

PARADIGMA BARU PEMANFAATAN TEKNOLOGI MODIFIKASI CUACA DALAM UPAYA PENANGANAN BENCANA KEBAKARAN HUTAN DAN LAHAN DI INDONESIA

A New Paradigm of The Application of Weather Modification Technology for Forest And Land Fire Disaster Management In Indonesia

Budi Harsoyo^{1)*}, Ibnu Athoillah¹⁾

¹⁾Lab. Pengelolaan TMC Direktorat Pengelolaan Laboratorium Fasilitas Riset dan Kawasan Sains Teknologi - BRIN, Gedung Ir. Mohammad Soebagio, GEOSTECH (820), Kawasan PUSPIPEK, Serpong, Tangerang Selatan
*E-mail : buhar04@yahoo.com

Intisari

Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) telah secara rutin dimanfaatkan dalam upaya penanganan bencana kebakaran hutan dan lahan (karhutla) yang terjadi hampir setiap tahun di wilayah Pulau Sumatera dan Kalimantan. El Nino tahun 2015 yang mengakibatkan bencana karhutla cukup parah telah memberikan pelajaran dan menjadi titik tolak bagi perubahan paradigma pemanfaatan TMC dalam skema penanganan bencana karhutla di Indonesia. Jika sebelumnya TMC dilakukan untuk tujuan pemadaman karhutla pada saat kejadian bencananya sudah sedemikian masif, maka setelah periode tahun 2015 TMC dilakukan lebih awal untuk tujuan pencegahan bencana karhutla dengan sasaran untuk pembasahan lahan gambut agar tidak mudah terbakar. Dengan pelaksanaan yang lebih awal di masa transisi musim hujan, hasil hujan yang diperoleh dari pelaksanaan TMC dapat lebih optimal dan mampu memperpendek periode kekeringan di lahan gambut yang rentan terbakar. Selama periode tahun 2016-2020, secara signifikan telah terjadi penurunan intensitas kejadian bencana karhutla dilihat dari berkurangnya jumlah titik panas, luas lahan terbakar dan emisi karbon di sejumlah provinsi rawan bencana karhutla di Indonesia.

Kata Kunci: Teknologi Modifikasi Cuaca, Karhutla, Hujan, Titik Panas, Emisi Karbon.

Abstract

Weather Modification Technology (WMT) has been routinely used to mitigate forest and land fires disaster that occurs almost every year in Sumatra and Kalimantan. The 2015 El Nino, which resulted in a severe forest and land fire disaster, has provided lessons and has become the starting point for a paradigm shift in the use of WMT in the forest and fire disaster management scheme in Indonesia. Previously, WMT was carried out for the purpose of extinguishing forest and land fires when the disaster was so massive. After 2015, WMT is put into operation in the earlier period, precisely during the rainy season transition period, for the purpose of wetting peatlands and, thus, preventing forest and land fires. The implementation of WMT can be more optimal and is able to shorten the drought period in peatlands that are prone to fire. During the 2016-2020 period, there has been a significant decrease in both the occurrence and the scale of intensity of forest and land fires. This study clearly indicates the decrease in the number of hotspots, the area of burned land, and the carbon emissions in several provinces that are prone to forest and land fires in Indonesia.

Keywords: Weather Modification Technology, Forest and Land Fires, Rainfall, Hotspot, Carbon Emission.

1. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia merupakan salah satu negara yang sangat rentan terhadap dampak perubahan iklim. Berdasarkan data kejadian bencana di Indonesia dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), Indonesia merupakan negara yang mempunyai indeks risiko bencana alam cukup tinggi. Kejadian bencana di Indonesia

didominasi oleh jenis bencana hidrometeorologi seperti banjir, kekeringan, tanah longsor, puting beliung, gelombang pasang, dan bencana kabut asap akibat kebakaran hutan dan lahan (karhutla).

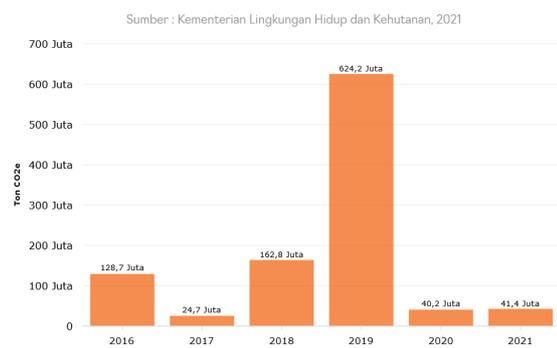
Selain dipicu oleh kerusakan lingkungan akibat ulah manusia, meningkatnya frekuensi bencana hidrometeorologi juga disebabkan oleh faktor perubahan iklim. Salah satu contohnya

adalah fenomena bencana kebakaran hutan dan lahan (karhutla) yang rutin terjadi di Indonesia. Secara historis, bencana karhutla menunjukkan kecenderungan berupa kejadian berulang dari tahun ke tahun dan peningkatan saat musim kemarau. Intensitas kejadian bencana karhutla dapat menjadi semakin parah manakala terjadi anomali iklim El Nino yang berdampak pada terjadinya kemarau panjang di wilayah Indonesia.

Menurut Alisyahbana dan Busch (2017), bencana karhutla berulang yang terjadi di wilayah Sumatera dan Kalimantan disebabkan oleh aktivitas agribisnis dan petani yang membuka lahan (*land clearing*). Dalam keadaan alamnya, hutan tropis di kedua pulau tersebut tidak mudah terbakar, tetapi aktivitas penebangan besar-besaran telah mengeringkan dan merusak kawasan hutan yang luas. Hal ini mengakibatkan meningkatnya kerawanan akan terjadinya kebakaran terhadap hutan tersebut. Kejadian karhutla yang cukup parah terakhir terjadi tahun 2015 dan telah membakar habis kawasan hutan seluas 0.43 juta hektar di Sumatera dan 0.67 juta hektar di Kalimantan. Kejadian karhutla di tahun 2015 juga telah menimbulkan bencana kabut asap yang menyebabkan ditutupnya sejumlah sekolah dan bandara, bahkan menyebar hingga ke negara tetangga Singapura dan Malaysia. Bank Dunia memperkirakan kerugian akibat karhutla tahun 2015 di Indonesia senilai \$16 miliar, lebih besar dari nilai tambah dari total produksi minyak sawit Indonesia pada tahun 2014 yang bernilai \$12 miliar.

Fenomena bencana karhutla ini selalu menjadi perhatian Pemerintah Indonesia, karena selain menimbulkan kerugian di sektor sosial dan ekonomi, bencana karhutla juga kerap menimbulkan citra negatif bagi Indonesia di dunia internasional akibat dampak kabut asap lintas batas (*trans haze boundary*). Selain itu, bencana karhutla juga sangat terkait dengan emisi karbon yang memiliki pengaruh terhadap perubahan iklim dalam jangka panjang. Oleh karena itu, mengacu pada ratifikasi Kesepakatan Paris atas Konvensi Kerja PBB tahun 2016 tentang Perubahan Iklim, Pemerintah Indonesia berkomitmen untuk menjalankan kesepakatan global guna mengurangi masalah perubahan iklim. Melalui *Nationally Determined Contribution* (NDC) yang telah disampaikan kepada Sekretariat *United Nation Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), Pemerintah Indonesia mencanangkan target untuk mengurangi emisi karbon dan Gas Rumah Kaca (GRK) sampai 29% pada tahun 2030. Sebagai upaya untuk mencapai komitmen nasional dalam menurunkan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) serta mencapai tujuan pembangunan rendah emisi dan berketahanan iklim seperti yang tertuang dalam dokumen NDC, Pemerintah Indonesia menunjuk Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) sebagai *national focal point* perubahan iklim di Indonesia.

Salah satu upaya menurunkan jumlah emisi karbon dan GRK adalah dengan mengurangi kejadian karhutla. Kejadian karhutla pada tahun 1997 yang bertepatan dengan fenomena El Nino diperkirakan melepaskan karbon sebanyak 0.81 – 2.57 gigaton dari lahan gambut dan hutan yang terbakar di Indonesia (Page *et al.*, 2002). Menurut laporan KLHK, kejadian karhutla pada 2021 telah menghasilkan emisi karbon sebesar 41.4 juta ton CO₂, jauh lebih rendah dari kejadian karhutla tahun 2019 (Gambar 1). Kejadian kebakaran hutan dan lahan gambut pada tahun 2019 juga memberikan sumbangan sekitar 50% pada emisi gas rumah kaca nasional. Dengan demikian, jika kejadian bencana karhutla dapat dikurangi intensitasnya, maka akan diperoleh dampak yang cukup signifikan dalam upaya pengurangan emisi karbon di Indonesia.



Gambar 1. Emisi karbon yang dihasilkan dari kejadian karhutla (sumber: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2021).

Dalam periode satu dekade terakhir, Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) telah banyak dimanfaatkan dalam upaya penanggulangan bencana karhutla di Indonesia. Peranan TMC untuk penanggulangan bencana karhutla telah tertuang sebagai penugasan nasional dalam Instruksi Presiden Republik Indonesia Nomor 3 Tahun 2020 tentang Penanggulangan Kebakaran Hutan dan Lahan. Dalam rangka peningkatan pengendalian kebakaran hutan dan lahan di seluruh wilayah Republik Indonesia, Presiden RI memberikan instruksi kepada Kepala Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), yang sekarang telah bertransformasi menjadi bagian dari Lembaga Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), untuk melakukan operasi Teknologi Modifikasi Cuaca dan pengembangan pembukaan lahan tanpa bakar untuk mendukung upaya penanggulangan kebakaran hutan dan lahan.

2. METODE

2.1. Karakteristik Bencana Karhutla di Indonesia

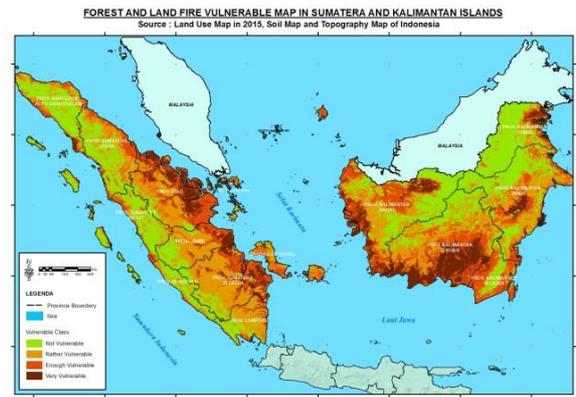
Pulau Sumatera dan Pulau Kalimantan merupakan dua wilayah di Indonesia yang rutin mengalami kejadian karhutla setiap kali musim

kemarau tiba. Dua pulau ini memiliki kerawanan yang tinggi dibandingkan wilayah lain karena memiliki sebaran lahan gambut yang cukup luas. Berdasarkan hasil penelitian Yananto *et al.* (2017), daerah yang paling rawan bencana karhutla untuk Pulau Sumatera sebagian besar berada di wilayah Provinsi Riau (Kabupaten Bengkalis, Indragiri Hilir dan Pelalawan), Provinsi Sumatera Selatan (Kabupaten Ogan Komering Ilir, Banyuasin dan Musibanyuasin) serta Provinsi Jambi (Kabupaten Tanjungjabung Timur, Muarojambi, dan Tanjungjabung Barat). Sedangkan di Pulau Kalimantan daerah yang sangat rawan terhadap kejadian karhutla sebagian besar berada di Provinsi Kalimantan Tengah (Kabupaten Katingan, Pulangpisau dan Kapuas) serta di Provinsi Kalimantan Barat (Kabupaten Ketapang, Kapuas Hulu dan Kuburaya). Wilayah rawan bencana karhutla di Pulau Sumatera dan Kalimantan ditunjukkan dalam bentuk gradasi warna yang semakin merah pada Gambar 2. Sejalan dengan hasil penelitian ini, bantuan Pemerintah Pusat dalam bentuk operasi TMC sebagai upaya penanganan bencana karhutla di wilayah Pulau Sumatera selalu diprioritaskan untuk sejumlah provinsi rawan bencana karhutla tersebut.

Karakteristik kejadian bencana karhutla di Indonesia sangat spesifik karena sebagian besar berada di lahan gambut yang sangat potensial menimbulkan asap. Dengan karakternya yang khas, gambut bisa menyimpan bara api hingga kedalaman tertentu. Bara api di lahan gambut juga dapat bertahan selama kondisi lingkungannya memungkinkan.

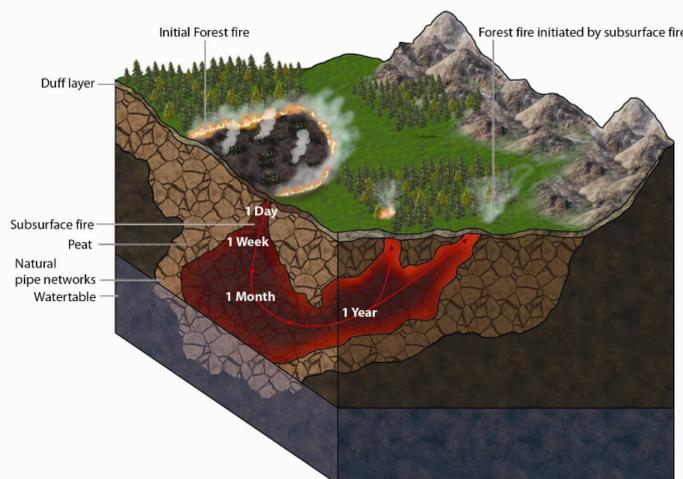
Kejadian karhutla di lahan gambut dapat dikenali dari dua jenis kebakaran, yaitu *open flame* atau kebakaran api permukaan, dan *smouldering* atau kebakaran api bawah permukaan (Rein, 2009) seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3. Kebakaran permukaan biasanya menghabiskan 5 kg/m² bahan bakaran berupa rumput, semak, dan pepohonan. Sementara itu, kebakaran bawah permukaan (*smouldering*) mampu menghabiskan

deposit gambut sebesar 75kg/m². Karhutla jenis *smouldering* inilah yang sulit untuk dipadamkan karena sifatnya yang tidak terlihat, sehingga dapat merambat ke area sekitarnya dan muncul kembali di permukaan. Jenis kebakaran seperti ini dapat menghasilkan asap tebal akibat banyaknya bahan bakar yang tersimpan di bawah permukaan. Akibatnya, kejadian karhutla di lahan gambut kerap menimbulkan bencana kabut asap sebagai kelanjutannya.

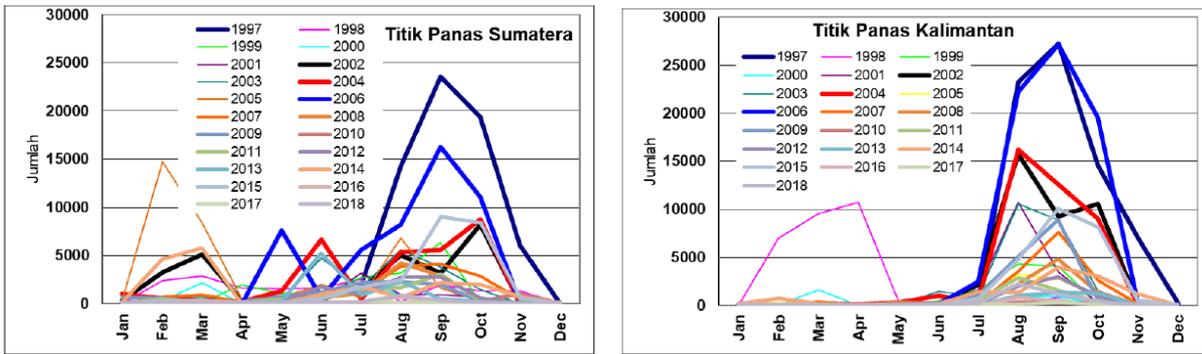


Gambar 2. Peta Kerawanan Kebakaran Hutan dan Lahan di Pulau Sumatera dan Kalimantan (sumber: Yananto *et al.*, 2017).

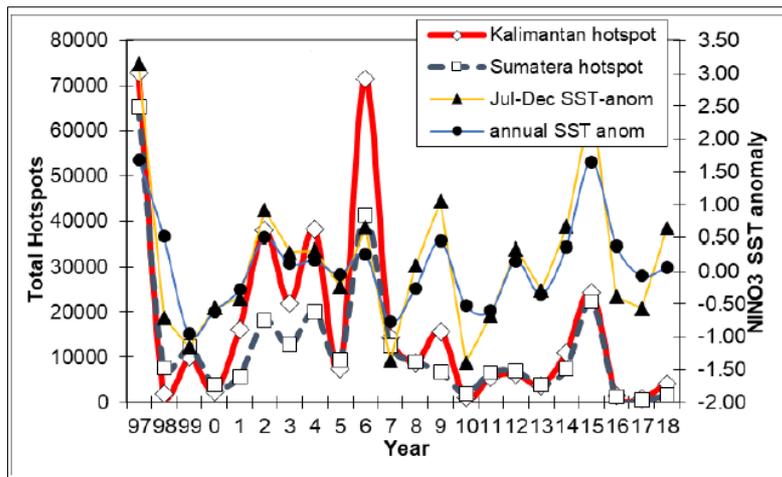
Kejadian bencana karhutla mempunyai korelasi kuat dengan periode musim kering (kemarau). Dari hasil analisis data historis kejadian karhutla di Pulau Sumatera dan Kalimantan berdasarkan data titik panas (hotspot) periode tahun 1997 – 2017, seperti yang tergambar dalam Gambar 4, terlihat bahwa pola kemunculan titik panas di Pulau Sumatera dan Kalimantan mempunyai pola yang linier dengan periode musim kemarau di bulan Juli, Agustus, September, dan Oktober. Lebih lanjut dalam Gambar 5 diperlihatkan korelasi antara kejadian karhutla dengan fenomena El Nino yang didekati dengan menggunakan anomali Sea Surface Temperature (SST) di titik NINO3 (Kusumaningtyas *et al.*, 2021).



Gambar 3. Kebakaran hutan dan lahan gambut: *Open flame* dan *Smouldering* (sumber: Rein, 2009).



Gambar 4. Pola tahunan kejadian karhutla di Pulau Sumatera dan Kalimantan (sumber: Kusumaningtyas *et al.*, 2021).

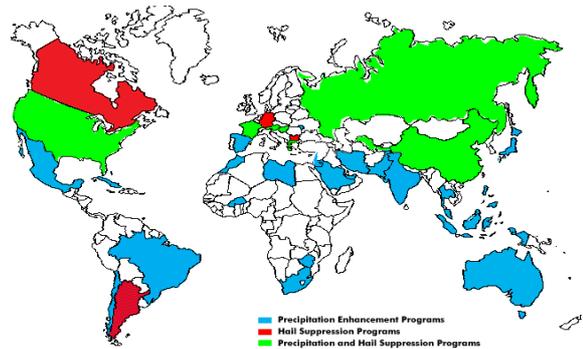


Gambar 5. Kesesuaian pola Karhutla di Pulau Sumatera dan Kalimantan dengan tingkat keparahan El Nino yang direpresentasikan oleh tingkat anomali SST pada daerah NINO3 (sumber: Kusumaningtyas *et al.*, 2021).

2.2. Sekilas Mengenai Teknologi Modifikasi Cuaca

Teknologi Modifikasi Cuaca merupakan intervensi manusia pada proses pembentukan hujan dengan cara menginjeksikan bahan semai (*seeding agent*) ke dalam awan. Dari hasil intervensi tersebut, proses tumbukan (*collision*) dan penggabungan (*coalescence*) antara tetes awan (*cloud droplets*) dengan partikel bahan semai di dalam awan akan menjadi lebih efisien daripada proses yang berjalan secara alami (Seto *et al.*, 2018).

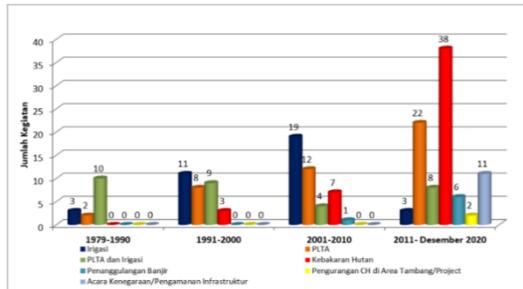
Banyak negara di dunia melaksanakan program modifikasi cuaca untuk berbagai tujuan. Secara umum, TMC dilaksanakan untuk tujuan penambahan curah hujan (*rain enhancement*) guna mengatasi permasalahan krisis sumber daya air. Di sejumlah negara yang berlokasi di daerah lintang tinggi, TMC juga banyak dimanfaatkan untuk tujuan pengurangan hujan es (*hail suppression*) (WMO, 2016). Di beberapa negara yang berada di daerah tropis seperti Indonesia, Malaysia, India dan Thailand, TMC juga dilakukan untuk meningkatkan pasokan ketersediaan air bagi keperluan irigasi pertanian. dan Pembangkit Listrik Tenaga Air (Bruitjtes, 1999).



Gambar 6. Program modifikasi cuaca di dunia (sumber: WMO, 2016).

Dengan semakin meningkatnya frekuensi kejadian bencana hidrometeorologi di Indonesia, maka TMC yang awalnya banyak dimanfaatkan untuk tujuan pengelolaan sumberdaya air guna memenuhi kebutuhan air irigasi dan PLTA, dalam satu dekade terakhir justru mulai banyak dimanfaatkan untuk tujuan mitigasi bencana hidrometeorologi, khususnya bencana karhutla. Dalam beberapa tahun terakhir ini, TMC telah dijadikan sebagai salah satu solusi permanen dalam upaya pengendalian bencana karhutla di Indonesia. TMC pertama kali mulai dimanfaatkan

oleh Pemerintah Indonesia dalam upaya penanggulangan bencana karhutla yang cukup besar eskalasinya saat terjadinya El Nino pada tahun 1997. Selanjutnya, sejak tahun 2009 pelaksanaan TMC untuk mitigasi bencana karhutla rutin dilakukan setiap tahun di sejumlah provinsi rawan bencana karhutla di Pulau Sumatera dan Kalimantan. Tren pelaksanaan operasi TMC berdasarkan tujuan pemanfaatannya tersaji dalam Gambar 7.



Gambar 7. Trend pelaksanaan TMC berdasarkan tujuan pemanfaatannya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Efektivitas TMC dalam Upaya Penanggulangan Bencana Karhutla

Ketika terjadi karhutla, atmosfer sangat sedikit mengandung uap air (RH rendah). Selain itu, terbakarnya biomasa menyebabkan populasi atau jumlah inti kondensasi di atmosfer meningkat. Kondisi ini menimbulkan kompetisi (persaingan) dalam memperebutkan uap air yang saat itu jumlahnya tidak besar. Keadaan ini menyebabkan sangat sulitnya terbentuk awan. Kalaupun ada awan, awan ini tidak dapat berkembang besar yang kemudian berdampak pada sulitnya terjadi hujan. Saat karhutla terjadi, biasanya kondisi cuaca menjadi stabil dan radiasi matahari ke bumi berkurang. Kondisi cuaca yang stabil mengakibatkan asap karhutla sulit terbuang ke angkasa. Hal ini berdampak pada berkurangnya jarak pandang, yang pada gilirannya berkontribusi pada semakin meningkatnya Indeks Standard Pencemaran Udara (ISPU), yang dapat menyebabkan gangguan pernafasan.

Pada kondisi asap yang sedemikian rupa, turunnya curah hujan menjadi hal penting untuk membersihkan udara dari polusi asap. Dengan demikian, kondisi radiasi menjadi semakin membaik dan cuaca menjadi labil, sehingga proses pembentukan awan berjalan normal. Peran TMC menjadi sangat penting dalam hal menjatuhkan curah hujan ini, terutama untuk awan-awan potensial (penghasil hujan) yang ada di dekat atau di atas daerah kebakaran hutan. Bila kondisi atmosfer di atas suatu daerah yang terbakar berubah menjadi mendukung (*favorable*), yaitu dengan masuknya masa udara lembap, maka awan-awan di daerah ini akan tumbuh dan berkembang. Pada kondisi seperti inilah peran

TMC menjadi sangat efektif untuk mempercepat proses terjadinya hujan, meningkatkan intensitas hujan, meluaskan daerah hujan, dan memperpanjang durasi (lama) hujan.

Hasil penelitian menyebutkan bahwa upaya TMC terbukti efektif meningkatkan curah hujan dan secara signifikan mengurangi kebakaran lahan gambut di Provinsi Riau selama periode tahun 2014-2016 (Sutikno *et al.*, 2020). Lebih lanjut, penelitian 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 dan dihitung dengan metode *Target Only* adalah sebesar 2.09. Penelitian lain yang dilakukan oleh Athoillah *et al.* (2019) yang juga mengkaji efektifitas pelaksanaan TMC untuk mitigasi bencana karhutla di Provinsi Sumatera Selatan menyebutkan bahwa hasil pelaksanaan TMC terbukti mampu meningkatkan intensitas curah hujan dan mengurangi jumlah *hotspot* 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 *hotspot* negatif (-0.3846).

Secara ringkas, efektivitas TMC dibandingkan dengan teknologi lainnya dalam melakukan pemadaman karhutla dan penanggulangan bencana kabut asap akibat karhutla dapat dijelaskan sebagai berikut:

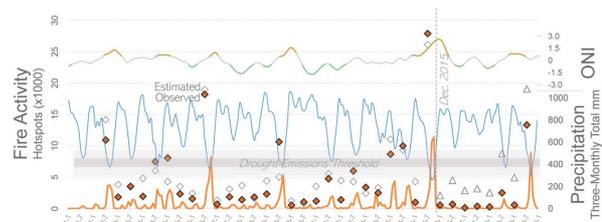
- 1) tidak ada teknologi apapun yang mampu memadamkan kebakaran hutan dan lahan dalam eskalasi yang luas, kecuali oleh siraman hujan;
- 2) dalam kondisi asap pekat, asap bukan hanya berbahaya bagi manusia. Asap pekat juga "tidak bersahabat" terhadap proses terjadinya hujan dalam 2 (dua) hal:
 - a) asap pekat menghalangi radiasi masuk ke permukaan bumi. Akibatnya suhu permukaan bumi tidak cukup hangat untuk membuat labil profil vertikal temperatur udara. Padahal profil vertikal temperatur udara yang labil inilah yang menjadi media bagi terbentuknya awan akibat aktivitas konveksi atau pengangkatan masa udara agar terjadi kondensasi. Akhirnya, awan menjadi sulit terbentuk dan tentu saja sulit terjadi hujan.
 - b) Ketika ada awan di suatu wilayah yang asapnya pekat (umumnya awan di sini berasal dari daerah lain yang terbawa angin, atau dalam istilah meteorologi disebut adveksi), maka asap pekat akan berebut uap air dengan awan yang tumbuh tersebut sehingga awan akan selalu berada dalam fase mula. Awan dalam fase mula ditandai dengan butir-butir awan berukuran kecil. Akibatnya, proses hujan akan sangat sulit terjadi.

- 3) TMC atau hujan buatan akan berperan penting dalam meningkatkan efisiensi proses hujan karena mampu mengubah (mempercepat) awan yang berada pada fase mula memasuki fase dewasa hingga matang. TMC dilakukan dengan menaburkan bahan semai higroskopis berukuran besar (UGN: *Ultra Giant Nuclei*, 10-50 mikron). Hadirnya bahan semai ini akan meningkatkan efisiensi tumbukan dan penggabungan (*collision and coalescence*), yang merupakan kunci terjadinya proses hujan pada awan hangat yang sering tumbuh di daerah tropis.

3.2. Paradigma Baru Skema Pemanfaatan TMC dalam Upaya Penanggulangan Bencana Karhutla

Sampai dengan tahun 2015, Pemanfaatan TMC untuk mitigasi bencana karhutla dilakukan pada saat eskalasi bencana sudah terjadi sedemikian masif. Terkait hal ini, BNPB meminta kepada BPPT untuk melakukan operasi TMC sebagai upaya pemadaman karhutla (*fire suppression*) setelah adanya status siaga darurat bencana dan permintaan bantuan TMC dari pemerintah daerah. Namun, dalam beberapa tahun terakhir setelah tahun 2015 dan dengan berkaca dari pengalaman kejadian bencana karhutla yang masif di tahun tersebut, paradigma pemanfaatan TMC berubah untuk tujuan pencegahan/antisipasi karhutla. Dengan koordinasi antar kementerian/lembaga yang dikoordinir oleh KLHK selaku *national focal point* perubahan iklim di Indonesia, TMC dilakukan pada masa transisi musim hujan menjelang masuknya musim kemarau dengan tujuan untuk mengisi air tanah gambut dan menjaga tingkat kebasahan pada area lahan gambut (*rewetting*). Dengan tetap terjaganya kelembapan tanah pada area lahan gambut, maka periode kering di lahan gambut bisa diperpendek dan potensi terjadinya kebakaran di area lahan gambut akan semakin berkurang.

Belajar dari pengalaman kejadian bencana di tahun 2015 tersebut, upaya Pemerintah Indonesia dalam hal pengendalian bencana karhutla yang dilaksanakan setelahnya telah menunjukkan hasil yang cukup signifikan. Sloan *et al.* (2021) menyebutkan bahwa upaya yang dilakukan oleh Pemerintah Indonesia setelah tahun 2015 dalam mencegah karhutla cukup sukses untuk mengurangi kerusakan/degradasi hutan, kabut asap dan emisi karbon. Dalam penelitian ini diperlihatkan perbedaan yang cukup signifikan antara jumlah *hotspot* yang terjadi sebelum dan setelah tahun 2015, seperti tersaji dalam Gambar 8.



Gambar 8 Perbedaan jumlah *hotspot* di Indonesia periode sebelum dan setelah tahun 2015 (sumber: Sloan *et al.*, 2021)

Dari Gambar 8 terlihat bahwa jumlah *hotspot* selama periode tahun 2016-2019 relatif lebih rendah dibandingkan jumlah *hotspot* selama periode tahun 2001-2015. Terlihat juga bahwa sebelum periode tahun 2015, jumlah *hotspot* aktual yang teramati relatif hampir sama atau lebih tinggi dibandingkan jumlah *hotspot* berdasarkan prediksi. Hal ini kontras dengan kondisi setelah tahun 2015, dimana jumlah *hotspot* aktual selalu berada di bawah jumlah *hotspot* hasil prediksi, dengan rerata sebesar 23%. Mengacu pada nilai *Oceanic Nino Index (ONI)*, diketahui pula bahwa tahun 2019 adalah tahun El Nino, mirip dengan tahun 2015. Namun demikian, jumlah *hotspot* di tahun 2019 mampu ditekan jumlahnya tidak sebanyak tahun 2015.

Selanjutnya, Gambar 9 menyajikan grafik kumulatif harian kejadian karhutla selama periode tahun 2001-2019 (a) dan curah hujan selama tahun-tahun El Nino (b). Dari gambar tersebut, diketahui bahwa meskipun tahun 2019 adalah tahun El Nino, peningkatan pesat kejadian karhutla di tahun tersebut dimulai lebih lambat sekitar 30-50 hari dibandingkan yang umumnya terjadi pada tahun-tahun El Nino sebelumnya. Jika dikaitkan dengan upaya TMC yang telah dilakukan, maka terjadinya keterlambatan tersebut dapat dikatakan terjadi karena TMC telah berhasil secara optimal memanfaatkan potensi hujan di masa transisi untuk memberikan simpanan cadangan air di musim kemarau. Dengan tetap terjaganya kebasahan lahan gambut, maka akan sulit bagi masyarakat untuk melakukan aktivitas pembakaran lahan, sehingga potensi risiko karhutla dapat ditekan secara optimal.

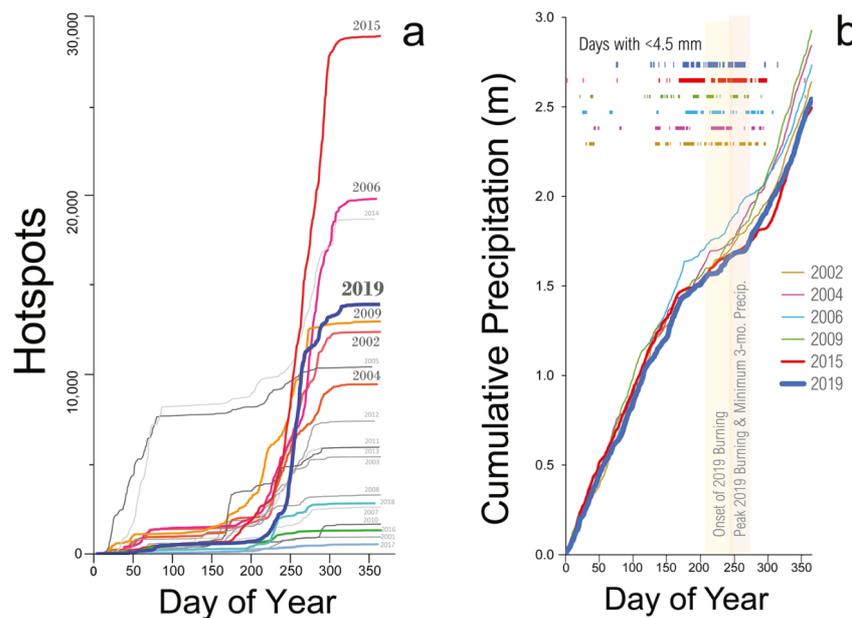
3.3. Hasil Pelaksanaan TMC Tahun 2020 dan 2021

Pada tahun 2020, TMC dilaksanakan untuk pengendalian bencana karhutla di Provinsi Riau dan Sumatera Selatan. Sementara pada tahun 2021, TMC untuk pengendalian bencana karhutla dilaksanakan di Provinsi Riau, Sumatera Selatan, Jambi dan Kalimantan Barat. Secara umum, curah hujan aktual yang terukur diperoleh dari hasil intervensi pelaksanaan TMC di tahun 2020 dan 2021 pada sejumlah provinsi rawan bencana

karhutla di Pulau Sumatera dan Kalimantan lebih tinggi dibandingkan dengan curah hujan hasil prediksi BMKG maupun curah hujan historisnya, sebagaimana tersaji dalam Tabel 1 dan Gambar 10.

Dalam forum *The 22nd Meeting of The Technical Working Group and Meeting of The Sub-Regional Ministerial Steering Committee on Transboundary Haze Pollution* di tingkat regional ASEAN yang diselenggarakan pada tanggal 29 - 30 November 2021, KLHK menyampaikan bahwa TMC telah menjadi salah satu solusi permanen dalam upaya pengendalian bencana karhutla di Indonesia. Pelaksanaan TMC dalam beberapa

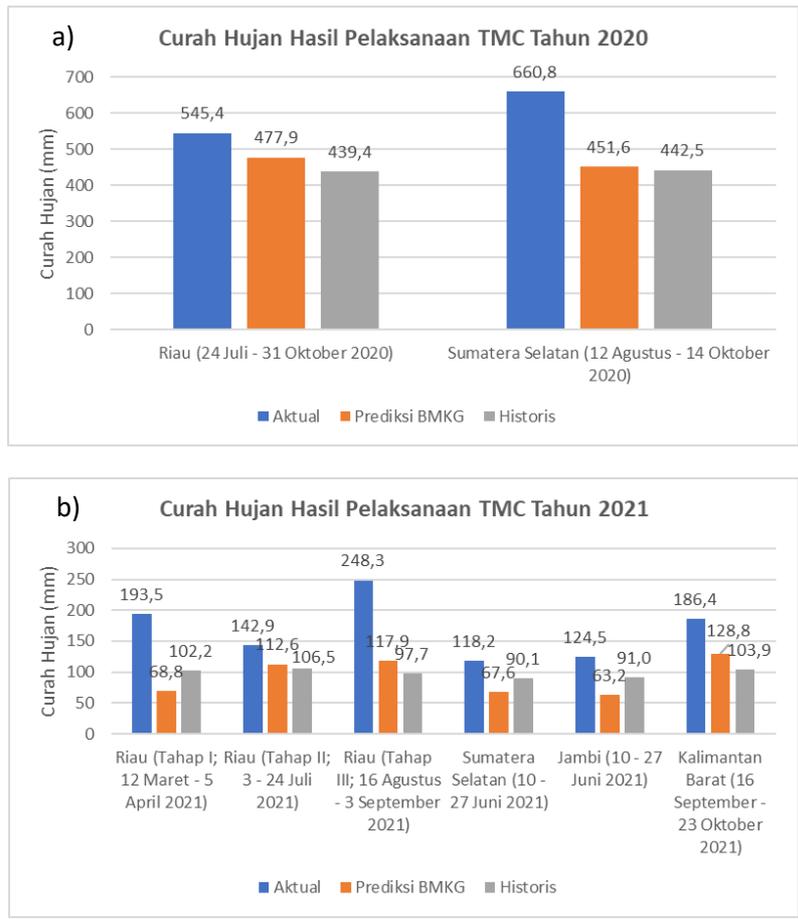
tahun terakhir telah memberikan hasil yang optimal karena dilaksanakan pada waktu yang tepat untuk tujuan pencegahan, dengan memperhatikan peringatan dini potensi risiko karhutla berdasarkan prediksi kekeringan di lahan lahan gambut. Hasilnya, selama beberapa tahun terakhir jumlah *hotspot* maupun luas area kebakaran berkurang secara signifikan (Gambar 11). Selain itu, dalam dua tahun terakhir (2020 dan 2021), wilayah ASEAN benar-benar bersih dari kiriman bencana kabut asap yang biasanya terjadi akibat kejadian karhutla di Pulau Sumatera atau Kalimantan.



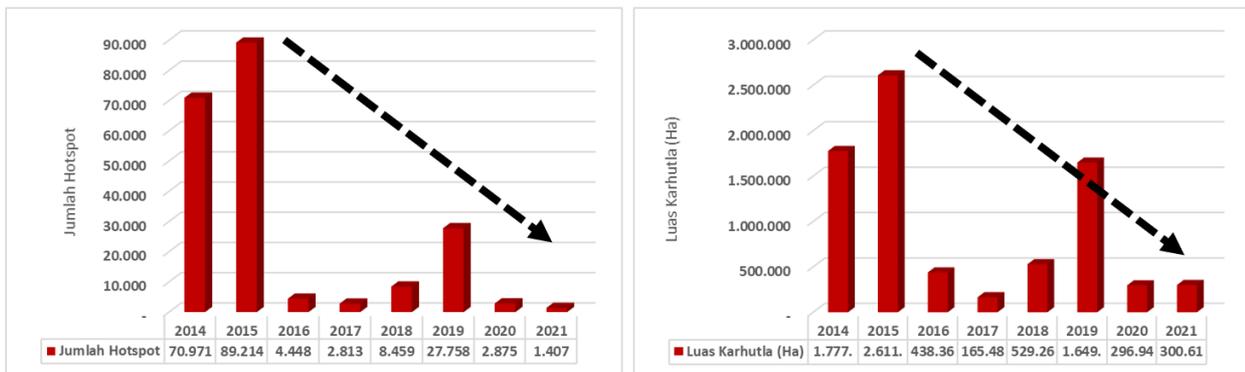
Gambar 9. Kumulatif harian kejadian karhutla selama periode tahun 2001-2019 (a) dan curah hujan selama tahun El Nino (b) (sumber: Sloan *et al.*, 2021).

Tabel 1. Rekapitulasi hasil pelaksanaan TMC tahun 2020 dan 2021 (sumber : BPPT 2021 dan 2022)

No	Lokasi	Waktu	Curah Hujan (mm)		
			Aktual	Prediksi BMKG	Historis
Tahun 2020					
1	Riau	24 Juli - 31 Oktober 2020	545,4	477,9	439,4
2	Sumatera Selatan	12 Agustus - 14 Oktober 2020	660,8	451,6	442,5
Tahun 2021					
4	Riau (Tahap 1)	12 Maret - 5 April 2021	193,5	68,8	102,2
	Riau (Tahap 2)	3 - 24 Juli 2021	142,9	112,6	106,5
	Riau (Tahap 3)	16 Agustus - 3 September 2021	248,3	117,9	97,7
5	Sumatera Selatan	10 - 27 Juni 2021	118,2	67,6	90,1
6	Jambi	10 - 27 Juni 2021	124,5	63,2	91,0
7	Kalimantan Barat	16 September - 23 Oktober 2021	186,4	128,8	103,9



Gambar 10. Perbandingan curah hujan aktual, curah hujan prediksi, dan curah hujan historis selama periode pelaksanaan TMC tahun 2020 (a) dan 2021 (b). (Sumber : Laporan kegiatan TMC tahun 2020 dan 2021)



Gambar 11. Jumlah hotspot (kiri) dan luasan area karhutla (kanan) di Indonesia yang berkurang secara signifikan setelah periode tahun 2015 – 2021.

4. KESIMPULAN

Dari keseluruhan uraian yang telah disampaikan dalam tulisan ini, diperoleh kesimpulan bahwa pemanfaatan TMC telah memperlihatkan kontribusi positif dalam upaya penanganan bencana karhutla di Indonesia. Berkaca dari pengalaman kejadian karhutla di tahun 2015, pelaksanaan TMC pada periode setelahnya dimulai lebih awal yaitu di masa transisi musim hujan, sehingga masih bisa mengoptimalkan potensi hujan yang ada untuk

menjaga kebasahan di lahan gambut dan memberikan simpanan air di kubah gambut untuk cadangan di musim kemarau. Dengan adanya pelaksanaan TMC di saat yang tepat, maka periode kering di sejumlah daerah yang memiliki kerentanan tinggi untuk terbakar menjadi lebih singkat, sehingga jumlah kejadian karhutla dapat ditekan secara optimal. Hal ini mengindikasikan bahwa manajemen risiko bencana karhutla di Indonesia sudah mulai memperlihatkan hasil.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Alisjahbana, A. S., & Busch, J. M. (2017). Forestry, Forest Fires, and Climate Change in Indonesia. *Bulletin of Indonesian Economic Studies*, 53(2), 111–136. doi: 10.1080/00074918.2017.1365404.
- 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. doi: 10.1109/AGERS48446.2019.9034349.
- BPPT. (2020). Laporan Akhir Pemanfaatan Teknologi Modifikasi Cuaca Dalam Rangka Siaga Darurat Bencana Asap Akibat Kebakaran Hutan dan Lahan di Sumatera dan Kalimantan. Jakarta.
- BPPT. (2021). Laporan Kegiatan Pemanfaatan Teknologi Modifikasi Cuaca Dalam Rangka Pencegahan Kebakaran Hutan dan Lahan di Provinsi Riau. Jakarta.
- BPPT. (2021). Laporan Kegiatan Pemanfaatan Teknologi Modifikasi Cuaca Dalam Rangka Pencegahan Kebakaran Hutan dan Lahan di Provinsi Sumatera Selatan dan Jambi. Jakarta.
- BPPT. (2021). Laporan Kegiatan Pemanfaatan Teknologi Modifikasi Cuaca Dalam Rangka Pencegahan Kebakaran Hutan dan Lahan di Provinsi Kalimantan Barat. Jakarta.
- 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. doi: 10.1175/1520-0477(1999)080<0805:AROCSE>2.0.CO;2.
- Kusumaningtyas, S.D.A., Aldrian, E., Sunaryo, S., Kurniawan, R. (2021). Biomass Burning and Haze in Indonesia, Long-Term Climate Perspective, and Impact on Regional Air Quality. *Biomass Burning in South and Southeast Asia*, (249-269). CRC Press.
- Page, S. E., Siegert, F., Rieley, J. O., Boehm, H. D. V., Jaya, A., & Limin, S. (2002). The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature*, 420(6911), 61–65. doi: 10.1038/nature01131.
- Rein, G. (2009). Smouldering Combustion Phenomena in Science and Technology. *International Review of Chemical Engineering*, 1(January 2009), 3–18. <http://www.era.lib.ed.ac.uk/handle/1842/1152>.
- Sandhyavritri, 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). doi: 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. doi: 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. doi: 10.1007/s11027-021-09965-2.
- Sutikno, S., Amalia, I. R., Sandhyavritri, 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). doi: 10.1063/5.0002137.
- WMO. (2016). WMO Expert Committee on Weather Modification Research. October.Report. <https://dokumen.tips/documents/wmo-expert-committee-on-weather-modification-research.html?page=1> [28 Juni 2022].
- 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. doi: 10.30871/jagi.v1i2.521.