



SIMULASI OPTIMASI (SIMOP) WADUK PENGGA DAN WADUK BATUJAI PADA DAS DODOKAN UNTUK PEMENUHAN KEBUTUHAN AIR BAKU DI KAWASAN EKONOMI KHUSUS (KEK) MANDALIKA

Oleh

Restusari Evayanti¹⁾ & Sugiharta²⁾

^{1,2}Fakultas Teknik Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Al-Azhar Mataram

Jalan Unizar No.20 Turida Cakranegara Mataram

Email: ¹restusariEvayanti@gmail.com & ²artalenge@yahoo.co.id

Abstract

The Mandalika Special Economic Zone (SEZ) in the southern part of Lombok's river basin requires a large supply of raw water. The Mandalika Special Economic Zone (SEZ) is located in an area with less supportive water potential, so it requires water supply from other sources, namely the Pengga reservoir in the Dodokan river basin (578.92 km²). In the Dodokan watershed there are 93 headworks (headwork / HW) in the form of 65 weirs, 26 reservoirs, and 2 dams downstream of the main river (Batujaai and Pengga). The Pengga reservoir (V_{eff} = 21000000 m³) is located downstream of the Batujaai reservoir (V_{eff} = 15429300 m³). The Pengga Reservoir is currently operated for irrigation (including a micro hydro power plant). In addition, the reservoir is planned to serve 200 l/sec raw water for The Mandalika Special Economic Zone (SEZ). The reservoir is in the HLD (High Level Diversion) interconnection system so that it is interdependent with the allocation of water in other HWs. To obtain optimal water allocation, a water balance behavior study was conducted during the 25 year timeseries (1994-2019). Optimization simulations (simop) in each cascade reservoir use a mass balance equation with sustainability-efficiency-equity (SEE) criteria, constraints and main inputs in the form of local inflow and water demand. In the optimization simulation, pay attention to: i) overflow from HW in the upstream Batujaai dam, ii) existing water needs in Batujaai (2860 ha) and DI Pengga (3189 ha), iii) existing raw water needs in the Batujaai reservoir 130 l / s, and iv) as a result of the supply from DI Gebong to DI Pengga so that it reduced the water demand load to the Pengga reservoir by about 35%. From the hydrological analysis, the mean: i) rain in the entire catchment area is 1308 mm, ii) rain in DI 1366 mm, iii) local inflow in the Batujaai reservoir 28.68 million m³ and the Pengga reservoir 26.42 million m³, iv) irrigation water needs (existing cropping pattern rice-paddy / palawija-palawija, planting intensity 300%, the beginning of the planting season in Batujaai, Des1 and DI Pengga, Nov3) 99.84 million m³, and v) raw water needs of 10.41 million m³. It is recommended to take 200 l/s of raw water in the Pengga reservoir. Based on optimization simulations, the allocation of irrigation water can be proportional-evenly with the K_{min} achievement of 41% -42% (K3 class), there is no K4 class (20% -40%) even in the year of the minimum local inflow. Reservoir performance with the coefficient of Reliability (R) = 100%, Resiliency (R) = 100%, and Vulnerability (V) = 0% which indicates that operations can be sustainable. The target of raw water supply to the Mandalika SEZ can be achieved provided that real-time water allocation must be tight, with centralized control by the WS management.

Keywords: Optimization Simulations, Raw Water & Irrigation.

PENDAHULUAN

Seiring rencana pengembangan kawasan ekonomi khusus (KEK) Mandalika di

Kuta pulau Lombok, dibutuhkan penyediaan air baku yang cukup besar. Sebagaimana diketahui, di sekitar KEK memiliki kondisi



hidrologi (hujan dan ketersediaan air atau *inflow*) yang kurang mendukung, yakni tidak terdapatnya sumber air permukaan, mata air maupun air tanah. Sehingga untuk penyediaan sebagian air baku di kawasan ini (+9 m) diperlukan pasokan dari lokasi sumber air yang memungkinkan, yaitu waduk Pengga (+49 m, estimasi jarak 18.3 km ke KEK).

Waduk Pengga (kapasitas efektif 21000000 m³) terletak 13.08 km di hilir waduk Batujai (kapasitas efektif 15429300 m³) di daerah aliran sungai (DAS) Dodokan (578.92 km²) wilayah sungai (WS) Lombok (4.738 km²) (Gambar 1). Kedua waduk terletak di bagian hilir sungai utama di DAS Dodokan. Diajukannya waduk Pengga sebagai salah satu sumber air baku KEK antara lain disebabkan: i) mempunyai *local inflow* (QL) dari daerah tangkapan air atau *catchment area* (CA) yang cukup luas (176.37 km²), ii) ketika defisit air dapat dibantu dari waduk Batujai, iii) sebagian daerah irigasi (DI) Pengga mendapat *supply* secara kolektif dari bendung Gebong DAS Babak, bendung Sesaot/Sesaot Feeder DAS Jangkok, dan bendung Batu Kantar DAS Remening setelah dikurangi kebutuhan air DI Gebong, dan iv) *trend* tampungan waduk Batujai yang cenderung menurun akibat tingginya sedimentasi.

Lebih lanjut, waduk Pengga terlingkup dalam *water network* sebagai sistem interkoneksi HLD (High Level Diversion). Ilustrasi sistem interkoneksi HLD antara lain sebagai berikut:

1. Sistem interdependen digunakan untuk meningkatkan alokasi air dari DAS basah di WS Lombok bagian Barat ke DAS kering di bagian Selatan, karena di bagian Selatan terdapat potensi areal irigasi (AI) yang terhampar luas namun selalu mengalami defisit air berlebihan.
2. Transfer air antar DAS melalui saluran HLD Babak-Renggung-Rutus (18 km) dan Jangkok-Babak-Jurang Sate (43 km) sejak 1980an. Sampai sekarang, di sistem HLD menjadi semakin kompleks karena terdapat 22 saluran suplesi dalam/lintas DAS

lainnya (total panjang 87 km). Sehingga *water network* menghubungkan 12 DAS (total luas 1888 km²) atau 40% dari luas WS Lombok mencakup DAS: Meninting, Jangkok, Remening, Babak, Dodokan, Renggung, Pare, Rere, Palung, Moyot, Aikambat dan Belimbing.

3. Bangunan utama pengambilan air (node atau headwork atau HW) dari jenis *reservoir*, *weir* dan *diversion*, mencakup 3 bendungan (BD), 77 embung (E), 355 bendung (B), serta 55 *diversion* di saluran Jangkok-Babak-Jurang Sate. Total 487 HW dimaksud didominasi untuk mengairi AI 98.878 ha di 432 DI dan sedikit untuk penyediaan air baku 404 l/dt.
4. Terdapat pengambilan air baku 2442 l/dt yang secara langsung dari 42 titik sumber mata air yang tersebar di DAS: Jangkok, Babak, Aikambat, Meninting Midang, Kelongkong Remening, Renggung, Palung dan Belimbing.

Dari tinjauan awal neraca air dalam dokumen rencana alokasi air tahunan (RAAT) WS Lombok Air 2017/2018 sampai 2019/2020 (BWS NT I), bahwa keberadaan waduk Pengga berpotensi untuk mendukung sebagian penyediaan air baku KEK. Target itu dapat tercapai melalui optimasi alokasi air tidak hanya dari waduk Pengga, melainkan waduk Batujai dan waduk Pengga sebagai sub sistem *cascade* dari sistem Dodokan. Dalam Farriansyah 2019, optimasi dimaksud perlu menerapkan kriteria SEE (sustainability-efficiency-equity) yaitu: i) keberlanjutan operasional dengan tetap mengalokasikan aliran pemeliharaan sungai/ekosistem, ii) pemberian air dengan tidak melampaui kebutuhan air dan memperhatikan ketersediaan air, dan iii) mengalokasikan air sesuai prioritas dan mengalihkan air secara proporsional-merata antar pengguna sejenis. Dalam hal alokasi air secara proporsional-merata serta mengingat irigasi sebagai pengguna air terbesar, maka antar sesama pengguna ini perlu mendapatkan jatah air sebagaimana rasio



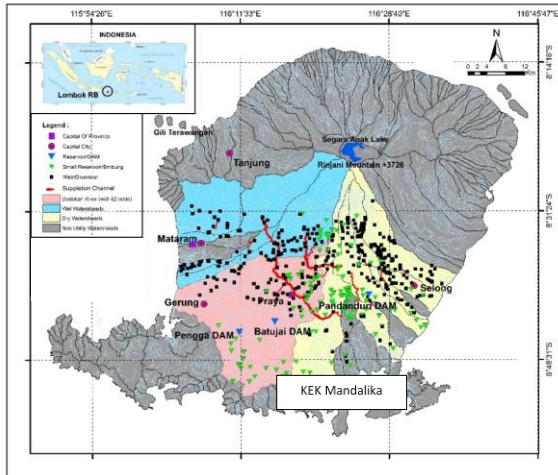
pemberian air (release) terhadap kebutuhan air (demand) atau faktor K atau K yang bernilai sama/hampir sama. Ketentuan berikutnya, menerapkan pola tata tanam (PTT) standar padi-padi/palawija-palawija (pd-pd/pal-pal), dengan awal musim tanam (AMT) berdasarkan awal musim hujan (AMH) sebagaimana Kementerian Pertanian dalam kalender tanam (KATAM) yang terbit tiap tahun. Selain itu, dalam operasional alokasi air secara *real time* hendaknya tiap HW dikendalikan secara terpusat.

Khususnya waduk Batujai dan waduk Pengga dapat diinformasikan sebagai berikut:

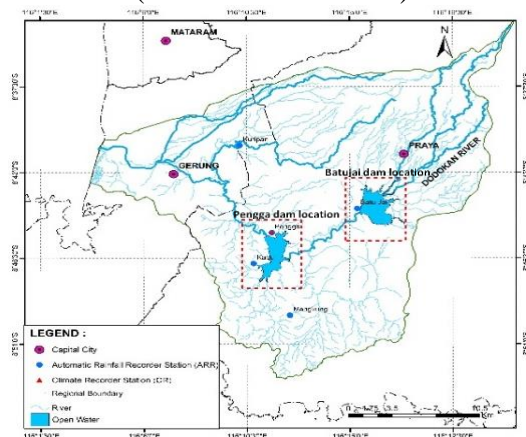
1. Kedua waduk terdapat di DAS Dodokan, tepatnya di sungai utama bagian hilir. Di DAS terbesar di WS Lombok ini terdapat 93 HW berupa 65 bendung, 26 embung dan 2 bendungan. Waduk Batujai (08⁰44'8.52'', 116⁰15'28.68'', +89.00) terletak di Praya, ibukota Kabupaten Lombok Tengah. Waduk ini melayani irigasi 2860 ha di Kabupaten Lombok Tengah dan kebutuhan air baku 130 l/dt. Di jarak 13.08 km dari Batujai ke hilir terletak waduk Pengga (08⁰45'20.16'', 116⁰11'22.2'', +57.00) melayani DI Pengga (3189 ha) di Lombok Tengah (67%) dan Lombok Barat (33%). Sebelum menuju saluran induk irigasi, air dari waduk Pengga untuk memutar turbin 400 KVA. Informasi ini pada Gambar 2.
2. Tipe sungai Dodokan adalah *ephemeral stream* dengan aliran terputus. Di waduk Batujai terhampar luas eceng gondok dan sedimen yang berpotensi menurunkan volume efektif. Tumbuhan ini juga terdapat di Pengga dalam jumlah lebih sedikit.
3. Ketersediaan air di waduk Batujai berasal dari limpahan HW-HW di hulu waduk Batujai, yaitu bendung Tiwuguk, bendung Juring, bendung Kali Sade, bendung Surabaya, bendung Batu Bangka, bendung Gerantung dan embung Enem serta suplesi dari kedua saluran HLD.
4. Waduk Batujai mendapat QL dari CA= 37.15 km² ditambah limpahan HW-HW di hulu S Dodokan. *Inflow* waduk Pengga berupa QL dari CA =176.37 km² dan kontribusi dari waduk Batujai.
5. Rerata hujan wilayah di CA waduk Batujai 1427 mm/thn sedangkan di DI Batujai 1434 mm/thn. Adapun rerata hujan wilayah di CA waduk Pengga 1290 mm/thn sedangkan di DI Pengga 1325 mm/thn. Efisiensi irigasi di kedua DI sekitar 40-55% (BWS NT I dari Pengamat Pengairan, 2019-2020). Perkolasi di AI sekitar 0.9-1.5 mm/hari. Rerata evaporasi di waduk Batujai 3.28 mm/hari dan waduk Pengga 3.00 mm/hari yang antara lain pos iklim Pengga sebagai yang terdekat.
6. Bobot kehilangan air di waduk Batujai 0.33% dan di waduk Pengga 0.15% masing-masing terhadap volume air waduk. Bobot ini dihitung dari evaporasi muka air terhadap permukaan air waduk dan rembesan yang terukur di V-notch (Farriansyah, 2019).
7. Berdasarkan data BWS NT I dari Pengamat Pengairan setempat tahun 2015 – 2019 bahwa PTT DI Batujai berupa pd-pd/pal-pal, AMT Des1 dan intensitas tanam (cropping intensity atau CI) 288-300%, sedangkan DI Pengga dengan PTT berupa pd-pd/pal-pal, AMT Nov3 dan CI 281-300%. AMT tersebut sesuai AMH dominan pada Nov3.
8. Dari data operasional Oktober 2013 - Juli 2018 selama 172 periode (El Nino tahun 2015) terdapat kondisi waduk sebagaimana gambar berikut. Dari grafik bahwa kedua waduk mengalami kering total setidaknya 5 kali berdurasi 2 – 5 periode dan pemberian air irigasi cenderung inefisien (release > demand) sehingga faktor K > 100% (Gambar 3), karena operasional waduk tidak direncanakan dan waduk tidak dikendalikan terpusat (Farriansyah, 2019).
9. Karena berada dalam lingkup sistem interkoneksi HLD, dalam hal alokasi air ke DI Gebong, selama ini DI Gebong (1086 ha) mendapat air dari: i) B Gebong – DAS Babak (rerata 438-1022 l/dt), ii) suplesi dari



bangunan bagi BS 3 DI Sesaot – DAS Jangkok (rerata 150-463 l/dt), dan iii) suplesi dari Bendung Batu Kantar – DAS Remening (rerata 231-426 l/dt). Adapun sisa air dari 3 sumber ini selanjutnya digunakan sebagai suplesi ke sebagian DI Pengga (0-1278 l/dt), sehingga akan mengurangi total kebutuhan air DI Pengga yang dibebankan ke waduk Pengga.



Gambar 1. Peta WS Lombok dengan Waduk Batujai – Pengga dan KEK Mandalika (Sumber: BWS NT I)



Gambar 2. Peta lokasi waduk Batujai-Pengga di DAS Dodokan,

Tujuan optimasi waduk Batujai-Pengga untuk mendapatkan perilaku operasional waduk atas rencana penyediaan air baku KEK Mandalika 200 l/dt dengan memperhatikan kebutuhan air eksisting

untuk: i) DI Batujai, ii) air baku di waduk Batujai, dan iii) DI Pengga.

LANDASAN TEORI

Perhitungan Hidrologi: Ketersediaan Air dan Kebutuhan Air Irigasi

1) Metode perhitungan ketersediaan air di waduk

Untuk mengetahui QL di waduk digunakan langkah hitung mundur berdasarkan formula neraca air waduk dengan meninjau catatan volume air waduk (2013-2019) dikurangi dengan kehilangan air waduk, debit pemberian air, dan limpahan. Secara rinci di tiap waduk sebagai berikut:

- Waduk Pengga
 - a) Menghitung QL waduk berdasarkan formula neraca air waduk,
 - b) Mencari model fungsional sesuai persamaan regresi $QL_t = f$ (hujan dan QL)
 - c) Membangkitkan nilai QL menggunakan model fungsional pada butir b untuk selain tahun 2013-2019.
- Waduk Batujai
 - a) Menghitung QL waduk berdasarkan formula neraca air waduk
 - b) Membangkitkan QL menggunakan model fungsional pada butir b dari waduk Pengga untuk selain tahun 2013-2019, karena diasumsikan memiliki karakteristik CA yang serupa dan terdapatnya debit kontribusi dari HW-HW di hulu waduk Batujai.
 - c) Menghitung debit kontribusi dari HW-HW di hulu waduk Batujai berdasarkan selisih butir a dan b pada tahun 2013-2019
 - d) Mencari model fungsional sesuai persamaan regresi debit kontribusi $QSt = f$ (hujan dan QS)
 - e) Membangkitkan debit kontribusi menggunakan model fungsional pada butir d untuk selain tahun 2013-2019.



2) Metode regresi (Soewarno, 1995)
 Metode regresi/regresi berganda digunakan untuk mengestimasi debit berdasarkan rumus fungsional yang dibangun dari data lapangan. Karena hujan-debit saling terkait dan keduanya merupakan besaran kontinyu antar waktu, maka diasumsikan debit saat ini merupakan hubungan dari variabel debit terdahulu, hujan saat ini dan hujan terdahulu. Formulasinya adalah:

$$Y_t = f(X_1, X_2, Y_{t-n} \dots \text{dst})$$

dengan:

X = hujan

Y = debit

Prosedur metode ini adalah:

- 1) Memilih data lapangan yang representatif, yaitu dapat berupa catatan *time series* atau satu tahun atau rerata dari beberapa tahun hidrologi yang memiliki *trend* hujan-debit terbaik.
 - 2) Membangun model regresi berupa rumus fungsional menggunakan MS. Excel *regression*.
 - 3) Memilih model regresi terbaik berdasarkan korelasi terbesar dan *volume error* terkecil.
 - 4) Menghitung debit menggunakan model regresi terpilih.
- 3) Metode perhitungan kebutuhan air irigasi (Ditjen SDA dalam KP-01, 2013)

Satuan kebutuhan air tanaman di sawah (net field requirement, NFR) untuk padi ditentukan oleh: i) penyiapan lahan, ii) penggunaan konsumtif, iii) perkolasi dan rembesan, iv) pergantian lapisan air, dan iv) hujan efektif, dengan rumus:

$$NFR = LP + ET_c + P + WLR - Re$$

dengan :

NFR = Kebutuhan air tanaman di sawah (mm/hari)

LP = Kebutuhan air untuk pengolahan lahan (mm/hari)

ET_c =Kebutuhan air tanaman (consumptive use), mm/hari adalah evaporasi panci A dikalikan koefisien panci (0.75) dan dikalikan koefisien tanaman (K_c).

K_c =Koefisien tanaman yang ditentukan sesuai jenis tanaman dan umur tanaman

WLR =Penggantian lapisan air (mm/hari)

P =Perkolasi (mm/hari)

Re =Hujan efektif padi (mm/hari) diambil sebesar 0.7 kali hujan (R)

Sedangkan untuk tanaman palawija, NFR mengikuti:

$$NFR = ET_c - Re$$

NFR = Kebutuhan air tanaman di sawah (mm/hari)

ET_c =Kebutuhan air tanaman (consumptive use), mm/hari adalah evaporasi panci A dikalikan koefisien panci (0.75) dan dikalikan koefisien tanaman (K_c).

Re = Hujan efektif palawija (mm/hari) diambil mengikuti Tabel A.2.7 pada KP-01 halaman 176.

Kebutuhan air irigasi (QD) di intake HW dihitung dengan:

$$QD = NFR.AC/e$$

dengan:

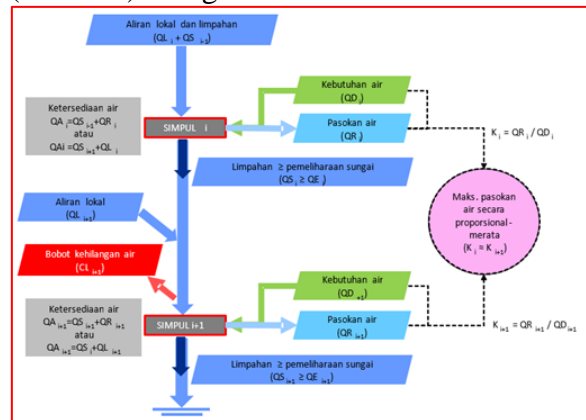
AC =Luas tanam (ha), bahwa AC ≤ AI

AI =Luas sawah irigasi (ha), bahwa CI tiap MT = AC/AI.100%

e = Effisiensi irigasi total

Simop Alokasi Air Kriteria Sustainability-Efficiency-Equity (SEE)

Simop berbasis MS. Excel (Farriansyah, 2019) dengan konsep ekualisasi porsi alokasi air (faktor K) sebagai berikut:





Gambar 3. Ekualisasi alokasi air antar pengguna sejenis (irigasi)

Simop berorientasi alokasi air optimal antar ruang dan waktu, berdasarkan kriteria SEE dan aturan/kebijakan operasional dengan prioritas alokasi air adalah: i) domestik, ii) ekosistem/pemeliharaan sungai, iii) dan irigasi. Berdasarkan persamaan keseimbangan massa dan fungsi optimasi akan dihitung variabel keputusan dengan fungsi tujuan memaksimalkan alokasi air, yaitu:

$$\text{Total QR} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T QR_{i,t}$$

Fungsi kendala dan kriteria sebagaimana sketsa di atas adalah:

1) Air tersedia.

Air tersedia (QA) dihitung berdasarkan aliran masuk lokal antar HW (QL) dan limpahan/kontribusi dari simpul hulu (QSi-1), dengan:

$$QA_{i,t} = QL_{i,t} + QSi_{-1,t}$$

QSi-1 dikondisikan dari HW hulu dengan batasan $QR + QSi \leq QA$ (untuk bendung) dan $QR + QSi \leq QA + f(V/\Delta t)$ (untuk waduk) karena terdapatnya fungsi tampungan.

2) Jatah ekosistem/pemeliharaan sungai.

Jatah ekosistem (QE) adalah kriteria utama pemenuhan air domestik dan irigasi yang ditentukan proporsional dari air tersedia (Ditjen SDA dalam KP-02, 2013 halaman 2) yaitu:

$$QE_{i,t} = 5\% \cdot QA_{i,t}$$

3) Faktor-K dan efisiensi daya guna air.

Keadilan berbagi air didekati dengan kesetaraan volumetrik yang diindikasikan dari rasio pasokan/kebutuhan. Porsi alokasi air ini dapat diturunkan dari kriteria pasokan $0 \leq QR \leq QD$, yaitu jika dibagi QD, maka $0 \leq K \leq 100\%$, atau:

$$K_{i,t} = \frac{QR_{i,t}}{QD_{i,t}} 100\%$$

Adapun kriteria efisiensi daya guna air akan ditinjau di simpul terhilir, yaitu jika

$K < 100\%$, maka $QS = QE$, dan jika $K = 100\%$, maka $QS \geq QE$.

4) Operasi waduk.

Agar operasi waduk dapat berkelanjutan (RRV maksimum) dengan porsi alokasi air K antar waktu tidak menurun secara tiba-tiba (drop) ditempuh sebagai berikut:

a) Operasi waduk berdasarkan persamaan keseimbangan air dengan volume terkalkulasi sesuai:

$$V_{cal,i,t} = V_{beg,i,t} + V_{in,i,t} - V_{loss,i,t} - V_{rel,i,t} - V_{spill,i,t}$$

dengan V_{beg} dan V_{end} =volume awal dan akhir, V_{in} =volume aliran masuk (sesuai QA), V_{loss} =kehilangan air akibat rembesan/evaporasi, V_{rel} =pasokan, V_{eff} =volume efektif dan

V_{spill} =limpahan/kontribusi. Karena $0 \leq V_{end} \leq V_{eff}$, sehingga terdapat kondisi: i) jika $V_{cal} < V_{eff}$, maka $V_{end} = V_{cal}$ dan ii) jika $V_{cal} > V_{eff}$, maka $V_{spill} = V_{cal} - V_{eff}$ dan $V_{end} = V_{eff}$.

b) Kehilangan air akibat evaporasi/rembesan dipengaruhi tinggi muka air di waduk. Karena volume air merupakan fungsi dari tinggi muka air dan luas, maka secara praktis dapat diestimasi kehilangan air linier dengan volume air dan bobot kehilangan air (RL). Bobot RL ini sekitar 0.15 – 1% dari volume air waduk (Farriansyah, 2019) atau:

$$V_{loss,i,t} = RL \cdot V_{beg,i,t}$$

c) Pemberian air irigasi QR dibatasi $0 \leq QR \leq QD$ sehingga $0 \leq K \leq 100\%$, sedangkan $QD \leq QC$ atau setelah terpenuhinya air domestik ($QR_{dm} = QD_{dm}$ atau $K_{dm} = 100\%$) dan jatah ekosistem QE.

d) Langkah waktu (Δt) ditetapkan 10 harian.

e) Kesetaraan porsi alokasi air antar simpul dan waktu.

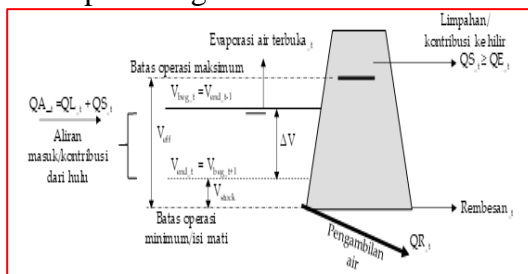
Kriteria K setara antar waktu atau periode sekarang (t) dan periode

setelahnya (t+1), untuk ekualisasi menggunakan data seri, adalah:

$$K_{i,t} - K_{i,t+1} \leq \epsilon t$$

Ekualisasi antar waktu dipengaruhi V_{end} sebagai unsur sinkronisasi sehingga gap K antar waktu berada dalam toleransi, diatur sebagai berikut:

- Kebijakan operasional adalah: i) jika air surplus ($K=100\%$), maka waduk terisi penuh, ii) jika air cukup-terbatas ($20\% \leq K < 100\%$), maka prioritas pengguna sama dengan atau lebih dari simpanan, dan iii) jika air sangat kurang ($K < 20\%$), maka tidak ada pemberian air ($QR=0$ atau $K=FALSE$) karena diprioritaskan menyimpan air.
- V_{stock} adalah V_{end} yang diharapkan. Iterasi V_{end} akan ditentukan dengan algoritma optimasi progresif. Cara ini memerlukan nilai awal iterasi dan membagi masalah multi-tahap menjadi dua-tahap yaitu periode sekarang dan berikutnya.
- Ditetapkan batas toleransi yaitu: i) gap K antar ruang pada waktu yang sama $\epsilon_i=1\%$ dan ii) gap K antar waktu $\epsilon t=5\%$ atau gap klas $K \leq 1$ klas K. Jika air tersedia sangat kurang ($K < 20\%$), maka gap antar waktu tidak diperhitungkan.



Gambar 4. Variabel yang bekerja di waduk

- 5) Rotasi grup.
Jika darurat ($K < 20\%$), maka disarankan rotasi grup (on/off node), yaitu memberikan air kepada DI prioritas sesuai resiko kesehatan tanaman, kelembaban tanah dan kesepakatan.
- 6) Kapasitas pintu pengambilan air dan saluran. Kapasitas (QC) diasumsikan dapat

dilewati kebutuhan air maksimum ($QC \geq QD_{max}$).

- 7) Analisis kinerja keberlanjutan operasional waduk menggunakan metode Hashimoto (Farriansyah, 2019) yang secara otomatis dihasilkan ketika melakukan simop sebagaimana di atas. Formulasi metode tersebut sebagai berikut:

$$Reliability = 1 - \frac{f}{T}$$

$$Resiliency = 1 - \frac{fc}{f}$$

$$Resiliency = 1 - \frac{fc}{f}$$

dengan Reliability/keandalan ($\leq 100\%$), Resiliency/ketahanan ($\leq 100\%$), Vulnerability/kerentanan (≥ 0), f = jumlah periode gagal pada seluruh periode, fc = jumlah periode gagal yang berlangsung kontinyu, Dev_t = jumlah periode defisit maksimum (dengan K terkecil) pada periode gagal yang berlangsung kontinyu, dan T = jumlah periode data. Dari hasil evaluasi dapat diindikasikan keberlanjutan kinerja waduk secara relatif.

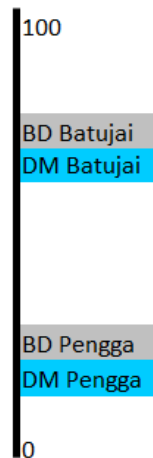
- 8) Sebagai indicator tingkat keterisian waduk selama *timeseries*, dapat dikelompokkan bobot volume air terhadap volume efektif waduk (V/V_{eff}) yang disebut C. Rentang klas C tiap 20% yaitu: i) C1 = 100% s/d 80% ii), C2 = <80% s/d 60%, iii) C3 = <60% s/d 40%, iv) C4 = <40% s/d 20%, v) C5 = <20% s/d >0, dan vi) C6 = 0.

Prosedur simop menggunakan MS. Excel sebagai berikut:

- 1) Menggambar skema sungai
Agar skema dapat dilacak, maka di skema sungai harus diberikan kode sel tertentu.



S DODOKAN



Gambar 5. Skema waduk Batujai - Pengga untuk simop alokasi air

2) Data input

Untuk simop dilakukan pemasukan data di setiap HW sebagai berikut:

Tabel 1. Data Input Simop waduk Batujai-Pengga

No	HW	Data Input	Rentang Data
1	B Tiwuguk, B Juring, B Kali Sade, B Surabaya, B Batu Bangsa, B Gerantung dan E Enem	QS total	1994-2019
2	BD Batujai	QL	1994-2019
		QD irigasi	1994-2019
		QD air baku	130 l/dt
		Vefektif	15429300 m ³
		Reservoir Losses	0.33%
3	BD Pengga	QL	1994-2019
		QD irigasi	1994-2019
		QD air baku	200 l/dt
		Vefektif	21000000 m ³
		Reservoir Losses	0.15%

Simop Alokasi Air dengan Perilaku *first come-first served* (FCFS)

Selain simop dengan kriteria SEE di atas, berikut metode simop dengan menggunakan perilaku alokasi air FCFS. Perilaku FCFS diilustrasikan sebagaimana perhitungan neraca air biasa tanpa optimasi dalam sebuah sistem sungai. Ciri perilaku tersebut: i) pengguna air bagian hulu memiliki kesempatan mengambil air yang lebih besar, ii) pengambilan air sebesar kebutuhan air, bahkan lebih, iii) tidak memperhatikan jatah aliran pemeliharaan sungai/ekosistem, iv) K tidak merata di tiap DI,

dan v) tidak terkendali secara terpusat (Farriansyah, 2019).

METODE PENELITIAN

Sebagaimana disebutkan di atas, bahwa kriteria optimasi alokasi air adalah SEE (*sustainability-efficiency-equity*). Untuk kriteria dimaksud akan dihitung neraca air di tiap simpul waduk Batujai-Pengga yaitu melakukan ekualisasi/perataan/penyetaraan bobot atau porsi alokasi air (K) antar pengguna sejenis (irigasi) di DI Batujai dan DI Pengga. Perhitungan menggunakan alat komputasi berupa model ekualisasi alokasi air yang berbasis MS. Excel. Optimasi menerapkan prinsip *mass balance equation*, fungsi optimasi dengan kendala/batasan dan metode simulasi dengan iterasi *forward-backward* untuk mencapai terminasi (Farriansyah, 2019).

Dalam simulasi-optimasi (simop) selama *timeseries* 25 tahun memperhitungkan antara lain:

- Keberadaan waduk Batujai dan waduk Pengga secara *cascade*.
- Kebutuhan air irigasi di DI Batujai dan DI Pengga mengikuti eksisting antara lain PTT pd-pd-pal, CI 300% dengan efisiensi irigasi 55%. Sedangkan AMT sesuai dengan AMH dominan yaitu DI Batujai AMT Des1 dan DI Pengga AMT Nov3.
- Layanan penyediaan air baku eksisting di waduk Batujai sebesar 130 l/dt (flat).
- Akibat suplesi dari DI Gebong sehingga beban kebutuhan air ke waduk Pengga sebesar total kebutuhan air irigasi DI Pengga dikurangi suplesi DI Gebong. Suplesi ke DI Gebong secara kolektif dari bendung Gebong DAS Babak, bendung Batu Kantar DAS Remening, dan bangunan bagi BS 3 DI Sesaut DAS Jangkok.

Adapun ketentuan dalam simop sebagai berikut:

- Simop berbasis periode 10 harian (dasarian) sesuai kalender hidrologi Okt 1, Okt 2, Okt 3 ... dst).



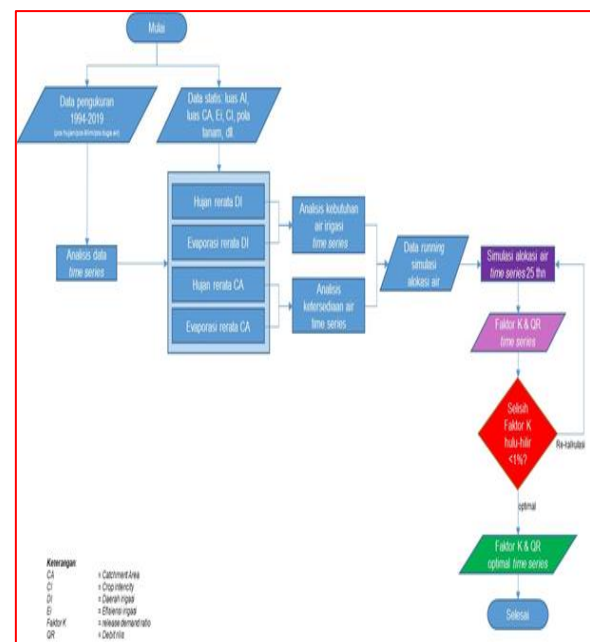
- b) Data masukan berupa skema sungai, ketersediaan air termasuk debit mata air (QL) di tiap simpul HW dan kebutuhan air irigasi dan air baku (demand, QD) di tiap HW.
- c) Porsi alokasi air antar ruang mencakup: i) di tiap DI bernilai sama/setara/adil yaitu selisih K hulu-hilir $\leq 1\%$, dan ii) menyediakan aliran pemeliharaan sungai/ekosistem $\geq 5\%$ dari total air tersedia di HW.
- d) Porsi alokasi air antar waktu yang mendapatkan air di waduk adalah tercapainya K di tiap DI yang bernilai sama/setara/menurun secara gradual yaitu selisih K antar waktu $\leq 2\%$ sampai 5%.
- e) Klas K dengan rentang nilai K adalah: i) K1; 100-80% (aliran menerus), ii) K2; 80-60% (rotasi ringan), iii) K3; 60-40% (rotasi sedang), iv) K4; 40-20% (rotasi berat), dan v) E; 20-0% (emergency). Ketika air tersedia sangat terbatas (K4 – E) atau $< K_{\text{limit}}$, maka dalam operasional disarankan menggunakan *ON-OFF rotation* antar DI dengan prioritas sesuai umur tanaman/kesepakatan pengguna air.
- f) Dalam hal *channel loss* dan *return flow* di segmen sungai antar HW tidak diteliti secara khusus, maka diasumsikan keduanya saling meniadakan sehingga tidak disertakan dalam simop.

Untuk simop di atas diperlukan analisis hidrologi dengan konsep sebagai berikut:

- a) QL di CA antar HW ditentukan menggunakan persamaan regresi berganda yang mengandung fungsi hujan dan debit, karena tidak terdapat pencatatan data debit sungai yang representatif di lokasi.
- b) Kebutuhan air (QD) mencakup kebutuhan air irigasi dan kebutuhan air baku. Kebutuhan air irigasi ditentukan menggunakan perhitungan *net field requirement* (NFR) sesuai PTT standar (pd-pd-pal), luas AI, efisiensi irigasi eksisting, dan AMT.
- c) AMT yang disarankan sebagaimana kalender tanam (KATAM) oleh

Kementerian Pertanian berkesesuaian dengan AMH. Sehingga pada simop ini AMT ditentukan berdasarkan AMH dominan di tiap zona musim (ZOM) terkait dalam rentang 2002-2019 (BMKG-Kediri), yaitu: i) DI Batujai (Des1) dan ii) DI Pengga (Nov3).

- d) Pada butir a dan b di atas menggunakan data hujan 25 tahun (1994 s/d 2019) antara lain dari pos hujan Pengadang, Batujai, Pengga, Kabul dan Mangkung sebagai yang terdekat. Selanjutnya diolah dengan metode isohyet, sehingga didapat hujan wilayah di tiap CA dan tiap DI.
- e) Dalam hal perhitungan debit tersedia menggunakan metode regresi, akan ditentukan persamaan fungsional sebagai model terbaik yang menggambarkan hubungan antara hujan dan debit.



Gambar 6. Bagan alir analisis hidrologi dan optimasi alokasi air

Data dan asumsi

Data untuk analisis hidrologi dan simop alokasi air sebagaimana tabel berikut.

Tabel 2. Jenis dan sumber data



No	Jenis /Rentang	Sumber	Kualitas	Penggunaan	Lampiran
1	Luas DAS/CA	BWS NT I	Sekunder dari Badan Informasi Geospasial (BIG)	Perhitungan ketersediaan air	-
2	Luas AI	BWS NT I	Sekunder dari laporan Pengamat Pengairan dan Permen PU tentang Penetapan Luas DI. Primer dari konsultan.	Perhitungan kebutuhan air irigasi	-
3	Hujan (1994 – 2018)	BWS NT I	Sekunder, dari catatan lapangan oleh BWS NT I/Dinas PU Prov NTB.	Pembuatan peta isohyet Perhitungan ketersediaan air Perhitungan kebutuhan air irigasi	4
4	Evaporasi Pan A (2013 – 2018)	BWS NT I	Sekunder, dari catatan lapangan oleh BWS NT I/Dinas PU Prov NTB.	Pembuatan peta isoevap Perhitungan ketersediaan air Perhitungan kebutuhan air irigasi	5
6	Operasi Waduk (2013 – 2019)	BWS NT I	Sekunder, dari catatan lapangan oleh BWS NT I/Dinas PU Prov NTB.	Perhitungan ketersediaan air	6
10	PTT dan CI (2017 - 2019)	Pengamat Pengairan	Sekunder, dari catatan lapangan oleh Pengamat Pengairan	Perhitungan kebutuhan air irigasi	-
12	Efisiensi Irigasi	BWS NT I	Sekunder berdasarkan visualisasi kondisi fisik jaringan irigasi oleh Pengamat Pengairan	Perhitungan kebutuhan air irigasi	-

Dalam simop waduk Batujai-Pengga digunakan asumsi sebagai berikut:

- Kondisi hidrologi di CA waduk Batujai dan waduk Pengga terdapat kemiripan karakter hujan dan aliran.
- Seluruh HW di hulu waduk Batujai-Pengga menerapkan pola operasi sesuai tradisi selama ini, sehingga limpahan seluruh HW di hulu waduk Batujai merupakan debit kontribusi.
- Tidak diperhitungkannya kehilangan air (channel losses) dan *return flow* di ruas sungai antara HW-HW di hulu waduk Batujai-waduk Batujai dan di waduk Batujai- waduk Pengga.
- Kebutuhan air irigasi sesuai dengan PTT, AMT, CI, dan efisiensi irigasi eksisting.
- Di awal periode simulasi (Okt1) waduk dalam kondisi penuh yaitu volume tampungan awal (Vbeg) sebesar tampungan efektif (Veff).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan perhitungan hidrologi diperoleh sebagai berikut:

- Hujan rerata wilayah sesuai CA dan DI berdasarkan simop sebagaimana Tabel 3, adalah:

Tabel 3. Total hujan tahunan CA

No	Nama HW	Maksimum	Tahun	Rerata	Minimum	Tahun
1	B Tiwuguk, B Juring, B Kali Sade, B Surabaya, B Batu Bangka, B Gerantung dan E Enem (di hulu BD Batujai)*	1711	2015/2016	1407	1065	2001/2002
2	BD Batujai	1729	2017/2018	1363	1077	2010/2011
3	BD Pengga	1778	2016/2017	1254	941	2011/2012
	Rerata	1739	-	1341	1027	-

*) sebagai limpahan total dari seluruh HW dimaksud

Tabel 4. Total hujan tahunan DI

No	Nama DI	Maksimum	Tahun	Rerata	Minimum	Tahun
1	DI Batujai	1766	1999/2000	1314	935	2011/2012
2	DI Pengga	2204	2016/2017	1418	1060	2011/2012
	Rerata	1949	-	1366	998	-

Terjadinya perbedaan hujan CA di hulu HW terhadap hujan DI *timeseries* (4%-12%) karena pada keduanya terdapat batas wilayah yang berbeda berikut dengan pengaruh garis kontur hujan yang melintas di wilayah tersebut. Hujan CA digunakan untuk menentukan ketersediaan air atau *local inflow* (QL). Hujan DI digunakan untuk menentukan kebutuhan air irigasi.

- Ketersediaan air diestimasi menggunakan persamaan regresi berganda dengan fungsi debit terhadap hujan dan debit periode sebelumnya. Persamaan ini dengan inputan hujan rerata dan dihubungkan terhadap data local inflow waduk Pengga berdasarkan debit terukur rerata tahun 2013-2019. Menggunakan persamaan regresi tersebut (koefisien korelasi 86% dan volume error 20%.) selanjutnya dapat dihitung debit tersedia (local inflow) di masing-masing HW yaitu limpahan HW di hulu BD Batujai, BD Batujai, dan BD Pengga.
- Ketersediaan air lokal (QL) di tiap HW berdasarkan pendekatan basic year. Dengan mengacu tahun kejadian debit maksimum atau *wet* (2016/2017), debit *mean* atau normal (2003/2004), dan debit minimum atau *dry* (1996/1997) di BD Pengga sebagaimana Tabel 5, dapat ditentukan ketersediaan air setahun sebagaimana tabel berikut.

Tabel 5. Total ketersediaan air setahun di tiap HW berdasarkan tahun kejadian debit



maksimum dan debit minimum di BD Pengga

No	Nama HW	Ketersediaan air local inflow tiap kondisi (juta m ³)		
		Wet	Normal	Dry
1	B Tiwuguk, B Juring, B Kali Sade, B Surabaya, B Batu Bangka, B Gerantung dan E Enem (di hulu BD Batujai)*	42.75	32.56	38.56
2	BD Batujai	38.94	30.12	28.97
3	BD Pengga	36.07	25.29	20.61

*) sebagai limpahan total dari seluruh HW dimaksud

Tabel 6. Total ketersediaan air local inflow setahun di tiap HW

No	Nama HW	Wet	Tahun	Normal	Tahun	Dry	Tahun
1	B Tiwuguk, B Juring, B Kali Sade, B Surabaya, B Batu Bangka, B Gerantung dan E Enem (di hulu BD Batujai)*	43.35	2012/2013	37.18	2011/2012	27.02	2001/2002
2	BD Batujai	38.94	2016/2017	28.22	2001/2002	21.65	2011/2012
3	BD Pengga	36.07	2016/2017	25.29	2003/2004	20.61	1996/1997
Total Ketersediaan air		118.36	-	90.69	-	69.28	-

*) sebagai limpahan total dari seluruh HW dimaksud

Pada tabel 5 didapat tahun kejadian yang berbeda pada kondisi debit *wet*, *normal*, dan *dry*. Kecuali pada tahun kejadian debit *wet* di BD Batujai dan BD Pengga memiliki tahun kejadian yang sama yaitu tahun 2016/2017.

d. Dari Tabel 6, dapat dikutip kebutuhan air irigasi. Kebutuhan air tersebut dihitung berdasarkan pola tanam padi-padi/palawija-palawija (300%).

Tabel 7. Kebutuhan air irigasi

No	Nama HW	AI (ha)	e*	AMT	Timeseries			
					NFRmax (l/dt/ha)	QDmax (l/dt)	QDmax (juta m ³)	QD r (juta)
1	BD Batujai	2860	55%	Des1	1.24	4415	139.23	54
2	BD Pengga	3189	55%	3-Nov	1.24	5335	168.25	57
Total kebutuhan air irigasi						9750	307.49	11

No	Nama HW	AI (ha)	e*	AMT	Andalan**			
					NFRmax (l/dt/ha)	QDmax (l/dt)	QDmax (juta m ³)	QD r (juta)
1	BD Batujai	2860	55%	Des1	1.23	4270	134.65	46
2	BD Pengga	3189	55%	3-Nov	1.21	4524	142.68	51
Total kebutuhan air irigasi						5698	179.7	48

*) RAAT 2019/2020 (BWS NT I),
**) berdasarkan hujan andalan *basic month* (padi R80% dan palawija R50%)

Total kebutuhan air irigasi maksimum (QDmax) pada Tabel 10 didapat dari penjumlahan QD tiap HW sesuai periode

yaitu timeseries 1-900, sedangkan andalan 1-36. Dari jumlah tiap periode tersebut dapat ditentukan nilai maksimumnya. Secara umum nilai NFR dan QD versi timeseries lebih kecil dari versi andalan. Perbedaan NFRmax pada versi timeseries dan andalan dipengaruhi oleh hujan masing-masing. NFR secara timeseries dan andalan (basic month). Sementara itu, kebutuhan air baku mencakup: i) waduk Batujai (eksisting) 130 l/dt (4.10 juta m³) dan ii) waduk Pengga (rencana) 200 l/dt (6.31 juta m³).
e. Dari butir c dan d di atas, secara umum didapat neraca air global dengan kategori defisit pada kondisi rerata *timeseries* sehingga diperlukan pengaturan alokasi air. Kejadian debit maksimum atau *wet* (2016/2017), debit mean atau normal (2003/2004), dan debit minimum atau *dry* (1996/1997) yang mengacu pada tahun kejadian di BD Pengga. Kondisi alokasi air pada skenario tersebut sebagaimana tabel berikut.

Tabel 8. QR dan K kondisi timeseries dan *dry*

No	Nama HW	Timeseries	Wet	Normal	Dry	
1	BD Batujai	QR (l/dt)	0-4393	0-4130	0-3461	0-3222
		K	41%-100%	99%-100%	57%-100%	55%-87%
		Vbeg (m ³)	15429300	6897749	5633237	3130605
		Vend (m ³)	1797513	6033628	3693003	3051144
		Elv_beg (m)				
2	BD Pengga	QR (l/dt)	0-4804	0-3586	0-2762	0-3566
		K	41%-100%	100%-100%	58%-87%	54%-87%
		Vbeg (m ³)	21000000	5250000	4356450	1773450
		Vend (m ³)	1492050	9712500	2549400	1260000
		Elv_beg (m)				
		Elv_end (m)				

Tabel 9. Frekuensi K kondisi timeseries dan *dry*

No	Nama HW	Klas K	Timeseries	Wet	Normal	Dry
1	BD Batujai	K1 (80%-100%)	43%	89%	36%	25%
		K2 (60%-80%)	33%	0%	53%	56%
		K3 (40%-60%)	18%	0%	8%	14%
		K4 (20%-40%)	0%	0%	0%	0%
		E (<20%)	0%	0%	0%	0%
		QD = 0	6%	11%	3%	6%
2	BD Pengga	K1 (80%-100%)	34%	75%	27%	22%
		K2 (60%-80%)	32%	0%	53%	50%
		K3 (40%-60%)	16%	0%	6%	14%
		K4 (20%-40%)	0%	0%	0%	0%
		E (<20%)	0%	0%	0%	0%
		QD = 0	18%	25%	14%	14%

Pada tabel di atas didapat faktor K Minimum 54%-55% (*wet*), ..%-..% (*normal*),



dan ..%-..% (dry) di seluruh DI dan alokasi air untuk pemeliharaan sungai/ekosistem dapat terpenuhi. Tidak terdapat K pada Klas K4 (20%-40%) bahkan tahun *dry*. Kminimum timeseries lebih kecil daripada Kminimum skenario *dry*, yang disebabkan BD Pengga pada skenario *dry* (1996/1997) yang sama di BD Batujai terdapat probabilitas 46% (mendekati normal).

f. Dari Tabel 9 didapat kinerja keberlanjutan operasional waduk dan frekuensi volume air di waduk. Dengan metode Hashimoto menghasilkan koefisien *Reliability* (R)= 100%, *Resiliency* (R)= 100%, dan *Vulnerability* (V) = 0%.

Tabel 10. Kinerja keberlanjutan operasional waduk

No	Perilaku	Nama HW	Reliability	Resiliency	Vulnerability
1	SEE	BD Batujai	100%	100%	0
		BD Pengga	100%	100%	0
2	FCFS	BD Batujai	98%	99%	0
		BD Pengga	98%	99%	0

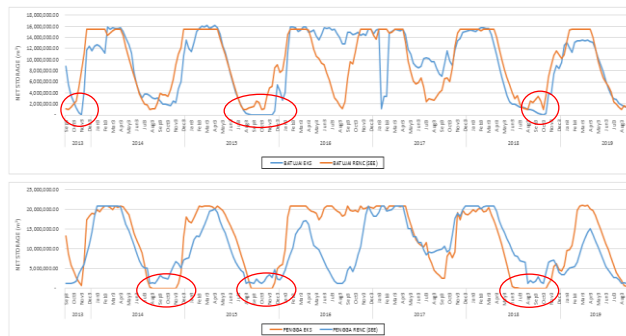
Lebih lanjut, dapat disusun tabel berikut yang mengindikasikan tingkat keterisian waduk ($C = V_{end}/V_{eff}$). Rentang klas C tiap 20% yaitu: i) C1 = 100% s/d 80% ii), C2 = <80% s/d 60%, iii) C3 = <60% s/d 40%, iv) C4 = <40% s/d 20%, v) C5 = <20% s/d >0, dan vi) C6 = 0.

Tabel 11. Frekuensi volume air di waduk

No	Perilaku	Nama HW	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	SEE	BD Batujai	41%	12%	11%	12%	24%	0%
		BD Pengga	15%	12%	15%	21%	37%	0%
2	FCFS	BD Batujai	37%	9%	10%	9%	18%	17%
		BD Pengga	11%	6%	10%	12%	28%	33%

Dari Tabel 10 diperoleh kinerja operasional waduk yang berkelanjutan dengan metode SEE. Hal ini didukung dengan Tabel 16 bahwa pada simop metode SEE tersebut frekuensi volume air (keterisian waduk) lebih besar dan tidak ditemukan kekosongan waduk.

g. Perbandingan fluktuasi tampungan waduk Batujai dan waduk Pengga (Sep3 2013 – Sep 3 2019) berikut.



Gambar 7: (a) Perbandingan fluktuasi waduk Batujai eksisting dan rencana (SEE); b) Perbandingan fluktuasi waduk Pengga eksisting dan rencana (SEE)

Berdasarkan Gambar 9 di atas, didapat kondisi tampungan waduk Batujai dan waduk Pengga tidak pernah mencapai nol. Begitu juga kondisi eksisting tampungan waduk Batujai dan waduk Pengga yang mencapai nol, pada kondisi rencana (SEE) volume tampungan lebih dari nol.

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan uraian di atas, dapat dilakukan pengambilan air baku 200 l/dt dari waduk Pengga dengan ketentuan sebagai berikut:

- Pembagian air baku dan antar HW irigasi hulu-hilir sesuai dengan kriteria SEE dan dikendalikan terpusat oleh pengelola WS (BWS NT I).
- Menerapkan PTT dan CI sesuai eksisting, dengan AMT mengikuti AMH atau sesuai rencana alokasi air tahunan (RAAT).
- Tiap HW harus menyediakan/mengalirkan debit kebutuhan ekosistem/pemeliharaan sungai sebesar 5% dari air tersedia.

Saran

- Perlu dilakukan pengendalian alokasi air di tiap HW di DAS Dodokan, termasuk HW-HW di sistem interkoneksi HLD.
- Pengelola air baku/PDAM perlu menjaga/meningkatkan efisiensi di jaringan distribusi air.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anonim. Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan bagian Perencanaan Jaringan Irigasi KP-01, 2013.
- [2] Anonim. Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan bagian Bangunan Utama (Headworks) KP-02, 2013.
- [3] Anonim. Rencana Alokasi Air Tahunan WS Lombok, Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara I, 2017.
- [4] Anonim. Rencana Alokasi Air Tahunan WS Lombok, Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara I, 2018.
- [5] Anonim. Rencana Alokasi Air Tahunan WS Lombok, Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara I, 2019.
- [6] Farriansyah, A.M. 2019. Model Ekualisasi Alokasi Air untuk Sistem Sungai dan Multiwaduk [disertasi]. Malang (ID): Universitas Brawijaya.
- [7] Soewarno, 1995. Aplikasi Metode Statistik untuk Analisa Data Jilid 2. Penerbit Nova.



HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN