

Optimasi Operasi Danau Rawa Pening dengan Program Dinamik untuk Pemanfaatan Sumber Daya Air yang Optimal

Dyah A. Wulandari*, Sriyana Sriyana, Salamun Salamun, Dwi Kurniani, Albert N. Tristanto,
Zelly Rinaldi, Reza Kandriani, Anisa R. Rahardiyanti

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

Abstrak

Danau Rawa Pening merupakan waduk alami yang mempunyai fungsi untuk melayani kebutuhan air irigasi, air baku air minum, PLTA, perikanan, pariwisata, serta pemeliharaan Sungai Tuntang. Berkurangnya kapasitas tampungan Rawa Pening akibat sedimentasi menyebabkan berkurangnya fungsi pelayanan Rawa Pening. Mengingat pentingnya fungsi Danau Rawa Pening dimana kinerja operasi waduk eksistingnya hanya mempunyai keandalan sebesar 60 % maka diperlukan analisis pengoperasian waduk untuk mengoptimalkan pemanfaatan potensi sumber daya air yang tersedia. Operasi waduk merupakan aturan untuk memanfaatkan sumber daya waduk berdasarkan pertimbangan sumber daya yang tersedia dan kebutuhan yang diperlukan dalam pengoperasian yang optimum berdasarkan hasil analisis. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan pedoman pengoperasian waduk guna peningkatan pemanfaatan potensi sumber daya yang tersedia. Penelitian dilakukan dengan membuat model optimasi operasi waduk dengan program dinamik. Tahapan analisis yang dilakukan adalah analisis kebutuhan air, analisis inflow waduk, perumusan model optimasi, melakukan optimasi dan menganalisis kinerja waduk hasil optimasi. Berdasarkan hasil analisis didapatkan kurva aturan operasi waduk dengan keandalan 86%.

Kata kunci: pemanfaatan danau; danau Rawa Pening; optimasi operasi waduk; program dinamik

Abstract

[Title: Operation optimization of rawa pening lake for water resources optimal utilization] Lake Rawa Pening is a natural reservoir that has a function to serve the needs of irrigation, raw water sources, hydropower, fisheries, and tourism, as well as the maintenance of the Tuntang River. The reduced storage capacity of Rawa Pening due to sedimentation has reduced the function of Rawa Pening services. The operational performance of the existing reservoir only has a reliability of 60%. It is necessary to analyze the operation of the reservoir to optimize the utilization of potential water resources. Reservoir operation is a rule for utilizing reservoir resources based on the consideration of available resources and the requirements required for optimal operation based on the analysis results. This study aimed to obtain the operation rule curve to increase the utilization of existing resources' potential. The research was conducted by creating a reservoir operation optimization model with a dynamic program. The stages of the analysis carried out are water demand analysis, reservoir inflow analysis, optimization model formulation, optimization, and analysis of reservoir performance. Based on the results, the reservoir operating rule curve is obtained with a reliability of 86%.

Keywords: lake utilization; Lake Rawa Pening; optimization of reservoir operations; dynamic programs

*) Penulis Korespondensi.
E-mail: dyahariwulandari@yahoo.co.id

1. Pendahuluan

Danau Rawa Pening merupakan salah satu dari 15 danau prioritas nasional. Danau Rawa Pening merupakan salah satu danau di Indonesia yang memerlukan pemulihan. Pemulihan Danau Rawa Pening

sangat penting karena Danau Rawa Pening merupakan kawasan strategis yang mempunyai fungsi penting dalam mendukung kegiatan pembangunan irigasi pertanian, perikanan, pariwisata dan pasokan air untuk pembangkit listrik. Untuk mengembalikan kembali kapasitas dan fungsi Danau Rawa Pening, sampai dengan saat ini Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) telah melakukan langkah penanganan yakni pengendalian sedimentasi berupa pengerukan danau, pembangunan chek dam, dan pengendalian gulma air dengan pembersihan eceng gondok secara rutin. Studi-studi yang telah dilakukan adalah studi pengukuran, sedimentasi dan kualitas air Waduk Rawa Pening pada tahun 2015, studi masterplan Danau Rawa Pening pada tahun 2016 dan penetapan batas badan dan sempadan Danau Rawa Pening (Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana, 2018).

Banyak sekali penelitian yang telah dilakukan terkait Danau Rawa Pening. Apriliyana (2015) dan Wulandari dkk.(2019a) melakukan penelitian mengenai erosi di Daerah Tangkapan Air (DTA) Rawa Pening dan sedimentasi danau serta pengendaliannya. Soeprbowati dan Suedy (2010), Soeprbowati dan Suedy (2011), Soeprbowati (2012), Samudra dkk.(2013), Sulastri dkk.(2016) dan Pirantia dkk.(2018) melakukan penelitian mengenai kualitas air Danau Rawa Pening dan alternatif penanganannya. Amariansah (2011) dan Yulianto dkk.(2016) meneliti pengendalian dan pemanfaatan eceng gondok. Darsono dkk. (2018) meneliti mengenai pengaruh pembangunan embung-embung di DTA Rawa Pening terhadap pengendalian banjir di Sungai Tuntang. Nugroho (2017) melakukan penelitian mengenai hasil air Danau Rawa Pening. Penelitian mengenai strategi pengelolaan untuk pelestarian Danau Rawa Pening dilakukan oleh Partomo dkk.(2011), Gerhard dan Susilowati (2013), Haryanti (2017) dan Raharjo dkk. (2019).

Danau Rawa Pening merupakan waduk alami karena kolam tampungan yang ada terjadi secara alami tanpa campur tangan manusia. Sehingga dalam kaitannya dengan pengoperasian Danau Rawa Pening akan digunakan istilah waduk. Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan belum ada yang meneliti mengenai pengoperasian waduk dalam pemanfaatan potensi airnya. Untuk pemanfaatan air waduk yang optimal diperlukan adanya pedoman pelaksanaan pengoperasian waduk. Selain itu dalam hal adanya perubahan kebutuhan air, kapasitas tampungan, ataupun perubahan kondisi hidrologi maka operasi waduk perlu di evaluasi dan diperbaharui untuk menyesuaikan dengan perubahan yang ada (Wulandari dkk., 2014). Sementara itu, berdasarkan penelitian Wulandari dkk.(2020) pada operasi Waduk Rawa Pening kondisi eksisting kinerja keandalannya

hanya sebesar 60 % (untuk memenuhi 90 % target kebutuhan air).

Adanya keterbatasan sumber daya dan peningkatan kebutuhan akan sumber daya memerlukan pengelolaan sumber daya yang tersedia sehingga dapat dimanfaatkan secara optimal. Oleh karena itu diperlukan analisis pengoperasian waduk, untuk mengoptimalkan pemanfaatan potensi sumber daya air yang tersedia. Operasi waduk merupakan aturan untuk memanfaatkan sumber daya waduk baik pemanfaatan ruang tampungannya maupun pemanfaatan airnya dalam berbagai kondisi hidrologi sesuai fungsi tujuannya. Pemanfaatan sumber daya waduk diatur berdasarkan pertimbangan sumber daya yang tersedia dan kebutuhan yang diperlukan dalam pengoperasian yang optimum berdasarkan hasil analisis. Kebijakan operasi ini nantinya akan digunakan sebagai pedoman bagi operator dalam memanfaatkan sumber daya waduk. Pedoman operasi waduk yang ada sekarang ini belum dikembangkan dengan metode optimasi. Dengan demikian, kebaruan dalam penelitian ini adalah melakukan optimasi dalam pengaturan pemanfaatan sumber daya air Rawa Pening dengan metode optimasi program dinamik. Adapun tujuannya adalah untuk mendapatkan pedoman pengoperasian waduk guna peningkatan pemanfaatan potensi sumber daya yang tersedia.

2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi Penelitian

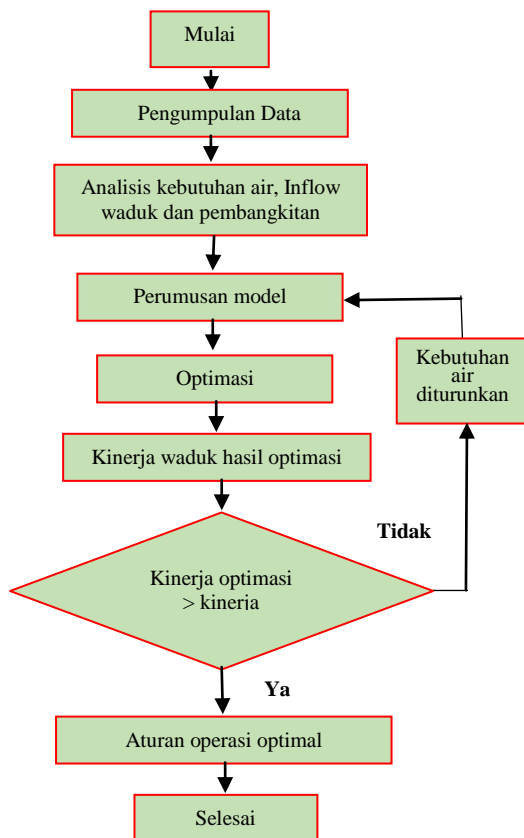
Danau Rawa Pening terletak di Kabupaten Semarang, Propinsi Jawa Tengah, kurang lebih 40 Km ke arah Selatan dari Kota Semarang (Gambar 1). Danau Rawa Pening terletak pada wilayah kerja Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Pemali – Juana. Secara astronomi Danau Rawa Pening terletak pada $7^{\circ} 4' \text{ LS} - 7^{\circ} 30' \text{ LS}$ dan $110^{\circ} 24' 46'' \text{ BT} - 110^{\circ} 49' 06'' \text{ BT}$ (Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana, 2016). DTA Danau Rawa Pening merupakan bagian hulu dari Daerah Aliran Sungai (DAS) Tuntang, yang memiliki luas 25.041,50 ha. Secara administrasi DTA Rawa Pening meliputi 72 desa yang terletak di 11 kecamatan dalam wilayah Kabupaten Semarang dan Salatiga (Wulandari dkk., 2019). Sumber air Danau Rawa Pening adalah air hujan, air tanah dan air permukaan dari 17 anak sungai. Selama musim hujan potensi air dari Danau Rawa Pening yang dimanfaatkan hanya 20 % nya, sedangkan 80 % nya terbuang ke laut (Darsono dkk., 2018). *Outlet* Danau Rawa Pening adalah Sungai Tuntang, yang diatur di Bendung Jelok.

2.2 Tahapan Penelitian

Penelitian dilakukan dengan tahapan seperti pada bagan alir Gambar 2.



Gambar 1. Lokasi Danau Rawa Pening (Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana, 2018)



Gambar 2. Bagan alir penelitian

2.3 Pengumpulan Data

Data yang diperlukan dalam penelitian ini diperoleh dari Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Pemali Juana, yaitu data laporan operasi waduk Rawa Pening dan bendung Gerak Jelok, pembagian fungsi tampungan waduk, kebutuhan air, lengkung elevasi-volume-area Danau Rawa Pening, laju evaporasi, data teknis Bendung Gerak Jelok, sistim waduk dan kinerja waduk eksisting.

2.4 Analisis Kebutuhan Air

Pada tahap ini dilakukan perhitungan kebutuhan air sesuai dengan fungsi Danau Rawa Pening.

2.5 Analisis Inflow dan Pembangkitan

Berdasarkan data laporan operasi waduk, inflow waduk dapat dihitung dengan persamaan neraca air waduk sebagaimana Persamaan 1 atau Persamaan 2 (Nandalan dan Bogardi, 2007).

$$I_i = S_{i+1} - S_i + X_i + E_i + SO_i \quad (1)$$

$$X_i = S_{i+1} - S_i + I_i + E_i + SO_i \quad (2)$$

dimana S_i adalah volume tampungan waduk (*storage*) pada awal periode i , S_{i+1} adalah volume tampungan waduk (*storage*) pada awal periode $i+1$, X_i adalah pelepasan (*release*) waduk pada periode i , I_i adalah inflow waduk pada periode i , E_i adalah penguapan (*evaporasi*) waduk pada periode i yang merupakan perkalian antara e_i dan A_i , e_i adalah laju evaporasi pada periode i , A_i adalah luas permukaan genangan air waduk pada periode i . dan

SO_i adalah limpasan (*spill out*) waduk pada periode i yang dapat dicari dengan Persamaan 3.

$$SO_i = \max(S_i + I_i - E_i - X_i - S_{\max}, 0) \quad (3)$$

Inflow yang diperoleh berdasarkan persamaan neraca air waduk ini kemudian digunakan sebagai data historis untuk pembangkitan debit. Pembangkitan debit dilakukan karena tidak tersedianya data debit historis dalam jangka panjang. Prinsip dari pembangkitan debit adalah *men-generate* data debit yang lebih panjang, dimana debit hasil bangkitan ini mempunyai karakteristik statistik yang sama dengan data debit historis. Analisis pembangkitan debit dilakukan dengan Metode *Thomas Fiering*. Metode *Thomas Fiering* merupakan salah satu pemodelan stokastik empiris. Data hidrologi yang dibangkitkan berupa data debit periodik, baik dalam periode bulanan atau periode 2 (dua) minggu. Data yang diperpanjang, dapat diperkirakan berdasarkan tingkat kesalahan dan keyakinan statistika yang diinginkan. Keunggulan metode ini antara lain adalah mengawetkan rata-rata, simpangan baku, dan korelasi antar bulan. Persamaan debit bangkitan yang digunakan adalah Persamaan 4 (Jamil, 2019).

$$q_{i,j} = x_j + r(j) \frac{S_j}{S_{j-1}} (q_{i,j-1} - x_{j-1}) + t_{i,j} S_j [1 - r(j)^2]^{0.5} \quad (4)$$

dimana q_{i,j} adalah debit periode j dalam tahun i (j=1,2,...,dst), x_j adalah rata-rata debit periode j, r(j) adalah koefisien korelasi periode j dari periode j-1, s_j adalah simpangan baku periode j, r(j) $\frac{S_j}{S_{j-1}}$ adalah koefisien regresi q_{i,j} dari q_{i,j-1}, s_{j-1} adalah simpangan baku periode j-1, x_{j-1} adalah rata-rata periode j-1 dan t_i adalah variabel acak berdistribusi normal baku, dengan rata-rata 0 dan variansi 1.

Data debit hasil bangkitan dengan Metode *Thomas Fiering* dapat digunakan untuk analisis selanjutnya, bila parameter statistik antara debit historis dan debit bangkitan mempunyai kemiripan yang baik. Parameter statistik yang dibandingkan adalah nilai rata-rata, simpangan baku, nilai korelasi, dan bj.

2.6 Optimasi Operasi Waduk

Optimasi operasi waduk akan dilakukan dengan program dinamik. Program dinamik digunakan dalam optimasi operasi waduk karena variabel-variabel dalam operasi waduk lebih bersifat tidak linier dan tidak pasti. Program Dinamik digunakan untuk optimalisasi pengambilan keputusan berangakai (*sequential decision problems*). Pada optimasi dengan program dinamik ini diperlukan perumusan model sebagai berikut:

a. Sistim waduk

Skema Sistim Waduk diperlukan untuk menggambarkan sistem yang ada meliputi sumber air, arah aliran, posisi penampungan dan pelayanan.

b. *Stage, State variables* dan *Decision variables*

Stage adalah periode operasi, *state variables* adalah variabel keadaan berupa tampungan awal waduk pada tiap periode dan *decision variables* adalah variabel keputusan berupa pelepasan air waduk pada tiap periode.

c. Fungsi tujuan (*objective function*)

Fungsi tujuan merupakan pernyataan kuantitatif dari kasus optimasi, misalnya meminimalkan selisih antara target dan kebutuhan air, memaksimalkan energi, memaksimalkan benefit, meminimumkan biaya operasi dan lain-lainnya.

d. Fungsi transformasi keadaan (*state transformation function*)

Fungsi ini diperlukan untuk menyatakan hubungan kondisi tampungan waduk dari satu periode ke periode berikutnya. Fungsi transformasi keadaan yang digunakan adalah persamaan neraca air waduk (Persamaan 1).

e. Fungsi kendala (*constraint*)

Fungsi kendala diperlukan untuk membatasi jumlah air minimal yang harus ada ditampungan waduk, jumlah air maksimum yang boleh ditampung waduk, dan jumlah aliran air minimal dan maksimal yang boleh dikeluarkan dari waduk.

f. Persamaan rekursif (*recursive equation*)

Menurut Nandalal dan Bogardi (2007) keputusan optimal untuk sistem yang berada pada *state* X_i dan *stage* i dapat dinyatakan sebagai Persamaan 5.

$$F_i(S_i) = \max_{X_i} \text{ or } \min [f_i(S_i, X_i) + F_{i+1}(S_{i+1})] \quad (5)$$

dimana F_i(S_i) adalah hasil optimal yang diperoleh dari *stage* i jika pada *stage* i sistem berada pada *state* S_i, f_i(S_i, X_i) adalah hasil yang diperoleh pada *stage* i jika sistem berada pada *state* S_i dan keputusan yang diambil adalah X_i dan F_{i+1}(S_{i+1}) adalah hasil optimal yang diperoleh dari *stage* i+1 jika pada *stage* i+1 (pada *stage* sebelumnya) sistem berada pada *state* S_{i+1}.

g. Diskritisasi

Diskritisasi diperlukan untuk menentukan interval tampungan dan pelepasan dalam optimasi.

Optimasi dengan program dinamik dilakukan dengan bantuan software CSUDP. Program ini dikembangkan oleh John W. Labadie dari *Colorado State University* dan merupakan *open source software*. Hasil optimasi berupa besarnya pelepasan lewat intake, kondisi tampungan di waduk serta nilai fungsi tujuan. Hasil optimasi yang dipilih adalah yang memenuhi fungsi tujuannya, dalam hal ini yang mempunyai nilai fungsi tujuan paling kecil. Indikator operasi waduk yang digunakan untuk menentukan operasi waduk yang optimal adalah kinerja waduk dalam memenuhi kebutuhan airnya.

Tabel 1. Kebutuhan air

Periode	PDAM m ³ /dt	Irigasi m ³ /dt	PLTA m ³ /dt	Pemeliharaan Sungai m ³ /dt	Kebutuhan Air juta m ³	
Januari I	0,25	0,444	8	0,5	9,194	11,9
Januari II	0,25	0,456	8	0,5	9,206	12,7
Februari I	0,25	0,479	8	0,5	9,229	12,0
Februari II	0,25	0,449	8	0,5	9,199	10,3
Maret I	0,25	0,330	8	0,5	9,080	11,8
Maret II	0,25	0,626	8	0,5	9,376	13,0
April I	0,25	0,483	8	0,5	9,233	12,0
April II	0,25	0,450	8	0,5	9,200	11,9
Mei I	0,25	0,526	8	0,5	9,276	12,0
Mei II	0,25	0,536	8	0,5	9,286	12,8
Juni I	0,25	0,536	8	0,5	9,286	12,1
Juni II	0,25	0,569	8	0,5	9,319	12,1
Juli I	0,25	0,556	8	0,5	9,306	12,1
Juli II	0,25	0,506	8	0,5	9,256	12,8
Agustus I	0,25	0,403	8	0,5	9,153	11,9
Agustus II	0,25	0,652	8	0,5	9,402	13,0
September I	0,25	0,653	8	0,5	9,403	12,2
September t II	0,25	0,646	8	0,5	9,396	12,2
Oktober I	0,25	0,532	8	0,5	9,282	12,0
Oktober II	0,25	0,673	8	0,5	9,423	13,0
November I	0,25	0,310	8	0,5	9,060	11,7
November II	0,25	0,610	8	0,5	9,360	12,1
Desember I	0,25	0,420	8	0,5	9,170	11,9
Desember II	0,25	0,36	8	0,5	9,110	12,6

Tabel 2 . Debit Historis Periode Bulan Januari s/d Juni

Tahun	Debit Historis (m ³ /dt)											
	Januari		Februari		Maret		April		Mei		Juni	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
2004	22,06	31,77	17,14	24,54	26,20	28,22	26,20	24,61	16,88	17,81	12,30	8,85
2005	21,62	18,55	18,25	25,28	21,65	25,22	26,91	27,87	15,54	14,19	15,06	19,01
2006	25,85	27,27	25,80	18,18	17,65	20,84	29,55	24,34	24,72	20,75	8,04	10,14
2007	12,59	23,68	22,08	10,37	22,70	26,42	18,69	16,21	13,03	12,93	10,93	10,95
2008	15,71	18,36	11,31	22,05	27,69	23,64	19,36	16,34	12,38	7,52	11,06	10,97
2009	28,92	29,53	16,47	29,28	20,12	22,00	20,25	22,88	19,21	25,21	31,39	22,27
2010	14,20	20,66	20,84	19,58	32,52	37,12	30,96	26,91	33,95	27,51	24,97	17,49
2011	16,51	18,69	17,36	16,92	23,13	33,18	30,66	27,27	28,98	21,48	15,19	12,71
2012	23,41	33,24	26,03	16,58	14,29	23,73	18,65	22,30	17,57	12,44	11,75	9,85
2013	21,09	23,04	20,79	20,11	22,29	29,94	30,42	28,17	19,32	24,32	24,18	17,71
2014	12,03	14,05	14,29	16,32	22,88	17,68	23,98	18,64	15,83	9,91	22,37	13,65
2015	11,92	18,62	21,17	17,84	23,06	24,21	24,86	24,47	24,61	15,29	8,31	10,47

2.7 Analisis Kinerja Waduk

Kinerja waduk dalam memenuhi kebutuhannya akan dinilai dari tiga indikator yaitu keandalan kelentingan dan kerawanan (Suharyanto, 1997; Wulandari dkk., 2018). Keandalan mengukur kemampuan waduk dalam memenuhi target kebutuhan selama masa operasi waduk. Kelentingan mengukur kemampuan waduk kembali ke keadaan memuaskan dari keadaan gagal. Jika semakin cepat waduk kembali

ke keadaan memuaskan maka dapat dikatakan bahwa waduk lebih lenting sehingga dampak dari kegagalan lebih kecil. Kerawanan mengukur besaran kegagalan.

3. Hasil dan Pembahasan

Fungsi Danau Rawa Pening adalah untuk memenuhi kebutuhan air baku PDAM PT. Sarana Tirta Ungaran, Kebutuhan air irigasi untuk melayani sawah di Daerah Irigasi Jelok Tuntang seluas 374 Ha,

Tabel 3. Debit Historis Periode Bulan Juli s/d Desember

Tahun	Debit Historis (m ³ /dt)											
	Juli		Agustus		September		Oktober		November		Desember	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
2004	7,10	11,54	5,95	6,65	8,48	7,95	6,79	5,53	7,06	17,76	15,74	21,38
2005	13,70	15,17	9,83	12,50	9,77	10,98	7,65	9,26	7,55	17,32	22,34	30,19
2006	14,84	11,85	10,89	6,81	5,74	4,95	5,73	6,30	6,32	9,58	9,45	13,23
2007	8,87	6,21	6,26	6,39	5,76	4,37	6,27	10,96	9,93	7,70	26,43	31,43
2008	6,13	6,48	6,50	5,00	3,42	7,86	12,24	11,48	15,28	15,19	21,76	14,70
2009	10,71	8,76	7,45	7,97	6,75	6,00	5,92	5,24	9,06	9,91	9,47	17,60
2010	9,57	17,14	11,99	14,28	18,48	18,87	23,53	30,04	24,21	25,75	27,26	23,64
2011	10,80	13,70	8,67	5,80	5,46	3,07	7,77	14,37	14,65	15,07	19,71	23,75
2012	7,10	7,95	6,39	5,91	5,94	6,18	8,57	6,80	8,76	14,90	17,68	17,24
2013	12,87	14,29	11,13	12,94	5,56	6,88	6,96	8,43	7,46	12,81	16,04	17,44
2014	9,42	9,30	7,31	8,11	6,09	4,66	5,84	5,85	12,68	10,93	13,00	16,69
2015	5,22	6,35	6,24	4,65	7,11	7,09	4,49	9,26	13,13	11,13	20,78	19,25

pemeliharaan aliran Sungai Tuntang, Kebutuhan air PLTA Jelok, serta perikanan dan pariwisata (Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana, 2016). Hasil analisis kebutuhan air selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 1. Sementara itu, untuk melayani kebutuhan air untuk perikanan dan rekreasi maka waduk tidak boleh kering sehingga elevasi muka air waduk tidak boleh lebih rendah dari batas tampungan minimal yang ditetapkan yaitu +460,5 mdpl.

Inflow Danau Rawa Pening berasal dari anak-

anak sungainya, mata air dan air hujan yang jatuh di danau. *Inflow* waduk diperoleh berdasarkan pengolahan data laporan elevasi muka air waduk, evaporasi di waduk, *outflow* waduk dan Lengkung H-V-A. Data yang tersedia lengkap untuk perhitungan inflow ini adalah data periode tahun 2004 – 2015. Berdasarkan keseimbangan air yang masuk dan air yang keluar waduk (Persamaan 1) maka diperoleh besarnya debit *inflow* waduk. Debit *Inflow* yang diperoleh dari analisis ini merupakan debit historis yang selanjutnya akan

Tabel 4. Debit bangkitan 25 tahun terakhir Periode Bulan Januari s/d Juni

Tahun	Debit Bangkitan (m ³ /dt)											
	Januari		Februari		Maret		April		Mei		Juni	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
1	13,52	12,52	13,66	6,37	7,02	15,43	18,71	20,51	15,65	7,85	4,49	6,35
2	15,98	16,90	12,67	13,67	20,32	21,55	21,40	22,69	15,33	12,66	12,02	11,86
3	14,82	12,59	17,09	23,99	22,64	21,71	19,64	13,39	10,55	2,76	10,99	9,98
4	20,45	16,19	20,49	12,56	15,61	19,28	17,25	22,47	20,58	12,21	7,90	4,11
5	20,52	16,84	19,99	13,78	17,56	23,54	23,42	20,21	16,29	15,84	8,48	6,66
6	11,47	11,99	16,26	26,18	17,72	18,41	19,86	19,22	21,86	10,61	12,46	7,51
7	18,97	19,85	6,68	16,29	19,68	17,03	17,28	14,51	11,98	13,33	12,54	15,86
8	14,61	16,35	14,87	21,51	19,41	27,92	20,45	19,10	13,73	10,85	15,76	12,70
9	14,60	12,40	17,50	17,04	13,86	14,58	17,70	19,13	18,74	16,76	11,55	13,44
10	18,23	16,45	12,36	14,91	12,56	13,67	16,48	12,79	18,67	17,33	14,21	10,08
11	7,91	19,21	14,07	12,18	19,95	14,65	20,02	14,98	10,00	6,23	7,30	12,05
12	12,83	15,96	8,59	11,05	13,31	14,41	14,79	11,09	9,51	11,78	7,34	10,76
13	19,08	21,44	10,70	13,73	15,91	25,08	28,02	28,45	26,40	13,97	14,77	9,10
14	12,29	15,35	22,28	15,89	16,86	21,40	22,92	21,26	15,11	11,69	8,44	6,80
15	16,63	18,34	17,33	18,23	22,17	18,70	18,60	21,38	21,50	18,43	13,63	13,70
16	12,75	21,34	12,78	20,80	15,44	18,66	17,28	18,78	12,25	11,68	7,76	8,75
17	16,32	17,51	12,24	15,65	16,33	13,82	14,50	7,71	9,49	4,42	8,07	9,75
18	14,51	13,34	16,42	18,27	17,14	20,41	19,85	17,31	23,38	13,26	13,17	2,63
19	14,08	16,81	11,36	20,30	18,10	18,89	16,71	14,27	17,73	13,18	9,47	12,68
20	18,59	18,23	14,76	12,90	11,94	19,87	17,49	15,39	7,98	7,16	4,87	6,53
21	12,28	18,20	17,14	11,16	16,56	15,09	17,30	15,60	20,56	15,89	16,17	13,43
22	17,80	16,93	18,30	6,67	10,69	9,58	14,66	13,32	15,24	16,72	8,66	8,70
23	11,54	17,86	11,01	13,44	16,19	15,79	17,77	16,75	8,68	0,00	10,63	9,13
24	12,18	11,60	14,50	22,06	20,79	20,80	20,19	18,15	17,93	8,56	11,28	7,38
25	10,47	4,68	18,37	6,69	10,74	14,86	20,12	21,19	16,94	14,86	13,49	12,35

Tabel 5. Debit bangkitan 25 tahun terakhir Periode Bulan Juli s/d Desember

Tahun	Debit Bangkitan (m ³ /dt)											
	Juli		Agustus		September		Oktober		November		Desember	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
1	3,73	7,20	5,05	6,55	6,76	8,35	11,41	12,31	12,44	12,34	16,43	13,40
2	11,73	9,39	9,71	9,75	11,54	15,25	18,83	20,69	16,25	15,16	21,92	14,54
3	9,20	10,31	10,09	10,08	10,83	11,59	13,06	11,23	8,87	10,48	20,10	16,67
4	1,96	2,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,56	6,61	9,07	10,05	18,89
5	5,27	6,04	3,19	3,63	4,46	1,55	1,11	1,87	6,78	8,98	11,30	14,70
6	5,98	7,99	5,70	4,93	4,13	1,92	2,91	5,88	7,43	11,65	15,81	24,67
7	10,56	7,69	6,92	6,16	5,79	3,11	2,24	3,10	3,77	3,60	9,20	17,75
8	8,49	6,47	4,47	2,91	4,33	3,36	3,17	5,16	5,62	12,66	15,59	15,30
9	7,23	8,60	5,73	7,29	8,97	9,58	12,38	12,25	6,87	4,08	12,98	18,86
10	6,18	7,72	7,60	4,08	1,81	0,80	0,68	7,07	7,77	10,86	11,22	11,14
11	7,98	9,90	7,77	6,22	6,50	3,48	4,92	7,96	14,57	22,20	19,87	16,97
12	7,42	7,05	5,20	2,96	4,94	2,57	4,08	7,23	11,45	14,70	19,80	13,13
13	7,67	8,77	8,09	7,75	4,88	4,65	3,80	2,26	2,22	4,36	8,11	15,47
14	8,57	8,64	6,65	6,94	7,86	7,90	7,95	6,54	13,47	9,36	13,53	19,93
15	12,15	9,25	8,76	6,36	6,10	3,93	2,39	2,20	2,70	11,07	11,43	14,31
16	2,50	2,42	2,18	1,31	1,91	2,65	6,38	7,58	9,15	10,09	8,01	17,14
17	6,42	7,90	7,10	7,07	6,02	6,98	9,52	7,27	12,80	12,77	17,68	17,31
18	1,99	5,45	3,96	2,67	2,56	3,05	4,97	4,65	7,00	13,52	17,24	19,26
19	9,55	10,51	8,30	9,60	8,63	11,29	10,06	8,23	7,49	5,97	12,29	17,02
20	3,80	4,74	4,17	1,15	1,70	0,49	0,42	2,59	7,87	11,70	11,32	11,15
21	10,04	9,59	8,95	9,09	7,26	8,02	9,93	12,12	9,34	1,32	7,30	19,28
22	7,05	8,30	5,67	5,80	4,97	9,06	9,24	7,52	5,69	5,08	11,18	15,63
23	9,65	7,21	8,54	5,48	5,97	5,57	7,45	5,81	8,37	12,70	13,79	7,53
24	4,92	6,63	6,64	7,33	7,93	5,25	4,01	3,92	6,28	6,19	8,36	5,56
25	9,85	8,02	6,38	6,02	5,43	6,36	5,92	6,89	10,88	13,82	14,74	21,47

digunakan sebagai data dalam analisis pembangkitan debit. Debit *inflow*/ debit historis hasil analisis dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Berdasarkan debit historis yang diperoleh sesuai Tabel 2 dan Tabel 3 kemudian dilakukan analisis pembangkitan debit dengan metode Thomas Fiering (Persamaan 4). Dalam penelitian ini pembangkitan debit dilakukan sepanjang 50 tahun, kemudian debit bangkitan yang akan digunakan untuk analisis selanjutnya adalah debit hasil bangkitan 25 tahun terakhir. Debit hasil bangkitan 25 tahun awal tidak digunakan karena masih terpengaruh oleh data historik sehingga debit bangkitan yang dihasilkan kurang valid. Debit bangkitan sepanjang 25 tahun terakhir dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5. Perbandingan parameter statistik antara debit historis dan debit bangkitan disajikan dalam bentuk grafik (Gambar 2 sampai dengan Gambar 5), dan diperoleh adanya kecenderungan yang sama antara debit historis dan debit bangkitan. Hal ini sesuai dengan pendapat Jamil (2019) sehingga debit bangkitan dapat digunakan untuk analisis selanjutnya.

Langkah berikutnya adalah mengembangkan model optimasi operasi waduk untuk peningkatan pemanfaatan potensi airnya. Selain itu optimasi ini juga dilakukan karena berkurangnya kapasitas tampungan karena sedimentasi, hal ini sesuai pendapat Wulandari

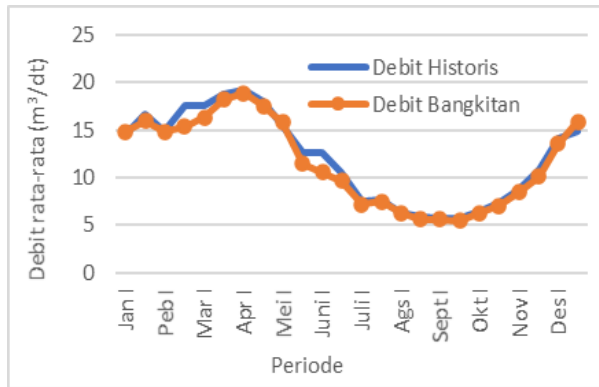
dkk. (2014) bahwa jika ada perubahan kapasitas tampungan maka operasi waduk perlu diperbaharui. Model dikembangkan untuk mengatur pelepasan air waduk untuk memenuhi kebutuhan air irigasi, kebutuhan air baku air minum dan PLTA serta pemeliharaan sungai. Tampungan yang disediakan untuk kebutuhan air irigasi, air baku air minum dan PLTA serta pemeliharaan sungai adalah tampungan antara elevasi +460,5 mdpl sampai dengan elevasi +463,3 mdpl (Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana, 2018). Tampungan dibawah elevasi +460,5 mdpl digunakan untuk kebutuhan perikanan dan pariwisata serta tampungan sedimen (elevasi tampungan mati + 457,1 mdpl).

Model optimasi operasi waduk dengan program dinamik dirumuskan sebagai berikut:

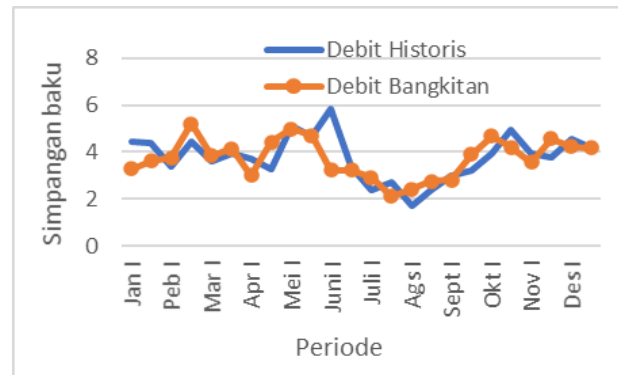
a. Sistim Waduk

Skema sistim waduk dapat dilihat pada Gambar 6. Danau Rawa Pening mendapatkan aliran air dari 17 anak sungai yang masuk danau. Danau Rawa Pening merupakan waduk alami sehingga tidak memiliki intake dan pelimpah, oleh karena itu pengaturan operasi waduk dilakukan di Bendung Gerak Jelok yang berjarak ± 5 km dari outlet danau. Pelepasan air waduk dilakukan melalui intake PLTA Jelok dan pintu Bendung Gerak Jelok.

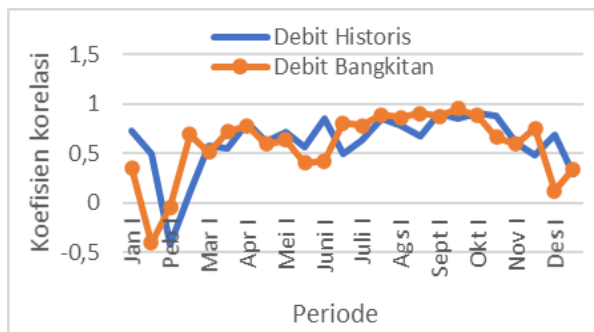
Stage, State Variables dan Decision Variables



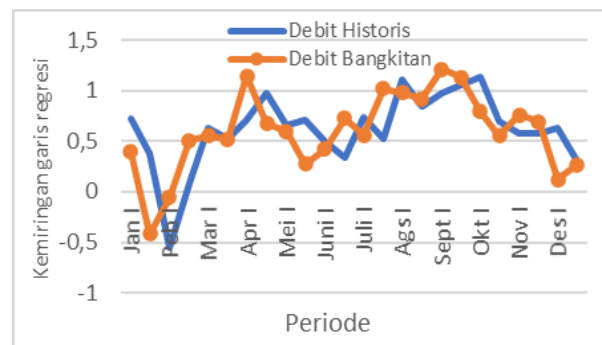
Gambar 2. Perbandingan nilai rata-rata (X_i) antara debit historis dan debit bangkitan



Gambar 3. Perbandingan nilai simpangan baku (S_i) antara debit historis dan debit bangkitan



Gambar 4. Perbandingan nilai koefisien regresi (r_i) antara debit historis dan debit bangkitan



Gambar 5. Perbandingan nilai kemiringan persamaan regresi (b_j) antara debit historis dan debit bangkitan



Gambar 6. Skema Sistim Waduk Rawa Pening

Dalam penelitian ini digunakan *Stage* periode 2 mingguan (dalam 1 tahun ada 24 periode), sehingga untuk 25 tahun ada 600 periode. Variabel keadaan (*state variables*) pada penelitian ini adalah tampungan awal waduk pada periode i dan variabel keputusannya (*decision variables*) adalah pelepasan air waduk pada periode i .

b. Fungsi Tujuan

Model dikembangkan untuk mengatur pelepasan air waduk guna memenuhi kebutuhan air irigasi, Kebutuhan air baku PDAM dan PLTA serta

pemeliharaan sungai. Tujuan optimasi pada penelitian ini adalah untuk meminimalkan penyimpangan relatif antara pelepasan dan target kebutuhan air irigasi, yang dirumuskan sebagai Persamaan 6.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^N \frac{|r_i - X_i|}{r_i} \quad (6)$$

Dimana Z adalah fungsi tujuan, i adalah urutan periode (*stage*) operasi waduk, N adalah banyaknya periode yang ditinjau, X_i adalah pelepasan waduk pada periode

Tabel 6. Laju evaporasi

Periode	laju evaporasi (m/hari)	Periode	laju evaporasi (m/hari)
Januari I	0,0111	Juli I	0,0061
Januari II	0,0113	Juli II	0,0081
Februari I	0,0101	Agustus I	0,0083
Februari II	0,0098	Agustus II	0,0070
Maret I	0,0120	September I	0,0101
Maret II	0,0135	September II	0,0107
April I	0,0123	Oktober I	0,0111
April II	0,0108	Oktober II	0,0095
Mei I	0,0087	November I	0,0119
Mei II	0,0083	November II	0,0118
Juni I	0,0082	Desember I	0,0131
Juni II	0,0092	Desember II	0,0146

i (release) dan T_i adalah target kebutuhan air irigasi pada periode i .

c. Fungsi transformasi keadaan

Untuk menyatakan hubungan kondisi tampungan waduk dari satu periode ke periode berikutnya digunakan persamaan neraca air waduk (Persamaan 2). Untuk mendapatkan luas permukaan genangan waduk digunakan kurva hubungan luas permukaan genangan dan volume hasil pengukuran bathimetri tahun 2015. Kurva hubungan antara luas permukaan waduk dengan

volume waduk didapat sebagaimana Persamaan 7.

$$Y = -0,0118 X^2 + 0,9578X - 0,7221 \quad (7)$$

Dimana Y adalah luas permukaan waduk (km^2) dan X adalah volume waduk (ribu m^3).

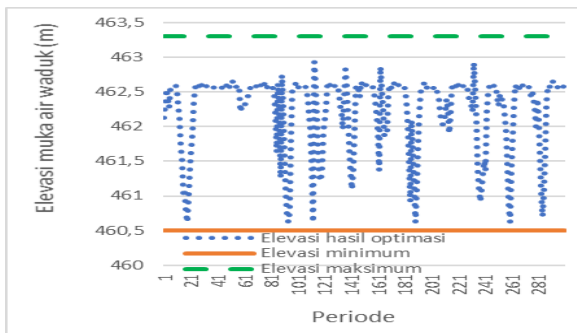
Besarnya evaporasi pada periode i (E_i) dapat dihitung dengan Persamaan 8.

$$E_i = e_i \left[-0,0118 \left(\frac{S_i + S_{i+1}}{2} \right)^2 + 0,9578 \left(\frac{S_i + S_{i+1}}{2} \right) - 0,7221 \right] \quad (8)$$

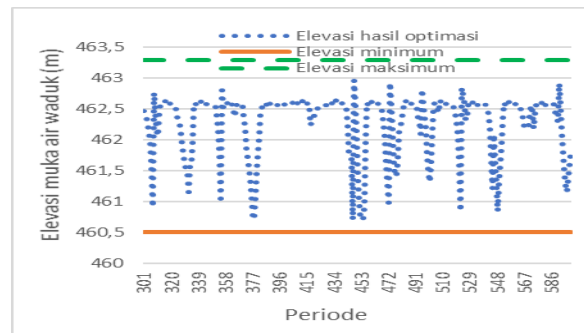
Besarnya laju evaporasi (e_i) dihitung berdasarkan laju evaporasi rata-rata selama periode tahun 2004 – 2015 (Tabel 6). S_i adalah volume tampungan waduk (storage) pada awal periode i dan S_{i+1} adalah volume tampungan waduk (storage) pada awal periode $i+1$

d. Fungsi Kendala

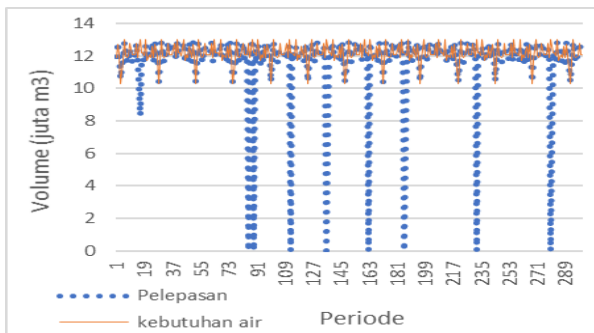
Sesuai fungsi tujuannya maka fungsi kendalanya adalah batas tampungan waduk dan batas pelepasan air waduk. Tampungan yang disediakan untuk memenuhi kebutuhan air adalah tampungan antara elevasi +460,5 mdpl sampai dengan elevasi +463,3 mdpl. Pada elevasi ini diperoleh batas tampungan sesuai Persamaan 9.



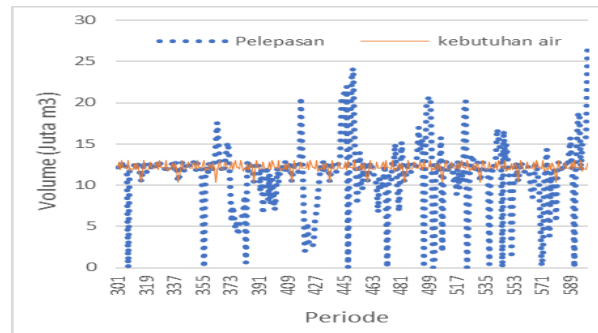
Gambar 7. Elevasi muka air waduk hasil optimasi pada periode 1 – 300



Gambar 8. Elevasi muka air waduk hasil optimasi pada periode 301 – 600



Gambar 9. Perbandingan kebutuhan air dan pelepasan pada periode 1 – 300



Gambar 10. Perbandingan kebutuhan air dan pelepasan pada periode 301 – 600

Tabel 7. Rata-rata pemakaian air hasil optimasi

Deskripsi	Satuan	Jumlah
Rata-rata inflow/ tahun	Juta m ³	366,00
Rata-rata pelepasan/ tahun	Juta m ³	277,39
Air yang terpakai	%	75,79

$$11,475 \text{ juta m}^3 \leq S_i \leq 53,7 \text{ juta m}^3 \quad (9)$$

S_i adalah volume tampungan waduk (*storage*) pada awal periode i . Batas pelepasan maksimum sesuai dengan kebutuhan air maksimum, fungsi kendala berupa faktor pembatas pelepasan, dapat dinyatakan sebagai Persamaan 10.

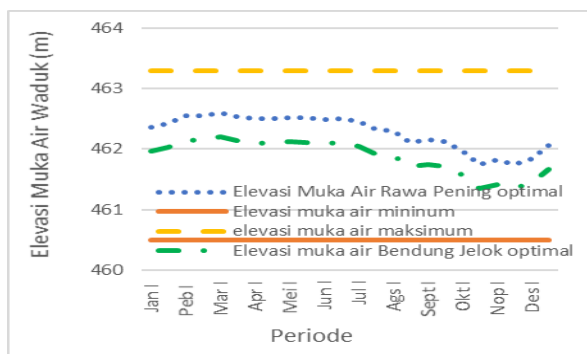
$$0 \leq X_i \leq 13 \text{ juta m}^3 \quad (10)$$

X_i adalah pelepasan (*release*) waduk pada periode i .

e. Diskritisasi

Diskritisasi tampungan (ΔS) diperoleh dengan coba-coba hingga didapat nilai minimal yang masih dapat diterima (tidak terjadi *error*), jumlah diskrit maksimum adalah 251. Nilai akhir dari *state variable* mengikuti nilai diskritisasi. Dari coba-coba didapat $\Delta S = 0,6 \text{ juta m}^3$ dengan jumlah diskrit 70. Diskritisasi untuk pelepasan (ΔX) diperkirakan dengan nilai terkecil yang dapat menghasilkan perhitungan yang akurat, digunakan $\Delta X = 0,01 \text{ juta m}^3$ dengan jumlah diskrit 1300. Nilai akhir dari *decision variable* tidak mengikuti nilai diskritisasi.

Berdasarkan hasil optimasi, pada tampungan awal waduk sebesar 25,275 – 26,475 juta m³ diperoleh nilai fungsi tujuan paling minimal yaitu sebesar 24,1859. Elevasi muka air waduk selama 25 tahun/ 600 periode hasil optimasi yang optimal dapat dilihat pada Gambar 7 sampai dengan Gambar 10. Berdasarkan Gambar 7 dan Gambar 8 dapat dilihat elevasi muka air waduk selalu mengalami fluktuasi, ini menunjukkan tampungan waduk sudah berfungsi dimana pada saat musim hujan terjadi pengisian untuk digunakan pada



Gambar 11. Pola operasi hasil optimasi

Tabel 8. Kinerja waduk hasil optimasi

No.	Kinerja	Satuan	Hasil
1	Keandalan	%	86,00
2	T gagal	periode	2,05
3	Kelentingan		0,49
4	Rata - rata defisit ratio	%	0,92
5	Maksimum defisit ratio	%	90,00
6	Maksimum defisit	juta m ³	11,70
7	Rata - rata defisit	juta m ³	0,78

saat musim kemarau. Pada beberapa tahun operasi penurunan terjadi hingga mendekati batas elevasi minimal, ini berarti inflow yang terjadi selama tahun operasi ini kecil. Sementara itu, pada beberapa tahun operasi elevasi muka air waduk tetap berada di kisaran elevasi +462,5 mdpl dan tidak mengalami penurunan, ini berarti inflow yang terjadi selama tahun operasi ini cukup besar.

Berdasarkan Gambar 9 dan Gambar 10 dapat dilihat pada periode 1 – 600 terjadi beberapa kali waduk tidak dapat memenuhi kebutuhan air. Sedangkan pada periode 350 - 600 terjadi beberapa kali kelebihan pelepasan. Adapun rata-rata pemakaian airnya tiap tahun adalah 75,79 % (Tabel 7).

Pada pengukuran kinerja, waduk dianggap dapat memenuhi fungsinya jika 90% dari kebutuhan airnya terpenuhi. Menurut Suharyanto (1997) dan Wulandari dkk.(2018) kinerja keandalan digunakan untuk mengukur kemampuan waduk dalam memenuhi target kebutuhan air, sedangkan kelentingan dan kerawanan untuk mengukur kegagalannya. Sehingga penerimaan model akan dilihat dari nilai keandalannya, bila keandalan lebih besar dari keandalan eksisting maka model dapat diterima. Secara terukur, kinerja waduk hasil optimasi dapat dilihat pada Tabel 8. Berdasarkan Tabel 8, kinerja keandalan model (86%) lebih besar dari keandalan eksisting (60%) sehingga model dapat

Tabel 9. Pedoman operasi Danau Rawa Pening

Periode	Elevasi (m)	Periode	Elevasi (m)
Januari I	461,96	Juli I	462,05
Januari II	462,03	Juli II	461,93
Februari I	462,15	Agustus I	461,90
Februari II	462,15	Agustus II	461,71
Maret I	462,20	September I	461,75
Maret II	462,14	September II	461,72
April I	462,10	Oktober I	461,57
April II	462,11	Oktober II	461,34
Mei I	462,13	November I	461,42
Mei II	462,11	November II	461,35
Juni I	462,09	Desember I	461,44
Juni II	462,11	Desember II	461,67

diterima. Keandalan 86 % hal ini berarti waduk dapat memenuhi fungsinya sebesar 86 %.

Nilai kelentingan pada pengoperasian waduk 0,49 dengan T_{gagal} 2,05, ini berarti untuk kembali ke keadaan memuaskan diperlukan waktu 2,05 periode. Jika kegagalan terjadi dalam waktu lama maka pemulihan sistem akan lambat (Suharyanto, 1997 dan Wulandari dkk., 2018). Besaran kegagalan diukur dari kerawanannya yang dinyatakan dalam rata-rata *ratio deficit* dan rata-rata *deficit* (Suharyanto (1997); Wulandari dkk. (2018). Besarnya rata-rata *deficit ratio* dari besarnya target kebutuhan dalam pemenuhan kebutuhan adalah 0,92 %, berarti 0,92 % kebutuhan air tidak terpenuhi dari suatu kegagalan dengan rata-rata deficit sebesar 0,78 juta m³ tiap periode kejadian gagal. Nilai maksimum *deficit ratio* adalah 90 % atau sebesar 11,7 juta m³.

Oleh karena model dapat diterima maka elevasi muka air waduk hasil optimasi ini dapat digunakan untuk membuat kurva aturan operasi waduk. Kurva aturan operasi waduk ini dibuat dengan cara mengambil nilai rata-rata dari tiap periode di tiap tahun operasi sepanjang 25 tahun operasi. Berdasarkan analisis ini akan didapat elevasi muka air waduk di tiap periode selama 1 tahun operasi (Gambar 11), elevasi ini merupakan elevasi muka air yang harus dicapai waduk pada tiap akhir periode operasi. Oleh karena pelepasan Waduk Rawa Pening diatur di Bendung Gerak Jelok maka elevasi muka air waduk dirubah ke elevasi muka air Bendung Gerak Jelok sebagai pedoman operasinya (Tabel 9).

4. Kesimpulan

Optimasi yang dilakukan berhasil mendapatkan pedoman pengoperasian waduk untuk peningkatan pemanfaatan potensi sumber daya yang tersedia. Peningkatan kemanfaatan ditunjukkan dengan meningkatnya keandalan dari 60 % pada kondisi eksisting menjadi 86 % pada kondisi optimasi.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Fakultas Teknik Undip yang telah mendanai penelitian ini, serta Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana yang telah menyediakan data yang diperlukan.

Daftar Pustaka

Amariansah, W. (2011). Klante Beton, Bangunan Pengendali Penyebaran Eceng Gondok Di Rawa Pening Yang Berfungsi Sebagai Jembatan Penghubung Antar Kecamatan. *Majalah Ilmiah Universitas Pandanaran*, 9 (20), 1-21.

- Apriliyana, D. (2015). Pengaruh Perubahan Penggunaan Lahan Sub DAS Rawapening terhadap Erosi dan Sedimentasi Danau Rawapening. *Jurnal Pembangunan Wilayah & Kota*, 11(1), 103-116.
- Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana. (2016). *Laporan Analisa Neraca Air Study Masterplan Danau Rawa Pening*. Semarang: Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana.
- Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana. (2018). *Laporan Penetapan Batas Badan dan Sempadan Danau Rawa Pening*. Semarang: Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana.
- Darsono, S., Suripin, Budienny, H., Afifah, R.C., Pujiastuti, R., Soripada, F., Hutagalung, M.I., Pamungkas, L.A., Saputra, G.W. (2018). Benefits of embungs in the Rawa Pening catchment area For Reducing turgent river flood discharge. *E3S Web of Conferences* (pp. 1-5), 73, 08029.
- Gerhard & Susilowati, I. (2013). Valuasi Ekonomi Sumberdaya Alam Rawa Pening Dan Strategi Pelestariannya Di Kabupaten Semarang, Diponegoro. *Journal Of Economics*, 2(2), 1 – 9.
- Haryanti, N. (2017). Membangun Kemitraan Pemerintah Dan Masyarakat: Remediasi Danau Rawapening Untuk Menjamin Kelestariannya. *Dalam Seminar Nasional Geografi Pengelolaan Sumberdaya Wilayah Berkelanjutan* (pp. 705-715). Surakarta, Indonesia: Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Jamil, F.F.S. (2019). Optimasi Kinerja Waduk Logung, Tesis. Universitas Diponegoro.
- Nandalal, K.D.W. & Bogardi, J.J. (2007). *Dynamic Programming Based Operation of Reservoirs: Applicability and Limits*. New York: Cambridge University Press.
- Nugroho, N.P. (2017). Estimasi Hasil Air Dari Daerah Tangkapan Air Danau Rawa Pening Dengan Menggunakan Model Invest. *Majalah Ilmiah Globë*, 19(2), 157-166.
- Partomo, Mangkuprawira, S., Hubeis, A.V.S., & Adrianto, L. (2011). Pengelolaan Danau Berbasis Co-Management: Kasus Rawa Pening. *Jurnal Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan*, 1(2), 106- 113.
- Pirantia, A. S., Rahayua, D. R., Waluyo, G. (2018). Evaluasi Status Mutu Air Danau Rawa Pening. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 8(2), 151-160.
- Raharjo, S.A.S, Falah, F., & Cahyono, S.A. (2019). Germadan Rawa Pening: Tindakan Bersama Dalam Pengelolaan. *Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*, 3(1), 1-12.
- Samudra, S. R., Soeprbowati, T. R., & Izzati, M. (2013). Komposisi, Kemelimpahan dan Keanekaragaman Fitoplankton Danau Rawa

- Pening Kabupaten Semarang. *Bioma Berkala Ilmiah Biologi*, 15(1), 6-13.
- Soeprbowati, T. R. & Suedy, S. W. A. (2010). Status Trofik Danau Rawapening Dan Solusi Pengelolaannya. *Jurnal Sains dan Matematika*, 18(4), 158-169.
- Soeprbowati, T. R. & Suedy, S.W.A. (2011). Komunitas Fitoplankton Danau Rawa Pening. *Jurnal Sains dan Matematika*, 19(1), 19-30.
- Soeprbowati, T.R. (2012). Mitigasi Danau Eutrofik: Studi Kasus Danau Rawapening. *Dalam Seminar Nasional Limnologi VI*, 36-48.
- Suharyanto. (1997). Analisa Unjuk Kerja Waduk. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, Edisi VIII, 51-57.
- Sulastris, Henny, C., & Handoko, U. (2016). Kondisi Lingkungan dan Status Trofik Danau Rawa Pening di Jawa Tengah. *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*, 1(3), 23-38.
- Yuliyanto, E., Astuti, A.P., & Rahmawati, A.A. (2016). Potensi Enceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*) Rawa Pening Untuk Budidaya Jamur *Campignon* Perspektif Desa Ekowisata Asinan. *Dalam Rakernas Aipkema*, 81-88.
- Wulandari, D.A., Legono, D., & Darsono, S. (2014). Reservoir Operation to Minimize Sedimentation. *International Journal of Science and Engineering*, 6(1), 16-23.
- Wulandari, D.A., Budienny, H., & Kurniani, D. (2016). Keakuratan Prediksi Inflow Waduk Dengan Neraca Air Waduk. *Teknik*, 37(2), 94-97.
- Wulandari, D.A., Kurniani, D., Edhisono, S., Ardianto, F., & Dahlan, D. (2019a). The effect of small dams in Rawa Pening catchment area on sedimentation rate of Rawa Pening Lake. *MATEC Web of Conferences* 270, 04018, ConCERN-2 2018.
- Wulandari, D.A., Darsono, S., & Kurniani, D. (2019b). Optimization of Gunungrowo Reservoir operation. *MATEC Web of Conferences* 270, 04016, ConCERN-2 2018.
- Wulandari, D.A., Sriyana, Salamun, Kurniani, D., Kandriani, R., Rahardiyanti, A.R., Trisanto, A.N., & Rinaldi, Z. (2020). *Laporan Penelitian: Prediksi Umur Tampung dan Skenario Peningkatan Kapasitas Tampung Danau Rawa Pening Terhadap Nilai Manfaatnya*. Universitas Diponegoro: Fakultas Teknik.