

Optimalisasi Metode Penyemaian Awan untuk Meningkatkan Curah Hujan

Nurinnadiyah Rahadatul 'Aisy^{1,*}, Ahmad Fauzi Hendratmoko², Nilna Najwa Kamila³, Zahirah Indana Sa'idah⁴

¹ S1 Program Studi Pendidikan Ilmu Pengetahuan Alam, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya

^{*)} Email Korespondensi: nurinaisy2@gmail.com

Abstract

Sitasi:

Aisy, N. R. (2024). *Optimalisasi Metode Penyemaian Awan untuk Meningkatkan Curah Hujan*. Jurnal Sains Geografi. Vol. 2, No. 1.

Sejarah Artikel:

Diterima: 24 Mei 2024

Disetujui: 25 Mei 2024

Publikasi: 27 Mei 2024

Water scarcity is a serious environmental issue impacting many countries worldwide. Cloud seeding is a technology aimed at increasing rainfall by adding certain chemicals to clouds. Cloud seeding can enhance rainfall by up to 10%, which can support the water needs of additional households annually. The purpose of this literature review is to identify the most effective cloud seeding methods. The search was conducted using the SCOPUS database. The articles found were then selected based on their titles, keywords, and abstracts to ensure relevance to the research topic, resulting in 7 relevant articles. The literature review revealed various cloud seeding methods, such as Weather Research and Forecasting (WRF) cloud seeding, hygroscopic cloud seeding, and ECMWF cloud seeding. Based on an analysis of the advantages and disadvantages of these three cloud seeding methods, the most effective method is WRF cloud seeding because it is highly flexible and can be adapted to various weather conditions and topographies.

Keywords: Water scarcity, cloud seeding, and WRF

Abstrak



Copyright: © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Kekurangan air merupakan masalah lingkungan serius yang berdampak pada banyak negara di seluruh dunia. Salah satu solusi yang digunakan untuk mengatasi masalah kekurangan air adalah penyemaian awan. Penyemaian awan atau cloud seeding adalah teknologi yang bertujuan meningkatkan curah hujan dengan menambahkan bahan kimia tertentu ke dalam awan. Penyemaian awan dapat meningkatkan curah hujan hingga 10%, yang dapat mendukung kebutuhan air bagi rumah tangga tambahan dalam setahun. Tujuan dari *literature review* ini, untuk mengidentifikasi metode penyemaian awan yang paling efektif. Pencarian dilakukan menggunakan basis data SCOPUS. Artikel yang ditemukan kemudian diseleksi berdasarkan judul, kata kunci, dan abstrak untuk memastikan kesesuaian dengan topik kajian,

sehingga terpilih 7 artikel yang relevan. Dari *literature review* yang dilakukan didapatkan hasil bahwa telah banyak ditemukan berbagai metode penyemaian awan, seperti penyemaian Awan WRF (Weather Research and Forecasting), penyemaian awan higroskopis, dan penyemaian awan ECMWF. Berdasarkan hasil analisis kelebihan dan kekurangan dari ketiga metode penyemaian awan tersebut metode penyemaian awan yang paling efektif adalah metode WRF karena metode ini sangat fleksibel dan dapat disesuaikan dengan berbagai kondisi cuaca dan topografi.

Kata kunci: Kekurangan air, penyemaian awan, dan WRF

1. Pendahuluan

Kekurangan air merupakan masalah lingkungan serius yang berdampak pada banyak negara di seluruh dunia. Menurut laporan dari World Resources Institute, ada 17 negara yang menghadapi tekanan air sangat tinggi, di mana lebih dari 80% sumber air yang tersedia digunakan setiap tahun. Negara-negara seperti India, Pakistan, dan beberapa wilayah di Timur Tengah mengalami kekeringan hebat yang mengganggu sektor pertanian, kebutuhan rumah tangga, dan industri.

Salah satu solusi yang digunakan untuk mengatasi masalah kekurangan air adalah penyemaian awan. Penyemaian awan atau cloud seeding adalah teknologi yang bertujuan meningkatkan curah hujan dengan menambahkan bahan kimia tertentu ke dalam awan. Ide penyemaian awan pertama kali diusulkan pada tahun 1891 oleh Louis Gathmann, yang mengusulkan penggunaan karbon dioksida cair untuk merangsang pembentukan hujan. Sekarang, banyak negara di dunia, termasuk Israel, Dakota, Korea, Arab, India, Cina, Rusia, Malaysia, Thailand, dan Amerika Serikat, menggunakan teknologi ini untuk mengatasi masalah kekeringan di wilayah mereka. Penyemaian awan dapat meningkatkan curah hujan hingga 10%, yang dapat mendukung kebutuhan air bagi

150.000 rumah tangga tambahan dalam setahun (Wondie, 2023).

Teknik penyemaian awan dapat meningkatkan curah hujan sebesar 10-30% di wilayah yang rawan kekeringan. Sebagai contoh, di Tiongkok, penyemaian awan telah berhasil meningkatkan curah hujan tahunan sekitar 10 miliar ton di daerah yang terkena dampak kekeringan. Uni Emirat Arab juga telah menginvestasikan lebih dari \$15 juta dalam proyek penyemaian awan untuk menambah curah hujan di wilayahnya yang kering. Di Amerika Serikat, beberapa negara bagian seperti California dan Texas telah menggunakan penyemaian awan untuk meningkatkan pasokan air. Studi di Texas menunjukkan bahwa penyemaian awan dapat meningkatkan curah hujan di daerah tertentu hingga 15% selama musim kering. Di Colorado, proyek penyemaian awan di pegunungan San Juan pada musim dingin 2018-2019 diperkirakan telah menambah sekitar 140.000 acre-feet (172,6 juta meter kubik) air untuk penyimpanan di waduk-waduk lokal.

Secara tradisional, dalam eksperimen penyemaian awan, tracer seperti gas inerta, sulfur heksafluorida (SF₆), atau serpihan radar dilepaskan di dasar awan, dan kemudian upaya dilakukan untuk mengukur tracer-tracer ini di bagian atas awan. Namun, pelacakan SF₆ dalam

awan yang telah disemai merupakan hal yang menantang, dan hanya sedikit percobaan yang berhasil dilaporkan, terutama di dekat dasar awan. Deteksi jejak SF₆ dan serpihan radar terhambat oleh batas deteksi, terutama ketika konsentrasi latar belakang tinggi. Penggunaan tracer-tracer ini sebagai proxy untuk melacak massa udara yang membawa material penyemaian terbatas oleh kesulitan menghubungkan keberadaan mereka secara pasti dengan material penyemaian karena sifat non-reaktif mereka dengan partikel awan (Konwar et al., 2024).

Penyemaian awan, yang juga dikenal sebagai modifikasi cuaca, telah menjadi fokus utama penelitian dalam bidang meteorologi dan lingkungan. Teknik ini melibatkan pengenalan zat-zat tertentu ke dalam awan dengan tujuan memengaruhi pembentukan awan dan proses presipitasi. Salah satu teknik yang umum digunakan adalah penyemaian awan dengan menggunakan iodida perak untuk merangsang pembentukan kristal es di dalam awan, yang diharapkan dapat meningkatkan jumlah presipitasi. Meskipun teknik penyemaian awan telah digunakan sejak diusulkan pertama kali oleh ahli fisika atmosfer Bernard Vonnegut pada tahun 1946, masih banyak pertanyaan yang belum terjawab tentang efektivitas dan dampak lingkungan dari praktik ini. Salah satu pertanyaan utama adalah seberapa efektif teknik penyemaian awan dalam meningkatkan presipitasi. Meskipun beberapa penelitian melaporkan peningkatan presipitasi di beberapa wilayah, masih terdapat ketidakpastian mengenai sejauh mana efektivitasnya dan seberapa konsisten hasilnya. Proses penyemaian awan dimulai ketika uap air mengembun di sekitar partikel-partikel tersebut. Ketika uap air mencapai titik jenuhnya, tetesan-tetesan kecil mulai terbentuk di sekitar partikel penyemaian. Tetesan-tetesan ini kemudian berkumpul dan bertambah besar, membentuk tetesan-tetesan air yang lebih besar dan akhirnya membentuk awan.

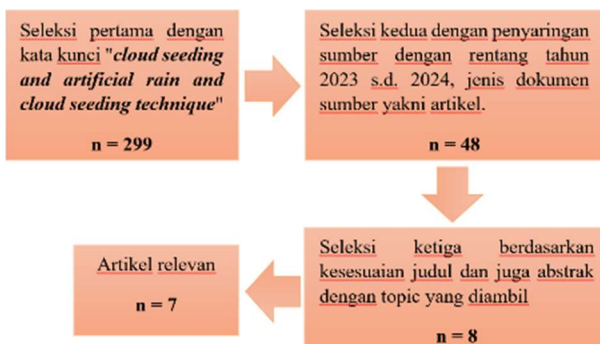
Dampak lingkungan dari penggunaan zat-zat kimia dalam penyemaian awan juga menjadi perhatian utama. Peningkatan curah hujan mempengaruhi kualitas tanah, termasuk risiko erosi dan perubahan komposisi kimia akibat bahan kimia yang digunakan dalam penyemaian awan, seperti perak iodide (Hidayat, 2023). Selain itu, penelitian ini juga perlu mengkaji dampaknya terhadap produktivitas pertanian, memastikan bahwa peningkatan hasil panen tidak disertai dengan degradasi tanah yang bisa merusak kesuburan jangka panjang. Penggunaan iodida perak atau bahan kimia lainnya dalam proses penyemaian awan dapat memiliki dampak jangka panjang terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Dalam konteks perubahan iklim global dan peningkatan frekuensi bencana alam yang terkait dengan cuaca ekstrem, pemahaman yang lebih baik tentang teknik penyemaian awan sangat penting. Oleh karena itu, artikel ini, bertujuan untuk mengidentifikasi metode penyemaian awan yang paling efektif. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang penyemaian awan, diharapkan dapat dikembangkan strategi yang lebih efektif dalam mengelola cuaca ekstrem dan mengurangi dampak bencana alam.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menerapkan metode tinjauan literatur *riview* untuk mengeksplorasi penyemaian awan dalam menghasilkan hujan buatan. Pendekatan ini melibatkan pengumpulan dan analisis literatur yang relevan dengan topik tersebut. Pengumpulan data dimulai dengan mencari sumber-sumber ilmiah khususnya jurnal ilmiah, dan publikasi dari lembaga resmi. Basis data yang digunakan untuk pencarian artikel ilmiah ini ialah Scopcus dengan kata kunci pencarian yang digunakan antara lain *cloud seeding*, *artificial rain*, *cloud seeding technique*.

Kriteria pemilihan literatur dalam penelitian ini mengaplikasikan PRISMA

sebagai panduan pelaporan. PRISMA diterbitkan pada tahun 2009 untuk membantu para peneliti menyusun tinjauan sistematis dengan transparan. Panduan ini memberikan arahan mengenai alasan di balik pelaksanaan kajian sistematis, langkah-langkah yang dilakukan oleh penulis, serta hasil dari kajian tersebut (Musa & Mahmud, 2022). Pada tahap pertama, seleksi dimulai dengan pencarian artikel menggunakan kata kunci "cloud seeding and artificial rain and cloud seeding technique" pada basis data SCOPUS dan menemukan 299 artikel. Artikel-artikel ini kemudian diseleksi dan disaring berdasarkan tahun dengan menggunakan rentang tahun 2023 hingga 2024, jenis dokumen sumber yang digunakan adalah artikel. Dari proses ini, 48 artikel terpilih untuk dikaji lebih mendalam melalui penyaringan judul serta abstraknya untuk memastikan kesesuaian dengan topik kajian, sehingga terdapat 8 jurnal yang akan dievaluasi kembali dengan penganalisisan secara menyeluruh. Proses ini merupakan proses terakhir dari penyaringan artikel, sehingga pada tahap ini menghasilkan 7 artikel yang relevan dengan topic yang diambil. Perbedaan tahapan pencarian dijelaskan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Seleksi dan Penyaringan Artikel

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil

Berdasarkan artikel yang telah disaring sesuai dengan topik, terdapat beberapa informasi singkat yang dapat disajikan seperti pada tabel 3.1.1.

Tabel 3.1.1. Informasi Singkat Artikel

Penelitian	Hasil Penemuan
(Ren et al., 2023)	Weather Research and Forecast (WRF) skala meso dengan katalitik AgI secara signifikan meningkatkan curah hujan tanah pada ketinggian 12 km di Pegunungan Qillan.
(Wan et al., 2023)	WRF dengan penyemian awan tujuh pesawat di Provinsi Hunan yang dipadukan dengan proses katalitik dapat mengevaluasi curah hujan secara efektif.
(Lin et al., 2023)	Penyemaian awan higroskopis di tingkat dalam awan dapat meningkatkan curah hujan lebih besar daripada penyemaian di dasar awan karena adanya peningkatan proses akresi..
(Wondie, 2023)	ECMWF memiliki kesesuaian tertinggi dengan observasi lapangan. Model ECMWF dipilih untuk pemodelan penyemaian awan karena menunjukkan kesesuaian terbaik dengan data observasi lapangan.
(Ro et al., 2023)	Bahan-bahan seperti es kering, kalsium klorida (CaCl ₂), dan perak iodida (AgI) digunakan dalam penyemaian awan untuk merangsang terjadinya hujan. Metode ini dilakukan melalui pesawat yang menyebarkan bahan-bahan tersebut ke dalam awan.
(Kang et al., 2023)	Hasil penelitian menunjukkan seberapa efektif dan berpotensi penggunaan teknik hujan buatan dengan menggunakan partikel aerosol higroskopis di daerah yang rawan kekeringan seperti sekitar Bendungan Boryeong.
(Ma et al., 2023)	Pemodelan WRF untuk meneliti perbandingan efisiensi pengumpulan curah hujan tambahan yang dihasilkan dari penyemaian awan di tiga cekungan bendungan yang berada di Korea.

3.2. Pembahasan

Penyemaian Awan WRF (Weather Research and Forecasting)

Model WRF (Weather Research and Forecasting) adalah model numerik yang digunakan untuk simulasi dan prediksi cuaca. Skala meso merujuk pada skala spasial dan temporal yang berada antara skala kecil (mikroskopis) dan skala besar (sinoptik), biasanya mencakup fenomena atmosfer yang berukuran dari beberapa kilometer hingga ratusan kilometer dan durasi beberapa jam hingga beberapa hari. WRF adalah model yang sangat fleksibel dan dapat disesuaikan dengan berbagai kondisi cuaca dan topografi. Penggunaan WRF dalam penyemaian awan memungkinkan peneliti untuk melakukan simulasi yang sangat detail mengenai bagaimana partikel penyemaian akan mempengaruhi awan dan curah hujan (Wan et al., 2023).

Weather Research and Forecast (WRF) skala meso yang digabungkan dengan modul katalitik awan dingin AgI (perak iodida) dapat secara signifikan meningkatkan curah hujan tanah pada ketinggian 12 km di Pegunungan Qilian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyemaian yang berlebihan dapat menimbulkan pengaruh negatif peningkatan curah hujan (Ren et al., 2023).

Perak iodida (AgI) adalah bahan kimia yang digunakan sebagai agen penyemaian awan. AgI memiliki struktur kristal yang mirip dengan es, yang membuatnya efektif sebagai inti pembentuk es dalam awan dingin. Ketika disemai ke dalam awan yang mengandung uap air superdingin (air yang tetap cair di bawah titik beku), partikel AgI akan mendorong terbentuknya kristal es. Kristal-kristal ini kemudian dapat tumbuh dan bergabung menjadi salju atau hujan, tergantung pada kondisi atmosfer (Ren et al., 2023).

Efek katalitik AgI bervariasi menurut ketinggian di Pegunungan Qilian. Efek peningkatan curah hujan paling baik

terjadi pada lapisan kelima (15 km) model, diikuti oleh lapisan keempat (12 km) dan lapisan keenam (18 km). Peningkatan kumulatif curah hujan selama 24 jam selama proses katalitik ini mencapai 9,5%. Partikel AgI yang tersebar bersentuhan dengan air awan yang sangat dingin, membeku sehingga air awan berubah menjadi kristal es. Kristal es yang meningkat tumbuh menjadi kristal salju dan setelah turun dan mencair ke tanah, terjadi pengendapan. Curah hujan dapat ditingkatkan secara signifikan dengan memasukkan katalis perak iodida dengan laju penyemaian 1,2 g/s pada posisi awan dingin dengan ketinggian 12 km. Mengingat bentang alam Pegunungan Qilian yang unik, efek katalitik lebih menguntungkan pada ketinggian air awan yang sangat dingin, suhu rendah, dan kandungan kristal es dan salju yang relatif kecil (Ren et al., 2023).

WRF dengan penyemaian awan tujuh pesawat di Profinsi Hunan yang dipadukan dengan proses katalitik dapat mengevaluasi curah hujan secara efektif. Jika kondisi uap air sesuai, perak iodida yang tersebar di udara dapat secara signifikan meningkatkan kandungan kristal es besar, salju, dan partikel hujan es di atmosfer bagian atas, yang mengakibatkan peningkatan curah hujan di dataran rendah dan curah hujan di tanah. Model WRF memiliki kesalahan tertentu dalam simulasi curah hujan resolusi tinggi, yang berasal dari berbagai sumber, termasuk kesalahan dalam bidang penggerak dan ketidakpastian dalam skema mikrofisika awan (Wan et al., 2023).

Hasil penelitian ini memberikan bukti adanya pengaruh positif proses katalitik dalam operasi penyemaian awan pesawat. Peningkatan konsentrasi inti kristal es, bersamaan dengan pembentukan tetesan awan besar, berkontribusi pada peningkatan curah hujan secara keseluruhan. Memahami mekanisme ini sangat penting untuk mengoptimalkan strategi penyemaian awan dan

meningkatkan kemampuan kita memanipulasi pola curah hujan dengan cara yang tepat sasaran (Wan et al., 2023).

Adanya hasil penelitian lain yang dilakukan dengan membahas tentang perbedaan pengaruh penyemaian awan di tiga cekungan bendungan yang terdapat di Korea. Dengan menggunakan metode WRF untuk membandingkan efisiensi pengumpulan curah hujan tambahan yang dihasilkan dari penyemaian awan di tiga cekungan tersebut. Data curah hujan yang dihasilkan dari simulasi ini digunakan untuk analisis lebih lanjut. Peneliti juga menguji berbagai skenario peningkatan curah hujan (5%, 10%, 15%, dan 20%) menggunakan data curah hujan yang dihasilkan oleh model WRF sebelumnya. Hal ini dilakukan untuk mengevaluasi dampak penyemaian awan dalam kondisi peningkatan curah hujan yang berbeda (Ma et al., 2023).

Hasil penelitian yang dapat membuktikan bahwa penyemaian awan dapat meningkatkan curah hujan di berbagai lokasi. Peningkatan ini berkisar antara 5-20% tergantung pada wilayah percobaan, periode, dan teknik yang diterapkan. Misalnya, di wilayah seperti Wyoming, North Dakota, dan California, peningkatan curah hujan berkisar antara 5-15%, sementara di Australia dan Israel peningkatan tersebut bisa mencapai 30%, sehingga penyemaian awan dapat memberikan kontribusi signifikan pada satu bendungan namun hanya sedikit pada bendungan lainnya, tergantung pada karakteristik masing-masing bendungan dan daerah aliran sungainya (Ma et al., 2023).

Masalah lingkungan seperti kekeringan dan kekurangan air telah menjadi ancaman serius bagi penduduk Ethiopia, sering kali menyebabkan kelaparan dan ketidakcukupan pangan. Oleh karena itu, teknologi cloud-seed dianggap sebagai solusi yang potensial untuk mengatasi tantangan ini dengan

memberikan tambahan curah hujan yang diperlukan untuk mendukung pertanian dan ketahanan pangan negara tersebut. Model cloud-seeded diperiksa dengan aplikasi langsung dari penyaring tanah dan operasi areal pesawat terbang di bagian selatan dan utara Ethiopia dari tahun 2021 hingga 2022 selama musim semi dan musim gugur. Dengan memanfaatkan teknologi cloud-seed, negara-negara dengan keterbatasan sumber daya seperti Ethiopia dapat menggunakan sumber daya alam yang ada (seperti awan) untuk menghasilkan air yang dibutuhkan untuk pertanian, tanpa harus bergantung pada sumber daya air yang langka. Hasil analisis menunjukkan bahwa data dari ECMWF memiliki kesesuaian tertinggi dengan observasi lapangan dibandingkan model lainnya. Model ECMWF dipilih untuk pemodelan penyemaian awan karena menunjukkan kesesuaian terbaik dengan data observasi lapangan (Wondie, 2023).

Penyemaian Awan Higroskopis

Penyemaian awan higroskopis adalah teknik yang digunakan untuk memodifikasi cuaca, khususnya untuk meningkatkan curah hujan di daerah yang mengalami kekeringan atau untuk mengelola persediaan air. Teknik ini melibatkan penyebaran bahan-bahan higroskopis, seperti garam (natrium klorida) atau bahan kimia lainnya, ke dalam awan. Bahan-bahan ini memiliki kemampuan untuk menyerap kelembaban dari udara, yang dapat menyebabkan pembentukan tetesan air yang lebih besar dan mempercepat proses kondensasi sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya hujan (Lin et al., 2023).

Penyemaian awan higroskopis dilakukan dengan menggunakan drone. Penyemaian awan higroskopis di tingkat dalam awan dapat meningkatkan curah hujan lebih besar daripada penyemaian di dasar awan karena adanya peningkatan proses akresi. Dengan memasukkan

partikel higroskopis ke dalam domain yang lebih besar atau dengan konsentrasi yang lebih tinggi secara efisien dapat meningkatkan curah hujan. Keberhasilan penyemaian awan higroskopis sangat bergantung pada kondisi cuaca dan lingkungan serta hanya efektif jika ada awan yang cukup mengandung uap air (Lin et al., 2023).

Penelitian ini, melakukan simulasi numerik hujan buatan menggunakan bahan higroskopis (CaCl₂, NaCl) yang berpusat di sekitar Bendungan Boryeong di Kota Boryeong, Provinsi Chungnam, Korea Selatan. Wilayah Chungnam sering mengalami kekeringan parah sejak tahun 2000, dan telah dikonfirmasi bahwa Bendungan Boryeong, yang memasok air untuk pertanian dan industri, rentan karena curah hujan dan aliran masuk yang tidak mencukupi (Kang et al., 2021). Selain itu, menganalisis sensitivitas peningkatan hujan buatan terhadap perubahan durasi dan jumlah penyemaian dari dua bahan penyemaian di area sekitar lokasi penelitian. Selanjutnya, untuk memilih periode penelitian yang lebih efisien untuk tujuan penelitian, kami menganalisis peta cuaca sinoptik untuk musim semi tahun 2021, yang menunjukkan peningkatan hujan buatan tertinggi selama tahun tersebut. Hasilnya, 3 April 2021, dipilih sebagai tanggal studi kasus, di mana tekanan rendah melewati area Bendungan Boryeong di Provinsi Chungnam, menghasilkan hujan terus menerus selama 11 jam.

Memvalidasi simulasi numerik, analisis statistik dilakukan menggunakan data meteorologi (suhu, kecepatan angin,

kelembapan relatif, dan curah hujan) dari enam stasiun Automated Synoptic Observing System (ASOS) dan 32 stasiun Automatic Weather Station (AWS) di wilayah Chungnam selama periode penelitian (titik pengamatan ditunjukkan pada Gambar 1). Untuk elemen meteorologi suhu, kecepatan angin, dan kelembapan relatif, Indeks Kesepakatan (Index of Agreement, IOA), Root Mean Square Error (RMSE), dan Mean Bias Error (MBE) dihitung dan digunakan untuk analisis. IOA yang mendekati 1 menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi antara nilai model dan nilai yang diamati, sementara RMSE dan MBE yang mendekati 0 menunjukkan kesalahan yang lebih rendah (Kang et al., 2023).

4. Kesimpulan

Berdasarkan tinjauan literatur yang telah dilakukan dengan menganalisis 7 artikel relevan terdapat beberapa metode yang digunakan untuk penyemaian awan yakni metode penyemaian awan WRF (Weather Research and Forecasting), penyemaian awan higroskopis, dan penyemaian awan ECMWF. Berdasarkan hasil analisis kelebihan dan kekurangan dari ketiga metode penyemaian awan tersebut metode penyemaian awan yang paling efektif adalah metode WRF karena metode ini sangat fleksibel dan dapat disesuaikan dengan berbagai kondisi cuaca dan topografi. Selain itu dari ke tujuh artikel relevan yang dianalisis 4 di antaranya menerapkan metode WRF. Sehingga metode WRF efektif untuk penyemaian awan.

Daftar Pustaka

- Hidayat, A. (2023). Dampak Perubahan Iklim Terhadap Pertanian Dan Strategi Adaptasi Yang Diterapkan Oleh Petani (2). Universitas Medan Area, 1–11.
- Konwar, M., Werden, B., Fortner, E. C., Bera, S., & Varghese, M. (2024). Identifying the seeding signature in cloud particles from hydrometeor residuals. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2387–2400.

- Kang, C. Y., Song, S. K., Moon, S. H., Lim, Y. K., Chang, K. H., & Chae, S. (2023). Effect of Cloud Seeding Using Hygroscopic Aerosol Particles on Artificial Rainfall Enhancement and Its Sensitivity Analysis in Spring 2021. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(3), 335–350. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.3.335>
- Lin, K. I., Chung, K. S., Wang, S. H., Chen, L. H., Liou, Y. C., Lin, P. L., Chang, W. Y., Chiu, H. J., & Chang, Y. H. (2023). Evaluation of hygroscopic cloud seeding in warm-rain processes by a hybrid microphysics scheme using a Weather Research and Forecasting (WRF) model: a real case study. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(18), 10423–10438. <https://doi.org/10.5194/acp-23-10423-2023>
- Ma, J. H., Yoo, C., Song, S. U., Na, W., Cho, E., Song, S. K., & Chang, K. H. (2023). Different Effect of Cloud Seeding on Three Dam Basins, Korea. *Water*, 15(14), 2555. <https://doi.org/10.3390/w15142555>
- Musa, M., & Mahmud, M. S. (2022, November 30). Strategi Pengajaran Matematik dalam Bahasa Inggeris sebagai Bahasa Kedua: Sebuah Kajian Literatur Sistematis. *Malaysian Journal of Social Sciences and Humanities (MJSSH)*, 7(11), e001900. <https://doi.org/10.47405/mjssh.v7i11.1900>
- Ren, J., Zhang, W., Kou, M., Ma, Y., & Zhang, X. (2023). A Numerical Study of Critical Variables on Artificial Cold Cloud Precipitation Enhancement in the Qilian Mountains, China. *Atmosphere*, 14(7), 1–17. <https://doi.org/10.3390/atmos14071086>
- Ro, Y., Chang, K. H., Chae, S., Lim, Y. K., Ku, J. M., & Jung, W. (2023). Estimation of the Total Amount of Enhanced Rainfall for a Cloud Seeding Experiment: Case Studies of Preventing Forest Fire, Drought, and Dust. *Advances in Meteorology*, 2023(2), 1–18. <https://doi.org/10.1155/2023/5478666>
- Wan, X., Zhou, S., & Fan, Z. (2023). Comprehensive Efficiency Evaluation of Aircraft Artificial Cloud Seeding in Hunan Province, China, Based on Numerical Simulation Catalytic Method. *Atmosphere*, 14(7), 1–12. <https://doi.org/10.3390/atmos14071187>
- Wondie, M. (2023). Modeling cloud seeding technology for rain enhancement over the arid and semiarid areas of Ethiopia. *Heliyon*, 9(4), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14974>