

EVALUASI NILAI PENAMBAHAN CURAH HUJAN HASIL PELAKSANAAN TEKNOLOGI MODIFIKASI CUACA DALAM UPAYA PENANGANAN BENCANA KEBAKARAN HUTAN DAN LAHAN DI INDONESIA

Evaluation of Rainfall Enhancement from Weather Modification Technology Implementation as An Effort for Forest and Land Fire Disaster Mitigation In Indonesia

Budi Harsoyo^{1,2*)}, Rizaldi Boer²⁾, Edvin Aldrian¹⁾, Lailan Syaufina²⁾, Ari Nugroho¹⁾, M. Bayu Rizky Prayoga¹⁾ dan Ibnu Athoillah¹⁾

¹⁾Badan Riset dan Inovasi Nasional, PUSPIPTEK, KST BJ Habibie, Serpong, Tangerang Selatan, 15314

²⁾Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB, Dramaga, Bogor, 16680

*E-mail : budi042@brin.go.id

Intisari

Telah dilakukan evaluasi statistik untuk menghitung nilai penambahan curah hujan hasil pelaksanaan Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) dalam upaya penanganan bencana kebakaran hutan dan lahan (karhutla) di Indonesia. Perhitungan dilakukan terhadap 4 (empat) sampel pelaksanaan TMC di Provinsi Riau pada tahun-tahun yang mengalami kondisi iklim berbeda, masing-masing tahun 2013 (Netral), 2015 dan 2023 (El Nino) serta 2022 (La Nina). Nilai penambahan curah hujan hasil TMC dihitung dengan menggunakan dua pendekatan, yaitu Metode Target Only dan Target Control. Dari hasil perhitungan menggunakan Metode Target Only maupun Target Control, hasil pelaksanaan TMC untuk penanganan bencana karhutla yang dilaksanakan pada tahun 2013 (Netral), 2015 (El Nino) dan 2022 (La Nina) diketahui mampu memberikan tambahan curah hujan dengan besaran persentase yang bervariasi. Pelaksanaan TMC pada kondisi iklim basah (La Nina) mampu memberikan hasil peningkatan curah hujan yang lebih tinggi dibandingkan pelaksanaan TMC pada kondisi iklim normal (Netral), terlebih lagi pada kondisi iklim kering (El Nino). Dengan Metode Target Only, pelaksanaan TMC di Provinsi Riau yang berlangsung selama 12 hari pada periode tanggal 6-17 Agustus 2022 terhitung mampu meningkatkan intensitas curah hujan sebesar 56,90%, atau rata-rata sekitar 4,74% per hari. Sementara dengan Metode Target Control, terhitung mampu meningkatkan intensitas curah hujan sebesar 81,12%, atau rata-rata sekitar 6,76% per hari.

Kata Kunci: Curah Hujan, Karhutla, Teknologi Modifikasi Cuaca, Target Only, Target Control

Abstract

A statistical evaluation has been carried out to calculate the value of rainfall enhancement resulting from the implementation of Weather Modification Technology (WMT) as an effort to deal with forest and land fires in Indonesia. Calculations were made on four samples of WMT implementation in Riau Province in years that experienced different climatic conditions, respectively 2013 (Neutral), 2015 and 2023 (El Nino), and 2022 (La Nina). The value of rainfall enhancement from the WMT activities is calculated using two different approaches, Target Only Method, and Target Control Method. From the results of calculations using both Target Only and Target Control Methods, WMT implementation for handling the forest and land fires carried out in 2013 (Neutral), 2015 (El Nino) and 2022 (La Nina) are known to be able to provide additional rainfall with varying percentages. Implementation of WMT in wet climate conditions (La Nina) is able to produce results of increasing rainfall which is higher than the implementation of WMT in normal (Neutral) climate conditions, especially in dry climate conditions (El Nino). With the Target Only Method, the implementation of WMT in Riau Province which lasted for 12 days, in the period 6-17 August 2022, was calculated to be able to increase rainfall intensity by 56.90%, or an average of around 4.74% per day. Meanwhile with the Target Control Method, WMT is calculated to be able to increase the intensity of rainfall by 81.12%, or an average of around 6.76% per day.

Keywords: Rainfall, Forest and Land Fires, Target Control, Target Only, Weather Modification Technology

1. PENDAHULUAN

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) selaku *National Focal Point* Pemerintah Republik Indonesia terkait isu Perubahan Iklim telah memanfaatkan Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) sebagai salah satu solusi permanen dalam upaya pengendalian bencana kebakaran hutan dan lahan (karhutla) di Indonesia. Sejak pertama kali diaplikasikan untuk menanggulangi bencana karhutla yang cukup hebat akibat El Nino kuat pada tahun 1997, teknologi ini kemudian mulai dimanfaatkan kembali secara rutin untuk mengatasi bencana karhutla di wilayah Pulau Sumatera dan Kalimantan mulai periode tahun 2010 hingga saat ini. Berkaca dari pengalaman kejadian bencana karhutla yang cukup massif akibat El Nino kuat di tahun 2015, skema pemanfaatan TMC selanjutnya mengalami perubahan paradigma. Dari yang semula dilakukan pada saat sudah terjadi bencana untuk tujuan pemadaman karhutla (*fire suppression*), sejak tahun 2016 TMC dilakukan lebih awal untuk tujuan pembasahan lahan gambut (*rewetting*) sebagai upaya pencegahan bencana karhutla (Harsoyo & Athoillah, 2022).

Dalam penelitian (Sloan *et al.*, 2021) disebutkan bahwa upaya yang dilakukan oleh Pemerintah Indonesia dalam hal pengendalian bencana karhutla setelah tahun 2015 cukup sukses untuk mengurangi kerusakan/degradasi hutan, kabut asap dan emisi karbon. Rerata aktivitas karhutla selama periode 2016-2019 sebesar 23% dan berkurang menjadi 70% disaat terjadi bencana yang cukup parah akibat El Nino tahun 2019. Keberhasilan upaya pengendalian karhutla di Indonesia dalam beberapa tahun terakhir dapat dilihat dari sejumlah indikator. Misalnya dengan melihat berkurangnya jumlah titik api, luas area kebakaran menurun, dan tidak adanya kejadian asap lintas batas serta penundaan atau penutupan sarana prasarana transportasi udara akibat karhutla dalam beberapa tahun terakhir. Namun demikian dalam penelitian tersebut tidak dijelaskan secara

spesifik mengenai kontribusi TMC terhadap keberhasilan tersebut, mengingat KLHK banyak melakukan upaya dalam hal pengendalian bencana karhutla. Mulai dari diseminasi informasi, patroli, kampanye, sosialisasi, pemadaman, dan lain-lain. TMC adalah salah satunya (Panjaitan, 2018).

Secara singkat dapat dijelaskan bahwa efektivitas TMC dibandingkan dengan teknologi lainnya dalam upaya pengendalian bencana karhutla adalah kelebihanannya dalam hal kemampuan memadamkan karhutla dalam eskalasi yang luas, yaitu melalui siraman hujan (Seto *et al.*, 2018), sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1. Dengan adanya perubahan paradigma pemanfaatan TMC untuk tujuan pembasahan lahan gambut, maka selanjutnya efektivitas TMC dalam upaya pengendalian bencana karhutla juga diukur dengan melihat seberapa mampu hujan hasil TMC dapat menjaga tingkat kebasahan tanah gambut dan mengisi simpanan air di kubah gambut untukantisipasi kekeringan saat musim kemarau tiba. Oleh karenanya, curah hujan menjadi parameter utama yang selalu dipakai untuk mengevaluasi kinerja hasil pelaksanaan TMC.

Terkait bantuan pelaksanaan TMC dari Pemerintah Pusat yang rutin dilakukan setiap tahun, masih cukup banyak masyarakat yang mempertanyakan mengenai nilai manfaat dan efisiensi pemanfaatan teknologi ini dalam upaya pengendalian bencana karhutla di Indonesia. Bahkan tidak sedikit pula masyarakat yang berasumsi bahwa pelaksanaan TMC merupakan suatu pemborosan, mengingat biaya operasionalnya yang relatif cukup mahal. Untuk menjawab permasalahan tersebut, penelitian ini dimaksudkan untuk menghitung nilai penambahan curah hujan dari hasil pelaksanaan TMC dalam skema pengendalian bencana karhutla di Indonesia. Keluaran yang dihasilkan dari kajian ini cukup penting untuk membuktikan bahwa TMC dapat memberikan dampak signifikan terhadap bertambahnya intensitas curah hujan di suatu wilayah target.



Gambar 1. Ilustrasi perbandingan efektivitas upaya pemadaman karhutla melalui siraman air hujan hasil TMC (kiri) dengan teknologi *water bombing* (tengah) dan upaya pemadaman terrestrial (kanan).

Evaluasi hasil TMC umumnya dilakukan untuk menghitung peningkatan curah hujan yang diharapkan berada di atas curah hujan alaminya. Menurut (Flossmann *et al.*, 2019), bukan perkara mudah untuk mendapatkan perhitungan evaluasi hasil pelaksanaan aktivitas modifikasi cuaca karena besarnya nilai variabilitas curah hujan alami, baik secara spasial maupun temporal.

Evaluasi pelaksanaan modifikasi cuaca secara saintifik dapat dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu secara fisik dan secara statistik (Bruintjes, 1999). Pendekatan secara fisik bertujuan untuk menguji efek penyemaian awan melalui pengamatan hubungan sebab-akibat dalam proses fisika awan setelah dilakukannya intervensi penyemaian awan, misalnya menggunakan data radar (Kucera *et al.*, 2010). Sementara pendekatan secara statistik bertujuan untuk mengetahui ada/tidaknya pengaruh penyemaian awan terhadap penambahan curah hujan yang terjadi, umumnya dilakukan menggunakan pendekatan analisis data curah hujan (Griffith *et al.*, 2015).

Beberapa penelitian telah mengulas efektivitas hasil pelaksanaan TMC untuk penanggulangan bencana karhutla di Indonesia dengan mengambil pendekatan dari perhitungan penambahan curah hujan yang dihasilkan dan jumlah titik api serta luas kebakaran yang berhasil dikurangi. Hasil penelitian (Sutikno *et al.*, 2020) menyebutkan bahwa upaya TMC terbukti efektif meningkatkan curah hujan pada kisaran 0,66-1,88 dan secara signifikan mengurangi kebakaran lahan gambut di Provinsi Riau selama periode tahun 2014-2016. Nilai tersebut tidak bersatuan karena merupakan perbandingan antara jumlah curah hujan aktual yang dibandingkan dengan nilai curah hujan historis. Lebih lanjut, penelitian dari (Sandhyavitri *et al.*, 2020) menyebutkan bahwa rerata peningkatan intensitas curah hujan yang terjadi di Provinsi Riau dari hasil pelaksanaan TMC selama periode tersebut di atas adalah sebesar 2,09. Penelitian lain oleh (Athoillah *et al.*, 2019) yang juga mengkaji efektivitas pelaksanaan TMC untuk mitigasi bencana karhutla di Provinsi Sumatera Selatan menyebutkan bahwa hasil pelaksanaan TMC terbukti mampu meningkatkan intensitas curah hujan dan mengurangi jumlah titik api di Kabupaten Ogan Komering Ilir pada tahun 2014 dan 2015, yang merupakan tahun El Nino lemah (2014) dan El Nino kuat (2015), dimana gradien curah hujan positif (0,0348) dan gradien titik api negatif (-0,3846).

Nilai penambahan curah hujan yang dihasilkan dari ketiga penelitian di atas dihitung dengan metode *Target Only*, yaitu dengan cara membandingkan curah hujan aktual di daerah target selama periode pelaksanaan TMC dengan nilai curah hujan historisnya pada periode yang sama. Mengingat Provinsi Riau dan Sumatera Selatan relatif rutin mendapatkan bantuan upaya TMC setiap tahunnya, maka perhitungan dengan

metode tersebut dapat dianggap memiliki bias karena sebenarnya nilai curah hujan historis yang dipakai sebagai pembandingan pun sangat mungkin merupakan nilai curah hujan yang telah terpengaruh oleh hasil TMC pada tahun-tahun sebelumnya.

Ada cukup banyak desain evaluasi untuk menghitung penambahan curah hujan hasil pelaksanaan TMC. Dalam beberapa dekade terakhir, desain evaluasi penambahan curah hujan hasil pelaksanaan TMC telah banyak berkembang. Mulai dari metode konvensional yang hanya mempertimbangkan kondisi curah hujan pada satu daerah tunggal yang menjadi daerah target penyemaian (*Target Only Method*) hingga metode lebih kompleks yang mengombinasikan beberapa indikator pada dua daerah terpilih yang ditetapkan sebagai daerah target dan daerah kontrol (*Target Control Method*). Terlepas dari sejumlah kontroversi dan perdebatan yang masih akan terus ada, bagaimanapun desain evaluasi yang menggunakan daerah target dan daerah kontrol dianggap lebih ilmiah dan lebih dapat diandalkan dibandingkan desain evaluasi yang hanya menggunakan area tunggal (Wu *et al.*, 2018).

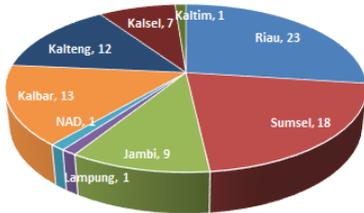
Penelitian ini bertujuan untuk mengulas efektivitas nilai manfaat TMC dalam upaya pengendalian bencana karhutla di Indonesia dengan pendekatan evaluasi secara statistik terhadap nilai penambahan curah hujan yang diperoleh dari hasil pelaksanaan TMC. Selain menggunakan metode *Target Only* yang sudah umum digunakan dalam beberapa penelitian sebelumnya, evaluasi penambahan curah hujan dalam penelitian ini juga dilakukan dengan metode *Target Control* yang dalam perhitungannya ikut mempertimbangkan curah hujan di daerah lain yang dijadikan sebagai daerah kontrol untuk pembandingnya. Metode *Target Only* yang digunakan dalam penelitian ini pun dalam perhitungannya dimodifikasi dengan proses filter data historisnya. Guna menghindari bias, sejumlah data curah hujan pada periode pelaksanaan TMC di tahun-tahun sebelumnya tidak disertakan dalam perhitungan. Selain itu data historis yang digunakan sebagai pembandingan pun dipilih berdasarkan kondisi iklim yang sama, sehingga komparasinya diharapkan menjadi lebih baik.

2. METODE

2.1. Sampel Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini mengambil sampel dari 4 (empat) historis pelaksanaan TMC yang pernah dilakukan di Provinsi Riau pada tahun 2013, 2015, 2022 dan 2023. Provinsi Riau (Gambar 3) dipilih sebagai sampel penelitian karena merupakan salah satu provinsi yang paling rawan bencana karhutla (Yananto *et al.*, 2017) dan

hampir rutin mendapatkan bantuan pelaksanaan operasi TMC setiap tahun dari Pemerintah Pusat. Sejak pertama kali diimplementasikan pada tahun 1997 hingga data terakhir bulan Juni 2023, Provinsi Riau telah 23 kali mendapat bantuan TMC. Paling banyak dibandingkan dengan provinsi rawan bencana karhutla lainnya, sebagaimana histogram pada Gambar 2.



Gambar 2. Historis dan Rekapitulasi pelaksanaan bantuan TMC di sejumlah provinsi rawan bencana karhutla selama periode tahun 1997 – Juni 2023

Tahun 2013, 2015, 2022 dan 2023 dipilih sebagai sampel waktu penelitian karena masing-masing tahun tersebut merepresentasikan tahun dengan kondisi iklim yang berbeda. Kondisi iklim didekati dengan melihat nilai Indeks ENSO yang direpresentasikan dari Suhu Muka Air Laut (*Sea Surface Temperature/ SST*) di titik Nino 3.4, sebagaimana tersaji dalam Tabel 1.

Tabel 1. Data Anomali SST Nino 3.4 (Indeks ENSO) selama periode tahun 2006 – Juni 2023

| Tahun | DJF | JFM | FMA | MAM | AMJ | MJJ | JJA | JAS | ASO | SON | OND | NDJ |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2006 | -0.9 | -0.8 | -0.6 | -0.4 | -0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 0.9 |
| 2007 | 0.7 | 0.2 | -0.1 | -0.3 | -0.4 | -0.5 | -0.6 | -0.8 | -1.1 | -1.3 | -1.5 | -1.6 |
| 2008 | -1.6 | -1.5 | -1.3 | -1.0 | -0.8 | -0.6 | -0.4 | -0.2 | -0.2 | -0.4 | -0.6 | -0.7 |
| 2009 | -0.8 | -0.8 | -0.6 | -0.3 | 0.0 | 0.3 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 1.0 | 1.4 | 1.6 |
| 2010 | 1.5 | 1.2 | 0.8 | 0.4 | -0.2 | -0.7 | -1.0 | -1.3 | -1.6 | -1.6 | -1.6 | -1.6 |
| 2011 | -1.4 | -1.2 | -0.9 | -0.7 | -0.6 | -0.4 | -0.5 | -0.6 | -0.8 | -1.0 | -1.1 | -1.0 |
| 2012 | -0.9 | -0.7 | -0.6 | -0.5 | -0.3 | 0.0 | 0.2 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.1 | -0.2 |
| 2013 | -0.4 | -0.4 | -0.3 | -0.3 | -0.4 | -0.4 | -0.4 | -0.3 | -0.3 | -0.2 | -0.2 | -0.3 |
| 2014 | -0.4 | -0.5 | -0.3 | 0.0 | 0.2 | 0.2 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 0.6 | 0.7 |
| 2015 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.7 | 0.9 | 1.2 | 1.5 | 1.9 | 2.2 | 2.4 | 2.6 | 2.6 |
| 2016 | 2.5 | 2.1 | 1.6 | 0.9 | 0.4 | -0.1 | -0.4 | -0.5 | -0.6 | -0.7 | -0.7 | -0.6 |
| 2017 | -0.3 | -0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.1 | -0.1 | -0.4 | -0.7 | -0.8 | -1.0 |
| 2018 | -0.9 | -0.9 | -0.7 | -0.5 | -0.2 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 0.8 |
| 2019 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.5 |
| 2020 | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 0.2 | -0.1 | -0.3 | -0.4 | -0.6 | -0.9 | -1.2 | -1.3 | -1.2 |
| 2021 | -1.0 | -0.9 | -0.8 | -0.7 | -0.5 | -0.4 | -0.4 | -0.5 | -0.7 | -0.8 | -1.0 | -1.0 |
| 2022 | -1.0 | -0.9 | -1.0 | -1.1 | -1.0 | -0.9 | -0.8 | -0.9 | -1.0 | -1.0 | -0.9 | -0.8 |
| 2023 | -0.7 | -0.4 | -0.1 | 0.2 | 0.5 | 0.9 | | | | | | |

Tahun 2013 dijadikan sebagai sampel untuk merepresentasikan kondisi iklim normal (Netral), 2015 untuk iklim kering (El Nino) dan 2022 untuk iklim basah (La Nina). Khusus tahun 2023 yang meskipun di awal tahun masih dalam kondisi iklim basah, namun sejak bulan Mei hingga Desember diprediksi akan mengalami El Nino, sehingga dapat menjadi pembandingan untuk hasil yang diperoleh dari pelaksanaan TMC di tahun 2015 yang mempunyai kondisi iklim serupa.

Dengan kriteria tersebut, terpilih 4 sampel penelitian yang akan dihitung nilai penambahan curah hujannya sebagaimana tersaji dalam daftar pada Tabel 2.



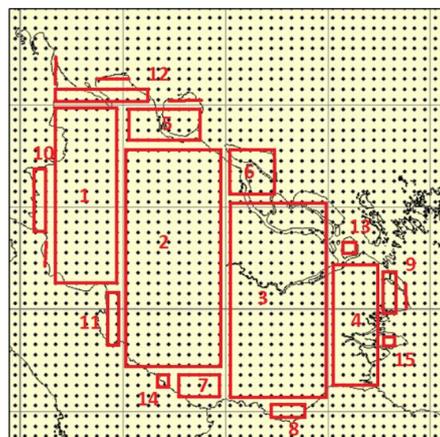
Gambar 3. Daerah Penelitian

Tabel 2. Histori pelaksanaan TMC yang menjadi sampel penelitian

| No | Tahun | Periode TMC | Durasi (Hari) | Indeks ENSO | Kondisi Iklim |
|----|-------|------------------------|---------------|-------------|--------------------|
| 1 | 2013 | 22 Juni - 18 Juli 2013 | 27 | -0,4 | Netral |
| 2 | 2015 | 9 - 31 Agustus 2015 | 23 | 1,9 | El Nino (Moderat) |
| 3 | 2022 | 6 - 17 Agustus 2022 | 12 | -0,9 | La Nina (Moderat)_ |
| 4 | 2023 | 17 Mei - 9 Juni 2023 | 24 | 0,5 - 0,9 | El Nino (Lemah) |

2.2. Perhitungan Penambahan Curah Hujan Hasil TMC

Nilai penambahan curah hujan hasil TMC diperhitungkan dengan menggunakan data curah hujan dari Satelit *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) yang diambil dari situs *JAXA Realtime Rainfall Watch* (dapat diunduh melalui portal <https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/>). Data yang digunakan adalah curah hujan dalam orde harian, historis sejak 1 Januari 2009. Data curah hujan dari satelit TRMM ini memiliki resolusi spasial 0,25° x 0,25° atau sekitar 27,5 km x 27,5 km.



Gambar 4. Grid satelit TRMM untuk wilayah Provinsi Riau

Sebelum digunakan untuk analisis, data curah hujan satelit TRMM yang dipakai telah dikalibrasi dan dikoreksi secara geometrik sehingga masing-masing grid telah memiliki nilai intensitas curah hujan yang mewakili area tertentu. Terkalibrasinya data yang dimaksud adalah data tersebut telah diuji kesesuaiannya dengan curah hujan yang diukur dari penakar manual maupun AWS. Dalam perhitungan penambahan curah hujan, intensitas curah hujan yang dihitung adalah nilai rerata curah hujan untuk satu wilayah provinsi yang dijadikan sebagai sampel daerah penelitian. Nilai curah hujan wilayah ini dihitung dengan menggunakan rerata nilai curah hujan dari seluruh grid yang masuk dalam batas administrasi provinsi tertentu. Gambar 4 menyajikan gambaran grid untuk menghitung rerata intensitas curah hujan wilayah di Provinsi Riau.

Perhitungan penambahan curah hujan dilakukan dengan menggunakan dua pendekatan. Pertama menggunakan Metode *Target Only* yang telah dimodifikasi dengan data historis terseleksi dan kedua menggunakan Metode *Target Control*. Dalam Metode *Target Only* nilai penambahan curah hujan dihitung dengan menggunakan data rerata historis curah hujan (CH_s) sebagai dasar informasi perbandingan. Pengaruh penyemaian dan besarnya penambahan curah hujan dihitung dengan cara membandingkan curah hujan selang waktu tertentu di daerah target pada periode penyemaian (CH_a) dengan curah hujan historis pada selang waktu yang sama di daerah target tersebut (CH_s).

Berbeda dengan Metode *Target Only* pada umumnya yang menggunakan data rerata curah hujan historis secara lengkap, Metode *Target Only* yang digunakan dalam penelitian ini sedikit dimodifikasi dengan adanya proses seleksi pada data historisnya. Data rerata curah hujan historis yang digunakan sebagai pembanding telah melalui proses *filtering* sebelum dianalisis. Data curah hujan historis yang digunakan sebagai pembanding hanya untuk data curah hujan pada kondisi iklim yang sama, mengacu pada Tabel 1. Selain itu, bila pada periode yang sama pada tahun lainnya di lokasi sampel tersebut ternyata juga ada pelaksanaan TMC, maka data curah hujan harian selama periode pelaksanaan TMC pada tahun tersebut tidak disertakan dalam perhitungan sebagai data historis. Dengan demikian, maka data curah hujan historis yang dipakai sebagai pembanding tidak memiliki bias karena benar-benar merupakan data curah hujan yang tidak terpengaruh oleh aktivitas penyemaian awan.

Nilai penambahan curah hujan menurut metode *Target Only* dihitung berdasarkan persamaan (1) dengan R = Tingkat pertambahan hujan (%), CH_a = Jumlah curah hujan aktual di daerah target (mm) dan CH_s = Rerata curah hujan historis di daerah target (mm).

$$R = \frac{CH_a - CH_s}{CH_s} \times 100\% \quad (1)$$

Sementara untuk nilai penambahan curah hujan dengan metode *Target Control* dihitung dengan curah hujan pendugaan di daerah target saat ada penyemaian awan yang diperkirakan dari hasil analisis regresi (CH_t) dengan menggunakan data curah hujan historis di daerah kontrol sebagai variabel bebas dan data curah hujan historis di daerah target untuk selang waktu yang sama. Curah hujan aktual selama selang waktu yang telah ditentukan diperoleh melalui pengukuran langsung. Curah hujan aktual di daerah target (CH_a) merupakan curah hujan yang dipengaruhi oleh penyemaian awan. Perhitungan penambahan curah hujan menurut metode ini dihitung berdasarkan persamaan (2). Nilai R adalah Tingkat pertambahan hujan (%), CH_t adalah Jumlah curah hujan dugaan di daerah target yang diperoleh dari persamaan regresi dengan menggunakan data curah hujan di daerah kontrol (mm)

$$R = \frac{CH_a - CH_t}{CH_t} \times 100\% \quad (2)$$

Dalam perhitungan dengan menggunakan metode ini, efek penambahan curah hujan di Provinsi Riau, Sumatera Selatan, Kalimantan Barat dan Kalimantan Tengah yang menjadi daerah target akan diperhitungkan dengan asumsi yang dibangun dengan memperhatikan kondisi curah hujan di provinsi tetangganya masing-masing yang memenuhi syarat untuk dijadikan sebagai daerah kontrol.

Penentuan daerah kontrol dilakukan dengan memperhatikan beberapa kriteria kondisi, seperti: (1) secara lokasi berdekatan dengan daerah target, (2) berada di daerah *up wind*, atau di daerah yang tidak terkontaminasi oleh efek penyemaian awan di daerah target, (3) mempunyai tipe iklim yang sama dengan daerah target, dan (4) mempunyai tingkat korelasi (r) curah hujan yang tinggi dengan daerah target dan konsisten baik selama periode penyemaian maupun periode tanpa penyemaian.

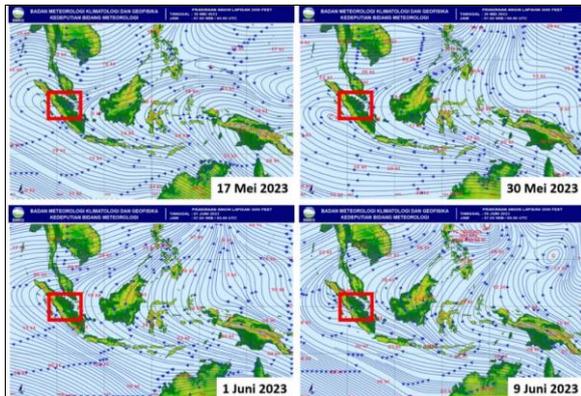
2.3. Penentuan Daerah Target dan Daerah Kontrol

Tahap pertama dalam proses penentuan daerah kontrol adalah melakukan analisis angin (*prevailing wind*) untuk mengetahui arah angin selama berlangsungnya kegiatan TMC yang telah dijadikan sampel penelitian. Analisis ini perlu untuk melihat provinsi mana yang secara lokasi berada di daerah *upwind* atau di daerah yang tidak terkontaminasi oleh efek penyemaian

di daerah target sehingga dapat memenuhi kriteria untuk dijadikan sebagai daerah kontrol.

Sebagai contoh, Provinsi Sumatera Utara, Sumatera Barat atau Jambi dapat menjadi kandidat daerah kontrol untuk dijadikan sebagai pembanding bagi daerah target di Provinsi Riau. Penentuan mana dari ketiga provinsi tersebut yang lebih tepat dijadikan sebagai daerah kontrol ditentukan dengan memperhatikan beberapa kriteria penentuan sebagaimana telah disebutkan diatas. Gambar 5 memberikan ilustrasi untuk contoh sampel pelaksanaan TMC di Provinsi Riau periode 17 Mei – 9 Juni 2023 (sampel 4).

Dari Gambar 5 dapat diketahui bahwa secara global selama periode bulan Mei - Juni 2023 angin di wilayah Indonesia masih dominan berasal dari timuran (Monsun Australia). Pada gambar atas (periode 17-31 Mei 2023) terlihat adanya gangguan Siklon Tropis "Mawar" yang tumbuh di wilayah perairan sebelah timur Filipina dan pola tekanan rendah di perairan sebelah barat Sumatera yang menyebabkan terjadinya belokan angin sehingga suplai massa udara yang masuk ke wilayah Provinsi Riau (daerah target, kotak warna merah) dominan berasal dari arah barat – barat laut. Oleh karenanya, pada periode ini Provinsi Sumatera Utara dan Sumatera Barat yang secara lokasi berada di daerah *upwind* dari Provinsi Riau dan tidak terkontaminasi oleh efek penyemaian awan di Provinsi Riau memenuhi kriteria untuk dijadikan sebagai kandidat daerah kontrol jika dari hasil analisis kemiripan pola curah hujan di kedua provinsi tersebut kemudian terbukti mempunyai korelasi yang cukup tinggi dengan Provinsi Riau.

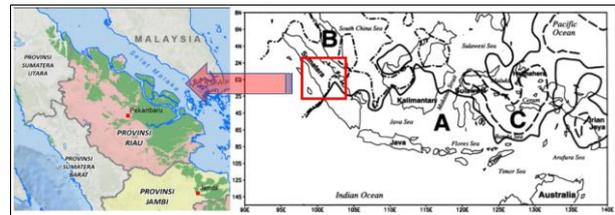


Gambar 5. Analisis angin gradien selama pelaksanaan TMC di Provinsi Riau periode 17 Mei – 9 Juni 2023
(Sumber: BMKG)

Selanjutnya pada gambar bawah (periode 1-9 Juni 2023) terlihat keberadaan Siklon Tropis "Mawar" mulai melemah dan semakin menjauh ke utara sehingga sejak awal Juni hingga akhir periode TMC tanggal 9 Juni 2023, suplai masa udara dominan berasal dari arah tenggara mengikuti pola Monsun Australia. Dengan

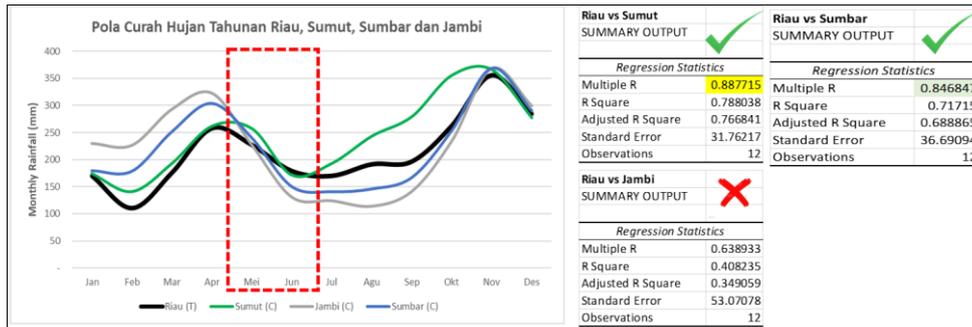
demikian, pada periode ini Provinsi Sumatera Barat yang posisinya berada di sebelah barat dari Provinsi Riau dan relatif tidak terkontaminasi oleh efek penyemaian awan dapat dijadikan sebagai kandidat daerah kontrol.

Dalam hal ini, Provinsi Sumatera Utara tidak lagi dapat ditetapkan sebagai kandidat daerah kontrol pada periode bulan Juni karena lokasinya menjadi daerah *upwind* dari Provinsi Riau dan besar kemungkinan curah hujannya terkontaminasi oleh efek penyemaian awan di Provinsi Riau. Sementara Provinsi Jambi meskipun secara lokasi bersebelahan dengan Provinsi Riau dan berada di daerah *downwind* dari Provinsi Riau, namun tidak dapat ditetapkan sebagai kandidat daerah kontrol karena mengacu pada pembagian zona iklim menurut (Aldrian & Dwi Susanto, 2003) seperti tersaji pada Gambar 6, Provinsi Jambi berada pada zona iklim A dengan tipe pola curah hujan monsunial. Berbeda dengan Provinsi Riau, Sumatera Utara dan Sumatera Barat yang sama-sama berada pada zona iklim B dengan tipe pola curah hujan ekuatorial.



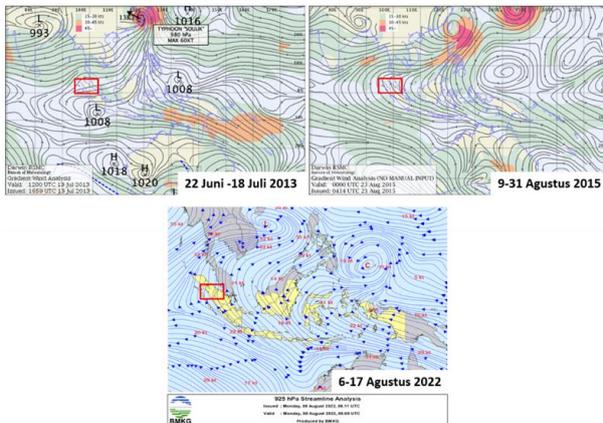
Gambar 6. Lokasi daerah target Provinsi Riau dan beberapa provinsi di sekitarnya sebagai kandidat daerah kontrol berdasarkan pembagian zona iklimnya
(Sumber: Aldrian & Dwi Susanto, 2003)

Lebih lanjut dari hasil analisis kemiripan pola curah hujan, Provinsi Riau terbukti memiliki kemiripan pola curah hujan tahunan yang lebih kuat dengan Provinsi Sumatera Utara dan Sumatera Barat dibandingkan dengan Jambi. Mengacu pada kriteria dalam statistika yang membagi kuat atau tidaknya korelasi berdasarkan rentang nilai (0,5-0,75/korelasi kuat, 0,75-0,99/korelasi sangat kuat, dan 1/korelasi sempurna), maka pada Gambar 7 yang menyandingkan pola curah hujan tahunan dari keempat provinsi tersebut dapat mengindikasikan korelasi yang terbentuk masuk dalam kategori sangat kuat. Nilai koefisien korelasi (R) curah hujan di bulan Mei dan Juni antara Provinsi Riau (garis tebal warna hitam) dengan Sumatera Utara (0,88) dan dengan Sumatera Barat (0,84), yang jauh lebih kuat korelasinya dibandingkan dengan Jambi (0,63).



Gambar 7. Analisis pola kemiripan curah hujan daerah target (Provinsi Sumatera Riau) dan beberapa provinsi di sekitarnya sebagai kandidat daerah kontrol (Sumber: Olahan Penulis, 2023)

Berdasarkan serangkaian analisis di atas, maka dapat ditentukan daerah kontrol untuk pelaksanaan TMC di Provinsi Riau yang terlaksana selama periode tanggal 17 Mei – 9 Juni 2023 (sampel 4) adalah Provinsi Sumatera Barat. Prosedur yang sama selanjutnya juga dipakai sebagai dasar untuk menentukan daerah kontrol untuk sampel penelitian lain. Hasil analisis *prevailing wind* untuk ketiga sampel lainnya (Gambar 8) juga memperlihatkan selama pelaksanaan TMC di tahun 2013 (kiri), 2015 (tengah) dan 2022 (kanan) arah angin masing-masing dominan dari arah barat dan tenggara. Oleh karenanya Provinsi Sumatera Barat dijadikan sebagai daerah kontrol untuk seluruh sampel dalam penelitian.



Gambar 8. Analisis angin gradien selama pelaksanaan TMC di Provinsi Riau tahun 2013, 2015 dan 2022 (Sumber: BOM Australia dan BMKG)

perhitungan dengan metode *Target Only*. Tahun dimana pada periode rentang waktu yang sama memiliki historis pelaksanaan TMC tidak disertakan dalam perhitungan. Selain itu, data historis yang digunakan sebagai pembandingan juga memperhatikan kemiripan kondisi iklimnya. Misalnya, data tahun El Nino (2015) tidak dipakai sebagai data historis pembandingan untuk sampel tahun La Nina (2022). Demikian pula sebaliknya.

Sebagai contoh untuk sampel 1 (periode 22 Juni – 18 Juli 2013) yang mewakili kondisi iklim netral, maka data pembandingan yang memenuhi kriteria tidak ada historis pelaksanaan TMC di periode waktu yang sama (periode bulan Juni – Juli) serta memiliki kondisi iklim yang mirip atau tidak terlalu kontras adalah data historis pada tahun 2009, 2011, 2012, 2014, 2016, 2017, 2018, 2020 dan 2021. Contoh lain, untuk sampel 2 (periode 9-31 Agustus 2015) yang mewakili kondisi iklim El Nino, dengan prosedur yang sama diperoleh dataset historis yang sesuai hanya pada tahun 2009, 2018 dan 2019.

Tabel 3. Dataset Curah Hujan Historis Yang Dipakai Dalam Perhitungan Dengan Pendekatan Metode *Target Only*

| No. | Periode Pelaksanaan TMC | Dataset Historis Terpakai |
|-----|-------------------------|--|
| 1 | 22 Juni - 18 Juli 2013 | 2009, 2011, 2012, 2014, 2016, 2017, 2018, 2020, 2021 |
| 2 | 9 - 31 Agustus 2015 | 2009, 2018, 2019 |
| 3 | 6 - 17 Agustus 2022 | 2010, 2011, 2014, 2018, 2021 |
| 4 | 17 Mei – 9 Juni 2023 | 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016, 2017, 2018, 2021, 2022 |

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

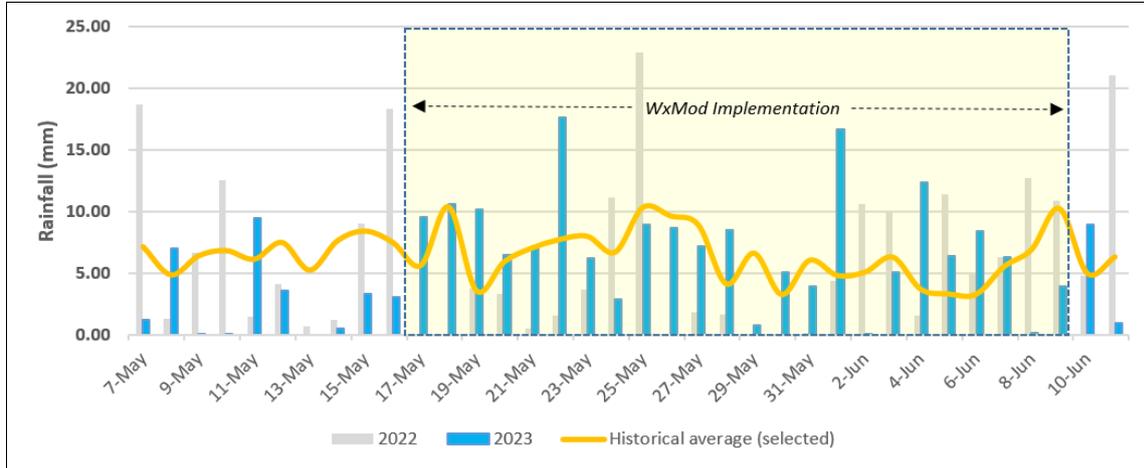
3.1. Penambahan Curah Hujan dengan Metode *Target Only*

Mengingat pelaksanaan TMC hampir tiap tahun rutin dilakukan di Provinsi Riau, maka untuk menghilangkan bias hasil pelaksanaan TMC pada tahun-tahun sebelumnya, tidak seluruh data historis (yang tersedia sejak tahun 2009) dipakai sebagai pembandingan dalam

Rekapitulasi dataset historis yang dipakai untuk tiap sampel penelitian selengkapnya tersaji dalam Tabel 3, sementara hasil perhitungan nilai penambahan curah hujan menggunakan metode *Target Only* tersaji pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai Penambahan Curah Hujan Hasil Pelaksanaan TMC Dengan Pendekatan Metode *Target Only*

| No. | Periode Pelaksanaan TMC | Durasi (Hari) | PCH Target Only | | | R Harian (%) |
|-----|-------------------------|---------------|-----------------|----------|-------|--------------|
| | | | CHa (mm) | CHs (mm) | R (%) | |
| 1 | 22 Juni - 18 Juli 2013 | 27 | 202 | 180 | 12,22 | 0,45 |
| 2 | 9 - 31 Agustus 2015 | 23 | 115 | 109 | 5,17 | 0,2 |
| 3 | 6 - 17 Agustus 2022 | 12 | 120 | 76 | 56,90 | 4,74 |
| 4 | 17 Mei - 9 Juni 2023 | 24 | 173 | 154 | 12,79 | 0,53 |

**Gambar 9.** Curah hujan Provinsi Riau selama pelaksanaan TMC periode 17 Mei – 9 Juni 2023 (Sumber: Olahan Penulis, 2023)

Hasil perhitungan pada Tabel 4 memperlihatkan terjadinya penambahan curah hujan dengan besaran nilai yang bervariasi dari keempat sampel pelaksanaan TMC pada tahun dengan kondisi iklim yang berbeda. Pelaksanaan TMC di tahun basah (La Nina) yang berlangsung selama 12 hari pada periode tanggal 6-17 Agustus 2022 (sampel 3) memberikan hasil peningkatan curah hujan tertinggi, yaitu sebesar 56,90% atau rata-rata sekitar 4,74% per hari. Sedangkan pelaksanaan TMC di tahun kering (El Nino) yang berlangsung selama 23 hari pada tanggal 9-31 Agustus 2015 (sampel 2) menghasilkan peningkatan curah hujan terendah, hanya sebesar 5,17% atau rata-rata sekitar 0,22% per hari.

Perhitungan penambahan curah hujan dengan Metode *Target Only* mempunyai kelebihan dalam memberikan gambaran hasil pelaksanaan TMC di suatu daerah target secara temporal. Dalam artian nilai penambahan curah hujan yang terjadi bisa lebih terlihat dengan jelas saat dibandingkan dengan nilai curah hujan pada tahun yang berbeda atau rerata historisnya. Hal ini bisa dilihat pada Gambar 9 yang memperlihatkan curah hujan harian di Provinsi Riau selama periode pelaksanaan TMC tanggal 17 Mei – 9 Juni 2023 (sampel 4).

Curah hujan aktual tahun 2023 digambarkan dengan balok warna biru, aktual tahun sebelumnya (2022) dengan balok warna abu-abu dan nilai rerata historis dengan garis warna oranye. Dari gambar tersebut terlihat

bahwa selama sepekan sebelum pelaksanaan TMC, curah hujan yang terjadi relatif minim. Intensitasnya jauh lebih rendah dibandingkan nilai rerata historis dan juga aktual tahun sebelumnya. Kondisi ini kemudian membaik selama periode pelaksanaan TMC tanggal 17 Mei – 9 Juni 2023, dimana intensitas curah hujan harian yang terjadi umumnya lebih tinggi dibandingkan nilai rerata historis maupun aktual tahun sebelumnya.

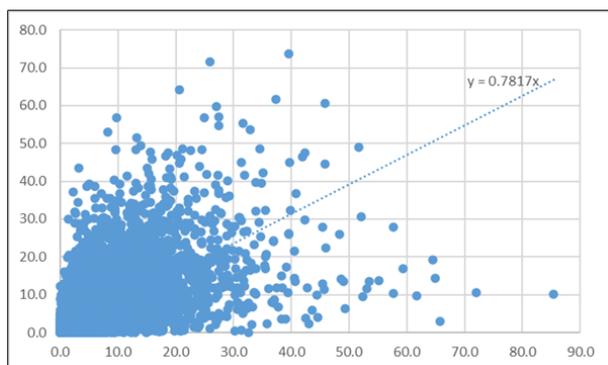
3.2. Penambahan Curah Hujan Dengan Metode Target Control

Berbeda dengan perhitungan nilai penambahan curah hujan dengan Metode *Target Only* yang hanya menggunakan data curah hujan dari area tunggal (daerah target), perhitungan dengan Metode *Target Control* memerlukan pasangan data curah hujan dari daerah target dan daerah kontrol sebagai pembandingan. Selain dari hasil analisis angin (*prevailing wind*), penentuan daerah target dan daerah kontrol juga dilakukan dengan melakukan analisis kemiripan pola curah hujannya. Analisis kemiripan pola curah hujan ditentukan dengan melakukan uji F dalam statistik (*F-test*) dan uji korelasi terhadap pasangan data curah hujan di daerah kontrol dan daerah target.

Uji normalitas dilakukan untuk mengetahui normal tidaknya suatu distribusi data. Hal ini penting diketahui berkaitan dengan ketepatan pemilihan uji statistik yang digunakan. Dalam uji

parametrik untuk analisis korelasi mensyaratkan bahwa data harus berdistribusi secara normal. Kenormalan data diketahui melalui sebaran data yang merata disetiap nilai. Metode yang digunakan untuk menguji kenormalan data adalah Metode Kolgomorov-Smirnov, dengan menggunakan taraf $\alpha = 5\%$. Hasil uji normalitas data curah hujan di daerah target dan daerah kontrol terhadap seluruh sampel memberikan nilai $p > 0,05$, sehingga dapat disimpulkan bahwa data berasal dari populasi yang berdistribusi secara normal.

Pengujian homogenitas adalah pengujian mengenai sama tidaknya variansi dua buah distribusi atau lebih. Uji homogenitas dimaksudkan untuk memperlihatkan bahwa dua atau lebih kelompok data sampel berasal dari populasi yang memiliki variansi yang sama. Dari hasil pengujian terhadap seluruh sampel diperoleh nilai signifikansi sebesar $> 0,05$, sehingga dapat disimpulkan seluruh data curah hujan yang digunakan dalam penelitian adalah homogen.



Gambar 10. Scatter plot diagram data curah hujan harian Provinsi Riau (target) dan Sumatera Barat (kontrol)
(Sumber: Olahan Penulis, 2023)

Uji korelasi dimaksudkan untuk mengetahui adanya keeratan hubungan antara data sampel yang terkumpul pada kelompok daerah target dan daerah kontrol. Apabila dari masing-masing kelompok data mempunyai korelasi yang kuat, maka data yang terkumpul dapat dipercaya validitas dan reliabilitasnya (data konsisten). Hasil uji korelasi data memberikan nilai koefisien korelasi antara pasangan data curah hujan di daerah target dengan daerah kontrol sebesar 0,85 ($> 0,5$). Ini berarti terdapat korelasi positif yang sangat kuat diantara hubungan data yang terkumpul pada daerah kontrol dan daerah target sehingga dapat disimpulkan bahwa kedua kelompok data pada masing-masing sampel penelitian tersebut berkorelasi sangat signifikan. Selanjutnya berdasarkan hasil analisis *scatter plot* pasangan data curah hujan daerah target dan kontrol diperoleh persamaan regresi $y = 0,7817x$, sebagaimana tergambar pada Gambar 10. Hasil

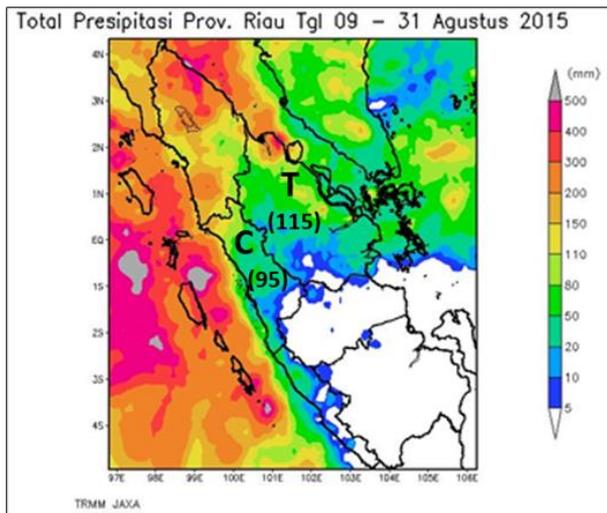
perhitungan penambahan curah hujan dengan Metode *Target Control* tersaji pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai Penambahan Curah Hujan Hasil Pelaksanaan TMC Dengan Pendekatan Metode *Target Control*

| No. | Periode Pelaksanaan TMC | Durasi (Hari) | PCH Target Only | | | | R Harian (%) |
|-----|-------------------------|---------------|-----------------|-------------|----------|-------|--------------|
| | | | CHa (mm) | CH Ctr (mm) | CHs (mm) | R (%) | |
| 1 | 22 Juni - 18 Juli 2013 | 27 | 202 | 197 | 154 | 31,35 | 1.16 |
| 2 | 9 - 31 Agustus 2015 | 23 | 115 | 95 | 74 | 54,68 | 2.38 |
| 3 | 6 - 17 Agustus 2022 | 12 | 120 | 85 | 66 | 81,12 | 6.76 |
| 4 | 17 Mei - 9 Juni 2023 | 24 | 173 | 196 | 153 | 12,86 | 0.54 |

Sama halnya dengan hasil perhitungan pada Tabel 4 sebelumnya, perhitungan dengan Metode *Target Control* sebagaimana tersaji dalam Tabel 5 di atas juga memperlihatkan terjadinya penambahan curah hujan dengan besaran nilai yang bervariasi dari seluruh sampel pelaksanaan TMC pada tahun dengan kondisi iklim yang berbeda. Pelaksanaan TMC di tahun basah (La Nina) yang berlangsung selama 12 hari pada periode tanggal 6-17 Agustus 2022 (sampel 3) memberikan hasil peningkatan curah hujan tertinggi, yaitu sebesar 383,46% atau rata-rata sekitar 31,96% per hari. Sedangkan pelaksanaan TMC di tahun kering (El Nino) yang berlangsung selama 24 hari pada tanggal 17-9 Juni 2023 (sampel 4) adalah yang menghasilkan peningkatan curah hujan terendah, yaitu sebesar 12,86% atau rata-rata sekitar 0,54% per hari.

Jika membandingkan hasil perhitungan kedua metode yang digunakan dengan melihat Tabel 4 dan Tabel 5, yang menarik adalah perbedaan kontras untuk pelaksanaan TMC pada periode 9-31 Agustus 2015 (sampel 2). Sebelumnya dari hasil perhitungan dengan metode *Target Only* sampel ini terhitung memiliki nilai penambahan curah hujan paling rendah. Namun hasil perhitungan dengan metode *Target Control* memperoleh nilai penambahan curah hujan yang terbilang cukup tinggi, yaitu sebesar 54,68% atau sekitar 2,38% per hari. Hal ini sebetulnya cukup wajar jika memperhatikan nilai curah hujan aktual di Provinsi Riau (daerah target) sebanyak 115 mm selama 23 hari pada periode 9-31 Agustus 2023 yang lebih tinggi dibandingkan dengan nilai curah hujan aktual di Provinsi Sumatera Barat (daerah kontrol) pada periode yang sama yang hanya sebesar 95 mm.



Gambar 11. Distribusi spasial curah hujan di Provinsi Riau (target) dan Sumatera Barat (kontrol) serta beberapa provinsi lain di sekitarnya saat pelaksanaan TMC periode 9-31 Agustus 2015

Jika pada Metode *Target Only* hasil penambahan curah hujan yang diperoleh lebih bisa menggambarkan perbandingan kondisi curah hujan secara temporal, maka dengan Metode *Target Control* ini justru memberikan gambaran secara aktual dengan perbandingannya secara spasial. Hal ini sekilas bisa dilihat dengan membandingkan nilai curah hujan terukur di daerah target (CHa) yang relatif lebih tinggi dibandingkan curah hujan terukur di daerah kontrol (CH Ctr) dan daerah lain di sekitarnya seperti terlihat pada Gambar 11.

4. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan menggunakan Metode *Target Only* maupun *Target Control*, hasil pelaksanaan TMC untuk penanganan bencana karhutla yang dilaksanakan pada tahun 2013 (kondisi iklim normal/Netral), 2015 (kering/El Nino) maupun 2022 (basah/La Nina) diketahui mampu memberikan tambahan curah hujan dengan besaran persentase yang bervariasi. Jika dilihat dari nilai rerata hasil penambahan curah hujan hariannya, dapat disimpulkan bahwa pelaksanaan TMC pada kondisi iklim basah (La Nina) mampu memberikan hasil peningkatan curah hujan yang lebih tinggi dibandingkan pelaksanaan TMC pada kondisi iklim normal (Netral), terlebih lagi pada kondisi iklim kering (El Nino). Atau dengan kata lain bisa dikatakan bahwa semakin basah kondisi atmosfernya, maka pelaksanaan TMC akan dapat memberikan hasil penambahan curah hujan yang lebih baik.

Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan dua pendekatan metode tersebut, pelaksanaan TMC di Provinsi Riau yang terlaksana pada kondisi iklim basah (La Nina) selama periode tanggal 6-17 Agustus 2022

memberikan hasil yang lebih tinggi dibandingkan sampel penelitian yang lain. Dengan Metode *Target Only*, hasil TMC pada tahun 2022 terhitung mampu meningkatkan intensitas curah hujan sebesar 56,90% selama 12 hari, atau rata-rata sekitar 4,74% per hari. Sementara dengan Metode *Target Control*, terhitung mampu meningkatkan intensitas curah hujan sebesar 81,22%, atau rata-rata sekitar 6,76% per hari.

Sebaliknya, pelaksanaan TMC pada kondisi iklim kering (El Nino) memperlihatkan hasil perhitungan nilai penambahan curah hujan yang paling rendah. Dengan metode *Target Only*, pelaksanaan TMC pada tahun 2015 yang berlangsung selama 23 hari pada periode tanggal 9-31 Agustus 2015 memberikan penambahan curah hujan sebesar 5,17%, atau rata-rata sekitar 0,22% per hari. Sementara dengan metode *Target Control*, justru pelaksanaan TMC pada tahun 2023 yang berlangsung selama 24 hari pada periode tanggal 17 Mei – 9 Agustus 2023 yang terhitung memberikan penambahan curah hujan terendah yaitu hanya sebesar 12,79%, atau rata-rata sekitar 0,53% per hari.

Perhitungan nilai penambahan curah hujan dengan Metode *Target Only* mampu memperlihatkan perbedaan hasil penambahan curah hujan di suatu daerah target secara temporal, sementara dengan Metode *Target Control* mampu memperlihatkan perbedaan hasil penambahan curah hujan di suatu daerah target secara spasial. Dalam hal ini, perhitungan penambahan curah hujan dengan Metode *Target Control* dinilai lebih baik karena dapat menggambarkan kondisi aktual perbedaan curah hujan di kedua daerah (target dan kontrol) pada satu periode waktu yang bersamaan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Aldrian, E., & Dwi Susanto, R. (2003). Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *International Journal of Climatology*, 23(12), 1435–1452. <https://doi.org/10.1002/joc.950>
- Athoillah, I., Sibarani, R. M., Zahroh, N. F., Siboro, Z., Tukiyat, Renggono, F., Sunarto, F., & Seto, T. H. (2019). The effectiveness of WMT activities to reduce hotspots during El-Nino in 2014-2015 in Ogan Komering Ilir District, South Sumatra. *AGERS 2019 - 2nd IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology: Understanding and Forecasting the Dynamics of Land, Ocean and Maritime*, Proceeding, 10–14. <https://doi.org/10.1109/AGERS48446.2019.9034349>
- Bruintjes, R. T. (1999). A Review of Cloud

- Seeding Experiments to Enhance Precipitation and Some New Prospects. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(5), 805–820. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<0805:AROCSE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0805:AROCSE>2.0.CO;2)
- Flossmann, A. I., Manton, M., Abshaev, A., Brientjes, R., Murakami, M., Prabhakaran, T., & Yao, Z. (2019). Review of advances in precipitation enhancement research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(8), 1465–1480. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0160.1>
- Griffith, D. A., Yorty, D. P., & Beall, S. D. (2015). Target/control analysis for Santa Barbara county's operational winter cloud seeding program. *Journal of Weather Modification*, 47(November), 10–25. <https://doi.org/10.54782/jwm.v47i1.524>
- Harsoyo, B., & Athoillah, I. (2022). Paradigma Baru Pemanfaatan Teknologi Modifikasi Cuaca dalam Upaya Penanganan Bencana Kebakaran Hutan dan Lahan di Indonesia. *Jurnal Sains Dan Teknologi Modifikasi Cuaca*, 23(1), 1–9.
- Kucera, P. A., Axisa, D., Burger, R. P., Collins, D. R., Li, R., Chapman, M., Posada, R., Krauss, T. W., & Ghulam, A. S. (2010). Features of the weather modification assessment project in the southwest region of Saudi Arabia. *Journal of Weather Modification*, 42(April), 78–103. <https://doi.org/10.54782/jwm.v42i1.162>
- Panjaitan, R. B. (2018). Rencana Mitigasi dan Adaptasi Terkait Bencana Iklim. Diskusi Pojok Iklim 'Tanggap Darurat Bencana Iklim', Direktorat PKHL, Dirjen PPI, KLHK.
- Sandhyavitri, A., Rahmi, I., Widodo, H., & Husaini, R. R. (2020). Evaluation the Effectiveness Implementation of the Weather Modification Technology for Mitigating Peatland Fires. *Journal of Physics: Conference Series*, 1655(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012153>
- Seto, T. H., Sakya, A. E., Prayoga, M. B. R., & Sunarto, F. (2018). Role of Weather Modification Technology in climate change adaptation: Indonesian case. *Regional Problems*, 21(3 (1)), 54–57. [https://doi.org/10.31433/1605-220x-2018-21-3\(1\)-54-57](https://doi.org/10.31433/1605-220x-2018-21-3(1)-54-57)
- Sloan, S., Tacconi, L., & Cattau, M. E. (2021). Fire prevention in managed landscapes: Recent success and challenges in Indonesia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 26(7), 1–30. <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09965-2>
- Sutikno, S., Amalia, I. R., Sandhyavitri, A., Syahza, A., Widodo, H., & Seto, T. H. (2020). Application of weather modification technology for peatlands fires mitigation in Riau, Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 2227(May). <https://doi.org/10.1063/5.0002137>
- Wu, X., Yan, N., Yu, H., Niu, S., Meng, F., Liu, W., & Sun, H. (2018). Advances in the Evaluation of Cloud Seeding: Statistical Evidence for the Enhancement of Precipitation. *Earth and Space Science*, 5(9), 425–439. <https://doi.org/10.1029/2018EA000424>
- Yananto, A., Prayoga, M. B. R., & Harsoyo, B. (2017). Forest and Land Fire Danger Mapping Based on Land Physical Parameters in Sumatera and Kalimantan Region of Indonesia. *Journal of Applied Geospatial Information*, 1(2), 75–81. <https://doi.org/10.30871/jagi.v1i2.521>