

Optimasi pola operasi Waduk Tukul di Pacitan untuk mendukung kebutuhan air irigasi dan domestik

Imam Nashrullah^{1,*}, Hari Nugroho¹, Kresno Wikan Sadono¹

¹Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia

*Corresponding authors: imamnashr@students.undip.ac.id

Submitted: 5 April 2026, Revised: 10 May 2026, Accepted: 9 June 2026

ABSTRACT: Tukul Reservoir, located in Pacitan Regency, serves a strategic role as a multipurpose infrastructure designed to meet irrigation and domestic raw water requirements. However, climate change dynamics and fluctuations in inflow discharge necessitate a precise storage management strategy to guarantee service reliability. This study aims to analyze and optimize the operation patterns of Tukul Reservoir to achieve high reliability in fulfilling irrigation water needs for 153 hectares and an average domestic raw water demand of 242.95 liters/second. The research methodology employs a water balance optimization simulation based on the Standard Operating Rule (SOR) principle, utilizing a 25-year hydrological dataset. Simulations were conducted across various hydrological conditions—wet, normal, and dry years—applying a Rice-Rice-Secondary Crop (Padi-Padi-Palawija) cropping pattern starting in the third week of October (October III). The results indicate that during wet years, water supply reliability reaches an absolute level of 100%. In normal years, the reliability index is recorded at 83.33%, providing maximum service across all sectors. Conversely, during dry years, reliability decreases to 81.82%, where the reservoir can only supply 90% of the maximum raw water demand (219.00 liters/second). These findings recommend the implementation of a rotational irrigation system during dry periods to maintain the stability of crop water availability. Overall, the resulting operation patterns serve as a technical benchmark for dam authorities in optimizing sustainable water resource management.

KEYWORDS: operation pattern; simulation optimization; storage reliability; Tukul Reservoir; water demand.

ABSTRAK: Waduk Tukul yang terletak di Kabupaten Pacitan memiliki peran strategis sebagai infrastruktur multiguna untuk memenuhi kebutuhan air irigasi dan air baku domestik. Namun, dinamika perubahan iklim dan fluktuasi debit masuk (inflow) menuntut adanya strategi pengelolaan tampungan yang presisi guna menjamin keandalan layanan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengoptimalkan pola operasi Waduk Tukul guna mencapai tingkat keandalan tinggi dalam pemenuhan kebutuhan air irigasi seluas 153 Ha dan air baku domestik rata-rata sebesar 242.95 liter/detik. Metode penelitian menggunakan simulasi optimasi neraca air berdasarkan prinsip Standard Operating Rule (SOR) dengan memanfaatkan data hidrologi selama periode 25 tahun. Simulasi dilakukan pada berbagai kondisi hidrologis (tahun basah, normal, dan kering) dengan menerapkan pola tanam Padi-Padi-Palawija yang dimulai pada periode Oktober III. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada kondisi tahun basah, keandalan pemenuhan air mencapai tingkat mutlak sebesar 100%. Pada kondisi tahun normal, indeks keandalan tercatat sebesar 83.33% dengan layanan maksimal pada seluruh sektor. Sementara itu, pada kondisi tahun kering, keandalan menurun menjadi 81.82%, di mana waduk hanya mampu menyuplai 90% dari kebutuhan maksimal air baku (219.00 liter/detik). Temuan ini merekomendasikan implementasi sistem irigasi bergilir pada periode kering untuk menjaga stabilitas ketersediaan air tanaman. Secara keseluruhan, pola operasi yang dihasilkan dapat dijadikan acuan teknis bagi pengelola bendungan dalam mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya air secara berkelanjutan.

KATA KUNCI: pola operasi; simulasi optimasi; keandalan tampungan; Waduk Tukul; kebutuhan air.

© The Author(s) 2026. This article is distributed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license.

1. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan air untuk irigasi dan kebutuhan domestik di Indonesia terjadi secara signifikan seiring dengan pertumbuhan penduduk dan dinamika perubahan iklim. Fenomena perubahan iklim ekstrem serta degradasi lahan pada area tangkapan air memicu ketidakpastian debit masuk (*inflow*) yang substansial (Sutrisno et al.,

2024). Anomali iklim seperti El Niño turut memperpanjang durasi musim kemarau, khususnya di wilayah selatan Jawa, yang berimplikasi langsung pada penurunan debit andalan secara drastis (Nur'utami & Hidayat, 2016). Ketidakpastian hidrologis ini menuntut sistem manajemen waduk yang tidak hanya bersifat statis, tetapi juga adaptif terhadap pergeseran pola hujan tahunan (Aldrian &

Djamil, 2008). Selain faktor klimatologis, karakteristik geologi Kabupaten Pacitan yang didominasi oleh topografi karst menambah kompleksitas manajemen sumber daya air. Wilayah karst memiliki tingkat infiltrasi yang sangat tinggi namun dengan kemampuan retensi permukaan yang rendah. Kondisi ini menyebabkan kekeringan meteorologis dapat bertransformasi dengan cepat menjadi kekeringan hidrologis (Adji et al., 2023).

Pengelolaan air yang efisien dan presisi menjadi krusial mengingat keterbatasan ketersediaan air dibandingkan dengan pemanfaatannya. Efisiensi pengelolaan air di bendungan sangat bergantung pada ketepatan pola operasi yang diterapkan. Secara teknis, pola operasi waduk yang tidak terencana dengan baik berisiko memicu kegagalan pemenuhan target keandalan air serta berpotensi membahayakan keamanan struktur bendungan akibat manajemen banjir yang tidak tepat. Selain itu, penurunan kapasitas tampung akibat sedimentasi dan fluktuasi iklim menuntut adanya evaluasi berkala terhadap pedoman operasional yang berlaku (Zahrah et al., 2023); (Ardana et al., 2021).

Optimalisasi pola operasi waduk berfungsi sebagai instrumen penting untuk menjembatani kesenjangan antara ketersediaan (*supply*) dan kebutuhan (*demand*) yang kian meningkat seiring kebutuhan energi listrik dan hasil pertanian (Soetopo, 2010); (Setiawan et al., 2017). Berbagai penelitian terdahulu telah menunjukkan efektivitas model simulasi dalam optimasi operasi waduk (Sudjarwadi, 2008). Penerapan program linier, algoritma genetik, serta program dinamik terbukti mampu meminimalkan defisit air pada periode puncak musim kemarau dengan menentukan titik-titik kritis pada kurva operasi (Harjanti & Darsono, 2020); (Subroto et al., 2021); (Hilmi et al., 2012).

Metode *Standard Operation Rule* (SOR) atau kurva aturan standar merupakan pendekatan yang andal dalam memandu pelepasan air waduk berdasarkan volume tampungan aktual dan prediksi *inflow*. SOR memberikan batasan operasional yang jelas bagi operator dalam menentukan besaran aliran keluar (*outflow*) guna menjaga keseimbangan antara kebutuhan saat ini dan cadangan air di masa depan (Tang et al., 2024). Keberhasilan perolehan manfaat ekonomi dari sektor irigasi dan air baku sangat bergantung pada presisi SOR dalam merespons variasi kondisi tahun kering, normal, dan basah (Loucks & van Beek, 2017).

Tujuan utama dari pedoman operasi waduk adalah mengatur pelepasan air agar memberikan manfaat optimal sesuai fungsi bendungan, elevasi tampungan, dan debit masuk (Mulyawati & Fazhar,

2020); (Chang et al., 2005). Optimasi ini memformulasikan aturan operasi yang adaptif dengan mempertimbangkan parameter keberlanjutan infrastruktur serta kesejahteraan pengguna air (Safaa et al., 2023). Hasil analisis optimasi diharapkan dapat menjadi dokumen operasional standar bagi pengelola bendungan dalam pengambilan keputusan strategis di tengah kondisi ekstrem (Nohara et al., 2019).

Kabupaten Pacitan, dengan karakteristik musim kemarau yang panjang, menghadapi tantangan defisit air yang signifikan. Sebagai langkah antisipatif, pembangunan Waduk Tukul menjadi sangat vital dalam program ketahanan air nasional. Agar mampu memenuhi kebutuhan air secara berkelanjutan, pengelolaan operasi Waduk Tukul harus dioptimalkan. Studi ini difokuskan pada penentuan pola operasi Waduk Tukul yang optimal melalui simulasi keandalan tampungan berdasarkan data debit masuk (*inflow*). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola operasi waduk guna mencapai tingkat keandalan yang tinggi dalam pemenuhan kebutuhan air irigasi dan domestik secara konsisten.

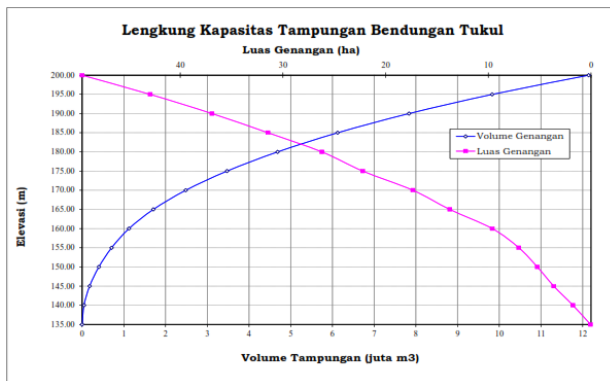
2. METODE

Data yang digunakan meliputi:

1. Data debit masuk (*inflow*) harian selama 25 tahun.
2. Kebutuhan air irigasi dengan luas 153 Ha.
3. Kebutuhan air baku maksimal rata-rata 242.95 liter/detik
4. Kebutuhan air *maintenance* sungai sebesar 0,05 m³/detik.
5. Elevasi *crest* pelimpah: +192.10 m.
6. Tampungan total: 8.68 juta m³.
7. Tampungan minimum operasional: 3.69 juta m³.

Debit andalan adalah besarnya debit yang tersedia untuk memenuhi kebutuhan air dengan risiko kegagalan yang telah diperhitungkan. Analisis debit andalan bertujuan untuk menentukan debit perencanaan yang diharapkan selalu tersedia di sungai (Soemarto, 1987). Pemenuhan keperluan perencanaan maupun pengoperasian waduk, salah satu informasi yang amat penting adalah hubungan antara elevasi dan volume tampungan serta luas permukaan genangan (Sudjarwadi, 2008). Kapasitas tampungan waduk dapat diketahui dari lengkung kapasitas waduk yang merupakan suatu kurva yang menggambarkan hubungan antara luas muka air, volume, dan elevasi (Susanto & Yosanto, 2017). Menurut Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2017) keberhasilan pengelolaan sumber daya air pada bendungan sangat bergantung pada penyusunan Rencana Tahunan Operasi Waduk (RTOW). RTOW

berfungsi sebagai instrumen pengendali agar distribusi air tetap sinkron dengan fluktuasi *inflow* sungai.

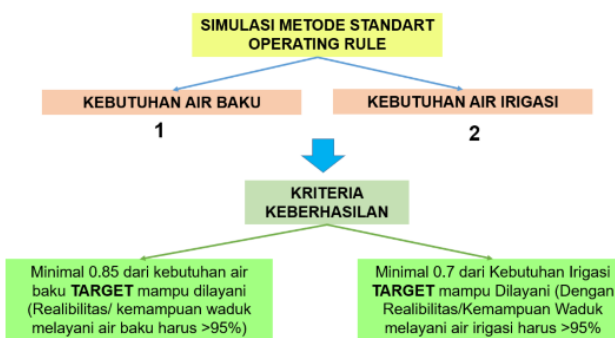


Gambar 1. Kurva tampungan Waduk Tukul

Model yang digunakan adalah persamaan neraca air (Triatmodjo, 2008):

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

dimana S_{t+1} adalah tampungan akhir periode, S_t adalah Tampungan awal periode, I_t adalah Volume *inflow* periode t , dan O_t adalah volume *outflow* periode t .



Gambar 2. Target pemenuhan kebutuhan air waduk tukul

Persamaan dasar simulasi neraca air di waduk merupakan fungsi dari masukan, keluaran dan tampungan waduk yang dapat disajikan dalam persamaan sebagai berikut (Triatmodjo, 2008):

$$I - O = ds/dt \quad (2)$$

dimana I adalah masukan, O adalah keluaran, dan $ds/dt = \Delta S$ adalah perubahan tampungan.

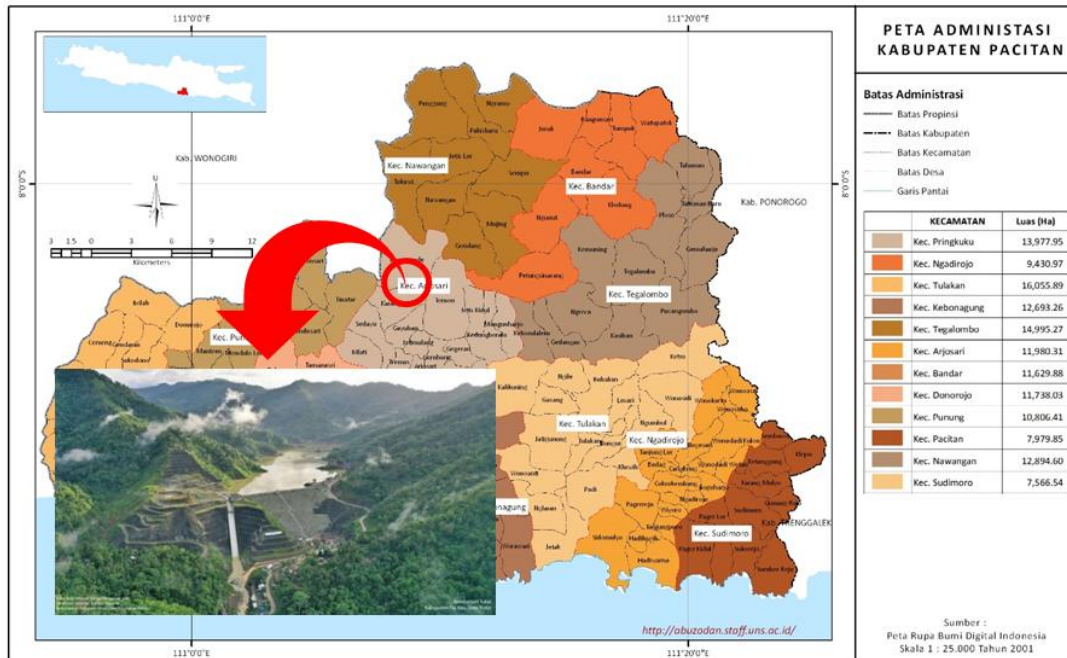
Atau secara rinci dapat ditampilkan sebagai berikut (Triatmodjo, 2008):

$$S_{t+1} = S_t + I_t + R_t - E_t - L_t - O_t - O_{st} \quad (3)$$

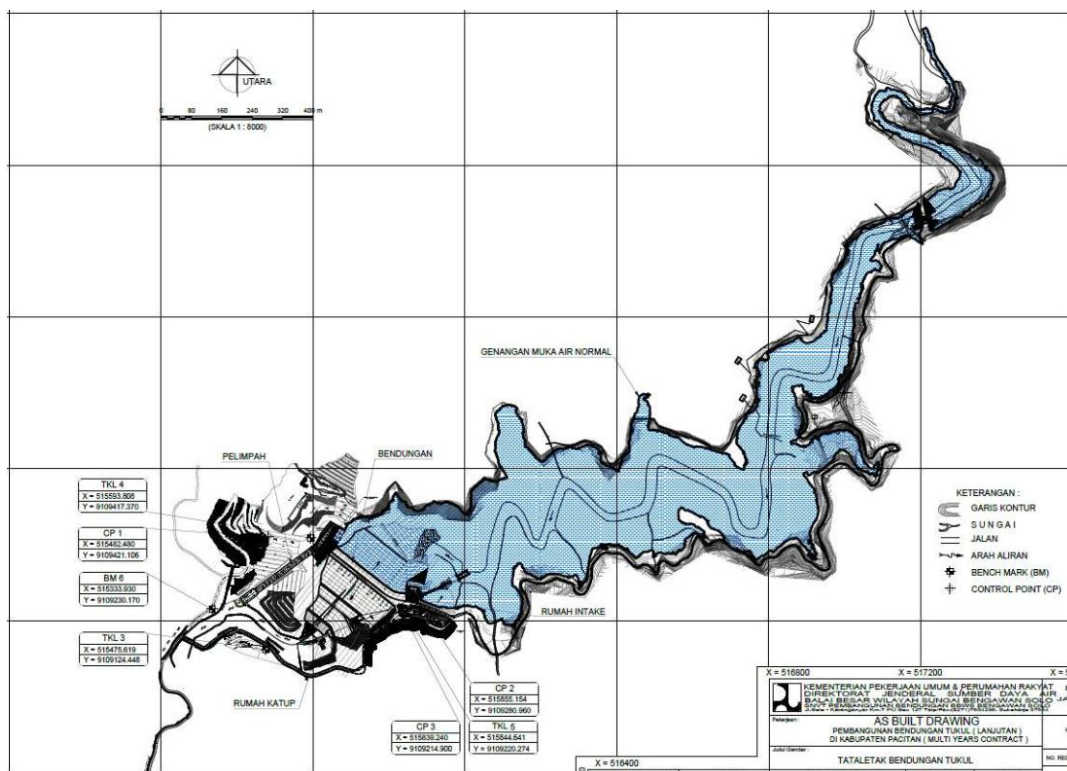
dimana S_t adalah tampungan waduk pada periode t , S_{t+1} adalah tampungan waduk pada periode $t+1$, I_t adalah masukan waduk pada periode t , R_t adalah hujan yang jatuh di atas permukaan waduk, pada periode t , E_t adalah kehilangan air akibat evaporasi pada periode t , L_t adalah kehilangan air akibat rembesan dan bocoran, O_t adalah total kebutuhan air, dan O_{st} adalah keluaran dari pelimpah.

Prosedur penyusunan/pembuatan pola operasi waduk:

1. Tentukan/hitung besarnya *inflow* (hasil observasi/sintetis) yang akan masuk ke waduk untuk berbagai kondisi Tahun Kering, Normal, dan Basah.
2. Tentukan hubungan antara elevasi-luas dan volume dari suatu waduk yang senantiasa diperbaharui karena adanya pendangkalan akibat sedimentasi.
3. Tentukan kondisi fisik dari suatu waduk (*dead storage*, efektif *storage*, dan *flood storage*).
4. Tentukan rencana pola operasi waduknya untuk periode tahunan atau periode beberapa tahun.
5. Tentukan besarnya *outflow* yang akan dikeluarkan dari suatu waduk tunggal atau waduk multiguna (hasil dari penjumlahan kebutuhan air hilir yang harus dilayani dari waduk tersebut).
6. Hitung besarnya volume tampungan dengan persamaan dasar neraca air $S_{t+1} = S_t + I_t + R_t - E_t - L_t - O_t - O_{st}$ (di mana t adalah periode operasi). Dengan hubungan elevasi – volume tampungan (Gambar 1), tentukan TMA waduk setiap waktu (t).
7. Menyimulasikan tinggi muka air untuk berbagai tipe kondisi *inflow* (basah, kering, normal) dengan pola *outflow* sesuai target (hasil dari penghitungan kebutuhan air) untuk mendapatkan ambang batas TMA kondisi basah, normal dan kering.
8. Bilamana TMA pada akhir operasi tidak dapat kembali seperti TMA pada saat awal operasi maka pola *outflow* diubah-ubah sehingga di dapat besaran *outflow* yang memenuhi untuk kondisi kering.
9. Dari hasil simulasi didapat ambang batas dan pola *outflow* untuk operasi pada tahun basah, tahun normal, dan tahun kering.



Gambar 3. Peta lokasi Bendungan Tukul
Sumber: (Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo, 2021)



Gambar 4. Peta situasi genangan Waduk Tukul
Sumber: (Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo, 2021)

Gambaran umum wilayah studi Bendungan Tukul dibangun di Sungai Telu. Secara administratif berada di Desa Karanggede, Kecamatan Arjosari, Kabupaten Pacitan, Provinsi Jawa Timur (Gambar 3). Bendungan Tukul bertipe Urugan zonal *random* batu dengan Inti tegak di tengah memiliki tinggi maksimum dari galian fondasi terdalam yaitu 70.34 meter. Lebar puncak 10

meter, panjang as 233 meter dengan elevasi puncak +198.30 m dan kemiringan lereng hulu dan hilir masing-masing 1:3.00 dan 1:2.50. Tampungan total mencapai 8.96 juta m³ dengan luas genangan 44.81 Ha dengan ilustrasi peta situasi Gambar 4 (Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo, 2021).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

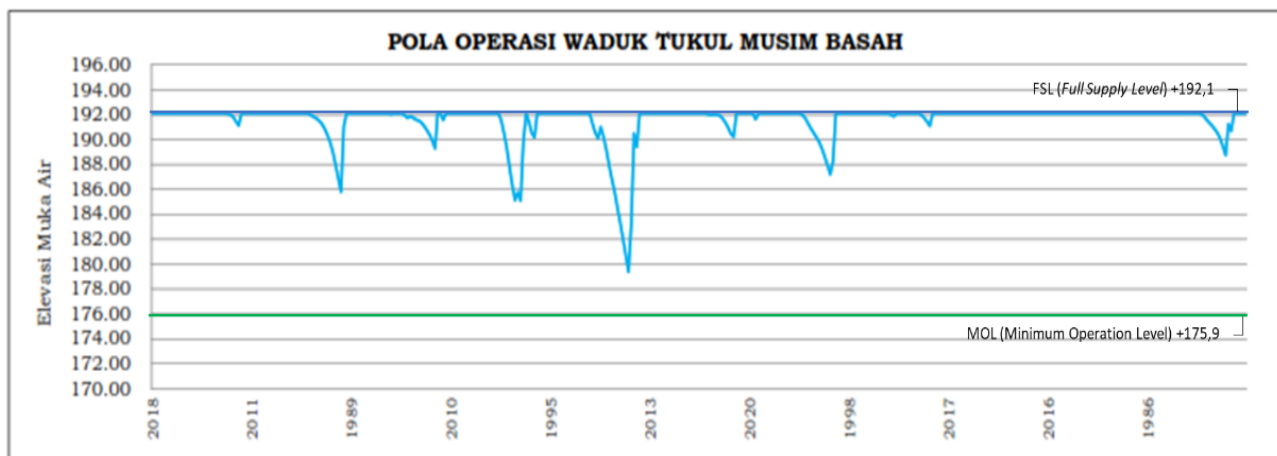
Berdasarkan fungsinya, Waduk Tukul dapat diklasifikasikan sebagai Waduk multi guna (*multipurpose*). Rencana Pemanfaatan Bendungan Waduk Tukul dirancang untuk memenuhi Irigasi (153 Ha), Air minum (242.95 liter/detik), Perikanan, Pariwisata, Air *maintenance*. Analisis dilakukan melalui simulasi operasional pada tiga skenario hidrologi, yaitu tahun basah, normal, dan kering (Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7).

Tabel 1. Rangkuman simulasi operasi waduk tahun basah

Deskripsi	Keterangan
Simulasi dilakukan	11 tahun (tahun basah)
Elevasi pelimpah	+192.1 m
Elevasi muka air minimum	+175.9 m
Tampungan awal	8.67 juta m ³
Tampungan operasi air minimum	3.69 juta m ³
Kebutuhan air:	
- <i>Maintenance</i>	0.05 m ³ /detik
- Air baku	242 liter/detik
- Air irigasi	1.52 liter/detik/ha
MT I	153 Ha awal tanam Okt 3
MT II	153 Ha awal tanam Feb 3
MT III	153 Ha awal tanam Jun 3
Keandalan Waduk	100%

Tabel 2. Rangkuman simulasi operasi waduk tahun normal

Deskripsi	Keterangan
Simulasi dilakukan	12 tahun (tahun normal)
Elevasi pelimpah	+192.1 m
Elevasi muka air minimum	+175.9 m
Tampungan awal	8.67 juta m ³
Tampungan operasi air minimum	3.69 juta m ³
Kebutuhan air:	
- <i>Maintenance</i>	0.05 m ³ /detik
- Air baku	242 liter/detik
- Air irigasi	1.52 liter/detik/ha
MT I	153 Ha awal tanam Okt 3
MT II	153 Ha awal tanam Feb 3
MT III	153 Ha awal tanam Jun 3
Keandalan Waduk	83.33%

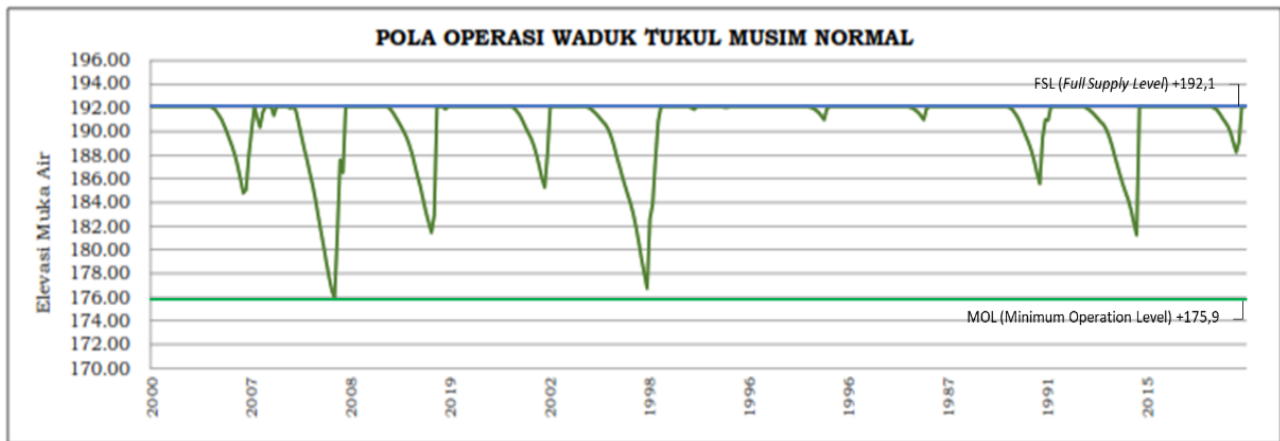


Gambar 5. Grafik simulasi operasi waduk tahun basah

Pada siklus hidrologi tahun normal, waduk tetap memberikan layanan maksimal dengan indeks keandalan 83.33% yang dirangkum pada Tabel 2. Meskipun terdapat fluktuasi *inflow*, kapasitas tampungan tetap berada di atas ambang batas kritis, sehingga target pemenuhan air irigasi 153 Ha dan air baku domestik rata-rata 242.95 liter/detik dapat

Hasil simulasi pada kondisi tahun basah pada Tabel 1 menunjukkan keandalan waduk yang optimal dengan tingkat keandalan mutlak 100%. Pada kondisi ini, ketersediaan air mampu mencukupi seluruh sektor layanan, termasuk kebutuhan air irigasi untuk tiga masa tanam (MT I-III) seluas 153 Ha, kebutuhan *maintenance* sungai, serta pemenuhan air baku domestik bahkan pada saat mencapai debit puncak sebesar 291.54 liter/detik.

dijamin keberlanjutannya secara konsisten. Hal ini membuktikan bahwa pola operasi yang diterapkan efektif dalam menjaga keseimbangan antara ketersediaan air (*supply*) dan kebutuhan (*demand*) meskipun terjadi fluktuasi debit masuk (*inflow*) pada level standar.

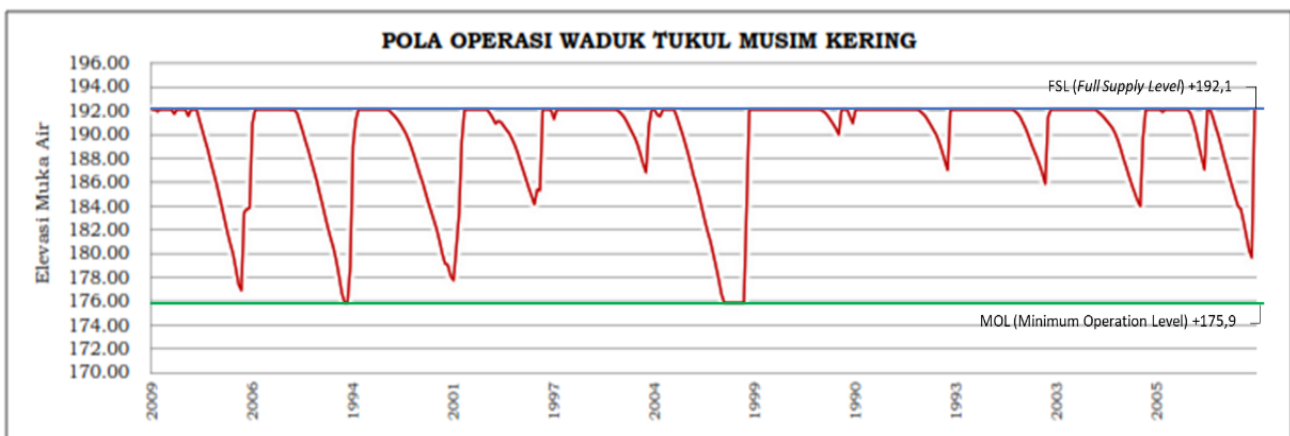


Gambar 5. Grafik simulasi operasi waduk tahun normal

Tabel 33. Rangkuman simulasi operasi waduk tahun kering

Deskripsi	Keterangan
Simulasi dilakukan	12 tahun (tahun kering)
Elevasi pelimpah	+192.1 m
Elevasi muka air minimum	+175.9 m
Tampungan awal	8.67 juta m ³
Tampungan operasi air minimum	3.69 juta m ³
Kebutuhan air:	
- Maintenance	0.05 m ³ /detik
- Air baku	219 liter/detik
- Air irigasi	1.52 liter/detik/ha
MT I	100 Ha awal tanam Okt 3
MT II	100 Ha awal tanam Feb 3
MT III	100 Ha awal tanam Jun 3
Keandalan Waduk	81.82%

Simulasi pada kondisi tahun kering menunjukkan penurunan keandalan menjadi 81.82% (Tabel 3), dimana suplai air baku hanya dapat dipenuhi sebesar 90% (219.00 liter/detik). Penurunan volume tampungan ini berdampak langsung pada sektor pertanian, di mana luasan lahan irigasi yang dapat dilayani secara optimal berkurang menjadi 100 Ha. Guna memitigasi risiko defisit lebih lanjut, diperlukan penyesuaian manajemen distribusi melalui implementasi sistem irigasi bergilir (*rotational irrigation*) untuk menjamin ketersediaan air bagi tanaman.



Gambar 7. Grafik simulasi operasi waduk tahun kering

Guna menjaga tingkat keandalan yang tinggi secara berkelanjutan, hasil studi ini menegaskan bahwa optimasi pola operasi tidak dapat hanya mengandalkan kapasitas tampungan statis. Penurunan suplai air baku menjadi 90% (219.00 liter/detik) pada simulasi tahun kering menunjukkan adanya *water stress* yang menuntut fleksibilitas dalam manajemen pelepasan

(*outflow*). Fenomena ini sejalan dengan temuan (Zahrah et al., 2023), di mana variabilitas *inflow* mengharuskan penyesuaian strategi distribusi guna memitigasi risiko kegagalan pemenuhan kebutuhan air. Sebagai langkah antisipatif untuk menjaga stabilitas ketersediaan air tanaman di sektor pertanian, implementasi sistem irigasi bergilir (*rotational*

irrigation) menjadi krusial untuk diterapkan pada periode kering. Perubahan kebijakan operasional yang adaptif ini merupakan respons teknis terhadap dinamika perubahan iklim dan tren pergeseran musim yang memengaruhi debit masuk ke waduk, sebagaimana ditekankan oleh Irvani et al. (2015). Dengan demikian, pola operasi yang disusun dalam penelitian ini dapat berfungsi sebagai pedoman operasional bagi pengelola bendungan dalam menghadapi ketidakpastian hidrologis di masa depan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi optimasi pola operasi Waduk Tukul menggunakan metode *Standard Operating Rule* (SOR) yang dianalisis selama periode 25 tahun, dapat ditarik beberapa kesimpulan strategis sebagai berikut:

1. Waduk Tukul menunjukkan performa sangat andal dengan indeks keandalan 100% pada tahun basah dan 83.33% pada tahun normal, yang berarti kapasitas tampungan mampu memenuhi kebutuhan irigasi seluas 153 Ha serta air baku domestik sebesar 242.95 liter/detik secara konsisten di atas ambang batas keberhasilan.
2. Pada siklus tahun kering, keandalan menurun menjadi 81.82% dengan kemampuan suplai air baku tereduksi menjadi 90% (219.00 liter/detik), sehingga diperlukan manajemen pelepasan (*outflow*) yang lebih ketat.
3. Pola tanam Padi-Padi-Palawija (awal tanam Oktober III) tetap efektif diterapkan, namun transisi dari pemberian air kontinu menjadi sistem irigasi bergilir (*rotational irrigation*) sangat krusial pada periode kering untuk menjaga stabilitas ketersediaan air tanpa menguras tampungan mati (*dead storage*).
4. Hasil studi ini direkomendasikan sebagai basis penyusunan Rencana Tahunan Operasi Waduk (RTOW) yang adaptif terhadap anomali iklim dan pergeseran musim di Kabupaten Pacitan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adji, T. N., Mujib, M. A., Haryono, E., Fatchurohman, H., & Kholis, A. N. (2023). Simplified approach in karst aquifer characterization by using discharge variability, storage capacity, and void development: A preliminary study in the tropical karst region. *Kuwait Journal of Science*, 50(4), 812–822. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.kjs.2023.05.012>
- Aldrian, E., & Djamil, Y. S. (2008). Spatio-temporal climatic change of rainfall in East Java Indonesia. *International Journal of Climatology*, 28(4), 435–448. <https://doi.org/10.1002/joc.1543>
- Ardana, J. V., Sinung Nugroho, S., Santosa, B., & Hartanto, D. (2021). Studi Perencanaan Pola Operasi Waduk Randugunting Kabupaten Blora, Provinsi Jawa Tengah Guna Kebutuhan Air Irigasi. In *Teknik Sipil Unika Soegijapranata Semarang* | (Vol. 5).
- <https://doi.org/https://doi.org/10.24167/gsmart.v5i1.2889>
- Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo. (2021). *Laporan Hidrologi Bendungan Tukul*.
- Chang, F.-J., Chen, L., & Chang, L.-C. (2005). Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms. *Hydrological Processes*, 19(11), 2277–2289. <https://doi.org/10.1002/hyp.5674>
- Harjanti, W. N., & Darsono, S. (2020). Optimasi Lepasn Waduk Logung dengan Algoritma Genetik. *Siklus : Jurnal Teknik Sipil*, 6(1), 38–48. <https://doi.org/10.31849/siklus.v6i1.3693>
- Hilmi, M., Masrevaniah, A., & Soetopo, W. (2012). Optimasi Pola Operasi Waduk Pelaparado Di Kabupaten Bima, Propinsi NTB. *Jurnal Teknik Pengairan*, 3(2).
- Irvani, H., Bisri, M., & Soetopo, W. (2015). *Studi Optimasi Pola Operasi Waduk Sutami Akibat Perubahan Iklim*.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2017). *Operasi Waduk*. Pusdiklat SDA dan Konstruksi.
- Loucks, D. P., & van Beck, E. (2017). *Water Resource Systems Planning and Management*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1>
- Mulyawati, I., & Fazhar, I. (2020). Simulasi Optimasi Pola Operasi Waduk Jatigede. *Universitas Sahid Jakarta*, 2(1).
- Nohara, D., IWAMOTO, M., TAKEMON, Y., & SUM, T. (2019). *Optimized Reservoir Operation For Flood Control Under Extreme Events Based On Rainfall-Runoff-Inundation Anaylsis In The Upper Katsura River Basin, Japan*. 1458–1465. <https://doi.org/10.3850/38WC092019-0607>
- Nur'utami, M., & Hidayat, R. (2016). Influences of IOD and ENSO to Indonesian Rainfall Variability: Role of Atmosphere-ocean Interaction in the Indo-pacific Sector. *Procedia Environmental Sciences*, 33, 196–203. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.070>
- Safaa, R. F., Sachro, S. S., & Wulandari, D. A. (2023). Studi Optimasi Operasi Waduk Bili-Bili Dengan Program Dinamik. *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil Dan Perencanaan*, 6(1), 65–75. <https://doi.org/10.24815/jarsp.v6i1.27522>
- Setiawan, A. H., Anwar, N., & Margini, N. F. (2017). Optimasi Pola Tanam Menggunakan Program Linier (Waduk Batu Tegi, Das Way Sekampung, Lampung). *Jurnal Hidroteknik*.
- Soemarto, C. D. (1987). *Hidrologi Teknik*. Usaha Nasional.
- Soetopo, W. (2010). *Teknik Operasi dan Pemodelan Waduk*. CV. Asrori.
- Subroto, T., Bisri, M., Limantara, L. M., & Soetopo, W. (2021). Optimization Model of the Way Rarem Reservoir Operation Pattern by Using Stochastic Dynamic Programming. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 48(11).
- Sudjarwadi. (2008). *Perencanaan Bangunan Air*. Gadjah Mada University Press.
- Susanto, H., & Yosanto, Y. (2017). Analisis Keandalan Tampungan Waduk Molintogupo untuk Kebutuhan Air Baku di Kabupaten Bone Bolango Provinsi Gorontalo. *Teknik Sipil Itenas*, 3(4).
- Sutrisno, A., Budiono, H., & Saputra, D. (2024). Dampak Perubahan Iklim terhadap Variabilitas Inflow Waduk di Indonesia. *Jurnal Teknik Pengairan*, 15(1), 45–58.
- Tang, R., Zhang, J., Wang, Y., & Zhang, X. (2024). Study on the Basic Form of Reservoir Operation Rule Curves for Water Supply and Power Generation. *Water*, 16(2), 276. <https://doi.org/10.3390/w16020276>
- Triatmodjo, B. (2008). *Hidrologi Terapan*. Beta Offset.

Zahrah, N., Azmeri, & Maimun Rizalihadi. (2023). Pembaharuan Pola Pengoperasian Waduk Sianjo-Anjo Akibat Peningkatan Laju Sedimen dan Variabilitas Aliran. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, 153–164. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v3i2.87>