

Optimasi Operasi Waduk Dolok dengan Program Dinamik

¹Lisa Adatika, ²Suripin, ³Suseno Darsono

Magister Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Indonesia

Email: ¹lisa.adatika@gmail.com, ²suripin.ar@gmail.com,
³sdarsono@hotmail.com

Tersedia Online di

<http://www.jurnal.unublitar.ac.id/index.php/briliant>

Sejarah Artikel

Diterima pada 23 November 2020

Disetujui pada 23 Februari 2021

Dipublikasikan pada 28 Februari 2021

Hal. 205-215

Kata Kunci:

Operasi waduk; *rule curve*;
program dinamik; CSUDP

DOI:

<http://dx.doi.org/10.28926/briliant.v3i4.595>

Abstrak: Waduk Dolok direncanakan dibangun dengan kapasitas tampungan 34,09 juta m³, tujuannya untuk memenuhi kebutuhan air irigasi dan air baku. Supaya tidak terjadi konflik kepentingan dalam pemanfaatan air maka perlu pengoperasian waduk yang optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menyusun pola operasi waduk yang optimal menggunakan program dinamik dengan bantuan *software* CSUDP. Data *inflow*, kebutuhan air, evaporasi, faktor pembatas dan diskritisasi diperlukan untuk input program. Keluaran program berupa tahapan, tampungan waduk, pelepasan, dan fungsi tujuan. *Rule curve* hasil optimasi berada pada zona normal, sehingga *rule curve* ini bisa dijadikan dasar pengoperasian Waduk Dolok. Waduk Dolok mampu memenuhi kebutuhan air irigasi seluas 1.296 ha, sedangkan sisanya untuk kebutuhan air baku dan pemeliharaan sungai.

PENDAHULUAN

Pembangunan Waduk Dolok yang terletak di DAS Dolok, Kabupaten Demak, Jawa Tengah merupakan salah satu solusi untuk mengatasi masalah kurangnya ketersediaan air pada DAS Dolok (BBWS Pemali Juana, 2016). Untuk dapat memanfaatkan tampungan waduk sebaik mungkin diperlukan pengoperasian sehingga kebutuhan yang direncanakan dapat terpenuhi secara optimal. Salah satu metode yang digunakan untuk menyusun pedoman pengoperasian waduk adalah dengan model optimasi. Penelitian ini bertujuan untuk menyusun pola operasi Waduk Dolok yang optimal dengan menggunakan program dinamik.

Pola operasi adalah patokan operasional periode suatu waduk dimana debit air yang dikeluarkan oleh waduk harus mengikuti ketentuan agar elevasinya terjaga sesuai dengan rancangan (Samosir et al, 2015). Pola operasi waduk paling sedikit memuat tata cara pengeluaran air dari waduk sesuai dengan kondisi volume dan/atau elevasi air waduk dan kebutuhan air serta kapasitas sungai di hilir bendungan (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2015).

Model optimasi merupakan salah satu alternatif dalam menyusun pedoman pengoperasian waduk dengan memperhatikan semaksimal mungkin aspek-aspek yang berkaitan dengan tujuan pemanfaatan waduk, serta melibatkan segala kendala yang membatasi upaya pemanfaatan sumber daya air tersebut (Jayadi, 1993). Ada

tiga tahapan dalam mempersiapkan model optimasi, yaitu mengidentifikasi fungsi objektif, *decision variable* secara kuantitatif, dan faktor yang membatasi (Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2004). Beberapa teknik optimasi yang digunakan untuk operasi waduk antara lain program linier, program non linier, program dinamik (deterministik dan stokastik), pembagian zona peruntukan dengan cara *rule curve*, serta pola pengoperasian baku (SOP) (Jayadi, 1993; Suharyanto, 2005).

Program dinamik yang digunakan dalam penelitian ini adalah program dinamik deterministik. Menurut Sri Harto (1985), optimasi deterministik adalah optimasi yang tidak memasukkan “kesempatan kejadian” dari masing-masing variabelnya, dimana setiap masukan dengan sifat-sifat tertentu akan menghasilkan keluaran yang tertentu juga. Debit *inflow*, evaporasi dan target kebutuhan sebagai input program pada penelitian ini sudah ditentukan. Dengan bantuan perangkat lunak CSUDP (*Colorado State University Dynamic Program*) diharapkan dapat menghasilkan keluaran nilai fungsi objektif, pelepasan dan elevasi waduk yang bisa dijadikan dasar dalam penyusunan *rule curve* yang optimal.

METODE

Penelitian Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder yaitu data yang diperoleh dari instansi terkait berupa : data curah hujan sepanjang 13 tahun, data klimatologi, data irigasi, data teknis waduk, data DAS, serta data penduduk. Data tersebut kemudian dianalisis untuk memperoleh *inflow* dan *outflow* waduk.

Analisis *Inflow* dan *Outflow* waduk

Inflow waduk diperoleh dari perhitungan debit berdasarkan data hujan, hari hujan, dan evapotranspirasi dengan menggunakan Metode Mock. Kelebihan metode yang diperkenalkan oleh Dr. F.J.Mock ini adalah hasil analisisnya lebih akurat karena lebih banyak mempertimbangkan keadaan alam yang mempengaruhi ketersediaan air (Habibi, 2010). Hasil analisis Model Mock divalidasi dengan debit observasi menggunakan cara grafis dan kriteria statistik. Kriteria statistik yang digunakan adalah R^2 dan NSE seperti pada persamaan 1 dan persamaan 2. Apabila debit simulasi nilainya mendekati debit observasi maka hasil perhitungan debit dengan metode Mock bisa digunakan untuk analisis selanjutnya. Kriteria R^2 yang digunakan adalah jika bernilai $\geq 0,60$ disebut “good”, dan jika $< 0,60$ disebut “bad”. Sedangkan uji statistik terhadap NSE, apabila nilainya $\geq 0,75$ mempunyai kriteria “good”, nilai $0,36 \leq NSE < 0,75$ adalah “satisfactorily”, dan $NSE < 0,36$ adalah “poor” (Hidayat et al, 2016; Priyanto, 2016; Suprayogi et al, 2013).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim,i})]^2}{\sum (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i})^2 \sum (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim,i})^2} \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i})^2} \quad (2)$$

Dengan, R^2 : koefisien determinasi, NSE : *Nash-Sutcliffe Coefficient of Efficiency*, Q_{obs} : debit observasi (m^3/s), Q_{sim} : debit simulasi (m^3/s), \bar{Q}_{obs} : rata-rata debit observasi (m^3/s), \bar{Q}_{sim} : rata-rata debit simulasi (m^3/s).

Outflow waduk berupa target kebutuhan air irigasi, air baku dan pemeliharaan sungai. Besarnya kebutuhan air irigasi diperoleh dari data Skema Pola Tanam DI Dolok Tahun 2017/2018 dengan luas DI 1296 ha. Sedangkan kebutuhan air baku diperoleh berdasarkan jumlah penduduk dan kebutuhan air perkapita berdasarkan kriteria perencanaan air bersih (Direktorat Jenderal Cipta Karya, 1996). Besarnya kebutuhan air untuk aliran pemeliharaan sungai adalah debit andalan Q95% dari data ketersediaan air yang ada kemudian dipilih nilai yang terendah dari nilai Q95% untuk 12 bulan yang ada (Hatmoko et al, 2020; Radhika et al, 2013).

Analisis Program Dinamik

Langkah selanjutnya adalah merumuskan fungsi tujuan dan fungsi kendala. Fungsi tujuan pada optimasi waduk dengan program dinamik seperti pada penelitian sebelumnya bisa berupa memaksimalkan fungsi (Natalia P.R., 2008; Nuf'a et al, 2016; Resmi, 2015) ataupun meminimumkan fungsi (Wulandari et al, 2012). Tujuan optimasi operasi waduk pada penelitian ini adalah untuk meminimalkan penyimpangan relatif antara pelepasan air waduk dan kebutuhan air yaitu perbandingan antara selisih target kebutuhan air dan pelepasan air waduk dengan target kebutuhan air. Sedangkan fungsi kendala berupa faktor pembatas tampungan waduk dan pelepasan. Dengan menggunakan kurva hubungan antara elevasi muka air – volume – dan luas genangan waduk seperti pada gambar 1 ditentukan faktor pembatas tampungan yaitu $9,860 \leq S_i \leq 34,09$ juta m^3 . Sedangkan faktor pembatas pelepasan yang digunakan adalah $0 \leq X_i \leq$ target kebutuhan air. Diskritisasi adalah membagi data menerus ke dalam jumlah terbatas elemen diskrit atau menjadi beberapa interval. Diskritisasi untuk tampungan (ΔS) diperoleh dengan membagi selisih antara tampungan maksimum dan tampungan minimum dengan jumlah diskrit, yaitu $\Delta S = 0,2423$ juta m^3 dengan jumlah diskrit 100. Input data yang digunakan untuk masukan *software* CSUDP adalah *inflow*, target kebutuhan air, dan evaporasi selanjutnya diketik dalam *software* notepad dan disimpan dengan penamaan file **namafilename.dat**.

Rumusan model program dinamik meliputi : *stage*, *state variables*, *decision variables*, fungsi tujuan, fungsi transformasi keadaan, fungsi kendala dan persamaan rekursif (Jayadi, 1993; Limantara & Soetopo, 2009).

a. *Stage*

Stage merupakan tahap atau periode tinjauan persoalan. Pada penelitian ini optimasi dihitung berdasarkan data *inflow* yang tersedia menggunakan debit andalan, sehingga untuk periode setengah bulanan jumlah *stage* adalah 312 (dalam 13 tahun).

b. *State Variables*

State variables merupakan tampungan awal waduk (S_i) pada *stage* ke- i .

c. *Decision variables*

Decision variables pada penelitian ini adalah pelepasan air waduk pada periode i (X_i).

d. Fungsi Tujuan

Tujuan optimasi ini adalah meminimalkan penyimpangan relatif antara pelepasan air waduk dan kebutuhan air yang dinyatakan dengan perbandingan

antara selisih target kebutuhan air dan pelepasan air waduk dengan target kebutuhan air. Fungsi tujuan dinyatakan pada persamaan 3 yaitu :

$$\text{Max } Z = \sum_{i=1}^N \frac{|X_i - T_i|}{T_i} \quad (3)$$

dengan, Z = nilai fungsi tujuan, i = urutan periode operasi waduk, N = banyaknya periode yang ditinjau, T_i = Target Kebutuhan Air Irigasi dan Air Baku pada periode i , X_i = Pelepasan air waduk pada periode i .

e. Fungsi Transformasi Keadaan

Fungsi transformasi keadaan dalam studi ini adalah perubahan tampungan waduk dari periode satu ke periode berikutnya. Persamaan yang digunakan adalah persamaan neraca air waduk sebagai berikut.

$$X_i = S_i - S_{i+1} + I_i - E_i - SO_i \quad (4)$$

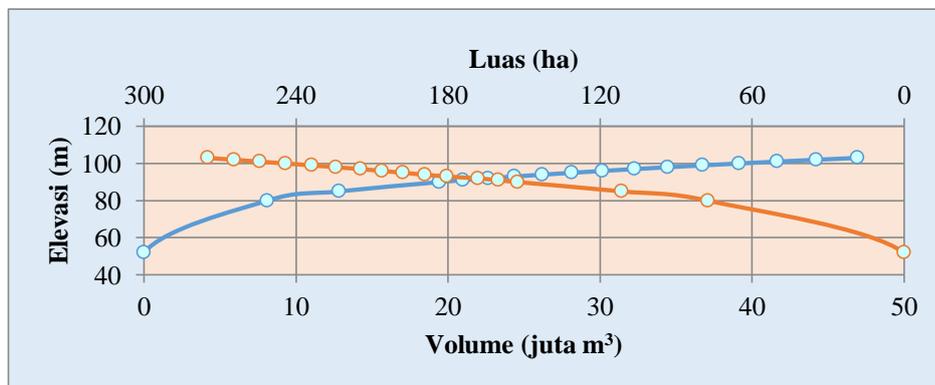
Dengan, X_i = pelepasan (*release*) waduk pada periode i , S_i = volume tampungan waduk (*storage*) pada awal periode i , S_{i+1} = volume tampungan waduk (*storage*) pada awal periode $i+1$, I_i = *inflow* waduk pada periode i , E_i = penguapan (*evaporation*) waduk pada periode i ($e_i \times A_i$), e_i = laju evaporasi pada periode i , SO_i = limpasan (*spill out*) waduk pada periode i ($\max(S_i + I_i - E_i - X_i - S_{\max}, 0)$)

Penguapan waduk pada periode i diperoleh dari laju evaporasi dengan luasan waduk. Dari grafik hubungan antara muka air - volume tampungan - luas genangan waduk pada gambar 1 kemudian dicari persamaan hubungan antara luas permukaan waduk dan volume waduk seperti pada gambar 2. Persamaan hubungan luas genangan dan volume dinyatakan pada persamaan 5 berikut.

$$y = -0.0435 \left(\frac{S_i + S_{i+1}}{2} \right)^2 + 7.7924 \left(\frac{S_i + S_{i+1}}{2} \right) + 10.269 \quad (5)$$

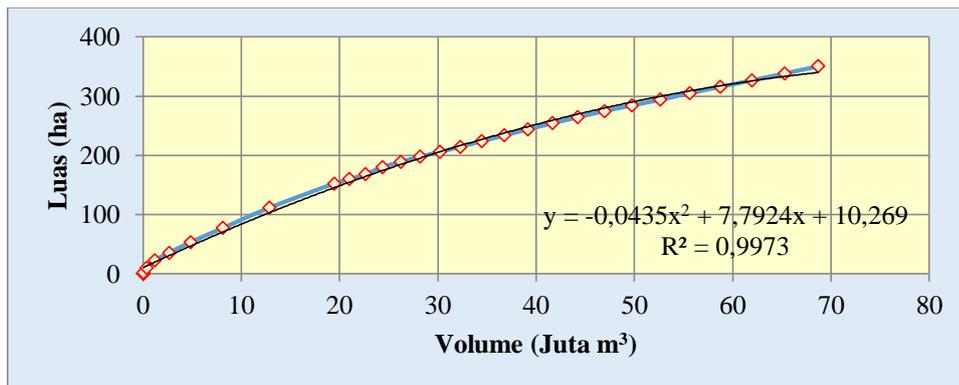
Dengan, y = luas permukaan waduk (ha), x = volume waduk (juta m^3) sehingga besarnya evaporasi pada periode i dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$E_i = e_{ix} \left[-0.0435 \left(\frac{S_i + S_{i+1}}{2} \right)^2 + 7.7924 \left(\frac{S_i + S_{i+1}}{2} \right) + 10.269 \right] \quad (6)$$



Sumber : Hasil Perhitungan, 2018

Gambar 1. Kurva H-V-A Waduk Dolok



Sumber : Hasil Perhitungan, 2018

Gambar 2. Hubungan Luas Permukaan Waduk dan Volume Waduk

f. Fungsi Kendala

Fungsi kendala pada penelitian ini berdasarkan fungsi tujuan seperti pada persamaan 3 adalah batas pelepasan air waduk dan batasan tampungan air waduk. Tampungan yang disediakan untuk kebutuhan air irigasi dan air baku adalah tampungan antara elevasi +83,0 m sampai dengan elevasi +98,0 m. Untuk melaksanakan fungsi waduk dalam pengendalian banjir disediakan tampungan antara elevasi +98,0 m sampai dengan +102,0 m. Fungsi kendala dirumuskan $S_{min} \leq S_i \leq S_{max}$ (7) untuk batasan tampungan dan $X_{min} \leq X_i \leq X_{max}$ (8) untuk batasan pelepasan air waduk.

g. Persamaan Rekursif

Antara keputusan optimal pada periode i dengan keputusan optimal pada periode $(i+1)$ dapat dinyatakan dengan hubungan seperti pada persamaan 8 yaitu $F_i(S_i) = \max[f_i(S_i, X_i) + F_{i+1}(S_{i+1})]$.

Pada perangkat lunak CSUDP pernyataan fungsi tujuan, fungsi transformasi keadaan dan fungsi kendala, dan fungsi pembaca data masukan pada model operasi waduk harus dituliskan dalam Bahasa C.

a. Pernyataan Fungsi Tujuan

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
/* use itrace for writing user-defined optimal traceback output files*/
typedef char logical;
logical itrace;
/* reserved variable names used by CSUDP */
double xin,xout,ucon,fobj,rvar,In[312][3];
long istage,jxin,kxout,lucon,iper;
/* user declares any additional variables here which are shared
with the other user defined C functions ( use double or long ) */
long k;
void object()
{
/* user declares any additional variable here for this C function
only ( use static double, static long, or static int ) */

/* user enters objective function value here for current istage */

k=istage;
fobj=(fabs(In[k-1][1]-ucon))/In[k-1][1];
}
```

b. Pernyataan Fungsi Transformasi Keadaan dan Fungsi Kendala

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#define max(_a,_b) ((_a)<(_b)) ? (_b):(_a)
/* use itrace for writing user-defined optimal traceback output files*/
typedef char logical;
logical itrace;
/* reserved variable names used by CSUDP */
double xin,xout,ucon,fobj,rvar,xmax,In[312][3],xmin,xbatas;
long istage,jxin,kxout,lucon,iper;
/* user declares any additional variables here which are shared
   with the other user defined C functions ( use double or long ) */
   long k;
   double SPO,SO,ucont;

void state()
{
   /* user declares any additional variable here for this C function
      only ( use static double, static long, or static int) */

   /* user provides state dynamics equation here */

   k=istage;
   ucont>=0;
   0<=ucon<=2.48;
   xmin=9.86;
   xmax=34.09;
   SPO=xin+In[istage-1][0]-(In[istage-1][2]*((-
   0.0435*(pow((xin+xout)/2,2)))+(7.7924*((xin+xout)/2))+10.269))-ucont-
   xmax;
   SO=max(SPO,0);
   ucon=xin-xout+In[istage-1][0]-(In[istage-1][2]*((-
   0.435*(pow((xin+xout)/2,2)))+(7.7924*((xin+xout)/2))+10.269))-SO;
   if (ucon<0) ucon=0;
}
```

c. Pernyataan Fungsi Pembaca Data

```
#include <stdio.h>
FILE *data;
/* this function allows user to read in any additional data
   needed for problem */

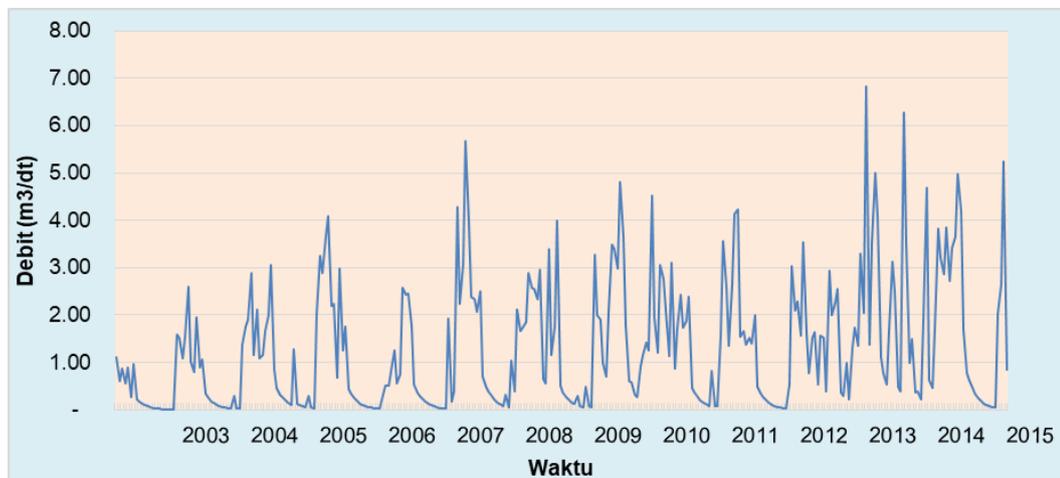
/* user declares any additional variables here which are shared
   with the other user defined C functions ( use double or long ) */
long m,n;
double In[312][3],inputdolok;
void readin()

{
   /* user declares any additional variable here for this C function
      only ( use static double, static long, or static int) */
   /*read input data*/
   data=fopen("inputdolok$.dat","r");
   for(m=1;m<=312;m=m+1)
   {
      for(n=1;n<=3;n=n+1)
      {
         fscanf(data,"%lf",&inputdolok);
         In[m-1][n-1]=inputdolok;
      }
   }
   fclose(data);
}
```

HASIL

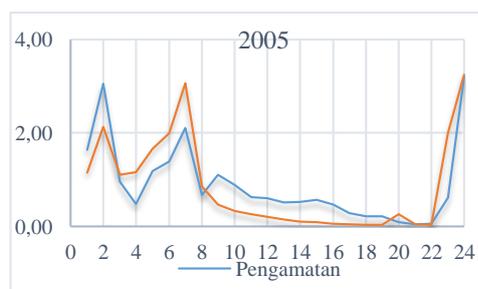
Inflow dan Outflow Waduk

Perhitungan *inflow* Waduk Dolok dilakukan dengan menggunakan Metode Mock. Metode ini merupakan model hidrologi dengan prinsip kerja keseimbangan air untuk aliran dengan hujan sebagai data masukan model. Hasil analisis debit dengan Metode Mock sepanjang 13 tahun (2003 – 2015) menunjukkan bahwa debit simulasi terkecil sebesar 0,01 m³/dt pada periode November-2 tahun 2003, sedangkan debit simulasi terbesar sebesar 6,85 m³/dt terjadi pada periode Desember-1 tahun 2013, seperti pada gambar 3. Hasil perhitungan debit simulasi tersebut kemudian dikalibrasi dengan debit pengamatan yang ada di stasiun AWLR Bendung Barang yang terletak di hilir DAS Waduk Dolok. Debit pengamatan yang tersedia adalah tahun 2005, 2010 dan tahun 2013. Berdasarkan gambar 4 dapat dilihat bahwa debit perhitungan dan debit pengamatan memiliki kecenderungan yang hampir sama. Selain disajikan dengan grafik, kalibrasi juga dilakukan dengan menggunakan uji statistik melalui perhitungan koefisien determinasi (R^2) dan *Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient* (NSE). Perhitungan uji statistik secara rinci dapat dilihat pada Lampiran D. Nilai R^2 yang diperoleh sebesar 0,6 (*good*) dan NSE 0,54 (*satisfactorily*). Hal ini menunjukkan bahwa model tersebut dapat digunakan pada DAS.

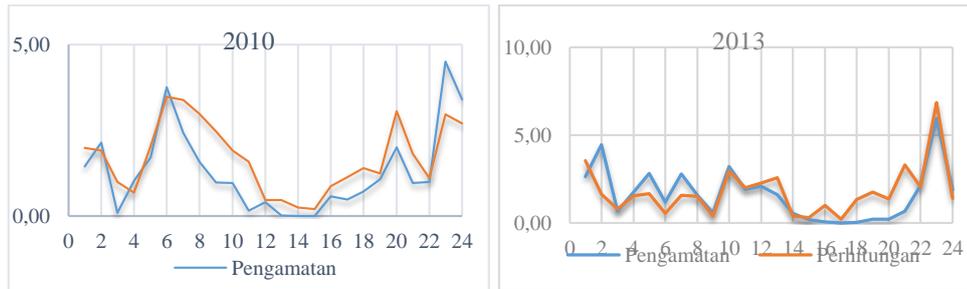


Sumber : Hasil Perhitungan, 2018

Gambar 3. Debit DAS Waduk Dolok dengan Metode Mock (2003-2015)



Gambar 4. Kalibrasi Model



Sumber : Hasil Perhitungan, 2018

Gambar 5. Kalibrasi Model (lanjutan)

Kebutuhan air irigasi diperoleh dari data Skema Pola Tanam DI Dolok Tahun 2017/2018. Sedangkan perhitungan kebutuhan air baku dilakukan dengan dasar jumlah penduduk pada lokasi studi. Untuk menganalisis kebutuhan air baku pada masa mendatang perlu dihitung pula proyeksi jumlah penduduk. Selanjutnya dihitung jumlah kebutuhan air dari sektor domestik dan non domestik berdasarkan Kriteria Perencanaan Ditjen Cipta Karya. Kebutuhan air total yang digunakan pada analisis ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kebutuhan Air

Minggu ke	Kebutuhan Air (m ³ /detik)											
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ag	Sep	Okt	Nov	Des
1	1,46	1,43	1,16	1,65	1,46	1,43	0,84	0,85	0,85	0,53	1,19	1,72
2	1,46	1,00	1,77	1,47	1,46	1,00	0,84	0,85	0,85	0,53	1,91	1,47

Sumber : Hasil Perhitungan, 2018

Analisis Program Dinamik

Hasil *running software* CSUDP diperoleh nilai total pelepasan air waduk sepanjang 312 periode sebesar 564,69 juta m³ dengan rata – rata volume pelepasan waduk sebesar 1,81 juta m³ atau setara 1,40 m³/detik. Sedangkan nilai total kebutuhan air sebesar 520,19 juta m³ dengan rata – rata volume kebutuhan air sebesar 1,67 juta m³ atau setara 1,29 m³/detik. Hal ini menunjukkan bahwa dengan jumlah pelepasan waduk yang lebih besar dari pada kebutuhan air, waduk mampu memenuhi kebutuhan air, baik irigasi, air baku, maupun untuk pemeliharaan sungai. Berdasarkan tampungan waduk dapat diperoleh elevasi waduk dengan menggunakan persamaan hubungan antara elevasi dan tampungan waduk yaitu $y = -0,0083x^2 + 1,0254x + 72,846$ seperti pada gambar 5. Tinggi muka air pada awal dan akhir periode berada pada elevasi atas, namun pada beberapa periode terlihat mendekati elevasi minimum.



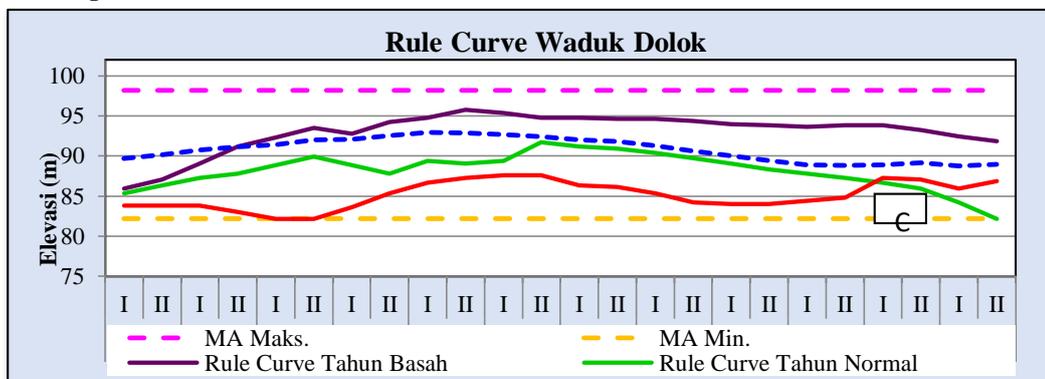
Sumber : Hasil Perhitungan, 2018

Gambar 6. Elevasi Muka Air Waduk Hasil Optimasi dengan Software CSUDP

PEMBAHASAN

Hasil *Rule Curve* pengoperasian waduk adalah kurva/grafik yang menunjukkan hubungan antara elevasi muka air waduk, debit *outflow* dengan waktu (mingguan, dalam satu tahun) (Natalia P.R., 2008). Tinggi muka air waduk rata-rata hasil running program dinamik kemudian dibuat grafik dua mingguan sehingga terlihat hubungan antara elevasi dan periode waktu. Aturan umum dalam simulasi pengaturan *release* waduk adalah: air waduk tidak boleh turun di bawah tampungan efektif, batas bawah tampungan efektif ini ditentukan oleh tingginya lubang outlet waduk. Air waduk tidak dapat melebihi batas atas tampungan efektif, batas atas tampungan efektif ini ditentukan oleh puncak *spillway*. Apabila terjadi kelebihan air, maka kelebihan ini akan melimpah melalui *spillway* (Pradwipa, Jayadi, & Istiarto, 2019).

Rule curve optimasi ini disandingkan dengan *rule curve* tahun basah, tahun normal dan tahun kering. Terdapat tiga zona pada gambar 6 yaitu zona banjir (zona A), zona normal (zona B), dan zona kering (zona C). *Rule curve* hasil optimasi CSUDP berada pada zona normal, yaitu terletak antara elevasi tahun basah dan elevasi tahun normal. Dengan demikian *rule curve* ini bisa dijadikan dasar pengoperasian Waduk Dolok. Apabila dalam pelaksanaan operasi waduk kondisi muka air berada diluar *rule curve* maka perlu diatur kembali sehingga muka air berada pada zona normal.



Sumber : Hasil Perhitungan, 2018

Gambar 7. *Rule Curve* Waduk Dolok Berdasarkan Software CSUDP

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan di DAS Waduk Dolok dapat disimpulkan bahwa rata – rata volume pelepasan Waduk Dolok berdasarkan hasil optimasi menggunakan program CSUDP sepanjang 312 periode (2 minggu) adalah 1,81 juta m³ atau setara 1,40 m³/detik. Sedangkan rata – rata volume kebutuhan air sebesar 1,67 juta m³ atau setara 1,29 m³/detik. Hal ini menunjukkan bahwa dengan jumlah pelepasan waduk yang lebih besar dari pada kebutuhan air, waduk mampu memenuhi kebutuhan air irigasi seluas 1296 ha. Sedangkan sisanya untuk kebutuhan air baku serta untuk pemeliharaan sungai.

Rencana pola operasi Waduk Dolok yang optimum didasarkan pada rule curve hasil optimasi. Rule curve hasil optimasi berada pada zona normal, yaitu terletak antara elevasi maksimum waduk dan elevasi tahun nomal. Dengan demikian rule curve ini bisa dijadikan dasar pengoperasian waduk.

SARAN

Rule curve hasil optimasi dengan program dinamik ini bisa digunakan sebagai pedoman aturan pelepasan air Waduk Dolok, namun kedepannya perlu dilakukan peninjauan kembali dengan memperhatikan debit *inflow* aktual waduk sehingga pemanfaatan air lebih optimum. Selain itu pengoperasian waduk dengan mempertimbangkan pengendalian banjir perlu dilakukan pada penelitian selanjutnya, sehingga fungsi waduk sebagai pengendali banjir juga bisa lebih optimal.

DAFTAR RUJUKAN

- BBWS Pemali Juana. (2016). *Detail Desain Bendungan Dolok*.
Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. (2004). *Pedoman Pengoperasian Waduk Tunggal Pd T-25-2004-A*. Indonesia.
Direktorat Jenderal Cipta Karya. (1996). *Kriteria Perencanaan Ditjen Cipta Karya*.
Habibi. (2010). *Kelayakan Debit Andalan pada Sungai Poboya untuk Suplai Air Bersih Kecamatan Palu Timur*.
Hatmoko, W., Levina, Radhika, Amirwandi, & Firmansyah, R. (2020). *Quantification of Environmental Flow Requirement for some Rivers in West Java*. In *E3S Web of Conferences*. Bali: EDP Sciences.
Hidayat, L., Sudira, P., Susanto, S., & Jayadi, R. (2016). *Validasi Model Hidrologi SWAT di daerah Tangkapan Air Waduk Mrica*. *Agritech*, 36(4), 467–474.
Jayadi, R. (1993). *Pemakaian Model Program Dinamik Deterministik Secara Berurutan untuk Optimasi Sistem Waduk Seri*. Yogyakarta: Fakultas Teknik UGM.
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2015). *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat No.27/PRT/M/2015 tentang Bendungan*. Indonesia.
Limantara, L. M., & Soetopo, W. (2009). *Statistika Terapan untuk Teknik Pengairan*. Malang: CV. Citra Malang.
Natalia P.R., K. (2008). *Penyusunan Rule Curve Waduk Menggunakan Model Program Dinamik Deterministik*. *Jurnal Teknik Sipil*, 8(3), 225–236.
Nuf'a, H., Montarich, L. L., & Soetopo, W. (2016). *Optimasi Air Waduk Gondang dengan Metode Dinamik Deterministik*. *Jurnal Teknik Pengairan*, 7(1), 25–36.

- Pradwipa, D. P., Jayadi, R., & Istiarto. (2019). *Kajian Pemanfaatan Sumber Daya Air Waduk Serbaguna Jatigede, Jawa Barat*. Renovasi, 4(2).
- Priyanto, R. Y. (2016). *Pendugaan Debit Puncak Menggunakan Model SWAT di Sub DAS Cikadu, Bandung*. Institut Pertanian Bogor.
- Radhika, Fauzi, M., Rahmawati, Rendy, F., Anthon, F., & Hatmoko, W. (2013). *Neraca Ketersediaan Air Permukaan Dan Kebutuhan Air Pada Wilayah Sungai di Indonesia*. In Kolokium Hasil Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air. Bandung.
- Resmi, W. M. (2015). *Model Optimasi Pemanfaatan Air Waduk Wonogiri menggunakan Program Dinamik Deterministik*. Universitas Gadjah Mada.
- Samosir, C. S., Soetopo, W., & Yuliani, E. (2015). *Optimasi Pola Operasi Waduk untuk Memenuhi Kebutuhan Energi Pembangkit Listrik Tenaga Air (Studi Kasus Waduk Wonogiri)*. Jurnal Teknik Pengairan, 6(1), 108–115.
- Suharyanto. (2005). *Pengoperasian Waduk Dalam Rangka Penanganan Bahaya Kekeringan dan Banjir*. Media Komunikasi Teknik Sipil, 13(1), 60–70.
- Suprayogi, I., Handayani, Y. L., Darmayanti, L., & Trimaijon. (2013). *Analisis Hujan Debit pada DAS Indragiri Menggunakan Pendekatan Model IHACRES*. Konferensi Nasional Teknik Sipil 7, A177–A184.
- Wulandari, D. A., Darsono, S., & Legono, D. (2012). *Optimasi Pemanfaatan Air Waduk Wonogiri dengan Program Dinamik*. Kumpulan Intisari PIT XXIX HATHI 2012.