

PERANAN BAHAN SEMAI HIGROSKOPIS DALAM PENYEMAIAN AWAN

Tri Handoko Seto¹

INTISARI

Dalam setiap kegiatan penyemaian awan, faktor yang sangat menentukan adalah penggunaan bahan semai. Berbagai jenis bahan semai telah dibuat untuk keperluan ini. Akan tetapi secara mendasar terdapat dua jenis bahan semai, yaitu bahan semai higroskopis untuk penyemaian awan panas dan bahan semai inti es yang digunakan dalam penyemaian awan dingin. Bahan semai higroskopis banyak digunakan di daerah tropis sedangkan bahan semai inti es banyak digunakan di daerah lintang tinggi sesuai dengan karakteristik awan yang biasa tumbuh di masing-masing daerah tersebut. Tulisan ini mengkaji peranan atau kinerja bahan semai higroskopis dalam awan panas. Kajian literatur ini diharapkan dapat dijadikan bahan pertimbangan bagi berbagai pengambilan keputusan atau kebijakan yang berkaitan dengan penyemaian awan panas.

ABSTRACT

The main factor on every cloud seeding activity is seeding agent. Many kinds of seeding agent were produced for this need, but basically there are two kinds of seeding agent: hygroscopic seeding agent for warm cloud seeding activity and ice nuclei seeding agent for cold cloud seeding activity. Hygroscopic seeding agent has been using mostly in tropic region and ice nuclei has been using mostly in high latitude region because of cloud characteristic that usually grow on that regions. This article assesses how hygroscopic seeding agent works in warm cloud. Hopefully, this literature assessment can be used to be a reference to make decisions in conducting warm cloud seeding activity.

Kata kunci: bahan semai higroskopis, penyemaian awan panas, inti kondensasi.

1. PENDAHULUAN

Sangat banyak permasalahan yang menantang untuk terus-menerus dilakukan pengkajian terhadap segala aspek yang berhubungan dengan teknologi modifikasi cuaca

khususnya penyemaian awan untuk menambah curah hujan. Jumlah dan ukuran bahan semai dan kriteria kelayakan awan untuk disemai merupakan masalah besar yang harus diselesaikan dan diperbaiki secara terus menerus. Namun untuk mengarah pada permasalahan besar itu perlu

¹ UPT Hujan Buatan BPP Teknologi, Jl. M.H. Thamrin No. 08, Jakarta 10340

dilakukan kajian-kajian baik berupa analisis data penelitian maupun review berbagai teori yang telah diuji kesahihannya dan dipublikasikan ke jurnal maupun buku. Analisis data penelitian diperlukan untuk mendapatkan hal-hal baru yang mengarah pada pemecahan masalah besar di atas. Review diperlukan untuk mengkompilasi berbagai teori dari literatur agar terdapat alur dan dasar yang semakin jelas dalam menyelesaikan permasalahan.

Tulisan ini merupakan kajian tentang peranan bahan semai dalam penyemaian awan. Dalam tulisan ini diungkapkan secara agak detail tentang perilaku bahan semai dalam awan dari berbagai ukuran pada kondisi awan dengan updraft dan tingi dasar awan yang berbeda-beda. Hal ini diperlukan untuk semakin memahami peristiwa yang sebenarnya terjadi ketika bahan semai dihantarkan ke sistem awan. Pemahaman perilaku bahan semai dalam awan akan menumbuhkan pemikiran yang lebih baik tentang bagaimana seharusnya bahan semai dihantarkan, berapa sebaiknya ukuran bahan semai, dan seberapa banyak bahan semai sebaiknya dihantarkan, tentunya dengan melalui analisis yang lebih jauh lagi.

2. PERAN CCN DALAM PEMBENTUKAN AWAN

Partikel-partikel di dalam awan terbentuk oleh suatu proses yang disebut sebagai nukleasi, di mana molekul-molekul air berubah dari status orde rendah ke orde tinggi. Misalnya, molekul uap di udara secara bersamaan membentuk tetes fase cair oleh peluang tumbukan. Untuk melihat bagaimana proses ini terjadi, perhatikan kondisi yang diperlukan untuk pembentukan tetes air murni dari uap air. Proses ini disebut nukleasi homogen untuk membedakannya dari kasus nukleasi heterogen. Menurut Houze (1993), jika tetes embrio dari air murni berjejari R , maka energi

yang diperlukan untuk menyelesaikan nukleasi adalah:

$$\Delta E = 4\pi R^2 \sigma_{vl} - 4\pi R^3 n_l (\mu_v - \mu_l) \quad (1)$$

Suku pertama ruas kanan merupakan kerja yang diperlukan untuk membentuk permukaan antarmuka cair-uap sekeliling tetes. Suku kedua merupakan tambahan energi karena perubahan molekul dari uap menjadi cair.

Pada kondisi di mana perubahan R tidak lagi mengakibatkan perubahan E atau $\delta(\Delta E)/\delta R = 0$ maka diperoleh jari-jari kritis:

$$R_c = 2\sigma_{vl} / n_l kBT \ln(e/es) \quad (2)$$

yang merupakan formula Kelvin. Jari-jari ini secara krusial bergantung pada kelembaban relatif ($e/es \times 100\%$). Udara dikatakan jenuh jika kelembaban relatifnya 100%.

Bagaimanapun juga jelas bahwa **tidak terdapat kemungkinan suatu tetes awan terbentuk dalam kondisi jenuh karena $R_c \gg 1$ untuk $e/es \approx 1$** . Tetes awan hanya dapat terbentuk dalam udara lewatjenuh ($e/es > 1$) agar R_c positif. Semakin lewatjenuh udaranya maka semakin kecil ukuran tetes yang harus dilampaui. Dalam udara dengan kandungan uap air murni, diperlukan kondisi lewatjenuh 300-400% untuk terjadinya nukleasi homogen. Karena lewatjenuh di atmosfer jarang yang melampaui 1% maka nukleasi homogen tidak memegang peranan dalam pembentukan awan.

Nukleasi heterogen merupakan proses terjadinya tetes awan yang sebenarnya. Di atmosfer banyak terdapat partikel-partikel aerosol kecil, dan molekul uap air pada permukaan aerosol tersebut. Jika tekanan permukaan antara air dan permukaan nukleasi cukup rendah maka inti dikatakan terbasahkan (*wettable*), dan air membentuk cap cembung seperti permukaan bola

pada permukaan partikel ini. Partikel di mana molekul-molekul berkumpul seperti ini disebut sebagai CCN (*cloud condensation nukleus*).

Jika CCN tidak larut dalam air (*insoluble*) maka proses pembentukan embrio tetes awan masih sama dengan kasus nukleasi homogen. Dapat ditunjukkan bahwa pers.(2) masih berlaku tetapi R_c memiliki interpretasi yang lebih umum yang mengacu pada jari-jari kritis kelengkungan embrio tetes. Karena jari-jari kelengkungan tetes yang terbentuk pada partikel lebih besar daripada jika partikel tidak ada maka agregasi molekul-molekul uap air berpeluang lebih besar untuk menghasilkan tetes yang besarnya melampaui jari-jari kritis.

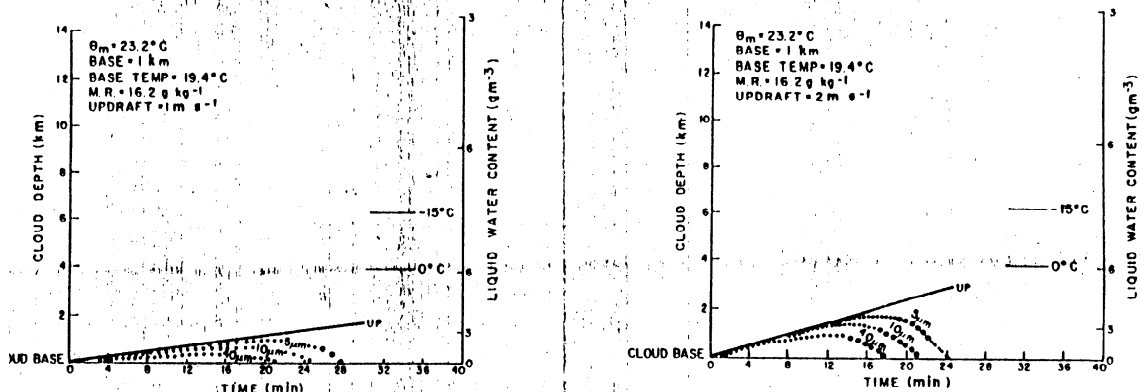
Jika CCN tersusun atas material yang larut dalam air (*soluble*) maka proses nukleasi akan jauh lebih mudah. Karena tekanan uap jenuh pada larutan cair secara umum lebih rendah daripada tekanan uap jenuh pada permukaan air murni (e/e_s meningkat). Sesuai dengan pers.(2) maka jari-jari kritis menjadi lebih kecil.

3. PERILAKU BAHAN SEMAI DALAM AWAN

Sebuah model tumbukan dan penggabungan satu dimensi telah dikembangkan oleh Klazura and Todd pada tahun 1978. Model ini

menggambarkan pertumbuhan suatu partikel presipitasi tunggal dalam lingkungan awan dengan berbagai kondisi yang spesifik. Karena banyaknya faktor interaksi yang menentukan karakteristik awan maka beberapa asumsi dilakukan secara hati-hati. Pengamatan pertumbuhan hidrometeor tunggal dalam pengaruh karakteristik awan yang berbeda memberikan sebuah pendugaan yang baik tentang kesimpulan umum yang digambarkan.

Model ini lebih jauh memberikan gambaran tentang bagaimana bahan semai higroskopis yang tidak bersaing (*non competing hygroscopic*) yang dilepaskan di bagian updraft tepat di dasar awan kemudian bergerak ke atas hingga kembali mencapai dasar awan. Kondensasi dan tumbukan terjadi hingga partikel tumbuh mencapai diameter 100 mikron. Persaingan antara bahan semai higroskopis dengan inti kondensasi alamiah harus diminimalisasi karena rendahnya densitas bahan semai memang diperlukan (dalam orde 1 per liter). Pada tahun 1972 Biswas and Dennis dalam bukunya *Calculations Related to Formation of Rainshower by Salt Seeding* menyatakan bahwa distribusi ukuran butir hujan dalam pengaruh penyemaian awan tidak jauh berbeda dari hal serupa dengan tidak adanya pengaruh penyemaian awan.



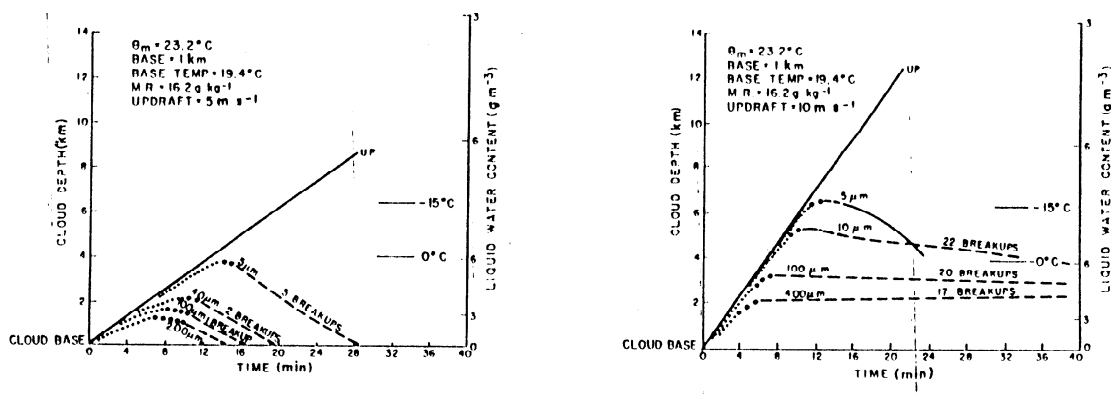
Gambar 1. Bahan semai dalam awan di mana tinggi dasar awan 1 km dengan updraft 1 m/s (kiri) dan 2 m/s (kanan). (Diambil dari Klazura and Todd (1978).)

Pada gambar 1 s.d. 5 terlihat bahwa partikel-partikel higroskopis dengan ukuran yang bervariasi (5 – 400 mikron) bergerak naik dari dasar awan dengan kecepatan yang hampir sama dengan updraft, segera jatuh ke dasar lagi ketika mencapai ukuran yang lebih besar. Partikel-partikel pada gambar 1 (kiri) hanya naik sejauh 0,5 – 1,0 km ke dalam awan dan kemudian jatuh ke dasar awan dalam waktu 21 – 28 menit setelah diameternya menjadi 0,6 – 1,5 mm. Ada catatan menarik di sini, bahwa **bahan semai terkecil (mula-mula 5 mikron) mencaapai titik tertinggi dan berada paling lama dalam awan**, jika dibandingkan dengan bahan semai yang lebih besar.

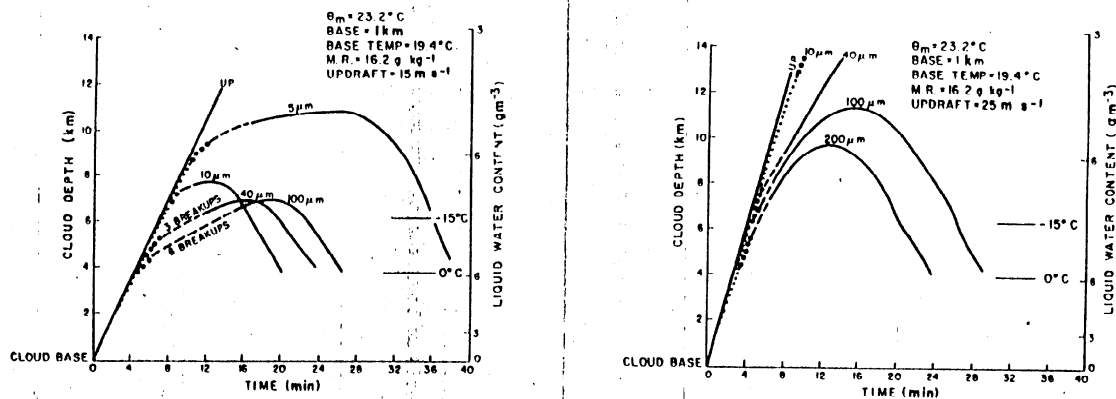
Pola yang sama juga nampak pada gambar 1 (kanan) dengan updraft yang lebih besar (2 m/s). Di sini waktu yang diperlukan oleh bahan semai meningkat sekitar 4 menit dan ukuran diameter tetes menjadi lebih besar (2 – 4 mm). Dalam kasus ini, hidrometeor mencapai level 500 m lebih tinggi di dalam awan dan mengalami proses penggabungan dengan lebih cepat karena kandungan air cair (LWC: *liquid water contents*) yang lebih tinggi.

Gambar 2 menggambarkan suatu fenomena yang dipercaya memberikan sumbangan terhadap

keberhasilan penyemaian awan panas. Updraft yang cukup besar (5 – 10 m/s) mendukung bahan semai untuk mencapai level yang lebih tinggi dalam awan. Ketika tetes hujan mencapai ukuran yang besar (sekitar 5 mm) maka ia akan terpecah menjadi beberapa tetes yang lebih kecil. Tetes-tetes kecil ini akan terangkat oleh gerak udara secara vertikal ke dalam awan untuk kemudian tumbuh menjadi besar dan terpecah lagi. Proses ini terjadi berulang-ulang dan membentuk reaksi berantai Langmuir. Dalam gambar 2 (kiri) bahan semai ukuran 5 – 40 mikron naik pada level yang cukup tinggi untuk kemudian jatuh sambil terpecah, dan akhirnya mencapai dasar awan dalam waktu 19 – 28 menit menjadi beberapa tetes dengan diameter 2,5 – 5 mm. Bagaimanapun juga untuk bahan semai higroskopis yang lebih dari 100 mikron, mekanisme terpecahnya tetes hujan tidak terjadi karena tetes lebih cepat tumbuh menjadi 5 mm dan lebih cepat mencapai dasar awan. Pada kasus updraft 10 m/s (gb 2 (kanan)) daerah akumulasi tetes besar berada pada 2 – 5 km di atas dasar awan untuk bahan semai 10 – 400 mikron. Sedangkan bahan semai ukuran 5 mikron akan naik cukup tinggi di awan dan lebih cepat membeku untuk mencapai diameter 5 mm dan tidak terpecah.



Gambar 2. Bahan semai dalam awan dengan tinggi dasar 1 km updraft 5 m/s (kiri) dan 10 m/s (kanan). (Diambil dari Klazura and Todd. (1978).)



Gambar 3. Bahan semai dalam awan dengan tinggi dasar 1 km updraft 15 m/s (kiri) dan 25 m/s (kanan). (Dari Klazura and Todd (1978).)

Semua partikel pada gambar 3 (kiri) yang updraftnya besar (15 m/s) naik tinggi hingga membeku dan tumbuh cukup besar untuk jatuh menembus updraft dan muncul sebagai tetes es 1 – 3 cm. Akan tetapi nampak pada gambar bahwa bahan semai 40 dan 100 mikron lebih banyak menghasilkan butir presipitasi karena terjadinya perpecahan menjadi 3 dan 6 kali sebelum membeku. Gambar 3 (kanan) menggambarkan kasus updraft yang sangat kuat (25 m/s). Sebagaimana yang diharapkan maka bahan semai yang lebih kecil semua terlempar ke puncak awan, sementara untuk bahan semai 100 dan 200 mikron tumbuh membesar dan jatuh lagi menembus updraft sebagai tetes es batu.

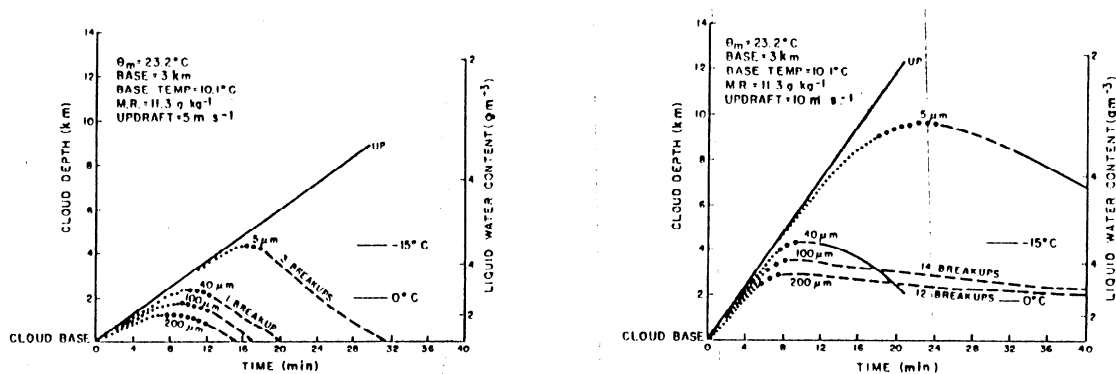
Pola umum yang sama juga nampak pada awan dengan dasar yang tinggi, yang biasanya terdapat pada wilayah daratan luas / benua. Perilaku bahan semai pada awan jenis ini dengan berbagai variasi updraft terdapat pada gambar 4 dan 5. Karena awan jenis ini hampir tidak pernah ada di Indonesia maka di sini tidak disertakan uraian mengenai perilaku bahan semainya. Akan tetapi dengan cara analisis seperti pada jenis awan rendah maka cukup mudah untuk dipahami.

4. PERAN BAHAN SEMAI DALAM PENYEMAIAN AWAN

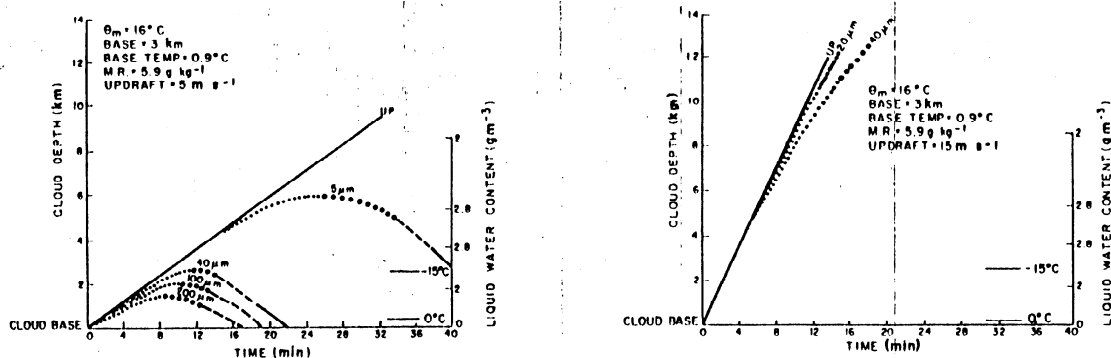
4.1. Sebagai Inti Kondensasi

Sebagaimana telah dijelaskan bahwa partikel-partikel di dalam awan terbentuk oleh suatu proses yang disebut sebagai nukleasi, di mana molekul-molekul air berubah dari status orde rendah ke orde tinggi, misalnya gas berubah fase menjadi cair. Dalam proses ini sangat diperlukan adanya inti kondensasi. Inti kondensasi dapat berupa aerosol alamiah yang berasal dari polutan yang banyak terdapat di atmosfer. Dapat dibayangkan apa yang terjadi jika tidak terdapat inti kondensasi di atmosfer. Sangat sulit bahkan hampir mustahil untuk dapat terbentuknya awan (khususnya awan berpotensi hujan) jika tidak ada inti kondensasi.

Mengacu pada kondisi yang seperti inilah maka penyemaian awan yang lebih dikenal dengan hujan buatan sering dikatakan sebagai penambahan inti kondensasi ke dalam awan. Kalau dilihat definisi awan, awan adalah kumpulan uap air yang telah mengondensasi. Yang menjadi pertanyaan adalah apa gunanya inti kondensasi yang diberikan pada sesuatu (awan) yang telah mengalami proses kondensasi. Ada sedikit jawaban untuk pertanyaan ini, yaitu bahwa tidak semua bagian awan telah mengalami kondensasi. Ada sebagian yang masih dalam fasa gas.



Gambar 4. Bahan semai dalam awan dengan tinggi dasar 3 km updraft 5 m/s (kiri) dan 10 m/s (kanan). (Diambil dari Klazura and Todd (1978).)



Gambar 5. Bahan semai dalam awan dengan tinggi dasar 3 km updraft 5 m/s (kiri) dan 15 m/s (kanan). (Diambil dari Klazura and Todd (1978).)

Karena masih belum banyaknya penulis mendapatkan referensi tentang masalah tersebut maka untuk sementara waktu peranan bahan semai sebagai inti kondensasi ditangguhkan. Masalah ini akan penulis kaji pada tulisan yang lain.

4.2. Meningkatkan Efektifitas dan Efisiensi Tumbukan dan Penggabungan

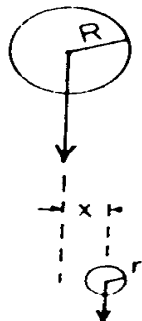
4.2.1. Tumbukan dan Penggabungan

Tumbukan dapat terjadi akibat respon yang berbeda dari tiap-tiap tetes terhadap gaya gravitasi, listrik, dan aerodinamik. Gaya gravitasi memberikan dampak yang menonjol dalam awan,

yaitu tetes yang lebih besar akan jatuh lebih cepat sehingga menabrak dan berpeluang untuk menangkap yang lebih kecil. Medan listrik dan turbulen diperlukan untuk menghasilkan tumbukan yang lebih kuat. Pada saat jatuh, tetes hanya akan menumbuk suatu fraksi dari tetes-tetes di lintasannya karena yang lain akan tersapu oleh aliran udara sekitar tetes. Perbandingan jumlah tumbukan dengan jumlah sapuan geometri lengkap (complete geometric sweep out) disebut efisiensi tumbukan, dan sangat tergantung kepada ukuran tetes penumbuk dan ukuran tetes-tetes tertumbuk. Proses tumbukan tidak menjamin terjadinya penggabungan. Ketika sepasang tetes bertumbukan maka ada beberapa kemungkinan yang akan terjadi, yaitu:

- Tetes-tetes saling melenting
- Tetes-tetes saling menggabung dan secara permanen tetap menyatu
- Tetes-tetes saling menggabung dan kemudian berpisah lagi seperti kondisi awal
- Tetes-tetes saling menggabung dan kemudian pecah menjadi sejumlah tetes-tetes kecil.

Jenis interaksi yang terjadi tergantung pada ukuran tetes-tetes dan lintasan tumbukan, dan dipengaruhi oleh keberadaan gaya listrik dan faktor eksternal. Untuk ukuran radius tetes yang kurang dari 100 mikron interaksi yang penting adalah interaksi no.1 dan 2. Perbandingan jumlah penggabungan dengan jumlah tumbukan disebut efisiensi pengumpulan (*collection efficiency*), yang merupakan hasil dari efisiensi tumbukan dan efisiensi penggabungan. Studi laboratorium pada tetes-tetes kecil yang bertumbukan menunjukkan bahwa efisiensi penggabungan mendekati satu terdapat medan listrik.



Gambar 6. Geometri tumbukan, Rogers (1979).

4.2.2. Efisiensi Tumbukan

Sebuah tetes dengan jari-jari R ditunjukkan pada gambar 6 akan menumbuk tetes dengan jari-jari r . Jika tetes kecil mempunyai inersia nol maka ia akan tersapu oleh aliran udara di sekitar tetes besar dan tumbukan tidak terjadi. Apakah tumbukan dapat terjadi, tergantung pada gaya inersia dan gaya aerodinamika serta jarak x antara kedua tetes yang disebut dengan parameter

impact. Untuk nilai R dan r yang tertentu maka terdapat nilai parameter impact kritis, x_0 di mana tumbukan masih bisa terjadi dan lebih dari itu maka tumbukan tidak terjadi.

Efisiensi tumbukan didefinisikan sebagai

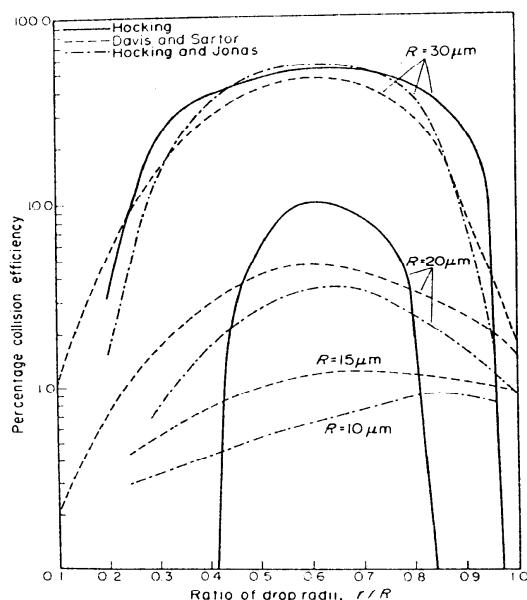
$$E(R,r) = x_0^2 / (R+r)^2 \quad (3)$$

Secara fisis efisiensi tumbukan didefinisikan sebagai fraksi dari tetes-tetes dengan jari-jari r yang tersapu oleh tetes pengumpul. Dapat juga diartikan bahwa E merupakan probabilitas terjadinya tumbukan antara tetes pengumpul dengan tetes kecil dalam jarak sapuan dalam parameter impact. Jadi $E \leq 1$. Gambar 7 memperlihatkan efisiensi tumbukan.

Dengan memperhatikan pola gambar 7 terlihat bahwa pada umumnya efisiensi tumbukan sangat ditentukan oleh perbandingan ukuran tetes-tetes R dan r . Pertanyaan logis yang muncul kemudian adalah apa peran bahan semai dalam meningkatkan efisiensi tumbukan yang tentunya juga akan meningkatkan efisiensi penggabungan? Marilah kita kembali mengacu pada gambar 1 s.d. 5. Akibat sifat higroskopisnya maka tetes-tetes awan yang diberi perlakuan (disemai) akan cepat membesar. Dari gambar 7 pula dapat dilihat bahwa untuk tetes-tetes yang berukuran lebih besar maka efisiensi tumbukan juga meningkat. Walaupun masih dipengaruhi oleh perbandingan ukuran tetes-tetes R dan r , akan tetapi pengaruhnya tidaklah sekuat pada tetes-tetes yang lebih kecil.

Jika kita mengacu pada persamaan (3) maka yang terlihat seolah-olah adalah hal yang kontradiktif. Dengan bertambahnya R dan atau r maka bilangan pembagi menjadi lebih besar, yang berarti bahwa efisiensi semakin menurun. Akan tetapi juga harus diingat bahwa parameter impact x_0 juga bukan merupakan konstanta, melainkan fungsi dari R dan r . Dengan melihat gambar 7,

dimana efisiensi terbesar dicapai oleh tetes berjari-jari R besar (30 mikron) maka dapat dipastikan bahwa semakin besar R maka semakin besar pula parameter impactnya sedemikian sehingga efisiensinya menjadi lebih besar.



Gambar 7. Efisiensi tumbukan yang dihitung oleh Hocking (1959), Davis and Sator (1967), dan Hocking and Jonas (1970) dari Rogers (1979)

5. KESIMPULAN

1. Partikel-partikel di dalam awan terbentuk oleh suatu proses yang disebut sebagai nukleasi, di mana molekul-molekul air berubah dari status orde rendah ke orde tinggi, misalnya gas berubah fase menjadi cair. Dalam proses ini sangat diperlukan adanya inti kondensasi. Inti kondensasi dapat berupa aerosol alamiah

yang berasal dari polutan yang banyak terdapat di atmosfer.

2. Bahan semai higroskopis dengan ukuran yang bervariasi (5 – 400 mikron) bergerak naik dari dasar awan dengan kecepatan yang hampir sama dengan updraft, segera jatuh ke dasar lagi ketika mencapai ukuran yang lebih besar. Bahan semai terkecil (mula-mula 5 mikron) mencapai titik tertinggi dan berada paling lama dalam awan, jika dibandingkan dengan bahan semai yang lebih besar.
3. Bahan semai higroskopis sangat membantu memperbesar ukuran butir awan akibat sifatnya sehingga dapat meningkatkan efisiensi tumbukan yang tentunya juga meningkatkan efisiensi penggabungan. Akibat proses tersebut maka bahan semai higroskopis dapat meningkatkan dinamika awan yang pada akhirnya meningkatkan curah hujan.

DAFTAR PUSTAKA

- Klazura G.E. and Todd C.J., 1978, *A Model of Hygroscopic seeding in Cumulus Clouds*, Journal of Applied Meteorology, Vol.17 No. 12, December 1978
- Robert A. Houze, Jr., 1993, *Cloud Dynamics*, Academic Press, Inc., San Diego, California.
- Rogers R.R., 1979, *A short Course in Cloud Physics 2nd edition*, Pergamon Press, Great Britain

DATA PENULIS



Tri Handoko Seto, lahir di Banyuwangi pada 12 Desember 1971, menyelesaikan sarjana fisika di Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Brawijaya Malang Agustus 1995 setelah menempuh studi selama 3 tahun 11 bulan. Bekerja di BPPT mulai Oktober 1996.