

TEKNOLOGI MODIFIKASI CUACA YANG EFEKTIF DAN EFISIEN

Untung Haryanto¹

INTISARI

Terdapat beberapa tahapan klasik yang selalu dilakukan pada kegiatan penyemaian yang dilaksanakan oleh UPT Hujan Buatan yaitu penentuan waktu pelaksanaan, penyiapan bahan semai (termasuk di dalamnya adalah produksi, mobilisasi, dan mempertahankan ukuran atau packing.). Ketika sudah berada di lapangan pelaksana dihadapkan pada penentuan atau pemilihan awan yang disemai dan teknik penyebarannya, waktu dan lokasi penyemaian dalam kaitannya dengan obyek awan. Pada tahap akhir, kegiatan yang dilakukan berupa evaluasi, yang sementara ini baru menggunakan teknik statistik. Teknik evaluasi statistik yang digunakan terkadang tidak berhasil mendeteksi tambahan curah hujan baik pada jaringan penakar hujan ataupun tambahan inflow pada sistem catchment. Dari beberapa tahapan tersebut, beberapa di antaranya kerap kali dirasa sebagai kendala baik dari sisi pandang user maupun pelaksana karena tidak "efektif dan efisien". Salah satu hal yang sering dipersalahkan adalah cuaca : angin yang kuat, tidak ada awan potensial. Dari tinjauan proses hujan yang terjadi di dalam awan, dasar ilmiah manipulasi proses, dan dipadukan dengan status teknologi modifikasi cuaca yang dilaksanakan beberapa tempat di dunia hingga tahun 1999, disimpulkan bahwa teknologi modifikasi cuaca yang efektif dan efisien dapat dicapai melalui dua pendekatan yaitu pertama menjadikan teknologi modifikasi cuaca sebagai bagian integral pengelolaan sumberdaya air, dan kedua menerapkan pemakaian "new cloud seeding device", serta pemakaian sarana yang sesuai untuk kebutuhan operasional.

ABSTRACT

There were some classical operational steps on each cloud seeding operational carried out by UPT Hujan Buatan that was determine the initial of operational day, preparing and handling seeding agent, and the last was overall evaluation. During the operational day, incharge person on the field should be decided when he must seed and where, which cloud to be choosed, and how much seeding agent must be injected into the cloud on the

¹ UPT Hujan Buatan, BPP Teknologi, Tlp. 316-8932; email: untungh@bppt.go.id

right time and the right place. Some time, the evaluation based on statistical could not detect the additional rainfall or river discharge on catchment. Some of those steps looks like in view of user or operator as constraint because its ineffective and inefficient. The frequent of unfavourable weather and strong wind during operational day caused the absence of potential cloud. Base on rain process knowledge and its manipulation it was concluded that an effective and efficient cloud seeding operational could be reached by two approaches that is firstly: carried out the cloud seeding operational as an integral part of water resources management, and secondly : by using a "new cloud seeding device", and using the proper tools and equipment for operational.

Kata Kunci : Modifikasi cuaca, tumbukan-penggabungan, radar, flare-pyrotechnics.

1. PENDAHULUAN

Effective menurut kamus Inggris adalah mampu untuk membawa ke arah tujuan, sedangkan *efficient* adalah unjuk kerja yang baik dalam mencapai tujuan (Hornby et.al, 1964). Jadi efektif dan efisien menurut penulis adalah unjuk kerja yang mampu mencapai tujuan, dengan tepat waktu atau lebih cepat dari jadwal yang ditentukan. Suatu tujuan memang bisa dicapai secara singkat atau tepat waktu bila pelaksanaannya mempunyai attitude dan kemampuan yang tinggi serta didukung oleh suasana dan sarana yang memadai. Dengan suasana dan sarana yang memadai, seseorang atau kelompok yang tidak mampu atau tidak menguasai bidang pekerjaannya dapat saja mencapai tujuan namun dengan tertatih-tatih, dengan waktu yang lama. Ini juga berlaku bagi teknologi modifikasi cuaca yang diterapkan oleh UPT Hujan Buatan. Karena UPT Hujan Buatan mempunyai tugas melayani pengadaan air melalui penerapan Hujan Buatan, maka tujuan dapat dilihat dari dua sisi yaitu dari sisi pemakai jasa dan dari sisi institusi UPT Hujan Buatan. Dari sisi pemakai jasa, tujuannya adalah

dengan memanfaatkan teknologi modifikasi cuaca, dapat mengurangi dampak dari defisit air yang sedang atau akan berlangsung. Sesuai dengan judul makalah ini, maka lingkup tulisan ini bertujuan menelaah aspek ilmiah yang berkaitan dengan dasar ilmiah dan penerapan teknologi modifikasi cuaca, sehingga pelaksanaan modifikasi yang efektif dan efisien oleh UPT Hujan Buatan dapat tercapai.

2. MANIPULASI PROSES HUJAN DAN PENERAPANNYA

Pada kegiatan hujan buatan, dilakukan manipulasi proses hujan yang terjadi di dalam awan, sehingga diperoleh nilai ekonomis yang menguntungkan dari air hujan yang turun atau tambahan air hujan dari hasil manipulasi tersebut. Kegiatan ini banyak dilakukan untuk menjaga volume air waduk atau danau sehingga dapat tetap menjaga fungsi waduk tersebut, baik sebagai pembangkit listrik, ataupun untuk irigasi pertanian. Banyak istilah lain yang kerap digunakan untuk menyatakan upaya manipulasi proses hujan di

dalam awan, di antaranya adalah *rain augmentation*, *rain stimulation*, *precipitation enhancement*, dan *artificial rain*. Kegiatan ini berbasis saintifik yang kuat. Konsep atau dasar fisisnya sudah mapan. Banyak model yang rumit dan canggih yaitu model awan 3-dimensi-tergantung waktu (3-D *time dependent*), telah dibuat dan dijalankan orang, dan hasilnya menunjukkan bahwa manipulasi proses ini dapat mengawali, memulai, mempercepat, dan menambah curah hujan. Akan tetapi begitu diterapkan di lapangan, banyak kendala yang dijumpai. Ukuran, banyaknya bahan semai yang diintroduksi, dan lokasi serta waktu yang tepat pada awan yang tepat merupakan kunci sukses dalam manipulasi proses ini. Cotton (1998) dan WKWMP (1999a) menyatakan bahwa kesempatan yang baik dalam melakukan treatment dengan mode statik hanya singkat saja, yang hanya ada pada interval waktu sempit yang dinamakan "*window of opportunity*", bila kehilangan kesempatan ini maka awan mungkin lebih dini menjadi hancur sehingga sumberdaya dan usaha menjadi sia-sia. Hal yang sama juga dinyatakan oleh Krauss (1999), meskipun manipulasi proses dilakukan dengan mode statik (mikro fisik), efek dinamik kemungkinan dapat dihasilkan, sebagai efek ikutan yang menyebabkan awan dapat berkembang lebih tinggi dan menjadi awan guntur atau *thunderstorm* (Dennis 1984). Dengan demikian, pendapat yang menyatakan bahwa jika pada hari penyemaian terdengar guntur maka hujan yang turun bukan hasil dari penyemaian, adalah tidak benar. Sering dipertanyakan apakah introduksi bahan semai ke dalam awan benar dapat bekerja memanipulasi proses hujan. Beberapa riset yang dilaksanakan belum lama ini melakukan tracking bahan semai dengan radar untuk mengikuti ke mana bahan tersebut bergerak, berapa lama ia berada di sana, dan berapa banyak. Hasil analisisnya memperkuat

hipotesis-sebagian besar bahan semai tersebut di dalam awan bergerak ke bagian atas awan, sesuai seperti skenario teoritik (WKWMP, 1999b). Variasi hujan dari awan konfektif amat besar, hal ini menyebabkan distribusi ruang dan waktu dari hujan konvektif yang tiba di tanah menjadi sangat kompleks, yang menyebabkan bagaimanapun baiknya desain distribusi penakar hujan, tidak mampu mengukur dengan cukup akurat curah hujan bagi keperluan evaluasi kegiatan modifikasi cuaca, sehingga evaluasi modifikasi cuaca secara statistik dengan berbasis curah hujan banyak yang menya-takan "*inconclusive*", atau tidak berhasil mendeteksi adanya tambahan curah hujan. Oleh karena itu peralatan dan teknik evaluasi yang tidak memadai tidak akan mampu mendeteksi adanya perubahan proses di dalam awan dan hujan yang keluar dari awan tersebut. Kemampuan untuk mendeteksi efek penyemaian sangat tergantung pada tingkat penambahan curah hujan dari teknologi ini dibandingkan terhadap variasi hujan pada basis data historiknya. Efek atau hasil penyemaian yang besar akan mudah diteksi dengan durasi penyemaian yang singkat, dibandingkan dengan tingkat penambahan yang sedikit (Grifith et.al, 1999). Dengan banyaknya kendala pada evaluasi secara statistik yang berbasis data penakar hujan maka sejak tahun 1991, evaluasi hasil penelitian dan opsional modifikasi cuaca mengalami perubahan yang mendasar, dari statistik ke arah monitoring fisis, untuk dapat mendeteksi dan membuktikan efek penyemaian pada awan (Czyz, 1994). Karena didesak oleh situasi akibat tekanan iklim dan cuaca serta variasinya, beberapa negara di dunia telah melaksanakan operasional secara rutin kegiatan modifikasi cuaca untuk berbagai keperluan. Tabel 1 memberikan gambaran kegiatan modifikasi cuaca di Amerika Serikat (WMA, 1997).

Tabel 1. Kegiatan Modifikasi Cuaca Tahun 1994 di Amerika Serikat. Tujuan dan Total Target Area (WMA, 1997)

Negara Bagian	Akti-fitas	Tujuan	Luas Target (km ²)
California	15	menambah hujan	15,934
Utah	3	menambah hujan & pembuyaran kabut	10,360
Kansas	1	pengurangan hujan batu es	12,000
North Dakota	2	pengurangan hujan batu es	9,203
Idaho	3	menambah hujan	3,941
Nevada	3	menambah hujan	4,923
Colorado	4	menambah hujan	550
Texas	1	menambah hujan	5,500
Wyoming	1	menambah hujan	939
Washington	1	pembuyaran kabut	50
Oregon	1	pembuyaran kabut	10
Georgia	1	pembuyaran kabut	1
12 Negara Bagian	36	Total	63,592

Banyak publikasi dan laporan menyampaikan hasil kegiatan modifikasi cuaca di negara-negara di luar Amerika Serikat, sebagian di antaranya hanya berupa eksperimen, akan tetapi sebagian lagi sudah menerapkannya menjadi bagian integral pengelo-laan sumberdaya air. Negara-negara tersebut adalah Itali, Perancis, Maroko, Afrika Selatan, Israel, Australia, Israel, Greece, Spanyol. Thailand, dan Indonesia. Khusus untuk Indonesia, modifikasi cuaca yang ditetapkan sebagai bagian integral pengelolaan sumberdaya air telah dilaksanakan di Kabupaten Luwu (Sulawesi Selatan) untuk tujuan menjaga volume air danau yang digunakan sebagai PLTA-Larona, dan telah dilaksanakan secara rutin sejak tahun 1998, dengan durasi 56 bulan pada musim penghujan.

Dengan durasi panjang itu maka tidak lagi dijumpai masalah penetapan waktu pelaksanaan, karena treatment hanya dilakukan pada awan-awan potensial yang muncul. Variasi cuaca dan iklim yang sering dipersalahkan menjadi penyebab jarang-munculnya awan potensial pada durasi pelaksanaan yang singkat seperti yang dilakukan oleh UPT Hujan Buatan (21 hari, dan kemudian

diubah menjadi selama 30 hari) dapat diatasi. Kegiatan seperti ini sesuai dengan pengarahan WMO dalam penerapan modifikasi cuaca yang efektif dan efisien, karena dapat meningkatkan curah hujan musiman (Terblanche, 1998). Di Amerika Serikat, sedang disiapkan beberapa program operasional ataupun demonstrasi untuk tahun 2000. Sebagian di antaranya sudah disetujui kontraknya untuk dibiayai, sebagian lagi dalam negosiasi, ataupun pengajuan proposal (WKWMP, 1999b). Pada tahun 1999 yang baru lalu, menurut laporan Akhir NOAA (1999), terdapat 68 hari semai yang tercatat hingga 17 September 1999 (WKWMP, 1999c).

3. FUNGSI BAHAN SEMAI

Dominan proses hujan pada awan panas adalah *Collission-Coalescence* seperti yang dinyatakan oleh Cotton dan Pielke (dalam Cotton, 1998). Proses ini sangat efektif pada awan yang dasarnya hangat dengan sifat masa udara maritim atau memiliki banyak LWC. Salah satu cara penyemaian untuk meningkatkan curah hujan adalah dengan mema-sukkan partikel higroskopik yang dapat segera menjadi cair melalui proses deposit uap air pada lingkungan udara yang jenuh. Cotton (1998) menyatakan bahwa cara konvensional dilakukan dengan melepaskan partikel garam yang berukuran 5 - 10 mikron (diameter) di bawah dasar awan. Melalui proses deposit uap air, partikel garam berkembang cepat hingga mencapai diameter 25 - 30 mikron atau lebih besar. Partikel garam berukuran sebesar ini bertindak sebagai inti besar, dan kehadirannya di sekitar droplet awan pada awan atau bagian awan yang belum hujan, merupakan embrio penggabungan dan atau berpartisipasi dalam pembentukan hujan melalui proses *collission-coalescence*. Selanjutnya berdasarkan

pengamatan dan studi model diperoleh hasil bahwa pada beberapa awan tertentu, penambahan bahan higroskopik dapat memperbesar spektrum tetes awan dan mempercepat proses terjadinya hujan (Cotton, 1998). Selain itu manipulasi proses ini juga dapat memperpanjang durasi hujan dari yang terjadi secara alamiah, melalui peningkatan efisiensi proses hujan. Efek dan informasi tentang introduksi bahan higroskopik juga telah banyak dipublikasikan (Ludlam, 1951; Rokicki and Young, 1978; Qloud Quest, 1999; homepage WKMP dan lain-lain). Terdapat permasalahan pada penerapan metode konvensional penggunaan bahan semai higroskopik. Persiapan (*preparing*) material, penanganan (*handling*), menjadi kendala karena sifat bahan higroskopik. Permasalahan lainnya adalah Bagaimana Mengidentifikasi Suatu Awan, Dan Melepaskan Bahan Semai Ke Dalam Awan Dalam Ukuran, Jumlah Dan Waktu Yang TEPAT. Karena ukuran CCN beragam maka droplet yang terbentuk juga beragam ukurannya. *Droplet* besar setelah naik oleh kekuatan *updraft*, akan jatuh lebih cepat dibandingkan dengan *droplet* yang lebih kecil. Dalam lintasan jatuhnya, akan menumbuk, menyapu, dan mengumpulkan droplet lain yang lebih kecil. Dengan cara ini maka ia menjadi bertambah besar, jatuh lebih cepat, dan lebih banyak lagi mengumpulkan droplet kecil. Pada kecepatan tertentu tetes akan pecah menjadi beberapa fraksi yang lebih kecil dan tiap fraksi mengalami lagi pembesaran dengan cara yang sama. Langmuir dalam Bernea (1971), dan Neumann (1971) menyatakan bahwa tumbukan dan penggabungan selalu diikuti oleh efek berantai (dikenal dengan *Langmuir chain-reaction*) yang menyebabkan pembesaran droplet meluas dengan cepat dan mengawali terjadinya hujan di dalam suatu awan. Efek berantai ini diakibatkan oleh "*critical-size*" dari suatu droplet yang mengalami gaya-gaya aerodinamik. Fraksi tetes

yang berhasil dikumpulkan sepanjang lintasan turun disebut sebagai efisiensi pengumpulan (E), yang merupakan kombinasi antara efisiensi tumbukan (E_I), dengan efisiensi penggabungan (E_s), dan dinyatakan dalam bentuk $E = E_I \cdot E_s$.

Efisiensi tumbukan sangat bergantung pada perbandingan (p) antara radius tetes kecil (a), dengan radius tetes besar (A). Perhitungan teoritik menunjukkan bahwa untuk $A \leq 15$ mikron, nilai E_I sangat kecil, yaitu kurang dari 0.01. bahkan untuk $A = 20$ mikron, E_I baru mencapai 0.05 (Neiburger and Weickman, 1974 ; Neuman, 1971), atau $E_I = 0$ untuk $A < 19$ mikron (Hocking, 1959). Pemahaman lebih lanjut mengenai efisiensi tumbukan akan lebih mudah diikuti apabila kita memandang dua macam awan dengan distribusi teoritik yang berbeda, yaitu awan *mono-disperse* (distribusi dropletnya relatif seragam dan kecil), dan awan *poly-disperse* (distribusi dropletnya relatif berbeda).

Perhitungan teoritik menunjukkan bahwa pengaruh droplet besar yang diameternya lebih besar dari 19 mikron dapat meningkatkan besarnya efisiensi tumbukan secara nyata, seperti dapat dilihat pada ilustrasi perhitungan teoritik berikut ini (dari Neiburger and Weickman, 1974). Laju pembesaran suatu droplet yang radiusnya A, pada awan *mono-disperse* dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{E(1+p)^2 (V-v)L}{4r_s} = \frac{WL}{4r_s} \dots\dots\dots(1)$$

dengan W adalah parameter (atau koefisien) pengumpulan, dan $p = a / A$, dan L adalah *Liquid Water Content*.

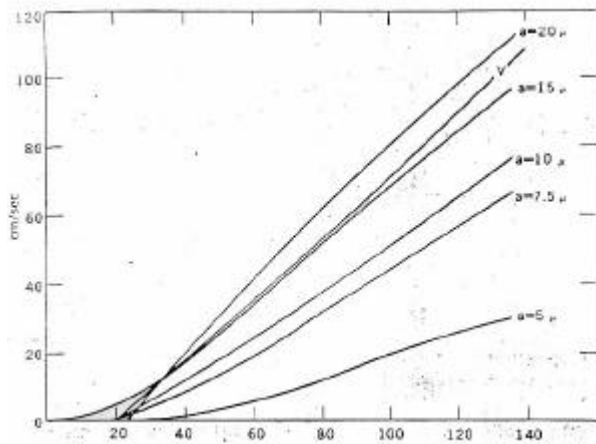
Bila terjadi pada awan *poly-disperse*, maka turut diperhitungkan banyaknya droplet per unit volume pada daerah a dan a+da, dan laju pembesarannya adalah:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{p}{3} \int n(a) a^3 W(a) da \dots \dots \dots (2)$$

Variasi W terhadap A untuk daerah A yang cukup lebar ternyata dapat didekati secara linier dengan bentuk $W = kA-B$, sehingga untuk mono-disperse diperoleh bahwa untuk tumbuh dari A_0 ke A_1 , waktu yang dibutuhkan adalah:

$$t_1 = \frac{9.2}{kL} (\log W_1 - \log W_2) \dots \dots \dots (3)$$

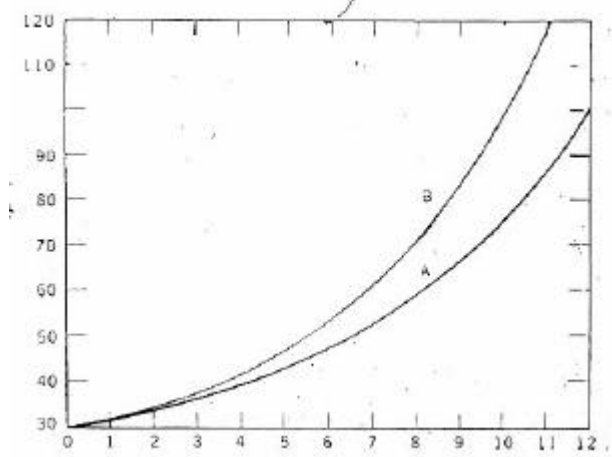
Persamaan ini menunjukkan bahwa laju pertumbuhan A sangat lambat bila A_0 kecil, dan meningkat dengan cepat bila A_0 besar. Pada gambar 1 dan gambar 2 masing-masing dapat dilihat pengaruh rasio p terhadap parameter pengumpulan (W), dan waktu perkembangan tetes besar (A mulai dari 30 mikron).



Gambar 1. Pengaruh rasio tetes kecil ($a = 5, 7.5, 10, 15$, dan 20 mikron) dan tetes besar terhadap laju pertumbuhan tetes besar (A), dinyatakan dalam kecepatan jatuh (V, dalam cm/s)

Pada kenyataannya, awan terdiri dari *droplet* dengan ukuran bervariasi, sehingga pendekatan *poly-disperse* lebih realistis. Distribusi *droplet* dengan radius yang bervariasi dinyatakan dengan spektrum ukuran *droplet* yang disebut "K-M spektrum" (*Khrgian-Mazin drop-size spectrum*), yaitu:

$$n(a) = \frac{1.45 L a^2 e^{-3a/a_m}}{a_m^6} \dots \dots \dots (4)$$



Gambar 2. Waktu perkembangan tetes besar dalam menit. Kurva "A" adalah awan *mono-disperse*, dan kurva "B" adalah awan *poly-disperse*. Perkembangan tetes besar di dalam awan *poly-disperse* lebih cepat dibandingkan di dalam awan *mono-disperse*.

dalam hal ini, a_m adalah rata-rata radius drop di dalam awan. Dikaitkan dengan banyaknya *droplet*, maka *Liquid Water Content* (L) dapat dinyatakan sebagai (Albrecht, 1989) :

$$L = (4/3) p r \sum_i n_i \dots \dots \dots (5)$$

Dengan demikian, perubahan atau penambahan banyaknya (n) *droplet*/cm³ yang memiliki masa di antara m dan dm sebagai hasil dari proses tumbukan-penggabungan adalah: yang dalam hal ini $K(m,M)$ adalah laju interaksi

$$\frac{\partial n(m)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_0^m n(M) n(m-M) K(M, m-M) dM - n(M) \int_0^\infty n(M) K(m, M) dm \dots \dots \dots (6)$$

antara drop bermassa m dengan drop bermassa M , dan dinyatakan sebagai :

$$K(m,M) = \pi A^2 W = \pi (A-a)^2 E(V-v) \dots \dots \dots (7)$$

Semua hasil perhitungan di atas diturunkan dengan asumsi nilai $E_s = 1$. Pada kenyataannya, awan alamiah memiliki nilai $E_s < 1$, seperti yang diperoleh pada penelitian yang dilakukan oleh

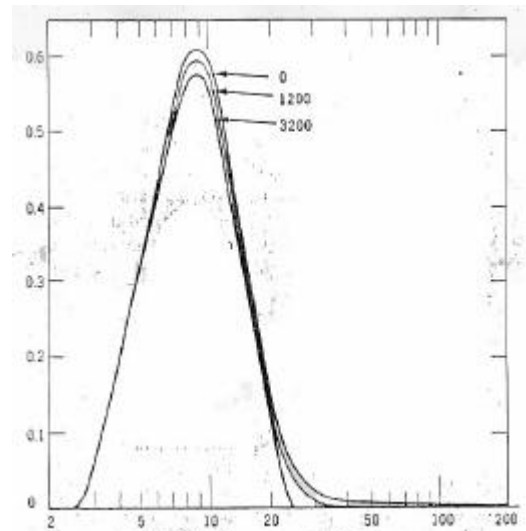
Universitas Toronto dan UCLA (Simpson and Dennis, 1974). Dengan demikian laju pertumbuhan tersebut sebenarnya lebih lambat. Agar tetap bisa memenuhi "*reasonable time*" maka ukuran droplet besar yang dihasilkan oleh partikel higroskopik setelah mengalami proses deposit uap air haruslah dapat mencapai ukuran > 20 mikron (Neumann, 1971). Ini dapat dicapai bila partikel tersebut dihasilkan dengan piroteknik (*flare*) yang disebarkan di dasar awan pada daerah *updraft*, atau dengan bubuk garam yang rata-rata berukuran 30 mikron yang disebarkan langsung ke dalam awan. Penyebaran di partikel besar di puncak atau di luar awan tidak menjamin masuknya bahan semai ke dalam awan.

Gambar 3 dan 4 menunjukkan perbedaan banyaknya penambahan butir bila pada awan yang tidak disemai (*non-seeded, non-precipitating cloud* atau *mono-disperse*), $a_m = 4.5$ mikron dengan awan setelah disemai, ambil sebagai contoh a_m menjadi 7.5 mikron.

Terlihat bahwa sebelum di semai, meskipun hingga 3200 detik, tidak ada droplet dengan radius lebih dari 30 mikron, akan tetapi pada awan yang disemai, tampak adanya perubahan nyata pada L setelah 600 detik, drop berukuran 50 mulai terbentuk, yang sebelumnya tidak ada. Setelah 1200 detik mulai terdapat drop dengan radius 100 mikron yang berarti mulai terjadi hujan.

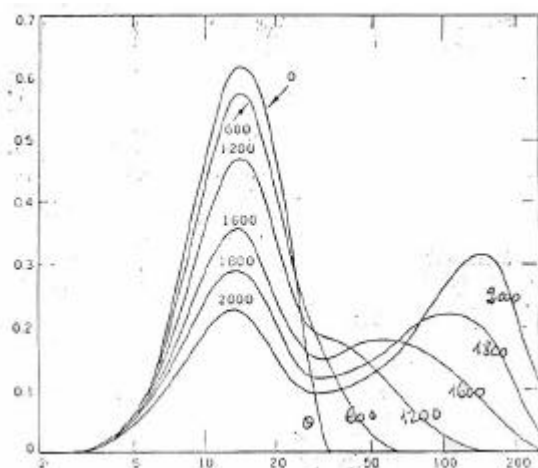
4. SIFAT BAHAN SEMAI DAN KUANTITAS YANG DIPERLUKAN

Pada percobaan awal sekitar tahun 1950, proses hujan dalam awan kumulus di manipulasi dengan penyemaian menggunakan "*water spray*" (Simpson and Dennis, 1974). Kendala yang muncul pada penyemaian dengan "*water spray*" adalah diperlukannya kuantitas air yang sangat banyak sehingga tidak efektif dan tidak diminati. Namun secara saintifik dapat diterima dan dapat dilaksanakan. Penggunaan material higroskopik



Gambar 3. Efek pembesaran tetes pada awan *mono-disperse*. Tidak terdapat ukuran butir 50 mikron meskipun sudah mencapai 3200 detik.

sebagai pengganti "*water spray*" dianggap dapat mengatasi kendala ini, karena dengan penaburan partikel kecil sekitar diameter 5 - 10 mikron, akan dengan cepat mengembang menjadi diameter 25 - 30 mikron. Adanya sifat ini sangat efektif karena bahan yang dibawa cukup sedikit saja, namun muncul kendala lain. Bahan higroskopik, baik yang berbentuk bubuk ataupun berbentuk larutan,



Gambar 4. Efek pembesaran tetes pada awan *poly-disperse*. Perubahan ukuran yang nyata telah terjadi dalam waktu 600 detik: butir berukuran 50 mikron mulai muncul, yang pada saat $t=0$, tidak ada. Ketika mencapai 1200 detik, mulai muncul tetes dengan radius 100 mikron, yang berarti mulai terjadi hujan.

sangat sulit ditangani. Ukuran partikel yang diperlukan bagi keperluan manipulasi proses sulit dikontrol karena penggumpalan atau *clumping*. Kendala ini baru dapat di atasi setelah diperkenalkannya penggunaan piroteknik-*flare*. Bahan lain yang bersifat "*wetable*" berupa bubuk yang dapat menjadi cair dalam lingkungan jenuh di dalam awan juga dapat digunakan. Namun karena tidak mampu menarik uap air, maka perubahan ukuran setelah menjadi cair relatif tidak berbeda dengan ukurannya ketika masih berbentuk padat. Dengan demikian penggunaan bahan "*wetable*" menghadapi kendala seperti pada penggunaan "*water-spray*" dan menjadi kurang efektif untuk digunakan sebagai bahan semai.

Berapa banyak bahan semai yang diperlukan untuk memanipulasi proses di dalam awan?. Ini agak sulit dijawab tanpa di bantu pengukuran, atau studi model. Bahan semai yang terlalu banyak diinjeksikan akan menimbulkan efek negatif yang tidak diinginkan, yaitu berkurangnya curah hujan melalui kompetisi uap air atau air awan (LWC) antara sesama *droplet*. Namun sifat ini justru dimanfaatkan untuk keperluan modifikasi cuaca pada "*supercooled cloud*" yaitu untuk "*hail suppresion*" yang efek ikutannya adalah penambahan curah hujan (WKWMP, 1999a). Kuantitas bahan semai yang diintroduksi ke dalam awan dengan ekspresi fisis yang berbeda pernah dinyatakan oleh beberapa peneliti dari hasil studi model, yaitu: **100 kgr untuk setiap awan** (Simpson and Dennis, 1974), **13 kgr/detik** (Johnson, 1980), **10 partikel/dm³-udara** (Tzivion et al, 1980), dan **100 kgr/km² menit⁻¹** (Rokicki and Young, 1978). UPT Hujan Buatan dalam setiap penerbangan penyemaian menaburkan bubuk garam sebanyak **1000 kgr/30 menit** yang diinjeksikan ke dalam 5 sampai 6 awan yang berada di atas daerah sasaran.

5. TINGKAT PENAMBAHAN CURAH HUJAN

Sukses dari manipulasi proses hujan dalam awan kumulus tergantung pada beberapa faktor yaitu :

1. Kesempatan mendapatkan awan potensial
2. Kesempatan mendapatkan "window of opportunity"
3. Jumlah bahan semai yang sesuai, tidak berlebihan, dan disebarkan pada lokasi yang tepat.
4. Peralatan monitoring yang memadai dan sesuai.

Hasil dari banyak percobaan dan operasional menunjukkan bahwa tambahan curah hujan melalui teknologi modifikasi cuaca adalah kecil, dibanding-kan dengan variasi hujan yang tinggi. Para ahli sepakat bahwa efek penyemaian umumnya kecil, dalam kisaran 10 - 15 persen dari hujan alam (Dennis, 1974). Kengla et al (1979) menganalisis potensi penambahan curah hujan melalui modifikasi cuaca di Texas dari hasil HIPLEX sebesar 10 persen. Pada kebanyakan penelitian angka peningkatan curah hujan tersebut pada umumnya muncul dari hasil analisis statistik. Beberapa ahli meragukan kehandalan teknik statistik untuk mendeteksi efek penyemaian karena berbagai pertimbangan. Changnon (1980) menyatakan bahwa membandingkan curah hujan pada daerah target yang disemai dengan curah hujan daerah lain yang tidak disemai tidak cukup untuk mendeteksi hasil penyemaian. Tidak ada dua daerah yang memiliki curah hujan sama, dan tidak dapat dibayangkan tersedianya data dengan catatan panjang untuk suatu daerah, yang dapat dibandingkan dengan data panjang yang tersedia bagi daerah lainnya. Selain itu hubungan statistik curah hujan antara dua daerah tidak pernah tetap dari musim ke musim. Untuk sementara, mengikuti perkembangan *echo* hujan pada awan yang

disemai dengan menggunakan radar merupakan teknik yang paling dapat diterima banyak ahli untuk mendeteksi perubahan yang terjadi pada suatu awan.

6. PENUTUP

Dari hasil penelaahan ini, dapat dibuat suatu ringkasan yang dapat ditindak lanjuti, sehingga UPT Hujan Buatan dapat melaksanakan kegiatan Hujan Buatan dengan efektif dan efisien.

- 1) Kegiatan Hujan Buatan yang berdurasi singkat (30 hari) tidak efektif untuk suatu upaya penam-bahan curah hujan pada suatu tempat yang menga-lami defisit air. Variasi iklim dan cuaca sering mengurangi kemunculan awan potensial. UPT Hujan Buatan harus mampu meyakinkan pemakai jasa bahwa teknologi modifikasi dapat berhasil dengan baik bila terdapat kesempatan yang lebih panjang. Kesempatan yang baik menemukan awan potensial biasanya diperoleh pada musim penghujan atau pada musim di musim penghujan. Dengan melak-sanakan penyemaian secara berkala pada suatu musim yang memiliki peluang besar mendapatkan awan potensial maka dapat lebih menjamin penambahan air pada suatu daerah yang memer-lukan atau defisit air. Mengintegrasikan teknologi modifikasi cuaca sebagai bagian integral pengelo-laan sumberdaya air pada tempat tersebut merupakan cara terbaik, seperti yang disarankan WMO. Ini merupakan satu tugas lain dari UPT Hujan Buatan untuk dapat memasukkan teknologi ini sebagai bagian pengelolaan sumberdaya air pada suatu daerah yang strategis. Bila ini dapat dilakukan maka penentuan waktu pelaksanaan tidak diperlukan lagi.
- 2) UPT Hujan Buatan harus mampu mengatasi kendala pada penanganan bahan semai yang higroskopik. *Flare* piroteknik sebagai "*new cloud seeding device*" memberi harapan untuk mengatasi kendala konvensional, namun penggunaan flare berimplikasi pada kemampuan pilot, jenis pesawat, dan sarana lainnya. Pilot perlu dilatih khusus bagi keperluan penerbangan yang bermanfaat bagi penyemaian. UPT Hujan Buatan harus melakukan pengkajian mendalam tentang spesifikasi flare yang paling sesuai bagi keperluan pemakaian di Indonesia.
- 3) Diperlukan peralatan bantu yang dapat menentu-kan tingkat perkembangan presipitasi di dalam suatu awan, sehingga dapat dilakukan manipulasi prosesnya pada waktu dan lokasi yang tepat. Penggunaan suatu radar untuk keperluan ini tidak dapat ditawarkan lagi. Radar ini juga dapat digunakan untuk menentukan daerah-daerah hujan yang dapat dikaitkan dengan penyemaian yang telah dilakukan. Mengingat variasi hujan yang tinggi maka penggunaan penakar hujan baik otomatis apalagi manual, sejauh mungkin dihindari dan mengganti-kannya dengan radar.
- 4) Meskipun diarahkan untuk kegiatan operasional, pemahaman yang mendalam pada aspek ilmiahnya harus dikuasai oleh tiap anggotanya. Salah satu yang amat diperlukan adalah penguasaan model awan. Dengan model awan dapat dikaji berbagai hal yang terutama berguna pada inovasi bahan semai dan strategi penyemaian.

DAFTAR PUSTAKA

- Albrecht, B.A.1989: Aerosols, Cloud Microphysics, and Fractional Cloudlines. Science Magazine 245. Sep 15. 1989.

- Bernea, E. and J. Mizrahi. 1971: The Possibility of The Use of Solid Particles For Acceleration of Drop Coalescence in Warm Cloud. Proceeding of Symposium on Artificial Rain, Shosh, 1970.
- Cotton, W.R. 1998: Weather Modification by Cloud Seeding - A status Report 1989-1997. Internet.
http://rams.atmos.colostate.edu/gkss_no44.html#SECTION00040.
- Changnon, S.A., R.R. Ruben, and C.F. Hsu. 1980. Evaluating Operational Cloud Seeding Projects. Proceeding 3-rd WMO Scientific Conference On Weather Modification.
- Czys, R.R. 1994 in U.S. National Report to IUGG, 1991-1994 Rev. Geophys. Vol. 33 Suppl., © 1995 American Geophysical Union.
<http://earth.agu.org/revgeophys/czys01/czys01.html>.
- Dennis, A.S. 1984: Experiment on Augmentation of Rainfall From Cumulus Cloud. Weather Modification Programme. Report No. 31. Appendix- D.
- Hornby, A.S., E.V. Gatlenby, and W. Wakefield. 1963: The Advance Learner's Dictionary of Current English. London Oxford University Press.
- Hocking, L.M. 1959: The Collision Efficiency of Small Drops. Quart. J. Roy. Meteor. Soc, 85. 44-50.
- Johnson, D.B. 1980: Hygroscopic Seeding To Initiate Precipitation. Proceeding 3rd WMO Scientific Conference On Weather Modification.
- Krauss, T.R. 1999: Personal Communication.
- Ludlam, F.H. 1951: The production Of Showers by Coalescence of Cloud Droplets. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 17.
- Neumann, J. 1971: The Growth Of Cloud Droplets By Collision and Coalescence . Proceeding of Symposium on Artificial Rain, Shosh, 1970.
- Neiburger, M. and H.K. Weickman 1974 : The Meteorological Background Of Weather Modification *dalam* Hess, W.N. (Ed) Weather and Climate Modification. John Willey and Sons.
- Cloud Quest. 1999: A New Cloud Seeding Device. Leavelete.
- Rokicki, M.L. and K.C. Young. 1978 : The Initiation of Precipitation in Updrafts. Amer. Met. Soc. 17. 1978.
- Simpson, J. and A.S. Dennis. 1974 : Cumulus Clouds and Their Modification *dalam* Hess, W.N. (Ed) Weather and Climate Modification. John Willey and Sons.
- Terblanche D.E. 1998: Bethlehem Precipitation Research Project. Metsys homepage. http://nprpo.ofs.gov.xa/bprp_bg.htm.
- Tzivion, S.H., I. A. Yanetz, and A. Manes. 1980: Numerical Simulation of The Effects of Cloud Seeding By Hygroscopic Particles On Coalescence Processes in Clouds. Proceeding 3rd WMO Scientific Conference On Weather Modification.
- WKWMP, 1999a: Physical Properties of Cloud Seeding.
<http://colby.ixks.com/~wkwmp/Final99/physical.html>.
- WKWMP, 1999b: Weather Modification Update. Frequently Asked Question.
<http://colby.ixks.com/~wbosser/wm2.html>.
- WKWMP, 1999c: Weather Modification Update.
http://colby.ixks.com/~wkwmp/Final99/appdx_d.giv.
- WMA, 1997: Some Fact About Seeding Clouds. Weather Modification Association, Fresno-Ca. <http://earth.agu.org/revgeophys/czys01/czys01.html>.

DATA PENULIS



UNTUNG HARYANTO, Masuk BPP Teknologi tahun 1981. S1 bidang **Fisika**, menyelesaikan S2 bidang **Klimatologi** di Institut Pertanian Bogor (IPB). Sekarang sebagai Ahli Peneliti bidang Teknologi Modifikasi Cuaca. Tahun 1996 mendapat penghargaan ilmiah dari Pemerintah: **Satya Lancana Wira Karya**.