

EVALUASI STATISTIK PENERAPAN MODIFIKASI CUACA BERBASIS SUAR CoSAT 1000 DI DAERAH TANGKAPAN AIR DANAU TOBA SERTA PENGARUHNYA TERHADAP PRODUKSI ALUMINIUM

Statistical Evaluation of The Implementation of Weather Modification Using Cosat-1000 Flare in The Lake Toba Catchment Area and Its Effect on Aluminum Production

Dwipa Wirawan^{1)*}, Adi Bayu Rusandi¹⁾, Chandra Fadlilah¹⁾

¹⁾ Lab. Pengelolaan Modifikasi Cuaca, Direktorat Pengelolaan Laboratorium Fasilitas Riset dan Kawasan SainsTeknologi - BRIN, Gedung Ir. Mohammad Soebagio, PUSPIPTEK, Tangerang Selatan

*E-mail: dwip003@brin.go.id

Intisari

Modifikasi cuaca (MC) berbasis bahan semai suar higroskopis dengan ukuran partikel kurang dari 10 mikron banyak digunakan di berbagai negara. Suar higroskopis Cloud Seeding Agent Tube 1000 (CoSAT-100) produksi PT Pindad (persero) pertama kali digunakan dalam kegiatan penerapan MC wahana pesawat di Daerah Tangkapan Air (DTA) Danau Toba pada tahun 2021. Pesawat yang digunakan, dikelola dan dioperasikan oleh Balai Besar TMC BPPT sejak 2018. Untuk mengetahui efektivitas suar CoSAT-1000 maka dilakukan evaluasi statistik dengan menerapkan beberapa metode antara lain metode target only, target control, double ratio dan metode debit aliran. Data yang dimanfaatkan adalah curah hujan penakar BMKG, presipitasi GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation), curah hujan historis BMKG (1981-2010) serta debit aliran Sungai Asahan dari PT Inalum. Dari hasil MC menggunakan CoSAT-1000 di DTA Danau Toba pada bulan April dan bulan Oktober-November 2021 berdasarkan data curah hujan penakar dibandingkan dengan historisnya atau metodologi target only, menunjukkan peningkatan curah hujan sebesar 7,8-20 %, dan bila dengan metodologi target kontrol berdasarkan data GSMaP memberikan peningkatan sebesar 26,8-67,5 %. Peningkatan 135 % bila dibandingkan dengan periode yang sama pada tahun 2011 hingga 2015 dimana tidak dilakukan penerapan MC. Sementara hasil penambahan debit aliran (inflow) sebesar 17-31 % atau setara dengan volume debit air yang dimanfaatkan PT Inalum untuk memproduksi aluminium sebesar 4.300 hingga 10.700 ton. Didukung pengelolaan dan pengoperasian pesawat secara mandiri, penerapan MC berbasis suar higroskopis produk dalam negeri CoSAT-1000 di DTA Danau Toba merupakan contoh kemandirian penerapan teknologi modifikasi cuaca di Indonesia.

Kata Kunci : Suar higroskopis CoSAT 1000, Target Only, Target Control, Double Ratio dan metode Debit Aliran, Kemandirian Penerapan MC

Abstract

Weather modification (WM) using hygroscopic flare seeding agents with particle sizes less than 10 microns is widely used in various countries. The hygroscopic flare Cloud Seeding Agent Tube 1000 (CoSAT-100) produced by PT Pindad (Persero), was used for the first time in aircraft base WM in the Lake Toba Catchment Area (DTA) in 2021. The aircraft used is managed and operated by Balai Besar TMC BPPT since 2018. To determine the effectiveness of the CoSAT-1000 flares, this study carried out a statistical evaluation by applying several statistical evaluation methods including the Target Only, Target Control, Double Ratio and inflow discharge methods. The data utilized include BMKG rainfall gauge, GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation) precipitation, BMKG historical rainfall (1981-2010) and Asahan River flow discharge data obtained from PT Inalum. The implementation of WM using CoSAT-1000 in the Lake Toba catchment area in the April and October-November 2021, based on rainfall gauge data compared to historical data, rainfall effectively increase by 7.8-20 %, and when use the target control method based on GSMaP data, it increases of 26.8-67.5 %. As well as an increase of 135% when compared to the same period in 2011 to 2015 where no weather modification implemented. While the additional inflow discharge is about 17-31 % or equivalent to the volume of water discharge utilized by PT Inalum to produce 4,300 to 10,700 tons of aluminium. Supported by independent aircraft management and operation, the implementation of weather modification utilize domestic products CoSAT-1000 hygroscopic flares in the Lake Toba watershed is example of independent weather modification technology applications in Indonesia.

Keywords: CoSAT-1000 hygroscopic flare, Target Only, Target Control, Double Ratio and Streamflow Increment method, Independence of Weather Modification Implementation in Indonesia

1. PENDAHULUAN

Danau Toba adalah Danau terbesar di Indonesia yang berada di pulau Sumatera dimana air Dananya dipergunakan oleh masyarakat sekitar untuk pembudidayaan ikan dan sarana rekreasi atau wisata air. Air Danau Toba yang keluar melalui aliran Sungai Asahan mengalir hingga ke Selat Malaka, untuk itu Danau Toba merupakan hulu dari Daerah Aliran Sungai (DAS) Asahan. Air Sungai Asahan dimanfaatkan PT Indonesia Asahan Aluminium (PT Inalum) sebagai sumber daya air pembangkit tenaga listrik guna memproduksi aluminium, untuk itu ketersediaan air di Danau Toba menjadi sangat penting bagi keberlangsungan produksi (Gambar 1).

PT Inalum telah menencanakan transformasi sebagai salah satu perusahaan industri pertambangan kelas dunia sejak tahun 2018 dengan target mencapai total produksi 1 juta ton pada tahun 2025. Agar dapat mencapai target tersebut maka perlu menjaga pasokan air dari Danau Toba untuk memenuhi kebutuhan listrik Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Sigura-gura dan PLTA Tangga yang berada di hilir sungai Asahan (PT Inalum, 2018). Untuk itu guna menjaga defisit kebutuhan air Danau Toba PTInalum menerapkan modifikasi cuaca dengan penyemaian awan agar hujan dapat jatuh dengan intensitas yang lebih banyak di atas daerah tangkapan air (DTA) Danau Toba.

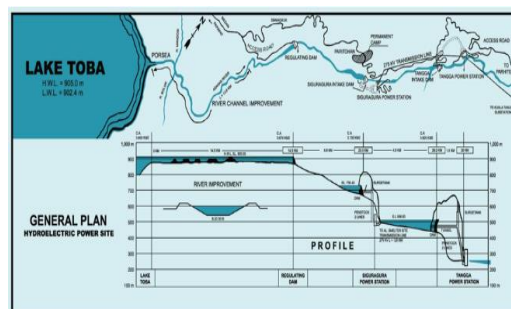
Modifikasi cuaca dengan penyemaian awan pada prinsipnya dapat dilakukan dengan menginjeksikan partikel higroskopis ke dalam atau ke dasar awan. Pada umumnya, awan di negara kepulauan seperti Indonesia, cenderung merupakan awan hangat yang suhu puncaknya tidak mencapai titik beku 0 °C (Wallace & Hobs, 2006). Dengan demikian partikel higroskopis akan mempercepat kondensasi dan meningkatkan proses tumbukan dan penggabungan sehingga memperbesar butir tetes hujan dan hujan jatuh lebih cepat dan dengan intensitas yang lebih banyak (Tjasyono, 2012).

Penerapan modifikasi cuaca di DTA Danau Toba pada tahun 2021 menggunakan bahan semai jenis *pyrotechnique* atau yang dikenal dengan suar higroskopis yang telah banyak digunakan di pelbagai negara. Bahan semai suar higroskopis yang digunakan merupakan produk nasional PT Pindad (Persero) yang disebut CoSAT-1000 yang merupakan pengembangan produk *reverse engineering* antara Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) bersama PT Pindad persero sejak 2011. CoSAT-1000 sudah memperoleh sertifikat laik udara (Pindad, 2020) dengan spesifikasi dan kualitas produk yang setara dengan produk suar

higroskopis yang digunakan di negara lain (Brintjes *et al.*, 2012, Wirawan *et al.*, 2022). Penggunaan bahan semai CoSAT-1000 dalam pelaksanaan modifikasi cuaca wahana udara di DTA Danau Toba merupakan yang pertama kali selain penggunaan suar higroskopis perolehan impor. Selain itu kegiatan ini juga didukung oleh pesawat milik BRIN (dahulu Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi) yang dioperasikan secara mandiri oleh Operator Laboratorium Pengelolaan Modifikasi Cuaca (dahulu Balai Besar Teknologi Modifikasi Cuaca – BPPT) (Wirawan *et al.*, 2022)

Keberhasilan penerapan modifikasi cuaca menurut Gabriel (1999) dapat dilakukan melalui pendekatan statistik dengan membandingkan hasil hujan area target maupun dengan target kontrol. Untuk itu membutuhkan data historis yang cukup panjang agar dapat memperhitungkan tingkat keberhasilan penyemaian awan (Gabriel, Petrondas 1983). Selain itu, keberhasilan modifikasi cuaca menurut Silverman (2007, 2008) dapat diperhitungkan pula dengan hasil debit aliran masuk terhadap DTA atau DAS selama pelaksanaan modifikasi cuaca. Saat ini metode statistik perhitungan keberhasilan modifikasi cuaca *target only*, *target-control* dan *double ratio* dan metode debit aliran masih layak digunakan. (Gabriel *et al.*, 1983; Silverman, 2007; Silverman, 2008, Wu *et al.*, 2018)

Dalam tulisan ini dilakukan kajian untuk mengetahui seberapa besar tingkat keberhasilan modifikasi cuaca di DTA Danau Toba yang menggunakan bahan semai suar higroskopis CoSAT 1000 dengan pendekatan statistik untuk menghitung penambahan curah hujan dan debit aliran. Guna melakukan evaluasi dimaksud, diperlukan penentuan daerah kontrol serta data historis curah hujan dan debit aliran sungai Asahan. Pada akhir kajian disimulasikan seberapa besar tambahan debit aliran yang dikonversi menjadi listrik sehingga memberikan peningkatan produksi aluminium PT Inalum.



Gambar 1. Skema aliran dari Danau Toba ke PLTA Sigura-gura dan PLTA Tangga PTInalum persero (<https://www.inalum.id/id/tentang-kami/fasilitas-pabrik/pabrik-ipp>).

2. PELAKSANAAN MODIFIKASI CUACA DAN METODE EVALUASI

2.1. Pelaksanaan Modifikasi Cuaca

Penerapan TMC dilaksanakan guna menjaga kebutuhan air PLTA Sigura-gura dan Tangga yang berada di DAS Asahan yang dilaksanakan pada tahun 2021 dalam 2 periode, periode bulan April dan bulan Oktober-November 2021. Kegiatan penerapan TMC periode bulan April 2021 dilaksanakan oleh Balai Besar TMC BPPT, sedangkan periode Oktober dan November 2021 dilaksanakan oleh Laboratorium Pengelolaan TMC, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dimana BPPT telah dilebur kedalam BRIN (BPPT, 2021; BRIN, 2021).

Berbeda dengan bahan semai yang umumnya digunakan dalam penerapan TMC berupa *super fine powder* NaCl yang berbentuk bubuk halus, bahan semai Suar Higroskopis CoSAT 1000 berbentuk campuran bahan kimia yang dipadatkan dan dikemas dalam tabung kertas. Asap partikel higroskopis yang keluar dari suar, yang berukuran diameter sekitar $\pm 2-10$ mikron, diarahkan masuk ke dalam awan melalui dasar awan (PT Pindad (persero), 2021 dan Wirawan *et al.*, 2022).

Alat pendukung utama pesawat udara yang digunakan untuk membawa suar CoSAT 1000 adalah pesawat Piper Cheyenne II registrasi PK-TMC (gambar 2.a) yang dikelola dan dioperasikan sendiri sejak tahun 2018 oleh BPPT dengan izin Sertifikat Operasi (*Operating Certificate*) nomor 91-018 dari Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, Kementerian Perhubungan. PK-TMC telah dimodifikasi untuk menjadi pesawat versi penyemai awan (*Rain Maker Version*) dan dilengkapi dengan *rack mounting* khusus untuk membawa suar CoSAT 1000 di kedua sayapnya (gambar 2.b) dengan kapasitas maksimum 24 buah suar, masing-masing 12 buah di sayap kanan dan kiri. (Ditjen Hubud Kemenhub, 2020).



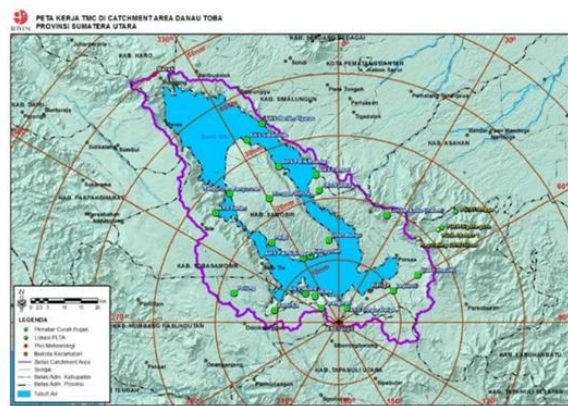
(a)



(b)

Gambar 2. Pesawat PK-TMC (a) dan Suar CoSAT-1000 terpasang pada rackmounting (b) (sumber BPPT, 2021; BRIN, 2021)

Pelaksanaan penerapan TMC berbasis suar higroskopis CoSAT 1000 di DTA Danau Toba berlangsung pada 1 s.d. 29 April 2021, dan 15 Oktober s.d. 18 November 2021. Periode pertama bulan April dilaksanakan selama 29 hari kegiatan dengan 24 hari penerbangan semai. Jumlah sorti penerbangan yang dilaksanakan sebanyak 27 sorti dengan menghabiskan 169 (seratus enam puluh sembilan) bahan semai suar CoSAT 1000. Sedangkan pada periode kedua bulan Oktober- November dilaksanakan selama 35 hari kegiatan dengan 30 hari penerbangan semai, 37 sorti penerbangan dengan menghabiskan 324 (tiga ratus dua puluh empat) CoSAT 1000.



Gambar 3. Peta area target DTA Danau Toba (sumber BRIN, 2021)

2.2. Metode Evaluasi

Guna mengetahui keberhasilan penyemaian awan, penambahan curah hujan dan penambahan debit aliran merupakan evaluasi pendekatan statistik yang layak dan patut dilakukan (Morisson *et al.*, 2009, Harsoyo *et al.*, 2013, Wu *et al.*, 2018). Evaluasi statistik modifikasi cuaca di DTA Danau Toba dengan suar higroskopis CoSAT-1000 menggunakan metode evaluasi statistik *Target Only*, *Target Control*, *Double Ratio* (Gabriel KR, 1983, 1999, Silverman, 2007) dan metode Debit Aliran (Silverman BA, 2008).

Metode *Target Only* dipergunakan guna mengetahui tingkat penambahan curah hujan pada area target, sedangkan metode Target Control dan Double Ratio membandingkan dengan curah hujan daerah kontrol. Daerah kontrol merupakan daerah yang berdekatan dengan area target yang memiliki kemiripan pola curah hujan klimatologi dengan area target dan berada di depan dari area target menurut arah angin dominan (*upwind*) serta diharapkan tidak terkontaminasi efek dari penyemaian awan. metode Debit Aliran adalah metode dengan menghitung tingkat penambahan aliran pada periode saat dilakukan penyemaian awan di area Target.

2.2.1. Target Only

Metode *Target Only* dihitung dengan menggunakan data rerata historis daerah target ((gambar 3) sebagai dasar informasi perbandingan. Pengaruh penyemaian dan besarnya penambahan curah hujan dihitung dengan cara membandingkan curah hujan di daerah target dengan curah hujan historis pada selang waktu periode penyemaian yang sama (Gabriel KR, 1983, 1999, Silverman, 2007).

Persamaan perhitungan metode *Target Only* dihitung berdasarkan persamaan berikut,

$$R = \frac{CHa - CHh}{CHh} \times 100 \% \quad (1)$$

dimana, R merupakan tingkat pertambahan hujan (%), CHa merupakan jumlah curah hujan aktual di daerah target (mm), dan CHh adalah rerata curah hujan historis di daerah target (mm)

CHa hanya dipilih pada hari dilaksanakan penyemaian awan guna mengurangi bias curah hujan yang terjadi dimana tidak dilakukan penerbangan penyemaian awan. Data historis yang dijadikan acuan adalah data historis 30 tahunan (1991-2020) Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika dan data historis produk *Global Precipitation Measurement (JAXA-TRMM)* periode 2011 hingga 2020 (10 tahun).

2.2.2. Target Control

Dengan memanfaatkan daerah kontrol maka curah hujan pendugaan di daerah target jika ada penyemaian awan diperkirakan dari analisa regresi dengan menggunakan data curah hujan historis di daerah kontrol sebagai variabel bebas dan data curah hujan historis di daerah target pada periode waktu yang sama. Curah hujan aktual periode penyemaian diperoleh melalui pengukuran langsung. Curah hujan aktual ini merupakan curah hujan yang dipengaruhi oleh penyemaian awan (Gabriel KR, 1983, 1999, Silverman, 2007). Perhitungan peningkatan curah hujan dengan metode ini diperoleh dari persamaan sebagai berikut,

$$R = \frac{CHa - CHs}{CHs} \times 100 \% \quad (2)$$

dimana, R merupakan tingkat pertambahan hujan (%), CHa merupakan jumlah curah hujan aktual di daerah target (mm), dan CHs merupakan curah hujan wilayah dugaan di daerah target yang diperoleh dari persamaan regresi (mm).

2.2.3. Double Ratio

Double Ratio adalah rasio curah hujan daerah target terhadap daerah kontrol pada periode penyemaian awan dengan rasio curah hujan daerah target terhadap kontrol pada waktu tidak ada penyemaian pada periode waktu yang sama (Gabriel KR, 1983, 1999, Silverman, 2007). Untuk menghitung double ratio digunakan persamaan sebagai berikut.

$$DR = \frac{(T/C)a}{(T/C)us} \quad (3)$$

Dimana,

DR merupakan nilai " Double Ratio", $(T/C)a$ merupakan perbandingan antara curah hujan aktual di daerah target pada periode penyemaian awan, dengan curah hujan daerah kontrol pada periode waktu yang sama. Dan $(T/C)us$ merupakan perbandingan curah hujan di daerah target dan kontrol pada periode waktu tidak ada penyemaian awan.

Peningkatan curah hujan akibat penyemaian dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$R \% = (DR - 1) \times 100 \% \quad (4)$$

2.2.4. Debit Aliran

Prinsip metode evaluasi Debit Aliran adalah melalui pendekatan debit aliran (inflow) di daerah target pada saat dilaksanakan penyemaian awan yang dibandingkan dengan *inflow* pada saat tidak dilakukan penyemaian awan atau dibandingkan dengan *baseline aliran* historis pada selang waktu yang sama (Silverman BA, 2008). Data *baseline* historis diperoleh dari pengelolaan DAS yang menggunakan model hidrologi).

Tingkat penambahan debit aliran dirumuskan sebagai berikut,

$$R = Qa - Qh \quad (5)$$

dimana, R merupakan tingkat pertambahan aliran (m^3), Qa merupakan debit aktual saat penerapan TMC (m^3), dan Qh adalah debit rerata historis atau debit saat tidak ada kegiatan TMC (m^3). Selisih besarnya debit aliran diantara kedua nilai tersebut dinyatakan sebagai penambahan aliran hasil penerapan MC.

2.3. Penentuan Target Kontrol

Dalam menentukan daerah target kontrol

terhadap DTA Danau Toba, antara lain ditentukan dengan kondisi geografis dan topografi yang mendekati kondisi daerah target, berada di wilayah yang diasumsikan tidak terpengaruh efek penyemaian awan serta memiliki karakteristik curah hujan yang mirip. Selain itu menurut Silverman (2007) karakteristik curah hujan antara target kontrol dengan dan daerah target memiliki nilai korelasi yang cukup tinggi.

Berdasarkan hal tersebut maka target kontrol DTA Danau Toba ditentukan keberadaannya yang berada di area upwind dari target serta memiliki pola karakteristik curah hujan dengan nilai korelasi yang tinggi. Dari hasil penelaahan maka DAS terdekat dengan DTA Danau Toba serta diasumsikan tidak terpengaruh oleh efek penyemaian awan adalah DAS Singkil yang berada di barat – barat laut dari Danau Toba.

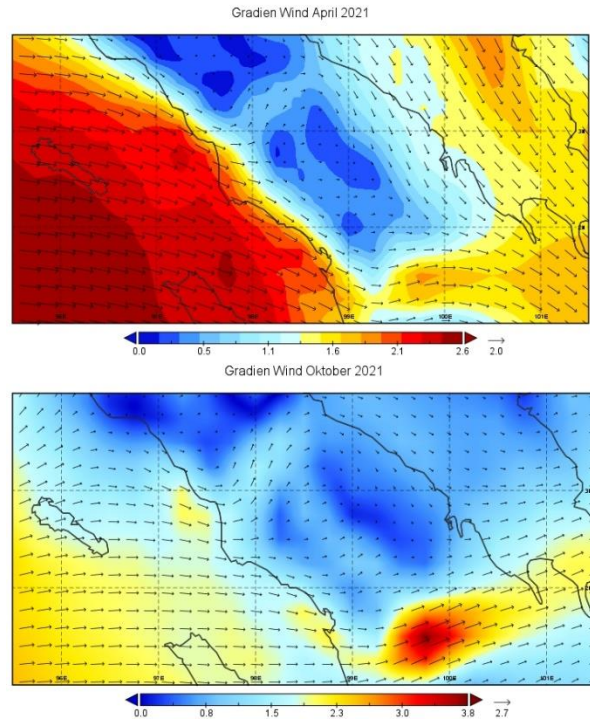
DAS Singkil terbentang dari barat daya Provinsi Nanggroe Aceh Darussalam hingga bagian barat Provinsi Sumatera Utara dengan hilirnya mengalir ke pantai pesisir Barat Provinsi Sumatera Utara. Sehubungan luas DAS Singkil 1,5 kali lebih luas daripada DTA Danau Toba untuk itu area yang ditentukan sebagai target kontrol hanya sebatas area yang bersinggungan langsung dengan DTA Danau Toba atau DAS Singkil bagian selatan (area yang dibatasi dengan garis ungu pada gambar 4).

Berdasarkan pola angin gradien dominan di wilayah provinsi Sumatera Utara pada periode bulan April dan Oktober 2021 menunjukkan pola angin baratan sehingga DAS Singkil merupakan area upwind terhadap DTA Danau Toba (gambar 5).

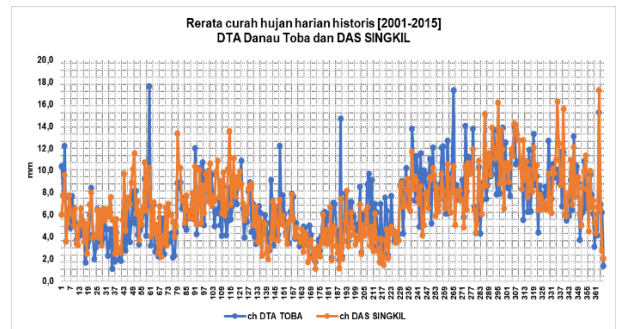
Adapun korelasi curah hujan harian antara DAS Singkil dengan DAS (DTA Toba) menunjukkan koefisien korelasi sekitar 0,582 dengan persamaan regresi $y = 0,77x + 1,68$ sedangkan untuk akumulasi curah hujan bulanan antara DAS Sigkil dan DTA Danau Toba menunjukkan efisien korelasi hingga 0,700, dengan persamaan regresi $y = 0,81x + 43,64$. Seperti terlihat pada gambar 6 dan 7. akumulasi curah hujan di kedua area berdasarkan data GSMaP.



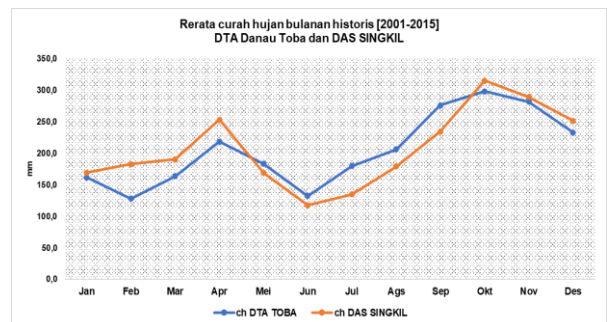
Gambar 4. DTA Danau Toba dan DAS Singkil



Gambar 5. Pola Angin Gradien Dominan wilayah provinsi Sumatera Utara bulan April 2021 (atas) dan Oktober 2021 (bawah) (olahan data reanalysis ECMWF)



Gambar 6. Pola curah hujan harian historis (2001-2015 /15 tahun) DTA Danau Toba dan DAS Singkil (olahan data GSMaP)



Gambar 7. Pola curah hujan bulanan historis (2001-2015 /15tahun) DTA Danau Toba dan DAS Singkil (olahan data GSMaP)

2.4. Data Curah Hujan Dan Debit Aliran

Data yang digunakan dalam kajian ini adalah data curah hujan yang terjadi di DTA Toba

- a. Data penakar curah hujan yang tersebar di DTA Danau Toba baik milik BMKG,

- BRIN dan PT Inalum dengan sebaran seperti tampak pada gambar 8.
- b. Data GSMaP satelit TRMM JAXA (yang diperoleh dari <ftp://hokusai.eorc.jaxa.jp/>) aktual periode pelaksanaan MC.
- c. Data curah hujan historis yang digunakan dalam perhitungan perbandingan curah hujan menggunakan data historis curah hujan GSMaP dengan periode dari tahun 2001 hingga 2015 yang merupakan periode tanpa adanya pelaksanaan MC.
- d. Data curah hujan area Zonal Musim (ZOM) periode tahun 1981-2010 dalam *Buku Prakiraan Musim Kemarau 2021* yang dikeluarkan BMKG (BMKG, Maret 2021).

Sedangkan data historis debit aliran masuk (inflow) ke PLTA Sigura-gura selama 35 tahun (1985 s.d. 2020) diperoleh dari PTInalum.

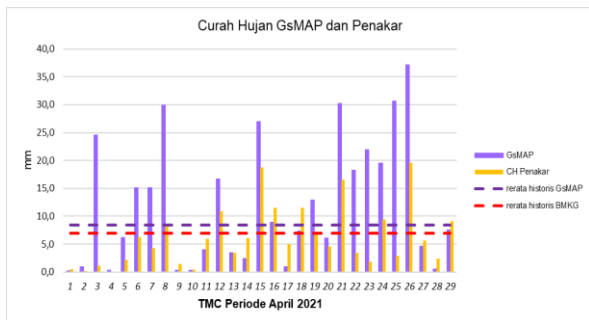


Gambar 8. Peta sebaran penakar curah hujan di DTA-Danau Toba (BRIN, 2021)

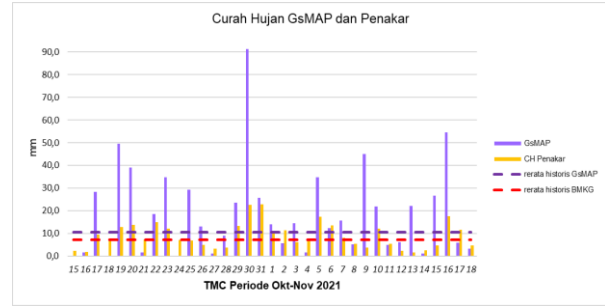
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Penambahan Curah Hujan Target Only

Hasil penerapan TMC diperoleh total curah hujan berdasarkan penakar yang tersebar di DTA Danau Toba dan curah hujan (presipitasi) produk GSMaP JAXA-TRMM periode April 2021, sebesar 180,4 mm dan 308,14 mm yang ditunjukkan dengan grafik pada gambar 9a. Untuk periode Oktober-November 2021 sebesar 283,48 mm dan 569,68 mm ditunjukkan pada grafik gambar 9b.



(a)



(b)

Gambar 9. Grafik curah hujan GSMaP dan Penakar periode TMC April 2021 (a) dan Oktober-November 2021 (b)

Pada gambar 9 terlihat pada periode April 2021 kejadian hujan diatas rerata historis curah hujan BMKG sebanyak 10 hari (periode April 2021), dan 18 hari (periode Oktober-November 2021). Pada periode April curah hujan penakar maksimum sebesar 19,6 mm terjadi pada tanggal 26 April 2021, sedangkan pada periode Oktober-November 2021 curah hujan maksimum sebesar 22,9 mm terjadi pada 31 November 2021.

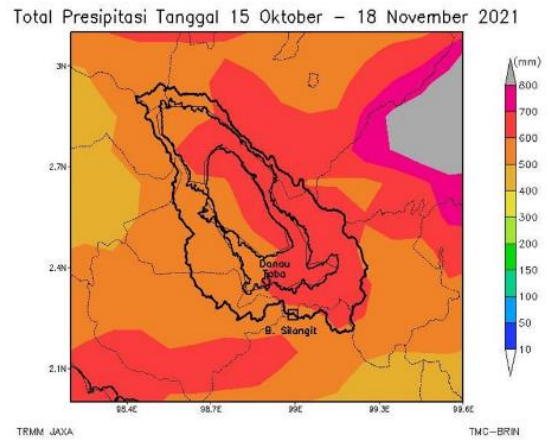
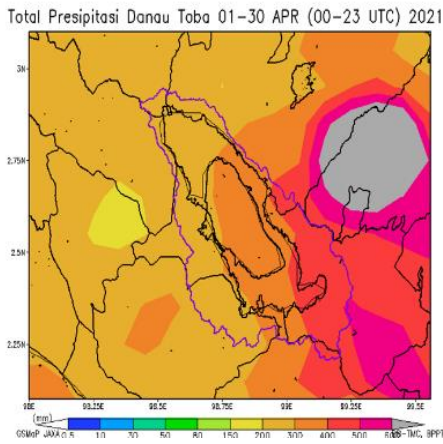
Hasil perhitungan penambahan curah hujan dengan metode *Target Only*, dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Evaluasi metode *Target Only*

Periode	Sorti	CH a		CH h		Ratio	
		GsMAP	BMKG	GsMAP	BMKG	GsMAP	BMKG
1-29 Apr	27	308,14	180,42	245,70	166,30	20,3%	7,8%
15 Okt- 18 Nov	37	569,68	283,48	368,05	226,40	35,4%	20,1%

Penambahan curah hujan pada penerapan TMC di DTA Danau Toba dengan perbandingan terhadap data historis BMKG (1981-2010) pada periode selang waktu yang sama berkisar 7,8 hingga 20,1%. Sedangkan terhadap curah hujan (presipitasi) GSMaP historis 2011-2020, berkisar antara 20,3 hingga 35,4 %. Adapun persentase peningkatan curah hujan (presipitasi) GSMaP lebih tinggi dikarenakan perhitungan presipitasi mencakup potensi terjadinya hujan di atas badan air Danau Toba.

Secara spasial presipitasi di DTA Danau Toba selama pelaksanaan TMC dapat dilihat pada gambar 10. Tampak pada periode TMC April 2021, curah hujan spasial berdasarkan GSMaP pada DTA Danau Toba dengan intensitas sekitar 200-400mm/30 hari dengan intensitas tertinggi di wilayah Timur hingga Tenggara DAS. Sedangkan pada periode Oktober-November 2021 berkisar 500-700mm/35hari dengan intensitas tertinggi di wilayah Utara hingga Tenggara DTA Danau Toba.



Gambar 10. Distribusi spasial curah hujan GSMaP di DTA-Danau Toba periode April 2021 (kiri) dan Periode Oktober-November 2021 (kanan)

3.2. Penambahan Curah Hujan Terhadap Target Kontrol

Dari hasil perhitungan metode target kontrol diperoleh pada periode April 2021, penambahan curah hujan sebesar 67,5% terhadap target kontrol, pada periode Oktober-November 2021 sebesar 26,8% seperti tampak pada tabel 2.

Tabel 2. Evaluasi metode *Target Control*

Periode	Curah Hujan		Penambahan %
	Target	Prediksi Target	
1-29 Apr	256,2	152,9	67,5
15 Okt- 18 Nov	491,7	387,9	26,8

Penambahan pada bulan April yang lebih tinggi dibandingkan dengan periode Oktober-November, dikarenakan curah hujan historis periode bulan April pada area target kontrol merupakan puncak curah hujan tahunan tertinggi kedua yang perbedaannya dengan curah hujan area target cukup signifikan. Selain itu DTA Toba juga merupakan daerah bayangan hujan dari DAS Singkil, sehingga penambahan kecil pada area target memiliki perbandingan penambahan yang cukup besar terhadap area target kontrol. Sedangkan puncak curah hujan historis area target kontrol pada bulan Oktober-November dibandingkan dengan puncak curah hujan historis area target (DTA Toba) hanya memiliki selisih berkisar 7,6 hingga 17,2 mm/bulan (lihat gambar 7).

3.3. Penambahan Curah Hujan Metode Double Ratio

Perhitungan metode double ratio membandingkan dengan curah hujan pada periode saat dilakukan penyemaian awan/modifikasi cuaca untuk target area dan target kontrol dengan periode sama, dan pada periode tidak adanya penyemaian awan. Saat periode tidak ada penyemaian awan digunakan data historis selama 5 tahun (2011-2015) dimana tidak pernah dilakukan penyemaian awan. Hasil perhitungan metode Double Ratio, dengan

menggunakan data historis yang sama dengan perhitungan metode target kontrol, maka diperoleh hasil seperti tampak pada tabel 3 sebagai berikut.

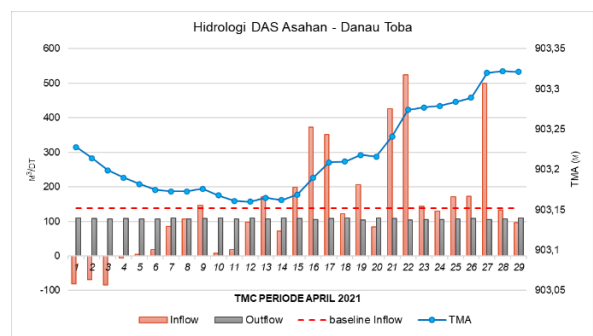
Tabel 3. Evaluasi metode *Double Ratio*

Periode	Curah Hujan Aktual		Curah Hujan Non Semai		DR	Penambahan %
	Target	Kontrol	Target	Kontrol		
1-29 Apr	256,2	209,4	207,5	329,5	1,94	94%
15 Okt- 18 Nov	491,7	531,1	351,8	534,4	1,41	41%

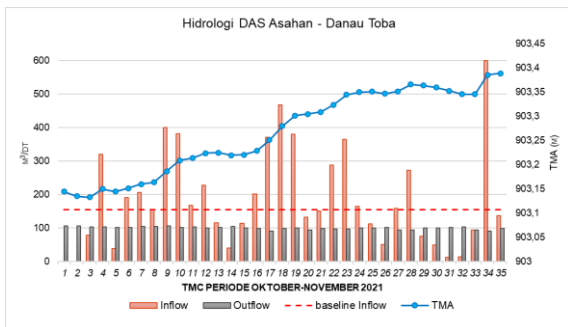
Secara total penambahan curah hujan akibat penyemaian awan di DTA Danau Toba pada tahun 2021 dengan metode *double ratio* sebesar 135 persen.

3.4. Penambahan Debit Aliran

Kondisi hidrologi DTA Danau Toba, aliran masuk (inflow), aliran keluar (outflow) dan Tinggi Muka Air (TMA) Danau Toba dapat dilihat pada gambar 11 dan 12.



Gambar 11. Grafik hidrologi DTA-Danau Toba periode April 2021



Gambar 12. Grafik hidrologi DTA-Danau Toba periode Oktober-November 2021

Pada gambar 11 dan 12 grafik hidrologi di atas, pada periode April 2021 debit aliran inflow yang melebihi rerata historis *baseline inflow* sebanyak 12 kali, dan pada periode Oktober-November 2021 sebanyak 18 kali. Adapun pada periode April, inflow 500m³/dt terjadi 2 kali, sedangkan pada periode Oktober-November inflow mencapai rerata inflow maksimum sebesar 600 m³/dt yang terjadi pada tanggal 17 November 2021.

Hasil perhitungan penambahan debit aliran (inflow) dapat dilihat pada tabel 4, dimana rasio penambahan periode April 2021 sebesar 17,6% dan periode Oktober-November 2021 sebesar 31,4%. Perhitungan penambahan debit aliran diperoleh dari aktual inflow pada saat penerapan TMC dibandingkan dengan data historis inflow pada periode yang sama, yaitu sebesar 138,6 m³/dt pada bulan April dan sebesar 154,6 m³/dt pada periode Oktober-November 2021.

Tabel 4. Evaluasi Penambahan Debit Aliran

Periode	Baseline Inflow	Inflow m ³ /dt	Ratio
1-29 Apr	138,6	162,98	17,6%
15 Okt- 18 Nov	154,6	203,20	31,4%

Dari tabel 4 di atas penambahan debit aliran pada bulan april sebesar 50,56 jt m³ (tabel 4. Inlow dikurangi baseflow) sedangkan pada bulan Oktober-November sebesar 125,98 juta m³.

3.5. Penambahan Produksi Listrik Dan Aluminium

Berdasarkan informasi PT Inalum aliran inlow sebesar 0,83 m³/dt dapat menghasilkan 1 kWh dan untuk memproduksi 1 (satu) ton aluminium dibutuhkan 14.000 kWh (PT Inalum, 2020 (<https://www.inalum.id/id/tentang-kami/fasilitas-pabrik/pabrik-ipp>)). Hasil produksi listrik dari tambahan inflow pada bulan April yang dapat dihasilkan sekitar 60,67 juta kWh sedangkan pada bulan Oktober November sebesar 151,18 kWh. Dengan demikain produksi Aluminium yang dapat dihasilkan dari tambahan inflow pada periode penerapan TMC sebesar

4.334 (empat ribu tiga ratus tiga puluh empat) ton pada bulan April, dan 10.798 pada periode bulan Oktober-November 2021 (Tabel 5).

Tabel 5. Penambahan Produksi Listrik Dan Produksi Aluminium

Periode	+ Vol. Inflow jt.m ³	Produksi jt kWh	Produksi Alum (ton)
1-29 Apr	50,56	60,67	4.334
15 Okt- 18 Nov	125,98	151,18	10.798

Secara total penambahan produksi aluminium PT Inalum akibat adanya penyemaian awan di DTA Danau Toba pada tahun 2021 sebesar 15312 ton.

4. KESIMPULAN

Penerapan TMC berbasis suar higroskopis CoSAT 1000 di DTA-Danau Toba pada periode April dan Oktober-November 2021 dapat disimpulkan:

1. Mampu meningkatkan curah hujan dengan penambahan sekitar 7 hingga 20% dibandingkan dengan rerata historis 1981-2010.
2. Memberikan penambahan curah hujan sebesar 26,8 hingga 67,5% terhadap target kontrol.
3. Bila dibandingkan dengan data historis tanpa adanya penyemaian awan pada area target dan target kontrol mampu menambah curah hujan sebesar 135%.
4. Meningkatkan tambahan debit aliran (inflow) sekitar 17 hingga 31 % dari *baseline* historis 35 tahun (1985-2020).
5. Tambahan produksi listrik akibat adanya penambahan debit aliran (inflow) sebesar 60,7 hingga 151,2 juta kWh, sehingga mampu menambah produksi Aluminium sebesar 4.300 hingga 10.700 ton.
6. Spesifikasi suar produk dalam negeri CoSAT 1000 setidaknya akan mampu bersaing dengan produk impor, ditambah dengan pengelolaan dan pengoperasian mandiri pesawat udara yang optimal dilakukan oleh para anak bangsa merupakan kemandirian teknologi modifikasi cuaca di Indonesia. (PT Pindad (persero), 2020, 2021. Wirawan, 2022).

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih sebesar-besarnya ditujukan kepada PT Inalum yang telah mempercayakan dan menugaskan Laboratorium Pengelolaan TMC, Badan Riset dan Inovasi Nasional (dh. Balai Besar TMC - BPPT) untuk melaksanakan kegiatan penerapan TMC berbasis suar higroskopis CoSAT 1000 di DTA Danau Toba. Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kepala Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), Deputi Kepala

Bidang Teknologi Pengembangan Sumberdaya Alam, Kepala Balai Besar TMC, dan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional, Deputi Infrastruktur Riset dan Inovasi, Direktorat Pengelolaan Laboratorium Fasilitas Riset dan Kawasan Sains Teknologi serta Koordinator Pengelolaan Laboratorium TMC, atas ijin dan dukungannya untuk menuntaskan kajian efektivitas suar higroskopis CoSAT 1000 di DTA Danau Toba.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG). (Maret 2021), *Buku Prakiraan Musim Kemarau 2021, Tabel data curah hujan Zona Musim 1981-2010*
- Badan Riset dan Inovasi Nasional. (November 2021), Direktorat Pengelolaan Laboratorium Fasilitas Riset dan Kawasan Sains Teknologi, Laboratorium Pengelolaan Teknologi Modifikasi Cuaca, *Laporan Akhir Pelaksanaan Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) di Daerah Tangkapan Air Danau Toba Provinsi Sumatera Utara, tahap II -Tahun 2021 periode 15 Oktober – 18 November 2021.*
- Balai Besar Teknologi Modifikasi Cuaca – BPPT (Mei 2021), *Laporan Akhir Pelaksanaan Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) di Daerah Tangkapan Air Danau Toba Provinsi Sumatera Utara, Tahun 2021 Tahap I periode 1– 29 April 2021.*
- Bruintjes, R. T., Salazar, V., Semeniuk, T. A., Buseck, P., Breed, D. W., & Gunkelman, J. (2012). Evaluation of hygroscopic cloud seeding flares. *The Journal of Weather Modification*, 44(1), 69-94. doi:10.54782/jwm.v44i1.85
- Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, Kementerian Perhubungan. (2020), Sertifikat Operasi (*Operating Certificate 91*) OC Number 91-018 (Juli 2020)
- Gabriel. K.R. (1999), Ratio Statistics for Randomized Experiments in Precipitation Stimulation, *Journal Of Applied Meteorology* Vol.38, 290-301, doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<0290:RSFREL>2.0.CO;2
- Gabriel KR, Petrondas D. (1983), On Using Historical Comparisons in Evaluating Cloud Seeding Operations, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* Vol. 22., 626-631, doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<0626:OUHCIE>2.0.CO;2
- Harsoyo, B., Haryanto, U., Seto, T.H., Tikno, S., Tukiyat., Bahri, S. (2013). Evaluasi Hasil Pelaksanaan Teknologi Modifikasi Cuaca di Jawa Barat Menggunakan Analisis Data Curah Hujan. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 14(2), 1-5, doi.org/10.29122/jstmc.v14i2.2689
- Morrison. A.E, Siems S.T, Manton M.J. (2009), On the Analysis of a Cloud Seeding Dataset over Tasmania, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* Vol. 48, 1267-1280, doi.org/10.1175/2008JAMC2068.1
- PTPindad (Persero). (2020), *Sertifikat Laik dan Aman Udara CoSAT 1000*, 2 November 2020, SKET/01/PM/XI/2020
- PTPindad (Persero). (2021). *Materi Presentasi CoSAT 1000 Produk Bahan Semai Awan PT Pindad (persero)*, Webinar Potensi Pemanfaatan Teknologi Modifikasi Cuaca Berbasis Flare di Indonesia 20 Agustus 2021.
- PT Indonesia Asahan Aluminium. (2018). Transformasi INALUM di Tengah Industri Pertambangan untuk Menjadi Perusahaan Kelas Dunia, 1 Mei 2018. (<https://www.inalum.id/id/read/transformasi-inalum-di-tengah-industri-pertambangan-untuk-menjadi-perusahaan-kelas-dunia>)
- PT Indonesia Asahan Aluminium. (2020). (<https://www.inalum.id/id/tentang-kami/fasilitas-pabrik/pabrik-ipp>)
- Silverman B.A. (2007), On the Use of Ratio Statistics for the Evaluation of Operational Cloud Seeding Programs, *Journal of Weather Modification* Vol. 39
- Silverman B.A. (2008), A Statistical Evaluation of the Kern River Operational Cloud Seeding Program, *Journal of Weather Modification* Vol. 48
- Tjasyono, Bayong. (2012), Mikrofisika Awan dan Hujan cetakan ke2
- Wallace JM, Hobbs P V. (2006). Atmospheric Science Second Edition
- Wirawan. D, Nuryanto S, Yananto A. (2022), *Suar Modifikasi Cuaca Cosat 1000 Aman Terhadap Status Mutu Air Danau Toba, Sumatera Utara*, *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, Vol.23 No.2, 2022: 85-96,
- Wu, Xianghua, Yan, Ni, Yu, Huaying, Niu, Sheng, Fangxiu, Meng, Liu, Weiqi, Sun, Haiyan. (2018), Advances in the Evaluation of Cloud Seeding: Statistical Evidence for the Enhancement of Precipitation, *Journal American Geophysical Union (AGU 100) - Advancing Earth and Space Science*, 425-439, doi.org/10.1029/2018EA000424