

# KAJIAN KELAYAKAN DANAU RAWAPENING SEBAGAI DAERAH TARGET PELAKSANAAN TEKNOLOGI MODIFIKASI CUACA

## Feasibility Study of Lake Rawapening as a Target Area for the Implementation of Weather Modification Technology

**Ari Nugroho<sup>1)\*</sup>, M. Djazim Syaifullah<sup>1)</sup>, Halda Aditya Belgaman<sup>2)</sup>, Purnomo Arif Abdillah<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup> Lab. Pengelolaan TMC, Direktorat Pengelolaan Laboratorium Fasilitas Riset dan Kawasan Sains Teknologi, BRIN

<sup>2)</sup> Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, BRIN

\*E-mail : arin004@brin.go.id

### Intisari

*Kajian kelayakan pelaksanaan Teknologi Modifikasi Cuaca telah dilakukan di Danau Rawapening. Analisis yang dilakukan untuk melihat kelayakan pelaksanaan teknologi modifikasi cuaca adalah analisis hidrologis, analisis meteorologis dan analisis morfologi. Dari hasil analisis kajian tinggi muka air (TMA), terlihat nilai tertinggi terjadi pada bulan Maret–April dengan nilai tertinggi 462.49 mdpl, sedangkan TMA terendah terjadi pada bulan September–Oktober nilai terendah 460.89 mdpl. Pola hujan di wilayah DAS Rawapening memiliki tipe pola hujan monsoonal dengan puncak musim hujan pada bulan Desember-April sedangkan puncak satu musim kering pada bulan Juni-Oktober. Pola pergerakan angin di daerah Rawapening didominasi oleh angin timuran pada bulan Desember-Maret, dan baratan ketika periode April–September. Secara topografi wilayah ini merupakan daerah yang dikelilingi pegunungan dan dataran tinggi yang merupakan daerah pertumbuhan awan orografis sehingga dapat dijadikan sebagai awan target pelaksanaan TMC metode GBG (Ground Based Generator). Dengan memperhatikan aspek morfologi, topografi, hidrologi serta historis curah hujannya, DAS Danau Rawapening layak untuk dilaksanakan operasi Teknologi Modifikasi Cuaca. Pelaksanaan TMC dengan menggunakan pesawat lebih optimal apabila dilaksanakan pada bulan April–Mei atau Oktober–November setiap tahunnya. Mengingat DAS Danau Rawapening yang relatif kecil dan topografi yang mengelilingi relatif tinggi, maka dari dua parameter tersebut ada peluang pelaksanaan TMC di DAS Danau Rawapening dengan opsi menggunakan Ground Based Generator (GBG).*

*Kata Kunci: Teknologi Modifikasi Cuaca, Rawapening, Curah hujan, GBG.*

### Abstract

*A Feasibility Study of the implementation of Weather Modification technology has been carried out at Lake Rawapening. This study includes hydrology, meteorology, and morphological analysis. From the water level analysis, it can be seen the highest water level value is 462.49 masl which occurred in March-April, while the lowest water level value is 460.89 masl which occurred in September-October. The rain pattern in the Rawapening watershed has a monsoonal rain pattern with the peak of the rainy season from December to April while the peak of the dry season is from June to October. From the wind analysis, the Rawapening area is dominated by Easterly wind during December–March, and Westerly during April–September. Lake Rawapening is mostly surrounded by mountains and highlands, which are orographic cloud growth areas, so it can be used as a target cloud for implementing Weather modification technology with the Ground-Based Generator (GBG) method. By taking into account the morphological, topographical, hydrological, and historical aspects of rainfall, the Lake Rawapening watershed is suitable for Weather Modification Technology operations. The implementation of Weather Modification using aircraft is more optimal if it is carried out in April-May or October-November every year. Considering the relatively small size of the Lake Rawapening watershed and the relatively high surrounding topography, from these two parameters there is an opportunity for the implementation of Weather Modification in the Lake Rawapening watershed with the option of using GBG(s).*

*Keywords: Weather modification technology, Rawapening, Rainfall, GBG*

## 1. PENDAHULUAN

Danau Rawapening merupakan danau seluas 2.670 hektar yang terbentuk secara alami. Danau ini memiliki Daerah Aliran Sungai (DAS) dengan luas catchment area sebesar 250,79 km<sup>2</sup> dan memiliki kapasitas tampungan air maksimal sebesar 65 juta meter kubik (KLH, 2012). Secara administratif danau ini terletak di Kabupaten Semarang dan menempati empat wilayah kecamatan yaitu Kecamatan Ambarawa, Bawen, Tuntang dan Banyubiru dengan titik koordinat 7°17' LS 110°26' BT. Rawapening terletak di cekungan terendah lereng Gunung Merbabu, Gunung Telomoyo, dan Gunung Ungaran. Danau Rawapening sendiri merupakan muara dari 9 sungai diantaranya Sungai Rengas, Sungai Panjang, Sungai Torong, Sungai Galeh, Sungai Legi, Sungai Parat, Sungai Sraten, Sungai Ringgis, serta Sungai Kedung Ringin (KLH, 2012). Danau ini dangkal dan menjadi hulu bagi Sungai Tuntang. Secara pemanfaatan, air maupun wilayah Rawapening banyak dimanfaatkan untuk irigasi pertanian, sebagai sumber air baku untuk kebutuhan air minum, sebagai pembangkit tenaga listrik, perikanan darat, pariwisata, serta digunakan sebagai pengendalian banjir di wilayah Kabupaten Grobogan dan Demak (Indrayati & Hikmah, 2018).

Dari data historis curah hujan di Danau Rawapening, terlihat bahwa pola curah hujan di daerah tersebut adalah pola muson di mana dalam satu tahun hanya terdapat satu puncak curah hujan tertinggi yaitu bulan Desember hingga Maret. Kondisi yang cukup memprihatinkan pada saat musim kemarau curah hujan menjadi sangat rendah hingga mencapai hanya 10-50 mm per bulan (KLH, 2012). Sehingga dalam pengelolaan ketersediaan air di Danau Rawapening, perlu menjaga tinggi muka air danau sebelum memasuki musim kemarau. Ketersediaan air perlu dijaga untuk mencegah terjadinya dampak negatif akibat tidak adanya pasokan air di musim kemarau. Oleh karena itu, dirasa perlu dilakukan kegiatan modifikasi cuaca untuk bisa menambah jumlah air yang masuk di Danau Rawapening. Teknologi Modifikasi Cuaca perlu dilakukan sebagai salah satu upaya untuk meningkatkan fungsi dan manfaat sumber daya air.

Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) merupakan suatu pemanfaatan teknologi yang digunakan sebagai upaya untuk memodifikasi cuaca agar mendapatkan kondisi yang diinginkan (BPPT, 2020). Hasil akhir dari upaya modifikasi cuaca tersebut umumnya adalah untuk meningkatkan intensitas curah hujan di suatu tempat (*rain enhancement*), meski untuk tujuan tertentu dapat juga dikondisikan sebaliknya, yaitu untuk menurunkan intensitas curah hujan di suatu lokasi tertentu (*rain reduction*) (Cutton *et al.*,

1982). Di negara-negara barat, khususnya di negara-negara yang berada pada daerah lintang tinggi, aktivitas modifikasi cuaca juga dilakukan dengan tujuan untuk mereduksi hujan es (*hail suppression*) (Finnegan & Pitter, 1988).

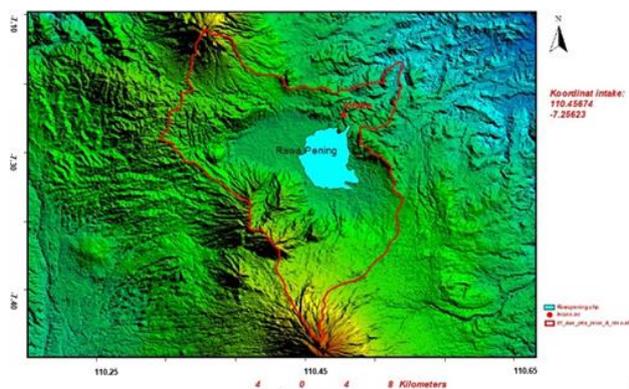
TMC dilakukan dengan mengintervensi proses yang terjadi di dalam awan melalui aktivitas penyemaian awan. Penghantaran bahan semai ke dalam awan dapat dilakukan dengan dua cara yaitu sistem dinamis dan sistem statis (BPPT, 2020). Sistem dinamis menggunakan pesawat sebagai media penghantaran bahan semai yang dilakukan dari udara, sedangkan sistem statis menggunakan *Ground Based Generator* (GBG) sebagai media penghantaran bahan semai yang dilakukan dari darat (Renggono *et al.*, 2022). Bahan semai yang digunakan dalam sistem dinamis merupakan bahan semai yang bersifat higroskopik berbentuk butiran bubuk berukuran sangat halus, paling umum digunakan adalah NaCl (garam) dan ada juga yang menggunakan CaCl<sub>2</sub> atau urea (Rosenfel *et al.*, 2010). Sedangkan bahan semai yang digunakan dalam sistem statis menggunakan flare dengan cara dibakar untuk menghasilkan inti kondensasi awan / *Cloud Condensation Nuclei* (CCN). Bahan semai Flare terbuat dari NaCl dan CaCl<sub>2</sub> (Haryanto *et al.*, 2001; BPPT, 2020).

Penelitian ini beranjak dari permasalahan dan teknologi yang diuraikan diatas. Dari uraian tersebut, maka penelitian ini bertujuan untuk memberikan solusi pencegahan krisis ketersediaan air di Danau Rawapening ketika memasuki musim kemarau. Pencegahan tersebut memanfaatkan teknologi Modifikasi cuaca yang selama ini belum pernah diterapkan di Danau Rawapening.

## 2. METODE

Penelitian ini difokuskan pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Danau Rawapening yang terletak di Kabupaten Semarang dan Kota Salatiga, Provinsi Jawa Tengah. DAS Danau Rawapening merupakan muara dari sembilan sungai diantaranya Sungai Rengas, Sungai Panjang, Sungai Torong, Sungai Galeh, Sungai Legi, Sungai Parat, Sungai Sraten, Sungai Ringgis, serta Sungai Kedung Ringin. Letak Danau Rawapening sendiri merupakan daerah cekungan terendah dari tiga gunung yang mengelilinginya yaitu Gunung Merbabu di sebelah selatan, Gunung Telomoyo di sebelah Barat Daya dan Gunung Ungaran di sebelah Barat Laut dengan ketinggian antara 455–465 mdpl. Tutupan lahan DAS Danau Rawapening meliputi 19,3% permukiman, 37,6% kebun, danau 5,6% dan

sisanya merupakan area sawah tadah hujan, tegalan, belukar dan eceng gondok (KLH, 2012). Peta DAS Danau Rawapening disajikan dalam Gambar 1.



**Gambar 1.** DAS Danau Rawapening.

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data yang didapatkan dari beberapa sumber. Data hidrologi, morfologi dan topografi didapatkan dengan melakukan survey ke lokasi Danau Rawapening dan hasil koordinasi dengan pengelola daerah tersebut yang telah dilakukan pada akhir Tahun 2020. Data curah hujan didapatkan dari data satelit resolusi tinggi dari GPM (*Global Precipitation Measurement*) Jaxa GMap\_NRT. Data arah angin permukaan bulanan diperoleh dari data satelit ERA5 yang dipadankan dengan data model ECMWF.

Setelah mendapatkan dan analisis data tersebut, kemudian dibuat sebuah simulasi untuk memberikan gambaran manfaat yang didapatkan dari pelaksanaan TMC berupa peningkatan inflow dan tinggi muka air di Danau Rawapening.

### 2.1. Observasi Hidrologi, Morfologi dan Topologi

Hidrologi yang digunakan sebagai bahan analisis berupa jumlah volume air masuk, air keluar dan tinggi muka air danau. Tinggi Muka Air (TMA) merupakan salah satu indikasi keberhasilan Teknologi Modifikasi Cuaca, oleh karena itu perlu dilakukan analisis pola TMA yang selama ini ada di Danau Rawapening. Penentuan pola TMA menggunakan data historis yang tersedia selama 10 tahun terakhir dari Tahun 2010–2019. TMA harian pada suatu danau/waduk diperoleh dari pengukuran setiap jam. Untuk mendapatkan rata-rata TMA harian dapat menggunakan rumus berikut (PU, 2000):

$$H = \frac{H1 + H2 + \dots + H24}{24} \quad (1)$$

Keterangan:

*H* = tinggi muka air harian rata-rata (mdpl)

*H1* = tinggi muka air jam pertama

*H2* = tinggi muka air jam ke dua

*H24* = tinggi muka air jam ke dua puluh empat

Setelah mendapatkan TMA harian, kemudian dikumpulkan dalam satu bulan untuk dibuatkan rata-rata bulanan dari data harian tersebut. Pola TMA didapatkan dengan membandingkan ketinggian TMA tiap bulan selama 10 tahun terakhir.

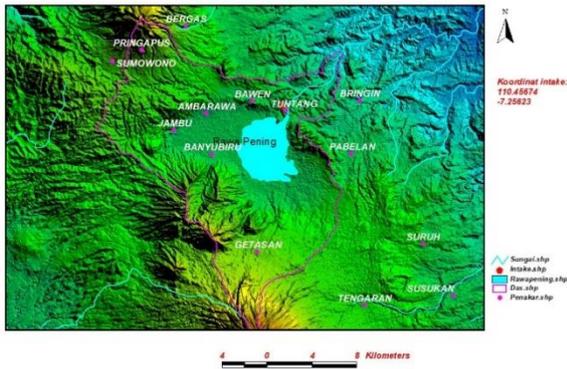
Sedangkan data inflow dan outflow didapatkan dari data yang dikirimkan oleh pengelola danau. Data tersebut digunakan sebagai dasar operasi pengelolaan danau untuk kebutuhan pengairan dan pembangkit listrik tenaga air (PLTA). PLTA yang beroperasi dengan memanfaatkan debit air dari Danau Rawapening adalah PLTA Jelok dan Timo yang dikelola oleh PT. Indonesia Power. Data inflow dan outflow yang digunakan adalah data selama 10 tahun terakhir seperti data TMA.

Data topologi diolah menggunakan aplikasi *global mapper* yang mampu menggambarkan topografi daerah target. Batas dari topologi yang ditampilkan adalah DAS Danau Rawapening yang dilakukan pengukuran penampang melintang di beberapa sisi DAS. Sedangkan morfologi didapatkan dari hasil pengukuran bathimetri yang pernah dilakukan oleh pengelola danau dalam hal ini adalah Perum Jasa Tirta I bekerjasama dengan Universitas Diponegoro Semarang pada Tahun 2020 (PJT I, 2020).

### 2.2. Analisis Curah Hujan

Salah satu parameter cuaca yang cukup penting dalam pengelolaan sumber daya air di suatu wilayah adalah curah hujan. Curah hujan diperoleh dari pengukuran hujan dengan penakar hujan baik manual maupun otomatis. Diperlukan penakar hujan dengan sebaran yang optimal di suatu wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS) sehingga analisis dan perencanaan sumberdaya air menjadi efektif. Dari pengamatan di lapangan data curah hujan di daerah Rawapening diperoleh dari data pengukuran yang dilakukan oleh institusi lain seperti Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Jlatunseluna dan Dinas Pertanian Kabupaten Semarang sehingga diperlukan koordinasi untuk mendapatkan data curah hujan, hal ini menjadi kendala tersendiri apabila dilakukan pengelolaan sumberdaya air yang terintegrasi. Gambar 2 menunjukkan sebaran penakar curah hujan yang didapat dari BBWS Jlatunseluna dan Dinas Pertanian Kabupaten Semarang dimana sebagian berada di dalam DAS sebagian di luar DAS.

Diperlukan peralatan pengukuran cuaca yang komprehensif dalam bentuk *Automatic Weather Station* (AWS) dengan sebaran yang optimal sehingga pengelolaan sumberdaya air di Danau Rawapening lebih optimal baik untuk pola operasi waduk, analisis hujan ekstrim *early warning system* maupun informasi lainnya.



**Gambar 2.** Lokasi Penakar curah hujan existing

Dengan adanya perangkat AWS yang terdiri dari data pengamatan cuaca (suhu udara, tekanan udara, kelembaban udara, arah kecepatan angin dan curah hujan ditambah dengan data pengukuran tinggi muka air) tersebar di DAS Rawapening terintegrasi ke dalam server maka analisis dan *decision* menjadi lebih cepat dan komprehensif

Persebaran lokasi penakar curah hujan yang berada di sekitaran DAS Rawapening berada di 15 titik. Penakar yang terdapat di dalam DAS Danau Rawapening berjumlah 7 titik sedangkan 8 titik lainnya berada di luar DAS. Dari tujuh titik tersebut tidak tersebar merata di seluruh area DAS, sehingga tidak mewakili keseluruhan DAS untuk mendapatkan curah hujan wilayahnya karena sebagian besar titik penakar berada di DAS Bagian Utara. Disamping itu, data yang diperoleh tidak lengkap untuk menggambarkan historis curah hujan wilayah di daerah tersebut paling tidak selama 5 tahun terakhir. Oleh karena itu, untuk mendapatkan gambaran kondisi curah hujan wilayah di area DAS, maka analisis curah hujan dilakukan dengan menggunakan data satelit resolusi tinggi dari GPM (*Global Precipitation Measurement*) Jaxa GSMaP\_NRT.

Satelit TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) Jaxa menyediakan data historis curah hujan dari tangkapan citra satelit. Data yang tersedia adalah data curah hujan dari Tahun 2008 hingga sekarang dan dapat didapatkan secara gratis dan *near real time*. Untuk analisis curah hujan, menggunakan data historis selama 10 tahun terakhir dari Tahun 2010 hingga Tahun 2019 agar mendapat gambaran serta korelasinya dengan kondisi hidrologi.

Dari data curah hujan tersebut, didapatkan pola curah hujan wilayah yang akan dijadikan dasar dalam menentukan waktu yang tepat untuk dilaksanakan operasi Teknologi Modifikasi Cuaca. Pelaksanaan yang tepat biasanya pada waktu transisi, yaitu peralihan musim kemarau ke musim hujan atau sebaliknya. Penentuan pelaksanaan

tersebut tentu dianalisis juga dengan pola operasi Danau Rawapening.

Setelah dilakukan analisis curah hujan dan analisis hidrologi, dilakukan juga simulasi kondisi hidrologi jika TMC dilakukan di DAS Danau Rawapening. Simulasi dilakukan dengan menggunakan beberapa pendekatan sesuai dengan kondisi hidrologi di daerah tersebut.

Besarnya aliran hasil TMC dihitung berdasarkan hasil inflow actual dikalikan dengan perolehan hasil TMC mengintervensi curah hujan sebesar 30% dari normalnya. Jika dihitung akan menghasilkan perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Aliran TMC} = 30\% \times V \text{ inflow actual} \quad (2)$$

Keterangan:

Aliran TMC = Tambahan aliran hasil TMC  
 $V \text{ inflow actual}$  = Volume inflow actual ( $\text{m}^3/\text{det}$ )

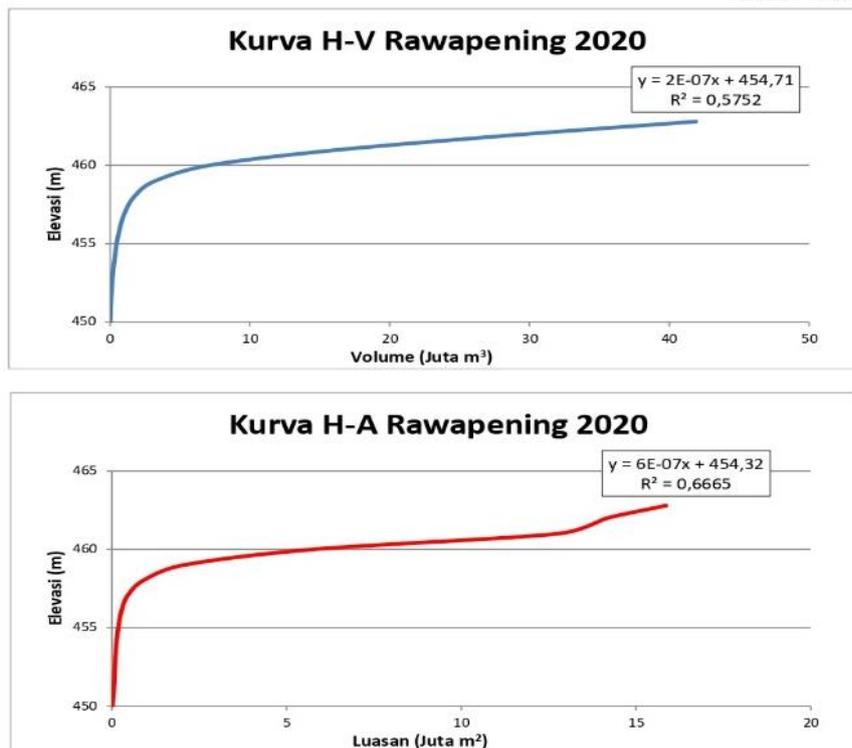
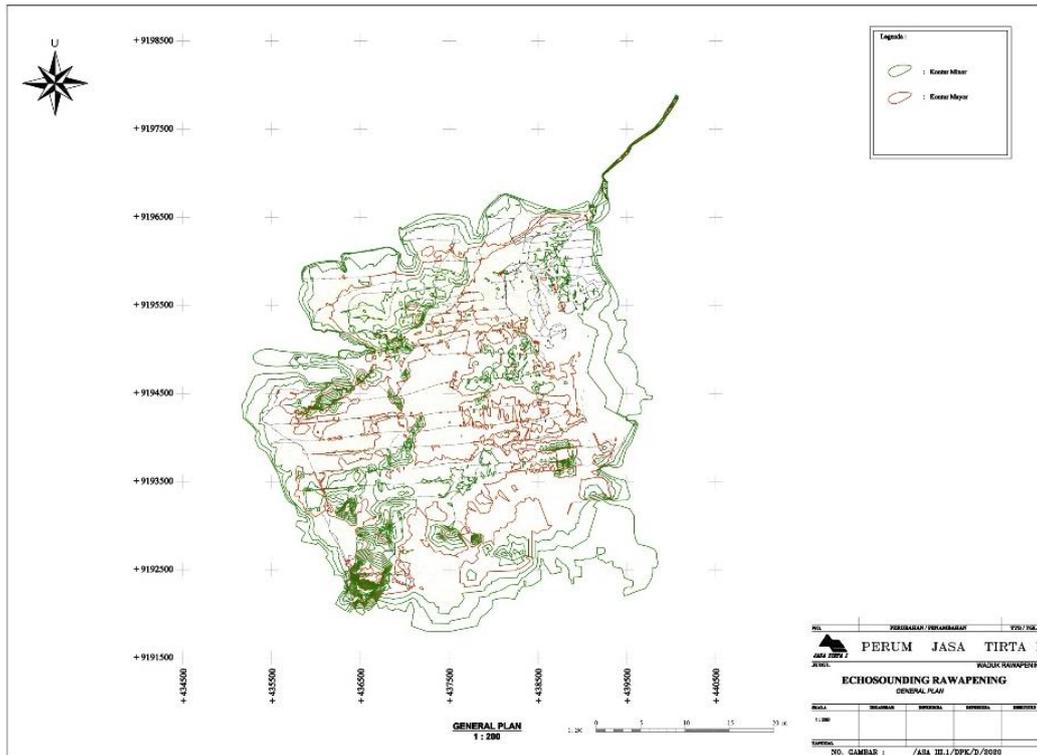
### 2.3. Analisis Angin

Analisis angin juga diperlukan untuk memberikan masukan mengenai penentuan waktu pelaksanaan TMC yang dianggap paling optimal. Dari hasil analisis arah angin dapat diketahui sumber supply massa udara yang masuk ke daerah target. Data yang digunakan dalam analisis sumber massa udara adalah data vektor angin permukaan yang diubah menjadi data mawar angin (*windrose*) yang bersumber dari data *reanalysis* ERA5 (Hersbach et al., 2018) yang dikeluarkan oleh ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecasting*). ERA5

ERA5 adalah data *reanalysis* ECMWF generasi ke-lima untuk cuaca dan iklim global selama empat-tujuh dekade terakhir yang dapat diunduh melalui ECMWF *Climate Data Store* (CDS). Data *reanalysis* ERA5 menyediakan estimasi harian dari kondisi variabilitas iklim atmosfer, darat dan laut. Data ERA5 yang digunakan memiliki resolusi horizontal sebesar  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  dan resolusi temporal harian di wilayah Danau Rawapening.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan survey bathimetri yang dilakukan oleh Perum Jasa Tirta I kerjasama dengan Universitas Diponegoro Semarang pada tahun 2020, diperoleh bahwa tampungan normal Danau Rawapening pada elevasi +462 mdpl adalah 29,85 juta  $\text{m}^3$  dengan luasan genangan sekitar 14,18  $\text{km}^2$ , sedangkan untuk 462,8 mdpl tampungan normal Danau adalah 41,87 juta  $\text{m}^3$  dengan luasan genangan mencapai 15,85  $\text{km}^2$ . Kedalaman paling dangkal berada pada elevasi 450 mdpl dengan luas sebesar 0,02  $\text{km}^2$ . Gambar 3 menunjukkan hasil pengukuran bathimetri Danau Rawapening tahun 2020:



**Gambar 3.** Hasil pengukuran bathimetri Danau Rawapening tahun 2020 (PJT I, 2020).

Kondisi Danau Rawapening saat dilakukan survey terlihat bahwa selain air yang menutupi area danau, juga banyak ditumbuhi tanaman eceng gondok kurang lebih 50% dari badan danau. Selain itu, di sekeliling danau dibatasi dengan bukit-bukit dan area pegunungan dengan puncak yang tertinggi berada di sisi utara danau terdapat Gunung Ungaran. Area danau juga digunakan untuk wahana wisata serta terdapat

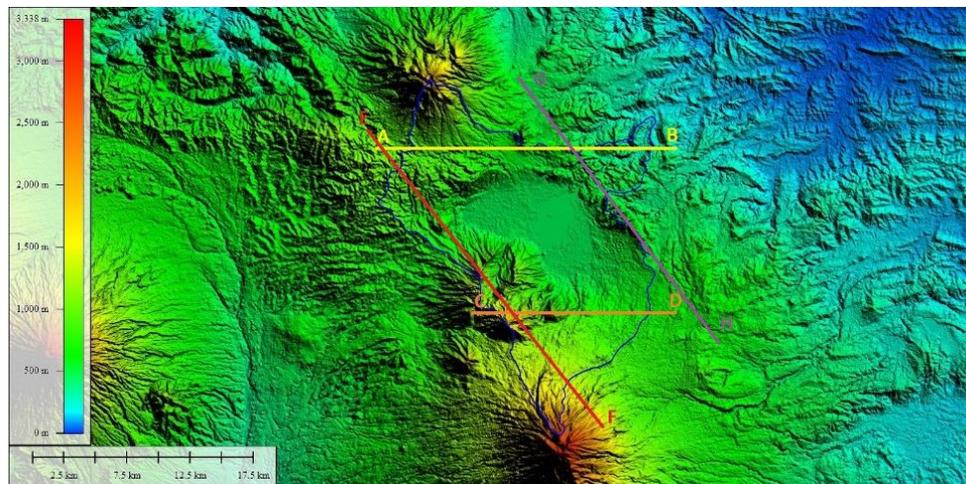
keramba-keramba ikan yang digunakan warga disekitar danau. Permukiman dan persawahan juga hampir merata di sekeliling danau, bahkan ada bagian badan danau yang digunakan untuk area persawahan. Secara umum Danau Rawapening merupakan lahan kehidupan bagi masyarakat sekitar danau, baik digunakan untuk lahan pertanian, perikanan, pariwisata dan kuliner makanan khas danau. Ketinggian Danau

Rawapening berada pada ketinggian 455–465 mdpl, jika dilihat secara administratif, Danau Rawapening berada di Kabupaten Semarang sebagian besarnya serta hanya sedikit yang masuk wilayah Kota Salatiga tepatnya di sebelah Timur.

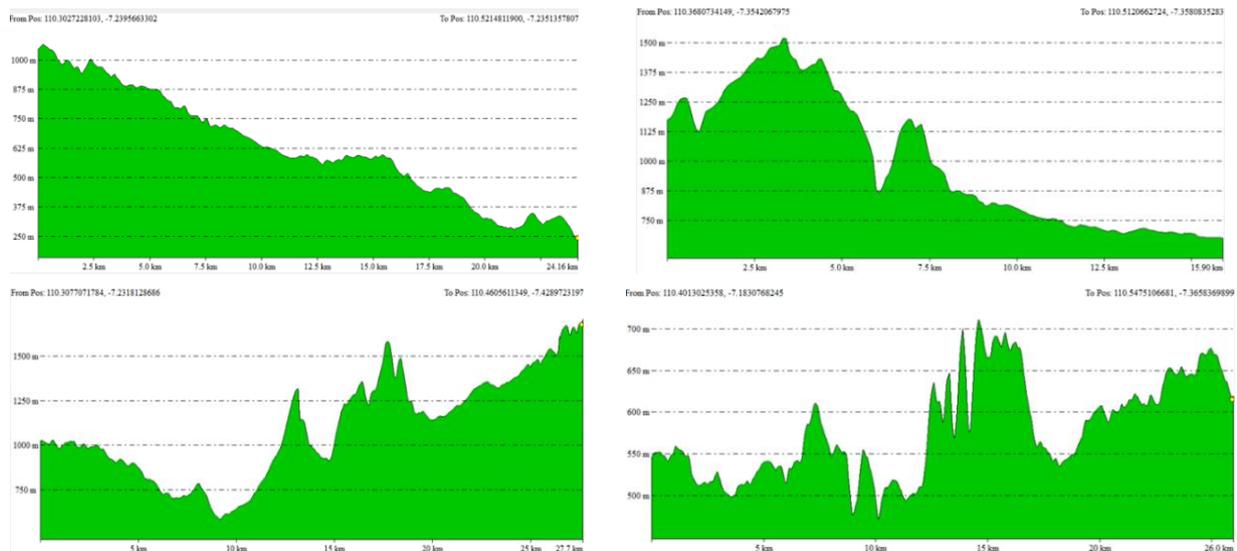
Dari kawasan–kawasan sub DAS Rawapening mempunyai topografi yang berbeda–beda. Pada sub sub-DAS Parat dan Sraten mempunyai topografi bervariasi yaitu datar, agak bergelombang, berbukit dengan kelereng antara 0-2% (sekitar Danau Rawapening). Kelereng antara 8-25% terdapat di kaki Gunung Merbabu, kelereng terjal yaitu lebih dari 45% terdapat di sekitar Gunung Telomoyo. Di sub sub DAS lain umumnya mempunyai bentuk topografi yang relatif datar. Dari profil topografi DAS danau Rawapening yang diperlihatkan Gambar 4 dan Gambar 5 terlihat bahwa kawasan Danau

Rawapening merupakan daerah cekungan paling rendah yang dikelilingi oleh tiga gunung yaitu Gunung Ungaran, Gunung Telomoyo dan Gunung Merbabu.

Topografi DAS Rawapening bagian utara yang diambil sayatan dari Barat ke Timur (Gambar 4. garis A-B) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 terlihat ketinggian mencapai 1.000 m bagian Barat yang berada di kaki Gunung Ungaran merupakan tempat tertinggi, sedangkan semakin ke Timur areanya semakin rendah hingga mencapai 250 m di Batas DAS bagian Timur. DAS Rawapening bagian Selatan merupakan lereng dari dua gunung, yaitu Gunung Telomoyo dan Gunung Merbabu. Pengukuran bagian Selatan dengan sayatan dari Barat ke Timur (Gambar 4. garis C-D) memiliki variasi ketinggian dari 1.500 m hingga paling rendah berada pada ketinggian 500 m.



**Gambar 4.** Profil topografi DAS Danau Rawapening.



**Gambar 5.** Profil topografi DAS Danau Rawapening bagian bagian Utara (Gambar 4. garis kuning) sayatan dari A - B (kiri atas), bagian Selatan (Gambar 4. garis orange) sayatan dari C - D (kanan atas), bagian Barat (Gambar 4. garis merah) sayatan dari E - F (kiri bawah), dan bagian Timur (garis ungu), sayatan dari G - H (kanan bawah).

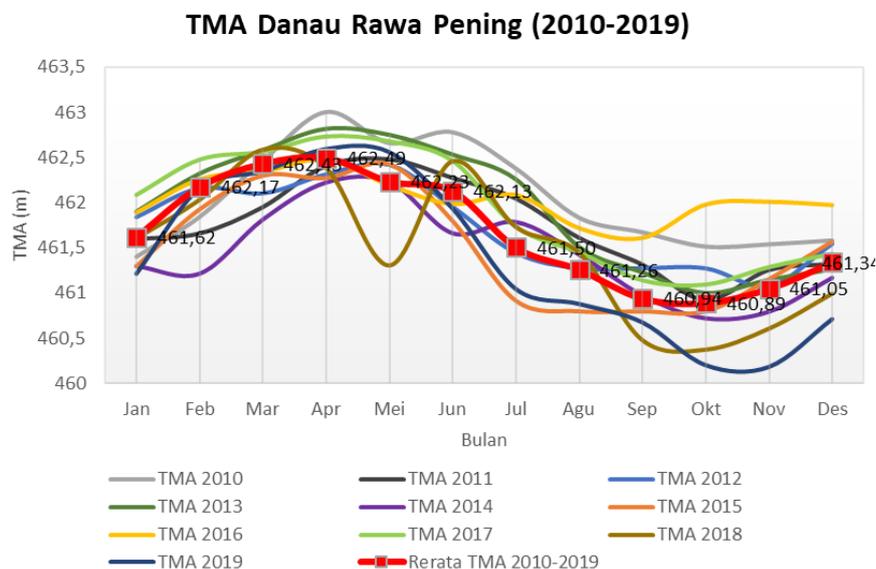
Sayatan Barat merupakan daerah pegunungan dan merupakan lereng Gunung Telomoyo serta merupakan aliran dari sub sub DAS Legi dan Galeh yang berada pada bagian Barat Daya dan Barat DAS Rawapening. Penggunaan lahan di bagian Barat dan Selatan umumnya merupakan sawah tadah hujan, kebun, belukar dan tegalan.

Topografi DAS Rawapening bagian barat (Gambar 4. garis E-F) merupakan deretan pegunungan dengan ketinggian 1.000 m hingga 1.500 di bagian Tenggara tepatnya di lereng Gunung Merbabu seperti yang terlihat pada Gambar 5. Penggunaan lahan masih berupa sawah tadah hujan, kebun dan tegalan yang mendominasi hingga ke bagian selatan. Sedangkan bagian Timur DAS Rawapening pengukuran diambil dari sayatan Barat laut hingga Tenggara (Gambar 4. garis G-H) merupakan deretan perbukitan dengan ketinggian dari 500 m hingga 700 m dibagian timur hingga tenggara. Penggunaan lahan di bagian timur merupakan sawah, kebun dan pemukiman. Di bagian Danau Rawapening merupakan daerah yang datar yang digunakan untuk daerah permukiman dan sawah. Di area Danau juga merupakan habitat dari tanaman eceng gondok yang menutupi sebagian besar permukaan danau.

Dari profil topografi diatas, dapat disimpulkan bahwa area DAS Danau Rawapening merupakan daerah yang dikelilingi pegunungan dan dataran tinggi yang cocok jika diterapkan Teknologi Modifikasi Cuaca menggunakan metode penyemaian awan dari darat menggunakan wahana GBG (*Ground Based Generator*). GBG memanfaatkan lokasi daerah target berupa perbukitan dan pegunungan yang merupakan lokasi ideal pertumbuhan awan–awan orografis. Awan Orografis inilah yang menjadi target dari pelaksanaan TMC menggunakan wahana GBG.

Dari sisi hidrologinya, outlet Danau Rawapening terletak pada hulu Sungai Tuntang dan merupakan satu–satunya pintu keluar air dari danau tersebut karena pada outlet inilah letak bendungan alami yang terbentuk dari proses geologi dan disempurnakan dengan pembangunan DAM. Pada lokasi outlet Sungai Tuntang dibangun pintu air untuk mengendalikan debit air yang keluar danau. DAM Tuntang digunakan untuk operasional PLTA Jelok yang berkapasitas 20.000 KWH dan PLTA Timo yang berkapasitas 12.000 KWH. Selain itu pemanfaatan outlet ini juga digunakan untuk keperluan irigasi pertanian warga sekitar dengan luasan mencapai 40.000 hektare. Gambar 6 menunjukkan grafik history TMA Danau Rawapening yang diukur dari DAM Tuntang dari tahun 2010–2019.

Dari Gambar 6 tersebut TMA tertinggi terjadi pada bulan Maret–April yang masih merupakan musim penghujan di wilayah tersebut, nilai TMA tertinggi adalah 462,49 mdpl. Sedangkan TMA terendah terjadi pada bulan September–Oktober pada saat musim kemarau di wilayah tersebut dengan nilai rata–rata terendah adalah 460,89 mdpl. Jika dilihat dari TMA pertahun, pada tahun 2019 secara keseluruhan mengalami penurunan dari tahun–tahun sebelumnya dimana TMA tertinggi sepanjang tahun terjadi pada tahun 2016 dan 2017. Nilai TMA tersebut masih harus dibandingkan dengan inflow dan outflow yang terjadi di DAM Tuntang untuk mengetahui penggunaan air Danau Rawapening apakah terjadi peningkatan atau tidak yang tentunya akan mempengaruhi kondisi TMA. Jika kebutuhan konsumsi air semakin meningkat maka akan terjadi penurunan tinggi muka air yang semakin besar jika tidak diimbangi dengan curah hujan yang signifikan.



**Gambar 6.** Historis Tinggi Muka Air Danau Rawapening dari Tahun 2010-2019.

Data hidrologi yang meliputi inflow dan outflow dari DAM Tuntang tahun 2010–2019 menunjukkan korelasi dengan pola TMA pada DAM Tuntang. Nilai output DAM Tuntang diperoleh dari gabungan outflow di PLTA Jelok dengan outflow Spillway di DAM Tuntang. Peningkatan TMA diikuti dengan nilai inflow dan outflow yang juga tinggi dan begitu juga sebaliknya. Pada bulan April TMA tertinggi dengan outflow sebesar 17,54 m<sup>3</sup>/detik dan inflow sebesar 17,87 m<sup>3</sup>/detik. Inflow dan Outflow terendah berada pada Bulan September hampir setiap tahunnya dengan debit air sebesar 5,79 m<sup>3</sup>/detik outflow dan 5,83 m<sup>3</sup>/detik inflow. Outflow DAM Tuntang ini berpengaruh terhadap penggunaan debit air yang digunakan untuk pembangkit pada PLTA Jelok dan PLTA Timo karena seluruh outflow di DAM Tuntang digunakan untuk pembangkit akan digunakan seluruhnya oleh PLTA Jelok kemudian digunakan kembali oleh PLTA Timo secara cascade. Gambar 7 menunjukkan kondisi hidrologi bulanan DAM Tuntang sepanjang tahun 2010–2019.

### 3.1. Pola Curah Hujan

Hasil analisis curah hujan dari data satelit TRMM Jaxa disajikan dengan Gambar 8. Hasil analisis yang ditampilkan adalah historis rata-rata curah hujan tahun 2010–2019. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa pola hujan di wilayah DAS Rawapening memiliki tipe pola hujan *monsoonal* yang memiliki distribusi hujan bulanan *annual*, yaitu memiliki satu puncak hujan di Desember hingga April dan satu musim kering di bulan Juni–Oktober. Puncak hujan maksimum di daerah tersebut terjadi pada bulan Januari dengan rata-

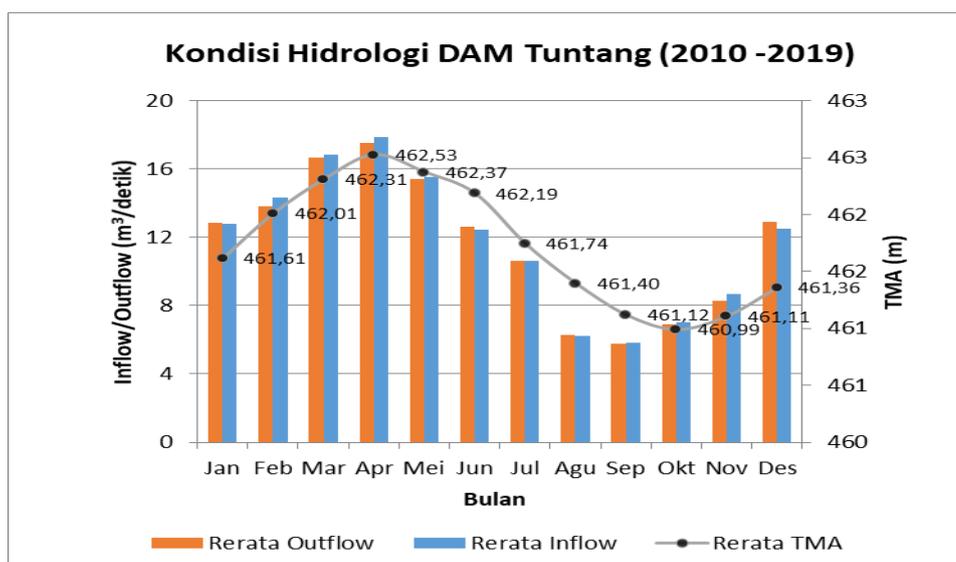
rata intensitas curah hujan 330 mm/bulan. Sedangkan titik minimum curah hujan di daerah tersebut terjadi pada bulan Agustus, yaitu sekitar 28 mm/bulan. Untuk kondisi hujan di tahun 2019, di awal tahun 2019 kondisi curah hujan di wilayah DAS Rawapening masih berada di atas rata-rata, tetapi di mulai bulan April hingga akhir tahun 2019, curah hujan dibawah rata-ratanya.

Selain analisis hujan bulanan, jika dilakukan analisis hujan dalam periode jam di wilayah Rawapening maka akan terlihat bahwa banyak curah hujan terjadi pada pagi hingga sore hari. Di musim transisi kering ke musim penghujan, kejadian hujan banyak terjadi pada sore hingga malam hari.

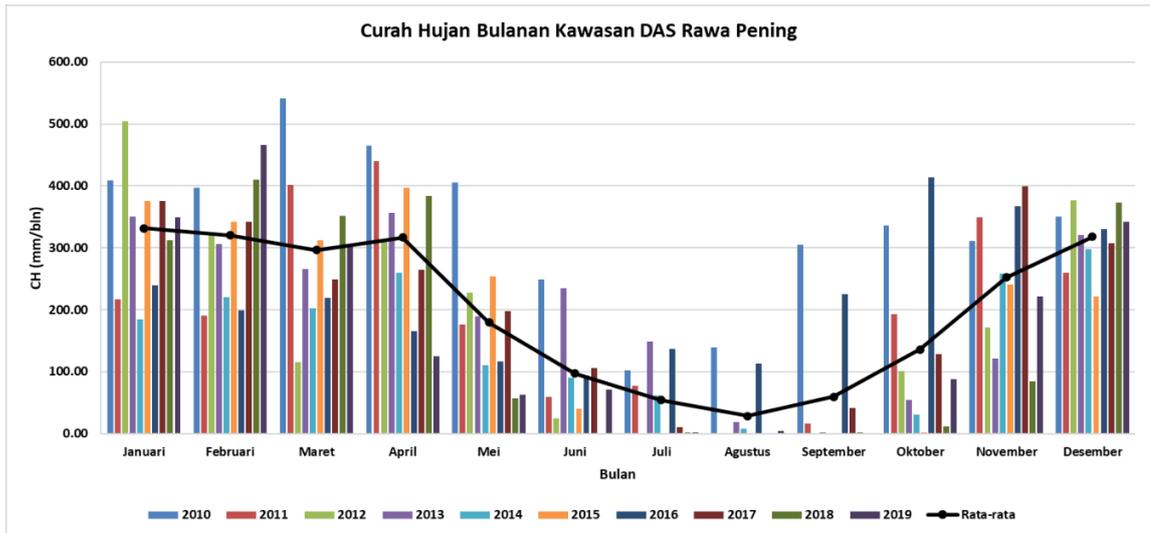
### 3.1. Pola Angin

Analisis pola angin juga diperlukan untuk memberikan masukan mengenai penentuan waktu pelaksanaan TMC yang dianggap paling optimal. Dari hasil analisis arah angin permukaan dapat diketahui sumber supply massa udara yang masuk ke daerah target. Data arah angin permukaan bulanan diperoleh dari data satelit ERA5 yang dipadankan dengan data model ECMWF.

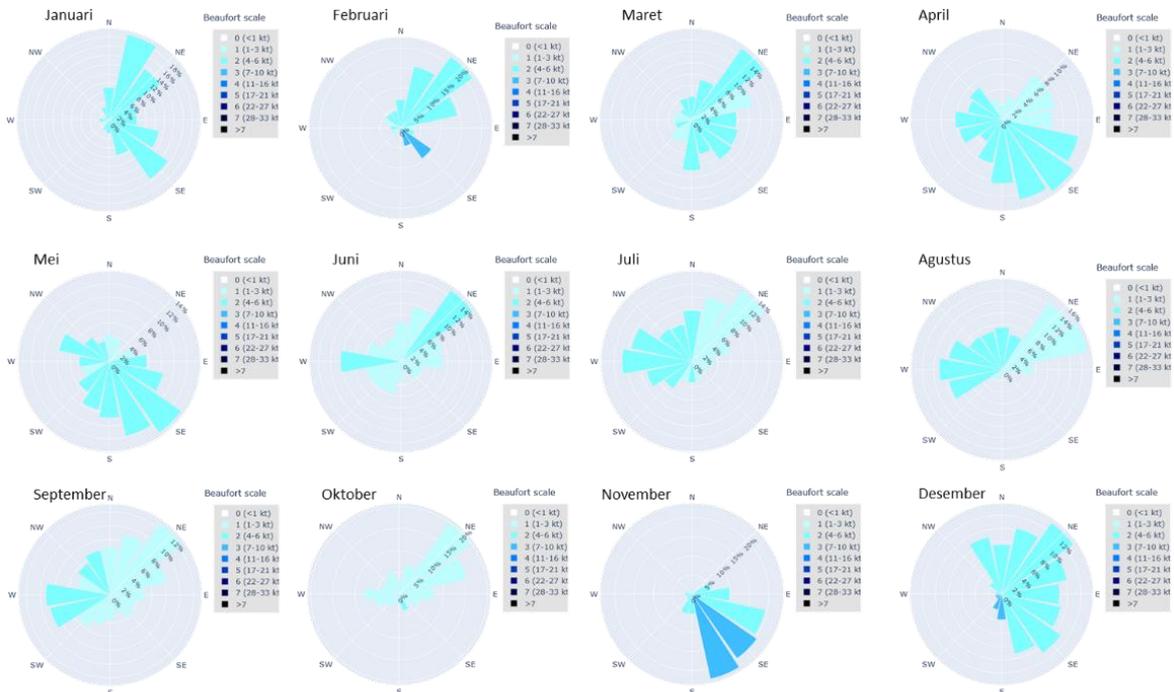
Gambar 9 merupakan windrose Danau Rawapening untuk tahun 2019. Pada gambar ini terlihat bahwa pada bulan November sampai April arah angin di wilayah Rawapening bertiup dari Utara–Timur-Tenggara, sedangkan bulan Mei sampai September dari Selatan-Barat. Puncak musim hujan yang terjadi pada Bulan Desember–April ditandai oleh arah angin dominan Timuran, sedangkan puncak musim kering pada periode



Gambar 7. Kondisi Hidrologi DAM Tuntang Tahun 2010–2019.



**Gambar 8.** Pola curah hujan DAS Danau Rawapening.



**Gambar 9.** Arah dan kecepatan angin bulanan DAS Danau Rawapening.

bulan Mei–September ditandai oleh dominan angin Baratan. Hal ini kemungkinan disebabkan adanya pegunungan di wilayah sebelah Barat Danau Rawapening, angin dari Barat merupakan angin kering sehingga wilayah Danau Rawapening menjadi daerah bayangan hujan. Sebaliknya pada puncak musim hujan, angin dari Timur terhambat oleh pegunungan di Barat, sehingga mengakibatkan berkumpulnya massa udara di wilayah Danau Rawapening. Apabila dilihat dari pola seperti ini, maka awan-awan penghujan yang ada di Rawapening merupakan awan-awan orografis. Awan orografis adalah awan yang terbentuk di lereng-lereng gunung, dimana massa udara yang dibawa oleh angin terhambat gerakannya oleh gunung, sehingga membentuk awan.

### 3.2. Simulasi Inflow Hasil TMC

Perhitungan simulasi data-data hidrologis di DAS Rawapening tepatnya di DAM Tuntang sebagai satu – satunya outlet Rawapening dilakukan sebagai bahan pertimbangan keefektifan pelaksanaan TMC. Ada beberapa asumsi yang dipakai sebagai pendekatan dan kemudian dijadikan sebagai dasar simulasi yang dibuat. Berdasarkan pengalaman TMC di beberapa danau dan waduk yang pernah menerapkan TMC mendapatkan peningkatan inflow rata-rata sebanyak 20-30%, maka dalam simulasi ini diasumsikan pelaksanaan operasi TMC di DAS Danau Rawapening dapat meningkatkan inflow sebanyak 20-30%. Data hidrologis yang digunakan adalah data kondisi

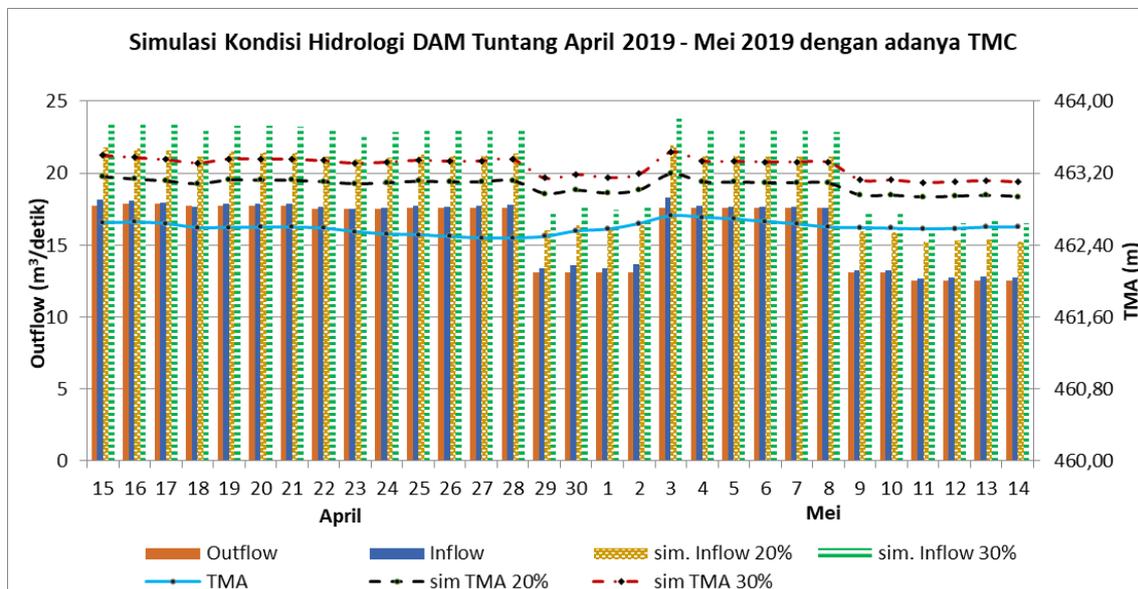
elevasi, inflow dan outflow di DAM Tuntang pada periode 15 April – 14 Mei 2019 dan periode 15 Oktober – 14 November 2019. Periode waktu itu digunakan karena melihat pola historis curah hujan di DAS Rawapening memperlihatkan pada periode waktu tersebut adalah waktu yang tepat dilaksanakan TMC.

Dalam membuat simulasi inflow hasil TMC, dibuat beberapa asumsi yang dapat mendukung perhitungan hasil TMC. Beberapa asumsi tersebut antara lain:

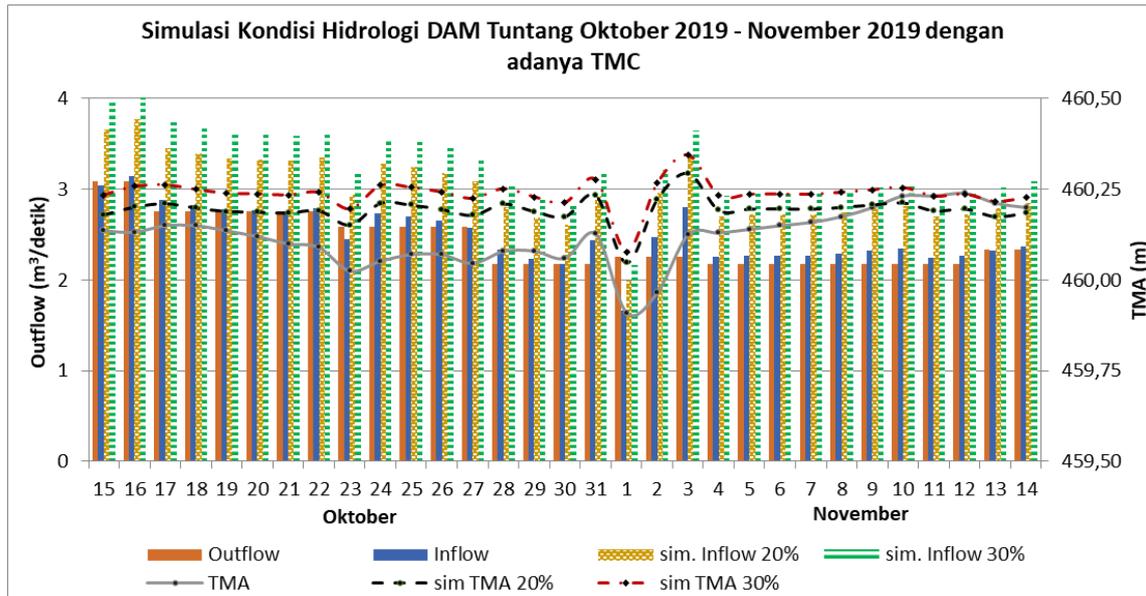
1. Untuk mencari hubungan antara inflow, outflow dan juga Tinggi Muka Air (TMA), maka dibuat baseline menggunakan regresi linear untuk membentuk hubungan matematis antara TMA, inflow dan outflow.
2. Data yang digunakan untuk membuat baseline tersebut adalah data operasi normal hidrologi pada periode bulan April–Mei 2019.
3. Mengasumsikan pola operasi, terutama kondisi outflow tetap pada periode simulasi, maka akan diperoleh prakiraan TMA apabila
4. Ada penambahan inflow sebesar 20-30% ketika melakukan operasi TMC.
5. Kondisi cuaca dalam kondisi normal tidak terjadi pengaruh kondisi global yang mempengaruhi secara signifikan cuaca di area DAS Danau Rawapening.

Gambar 10 menunjukkan hasil simulasi peningkatan inflow dan TMA jika kegiatan TMC

dilakukan pada periode bulan April–Mei 2019 dengan peningkatan sebesar 20% dan 30%. Dari simulasi tersebut, TMA tertinggi yang dapat dicapai adalah 463,44 mdpl jika mendapatkan peningkatan inflow sebesar 30%, sedangkan jika peningkatan inflow sebesar 20% akan mendapatkan TMA tertinggi sebesar 463,20 mdpl. Simulasi tersebut belum memperhitungkan batas TMA maksimal di DAM Tuntang sebesar 462,90 mdpl. Sedangkan Gambar 11 menunjukkan hasil simulasi peningkatan inflow dan TMA jika kegiatan TMC dilakukan pada periode bulan Oktober–November 2019. Mengingat secara historis TMA pada periode tersebut termasuk pada periode TMA terendah, maka hasil simulasi tersebut sudah memperhitungkan TMA maksimal sebesar 462,90 mdpl. Dari hasil simulasi Gambar 11 didapatkan TMA tertinggi yang didapatkan sebesar 460,34 mdpl untuk peningkatan inflow 30 %, jika mendapatkan peningkatan inflow sebesar 20% akan mendapatkan TMA sebesar 460,29 mdpl. Kedua hasil simulasi tersebut dengan pola operasi outflow tetap seperti tahun 2019 akan menekan laju penurunan laju TMA. Hasil simulasi yang dilakukan ini perlu memperhatikan beberapa asumsi di atas, yang tentunya sedikit banyak akan berbeda dengan kenyataan di lapangan, terutama kondisi cuaca yang tidak bisa diprediksikan, dan juga pola operasi DAM Tuntang itu sendiri.



**Gambar 10.** TMA, Inflow, Outflow dan simulasi (sim.) peningkatan inflow serta TMA jika kegiatan TMC dilakukan pada periode April–Mei 2019 di DAS Danau Rawapening.



**Gambar 11.** TMA, Inflow, Outflow dan simulasi (sim.) peningkatan inflow serta TMA jika kegiatan TMC dilakukan pada periode Oktober–November 2019 di DAS Danau Rawapening.

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil analisis yang telah dilakukan diatas, maka dapat disimpulkan bahwa Danau Rawapening memiliki luas sebesar 27,7 km<sup>2</sup>, sedangkan luas DAS Rawapening sebesar 250,79 km<sup>2</sup>. Dengan luasan danau tersebut mampu menampung air dengan kapasitas maksimal sebesar 65 juta m<sup>3</sup> yang berasal dari sembilan sungai yang bermuara. Dari Kajian Tinggi Muka Air Danau Rawapening, terlihat TMA tertinggi terjadi pada bulan Maret–April yang merupakan musim penghujan, nilai TMA tertinggi adalah 462,49 mdpl, sedangkan TMA terendah terjadi pada bulan September–Oktober pada saat musim kemarau dengan nilai rata–rata terendah adalah 460,89 mdpl.

Pola hujan di wilayah DAS Rawapening memiliki tipe pola hujan monsoonal yang memiliki distribusi hujan bulanan annual, yaitu memiliki satu puncak hujan di Desember hingga April dan satu musim kering di bulan Juni–Oktober. Dengan memperhatikan aspek morfologi, topografi, hidrologi serta historis curah hujannya, DAS Danau Rawapening layak untuk dilaksanakan operasi Teknologi Modifikasi Cuaca. Pelaksanaan TMC dengan menggunakan pesawat lebih optimal apabila dilaksanakan pada bulan April–Mei atau Oktober–November setiap tahunnya. Mengingat DAS Danau Rawapening yang relatif kecil dan topografi yang mengelilingi relatif tinggi, maka dari dua parameter tersebut ada peluang pelaksanaan TMC di DAS Danau Rawapening dengan opsi menggunakan *Ground Based Generator* (GBG).

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- Abshaev, A. M., Flossmann, A., Siems, S. T., Prabhakaran, T., Yao, Z., & Tessorf, S. (2022). Rain Enhancement Through Cloud Seeding. In *Unconventional Water Resources* (pp. 21-49). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-90146-2\_2
- Cotton, W.R. (1982). Modification of Precipitation from Warm Clouds—A Review. *American Meteorological Society*, 63(2), 146-160.
- BPPT. (2020). Kajian implementasi teknologi modifikasi cuaca dengan metode penyemaian dari darat menggunakan wahana *ground based generator* (GBG) di DAS Kali Brantas dan DAS Kali Konto, Jawa Timur.
- Finnegan, W.G., Pitter, R.L. (1988). Rapid ice nucleation by acetone-silver iodide generator aerosols. *J. Wea. Mod.*, 20, 51-53.
- Haryanto, U., Sarwono, P.S., Shanty. (2001). Analisis tingkat hisgroskopisitas dan ukuran partikel yang dihasilkan dari pembakaran Flare dengan 14 macam komposisi berbeda untuk dipilih dan digunakan pada *cloud base seeding* di Soroako. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, Vol.2, No.1, 2001:69-74.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2018). ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S)

- Climate Data Store (CDS). Doi: 10.24381/cds.adbb2d47
- Indrayati, A. dan Hikmah, N.I. (2018) Prediksi sedimen danau Rawapening tahun 2020 sebagai dasar reservasi sungai tuntang berbasis sistem informasi geografis. Seminar Nasional Geografi UMS IX 2018. Hal. 543-552.
- Kementerian Lingkungan Hidup (KLH). (2012). Daya Tampung Beban Pencemaran Air dan Zonasi Danau Rawapening.
- Kementerian Pekerjaan Umum. (2000). Perhitungan hidrologi, Diklat perencanaan bendungan urugan tingkat dasar.
- Perum Jasa Tirta 1. (2020). Volume echosounding Rawapening 2020.
- Prasetio, A., Widjiantoro, B. L., & Nasution, A. M. (2019). Overview of ground-based generator towers as cloud seeding facilities to optimize water resources in the Larona Basin. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 276, p. 06025). EDP Sciences.
- Renggono, F., Kudsy, M., Adhitya, K., Purwadi, P., Belgaman, H. A., Dewi, S., ... & Arifian, J. (2022). Hygroscopic Ground-Based Generator Cloud Seeding Design; A Case Study from the 2020 Weather Modification in Larona Basin Indonesia. *Atmosphere*, 13(6), 968. Doi: 10.3390/atmos13060968.
- Rosenfeld, D., Axisa, D., Woodley, W. L., and Lahav, R. (2010). A Quest for Effective Hygroscopic Cloud Seeding. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 49, 1548–1562.
- Ruritan, R.V., Indahyani, T., Rachmadi, E., and Anggoro N.H. (2013). Penerapan Teknologi Modifikasi Cuaca Dalam Upaya Peningkatan Keandalan Alokasi Air Waduk Di Wilayah Sungai Brantas. PIT HATHI XXX.
- Soeprbowati, Tri. (2012). Peta Batimetri Danau Rawapening. *Bioma: Berkala Ilmiah Biologi*. 14. 1410-8801. Doi: 10.14710/bioma.14.2.78-84.