



Kajian Optimasi Pengoperasian Waduk Malahayu Kecamatan Banjarharjo, Kabupaten Brebes

Bambang Laras Media¹; Abdul Latif N²;

Wahudin Diantoro³; Abdul Khamid⁴

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik,

Universitas Muhadi Setiabudi Brebes, Indonesia

E-mail: Ncoy58a@gmail.com¹; studiokp3k@gmail.com²;

ir.wahudiniantoro@gmail.com³; abdulkhamid.Mt@gmail.com⁴

Abstract : Malahayu Reservoir is located in Malahayu Village, Banjarharjo District, Brebes Regency. Malahayu Reservoir was built in 1935. Malahayu Reservoir is planned to have a water storage capacity of 69 million m³ with a water surface area of 9.25 km². The main purpose of the construction of this reservoir is to supply irrigation water with a total area of 12,674 Ha, consisting of DI Kabuyutan of 4,166 Ha, DI Jengkelok of 6,173 Ha, and DI Babakan of 2,335 Ha. However, the water supply in Malahayu Reservoir continues to decrease, allegedly due to the high amount of sediment. The current problem is the occurrence of sediment in the Malahayu Reservoir. The pattern of operation using this reservoir needs to be studied because it is considered less optimal and because there needs to be a review of the use of reservoir water using newer data. That way, an operating pattern is needed to determine the reliability of reservoirs in their use as irrigation water providers. This study began by analyzing the secondary data obtained. Data is processed to obtain the amount of reservoir discharge and water needs for irrigation water. And the study ended with a simulation of the reservoir operation pattern. From the results of this study, it is expected to help provide solutions for the operation pattern of Malahayu Reservoir as an optimal reservoir. To improve the performance of the Malahayu Reservoir, supporting data such as reservoir operational systems and performance, hydrological data, reservoir operating procedures and patterns, and irrigation data are needed. The results of the analysis showed that the operation of the Malahayu Reservoir was less than optimal. Simulation of reservoir operation shows that the volume of water in Malahayu Reservoir is below the Minimum Operating Level (MOL), which is the minimum volume of water that should be in the reservoir. According to the records of the Cimanuk-Cisanggarung River Basin Center (BBWS), the condition of water supply in the Malahayu Reservoir continues to decline since this reservoir was built during the Dutch colonial rule until now.

Keywords : Operation Optimization, hydrology, irrigation performance, inflow and outflow discharge

Abstrak : Waduk Malahayu terletak di Desa Malahayu Kecamatan Banjarharjo Kabupaten Brebes. Waduk Malahayu dibangun pada tahun 1935. Waduk Malahayu direncanakan memiliki kapasitas penampungan air sebesar 69 juta m³ dengan luas permukaan air seluas 9,25 km². Tujuan utama pembangunan waduk ini adalah untuk memasok air irigasi dengan total luas area seluas 12.674 Ha, yang terdiri dari DI Kabuyutan sebesar 4.166 Ha, DI Jengkelok sebesar 6.173 Ha, dan DI Babakan sebesar 2.335 Ha. Namun, persediaan air di Waduk Malahayu terus berkurang, diduga disebabkan oleh tingginya jumlah sedimen. Permasalahan saat ini adalah terjadinya endapan pada Waduk Malahayu. Pola pengoperasian dengan menggunakan waduk ini perlu dikaji karena dirasa kurang optimal dan karena perlu adanya tinjauan mengenai pemanfaatan air waduk dengan menggunakan data yang lebih baru. Dengan begitu, dibutuhkan sebuah pola pengoperasian untuk mengetahui keandalan waduk dalam pemanfaatannya sebagai penyedia air irigasi. Studi ini diawali dengan melakukan analisis data sekunder yang didapat. Data diolah untuk mendapatkan besar debit waduk serta kebutuhan air untuk air irigasi. Dan studi diakhiri dengan simulasi pola pengoperasian waduk. Dari hasil studi ini diharapkan dapat membantu memberikan solusi pola pengoperasian Waduk Malahayu sebagai waduk yang optimal. Untuk meningkatkan kinerja Waduk Malahayu, diperlukan data pendukung seperti sistem dan kinerja operasional waduk, data hidrologi, prosedur dan pola pengoperasian waduk, serta data irigasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa pengoperasian Waduk Malahayu kurang optimal. Simulasi operasi waduk menunjukkan bahwa volume air di Waduk Malahayu berada di bawah Minimum Operating Level (MOL), yaitu volume air minimum yang seharusnya ada dalam waduk. Menurut catatan Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Cimanuk-Cisanggarung, kondisi persediaan air di Waduk Malahayu terus mengalami penurunan sejak waduk ini dibangun pada zaman pemerintahan kolonial Belanda hingga saat ini.

Kata kunci: Optimasi Pengoperasian, Hidrologi, Kinerja irigasi, Debit *inflow* dan *outflow*

LATAR BELAKANG

Waduk adalah suatu struktur air yang digunakan untuk menampung debit air berlebih saat musim hujan agar dapat dimanfaatkan saat debit air rendah atau saat musim kering (Sagina, 2021). Waduk adalah struktur air yang dirancang untuk menampung debit air berlebih selama musim hujan agar dapat dimanfaatkan saat debit air rendah atau musim kering (Sagina, 2021). Waduk Malahayu adalah salah satu waduk buatan yang terletak di daerah aliran sungai Kabuyutan bagian hulu. Secara administratif, waduk ini terletak di Desa Malahayu, Kecamatan Banjarharjo, Kabupaten Brebes, Provinsi Jawa Tengah. Waduk Malahayu dibangun antara tahun 1934 hingga 1937 dan dioperasikan untuk menampung air dari sungai Kabuyutan dan beberapa sungai kecil lainnya. Pada tahun 1974, dilakukan perbaikan aliran sungai Kabuyutan dan sungai-sungai kecil oleh Prosida (subproyek Pemali-Comal). Waduk Malahayu menerima pasokan air dari sungai Kabuyutan, yang memiliki dua anak sungai yaitu sungai Ciomas yang berasal dari Gunung Heubeulisuk, dan sungai Cigora yang berasal dari Gunung Beleketepe.

Fungsi utama Waduk Malahayu adalah sebagai penyedia air irigasi untuk luas area seluas 12.674 hektar. Daerah irigasi yang dilayani oleh waduk ini mencakup Daerah Irigasi Kabuyutan (4.166 Ha), Daerah Irigasi Jengkolak (6.173 Ha), dan Daerah Irigasi Babakan (2.335 Ha). Artinya, waduk ini berperan penting dalam memasok air untuk pertanian di wilayah tersebut. Saluran air di sekitar Waduk Malahayu memiliki total panjang 35,674 km. Saluran tersebut terdiri dari Saluran Induk (SI) Babakan dengan panjang 9,126 km, Saluran Induk Jengkelok dengan panjang 4,308 km, Saluran Induk Kabuyutan dengan panjang 3,440 km, dan Saluran Sekunder Tanjung dengan panjang 18,800 km. Saat ini, terdapat beberapa permasalahan yang dihadapi. Pertama, terjadi endapan pada Waduk Malahayu dengan volume sekitar 30 juta meter kubik. Selain itu, terjadi kerusakan pada bangunan pembagi dan pintu bendung. Selain permasalahan di waduk itu sendiri, endapan juga terjadi pada ketiga saluran induk dan saluran sekunder Tanjung. Pada musim kemarau, air dari Waduk Malahayu dialirkan untuk memenuhi kebutuhan tanaman padi, palawija, dan tebu.

Pengeluaran air ini biasanya dimulai pada bulan Juni dan Juli setiap tahunnya. Pada saat ini, kondisi air di daerah aliran yang terhubung dengan waduk tersebut sudah tidak mencukupi lagi untuk memenuhi kebutuhan tanaman. Penjadwalan pengeluaran air ini juga disesuaikan dengan jadwal tanaman musim kemarau di area irigasi jaringan Waduk Malahayu. Volume awal Waduk Malahayu adalah 69,00 juta m³, namun saat ini mengalami penurunan menjadi 39,00 juta m³ akibat sedimentasi. Saat ini, muka air waduk berada 2,50 meter di bawah *spillway*. Waduk Malahayu melayani daerah irigasi seluas 12,674 ha, yang

terdiri dari Daerah Irigasi Kabuyutan (4,166 ha), Daerah Irigasi Jengkolak (6,173 ha), dan Daerah Irigasi Babakan (2,335 ha). Panjang saluran irigasi adalah 35,674 km, yang terdiri dari Saluran Induk (SI) Babakan sepanjang 9,126 km, Saluran Induk Jengkelok sepanjang 4,308 km, Saluran Induk Kabuyutan sepanjang 3,440 km, dan Saluran Sekunder Tanjung sepanjang 18,800 km. Permasalahan yang dihadapi saat ini adalah adanya endapan dalam Waduk Malahayu dengan volume sekitar 30 juta meter kubik, kerusakan pada saluran-saluran induk dan saluran sekunder Tanjung akibat endapan, serta kerusakan pada bangunan pembagi dan pintu bendung.

Waduk Malahayu memiliki kapasitas penampungan air awal sekitar 69 juta meter kubik, namun saat ini mengalami penurunan menjadi sekitar 39 juta meter kubik akibat sedimentasi. Permasalahan yang dihadapi Waduk Malahayu meliputi endapan sedimen yang cukup tinggi, kerusakan pada saluran-saluran induk, dan kerusakan pada bangunan pembagi dan pintu bendung. Pengoperasian Waduk Malahayu perlu dikaji dan dioptimalkan agar dapat berfungsi secara optimal dalam penyediaan air irigasi. Penelitian dan simulasi pola pengoperasian waduk dilakukan untuk memastikan keandalan waduk dalam pemenuhan kebutuhan air irigasi. Waduk Malahayu menyuplai air irigasi seluas 12,674 Ha, adapun daerah-daerah pengairan yang mendapat suplesi dari Waduk Malahayu yaitu: Daerah Irigasi Kabuyutan dengan 4.166 Ha, Daerah Irigasi Jengkolak 6.173 Ha dan Daerah Irigasi Babakan 2.335 Ha. Waduk Malahayu pada musim hujan tidak mengeluarkan air, tetapi pada musim hujan harus diusahakan agar Waduk bisa mencapai Volume air yang maksimal yaitu 47.000.000 m³. Kedudukan muka air tertinggi selalu dikendalikan dan diusahakan pada peil +55,75 m.

Hasil obeservasi awal yang didapat adalah debit tersedia bangkitan data FJ Mock (*inflow*) selama rencana program kerja 2020-2029 (tahun ke-1 – 10), didapatkan nilai tersedia terbesar 11,206 m³/detik dan debit tersedia terkecil adalah 0,000 m³/detik, besar kebutuhan air irigasi maksimum untuk pola tanam eksisting (padi, tebu dan palawija) sebesar 21811,761 liter/detik. Hasil simulasi pola pengoperasian Waduk Malahayu selama tahun 2020-2029 (tahun ke-1 – 10) didapat keandalan waduk 92,92% dengan kegagalan sebesar 7,08% yang masih dibawah dari kegagalan periode maksimal sebesar 20%. Sehingga, analisis simulasi pola pengoperasian waduk untuk 10 tahun yang akan datang telah sesuai perencanaan dan masih dapat diandalkan fungsinya hingga tahun 2029 (Sagina, 2021). Berdasarkan latar belakang di atas tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis hidrologi dan kinerja irigasi waduk Malahayu. Data kebutuhan irigasi digunakan untuk mengetahui besarnya debit inflow dan outflow waduk Malahayu.

TINJAUAN PUSTAKA

1. Gambaran Umum Waduk

Waduk merupakan salah satu sarana pemanfaatan sumber daya air yang mempunyai fungsi sebagai tampungan air (Sagina, 2021). Waduk adalah tempat menampung air yang umumnya dibentuk dari sungai atau rawa dengan tujuan tertentu (Yuono, 2013). Waduk adalah sebuah struktur atau bangunan air yang dibuat dengan tujuan menampung air dalam jumlah yang cukup besar. Waduk biasanya dibangun di aliran sungai atau daerah aliran sungai untuk mengatur aliran air, menyimpan air, dan memanfaatkannya untuk berbagai keperluan. Waduk sering digunakan untuk penyediaan air irigasi bagi lahan pertanian, pengendalian banjir, pembangkit listrik tenaga air, serta keperluan air minum dan industri. Selain itu, waduk juga dapat menjadi tempat rekreasi, pariwisata, dan budi daya ikan air tawar. Waduk berperan sebagai tempat penyimpanan dan penampungan air yang cukup selama musim basah, sehingga air tersebut dapat digunakan pada musim kering. Fungsi utama waduk adalah untuk mengairi lahan pertanian, namun juga memiliki fungsi lain seperti pengendalian banjir saat musim hujan, budidaya ikan air tawar, serta sebagai tempat rekreasi dan pariwisata.



Gambar 1. Waduk Malahayu, 2023

Ciri fisik suatu waduk berdasarkan kondisinya dapat dijelaskan sebagai berikut (Harjanti & Darsono, 2020).

- a. Tampungan efektif atau kapasitas berguna (*useful storage*), sebagai volume tampungan antara Muka Air Minimum (Low Water Level/LWL) dan Muka Air Normal (Normally Water Level/NWL).
- b. Tampungan tambahan (*surcharge storage*), sebagai volume air di atas Muka Air Normal selama banjir. Debit air yang meluap melalui kapasitas tambahan ini umumnya tidak terkendali dan hanya terjadi selama banjir, dan tidak dapat digunakan untuk keperluan lainnya.
- c. Tampungan mati (*dead storage*), adalah volume air yang terletak di bawah Muka Air Minimum dan tidak dimanfaatkan dalam operasi waduk.

- d. Tampungannya tebing (*valley storage*), yaitu volume air yang terkandung dalam susunan tanah yang permeabel di tebing dan lembah sungai.
- e. Permukaan genangan normal (*normal water level/NWL*), adalah elevasi maksimum yang dicapai oleh permukaan air waduk pada kondisi normal.
- f. Permukaan genangan minimum (*low water level/LWL*), adalah elevasi terendah ketika tampungannya air dilepaskan dalam kondisi normal.
- g. Permukaan genangan pada banjir rencana (*flood water level/FWL*), adalah elevasi maksimum air selama banjir yang direncanakan akan terjadi.
- h. Pelepasan (*release*), adalah volume air yang secara terkendali dilepaskan dari waduk selama periode waktu tertentu.
- i. Periode kritis (*critical periode*), adalah periode di mana waduk berubah dari kondisi penuh ke kondisi kosong tanpa melimpah selama periode tersebut

2. Sistem dan Kinerja Operasional Waduk

Sistem dan kinerja operasional waduk merujuk pada cara waduk dioperasikan dan bagaimana sistemnya berfungsi untuk mengelola air yang masuk dan keluar dari waduk. Berikut adalah deskripsi umum tentang sistem dan kinerja operasional waduk:

- a. *Inflow* (debit masuk): Sistem operasional waduk melibatkan pengaturan debit masuk air ke dalam waduk. Debit masuk ini dapat berasal dari sumber-sumber seperti air hujan, air tanah, dan daerah aliran sungai yang dialirkan melalui sungai-sungai yang mengalir ke waduk. Pengaturan debit masuk ini penting untuk menjaga agar waduk tidak kelebihan air atau mengalami kekeringan.
- b. *Outflow* (debit keluar): Waduk juga memiliki sistem operasional untuk mengatur debit air yang keluar dari waduk. Debit keluar ini dapat digunakan untuk berbagai tujuan, seperti penyediaan air irigasi bagi lahan pertanian, pengendalian banjir pada musim hujan, penyediaan air minum, dan pembangkit listrik tenaga air. Sistem ini melibatkan pengaturan pintu-pintu air atau saluran air yang mengatur aliran air keluar dari waduk.
- c. Pengukuran dan pemantauan: Untuk menjaga kinerja operasional waduk, sistem pemantauan dan pengukuran secara teratur dilakukan. Ini melibatkan pengukuran debit air masuk dan keluar, tinggi muka air waduk, kualitas air, serta faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi kinerja waduk. Data pengukuran ini penting dalam pengambilan keputusan terkait pengoperasian waduk.
- d. Pengendalian dan pengaturan: Sistem pengendalian dan pengaturan digunakan untuk mengelola debit air yang masuk dan keluar dari waduk. Hal ini mencakup

pengaturan pintu-pintu air, pompa-pompa, dan infrastruktur lainnya yang terlibat dalam mengatur aliran air di dalam waduk. Tujuan dari pengendalian ini adalah menjaga keseimbangan antara pasokan dan kebutuhan air serta memastikan keberlanjutan operasional waduk.

- e. Keandalan dan efisiensi: Sistem operasional waduk harus dirancang dan dioperasikan sedemikian rupa untuk mencapai keandalan dan efisiensi yang optimal. Keandalan berarti waduk dapat memenuhi kebutuhan air irigasi atau tujuan lainnya secara konsisten dan dapat diandalkan. Efisiensi berarti penggunaan air yang efisien dalam operasional waduk, sehingga sumber daya air dapat dimanfaatkan dengan optimal.

Dalam menjalankan sistem dan kinerja operasionalnya, waduk perlu memperhatikan kondisi hidrologi, perubahan iklim, kebutuhan air, serta peraturan dan kebijakan terkait pengelolaan sumber daya air.

3. Penyusunan Pola Operasi Waduk

Operasi waduk (*reservoir operation*) melibatkan proses penampungan aliran air sungai ke dalam sebuah waduk (*reservoir*) dan pelepasan air yang telah ditampung tersebut untuk berbagai tujuan (Samosir, 2015). Pola operasi mengacu pada pedoman operasional dalam suatu periode tertentu di mana debit air yang dilepaskan oleh waduk harus mengikuti ketentuan agar ketinggian muka air (elevasi) waduk tetap sesuai dengan perancangan yang telah ditetapkan (Sagina, 2021). Setelah analisis evaporasi waduk, kebutuhan air irigasi dan data debit diketahui dilakukan simulasi waduk berdasarkan tampungan.

Persamaan waduk dinyatakan sebagai : $St+1 = St + I - O$

Dimana:

$St+1$ = Tampungan pada akhir periode t

t = Interval waktu yang digunakan

St = Tampungan pada awal periode t

I = Total volume *debit inflow* yang masuk ke waduk selama periode t

O = Total volume *debit outflow* yang keluar dari waduk selama periode t

Pola operasi waduk memiliki peranan yang sangat penting dalam menjaga agar air yang keluar dari waduk saat terjadi banjir tidak menyebabkan atau memperparah banjir di daerah hilir. Sebaliknya, pada musim kemarau, pola operasi waduk dapat mengurangi dampak kekeringan dengan mengatur penyimpanan air pada akhir musim hujan (Iqbal, 2015).

Simulasi waduk merupakan suatu proses yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik dan sifat kapasitas waduk dalam kondisi lapangan dengan tujuan memenuhi kebutuhan air dalam saluran irigasi. Salah satu persamaan umum yang digunakan dalam simulasi operasi waduk adalah neraca keseimbangan air (water balance) waduk, yang melibatkan evaluasi kebutuhan dan ketersediaan air (Widyawati dan Elok, 2018).

Dalam simulasi waduk, terdapat beberapa komponen penting yang diperhatikan dalam neraca air, yaitu curah hujan dan aliran permukaan sebagai aliran masuk (inflow), serta kebutuhan air sebagai aliran keluar (outflow). Jika kapasitas penyimpanan waduk tetap, waduk dapat mengalami kondisi kering atau terisi penuh, bahkan meluap (limpasan air) (Widyawati dan Elok, 2018).

- a. Tampungannya Waduk (%), yaitu besarnya tampungan waduk diukur dengan persentase tampungan terhadap kapasitas tampungan aktif.
- b. Lepasannya Kebutuhan (%), yaitu besarnya pemenuhan kebutuhan diukur dengan mempertimbangkan kondisi atau status tampungan waduk. Artinya, jika kondisi tampungan waduk menurun, maka persentase lepasannya sesuai kebutuhan juga akan menurun.

4. Curah Hujan Efektif

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Hidayat dan Empung pada tahun 2016, mereka mendefinisikan curah hujan efektif sebagai jumlah curah hujan yang dapat langsung dimanfaatkan oleh tanaman selama masa pertumbuhannya. Curah hujan merupakan salah satu faktor penting dalam proses hidrologi. Jumlah kedalaman hujan (rainfall depth) menjadi faktor yang mempengaruhi aliran, baik melalui limpasan permukaan maupun aliran tanah (groundwater flow) (Agustianto, 2014).

Karakteristik hujan dapat sangat bervariasi dari satu tempat ke tempat lain, sehingga satu alat penakar hujan saja tidak cukup untuk mencerminkan kondisi hujan di seluruh wilayah. Oleh karena itu, untuk wilayah yang luas, diperlukan data curah hujan kawasan atau curah hujan wilayah yang diperoleh dari nilai rata-rata curah hujan beberapa stasiun penakar hujan yang berada di dalam dan/atau di sekitar wilayah tersebut. Data curah hujan harian digunakan untuk menghitung curah hujan rerata daerah dengan menggunakan metode poligon Theissen (Nuraeni, 2011). Hasil perhitungan poligon Theissen ini berguna untuk mengetahui besaran debit inflow di Waduk Malahayu.

Besaran curah hujan memiliki dampak yang signifikan terhadap pertanian, kapasitas drainase, dan bangunan air di kedua daerah tersebut. Curah hujan efektif yang

terukur dan terhitung dengan baik akan mempengaruhi hasil panen dengan optimal, terutama dalam pembagian air pada areal irigasi. Beberapa faktor yang mempengaruhi besarnya curah hujan efektif antara lain cara pemberian air irigasi, laju pengurangan air genangan, kedalaman lapisan air, pemerian air ke petak sawah, serta jenis tanaman yang ditanam (Agustianto, 2014)

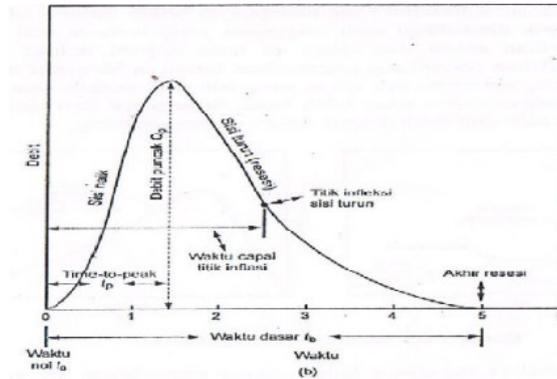
5. Metode Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) Nakayasu

Perhitungan debit banjir ini bertujuan untuk mendapatkan debit rencana yang akan digunakan sebagai data dalam menentukan dimensi bangunan yang direncanakan. Metode ini didasarkan pada distribusi curah hujan efektif setiap jamnya. Untuk melakukan penyebaran hujan, dilakukan perhitungan distribusi dan curah hujan efektif pada setiap jamnya. Perhitungan ini mengacu pada kurva naik yang mencerminkan debit yang mendekati puncak grafik hidrograf, serta kurva turun yang mencerminkan debit yang perlahan atau cepat meninggalkan debit puncak grafik hidrograf. Dari hasil perhitungan tersebut, dapat diperoleh grafik hidrograf. Hidrograf mempunyai tiga komponen pembentuk yaitu aliran permukaan, aliran antara, dan aliran air tanah. Hidrograf mempunyai bentuk seperti diberikan dalam gambar sebagai berikut (Agustianto, 2014).

Nakayasu dari Jepang telah mengembangkan rumus hidrograf satuan sintetis berdasarkan hasil penelitiannya. Rumus ini dapat digunakan untuk memperkirakan hidrograf banjir dengan menggunakan data curah hujan dan karakteristik DAS tertentu. Rumus hidrograf satuan sintetis ini memperhitungkan faktor-faktor seperti luas daerah, tipe tanah, dan pola aliran air dalam DAS tersebut. Dengan menggunakan rumus ini, dapat dihasilkan estimasi hidrograf banjir yang berguna dalam perencanaan struktur bangunan, seperti saluran drainase, bendungan, atau sistem pengendalian banjir lainnya. Perhitungan hidrograf banjir dan penggunaan rumus hidrograf satuan sintetis ini penting dalam manajemen risiko banjir dan perencanaan infrastruktur yang berhubungan dengan air. Data hidrograf yang diperoleh dapat membantu dalam menentukan dimensi dan kapasitas bangunan serta mengantisipasi dampak banjir pada lingkungan sekitarnya.

Waktu nol (*zero time*) merupakan titik awal dalam hidrograf, yaitu saat dimulainya peristiwa yang mempengaruhi aliran air. Pada hidrograf, puncak hidrograf (*peak flow*) adalah bagian yang menunjukkan debit air maksimum yang terjadi dalam suatu periode waktu. Waktu capai puncak (*time to peak*) adalah waktu yang diukur dari waktu nol hingga mencapai debit puncak. Sisi naik (*rising limb*) adalah bagian hidrograf yang berada antara waktu nol dan waktu capai puncak. Pada sisi naik, debit air

meningkat dari awal peristiwa hingga mencapai debit puncaknya. Sisi turun (*recession limb*) adalah bagian hidrograf yang terjadi setelah mencapai debit puncak, yaitu saat debit air mulai menurun. Waktu dasar (*time base*) adalah waktu yang diukur dari waktu nol hingga mencapai akhir sisi turun hidrograf, di mana debit air kembali mencapai tingkat yang lebih rendah atau mendekati kondisi awal (Agustianto, 2014).



Gambar 1. Komponen hidrograf

Pemahaman terhadap komponen-komponen tersebut dalam hidrograf membantu dalam menganalisis dan memahami pola aliran air serta karakteristik hidrologi suatu sungai atau sistem perairan. Informasi ini penting dalam perencanaan dan manajemen sumber daya air, seperti prediksi banjir, perencanaan irigasi, pengendalian aliran sungai, dan penanganan risiko bencana terkait air.

Untuk menurunkan hidrograf terukur di Daerah Aliran Sungai (DAS) yang sedang ditinjau, diperlukan data hujan dan debit yang diperoleh melalui pengamatan lapangan. Data hujan diperoleh menggunakan alat pengukur hujan otomatis yang merekam curah hujan pada setiap interval waktu tertentu, seperti per jam. Sementara itu, data debit diperoleh dengan mencatat debit air di titik kontrol yang terdapat dalam DAS tersebut. Dari data hujan dan debit yang tercatat, langkah selanjutnya adalah melakukan pemilihan data yang akan digunakan untuk analisis lebih lanjut. Berdasarkan intensitas hujan pada interval waktu tertentu, dapat diperoleh debit puncak yang akan digambarkan dalam grafik hidrograf.

Dalam analisis hidrologi, penting untuk memperhatikan bahwa sifat DAS tidak berubah dari satu hujan ke hujan lainnya. Oleh karena itu, hidrograf yang dihasilkan dari hujan dengan durasi dan pola yang serupa akan memberikan bentuk dan waktu dasar yang serupa pula. Variasi sifat hujan, seperti durasi, intensitas, dan distribusi hujan, memiliki pengaruh signifikan terhadap bentuk hidrograf yang terbentuk dalam DAS tersebut. Dengan memahami dan menganalisis data hujan dan debit yang terkumpul, serta memperhitungkan karakteristik DAS, dapat dihasilkan hidrograf yang memberikan

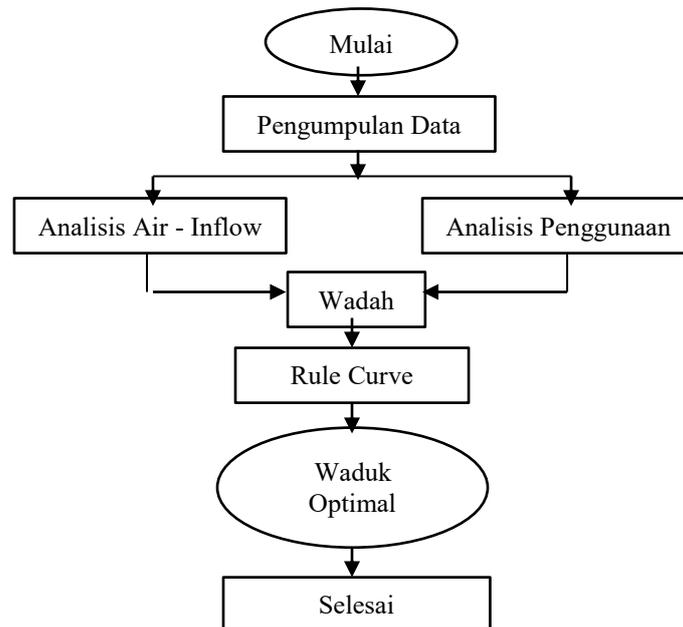
gambaran tentang aliran air di DAS tersebut. Informasi ini penting dalam manajemen sumber daya air, seperti perencanaan pengendalian banjir, pengelolaan irigasi, dan evaluasi dampak lingkungan terhadap aliran sungai.

6. Kebutuhan Air Irigasi

Data kebutuhan irigasi digunakan untuk mengetahui besarnya *debit outflow* pada Waduk Malahayu, daerah yang harus di suplai oleh Waduk Malahayu yaitu DI Kabuyutan, DI Jengkolak, DI Babakan. Kebutuhan air irigasi merujuk pada jumlah volume air yang diperlukan untuk memenuhi berbagai kebutuhan dalam pertanian, terutama untuk evapotranspirasi tanaman, kehilangan air, dan kebutuhan air yang diperoleh melalui hujan dan kontribusi air tanah. Dalam konteks sawah untuk pertumbuhan padi, kebutuhan air irigasi ditentukan oleh faktor-faktor berikut (Zamanudin et al., 2017):

- a. **Penyiapan Lahan:** Proses penyiapan lahan meliputi pengolahan tanah, perendaman, dan pengaturan struktur air di sawah. Kebutuhan air diperhitungkan untuk memastikan kondisi tanah yang sesuai untuk penanaman padi.
- b. **Penggunaan Konsumtif:** Kebutuhan air konsumtif berkaitan dengan kebutuhan air yang diambil oleh tanaman melalui evapotranspirasi, yaitu proses penguapan air dari tanah dan transpirasi melalui daun tanaman. Ini mencakup kebutuhan air untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman padi selama siklus pertumbuhannya.
- c. **Perkolasi dan Rembesan:** Kebutuhan air juga dipengaruhi oleh perkolasi, yaitu aliran air melalui lapisan tanah ke bawah, dan rembesan, yaitu kebocoran air dari saluran irigasi atau sistem penyiraman.
- d. **Pergantian Lapisan Air:** Sawah membutuhkan pergantian lapisan air untuk memastikan kondisi yang sesuai bagi tanaman padi. Proses ini melibatkan pengaturan tingkat air dengan mengairi sawah secara berkala atau melakukan drainase untuk menghilangkan air yang berlebih.
- e. **Curah Hujan Efektif:** Curah hujan efektif merujuk pada jumlah curah hujan yang secara efektif dapat digunakan oleh tanaman dan tidak mengalami kerugian akibat penguapan atau aliran permukaan. Curah hujan efektif diperhitungkan dalam menentukan kebutuhan air irigasi. Kebutuhan air di sawah dinyatakan dalam mm/hari atau lt/dt/ha. Kebutuhan air belum termasuk efisiensi di jaringan tersier dan utama. Efisiensi dihitung dalam kebutuhan pengambilan air irigasi. Dengan memperhitungkan faktor-faktor di atas, dapat dilakukan estimasi kebutuhan air irigasi untuk sawah padi. Hal ini membantu dalam perencanaan penggunaan air yang

efisien, pengaturan sistem irigasi yang tepat, dan optimalisasi pertumbuhan tanaman padi (Legowo et al., 2010).



Gambar 2. Susunan Lapis Perkerasan Lentur

METODOLOGI PENELITIAN

Metode Penelitian

Penelitian eksperimen adalah jenis penelitian yang dilakukan dengan tujuan untuk menjawab pertanyaan mengenai apa yang akan terjadi jika suatu tindakan dilakukan dalam kondisi yang sangat terkontrol. Dalam penelitian ini, kita memberikan perlakuan (treatment) pada kondisi yang dikendalikan untuk melihat apakah ada perubahan yang terjadi atau tidak. Metode penelitian eksperimen digunakan untuk mencari pengaruh perlakuan tertentu terhadap faktor lain dalam kondisi yang terkendali (Sugiyono, 2017).

Lokasi penelitian yang digunakan adalah Waduk Malahayu, sebuah waduk buatan yang terletak di hulu DAS (Daerah Aliran Sungai) Kebuyutan. Secara administratif, waduk ini berada di Kabupaten Brebes, Provinsi Jawa Tengah, tepatnya di Desa Malahayu, Kecamatan Banjarharjo, Kabupaten Brebes.

Dalam melakukan penelitian eksperimen, terdapat tiga elemen penting yang perlu diperhatikan, yaitu kontrol, manipulasi, dan pengamatan. Variabel kontrol merupakan elemen inti dalam metode eksperimen, karena variabel kontrol digunakan sebagai standar untuk melihat perubahan atau perbedaan yang terjadi akibat perlakuan yang berbeda. Manipulasi adalah tindakan yang sengaja dilakukan dalam penelitian eksperimen. Dalam penelitian ini, variabel independen dimanipulasi dengan melibatkan kelompok perlakuan yang memiliki

kondisi yang berbeda. Setelah pemberian perlakuan eksperimen, peneliti harus melakukan pengamatan untuk menentukan apakah terjadi perubahan sesuai dengan hipotesis yang diajukan.

1. Pengumpulan Data

Data yang diperlukan dalam studi ini adalah

- a. Data curah hujan, data klimatologi, data karakteristik DAS, data kebutuhan air irigasi, data evaporasi waduk dan data karakteristik waduk.
- b. Perhitungan curah hujan pada stasiun Waduk Malahayu menggunakan metode Poligon Thiessen.
- c. Perhitungan debit inflow dan *outflow* waduk Malahayu

2. Simulasi Operasi Waduk Malahayu

Dalam penelitian ini, digunakan teknik optimasi dengan model simulasi stokastik. Pemilihan model simulasi ini dilakukan karena model simulasi stokastik memiliki fleksibilitas dalam mengatasi hubungan kompleks yang bersifat nonlinier. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan gambaran dan pola operasi yang paling optimal untuk Waduk Malahayu dalam konteks pemenuhan kebutuhan energi listrik tenaga air dengan menggunakan model simulasi stokastik. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan model optimasi melalui simulasi stokastik guna meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya air dalam pembangkit energi listrik, serta memberikan pola operasi waduk yang lebih fleksibel sesuai dengan kondisi tampungan waduk.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Optimasi Simulasi Operasi Waduk

Data curah hujan efektif Waduk Malahayu yang digunakan dalam analisis ditunjukkan seperti pada tabel 1.

Tabel 1. Koefisien Curah Hujan Efektif ½ Bulanan

Hujan ½ Bulanan (mm)	% Efektif
0 – 15	0
15 – 50	70
50 – 75	60
75 – 100	45
100 – 250	40
> 250	-

Sumber : Direktorat Jendral Pengairan. Dept. PU ” (Sagina, 2021)

Data curah hujan ½ bulanan dan curah hujan efektif untuk stasiun Waduk Malahayu ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 2. Koefisien Curah Hujan Efektif ½ Bulanan

Bulan	Periode	Rata-Rata 1/2 Bulanan (mm)	Mean (%)	% Efektif	Curah Hujan Efektif 1/2 Bulanan (mm)
1	2	3	4	5	6 = 4 x 5
JAN	I	197	170	40	6812
	II	225	206	40	8258
FEB	I	183	160	40	6415
	II	168	147	40	5890
MAR	I	233	221	40	8852
	II	161	140	40	5603
APR	I	191	166	40	6625
	II	144	103	40	4104
MEI	I	110	82	45	3680
	II	110	97	60	5813
JUN	I	54	32	70	2215
	II	55	43	70	3001
JUL	I	48	16	70	1131
	II	42	28	70	1980
AGS	I	23	21	70	1454
	II	40	35	70	2425
SEP	I	36	8	70	526
	II	32	7	70	457
OKT	I	58	45	70	3137
	II	75	58	60	3499
NOP	I	109	93	45	4163
	II	120	110	45	4970
DES	I	141	130	40	5191
	II	205	188	40	7520

Sumber : Hasil Analisis Perhitungan

2. Analisis *Inflow* Menggunakan Metode Hidrograf Sintetis Nakayasu

Analisis hidrograf sintetis nakayasu diuraikan sebagai berikut:

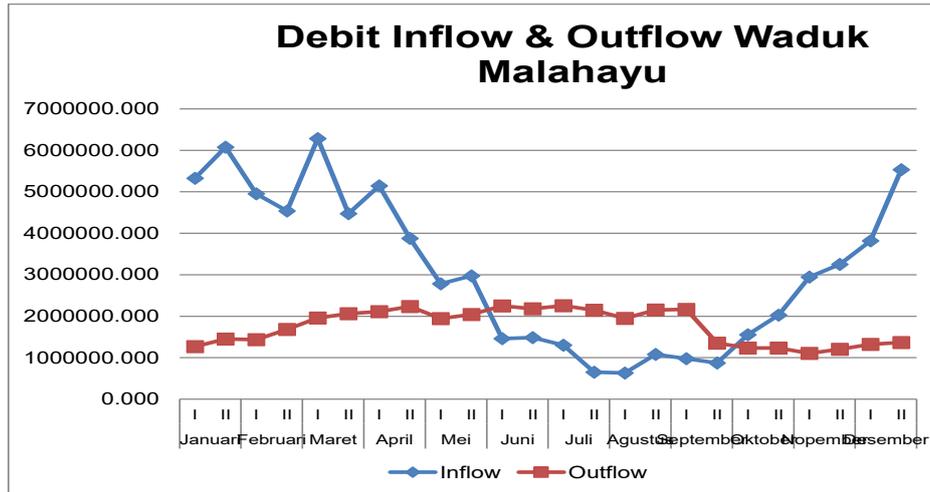
Luas DTA (A) = 27,00 km² (hasil dari peta DAS)

Panjang Sungai = 12 km² (hasil dari peta DAS)

Tabel 3. Hidrograf Nakayasu

Parameter	Satuan	Nilai
$T_g = 0,4 + 0,058.L$	jam	1.096
$A = 0,47 + (A.L)^{0,25} / t_g$	jam	4.340.7121
$T_r = (0,5 - 1 t_g)$	jam	1.666
$T_p = t_g + 0,8 t_r$	jam	4.758
$0.5 \times T_{0.3}$	jam	2.379
$1.5 \times T_{0.3}$	jam	7.137
$2.0 \times T_{0.3}$	jam	9.516
$T_p \times T_{0.3}$	jam	7.926
$TP + T_{0.3} + 1.5 \times T_{0.3}$	jam	13.560
$Q_p = \frac{1}{3.6} \times A \times \frac{Ro}{(0,3 T_p + T_{0.3})}$	m ³ /det	1.427

Sumber: Hasil analisis perhitungan



Gambar 3. Grafik *Outflow* Waduk Malahayu

3. Analisis Simulasi Operasi Waduk Malahayu

Pola operasi waduk sangat penting untuk memastikan bahwa saat terjadi banjir, air yang keluar dari waduk tidak menyebabkan atau memperparah banjir di daerah hilir. Sebaliknya, pada musim kemarau, pola operasi waduk dapat mengurangi dampak kekeringan dengan mengatur penyimpanan air pada akhir musim hujan (Iqbal, 2015).

Simulasi waduk merupakan proses yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik dan sifat kapasitas waduk dalam kondisi lapangan guna memenuhi kebutuhan air dalam saluran irigasi. Salah satu persamaan umum dalam simulasi operasi waduk adalah neraca keseimbangan air (water balance) waduk, yang melibatkan evaluasi kebutuhan dan ketersediaan air (Widyawati dan Elok, 2018).

Dalam simulasi waduk, terdapat komponen penting yang diperhatikan dalam neraca air, yaitu curah hujan dan aliran permukaan sebagai aliran masuk (inflow), serta kebutuhan air sebagai aliran keluar (outflow). Jika kapasitas penyimpanan waduk tetap, waduk dapat mengalami kondisi kering atau terisi penuh, bahkan meluap (limpasan air) (Widyawati dan Elok, 2018).

Dalam simulasi operasi waduk, data masukan seperti curah hujan, aliran permukaan, dan kebutuhan air digunakan untuk memodelkan perubahan volume air dalam waduk seiring waktu. Dengan mempertimbangkan karakteristik hidrologis dan hidraulis waduk, simulasi ini dapat memberikan gambaran tentang kapan waduk akan terisi, berapa banyak air yang tersedia untuk keperluan irigasi, dan sejauh mana waduk dapat menampung curah hujan yang berlebihan sebelum meluap. Dengan menggunakan simulasi waduk, para pengelola waduk dapat memahami dan mengoptimalkan operasi waduk dengan memperhitungkan variabilitas curah hujan, permintaan air, dan kapasitas penyimpanan waduk. Hal ini memungkinkan pengelolaan sumber daya air yang lebih

efisien, pengendalian banjir yang lebih baik, dan pemenuhan kebutuhan irigasi yang lebih akurat.

Persamaan dasar dalam simulasi waduk yaitu persamaan dasar simulasi neraca air yang merupakan fungsi dari masuk (*inflow*), keluaran (*outflow*) dan tampungan waduk yang dapat disajikan dalam persamaan berikut : $S_{t-1} = S_t + Inflow - Evaporasi - Outflow$

Dimana :

S_{t-1} : Volume waduk pada periode t-1 (m^3)

S_t : Volume waduk pada periode t (m^3)

Adapun kebijakan dalam operasi waduk tahunan diasumsikan sebagai berikut :

- a. Pada bulan mulainya tahun hidrologi yaitu bulan oktober, volume waduk diasumsikan $\frac{1}{2}$ volume efektif waduk.

S_t : $0,5 (S_{FSL} - S_{MOL}) + S_{MOL}$

S_t : Volume waduk pada periode t (m^3)

S_{FSL} : Volume waduk pada "full supply level" (m^3)

S_{MOL} : Volume waduk pada "minimum operating level" (m^3)

- b. Jika *inflow* bulanan dan *outflow* bulanan menyebabkan muka air di waduk melebihi FSL maka *outflow* harus diperbesar sedemikian, sehingga muka air waduk tidak melebihi FSL. Demikian pula jika akibat *inflow* dan *outflow* bulanan menyebabkan muka air di waduk lebih rendah dari MOL maka *outflow* harus dikurangi sedemikian, sehingga muka air waduk tidak turun dibawah MOL, maka kondisi ini harus dapat dipenuhi.

R_i : $S_{i-1} + Q_i - S_{MOL}$ jika $S_{i-1} + Q_i - R_d < S_{MOL}$

R_i : R_d jika $S_{FSL} \geq S_{i-1} + Q_i - R_d \geq S_{MOL}$

R_i : $S_{i-1} + Q_i - S_{FSL}$ jika $S_{i-1} + Q_i - R_d > S_{FSL}$

Dimana :

R_i : *outflow* bulan yang nyata pada bulan i (m^3)

S_{i-1} : volume waduk pada bulan i - 1 (m^3)

Q_i : *inflow* bulanan pada bulan i (m^3)

R_d : *outflow* bulanan yang sesuai dengan kebutuhan (m^3)

- c. Perhitungan Operasi Waduk diketahui :

S_{FSL} : 31.000.000 m^3 dengan $Elv_{FSL} = + 57,75$ m

S_{MOL} : 535.598,33 m^3 dengan $Elv_{MOL} = + 47$ m

S_t : $0,5 (S_{FSL} - S_{MOL}) + S_{MOL}$

: $(0,5 (31.000.000 - 535.598,33)) + 535.598,33$

:15.767.799,17 m³

Untuk perhitungan S_{t-1} disajikan pada tabel berikut ini :

$$S_{t-1} = S_t + Inflow - Evaporasi - Outflow$$

Cek terhadap $El_{V_{FSL}}$ dan $El_{V_{MOL}}$ jika hasilnya “ok” lanjutkan jika “tidak ok”, maka *outflow* harus disesuaikan.

3. Optimasi Operasi Waduk

Dalam buku pedoman pengoperasian waduk tunggal, Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, ada tiga tahapan dalam mempersiapkan model optimasi (Samosir, 2015).

Tahapan pertama dalam mempersiapkan model optimasi dalam buku pedoman pengoperasian waduk tunggal adalah mengidentifikasi fungsi objektif. Fungsi objektif ini digunakan untuk mengukur efektivitas atau kegunaan dari berbagai kombinasi variabel yang terkait. Dalam konteks pengoperasian waduk tunggal, fungsi objektif ini dapat mencakup tujuan seperti memaksimalkan pasokan air, mengoptimalkan produksi energi listrik, atau meminimalkan risiko banjir, tergantung pada kebutuhan dan prioritas yang ditetapkan.

Tahap kedua adalah mengidentifikasi *decision variable* secara kuantitatif dan menentukan ketelitiannya. *Decision variable* adalah variabel-variabel yang dapat diatur atau dikendalikan dalam model optimasi. Dalam konteks waduk tunggal, ini bisa meliputi variabel seperti tingkat pengisian waduk, debit aliran masuk dan keluar, pola pelepasan air, atau kebijakan operasional yang terkait. Penelitian *decision variable* merujuk pada pembagian nilai-nilai yang mungkin diambil oleh variabel-variabel tersebut, serta apakah mereka harus dinyatakan dalam bentuk diskrit atau kontinu.

Tahap ketiga adalah mengidentifikasi faktor-faktor pembatas yang mempengaruhi *decision variable*. Pada tahap ini, faktor-faktor yang membatasi atau mengontrol nilai-nilai yang dapat diambil oleh *decision variable* diidentifikasi. Hal ini dapat melibatkan pertimbangan seperti kapasitas waduk, batasan hidrologi atau hidraulis, kebijakan lingkungan, kebijakan regulasi, atau kendala teknis lainnya (Rianto, 2021). Identifikasi faktor-faktor pembatas ini akan menghasilkan persamaan kendala yang harus dipatuhi dalam model optimasi. Dalam buku pedoman pengoperasian waduk tunggal tersebut, ketiga tahapan ini membantu membangun model optimasi yang dapat digunakan untuk mengoptimalkan pengoperasian waduk tunggal dengan mempertimbangkan tujuan yang diinginkan dan mematuhi pembatasan yang ada. Model

ini dapat digunakan sebagai alat untuk mengambil keputusan yang lebih baik dan efisien dalam pengelolaan waduk tunggal.

4. Kinerja Waduk Malahayu

Pengoperasian waduk yang baik memiliki peran penting dalam memenuhi kebutuhan air dan energi, serta menjaga keandalan, kelentingan, dan kerawanan waduk. Untuk mengevaluasi kinerja pengoperasian waduk, beberapa indikator yang dapat digunakan adalah keandalan (*reliability*), kelentingan (*resiliency*), dan kerawanan (*vulnerability*) (Wulandari et al., 2012). Dalam melakukan pengoptimasian pola operasi waduk, diperlukan desain penelitian yang terarah untuk mencapai hasil yang maksimal. Beberapa tahapan pekerjaan yang perlu dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Pengumpulan Data: Tahap ini melibatkan pengumpulan data terkait pengoptimasian waduk, seperti data debit aliran keluar waduk yang ada, data debit aliran masuk, data karakteristik waduk, data kebutuhan di daerah hilir waduk, data instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), serta data-data pendukung lainnya, seperti studi sebelumnya dan dokumentasi terkait.
- b. Pengelolaan Data: Setelah data terkumpul, tahap ini melibatkan pengelolaan data sesuai dengan karakteristik yang ada. Misalnya, pengolahan data debit aliran masuk ke waduk dan pembacaan volume penampungan waduk. Data yang telah dikumpulkan perlu diorganisir dan disusun dengan baik untuk memastikan keakuratan dan ketersediaan data yang diperlukan dalam analisis dan simulasi.
- c. Simulasi: Tahap ini melibatkan penggunaan data historis debit aliran keluar waduk untuk melakukan simulasi. Simulasi ini bertujuan untuk memperoleh elevasi operasi permukaan air di waduk dan perkiraan produksi listrik yang telah ada. Dengan menggunakan data historis, simulasi dapat membantu dalam mengoptimalkan pola operasi waduk dan memprediksi kinerja operasionalnya di masa mendatang.
- d. Melakukan perhitungan optimasi dengan menggunakan model simulasi stokastik dengan bantuan program *solver evolutionary*. Optimasi dilakukan dengan membuat aturan lepasan waduk optimasi berdasarkan status tampungan.
- e. Merumuskan pola kebijakan pengoperasian waduk yang didasarkan hasil optimasi.
- f. Melakukan perbandingan produksi listrik hasil simulasi eksisting dengan hasil optimasi.
- g. Melakukan perbandingan tampungan waduk hasil simulasi eksisting dengan tampungan hasil optimasi.

- h. Melakukan evaluasi kinerja sistem Waduk Malahayu bila menerapkan pola operasi waduk hasil optimasi (Mulyadi, 1985).

Fungsi tujuan optimasi adalah memaksimalkan hasil atau unjuk kerja yang diharapkan dari sistem secara keseluruhan. Hasil sistem dalam hal ini adalah produksi listrik dari PLTA pada sistem yang ditinjau. Dengan melalui tahapan-tahapan tersebut, diharapkan pengoperasian waduk dapat dioptimalkan dengan hasil yang maksimal. Melalui pengumpulan dan pengolahan data yang baik serta menggunakan simulasi yang tepat, dapat diperoleh pemahaman yang lebih baik tentang pola operasi waduk dan dampaknya terhadap kebutuhan air, energi, dan mitigasi risiko.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis pada bab-bab sebelumnya, maka kajian ini dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil analisis menunjukkan bahwa pengoperasian Waduk Malahayu masih kurang optimal karena berdasarkan hasil analisis simulasi operasi waduk menunjukkan bahwa volume air Waduk Malahayu masih di bawah Minimum Operating Level (MOL).
2. Pada saat-saat dimana air tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan air tanaman dengan pengaliran menerus, maka pemberian air tanaman dilakukan secara bergilir.

Saran

Berdasarkan hasil kesimpulan di atas penulis dapat memberikan saran-saran sebagai berikut :

1. Dalam pengoperasian Waduk Malahayu para petugas di lapangan harus memperhatikan hal-hal sebagai berikut :
 - a. Jika *inflow* dan *outflow* bulanan cenderung meninggi melebihi *Full Supply Level (FSL)*, maka *outflow* harus diperbesar sedemikian rupa sehingga muka air waduk tetap berada di bawah *Full Supply Level (FSL)*.
 - b. Demikian pula jika *inflow* dan *outflow* bulanan cenderung menurun di bawah *Minimum Operating Level (MOL)*, maka *outflow* harus dikurangi sedemikian rupa sehingga muka air waduk tetap berada di atas *Minimum Operating Level (MOL)*.
2. Penekanan sedimentasi harus dilakukan untuk mempertahankan kapasitas tampung Waduk Malahayu dan juga untuk menambah umur guna dari Waduk Malahayu itu sendiri.
3. Peran serta setiap elemen masyarakat dan pemerintah daerah dalam pengelolaan sungai dan waduk perlu ditingkatkan lagi

DAFTAR PUSTAKA

- Agustianto, D. A. (2014). Model Hubungan Hujan dan Runoff (Studi Lapangan). *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 2(2), 215–224.
- 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>
- Hidayat, A. K., & Empung. (2016). Analisis Curah Hujan Efektif dan Curah Hujan dengan Berbagai Periode Ulang untuk Wilayah Kota Tasikmalaya Dan Kabupaten Garut. *Jurnal Siliwangi*, 2(2), 121–126.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. (2017). *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 13/PRT/M/2017 Tentang Penggunaan Barang Milik Negara Berupa Kendaraan Dinas Operasional pada Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat*. <http://www.pu.go.id/>
- Legowo, S., Hadihardaja, I. K., & Rabuanawati, S. (2010). Pengoperasian dan Umur Guna Waduk. *Jurnal Teknik Sipil*, 13(4), 183–200.
- Mulyadi. (1985). *Fluktuasi Komunitas Fitoplankton di Waduk Malahayu* ,. 3(3), 3–6.
- Nuraeni, Y. (2011). Metode Memperkirakan Debit Air yang MAsuk ke Waduk dengan Metode Stokastik Chain Markov. *Jurnal Teoretis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 18(2).
- Rianto, D. J. (2021). Penentuan Intensitas Curah Hujan dalam Menentukan Debit Limpasan untuk Rekomendasi Pembuatan Saluran Air Terhadap Tipe Dinding Saluran Air yang Berbeda. *Jurnal Inovasi Penelitian*, 1(9), 1795–1804.
- Sagina, M. (2021). Studi Optimasi Pola Pengoperasian Waduk Malahayu di Kabupaten Brebes untuk Kebutuhan Irigasi. *Doctoral Dissertation, University of Technology Yogyakarta*.
- Samosir, C. S. (2015). Optimasi Pola Operasi Waduk untuk Memenuhi Kebutuhan Energi Pembangkit Listrik Tenaga Air (Studi Kasus Waduk Wonogiri). *Jurnal Teknik Pengairan*, 6(1), 108–115.
- Sugiyono. (2017). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, R & D*. CV Alfabeta.
- Wulandari, D. A., Darsono, S., & Legono, D. (2012). Optimasi Pemanfaatan Air Waduk Wonogiri dengan Program Dinamik. In *Pertemuan Ilmiah HATHI 29* (Issue Pengelolaan Sumber Daya Air untuk Mendukung Ketahanan Pangan dan Energi, pp. 136–146).
- Yuono, T. (2013). Evaluasi Kinerja Sistem Irigasi Waduk Cengklik. *Jurnal EMBA*, 1(4), 78–85.
- Zamanudin, A. M., Farhan, O., & Anwar, S. (2017). Kajian Optimasi Pengoperasian Waduk Malahayu Kabupaten Brebes – Jawa Tengah. *Jurnal Konstruksi*, VI(6), 1. <https://jurnal.ugj.ac.id/index.php/Konstruksi/article/view/3869/1910>