahun, yang dirumuskan dalam Persamaan 13 berikut:

$$\text{Maks } Z = \frac{100}{AI} \sum_{i=1}^3 A_i \quad (13)$$

dimana:

- Z = intensitas tanam tahunan rerata (%),
- A_i = luas tanam pada musim tanam i (ha),
- i = indeks musim tanam,
- AI = luas areal irigasi potensial (ha).

c. Kendala (*constraints*), merupakan batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut ini (Persamaan 14-17).

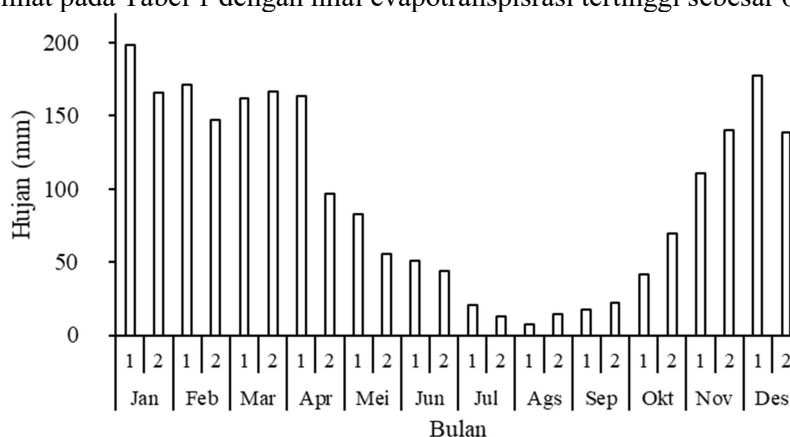
- 1) Luas tanam
 Nilai luas tanam pada musim tanam i (ha) tidak melebihi luas areal irigasi tersedia
 $A_i \leq AI$ (14)
- 2) Faktor k
 Faktor pemenuhan kebutuhan irigasi dan air baku harus memenuhi nilai berikut;
 k irigasi $\geq 0,7$ dan k air baku $\geq 0,85$ (15)
- 3) Tingkat keandalan waduk atau reliabilitas suplai air
 Rl air baku $\geq 85\%$ (16)
- 4) Prioritas
 Waduk Tukul direncanakan memprioritaskan kebutuhan irigasi, sehingga nilai
 Rl irigasi $\geq Rl$ air baku (17)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ketersediaan Air

Pada penelitian ini dilakukan analisis hujan rata-rata di Daerah Aliran Sungai Kali Telu dengan luas DAS 47,8 km², dengan menggunakan metode Poligon *Thiessen*. Hujan rerata tengah bulan stasiun Nawangan dari tahun 1975 sampai dengan 2017 disajikan pada Gambar 2.

Analisis evapotranspirasi menggunakan metode *Penman-Monteith* berdasarkan data sekunder berupa data klimatologi Stasiun Lanud (Pangkalan Udara) Pacitan, selama tahun 2014-2016. Hasil analisis dapat dilihat pada Tabel 1 dengan nilai evapotranspirasi tertinggi sebesar 6,76 mm/hari.



Gambar 2. Grafik rata-rata hujan tengah bulanan stasiun hujan Nawangan

Kebutuhan dan Neraca Air

Salah satu rencana pemanfaatan sumber daya air Waduk Tukul adalah penyediaan air irigasi di hilir bendungan, di area seluas 564 hektare pada Desa Karanggede, Karangrejo dan Gayuhan. Saat ini sistem irigasi di Kecamatan Arjosari tersebut masih berupa irigasi non teknis. Pola tanam yang diterapkan berupa tiga musim tanam dengan pola tanam padi, padi, palawija. Seperti terlihat pada Tabel 2, bulan Februari merupakan bulan dengan kebutuhan air irigasi terbesar yaitu sebesar 2,19 liter/detik/hektare pada tengah bulan pertama dan 1,75 liter/detik/hektare pada tengah bulan kedua.

Waduk Tukul diharapkan dapat membantu memenuhi kebutuhan air di 3 kecamatan yaitu Pacitan, Arjosari, dan Kebonagung. Pada penelitian ini direncanakan kebutuhan air baku adalah 300 l/detik.

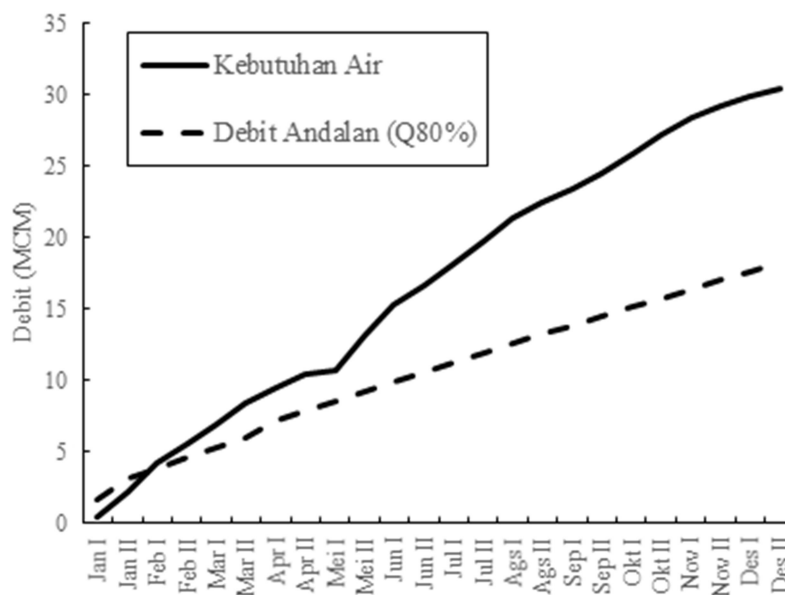
Neraca air berfungsi membandingkan antara ketersediaan air dan kebutuhan air pada pada kondisi eksisting. Ketersediaan air menggunakan debit andalan (Q_{80}) di Kali Telu. Pada Gambar 3 terlihat surplus hanya terjadi pada tiga tengah bulan pertama, sisanya terjadi defisit akibat tingginya kebutuhan air. Defisit air tertinggi adalah sebesar 12,25 MCM, sedangkan surplus air hanya sebesar 1,31 MCM. Untuk mengatasi hal ini diperlukan pembuatan bendungan agar dapat menampung air demi mencukupi kebutuhan air irigasi dan air baku.

Tabel 1. Hasil Analisis Evapotranspirasi

Bulan	Evapotranspirasi (mm/hari)	Evaporasi (mm/hari)
Januari	5,14	3,77
Februari	6,19	3,36
Maret	5,21	2,55
April	3,48	2,69
Mei	2,50	2,72
Juni	1,91	3,33
Juli	2,10	3,93
Agustus	3,22	4,64
September	4,86	5,66
Oktober	6,30	5,81
November	6,64	4,48
Desember	6,77	2.83

Tabel 2. Kebutuhan Air Irigasi Tengah Bulan

Tengah Bulan	Kebutuhan Air (l/dtk/ha)	Tengah Bulan	Kebutuhan Air (l/dtk/ha)
Jan I	0,00	Jul I	1,48
Jan II	1,74	Jul II	1,47
Feb I	2,19	Ags I	1,69
Feb II	1,75	Ags II	0,97
Mar I	1,28	Sep I	0,64
Mar II	1,31	Sep II	0,90
Apr I	0,96	Okt I	1,34
Apr II	0,70	Okt II	1,27
Mei I	0,00	Nov I	1,11
Mei II	2,47	Nov II	0,53
Jun I	2,39	Des I	0,41
Jun II	1,45	Des II	0,19

**Gambar 3.** Neraca Air Kali Telu

Skenario Pengelompokkan Data Debit dan Simulasi

Skenario pengelompokkan debit dimaksudkan untuk mewakili jumlah data debit historis menjadi 3 kondisi tahun aliran, yaitu tahun basah, tahun normal dan tahun kering seperti terlihat pada Tabel 3.

Nilai faktor k merupakan nilai rasio antara *actual release* dan *target release*. Nilai faktor k minimum untuk irigasi adalah 0,7. Nilai batas minimum ini ditetapkan pertimbangan pertumbuhan tanaman agar tidak berisiko gagal panen [Kusumahartini, 2013]. Nilai faktor k untuk air baku tidak lebih rendah 0,85 sebagai batas minimum.

Ukuran reliabilitas operasi waduk dinyatakan dalam rasio antara jumlah periode waktu dimana kebutuhan air dapat terpenuhi (“sukses”) dengan jumlah total periode pemberian air. Pemenuhan kebutuhan air dikatakan sukses apabila memenuhi batas minimum faktor k dan realibilitas layanan air cukup besar, tidak kurang dari 90%.

Tabel 3. Distribusi debit tengah bulanan skenario debit *inflow* (m³/s)

Tengah bulan	Musim			Tengah bulan	Musim		
	Basah	Normal	Kering		Basah	Normal	Kering
Jan I	3,91	3,99	2,40	Jul I	1,03	0,53	0,52
Jan II	3,12	2,54	2,33	Jul II	0,79	0,49	0,48
Feb I	3,51	2,40	2,02	Ags I	0,65	0,52	0,50
Feb II	4,25	2,10	2,17	Ags II	0,79	0,48	0,47
Mar I	4,43	2,46	1,75	Sep I	0,58	0,77	0,49
Mar II	4,08	2,55	1,37	Sep II	0,90	0,51	0,49
Apr I	3,33	2,30	2,36	Okt I	1,06	0,50	0,48
Apr II	1,70	1,33	1,33	Okt II	0,89	0,47	0,45
Mei I	2,32	1,16	0,98	Nov I	1,70	1,22	0,48
Mei II	1,34	0,83	0,92	Nov II	1,69	1,46	0,47
Jun I	1,68	0,97	0,59	Des I	2,07	2,38	1,42
Jun II	1,70	1,17	0,52	Des II	1,62	1,93	0,63

Hasil Optimasi Pemanfaatan Air Waduk

Berdasarkan hasil optimasi menggunakan data *inflow* historis dengan bantuan *Tool Solver* pada program *Microsoft Excel*, didapat hasil terbaik dengan intensitas tanam 262,65%, dimana intensitas tanam pada musim tanam 1, 2 dan 3 secara berturut-turut 100%, 62,65% dan 100%, dengan reliabilitas layanan air irigasi 93,99%. Nilai rerata faktor *k* irigasi pada debit historis cukup tinggi yaitu sebesar 0,97 (lihat Tabel 4), tetapi nilai minimum faktor *k* untuk musim tanam 1, 2 dan 3 relatif rendah, yaitu masing-masing 0,36, 0,52 dan 0,51. Untuk layanan air baku diperoleh nilai reliabilitas 85,08%. Nilai rerata faktor *k* untuk air baku cukup baik, yaitu 0,88, namun ada beberapa periode yang tidak dapat dilakukan suplai air baku karena ketersediaan air sangat terbatas.

Selanjutnya dilakukan pula optimasi dengan input data *inflow* tahun basah, tahun normal dan tahun kering yang hasilnya disajikan pada Tabel 4. Untuk kondisi tahun basah, semua kebutuhan air dapat terlayani sesuai dengan kebutuhan. Reliabilitas layanan air irigasi dan air baku mencapai 100%, serta intensitas tanam dapat mencapai 300%. Faktor *k* untuk irigasi dan air baku mencapai 1.

Hasil optimasi untuk kondisi tahun normal adalah intensitas tanam 266,22%, reliabilitas layanan air irigasi dan air baku masing-masing 100% dan 95,83%, sedangkan rerata nilai faktor *k* untuk irigasi dan air baku adalah 1 dan 0,99. Nilai minimum faktor *k* untuk air baku dapat memenuhi batas yang ditetapkan, yaitu 0,85.

Untuk tahun kering diperoleh intensitas tanam optimal 235,55%, dengan rincian untuk musim tanam 1, 2 dan 3 berturut-turut 100%, 35,55% dan 100%. Reliabilitas layanan air irigasi dan air baku masing-masing 100% dan 95,83%, sedangkan rerata nilai faktor *k* untuk irigasi dan air baku adalah 1 dan 0,99. Pada kondisi tahun kering nilai minimum faktor *k* untuk air baku juga dapat memenuhi batas yang ditetapkan, yaitu 0,85.

Tabel 4. Optimasi Pemanfaatan Air Waduk Berdasarkan Data Debit Historis dan Pengelompokkan Debit

Kriteria	Historis	Tahun Basah	Tahun Normal	Tahun Kering
		Intensitas Tanam	MT-1 Padi	100,00%
	MT-2 Padi	62,65%	100,00%	35,55%
	MT-3 Palawija	100,00%	100,00%	100,00%
Rerata <i>k</i> Irigasi	<i>k</i> 1; nilai minimum	1,00 ; 0,36	1,00 ; 1,00	1,00 ; 1,00
	<i>k</i> 2; nilai minimum	0,99 ; 0,52	1,00 ; 1,00	1,00 ; 1,00
	<i>k</i> 3; nilai minimum	0,92 ; 0,51	1,00 ; 1,00	1,00 ; 1,00
Rerata <i>k</i> Air Baku; nilai minimum		0,88 ; 0,00	1,00 ; 1,00	0,99 ; 0,85
Reliabilitas layanan air irigasi		93,99%	100,00%	100,00%
Reliabilitas layanan air baku		85,08%	100,00%	95,83%

Musim tanam kedua (tengah bulan Mei kedua sampai tengah bulan September pertama) mengalami penurunan kinerja pemanfaatan air waduk dikarenakan *inflow* yang kecil periode tersebut (lihat Gambar 2), namun kebutuhan air irigasi cukup besar (lihat Tabel 2). Kondisi ini menyebabkan pengurangan intensitas tanam pada musim tanam 2 untuk tahun normal terhadap tahun basah sebesar 33,78% dan tahun kering terhadap tahun basah sebesar 64,45%.

Hasil optimasi yang menarik adalah bahwa intensitas tanam untuk musim tanam ke 3 semuanya dapat mencapai 100%, baik tahun normal maupun tahun kering. Selain itu perlu diantisipasi untuk kondisi tahun kering, karena intensitas tanam musim tanam 2 sangat rendah, yaitu hanya mencapai 35,55%.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis optimasi pemanfaatan air Waduk Tukul menggunakan data *inflow* historis tahun 1975-2017 diperoleh rerata intensitas tanam maksimal 262,65%, dengan nilai rerata intensitas tanam tiap musim tanam 1, 2 dan 3 secara berturut-turut 100%; 62,65% dan 100%. Kinerja layanan air irigasi dan air baku ditunjukkan dengan nilai reliabilitas masing-masing sebesar 93,99% dan 85,08%. Pada optimasi tahap awal ini masih banyak dijumpai nilai faktor k untuk irigasi dan faktor k untuk air baku yang tidak mencapai nilai minimal, bahkan ada beberapa periode tanpa layanan air baku.

Pada kondisi tahun normal didapat intensitas tanam maksimal 266,22% dengan intensitas tanam tiap musim berturut-turut 100%; 66,22%; 100%, serta reliabilitas layanan air irigasi dan air baku masing-masing 100% dan 95,83%. Untuk kondisi tahun kering diperoleh intensitas tanam maksimal 235,55% dengan intensitas tanam tiap musim berturut-turut 100%; 35,55%; 100%. Reliabilitas layanan air irigasi dan air baku pada tahun kering masing-masing 100% dan 95,83%. Nilai minimum faktor k untuk air baku pada kondisi tahun normal dan tahun kering memenuhi batas yang ditetapkan, yaitu 0,85.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional, 2012, *SNI 7745:2012 Tata Cara Penghitungan Evapotranspirasi Tanaman Acuan dengan Metode Penman-Monteith*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Chang, F.J., Chen, L. dan Chang, L.C, 2005, Optimizing the Reservoir Operating Rule Curves by Genetic Algorithms. *Hydrological Processes*. 19. 2277 - 2289. 10.1002/hyp.5674
- Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013, *Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan Bagian Jaringan Irigasi KP-01*, Kementerian Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Global Parasindo Jaya, 2012, *Detailed Design Pembangunan Waduk Tukul di Kabupaten Pacitan*, Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo, Sukoharjo.
- Jayadi, R., 2012, *Analisis Sumber Daya Air*. Diktat Kuliah, Yogyakarta: Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada , Yogyakarta.
- Mock, F.J., 1973, *Land Capability-Appraisal Indonesia Water-Availability Appraisal*, FAO, Bogor.
- Pusdiklat Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2017, *Modul Operasi Waduk; Pelatihan Alokasi Air*, Pusdiklat Sumber Daya Air dan Konstruksi, Bandung.
- Kusumahartini, R., 2013, Pengembangan Model Optimasi Waduk Pandanduri untuk Pemenuhan Kebutuhan Air Irigasi di Lombok Nusa Tenggara Barat, *Tesis*, Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Natalia, K., 2007, Penyusunan Rule Curve Waduk Menggunakan Model Program Dinamik Deterministik, *Jurnal Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya*, No. 3, Vol VIII, 225-236
- Subarkah, I., 1980, *Hidrologi untuk Perencanaan Bangunan Air*, Idea Dharma Bandung, Bandung.
- Samosir, C. S., Soetopo, W., dan Yuliani, E., 2015, Optimasi Pola Operasi Waduk Untuk Memenuhi Kebutuhan Energi Pembangkit Listrik Tenaga Air (Studi Kasus Waduk Wonogiri), *Jurnal Teknik Pengairan*, No.1, Vol. 6, 108-115.
- Sudjarwadi, 2008, *Pengembangan Sumberdaya Air*, Biro Penerbit Teknik Sipil UGM, Yogyakarta.
- Zhou, Y., dan Guo, S., 2013, Incorporating ecological requirement into multipurpose reservoir operating rule curves for adaptation to climate change. *Journal of Hydrology*. 498. 153-164. 10.1016/j.jhydrol.2013.06.028.