

MONITORING DAN EVALUASI PENERAPAN TEKNOLOGI MODIFIKASI CUACA DI DAS WADUK KASKADE - CITARUM, JAWA BARAT

MONITORING AND EVALUATION OF WEATHER MODIFICATION TECHNOLOGY IMPLEMENTATION IN THE CATCHMENT AREA OF CASCADE RESERVOIRS – CITARUM, WEST JAVA

Isnain Fauzan Akrom¹⁾* Muhammad Fauzi²⁾

^{1,2)}Balai Hidrologi dan Lingkungan Keairan, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian PUPR
Jl. Ir. H. Djuanda No. 193, Bandung, Indonesia

*Correspondent email: isnainakrom@gmail.com

Diterima: 04 Juli 2022; Direvisi: 31 Juli 2022 ; Disetujui: 19 November 2022

ABSTRACT

The 2020 drought led to a reduction in the water supply of the Citarum cascade reservoirs (Saguling, Cirata, and Juanda) due the lowering intensity of rainfall in the catchments of the three reservoirs. Rainfall in late 2020 through February 2021 was much lower than the predicted and historical averages. This caused the water level of the Citarum cascade reservoirs fell to be below normal at the end of December 2020. To meet the water demand, an increase in inflow enhancement is needed, hence the implementation of Weather Modification Technology (WMT) which was carried out on March 12th - April 21st, 2021 in the Citarum watershed, West Java Province. WMT is applied for increasing or decreasing the amount of rainfall by intervening in the cloud growth process, which is carried out by seeding NaCl powder on clouds using an airplane. The purpose of monitoring and evaluation (M&E) of WMT implementation is to collect data, analyze, and evaluate the hydrological conditions of the Citarum cascade reservoirs during WMT implementation. The purpose of M&E is to assess the success of additional reservoir volume due to rainfall during WMT implementation. The M&E is conducted by collecting daily data of the rainfall, water level, and hydrological data of the reservoirs. The data collected each day is used as the basis for the seeding strategy on that day. After the WMT implementation activities are completed, an evaluation of the overall WMT implementation results is continued, which includes analyzing rainfall data, river water level, as well as the inflow, volume, and water level of the reservoir. The results of this study show that WMT implementation could not raise the water level of the three reservoirs to the Normal Operating Limit, but it has succeeded in increasing the reservoir volume by approximately 270 million m³ for Saguling, 201 million m³ for Cirata, and 59 million m³ for Juanda.

Keywords: Reservoir, Citarum, Weather, Modification, Technology

ABSTRAK

Kemarau tahun 2020 mengakibatkan berkurangnya pasokan air waduk kaskade Citarum (Saguling, Cirata, dan Juanda) akibat berkurangnya intensitas air hujan yang jatuh pada daerah aliran sungai ketiga waduk. Curah hujan pada akhir 2020 hingga Februari 2021 jauh lebih rendah dari rata-rata historis dan prediksinya. Hal tersebut mengakibatkan kondisi muka air waduk kaskade Citarum turun hingga dibawah Normal pada akhir Desember 2020. Untuk memenuhi kebutuhan air dibutuhkan peningkatan inflow, melalui penerapan Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) yang telah dilaksanakan pada 12 Maret – 21 April 2021 di DAS Citarum, Provinsi Jawa Barat. TMC diterapkan untuk menambah atau mengurangi curah hujan dengan melakukan intervensi pada proses pertumbuhan awan, yang dilakukan dengan penyemaian serbuk NaCl pada awan menggunakan pesawat. Maksud dilakukannya monitoring dan evaluasi (Monev) terhadap penerapan TMC adalah untuk pengumpulan data, analisis, dan evaluasi kondisi hidrologi waduk kaskade Citarum selama pelaksanaan TMC. Tujuan Monev sendiri adalah untuk menilai keberhasilan tambahan volume waduk akibat curah hujan selama pelaksanaan TMC. Monev TMC dilakukan dengan pengumpulan data setiap hari baik data hujan, Tinggi Muka Air (TMA), maupun data hidrologi waduk. Data yang terkumpul digunakan sebagai dasar untuk strategi penyemaian pada hari itu. Setelah kegiatan penerapan TMC selesai, dilanjutkan evaluasi hasil penerapan TMC secara keseluruhan yang mencakup analisa data hujan, TMA sungai, inflow, volume dan TMA waduk. Hasil penerapan TMC pada kajian ini tidak dapat menaikkan TMA ketiga waduk hingga Batas Operasi Normal, namun telah berhasil menambah volume waduk sekitar 270 juta m³ untuk Saguling, 201 juta m³ untuk Cirata dan 59 juta m³ untuk Juanda.

Kata Kunci: Modifikasi, Cuaca, Teknologi, Waduk, Citarum

PENDAHULUAN

Musim kemarau yang panjang sering membawa dampak kerugian yang langsung dirasakan oleh masyarakat seperti berkurangnya pasokan air untuk air baku (Wahyuni & Junianto, 2017), dan gagal panen (Arham & Adiwibowo, 2022). Selain itu, pasokan air yang berkurang juga berdampak pada berkurangnya pemenuhan energi listrik pada pembangkit listrik tenaga air (Tampang, 2017). Lama periode musim kemarau dipengaruhi oleh El Nino Osilasi Selatan (ENSO), yaitu variasi angin dan suhu permukaan laut di wilayah tropis belahan timur Samudra Pasifik yang ireguler dan berkala, yang berpengaruh terhadap cuaca di sebagian besar wilayah tropis dan subtropis bumi. Periode panasnya disebut sebagai El Nino sementara periode dinginnya disebut La Nina (IPCC, 2007).

Monitoring indeks ENSO yang dilakukan oleh Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) menunjukkan bahwa pada akhir tahun 2020 hingga Februari 2021 Indonesia masuk pada La Nina lemah hingga moderat. Hal tersebut seharusnya mengakibatkan peningkatan curah hujan melebihi normal. Pada pengamatan data curah hujan dari tahun 1998 sampai tahun 2016 di Jawa Barat menunjukkan pengaruh peningkatan intensitas curah hujan saat La Nina dan sebaliknya saat El Nino (Nabilah *et al.*, 2017). Namun realisasinya justru terjadi anomali, khususnya pada Daerah Aliran Sungai (DAS) waduk kaskade Citarum. Curah hujan yang jatuh ke tangkapan waduk kaskade Citarum pada akhir 2020 hingga Februari 2021 jauh lebih rendah dari rata-rata historis dan prediksinya. Hal tersebut mengakibatkan penurunan *inflow* waduk. Tanpa penyesuaian pemakaian air waduk, kondisi tersebut mengakibatkan kondisi muka air waduk kaskade Citarum (Saguling, Cirata, dan Juanda) berada di bawah Normal pada akhir Desember 2020.

Agar waduk tersebut tetap dapat memenuhi kebutuhan air, maka diperlukan adanya peningkatan *inflow*. Salah satu teknologi yang dapat diterapkan adalah Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) dengan tujuan meningkatkan intensitas curah hujan sehingga dapat menambah *inflow* ke waduk. Pelaksanaan monitoring dan evaluasi (monev) sangat penting dilakukan untuk menilai keberhasilan dari penerapan teknologi ini.

TMC adalah suatu bentuk upaya intervensi manusia pada cuaca, yang paling umum dilakukan adalah melalui penyemaian pada sistem awan (*cloud seeding*), dengan maksud mengkondisikan cuaca agar berperilaku lebih mengarah sesuai

dengan yang dibutuhkan. Pada umumnya TMC ditujukan untuk meningkatkan intensitas curah hujan atau mempercepat proses hujan di suatu tempat. TMC dilakukan dengan meniru proses alamiah yang terjadi di dalam awan. Sejumlah partikel higroskopik yang dibawa dengan pesawat sengaja ditambahkan langsung ke dalam awan jenis Cumulus (awan hujan) agar proses pengumpulan tetes air di dalam awan segera dimulai. Dengan berlangsungnya pembesaran tetes secara lebih efektif, maka proses hujan menjadi lebih cepat dan menghasilkan curah hujan yang lebih banyak (Wirahma *et al.*, 2014). Tindakan mempercepat proses hujan dapat diaplikasikan untuk menghalau hujan agar wilayah yang diinginkan di tempat lain tidak terjadi hujan. Aplikasi tersebut biasanya digunakan untuk mengamankan penyelenggaraan acara tertentu yang menghindari hujan atau bahkan diaplikasikan untuk menghalau hujan ekstrim untuk mencegah bencana banjir, seperti yang telah diterapkan di DKI Jakarta (Seto *et al.*, 2013). Penerapan TMC juga dapat diaplikasikan untuk memaksa hujan jatuh di lokasi tertentu, seperti untuk penanggulangan dampak kebakaran hutan (Syaifullah, 2012) atau untuk pengisian waduk sebagai penanggulangan kekeringan melalui peningkatan pasokan air untuk pertanian ataupun peningkatan pasokan air untuk produksi listrik (Abdillah *et al.*, 2017).

Penerapan TMC untuk pengisian waduk kaskade Citarum bukan yang pertama kali dilakukan di tahun 2021. Berdasarkan catatan 10 tahun terakhir dari pengelola waduk, telah dilakukan penerapan TMC pada tahun 2012 dan 2019. Pada tahun 2021 penerapan TMC telah dilaksanakan pada tanggal 12 Maret – 21 April 2021 (41 hari). Jumlah hari penerbangan/penyemaian sebanyak 31 hari, 6 hari tidak terbang karena kendala teknis pesawat, 3 hari tidak terbang karena tidak terdeteksi potensi pertumbuhan awan dari pantauan radar BPPT dan BMKG, serta 1 hari tidak terbang akibat cuaca buruk sehingga terkendala dalam hal jarak pandang pesawat.

Maksud dilakukannya monitoring dan evaluasi terhadap penerapan TMC adalah untuk pengumpulan data, analisis, dan evaluasi kondisi hidrologi waduk kaskade Citarum selama pelaksanaan TMC. Tujuannya adalah untuk menilai keberhasilan tambahan volume waduk akibat curah hujan selama pelaksanaan TMC dan menginformasikan kepada instansi terkait lainnya atas hasil pelaksanaan penerapan TMC. Monev TMC dalam kajian ini hanya dibahas pada aspek hidrologi.

METODOLOGI

Lokasi Kajian

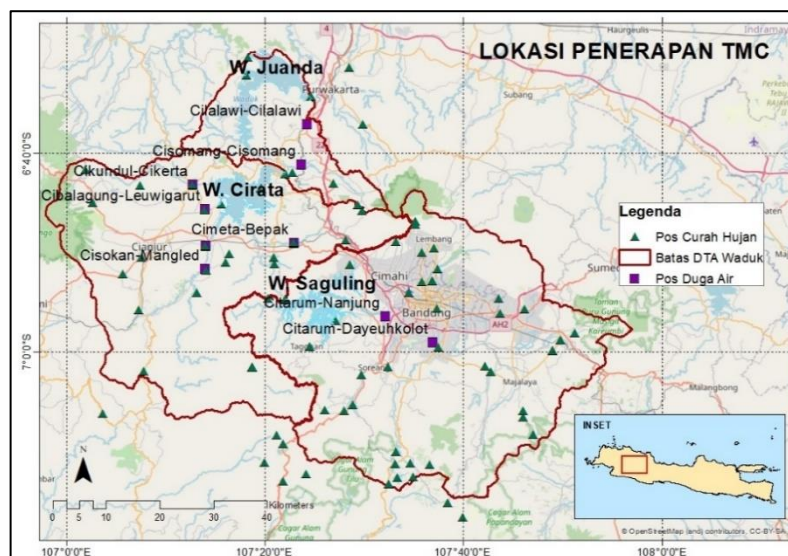
Lokasi target operasi penerapan TMC adalah DAS pada waduk kaskade Citarum, provinsi Jawa Barat dengan luas sekitar 6.900 km² (Gambar 1). Curah hujan ditargetkan turun pada hulu waduk Juanda ke atas agar bisa dimanfaatkan oleh ketiga waduk. Waduk kaskade Citarum sendiri terdiri dari tiga waduk yang tersusun secara seri dari hulu ke hilir yaitu waduk Saguling, waduk Cirata, dan waduk Juanda. Sistem kaskade pada ketiga waduk ini memiliki konsekuensi operasional ketiganya harus diatur sebagai satu sistem, karena *outflow* Saguling menjadi bagian dari *inflow* Cirata, dan *outflow* Cirata menjadi bagian dari *inflow* Juanda. Ketiga waduk ini memiliki elevasi muka air operasi minimum-maksimum berturut-turut sebesar 623-643 mdpl, 206-220 mdpl, dan 87,5-107 mdpl.

Waduk Saguling seluas 5.600 ha dimanfaatkan untuk kegiatan perikanan dan pembangkit listrik. Waduk Cirata seluas 6.200 Ha berfungsi untuk kegiatan perikanan dan pembangkit listrik. Waduk Jatiluhur seluas 8.300 ha merupakan waduk multifungsi yaitu untuk pembangkit tenaga listrik, pengendali banjir, pariwisata, irigasi, transportasi dan perikanan baik perikanan tangkap maupun budidaya (Krismono & Astuti, 2006). Pada umumnya pola curah hujan di DAS Citarum secara temporal memiliki pola curah hujan monsun yang curah hujannya tinggi pada bulan November, Desember, Januari, Februari dan Maret, namun mulai pada bulan April akhir hingga September memiliki curah hujan rendah ketika massa udara bergerak dari selatan atau monsun Australia mengarah ke utara (Berliana *et al.*, 2010).

Pelaksanaan Monev

Secara keseluruhan Monev TMC dilakukan dengan pengumpulan data setiap hari baik data hujan, Tinggi Muka Air (TMA), maupun data hidrologi waduk. Pengumpulan data dilakukan pada periode H-2 sampai H+2 pelaksanaan TMC yaitu dari 10 Maret jam 07:00 sampai 23 April Jam 07:00. Data yang terkumpul tiap hari pada hari sebelumnya, digunakan sebagai dasar untuk strategi penyemaian pada hari itu sesuai dengan pedoman yang ada (Indonesia, 2004). Setelah kegiatan penerapan TMC selesai, dilanjutkan analisis data untuk evaluasi hasil penerapan TMC secara keseluruhan.

Pengumpulan data curah hujan dilakukan di 95 pos hujan setiap hari pada pukul 07:00. Hujan diukur, dicatat, dan diinformasikan oleh pengamat pos ke pengelola waduk setiap hari, kemudian data yang terkumpul disampaikan ke Tim Monev. Selain pengamatan data hujan dari pos hujan, dilakukan juga pengamatan data satelit. Data hujan satelit yang dipilih adalah GSMaP dari JAXA (Organisasi Antariksa Jepang). Data hujan tersebut berbentuk grid dengan resolusi spasial 0.1 X 0.1⁰ atau sekitar 12 x 12 km pada lokasi kajian. Data hujan satelit tersebut dipilih untuk melihat tren hujan yang terjadi saat TMC dibandingkan dengan historis kejadian hujan pada DAS waduk kaskade Citarum. Pada kajian Monev TMC ini dibutuhkan analisis yang cepat untuk segera digunakan dalam pengambilan keputusan, sehingga data satelit dipilih karena kemudahan dalam memperolehnya. Dibandingkan dengan data pos hujan yang memerlukan pengecekan kesalahan penulisan data oleh pengamat, data hujan satelit lebih mudah digunakan karena memiliki kualitas data dengan sebaran spasial yang seragam, khususnya untuk kebutuhan analisis tren hujan bulanan.



Gambar 1 Lokasi target penerapan TMC

Data hujan GSMap telah banyak diterapkan berbagai negara termasuk di Indonesia. Salah satunya telah digunakan untuk analisis banjir di Cirebon tahun 2017 akibat hujan ekstrim, dimana pada lokasi tersebut tidak terdapat data pos hujan yang memadai (Mulyana, 2019). Kajian tren data GSMap juga telah diuji melalui perbandingan dengan data hujan manual pada tiga DAS di Indonesia (Syaifulallah, 2014). Hujan rerata DAS dihitung sesuai dengan bobot luas grid GSMap yang mencakup wilayah DAS kajian dengan persamaan sebagai berikut:

$$R_{av} = \frac{1}{A} (A_1 R_1 + A_2 R_2 + \dots + A_n R_n) \quad \dots (1)$$

dimana:

R_{av} = curah hujan rata-rata DAS

R_i = curah hujan tiap grid GSMap

A_i = bagian luasan

A = luas DAS

Pengumpulan data TMA sungai dilakukan di 8 Pos Duga Air (PDA) tiap jam. PDA tersebut adalah 1 PDA untuk pengamatan *inflow* waduk Saguling (Citarum-Nanjung), 5 PDA untuk pengamatan lokal *inflow* waduk Cirata (Cisokan-Mangled, Cilaku-Parungbedil, Cimeta-Bepak, Cikundul-Cikerta, Ciabalagung-Leuwigarut), serta 2 PDA untuk pengamatan lokal *inflow* waduk Juanda (Cisomang dan Cilalawi). Data TMA digunakan untuk mengkonfirmasi pengaruh curah hujan terhadap peningkatan debit sungai *inflow* waduk.

Pengumpulan data hidrologi waduk berupa TMA waduk, *outflow*, *inflow* dan lain-lain dilakukan dengan meminta informasi dari pengelola waduk. Untuk mengetahui berapa besarnya volume air hujan yang mengalir dan masuk ke waduk, maka dilakukan analisis keseimbangan air waduk. Debit aliran yang masuk ke Waduk Saguling dimonitor melalui Pos Duga Air Sungai Citarum-Nanjung yang jaraknya masih cukup jauh dari waduk Saguling, sehingga debit aliran yang masuk ke waduk tidak hanya berasal dari Sungai Citarum tetapi juga dari anak-anak sungai Citarum lainnya yang langsung masuk ke waduk. Oleh karena itu, perhitungan debit air masuk ke waduk sering tidak akurat karena tidak terukurnya debit yang langsung masuk ke waduk setelah pos duga air di Nanjung. Demikian halnya dengan *inflow* waduk Cirata dan Juanda. mengingat masalah utama di semua waduk adalah ketersediaan data dan perhitungan data debit air masuk, maka besaran debit aliran yang masuk ke waduk dianalisis dengan metode keseimbangan air waduk dengan periode harian. Rumus keseimbangan waduk cukup sederhana dan telah banyak diterapkan untuk analisis operasi waduk

(Kalbuardhi & Suwarno, 2018). Persamaannya dapat ditulis sebagai berikut:

$$\Delta S = I - O \quad \dots (2)$$

sehingga perhitungan *inflow* waduk adalah:

$$I = \Delta S + O \quad \dots (3)$$

$$I = V_2 - V_1 + O \quad \dots (4)$$

perhitungan *inflow* akibat hujan adalah:

$$I_{TMC} = I - I_B \quad \dots (5)$$

dimana:

ΔS = selisih volume tampungan

I = *inflow*

O = *outflow*

V_2 = volume storage akhir

V_1 = volume *storage* awal

I_{TMC} = *inflow* akibat TMC

I_B = aliran dasar

Pada kajian ini karena pengaruh evapotranspirasi waduk cukup kecil untuk rentang analisis waduk secara harian, maka diabaikan. Untuk memisahkan *inflow* yang masuk ke waduk akibat hujan, maka perlu diperhitungkan aliran dasar (*baseflow*), sehingga apabila *inflow* waduk lebih besar dari aliran dasarnya maka dianggap sebagai akibat limpasan hujan (*run-off*). Ada beberapa pendekatan teori cara memisahkan aliran dasar dengan aliran permukaan di suatu sungai (*baseflow separation*). Metode aliran dasar yang dipakai pada kajian ini adalah menggunakan analisis statistik debit andalan Q_{95} . Metode ini dipilih karena kesederhanaan perhitungannya. Debit andalan Q_{95} adalah debit yang dapat tersedia atau setidaknya ada debit dengan minimal nilai tertentu dapat tercapai dengan probabilitas 95%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Data Hujan pada Pos Curah Hujan

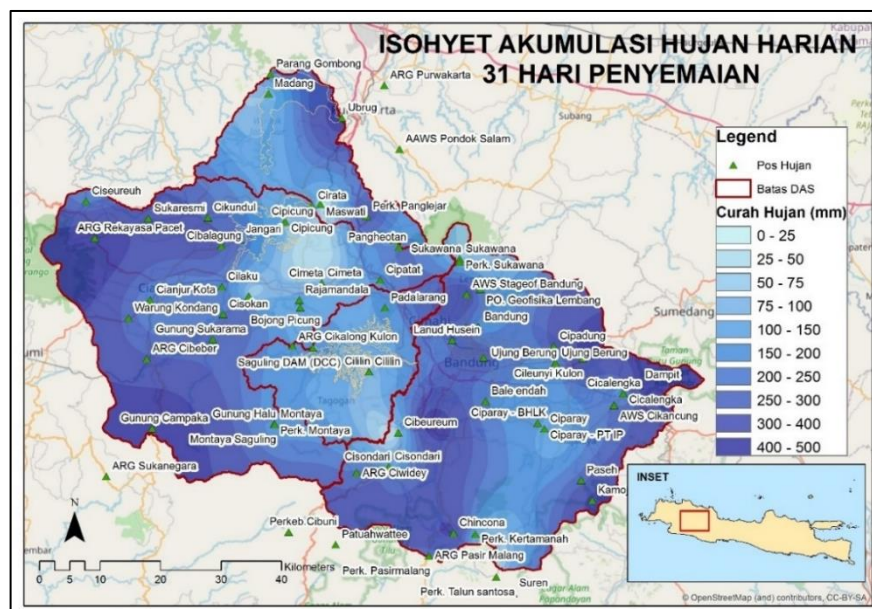
Data hujan yang telah dikumpulkan selanjutnya dibuat isohyet untuk hujan yang terjadi, yang disajikan pada Gambar 2. Terlihat bahwa seluruh wilayah DAS waduk kaskade Citarum telah terjadi hujan, meskipun terjadi pada waktu dan kuantitas yang berbeda. Isohyet jumlah curah hujan selama periode TMC dihitung hanya menggunakan hari saat dilakukan penyemaian (31 hari) ditunjukkan pada Gambar 3. Terlihat bahwa daerah yang paling banyak mengalami hujan adalah wilayah batas DAS waduk. DAS waduk Saguling banyak mendapatkan curah hujan di wilayah Timur Laut dan Timur serta di tengah, di daerah Cibeureum sampai ke selatan daerah Ciwideuy. DAS waduk Cirata banyak mendapatkan curah hujan di wilayah barat, daerah Gunung Campaka dan Pacet. DAS waduk Juanda

banyak mendapatkan curah hujan di wilayah Timur, daerah Ubrug.

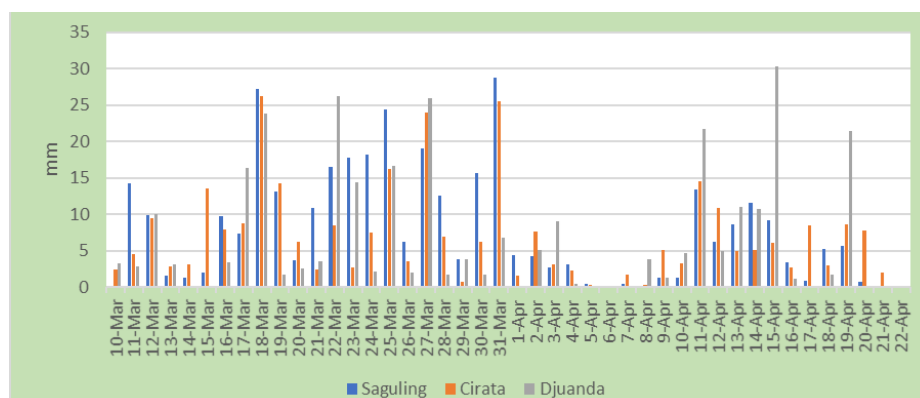
Berdasarkan data pos hujan yang telah didapatkan, hujan tertinggi yang tercatat terjadi di Pos Soreang Indah sebesar 117 mm pada tanggal 31 Maret 2021, sedangkan akumulasi hujan (31 hari) terbesar terjadi pada pos Gunung Campaka sebesar 452 mm. Grafik hujan rata-rata harian yang dihitung dengan metode rerata aritmatik dari data pos hujan di masing-masing DAS waduk selama periode TMC ditunjukkan pada Gambar 3.

Selama periode TMC (40 hari), hujan rerata harian DAS tiap waduk adalah 8,3 mm untuk Saguling, 7,4 mm untuk Cirata, dan 7,4 untuk Juanda. Apabila hanya memperhitungkan hari dilakukan penyemaian (31 hari), hujan rerata harian DAS tiap waduk adalah 9,1 mm untuk Saguling, 8,1 mm untuk Cirata, dan 8,4 mm untuk Juanda. Hasil perhitungan hujan rerata harian DAS tiap waduk menunjukkan bahwa waduk Saguling mendapatkan potensi paling besar dari air hujan

yang akan masuk ke waduk, diikuti dengan Juanda dan Cirata. Total hujan harian rata-rata yang diterima pada keseluruhan DAS waduk Juanda adalah 7,8 mm atau akumulasi selama periode TMC 40 hari adalah 314 mm, dengan luas DAS 4599 km² sehingga didapatkan volume 1444 juta m³. Apabila hanya memperhitungkan hari dilakukan penyemaian adalah 8,6 mm atau akumulasi dalam 31 hari penyemaian adalah 268 mm, sehingga didapatkan volume 1231 juta m³. Selisih volume diantara keduanya adalah sekitar 15%, padahal ada jeda 9 hari tidak dilakukan TMC dari 40 hari pelaksanaan (23 %). Hal tersebut sesuai dengan catatan pelaksanaan penerbangan penyemaian TMC dimana 3 dari 40 hari (8 %) tidak dilakukan penyemaian karena memang tidak ada potensi pertumbuhan awan. 6 hari sisanya tidak dilakukan penyemaian akibat kendala teknis pesawat. Hal ini perlu menjadi evaluasi pelaksana TMC karena dapat kehilangan 15% potensi curah hujan yang dapat ditingkatkan, apabila dilakukan TMC.



Gambar 2 Isohyet jumlah hujan rata-rata tiap pos hujan selama 31 hari penyemaian



Gambar 3 Hujan Rata-Rata Harian Selama Periode TMC

Analisis Data Curah Hujan Satelit

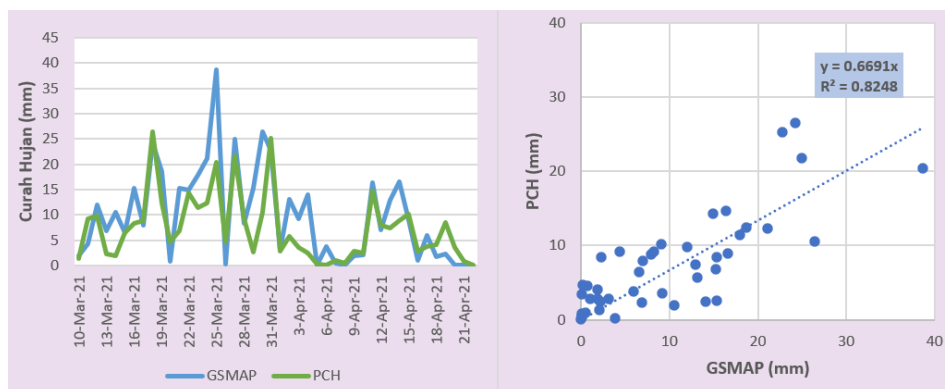
Data hujan satelit GSMaP tiap grid diakumulasikan harian per jam 07:00, kemudian dikonversi ke hujan rerata wilayah, untuk dibandingkan dengan data pos hujan yang juga dikonversi ke hujan wilayah selama periode TMC (Gambar 4). Hal tersebut dilakukan untuk memastikan bahwa tren data hujan GSMaP tidak jauh berbeda dengan data pos curah hujan (PCH).

Pada Gambar 4 terlihat bahwa meskipun terdapat perbedaan antara hujan harian PCH dengan GSMaP, namun terlihat trennya tetap sama dengan nilai koefisien determinasi cukup besar $R^2 = 0,8248$. Hal tersebut untuk memvalidasi Data GSMaP yang digunakan untuk analisis tren bulanan. Nilai koefisien determinasi tersebut lebih besar apabila dibandingkan dengan hasil studi perbandingan GSMaP dan Pos Hujan di Nepal sebesar 0,62 (Shrestha *et al.*, 2011) dan di tiga DAS di Indonesia sebesar 0,14 (M. D. Syaifullah, 2014), namun kajian tersebut dan yang umum dilakukan pada studi perbandingan data adalah hujan grid satelit dibandingkan terhadap hujan titik dari pos

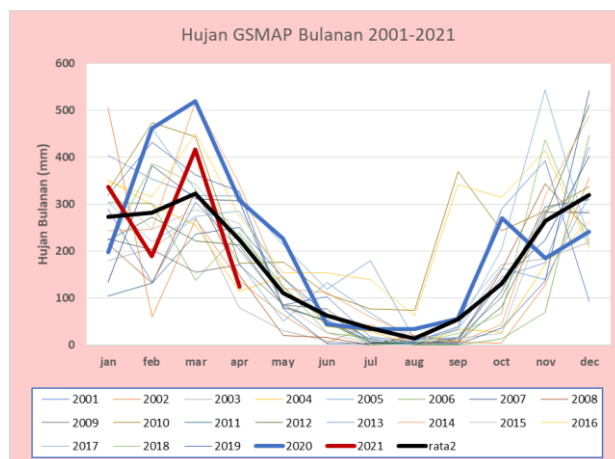
hujan. Selisih nilai hujan satelit terhadap pos hujan akan makin kecil apabila keduanya telah dikonversi ke hujan rerata wilayah (Akrom *et al.*, 2017).

Data hujan GSMaP bulanan Januari - April 2021, kemudian dibandingkan dengan data historis rata-rata bulannya dari tahun 2001-2020 (Gambar 5). Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui kondisi curah hujan pada tahun 2021, saat dilakukan TMC.

Pada Gambar 5 terlihat bahwa pada awal tahun 2020 terlihat bahwa curah hujan cukup besar di atas nilai rata-rata selama 20 tahun terakhir, namun saat masuk ke musim hujan 2020 yaitu pada bulan November dan Desember 2020, curah hujan yang terjadi berada di bawah rata-rata. Hal tersebut mengakibatkan *inflow* waduk turun pada awal tahun 2021. Pada saat pelaksanaan TMC pada bulan Maret 2021 terlihat peningkatan curah hujan dibandingkan rata-ratanya, namun pada bulan April 2021 intensitas curah hujannya menurun. Hal ini menunjukkan bahwa pelaksanaan TMC ini tidak selalu menghasilkan curah hujan yang lebih besar dari nilai historisnya.



Gambar 4 Perbandingan Data Curah Hujan Harian Rata-rata DAS antara GSMaP dan Pos Hujan Selama Periode TMC

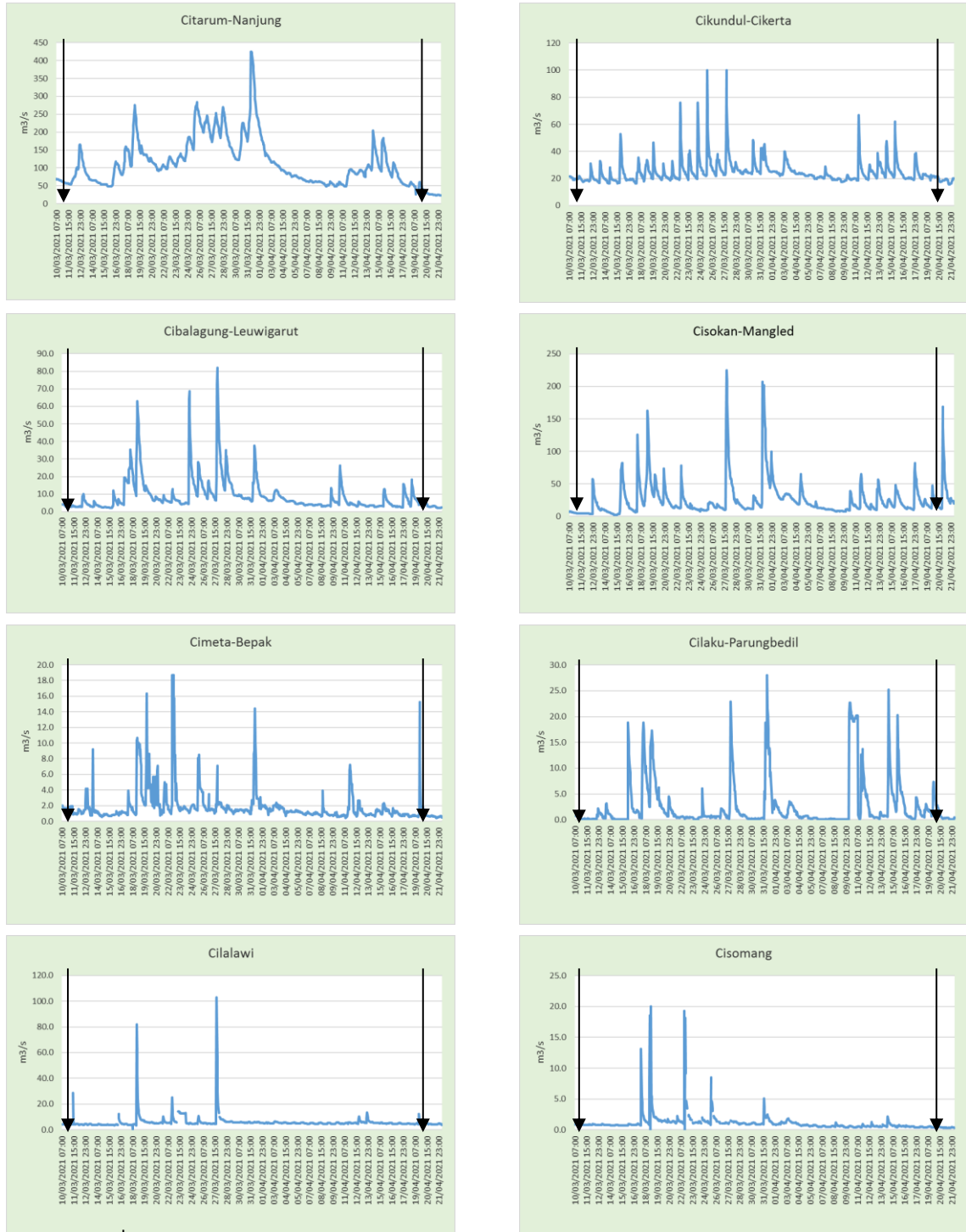


Gambar 5 Perbandingan Data Curah Hujan Bulanan GSMaP Rata-rata DAS waduk kaskade Citarum

Analisis Debit Sungai *Inflow* Waduk

Pengamatan debit pada PDA dilakukan untuk memastikan bahwa hujan berdampak pada kenaikan muka air sungai yang menjadi *inflow*

waduk dan untuk pengaturan strategi penyemaian awan tiap hari, terutama jika terjadi banjir. Grafik tinggi muka air selama periode TMC ditunjukkan pada Gambar 6.



Keterangan: ↓ awal dan akhir TMC

Gambar 6 Grafik Tinggi Muka Air PDA pada sungai *inflow* waduk

Berdasarkan grafik pengamatan tinggi muka air pada 8 PDA Pengamatan, dapat dilihat bahwa debit air sungai mengalami kenaikan signifikan beberapa saat sejak awal periode TMC, dari pertengahan hingga akhir Maret 2021. Pada bulan April masih terdapat curah hujan namun tidak sebesar bulan sebelumnya. Hal tersebut yang mengakibatkan debit air sungai tidak mengalami kenaikan yang cukup signifikan, kecuali pada PDA Ciluku-Parungbedil dimana hulu pos tersebut masih sering terdapat hujan pada bulan April dan sungai tersebut cukup kecil sehingga respon kenaikan debit terhadap adanya hujan di hulu cukup cepat.

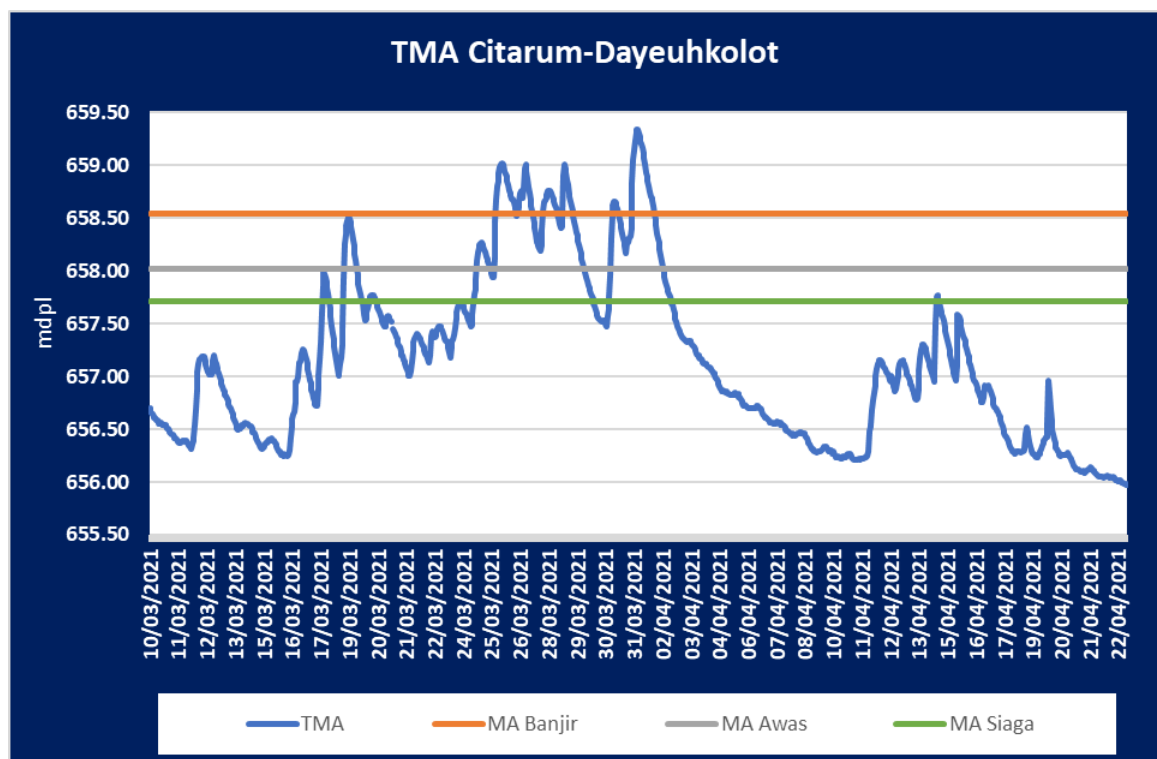
Selain pengamatan untuk PDA pada sungai inflow waduk, dilakukan juga pengamatan PDA untuk siaga banjir, yaitu Pos Citarum-Dayeuhkolot sebagai indikator siaga banjir di daerah Bandung. Pos tersebut merupakan PDA telemetri dengan data muka air per jam. Grafik TMA Pos Citarum-Dayeuhkolot ditunjukkan Gambar 7.

Dari pengamatan tinggi muka air selama periode TMC, muka air beberapa kali melampaui

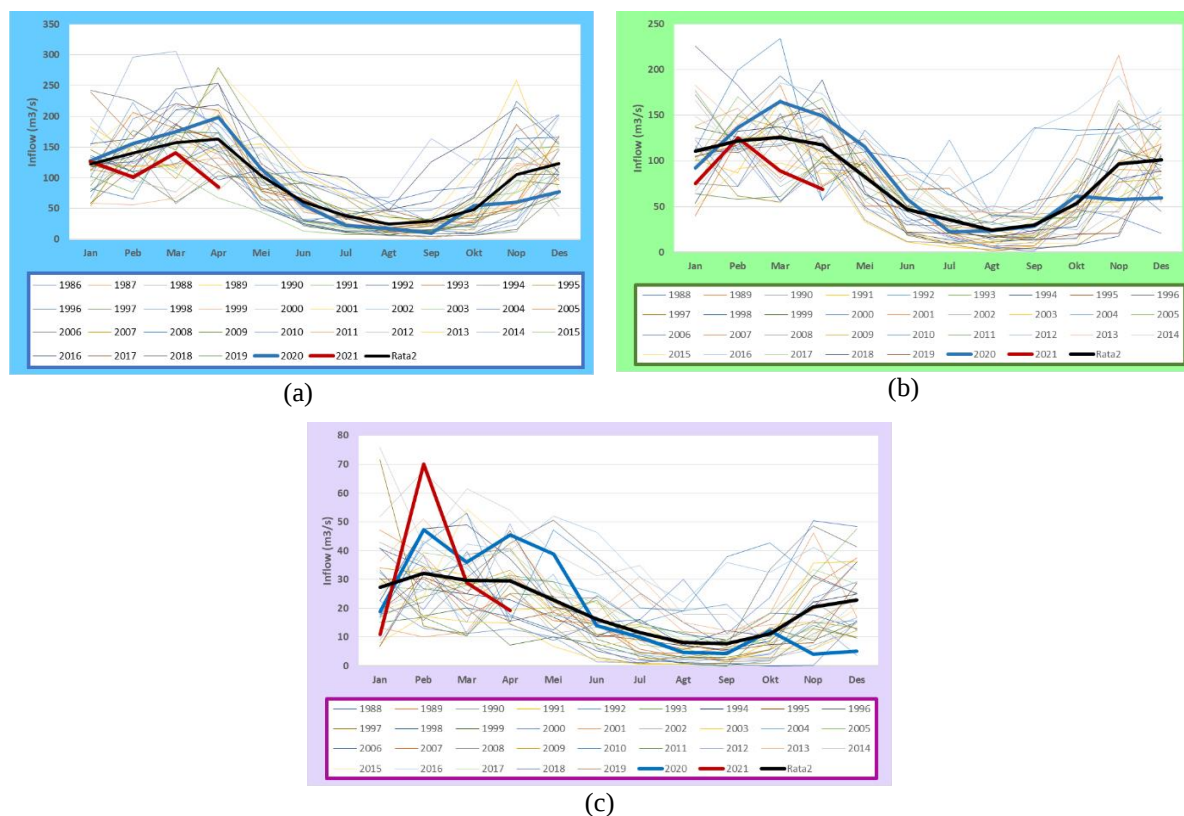
batas MA Banjir (616 cm diatas 0 peilskal atau 658.546 mdpl) diantara tanggal 25 Maret – 1 April 2021. Puncak banjir terjadi pada 1 April 2021 Jam 02:00 sebesar 659.335 mdpl, kemudian tinggi muka air setelahnya tidak sampai melewati batas MA siaga banjir sampai penerapan TMC berakhir. Saat pelaksanaan Monev harian, ketika TMA Pos Citarum-Dayeuhkolot diatas batas Siaga (657.715 mdpl), penyemaian diarahkan menjauhi DAS Pos Citarum-Dayeuhkolot yang merupakan wilayah DAS waduk Saguling.

Analisis Inflow Waduk

Hujan yang terjadi berdampak terhadap *Inflow* waduk. Untuk mengetahui kondisi *inflow* waduk pada periode TMC bulan Maret dan April 2021 perlu dibandingkan dengan data *inflow* waduk historis. Data *inflow* waduk bulanan tersedia dari tahun 1986 untuk Saguling dan 1988 untuk Cirata dan Juanda. Perbandingan *inflow* bulanan dengan rata-rata historis ketiga waduk ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 7 Grafik TMA Pos Citarum-Dayeuhkolot



Gambar 8 Perbandingan Inflow Bulanan dengan Rata-rata Historis Waduk (a) Saguling, (b) Cirata, dan (c) Juanda

Berdasarkan perbandingan *inflow* bulanan dengan rata-rata historis ketiga waduk terlihat bahwa pada awal tahun 2020 *inflow* ketiga waduk yang terjadi berada diatas rata-rata historisnya., Pada saat itu kondisi muka air waduk juga berada diatas batas operasi normal, sehingga pelaksanaan penerapan TMC awal tahun 2020 tidak dibutuhkan. Sayangnya yang terjadi selanjutnya pada akhir 2020 sampai Januari 2021, *inflow* ketiga waduk berada jauh dibawah rata-rata, hanya waduk Saguling dengan *inflow* pada bulan Januari 2021 sedikit diatas rata-rata. Hal tersebut merupakan suatu anomali, dimana biasanya bulan-bulan basah November, Desember, dan Januari adalah saatnya waduk mengisi tampungan, namun *inflow* ketiga waduk justru kecil. Padahal menurut BMKG indeks ENSO Indonesia tahun 2020 sampai April adalah La Nina lemah hingga moderat. *Inflow* yang terjadi pada periode TMC bulan Maret dan April juga tidak meningkat secara signifikan, terlihat *inflow* ketiga waduk masih berada dibawah rata-rata.

Analisis Keseimbangan Air Waduk

Inflow air yang masuk ke waduk tidak hanya berasal dari sungai utama, tetapi berasal juga dari anak-anak sungainya yang tentu tidak semua bisa terukur dengan pos duga air. Maka dari itu, perhitungan *inflow* didapatkan dari analisis keseimbangan air waduk. Untuk memisahkan air limpasan akibat hujan terhadap aliran dasarnya,

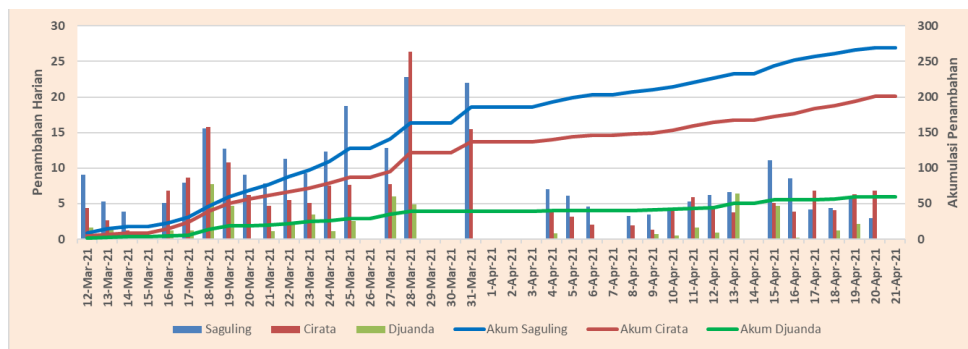
maka perlu dihitung aliran dasarnya, sehingga *inflow* yang masuk ke waduk akibat TMC setidaknya dapat didekati melalui metode tersebut. Volume tampungan masing-masing waduk didapatkan dari tabel Elevasi-Tampungan hasil pemeruman tahun 2016 untuk Saguling, tahun 2017 untuk Cirata, dan tahun 2000 untuk Juanda. Perhitungan aliran dasar menggunakan debit andalan Q_{95} dari data *inflow* lokal rata-rata bulanan tahun 1986-2020 sebesar 11 m³/s untuk Saguling, tahun 1988-2020 sebesar 10 m³/s untuk Cirata dan tahun 1988-2020 sebesar 1.4 m³/s untuk Juanda. Perhitungan volume air yang masuk ke waduk disajikan pada Lampiran. Grafik Penambahan volume disajikan pada Gambar 9.

Sampai saat ini, belum ada metode untuk memisahkan air hujan hasil penyemaian TMC terhadap air hujan alami, sehingga perhitungan volume air yang masuk ke waduk pada kajian ini menggunakan asumsi volume air yang masuk saat hari tidak dilakukan penyemaian tidak dimasukkan dalam perhitungan. Maka dari itu, hanya hari saat penyemaian saja yang dihitung (31 hari). Total penambahan volume ketiga waduk sebesar 270 juta m³ untuk Saguling, 201 juta m³ untuk Cirata dan 59 juta m³ untuk Juanda. Apabila *inflow* selama periode TMC diperhitungkan (40 hari), maka total penambahan volume ketiga waduk sebesar 368 juta m³ untuk Saguling, 246 juta m³ untuk Cirata, dan 73 juta m³ untuk Juanda. Terdapat selisih sebesar 27 %

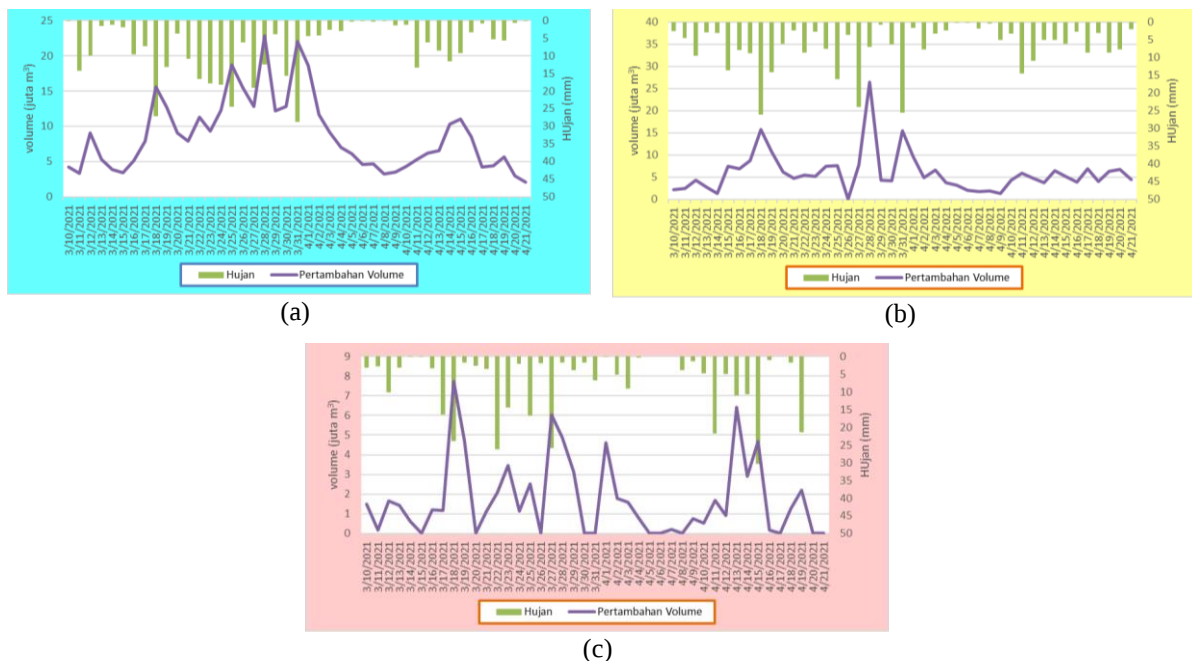
untuk Saguling, 18 % untuk Cirata, dan 19 % untuk Juanda. Apabila ketiga nilai persentase tersebut dibandingkan terhadap persentase jumlah hari tidak dilakukan TMC (9 hari dari 31 hari), yaitu sebesar 29 %, maka ketiganya lebih kecil dari nilai tersebut, sehingga dampak 9 hari tidak dilakukan penyemaian terlihat sedikit berpengaruh mengurangi penambahan *inflow*. Hal tersebut sebenarnya masih bisa dianggap sesuai, karena pada beberapa hari tidak dilakukan TMC ada 3 hari yang diakibatkan oleh tidak adanya potensi pertumbuhan awan. Pada grafik Gambar 9 merupakan penambahan volume waduk yang didapatkan dengan hanya mengakomodasi *inflow* pada hari saat penyemaian. Pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa volume waduk meningkat secara signifikan pada bulan Maret namun pada bulan April, akibat curah hujan yang kecil, sehingga penambahan volume waduknya pun juga lebih kecil daripada bulan Maret.

Evaluasi Keberhasilan Pelaksanaan TMC

Berdasarkan analisis data hujan dan volume air yang masuk ke waduk, dapat dilihat bahwa air hujan berkorelasi terhadap pertambahan volume waduk seperti pada Gambar 10, walaupun terlihat bahwa pertambahan volume meningkat pada hari yang belum tentu sama dengan hari kejadian hujan. Hal tersebut masih sesuai dengan sifat hidrologis DAS dimana air hujan yang jatuh membasahi tanah terlebih dahulu, sebagian ada yang langsung menjadi limpasan, sebagian ada yang meresap ke dalam tanah sesuai dengan kondisi kejenuhan masing-masing tanah (Sudirman *et al.*, 2021). Air yang meresap kedalam tanah ada juga yang masuk menjadi air tanah dan ada juga yang menuju ke sungai melalui pori-pori tanah yang tentunya memiliki keterlambatan (*lagging*) dibandingkan dengan limpasan langsung.



Gambar 9 Grafik Penambahan Volume Waduk



Gambar 10 Hubungan Curah Hujan terhadap *Inflow* dan Penambahan Volume Waduk (a) Saguling, (b) Cirata, dan (c) Juanda

Hubungan curah hujan terhadap pertambahan volume pada periode TMC ditunjukkan Tabel 1. Berdasarkan tabel tersebut terlihat bahwa hanya 43% air hujan yang menjadi *inflow* ke waduk, sebagian air hujan masuk pori-pori tanah untuk mengisi cadangan air tanah dan menjenuhkan kadar air dalam tanah (57%).

Pada kajian ini evapotranspirasi pada kesetimbangan air waduk tidak diperhitungkan. Evapotranspirasi waduk Juanda adalah sekitar 4,1 mm (Kalbuwardhi & Suwarno, 2018). Apabila evapotranspirasi pada waduk Saguling dan Cirata dianggap tidak jauh berbeda, dan kemudian dihitung total evapotranspirasi pada hari dilakukan penyemaian (31 hari), maka didapatkan total evapotranspirasi sebesar 127,1 mm. Nilai tersebut dikalikan dengan total luas genangan ketiga waduk (201 km²) untuk mendapatkan pengurangan volume waduk akibat evapotranspirasi dan diperoleh hasil sebesar 25,5 juta m³. Apabila volume tersebut dibandingkan dengan volume total *inflow* (530 juta m³), maka hanya berkontribusi sebesar 4,8 %, sehingga pengaruhnya dapat diabaikan.

Evaluasi kondisi waduk selama periode TMC ditunjukkan pada Tabel 2. TMA ketiga waduk mengalami peningkatan dari awal TMC 12 Maret jam 07:00 sampai 21 April jam 07:00. Hal tersebut terlihat jelas akibat *inflow* lebih besar daripada

outflow. Meskipun terdapat perbedaan volume air yang masuk pada ketiga waduk akibat perbedaan luas DAS dan akumulasi hujan yang terjadi saat hari penyemaian TMC, sehingga waduk Saguling mendapatkan *inflow* akibat TMC yang paling besar (466 juta m³), namun pada akhirnya air tersebut juga akan mengalir ke waduk Cirata dan Juanda.

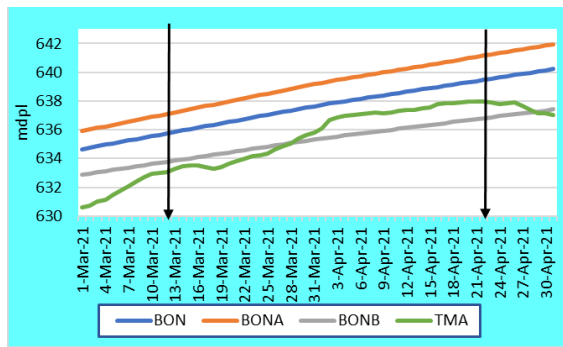
Selain volume air yang masuk ke waduk, perlu dilihat juga kondisi TMA waduk terhadap rencananya. Pola operasi waduk kaskade Citarum dibuat berdasarkan rencana kebutuhan air dan prediksi *inflow* selama satu tahun, selanjutnya dibuat rencana tinggi muka air bulanan selama satu tahun menggunakan optimasi kesetimbangan air waduk. Rencana tinggi muka air berupa batas operasi normal (BON), BON atas (BONA) dan BON bawah (BONB). Grafik realisasi TMA ketiga waduk ditunjukkan pada Gambar 11. Terlihat bahwa nilai TMA ketiga waduk mengalami peningkatan dengan nilai yang telah ditampilkan pada Tabel 2, yaitu 4,92 m (Saguling), 4,49 (Cirata), dan 0,93 m (Juanda). TMA akhir pada akhir TMC 21 April merupakan yang tertinggi, (1,40 m dibawah BON atau 1,25 diatas BONB). TMA tertinggi waduk Cirata yang tercapai pada periode TMC adalah 215,32 (0,79 m dibawah BON atau 1,78 diatas BONB), sedangkan untuk waduk Juanda adalah 99,02 (1,14 m di bawah BON atau 1,62 di atas BONB).

Tabel 1 Tabel perhitungan volume air masuk dan hujan saat hari penyemaian (31 hari)

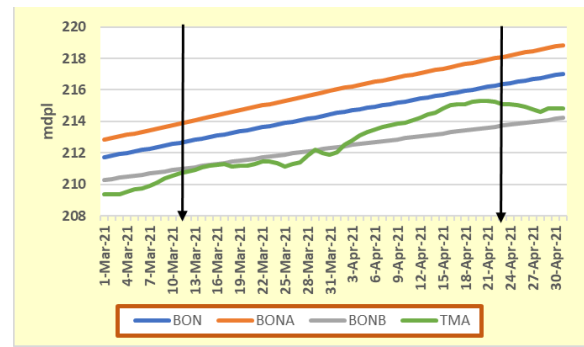
Waduk	Luas DAS (km ²)	Hujan harian rata-rata (mm)	Akumulasi hujan (mm)	Volume Hujan (juta m ³)	Volume <i>Inflow</i> Akibat Limpasan Hujan (juta m ³)	Persentase air masuk terhadap hujan
Saguling	2295	9,1	282	648	270	42%
Cirata	1837	8,1	251	461	201	44%
Juanda	467	8,4	262	122	59	48%
Total	4599	8,6	268	1231	530	43%

Tabel 2 Evaluasi kondisi waduk pada periode TMC

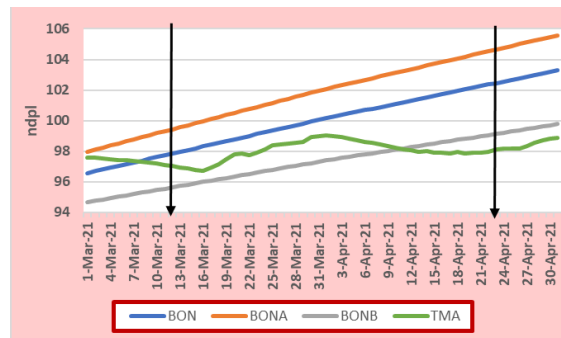
Waduk	Volume <i>Inflow</i> (juta m ³)	Volume Lokal <i>Inflow</i> (juta m ³)	Volume <i>Outflow</i> (juta m ³)	TMA Awal 12 Maret jam 07:00 (mdpl)	TMA Akhir 21 April jam 07:00 (mdpl)	Selisih TMA (m)
Saguling	466	466	259	633,11	638,03	4,92
Cirata	478	219	309	210,85	215,34	4,49
Juanda	335	26	326	96,97	97,90	0,93



(a)



(b)



(c)

Gambar 11 Grafik TMA, BON, BONB, dan BONA (a) Saguling, (b) Cirata dan (c) Juanda

TMA Saguling dan Cirata cenderung konsisten semakin naik pada periode TMC. Berbeda halnya dengan Juanda yang mengalami kenaikan hanya sampai bulan Maret. Pada Gambar 11 juga telah dijelaskan bahwa pada bulan April *inflow* ketiga waduk tidak sebesar bulan Maret. Pada Lampiran juga terlihat bahwa *outflow* Saguling (Tabel L2) dan Cirata (Tabel L1) semakin kecil pada bulan April dibandingkan bulan Maret. Namun berbeda halnya dengan Juanda (Tabel L3) yang mengeluarkan air cenderung konstan, bahkan polanya justru semakin meningkat pada kisaran 88 – 100 m³, meskipun air masuk pada waduk tersebut semakin kecil pada bulan April. Hal tersebut tidak bisa dihindari mengingat fungsi waduk Juanda sebagai waduk multifungsi untuk irigasi, air baku, dan pembangkit listrik. Berbeda halnya dengan kedua waduk di hulu yang hanya fokus utamanya sebagai pembangkit listrik.

Berdasarkan hasil evaluasi keseluruhan, Hujan yang terjadi saat TMC berdampak langsung terhadap kenaikan tinggi muka air sungai *inflow* waduk, yang selanjutnya berdampak pada pertambahan volume waduk. Pelaksanaan TMC telah berhasil menambah volume waduk sekitar 270 juta m³ untuk Saguling, 201 juta m³ untuk Cirata, dan 59 juta m³ untuk Juanda. Pada akhir TMC, TMA waduk Saguling berada pada 1,4 m dibawah BON, waduk Cirata 0,89 m dibawah BON, dan Juanda 4,34 m dibawah BON (1,07 m dibawah

BONB). Pelaksanaan TMC tidak dapat menaikkan TMA ketiga waduk ke Batas Operasi Normal, karena TMA waduk bukan hanya dipengaruhi oleh *inflow* tetapi juga *outflow*, yang merupakan kebijakan masing-masing pengelola waduk. Selain itu, meskipun volume *inflow* waduk cukup besar, namun nilai *inflow* saat TMC bulan Maret dan April 2021 lebih rendah dari rata-rata historisnya.

KESIMPULAN

Jumlah hujan rata-rata harian pada daerah tangkapan waduk selama periode TMC dengan memperhitungkan hari saat dilakukan penyemaian saja adalah 9,1 mm untuk Saguling; 8,1 mm untuk Cirata; 8,4 mm untuk Juanda, dan 8,6 mm untuk seluruh DAS waduk kaskade Citarum.

Curah hujan yang terjadi pada akhir tahun 2020 berada di bawah rata-rata historisnya, yang mengakibatkan *inflow* waduk sangat rendah pada awal tahun 2021. Saat pelaksanaan TMC pada bulan Maret 2021 terlihat peningkatan curah hujan dibandingkan rata-ratanya, namun pada bulan April 2021 intensitas curah hujannya menurun, sehingga mengakibatkan nilai *inflow* saat TMC bulan Maret dan April 2021 lebih rendah dari rata-rata historisnya.

Penerapan TMC tidak dapat menaikkan TMA ketiga waduk ke Batas Operasi Normal, namun telah berhasil menambah volume waduk sekitar 270 juta

m³ untuk Saguling, 201 juta m³ untuk Cirata. dan 59 juta m³ untuk Juanda.

Pada kajian ini digunakan beberapa asumsi pemilihan metode perhitungan yang berpengaruh terhadap hasil analisis, seperti perhitungan aliran dasar menggunakan debit andalan Q₉₅, perhitungan air yang masuk ke waduk menggunakan kesetimbangan air waduk, dan lainnya. Pada kajian selanjutnya, dapat dilakukan analisis dengan membandingkan berbagai alternatif metode.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan khususnya kepada seluruh tim Monev TMC waduk Kaskade Citarum tahun 2021 dari Balai Hidrologi dan Lingkungan Keairan, Ditjen SDA. Atas kerjasama dalam kegiatan penerapan TMC serta pertukaran informasi dan data, diucapkan juga terima kasih kepada Balai Besar Teknologi Modifikasi Cuaca BPPT sebagai pelaksana TMC, BMKG sebagai penyedia dukungan data dan informasi cuaca, serta para pengelola waduk, yaitu PT Indonesia Power Saguling POMU, PT Pembangkitan Jawa Bali UP Cirata, dan Perum Jasa Tirta II (Juanda).

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, P. A., Syaifullah, M. D., & Sibarani, R. M. (2017). Analisis Cuaca pada Penerapan Teknologi Modifikasi Cuaca di DAS PLTA₇. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 18(2): 67–74. <https://doi.org/10.29122/jstmc.v18i2.2784>
- Akrom, I. F., Hadihardaja, I. K., & Adidharma, W. K. (2017). Kajian Data TRMM dan GPCC Sebagai Pengisi Data Kosong Hujan Bulanan dan Tengah Bulanan Studi Kasus DAS Citarum Hulu. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, 3(2): 101–114.
- Arham, I. L., & Adiwibowo, S. (2022). Pengaruh Kemarau Panjang 2019 Sebagai Indikasi Perubahan Iklim Terhadap Kesejahteraan Rumah Tangga Petani Padi Desa Tenajar Kidul, Indramayu. *Jurnal Sains Komunikasi Dan Pengembangan Masyarakat*, 6(1): 86–100. <https://doi.org/10.29244/jskpm.v6i1.910>
- Berliana, S., Febrianti, N., Cholianawat, N., & Susanti, I. (2010). Dampak Perubahan Iklim Terhadap Daerah Aliran Sungai Citarum Berbasis Satelit Climate. *Penelitian Masalah Lingkungan Di Indonesia*, March 2018, 121–130.
- Indonesia. (2004). *Monitoring dan Evaluasi Hasil Penerapan Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) dalam Pengisian Waduk Pd T-20-2004-A*. Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Kalbuadhi, R., & Suwarno, D. (2018). Analisis Ketersediaan Air Waduk Jatiluhur Sebagai Dasar Penerapan Pola Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Air (Studi Kasus: PLTA Waduk Jatiluhur Kabupaten Purwakarta, Jawa Barat). *Jurnal Teknik Sipil Unika Soegijapranata Semarang*, 2(2):51–61. <https://doi.org/10.24167/gsv2i2.1573>
- Krismono, & Astuti, L. P. (2006). Pengelolaan Waduk Kaskade (Saguling, Cirata, Jatiluhur) untuk Budidaya Ikan dalam Karamba Jaring Apung (KJA). *Prosiding Seminar Nasional Ikan IV, Jatiluhur, 29-30 Agustus 2006*, 225–229.
- Mulyana, E. (2019). *Konvergensi Atmosfer Lapisan Bawah dan Hubungannya dengan Hujan Ekstrem (Studi Kasus: Banjir Cirebon 15 Februari 2017)*. 20(1), 23–29. <https://doi.org/10.29122/jstmc.v20i1.3943>
- Nabilah, F., Prasetyo, Y., & Sukmono, A. (2017). Analisis Pengaruh Fenomena El Nino dan La Nina terhadap Curah Hujan Tahun 1998 – 2016 Menggunakan Indikator ONI (Oceanic Nino Index) (Studi Kasus : Provinsi Jawa). *Jurnal Geodesi Undip*, 6(4): 402–412.
- Seto, T. H., Tikno, S., & Widodo, F. H. (2013). Pemanfaatan Teknologi Modifikasi Cuaca untuk Redistribusi Curah Hujan dalam Rangka Tanggap Darurat Banjir di Provinsi DKI Jakarta dan Sekitarnya. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 14(1): 1–11. <https://doi.org/10.29122/jstmc.v14i1.2676>
- Shrestha, M. S., Kaoru, T., Kubota, T., & Bajiracharya, S. R. (2011). Verification of Gsmap Rainfall. *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 67(4): 37–42.
- Sudirman, Saidah, H., Tumpu, M., Yasa, I. W., Nenny, Ihsan, M., Nurmayaty, Rustan, F. R., & Tamrin. (2021). *Sistem Irigasi dan Bangunan Air* (A. Karim, Ed.). Yayasan Kita Menulis.
- Syaifullah, D. (2012). Penerapan Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) untuk Mengatasi Kabut Asap Akibat Kebakaran Lahan dan Hutan di Provinsi Jambi September-Oktober 2012. *Jurnal Sains & Modifikasi Cuaca*, 13(2): 51–60. <https://doi.org/10.29122/jstmc.v13i2.2572>
- Syaifullah, M. D. (2014). Validasi Data TRMM terhadap Data Curah Hujan Aktual di Tiga DAS di Indonesia. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*, 15(2): 109–118. <https://doi.org/10.31172/jmg.v15i2.180>
- Tampang, L. (2017). Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Lumpias untuk Rancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro. *Prosiding Seminar Nasional*

- Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Secara Terpadu 2017: 73–78.*
- Wahyuni, A., & Junianto. (2017). Analisa Kebutuhan Air Bersih Kota Batam pada Tahun 2025. *TAPAK*, 6(2): 116–126. <https://doi.org/10.24127/tapak.v6i2.419>
- Wirahma, S., Seto, T. H., & Athoillah, I. (2014). Pemanfaatan Teknologi Modifikasi Cuaca Untuk Perkebunan Kelapa Sawit. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 15(1): 39–47. <https://doi.org/10.29122/jstmc.v15i1.2656>

*Monitoring dan evaluasi penerapan teknologi modifikasi cuaca
di daerah aliran sungai waduk kaskade citarum.... (Isnain Fauzan Akrom, Muhammad Fauzi)*

LAMPIRAN

Tabel L1 Perhitungan Pertambahan Volume Waduk Saguling

Tanggal	TMA	VOLUME (Juta m ³)	STORAGE (Juta m ³)	Air Keluar			AM Calc		Baseflow		Penambahan Vol. TMC		Keterangan
(1)	(2)	(3)	(4)	(m ³ /det) (5)	(Juta m ³) (6)	(Juta m ³) (7)=Komul(6)	(Juta m ³) (8)=(4)+(6)	(Juta m ³) (9)=Komul(8)	(m ³ /det) (10)	(Juta m ³) (11)	(Juta m ³) (12)	(Juta m ³) (13)=Komul(12)	
3/10/2021	632,96	289,02	2,27	34,49	2,98	2,98	5,25	5,25	11,49	0,99	4,26		
3/11/2021	633,05	291,29	1,56	32,29	2,79	5,77	4,35	9,60	11,49	0,99	3,36		
3/12/2021	633,11	292,85	6,52	40,75	3,52	9,29	10,04	19,64	11,49	0,99	9,04	9,04	TMC
3/13/2021	633,36	299,37	3,13	36,62	3,16	12,45	6,29	25,93	11,49	0,99	5,30	14,34	TMC
3/14/2021	633,48	302,50	1,56	38,62	3,34	15,79	4,90	30,83	11,49	0,99	3,91	18,25	TMC
3/15/2021	633,54	304,06	0,26	47,79	4,13	19,92	4,39	35,22	11,49	0,99	0,00	18,25	tidak TMC
3/16/2021	633,55	304,32	-3,13	106,89	9,23	29,16	6,11	41,33	11,49	0,99	5,11	23,36	TMC
3/17/2021	633,43	301,19	-1,56	121,03	10,46	39,61	8,89	50,22	11,49	0,99	7,90	31,26	TMC
3/18/2021	633,37	299,63	6,25	119,63	10,34	49,95	16,59	66,81	11,49	0,99	15,60	46,86	TMC
3/19/2021	633,61	305,89	3,65	116,90	10,10	60,05	13,75	80,56	11,49	0,99	12,76	59,62	TMC
3/20/2021	633,75	309,53	3,39	77,56	6,70	66,75	10,09	90,65	11,49	0,99	9,10	68,71	TMC
3/21/2021	633,88	312,92	5,66	37,01	3,20	69,95	8,86	99,51	11,49	0,99	7,86	76,58	TMC
3/22/2021	634,09	318,58	4,22	93,45	8,07	78,02	12,29	111,80	11,49	0,99	11,30	87,88	TMC
3/23/2021	634,24	322,80	1,69	99,65	8,61	86,63	10,30	122,10	11,49	0,99	9,30	97,18	TMC
3/24/2021	634,30	324,49	4,22	104,76	9,05	95,68	13,27	135,37	11,49	0,99	12,28	109,46	TMC
3/25/2021	634,45	328,71	10,69	104,69	9,05	104,73	19,73	155,10	11,49	0,99	18,74	128,20	TMC
3/26/2021	634,83	339,40	1,41	173,23	14,97	119,69	16,37	171,48	11,49	0,99	0,00	128,20	tidak TMC
3/27/2021	634,88	340,80	0,93	149,26	12,90	132,59	13,82	185,30	11,49	0,99	12,83	141,03	TMC
3/28/2021	634,91	341,73	17,84	68,64	5,93	138,52	23,77	209,07	11,49	0,99	22,78	163,81	TMC
3/29/2021	635,51	359,57	5,43	90,09	7,78	146,30	13,22	222,29	11,49	0,99	0,00	163,81	tidak TMC
3/30/2021	635,69	365,00	5,43	96,36	8,33	154,63	13,76	236,05	11,49	0,99	0,00	163,81	tidak TMC
3/31/2021	635,87	370,44	15,50	86,99	7,52	162,15	23,01	259,06	11,49	0,99	22,02	185,83	TMC
4/1/2021	636,36	385,93	11,57	92,94	8,03	170,18	19,60	278,66	11,49	0,99	0,00	185,83	tidak TMC
4/2/2021	636,72	397,51	4,82	90,61	7,83	178,00	12,65	291,31	11,49	0,99	0,00	185,83	tidak TMC
4/3/2021	636,87	402,33	3,21	80,21	6,93	184,93	10,14	301,46	11,49	0,99	0,00	185,83	tidak TMC
4/4/2021	636,97	405,54	2,33	65,29	5,64	190,58	7,97	309,43	11,49	0,99	6,98	192,81	TMC
4/5/2021	637,04	407,87	2,73	50,50	4,36	194,94	7,10	316,53	11,49	0,99	6,10	198,91	TMC
4/6/2021	637,12	410,61	0,68	56,77	4,91	199,84	5,59	322,11	11,49	0,99	4,60	203,51	TMC
4/7/2021	637,14	411,29	1,71	46,66	3,95	203,79	5,65	327,77	11,49	0,99	0,00	203,51	tidak TMC
4/8/2021	637,19	413,00	0,34	45,40	3,92	207,71	4,26	332,03	11,49	0,99	3,27	206,78	TMC
4/9/2021	637,20	413,34	1,37	35,91	3,10	210,82	4,47	336,50	11,49	0,99	3,48	210,25	TMC
4/10/2021	637,24	414,71	2,39	34,29	2,96	213,78	5,35	341,86	11,49	0,99	4,36	214,62	TMC
4/11/2021	637,31	417,10	3,42	33,65	2,91	216,69	6,32	348,18	11,49	0,99	5,33	219,95	TMC
4/12/2021	637,41	420,52	0,34	78,95	6,82	223,51	7,16	355,34	11,49	0,99	6,17	226,12	TMC
4/13/2021	637,42	420,86	3,42	48,05	4,15	227,66	7,57	362,91	11,49	0,99	6,58	232,69	TMC
4/14/2021	637,52	424,28	2,39	103,14	8,91	236,57	11,30	374,22	11,49	0,99	0,00	232,69	TMC
4/15/2021	637,59	426,67	8,54	40,49	3,50	240,07	12,04	386,26	11,49	0,99	11,05	243,74	TMC
4/16/2021	637,84	435,21	4,78	55,22	4,77	244,84	9,55	395,81	11,49	0,99	8,56	252,30	TMC
4/17/2021	637,98	439,99	-3,08	95,78	8,28	253,11	5,20	401,01	11,49	0,99	4,21	256,51	TMC
4/18/2021	637,89	436,92	2,39	35,07	3,03	256,14	5,42	406,43	11,49	0,99	4,43	260,94	TMC
4/19/2021	637,96	439,31	1,03	65,42	5,65	261,80	6,68	413,11	11,49	0,99	5,68	266,62	TMC
4/20/2021	637,99	440,34	1,43	29,00	2,51	264,30	3,93	417,05	11,49	0,99	2,94	269,56	TMC
4/21/2021	638,03	441,76	-1,09	48,18	4,16	268,46	3,08	420,12	11,49	0,99	0,00	269,56	tidak TMC
4/22/2021	638,00	440,68											
Volume air (Juta m ³)					262,7		410,5			40,7	270		

Tabel L2 Perhitungan Pertambahan Volume Waduk Cirata

Tanggal	TMA	VOLUME (Juta m ³)	STORAGE (Juta m ³)	Air Keluar			Air Keluar Saguling		AML Calc		Baseflow		Penambahan Vol. TMC		Keterangan
(1)	(2)	(3)	(4)	(m ³ /det) (5)	(Juta m ³) (6)	(Juta m ³) (7)=Komul(6)	(m ³ /det) (8)	(Juta m ³) (9)	(Juta m ³) (10)=(4)+(6)+(9)	(Juta m ³) (11)=Komul(10)	(m ³ /det) (12)	(Juta m ³) (13)	(Juta m ³) (14)=(10)+(13)	(Juta m ³) (15)=Komul(14)	
3/10/2021	210,59	1234,47	5,93	1,4	0,1	0,1	34,5	3,0	3,1	3,1	10,0	0,9	2,2		
3/11/2021	210,72	1240,40	5,93	1,7	0,1	0,3	32,3	2,8	3,3	6,4	10,0	0,9	2,4		
3/12/2021	210,85	1246,32	6,84	22,0	1,9	2,2	40,8	3,5	5,2	11,6	10,0	0,9	4,4	4,4	TMC
3/13/2021	211,00	1253,16	5,59	13,2	1,1	3,3	36,6	3,2	3,6	15,1	10,0	0,9	2,7	7,1	TMC
3/14/2021	211,12	1258,75	5,12	4,1	0,4	3,7	38,6	3,3	2,1	17,3	10,0	0,9	1,3	8,3	TMC
3/15/2021	211,23	1263,87	6,52	68,4	5,9	9,6	47,8	4,1	8,3	25,6	10,0	0,9	0,0	8,3	tidak TMC
3/16/2021	211,37	1270,39	-0,93	206,8	17,9	27,5	106,9	9,2	7,7	33,3	10,0	0,9	6,8	15,2	TMC
3/17/2021	211,35	1269,46	-2,79	264,0	22,8	50,3	121,0	10,5	9,6	42,8	10,0	0,9	8,7	23,9	TMC
3/18/2021	211,29	1266,66	3,26	274,7	23,7	74,0	119,6	10,3	16,7	59,5	10,0	0,9	15,8	39,6	TMC
3/19/2021	211,36	1269,92	-5,59	316,0	27,3	101,3	116,9	10,1	11,6	71,1	10,0	0,9	10,7	50,4	TMC
3/20/2021	211,24	1264,33	5,59	94,6	8,2	109,5	77,6	6,7	7,1	78,2	10,0	0,9	6,2	56,6	TMC
3/21/2021	211,36	1269,92	5,59	36,5	3,2	112,6	37,0	3,2	5,5	83,7	10,0	0,9	4,7	61,3	TMC
3/22/2021	211,48	1275,51	0,47	161,5	14,0	126,6	93,5	8,1	6,3	90,1	10,0	0,9	5,5	66,7	TMC
3/23/2021	211,49	1275,98	-8,38	266,2	23,0	149,6	99,7	8,6	6,0	96,1	10,0	0,9	5,1	71,9	TMC
3/24/2021	211,31	1267,59	-6,05	272,1	23,5	173,1	104,8	9,1	8,4	104,5	10,0	0,9	7,5	79,4	TMC
3/25/2021	211,18	1261,54	7,92	111,4	9,6	182,7	104,7	9,0	8,5	113,0	10,0	0,9	7,6	87,1	TMC
3/26/2021	211,35	1269,46	2,78	126,3	10,9	193,6	173,2	15,0	0,0	113,0	10,0	0,9	0,0	87,1	tidak TMC
3/27/2021	211,41	1272,23	13,44	93,5	8,1	201,7	149,3	12,9	8,6	121,6	10,0	0,9	7,8	94,8	TMC
3/28/2021	211,70	1285,68	28,79	51,2	4,4	206,1	68,6	5,9	27,3	148,9	10,0	0,9	26,4	121,2	TMC
3/29/2021	212,31	1314,46	-11,41	282,1	24,4	230,5	90,1	7,8	5,2	154,1	10,0	0,9	0,0	121,2	Tidak TMC
3/30/2021	212,07	1303,05	-4,73	209,9	18,1	248,6	96,4	8,3	5,1	159,1	10,0	0,9	0,0	121,2	Tidak TMC
3/31/2021	211,97	1298,33	13,76	116,6	10,1	258,7	87,0	7,5	16,3	175,5	10,0	0,9	15,5	136,7	TMC
4/1/2021	212,26	1312,09	16,64	21,8	1,9	260,6	92,9	8,0	10,5	186,0	10,0	0,9	0,0	136,7	Tidak TMC
4/2/2021	212,61	1328,73	12,36	13,8	1,2	261,8	90,6	7,8	5,7	191,7	10,0	0,9	0,0	136,7	Tidak TMC
4/3/2021	212,87	1341,09	14,43	0,0	0,0	261,8	80,2	6,9	7,5	199,2	10,0	0,9	0,0	136,7	Tidak TMC
4/4/2021	213,17	1355,52	10,19	1,3	0,1	261,9	65,3	5,6	4,7	203,9	10,0	0,9	3,8	140,5	TMC
4/5/2021	213,38	1365,72	7,28	12,3	1,1	263,0	50,5	4,4	4,0	207,8	10,0	0,9	3,1	143,6	TMC
4/6/2021	213,53	1373,00	5,82	23,5	2,0	265,0	56,8	4,9	3,0	210,8	10,0	0,9	2,1	145,7	TMC
4/7/2021	213,65	1378,82	6,31	2,4	0,2	265,2	45,7	3,9	2,6	213,4	10,0	0,9	0,0	145,7	Tidak TMC
4/8/2021	213,78	1385,13	4,85	21,9	1,9	267,1	45,4	3,9	2,8	216,2	10,0	0,9	2,0	147,6	TMC
4/9/2021	213,88	1389,98	3,88	16,1	1,4	268,5	35,9	3,1	2,2	218,4	10,0	0,9	1,3	148,9	TMC
4/10/2021	213,96	1393,87	7,88	3,4	0,3	268,8	34,3	3,0	5,2	223,6	10,0	0,9	4,3	153,3	TMC
4/11/2021	214,12	1401,75	8,41	3,5	0,3	269,1	33,8	2,9	6,8	230,4	10,0	0,9	5,9	159,2	TMC
4/12/2021	214,31	1411,16	9,91	40,0	3,5	272,6	79,0	5,5	5,5	235,9	10,0	0,9	7,7	163,9	TMC
4/13/2021	214,49	1420,07	5,94	33,0	2,8	275,4	48,1	4,2	4,6	240,6	10,0	0,9	3,8	167,7	TMC
4/14/2021	214,61	1426,02	14,86	15,3	1,3	276,7	103,1	8,9	7,3	247,8	10,0	0,9	0,0	167,7	Tidak TMC
4/15/2021	214,91	1440,87	8,50	11,6	1,0	277,7	40,5	3,5	6,0	253,8	10,0	0,9	5,1	172,8	TMC
4/16/2021	215,08	1449,37	2,53	81,2	7,0	284,8	55,2	4,8	4,8	258,6	10,0	0,9	3,9	176,7	TMC
4/17/2021	215,13	1451,90	2,02	161,8	14,0	298,7	95,8	8,3	7,7	266,3	10,0	0,9	6,9	183,6	TMC
4/18/2021	215,17	1453,92	7,58	4,8	0,4	299,1	35,1	3,0	5,0	271,3	10,0	0,9	4,1	187,7	TMC
4/19/2021	215,32	1461,49	3,03	113,8	9,8	309,0	65,4	5,7	7,2	278,5	10,0	0,9	6,3	194,0	TMC
4/20/2021	215,38	1464,52	-2,02	140,9	12,2	321,1	29,0	2,5	7,6	286,1	10,0	0,9	6,8	200,8	TMC
4/21/2021	215,34	1462,50	-5,05	167,7	14,5	335,6	48,2	4,2	5,3	291,4	10,0	0,9	0,0	200,8	Tidak TMC
4/22/2021	215,24	1457,45													
Volume air (Juta m ³)					335,4			262,7	285,07			35,5	201		

Tabel L3 Perhitungan Pertambahan Volume Waduk Juanda

Tanggal	TMA	VOLUME	STORAGE	Air Keluar				Air Keluar Cirata		AML Calc		Baseflow		Penambahan Vol. TMC		Keterangan
		(Juta m ³)	(Juta m ³)	(m ³ /det)	(Juta m ³)	(Juta m ³)	(m ³ /det)	(Juta m ³)	(Juta m ³)	(Juta m ³)	(Juta m ³)	(m ³ /det)	(Juta m ³)	(Juta m ³)	(Juta m ³)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)=Kumul (6)	(8)	(9)	(10)=(4)+(6)-(9)	(11)=Kumul (10)	(12)	(13)	(14)=(10)-(13)	(15)=Kumul (14)		
3/10/2021	97,17	1706,7	-6,2	91,8	7,9	7,9	1,4	0,1	1,6	1,6	1,4	0,1	1,5			
3/11/2021	97,08	1700,5	-7,5	92,0	7,9	15,9	1,7	0,1	0,3	1,9	1,4	0,1	0,2			
3/12/2021	96,97	1693,0	-4,0	88,2	7,6	23,5	2,2	0,1	1,8	3,7	1,4	0,1	1,6	1,6	TMC	
3/13/2021	96,91	1689,1	-5,3	92,2	8,0	31,5	13,2	1,1	1,5	5,2	1,4	0,1	1,4	3,1	TMC	
3/14/2021	96,83	1683,8	-6,6	89,1	7,7	39,2	4,1	0,4	0,7	5,9	1,4	0,1	0,6	3,7	TMC	
3/15/2021	96,73	1677,2	-2,0	92,4	8,0	47,1	68,4	5,9	0,1	6,0	1,4	0,1	0,0	3,7	tidak TMC	
3/16/2021	96,70	1675,2	11,2	92,2	8,0	55,1	206,8	17,9	1,3	7,4	1,4	0,1	1,2	4,9	TMC	
3/17/2021	96,87	1686,4	16,2	92,0	7,9	63,1	264,0	22,8	1,3	8,7	1,4	0,1	1,2	6,1	TMC	
3/18/2021	97,11	1702,6	23,5	93,9	8,1	71,2	274,7	23,7	7,8	16,5	1,4	0,1	7,7	13,8	TMC	
3/19/2021	97,45	1726,1	24,1	92,5	8,0	79,2	316,0	27,3	4,8	21,3	1,4	0,1	4,7	18,5	TMC	
3/20/2021	97,80	1750,2	-1,4	91,0	7,9	87,0	94,6	8,2	0,0	21,3	1,4	0,1	0,0	18,5	TMC	
3/21/2021	97,78	1748,8	-3,4	91,0	7,9	94,9	36,5	3,2	1,3	22,6	1,4	0,1	1,1	19,6	TMC	
3/22/2021	97,73	1745,4	8,3	91,0	7,9	102,8	161,5	14,0	2,2	24,8	1,4	0,1	2,1	21,7	TMC	
3/23/2021	97,85	1753,7	18,8	90,7	7,8	110,6	266,2	23,0	3,6	28,4	1,4	0,1	3,5	25,2	TMC	
3/24/2021	98,12	1772,4	16,8	92,4	8,0	118,6	272,1	23,5	1,3	29,6	1,4	0,1	1,2	26,3	TMC	
3/25/2021	98,36	1789,2	4,2	93,4	8,1	126,6	111,4	9,6	2,6	32,3	1,4	0,1	2,5	28,8	TMC	
3/26/2021	98,42	1793,4	2,9	93,3	8,1	134,7	126,3	10,9	0,1	32,3	1,4	0,1	0,0	28,8	tidak TMC	
3/27/2021	98,46	1796,3	6,2	92,9	8,0	142,7	93,5	8,1	6,2	38,5	1,4	0,1	6,0	34,9	TMC	
3/28/2021	98,55	1802,5	1,4	93,2	8,1	150,8	51,2	4,4	5,0	43,5	1,4	0,1	4,9	39,8	TMC	
3/29/2021	98,57	1803,9	19,6	92,9	8,0	158,8	282,1	24,4	3,3	46,8	1,4	0,1	0,0	39,8	tidak TMC	
3/30/2021	98,85	1823,5	7,0	92,7	8,0	166,8	209,9	18,1	0,0	46,8	1,4	0,1	0,0	39,8	tidak TMC	
3/31/2021	98,95	1830,5	2,1	92,6	8,0	174,8	116,6	10,1	0,0	46,8	1,4	0,1	0,0	39,8	tidak TMC	
4/1/2021	98,98	1832,6	-1,4	92,7	8,0	182,8	21,8	1,9	4,7	51,5	1,4	0,1	0,0	39,8	tidak TMC	
4/2/2021	98,96	1831,2	-4,9	92,7	8,0	190,8	13,8	1,2	1,9	53,4	1,4	0,1	0,0	39,8	tidak TMC	
4/3/2021	98,89	1826,3	-6,3	92,8	8,0	198,9	0,0	0,0	1,7	55,1	1,4	0,1	0,0	39,8	tidak TMC	
4/4/2021	98,80	1820,0	-7,0	93,0	8,0	206,9	1,3	0,1	0,9	56,1	1,4	0,1	0,8	40,6	TMC	
4/5/2021	98,70	1813,0	-7,0	93,1	8,0	214,9	12,3	1,1	0,0	56,1	1,4	0,1	0,0	40,6	TMC	
4/6/2021	98,60	1806,0	-6,3	93,2	8,1	223,0	23,5	2,0	0,0	56,1	1,4	0,1	0,0	40,6	TMC	
4/7/2021	98,51	1799,7	-7,7	95,3	8,2	231,2	2,4	0,2	0,3	56,4	1,4	0,1	0,0	40,6	tidak TMC	
4/8/2021	98,40	1792,0	-6,3	95,0	8,2	239,4	21,9	1,9	0,0	56,4	1,4	0,1	0,0	40,6	TMC	
4/9/2021	98,31	1785,7	-6,3	99,2	8,6	248,0	16,1	1,4	0,9	57,3	1,4	0,1	0,8	41,3	TMC	
4/10/2021	98,22	1779,4	-7,7	99,9	8,6	256,6	3,4	0,3	0,6	57,9	1,4	0,1	0,5	41,8	TMC	
4/11/2021	98,11	1771,7	-6,3	97,3	8,4	265,0	3,5	0,3	1,8	59,7	1,4	0,1	1,7	43,5	TMC	
4/12/2021	98,02	1765,4	-4,2	100,2	8,7	273,7	40,0	3,5	1,0	60,8	1,4	0,1	0,9	44,4	TMC	
4/13/2021	97,96	1761,2	0,7	100,4	8,7	282,4	33,0	2,8	6,5	67,3	1,4	0,1	6,4	50,8	TMC	
4/14/2021	97,97	1761,9	-4,1	98,2	8,5	290,9	15,3	1,3	3,0	70,3	1,4	0,1	0,0	50,8	tidak TMC	
4/15/2021	97,91	1757,8	-2,8	99,2	8,6	299,4	11,6	1,0	4,8	75,1	1,4	0,1	4,7	55,5	TMC	
4/16/2021	97,87	1755,0	-1,4	100,6	8,7	308,1	81,2	7,0	0,3	75,4	1,4	0,1	0,2	55,7	TMC	
4/17/2021	97,85	1753,7	4,1	100,6	8,7	316,8	161,8	14,0	0,0	75,4	1,4	0,1	0,0	55,7	TMC	
4/18/2021	97,91	1757,8	-6,9	100,6	8,7	325,5	4,8	0,4	1,4	76,8	1,4	0,1	1,3	57,0	TMC	
4/19/2021	97,81	1750,9	3,4	100,6	8,7	334,2	113,8	9,8	2,3	79,1	1,4	0,1	2,2	59,1	TMC	
4/20/2021	97,86	1754,3	2,8	100,6	8,7	342,9	140,9	12,2	0,0	79,1	1,4	0,1	0,0	59,1	TMC	
4/21/2021	97,90	1757,1	5,5	100,5	8,7	351,6	167,7	14,5	0,0	79,1	1,4	0,1	0,0	59,1	tidak TMC	
4/22/2021	97,98	1762,6														
Volume air (Juta m ³)					335,7			335,4	77,2			5,0	59			