

APLIKASI TEKNOLOGI MODIFIKASI CUACA UNTUK MENINGKATKAN CURAH HUJAN DI DAS CITARUM - JAWA BARAT 12 MARET S.D. 10 APRIL 2001

M. Karmini¹, S. P. Nugroho¹, S. Tikno¹, S. Nuryanto¹, B. P. Sitorus¹, S. Bahri¹,
F. H. Widodo¹, J. Arifian¹, M. Kudsy¹, D. Gunawan¹, R. B. Yahya¹ dan F. Renggono¹.

Intisari

Teknologi modifikasi cuaca sudah sering diaplikasikan di Indonesia terutama untuk meningkatkan jumlah curah hujan. Teknologi modifikasi cuaca diterapkan bila terjadi indikasi penurunan jumlah curah hujan dan kemungkinan akan munculnya fenomena El Niño sebagai tindakan preventif. Aplikasi teknologi modifikasi cuaca yang dilaksanakan di DAS Citarum, Jawa Barat mulai tanggal 12 Maret s.d. 10 April 2001 adalah berdasarkan kenyataan bahwa inflow DAS Citarum menurun dengan drastis pada bulan Desember 2000 dan sebagai tindakan preventif akan munculnya fenomena El Niño pada akhir tahun 2001 atau 2002. Pada awal tahun 2001, tiga kaskade waduk di DAS Citarum mengalami defisit cadangan air sebanyak 486,36 juta m³. Waduk Ir. Juanda yang merupakan waduk multi fungsi harus menyediakan pasokan air untuk: irigasi teknis pada lahan sawah seluas 296.000 ha (2 kali tanam), yang memberikan kontribusi sebesar ± 40 % ke Jabar atau setara dengan ± 10 % Nasional; air baku permukiman dan industri; serta penyediaan tenaga listrik (± 4,5 milyar kWh). Data akhir setelah dilaksanakan penerapan teknologi modifikasi cuaca dengan menggunakan konsep sistim dan lingkungan adalah nilai rata-rata aliran total Citarum sebesar 326,81 m³/det dan volume total aliran Citarum sejak mulai kegiatan hingga tanggal 10 April 2001 adalah sebesar 847,1 juta m³.

Abstract

Weather modification technology has been applied in Indonesia especially to enhance rainfall. Weather modification technology has been employed whenever there has been an indication of rainfall shortage and the possibility of El Niño occurrence as precautionary action. Weather modification technology that was applied in Citarum catchment area – West Java on 12 March – 10 April 2001 was based on the fact that Citarum inflow decreased drastically in December 2000 and also as a preventive endeavor to the possibility of warm episode in 2001/2002. In the early of 2001, three cascade dams had water storage deficit as much as 486.36 million m³. Ir. Juanda dam, which has multi purposes, has to supply water for: technical irrigation for 296,000 ha of rice field (2 planting seasons) that contributes ± 40 % to West Java or about ± 10 % of national production; fresh water for community and industry; as well as electricity of about 4.5 billion kWh. After the application of weather modification technology by employing system and environment concept, it was recorded that the average inflow of Citarum catchment area was 326.81 m³/sec and total volume during the activity was 847.33 million m³.

Kata Kunci: Teknologi Modifikasi cuaca, Sistim dan Lingkungan.

¹ UPT Hujan Buatan - BPPT, Gd. BPPT I - Lantai 19, Jl. M. H. Thamrin No. 8, Jakarta 10340. Email: mimin@bppt.go.id, mkarmini@yahoo.com.

1. LATAR BELAKANG

Pada bulan Desember 2000, curah hujan di Indonesia umumnya dan Jawa khususnya menunjukkan nilai anomali negatif mengingat bulan Desember masih termasuk musim hujan terutama di wilayah Indonesia yang terletak di selatan khatulistiwa. Kondisi defisit curah hujan ini sangat dirasakan oleh Perum Jasa Tirta (PJT) I dan II berdasarkan air masuk (*inflow*) daerah aliran sungai (DAS) yang dikelola oleh kedua PJT menurun sangat drastis bahkan dirasakan sangat buruk. Menurut Climate Prediction Center/NCEP edisi Januari 2001, curah hujan di Indonesia pada bulan Desember 2000 dipengaruhi oleh fenomena *Madden Julian Oscillation* (MJO) yang mempunyai periode 40 s.d. 60 hari. MJO bergerak ke arah timur dan pada bulan Desember 2000 mengakibatkan penurunan aktivitas konveksi di Indonesia sehingga curah hujan menurun secara drastis. Indikasi penurunan aktivitas konveksi terlihat melalui tingginya nilai *outgoing longwave radiation* (OLR).

Pada saat yang sama, hasil prediksi musim yang dikeluarkan NOAA mengindikasikan bahwa episode hangat (El Niño) sangat mungkin terjadi pada akhir tahun 2001. Hal ini ditunjukkan dari prediksi suhu muka laut (SST) yang meningkat nyata mulai bulan September 2001. Meskipun fenomena El Niño diperkirakan akan mulai muncul akhir tahun 2001, kekeringan di wilayah Indonesia baru akan dirasakan mulai awal musim kemarau tahun 2002. Namun demikian, musim kemarau yang bersesuaian dengan munculnya fenomena El Niño kemungkinan besar akan maju dan akan berlangsung lebih lama. Kejadian ini pernah terjadi pada tahun 1994 dan 1997.

Dalam Seminar Antisipasi El Niño yang diselenggarakan oleh Peragi dan Perhimpni di Bogor tanggal 22 Februari 2001, Kepala BMG telah menginformasikan bahwa fenomena El Niño diperkirakan berpeluang akan terjadi $\pm 30\%$ di tahun 2001 dan $\pm 70\%$ di tahun 2002. Pada musim kemarau 2001, beberapa daerah (antara lain daerah Jalur Pantura) akan masuk lebih awal yakni pada dasarian I s.d. III April 2001.

Kenyataan di lapangan menurut PJT II (2001), air masuk Citarum (AMC) bulan Desember tahun 2000 hanya sebanyak rerata $107,78 \text{ m}^3/\text{det}$ atau berada di bawah kondisi aliran kering sekali ($128,90 \text{ m}^3/\text{det}$). Kondisi ini (tercatat sebanyak $38,2 \text{ m}^3/\text{det}$) merupakan kondisi terburuk rerata air masuk waduk Saguling (Citarum hulu) sejak tahun 1970. Keadaan AMC seperti ini terus berlanjut pada bulan Januari 2001 yaitu sebanyak rerata $257,55 \text{ m}^3/\text{det}$ atau berada di bawah kondisi aliran normal ($293,70 \text{ m}^3/\text{det}$).

Pada awal tahun 2001, permukaan waduk kaskade Citarum tidak mencapai tinggi muka air (TMA) rencana. Ketiga waduk menunjukkan TMA secara berturut-turut: Saguling $8,26 \text{ m}$; Cirata $1,79$

m ; dan Ir. H. Djuanda $2,96 \text{ m}$ di bawah rencana. Hal ini mengakibatkan cadangan air ketiga waduk defisit (kurang) sebanyak $486,36 \text{ juta m}^3$ dari rencana. Perhitungan ini diperoleh dari Pola Pengusahaan Waduk Kaskade Citarum Tahun 2001 yang telah disusun berdasarkan pola operasi berkelanjutan (*multi years operation*) oleh Panitia Pelaksana Tata Pengaturan Air Citarum (SPK - TPA). Pola ini dibuat dengan memperbesar cadangan air di ketiga waduk serta beroperasi pada elevasi tinggi sehingga apabila terjadi AMC seperti tahun 1997 (terkecil selama 30 tahun operasi waduk), operasional waduk masih bisa dilakukan dengan baik.

Pada bulan Februari 2001, AMC berada sedikit di atas normal yakni sebanyak rerata $297,32 \text{ m}^3/\text{det}$ (normal $272,50 \text{ m}^3/\text{det}$). Hal ini mengakibatkan defisit cadangan air di ketiga waduk sedikit terkoreksi yaitu dari kondisi tanggal 1 Januari 2001 sebesar $486,36 \text{ juta m}^3$ menjadi $394,66 \text{ juta m}^3$.

Dalam usaha mempertahankan cadangan air di ketiga waduk, teknologi modifikasi cuaca atau yang dikenal sebagai penyemaian awan atau hujan buatan perlu diaplikasikan di DAS Citarum guna menambah cadangan air di ketiga waduk kaskade. Kegiatan ini dilakukan untuk mengamankan operasional tahun 2001 dan memantapkan operasional tahun 2002. Apabila defisit cadangan air dapat diatasi, maka penyediaan air untuk keperluan: tanaman padi seluas 296.000 ha (2 kali tanam), yang memberikan kontribusi sebesar $\pm 40\%$ ke Jabar atau setara dengan $\pm 10\%$ Nasional; air baku permukiman dan industri; dan penyediaan tenaga listrik ($\pm 4,5 \text{ milyar kWh}$) dapat diamankan (PJT II, 2001).

Dengan latar belakang tersebut di atas, teknologi modifikasi cuaca telah diterapkan di DAS Citarum Jawa Barat selama 30 hari mulai tanggal 12 Maret 2001.

2. METODE

Dalam penerapan teknologi modifikasi cuaca, prosedur standar yang dilakukan adalah :

- A. Melakukan analisis kondisi cuaca skala sinop guna mengetahui kemungkinan peluang terdapatnya awan potensial yang dapat disemai. Kegiatan ini dilakukan sebelum pelaksanaan kegiatan modifikasi cuaca.
- B. Menentukan lokasi pos pengamat cuaca (POSMET) di sekitar daerah target untuk memonitor perkembangan awan dan perubahan cuaca di daerah target. Kegiatan ini dilakukan sebelum melakukan kegiatan penyemaian awan.

- C. Melakukan analisis kondisi cuaca harian untuk menentukan strategi penyemaian.
- D. Melaksanakan penyemaian berdasarkan hasil analisis semua data yang masuk pada hari yang bersangkutan.

3. PERSIAPAN KEGIATAN LAPANG

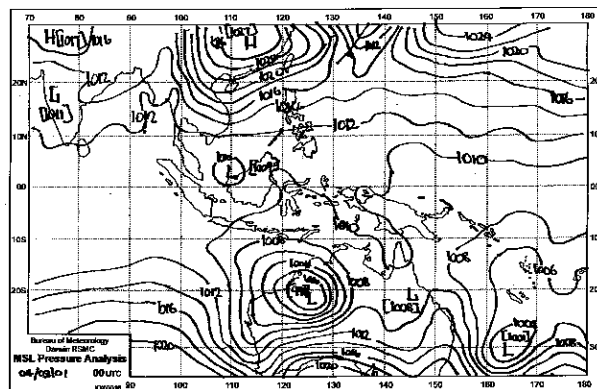
Sebelum dilaksanakan penerapan teknologi modifikasi cuaca / penyemaian awan, beberapa kegiatan dilaksanakan seperti kajian kondisi cuaca dan penentuan lokasi pos pengamat cuaca serta mengurus perizinan kepada instansi terkait guna kegiatan penyemaian awan.

3.1. Kajian kondisi cuaca

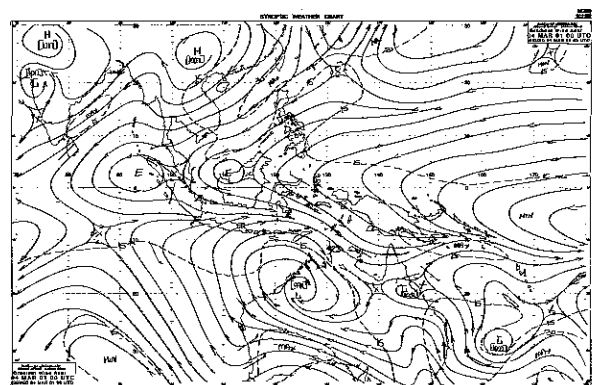
- a) Tanggal 30 Januari 2001, telah dilakukan Pembahasan Kondisi Iklim tahun 2001, Aliran DAS Citarum dan Rencana Upaya Penyemaian Awan. Pembahasan ini dilakukan bersama BMG, BPPT, Puslitbang SDA Kimpraswil, PLN dan PJT-II.
- b) Tanggal 1 Maret 2001, dilakukan Pembahasan Pelaksanaan Penyemaian Awan, bersama BMG, BPPT, Puslitbang SDA Kimpraswil, PLN dan PJT-II. Dalam pembahasan ini disarankan apabila PJT-II akan menerapkan teknologi modifikasi cuaca, pelaksanaan yang baik adalah pada bulan maret 2001.
- c) Dari hasil rapat tanggal 1 Maret 2001, UPT Hujan Buatan melakukan pengkajian kondisi cuaca awal bulan Maret 2001 untuk melihat peluang terbentuknya awan potensial yaitu cumulus. Dalam kajian ini terutama ditekankan akan kemungkinan massa udara yang masuk ke daerah target, pola medan tekanan udara level muka laut, kondisi suhu muka laut di sekitar Indonesia, dan citra satelit. Apabila hasil kajian kondisi cuaca menunjukkan peluang pertumbuhan awan cumulus, UPT Hujan Buatan akan melaksanakan kegiatan penerapan teknologi modifikasi cuaca. Kesimpulan kajian tersebut adalah sebagai berikut:

- Wilayah Jawa Barat masih didominasi tekanan rendah. Selanjutnya, sistem tekanan rendah di pantai barat laut Australia dan Laut Cina Selatan menyebabkan massa udara dari Lautan Hindia (barat Sumatera) dan Laut Cina Selatan masuk ke daerah Jawa Barat. Keadaan ini menunjukkan bahwa massa udara cukup mengandung uap air. Sistem tekanan rendah akan bergerak ke arah barat dan besar kemungkinan kondisi seperti ini akan tetap berlangsung dalam satu minggu ke depan. (Gambar.1).

- Massa udara yang masuk ke daerah Jawa Barat berasal dari barat Australia dan Laut Cina Selatan melalui Lautan Hindia. Konvergensi massa udara terjadi di barat selat Sunda yang mana dapat membantu pertumbuhan awan di Jawa Barat. Massa udara memasuki DAS Citarum dari arah barat sampai barat daya. (Gambar 2).



Gambar 1. Pola isobar pada level muka laut tanggal 4 Maret 2001, pkl. 07:00 wib. (Dari <http://www.BoM.Gov.Au/weather/nt>)



Gambar 2. Analisis angin gradien tanggal 4 Maret 2001, pkl. 19:00 wib. (Dari <http://www.BoM.Gov.Au/weather/nt>)

Dari hasil kajian ini, UPT Hujan Buatan bersama PJT II sepakat melaksanakan kegiatan selama 30 hari mulai tanggal 12 Maret 2001.

3.2. Penentuan lokasi POSMET

POSMET diperlukan untuk mengetahui perubahan kondisi cuaca dalam skala jam di seputar daerah target. Perubahan suhu udara, tekanan udara, kelembaban udara dan angin permukaan setiap jam diukur dan dilaporkan ke POSKO (pos komando). Demikian juga kondisi angin pada berbagai ketinggian dievaluasi dengan *tracking* pilot balon menggunakan theodolit setiap tiga jam (07:00, 10:00, 13:00, dan 16:00 wib) untuk melihat perubahan kondisi angin di daerah

target. Informasi penting bagi POSKO adalah kondisi awan di sekitar daerah target setiap saat. Dengan demikian, lokasi POSMET harus dipertimbangkan sedemikian rupa sehingga informasi yang diperlukan oleh POSKO untuk menentukan strategi penyemaian dapat diperoleh dengan baik.

Dalam kegiatan ini, 4 (empat) lokasi yaitu Ciranjang, Cariu, Ciwidey, dan Jati Sari ditentukan sebagai POSMET. Selain itu ditentukan dua lokasi lain sebagai tambahan yaitu Husein Sastranegara dan Kali Jati.

4. DATA YANG DIGUNAKAN

Data yang digunakan dalam penerapan teknologi modifikasi cuaca antara lain:

- A. Data suhu muka laut (SST) yang diambil dari situs:
<http://www.grads.iges.org/pix/trop.fcst.htm>.
Data ini digunakan untuk mengetahui potensi uap air yang masuk ke daerah target. Suhu muka laut yang mendukung penguapan cukup adalah 28° C (Fu et al., 1990, Bell et al., 1999)
- B. Pola isobar pada ketinggian muka laut di wilayah Indonesia dan sekitarnya yang diambil dari situs: <http://www.BoM.Gov.Au/weather/nt>.
Pola isobar dapat menunjukkan sistem tekanan rendah dan sistem tekanan tinggi. Dengan analisis dapat diketahui kemungkinan masuknya massa udara ke daerah target.
- C. Analisa angin gradien (*gradient winds analyses*) yang diambil dari situs: <http://www.BoM.Gov.Au/weather/nt>. Dari data ini selain dapat diketahui asal massa udara yang masuk ke daerah target juga dapat diketahui kondisi angin (arah dan kecepatan angin pada ketinggian 850 mb atau 5000 feet) dan daerah convergen atau divergen di sekitar daerah target.
- D. Data citra satelit kanal infra merah dan *visible* yang diambil dari situs: <http://www.npmoc.navy.mil>. Citra satelit digunakan untuk mengetahui tutupan awan dan jenis awan secara umum. Awan atau sistem awan yang akan masuk ke daerah target dapat ditentukan melalui kombinasi sistem awan yang cukup besar dengan *gradient winds analyses*.
- E. Sounding atmosfer yang diluncurkan setiap dua hari diperlukan untuk mengetahui kondisi atmosfer secara vertikal di daerah target. Analisis data dari radiosonde dapat menginformasikan tingkat stabilitas atmosfer; kondisi awan layer yang memungkinkan menutupi radiasi matahari sampai ke permukaan tanah; potensi terbentuknya awan hujan dan arah serta kecepatan angin pada berbagai ketinggian.
- F. Data cuaca permukaan yang terdiri dari tekanan udara, suhu bola kering, suhu bola basah, kelembaban relatif (RH), dan angin permukaan. Selain data cuaca permukaan juga data angin pada berbagai ketinggian yang diperoleh dengan Pilot Balon yang dilakukan empat (4) kali setiap harinya dan informasi jumlah tutupan awan serta jenisnya.
- G. Data curah hujan dan hidrologi. Data ini terutama untuk mengetahui kejadian hujan dan perubahan kondisi permukaan air waduk sebagai bahan analisis dari aktivitas penyemaian awan.

5. KEGIATAN APLIKASI TEKNOLOGI MODIFIKASI CUACA

Aplikasi teknologi modifikasi cuaca untuk meningkatkan curah hujan atau dikenal dengan "hujan buatan/penyemaian awan" di DAS Citarum - Jawa Barat, telah dilaksanakan oleh UPT Hujan Buatan-BPPT atas permintaan Perum Jasa Tirta II (PJT II). Hasil penyemaian awan dievaluasi setiap 10 harian oleh Tim yang dipimpin oleh Dinas PSDA Jabar dengan anggota dari Pemda Propinsi Jabar, BMG, Puslitbang SDA Kimpraswil dan Instansi dari Pemda Kab / Kota yang terkait.

Dalam penerapan teknologi modifikasi cuaca ini digunakan konsep sistem dan lingkungan.

5.1. Konsep Sistem dan Lingkungan

Konsep sistem dan lingkungan adalah "akumulasi atau penipisan di dalam satu sistem sama dengan {jumlah pemindahan (*transport*) dari luar ke dalam sistem ditambah produksi di dalam sistem itu sendiri} dikurangi {jumlah pemindahan (*transport*) dari dalam ke luar sistem ditambah jumlah yang dikonsumsi di dalam sistem itu sendiri}" (Sitorus, 2001).

Dalam konsep ini, yang dimaksud dengan sistem adalah daerah target atau dalam kegiatan penyemaian awan di Bandung adalah Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum, di mana terdapat tiga waduk kaskade. Penerapan teknologi modifikasi cuaca ditujukan untuk meningkatkan jumlah curah hujan di dalam DAS Citarum.

Untuk mencapai sasaran kegiatan penerapan teknologi modifikasi cuaca di DAS Citarum, usaha yang harus dilakukan adalah meningkatkan *transport* awan atau uap air dari luar DAS ke dalam DAS ditambah dengan mengoptimalkan awan yang tersedia di dalam DAS, yaitu turun hujan sebelum keluar dari DAS.

Dalam menerapkan konsep sistem dan lingkungan pada teknologi modifikasi cuaca untuk meningkatkan jumlah curah hujan, perlu diupayakan:

- A. Menentukan faktor mana yang paling dominan antara unsur global dan unsur lokal terhadap kondisi cuaca di daerah target bila terjadi fenomena alam skala global.
- B. Mengoptimalkan intensitas radiasi matahari pada permukaan tanah melalui penyemaian awan *layer* atau jenis stratus yang menutupi DAS pada pagi hari. Intensitas radiasi matahari yang optimal akan mempercepat proses konveksi dan memberi peluang masuknya suplay uap air dari luar DAS, sehingga peluang pertumbuhan awan di dalam DAS akan semakin besar.
- C. Memonitor pertumbuhan awan di luar DAS melalui pos-pos meteorologi dan survey dari udara dengan pesawat terbang. Informasi ini dapat membantu dalam pengambilan keputusan untuk misi penyemaian awan.
- D. Membuyarkan awan potensial di luar DAS pada daerah *inflow* (sisi suplay) dari DAS agar proses pelembaban di dalam DAS (dengan masuknya uap air) dipercepat, sehingga pertumbuhan awan di dalam DAS lebih baik dan menjadi awan berpotensi hujan.
- E. Membiarkan awan potensial tumbuh di luar DAS pada sisi *outflow* karena awan tersebut dapat berfungsi sebagai penahan aliran masa udara atau awan keluar dari DAS.
- F. Membuyarkan awan tidak potensial sekitar awan potensial di dalam DAS supaya di sekitar awan potensial menjadi lebih lembab.
- G. Menyemai awan potensial di dalam DAS untuk memicu proses *collision coalescence* agar proses pembesaran butir dipercepat sehingga hujan turun lebih cepat. Perlakuan ini hanya ditujukan pada awan potensial yang kemungkinan besar akan bergeser keluar DAS. Sementara awan potensial yang kemungkinan besar tidak akan bergeser ke luar DAS tidak perlu disemai.
- H. Apabila di luar DAS (dekat batas DAS) ada awan potensial yang tumbuh baik dan berpotensi hujan, awan potensial di dalam DAS (pada sisi yang berdekatan) harus diupayakan turun hujan lebih dahulu dengan menyemai awan. Dengan demikian, awan potensial di luar DAS diharapkan terganggu kesetimbangannya dan dapat masuk ke dalam DAS yang sedang hujan.
- I. Tidak mengganggu atau merusak awan yang tumbuh baik di dalam DAS (khususnya pada DAS kecil).
- J. Memanfaatkan karakteristik alam (di dalam dan luar DAS) pada saat menentukan strategi penyemaian agar hujan turun tepat pada sasaran.
Karakteristik alam yang dimanfaatkan adalah :
 - a) Angin laut (seeding pagi hari) dan angin darat (penyemaian sore hari) untuk menentukan lokasi penyemaian agar

hujan turun pada sasaran, terutama untuk daerah sekitar pantai.

- b) Topografi yang dapat berfungsi sebagai penahan aliran angin dan atau awan yang masuk atau keluar DAS.

5.2. Kondisi Cuaca Selama Kegiatan

Sesuai hasil kajian kondisi cuaca oleh UPT Hujan Buatan sebelum kegiatan, kondisi cuaca mendukung kegiatan modifikasi cuaca di DAS Citarum. Hujan terjadi setiap hari selama kegiatan, meskipun pada tiga hari pertama hujan masih terjadi secara spot (sporadis) di DAS Citarum. Usaha tiga hari pertama adalah mengkondisikan peluang hujan di DAS Citarum, karena hujan sering terjadi di luar DAS Citarum.

Untuk mengamati kondisi cuaca di sekitar DAS Citarum, 6 pos pengamat cuaca (POSMET) telah ditetapkan. 4 POSMET ditempatkan di Ciwidey, Cariu, Ciranjang, dan Tanjung Sari yang mana para pengamatnya dilakukan langsung oleh anggota UPT Hujan Buatan, sementara 2 pos lainnya, Kalijati dan Husein dilakukan oleh TNI AU. Selain POSMET, dilakukan juga peluncuran radiosonde setiap dua hari pada pukul 08.00 wib. Alasan frekuensi peluncuran hanya dua hari sekali adalah keterbatasan jumlah transmitter. Sementara data atmosfer secara vertikal di DAS Citarum sangat diperlukan untuk mengetahui kondisi uap air dan labilitas atmosfer agar chance terbentuknya awan potensial dapat diketahui.

Sementara untuk melihat kondisi cuaca dalam skala sinop, data seperti *sea surface temperature* (SST) *analysis*, citra satelit, pola isobar (tekanan udara) pada level muka laut, dan *gradient winds analysis* diakses langsung dari internet setiap hari.

Hasil analisis kondisi cuaca dari data yang dapat dikumpulkan pada hari yang bersangkutan digunakan untuk menentukan strategi kegiatan penerbangan yang akan dilakukan hari itu. Dalam perolehan data dan analisis kondisi cuaca, UPT Hujan Buatan dalam kegiatan ini telah melibatkan instansi BMG, LAPAN dan TNI AU.

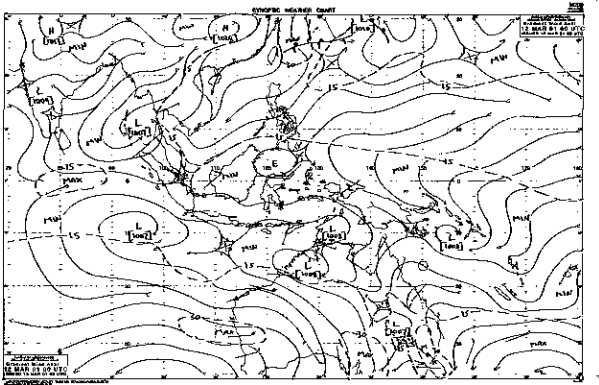
Dari hasil analisis data cuaca baik permukaan, sinop maupun radiosonde dapat disimpulkan bahwa kondisi cuaca selama kegiatan (30 hari) mendukung penerapan teknologi modifikasi cuaca. Sementara derajat dukungan kondisi cuaca cukup bervariasi. Misalnya, jumlah uap air yang masuk daerah target; kecepatan angin yang sangat kencang saat adanya *tropical cyclon* "WALTER" di selatan Jawa, dan terhalangnya radiasi matahari akibat awan stratus (layer) yang menutupi daerah target.

Adapun resume kondisi cuaca selama kegiatan akan dibagi menjadi tiga periode sesuai dengan evaluasi 10 (sepuluh) harian.

A. Resume periode 12 s.d. 19 Maret 2001

Massa udara berasal dari lautan Hindia yang ditunjukkan oleh analisis angin gradien yang mana suhu muka lautnya berkisar antara 28-29° Celcius. Suhu muka laut seperti ini menunjukkan cukupnya penguapan sehingga massa udara yang berasal dari daerah seperti ini akan cukup mengandung uap air.

Akan tetapi, massa udara dan jumlah kandungan uap air yang masuk daerah Jawa Barat sangat dipengaruhi dengan adanya sistem tekanan yang ada di Teluk Benggala dan selatan Jawa. Pada awal kegiatan terdapat sistem tekanan rendah di Teluk Benggala dan barat daya P. Jawa, sehingga massa udara yang masuk ke Jawa Barat kurang mengandung uap air karena uap air banyak terserap pada kedua sistem tekanan rendah tersebut (Gambar 3). Hasil analisis radiosonde juga menunjukkan bahwa udara sangat kering dimana RH mencapai 10% pada level pertumbuhan awan.



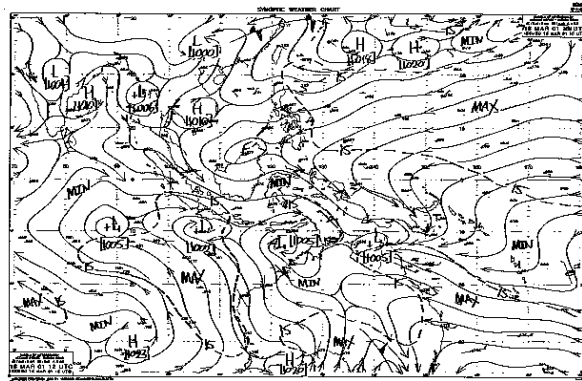
Gambar 3. Analisis angin gradien tanggal 12 Maret 2001, pukul 19:00 wib.

Mulai tanggal 16 Maret ada perubahan di mana muncul sistem tekanan rendah di selatan Jawa sehingga massa udara yang masuk ke Jawa Barat cukup mengandung uap air. Selain itu, pusaran yang terdapat di barat daya Jawa menyebabkan Jawa Barat menjadi daerah konvergensi. Kondisi ini membantu pertumbuhan awan berpotensi hujan atau awan cumulus (Gambar 4). Hasil analisis radiosonde tanggal 17 Maret menunjukkan kondisi atmosfer yang kurang stabil sehingga mendukung terbentuknya awan cumulus.

Pada tanggal 18 Maret massa udara banyak mengandung uap air yang berasal dari sebelah barat Sumatera di mana SST-nya 29° C. Kondisi ini dimungkinkan karena sistem tekanan tinggi muncul di Teluk Benggala sementara tekanan rendah di barat daya Jawa sudah bergeser ke arah barat.

B. Resume periode 22 s.d. 29 Maret 2001

Suhu muka laut di selatan Jawa sampai barat Sumatera selama periode ini berkisar antara 28-29° Celcius. Demikian juga suhu muka laut di utara Jawa memiliki suhu sebesar 29° C. Suhu muka laut seperti ini menunjukkan penguapan cukup tinggi sehingga massa udara yang berasal dari daerah seperti ini akan cukup mengandung uap air.

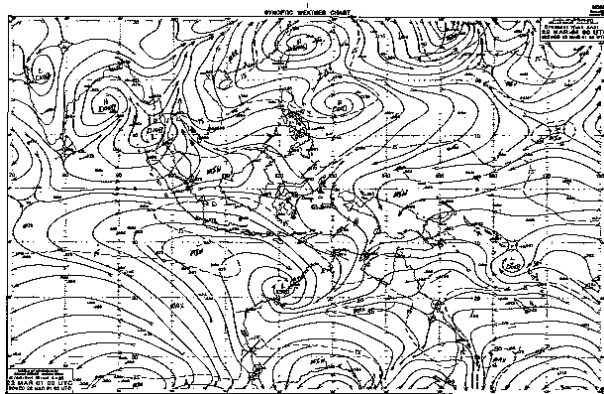


Gambar 4. Analisis angin gradien tanggal 16 Maret 2001, 19:00 wib.

Tanggal 22 dan 23 massa udara berasal dari L. Hindia, yaitu selatan dan baratdaya Jawa yang masuk ke daerah target, dan masuk dari barat - baratdaya target area. Termonitor adanya palung mulai dari barat laut Australia sampai barat Sumatera yang memungkinkan pertumbuhan awan di daerah ini. Konvergensi massa udara juga terlihat di sekitar equator. Kondisi ini dipengaruhi dengan adanya sistem tekanan tinggi (H) di Teluk Benggala dan tekanan rendah (L) di pantai barat laut Australia. Hasil analisis data radiosonde pada tanggal 22 Maret 2001 menunjang hasil analisis angin gradien yang menginformasikan bahwa kondisi atmosfer di sekitar target area tidak stabil (K indeks sebesar 35.3 dengan *mixing ratio* 10 gr/Kg) dan memungkinkan pertumbuhan awan potensial.

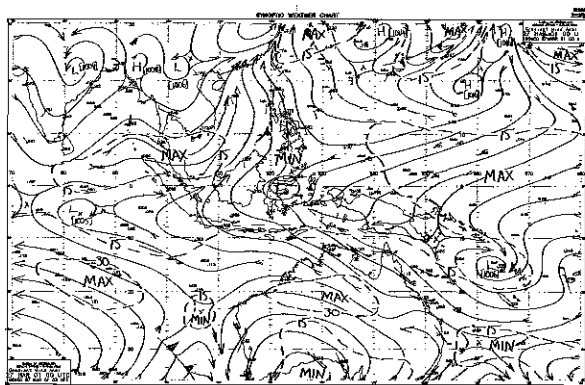
Mulai tanggal 24 Maret 2001, massa udara yang masuk ke Jawa berasal dari daratan Australia akibat sistem tekanan tinggi (H) di Australia. Namun demikian, karena massa udara sebelum memasuki Jawa melalui laut hangat dengan kecepatan kurang dari 15 knots maka mampu membawa uap air dari perairan selatan Jawa yang hangat (Gambar. 5). Palung semakin mendekati Jawa dan memberikan peluang pertumbuhan awan di daerah target. Jawa Barat sendiri merupakan daerah konvergensi, dan sekitar equator (dari barat Sumatera s.d. utara Jawa) merupakan daerah konvergensi. Kondisi ini berlangsung sampai 26 Maret 2001. Dari hasil analisis data radiosonde tanggal 24 Maret menunjukkan bahwa kandungan uap air sangat tinggi (*mixing ratio* 13 gr/Kg) dan K indeks

mencapai 36,9 (terbesar selama kegiatan di Bandung) dan suplay terbesar dari nilai ini berasal dari tingginya RH dari permukaan s.d. lapisan 500 mb.



Gambar 5. Analisis angin gradien tanggal 24 Maret 2001, 19.00 wib.

Mulai tanggal 27 Maret 2001, massa udara masuk ke daerah target dari arah tenggara sampai timur (Gambar. 6). Asal massa udara masih dari daratan Australia yang menjadi sistem tekanan tinggi. Massa udara ini masih mengandung uap air karena melalui selatan sampai tenggara Jawa yang suhu muka lautnya masih 29° C. Jawa Barat masih merupakan daerah konvergensi, sementara konvergensi massa udara terdapat di Sumatera sekitar equator. Kondisi ini berlangsung sampai 28 Maret 2001. Hasil analisis radiosonde tanggal 28 Maret 2001 menunjukkan bahwa dominasi angin sudah mulai dari tenggara (permukaan s.d. 12.000 kaki). K indeks sebesar 30.9 yang menunjukkan kelabilan udara cukup baik dan memungkinkan pertumbuhan awan.



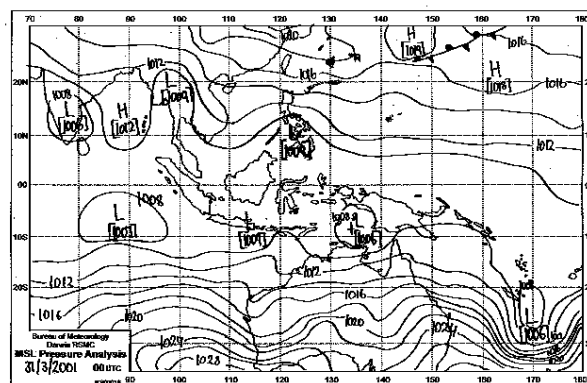
Gambar 6. Analisis angin gradien tanggal 27 Maret 2001, 07:00 wib.

C. Resume periode 31 Maret s.d. 10 April 2001

Pada tanggal 31 Maret 2001, suhu muka laut di sekitar selatan Jawa sampai barat

Sumatera berkisar antara 28-29° Celcius. Demikian juga suhu muka laut di utara Jawa memiliki suhu sebesar 29° C. Suhu muka laut seperti ini menunjukkan penguapan cukup sehingga massa udara yang berasal dari daerah seperti ini akan cukup mengandung uap air.

Tekanan rendah di sekitar Jawa Timur, Nusa Tenggara Timur dan barat Sumatera yang mulai tampak pada tanggal 29 Maret 2001 sudah bergeser ke arah barat. Pada tanggal 31 Maret 2001, tekanan rendah yang ada di barat Sumatera sudah hilang, dan muncul tekanan rendah baru di sekitar perairan Pulau Irian (utara Australia) (Gambar 7). Sistem tekanan tinggi (1028 mb) di barat Australia akan bergerak ke daratan Australia.



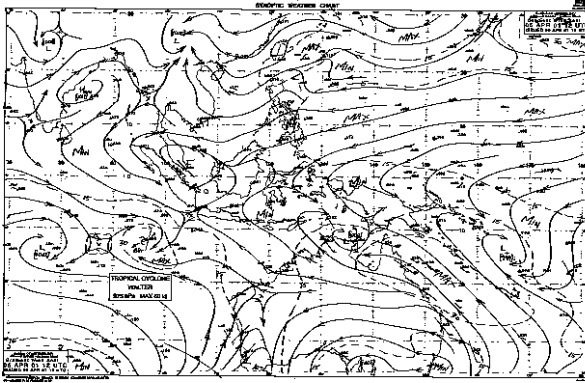
Gambar 7. MSL Pressure Analysis tanggal 31 Maret 2001, pkl. 07:00 wib

Sesuai dengan kondisi SST dan pola tekanan MSL, analisis angin gradien tanggal 31 Maret menggambarkan bahwa massa udara yang masuk ke Jawa Barat berasal dari daratan Australia dan Laut Cina Selatan. Daerah target menjadi daerah netral dengan adanya sadel di sektor barat Jawa Barat. Kondisi ini membantu pertumbuhan awan di Jawa Barat meskipun konsentrasi awan potensial ada di Jawa Timur dengan terdapatnya sistem tekanan rendah (L).

Pada tanggal 5 April 2001, kondisi suhu muka laut sedikit berubah yang mana area dengan suhu muka laut sebesar 28-29° derajat Celcius di selatan Jawa lebih sempit (lebih ke utara) mengingat posisi matahari sudah mulai di lintang utara. Sementara tekanan rendah yang pada tanggal 31 Maret berada di selatan Jawa Timur telah menguat menjadi siklon tropis "WALTER" dan bergerak ke arah barat. Dalam proses pembentukan siklon tropis dan masih berada di selatan Jawa Barat, kecepatan angin di DAS Citarum sangat kencang dari arah barat s.d. barat daya dan membawa uap air. Kondisi ini dirasakan pada tanggal 2 s.d. 3 April 2001.

Dengan bergeraknya sistem tekanan rendah dari Jawa Timur ke arah barat dan menjadi siklon tropis, Jawa setelah dilanda angin kencang menjadi tenang kembali. Massa udara pada

tanggal 5 April (Gmb. 8) masih berasal dari daratan Australia dan barat Sumatera. Massa udara masih mengandung uap air karena masih cukup air muka laut yang memiliki suhu di atas 28 derajat Celcius. Jawa Barat masih menunjukkan daerah konvergensi yang berarti memberi peluang pertumbuhan awan.



Gambar 8. Analisis angin gradien tanggal 5 April 19:00 wib.

5.3. Kegiatan Penerbangan

Penerbangan untuk melakukan penyemaian awan dilakukan setiap hari dengan maksimum penerbangan sebanyak 4 sorty. Tujuan penerbangan adalah: mempercepat radiasi matahari sampai tanah, mengusahakan masuknya massa udara yang mengandung uap air masuk ke dalam DAS, dan mempercepat turunnya hujan di dalam DAS. Total kegiatan penerbangan selama kegiatan sebanyak 115 sorty

Pesawat terbang yang digunakan adalah 2 (dua) unit pesawat Casa NC-212 serie 200 milik BPPT dengan nomor registrasi PK-VSA dan PK-VSE yang dioperasikan oleh PT. Dirgantara Air Service. Pada setiap sorty penerbangan, pesawat ini dapat mengangkut bahan semai antara 800 kg hingga 900 kg ditambah 4 (empat) orang penumpang yaitu 2 *Flight Scientist* dari UPT Hujan Buatan-BPPT, 1 peninjau dari Perum Jasa Tirta II dan 1 mekanik.

Pada setiap sorty penerbangan selalu disertai dengan 2 orang *Flight Scientist* yang bertanggungjawab menjalankan tugasnya sesuai dengan *guidline* (arahan) yang telah diberikan Kordinator Lapangan pada saat Briefing sebelum penerbangan dilakukan. Selama penerbangan *Flight Scientist* bertugas mengarahkan Pilot ke lokasi penyemaian yang akan dituju, dan menetapkan level ketinggian terbang yang sesuai untuk melakukan penyemaian awan. *Flight Scientist* menentukan mana awan-awan yang harus dibuyarkan, dan mana awan-awan yang harus dipelihara pertumbuhannya, dan mana awan yang harus dipercepat segera turun menjadi hujan. Kerjasama yang baik antara *Flight Scientist*

dengan Pilot sangat menentukan keberhasilan misi penerbangan. Meskipun data, informasi, dan arahan telah diberikan Koordinator Lapangan sebelum terbang, namun *Flight Scientist* diberikan kewenangan penuh dalam melakukan *judgement* apabila kondisi riil di lapangan yang ditemukan saat terbang tidak seperti yang diperkirakan oleh Kordinator Lapangan sebelum terbang.

6. KONDISI HIDROLOGI PERIODE 1 MARET S.D. 10 APRIL 2001.

Hasil akhir dari kegiatan penerapan teknologi modifikasi cuaca adalah jumlah curah hujan dan perubahan *inflow* di dalam DAS Citarum. Untuk memberikan gambaran hasil perolehan air selama pelaksanaan penyemaian awan, maka akan ditinjau kondisi hidrologi waduk sebelum dan selama pelaksanaan penyemaian awan berdasarkan hasil pengamatan lapang dan pencatatan kondisi waduk yang dilakukan oleh pihak Perum Jasa Tirta II.

6.1. Periode sebelum kegiatan (1 s.d. 11 Maret 2001)

Periode sebelum kegiatan penyemaian awan dapat dirangkum sebagai berikut:

- 1) Kejadian hujan lebih banyak di luar DAS Citarum seperti tampak dalam Tabel berikut.

Tabel Curah Hujan di luar DAS dan Bandung Tanggal 1 s.d 11 Maret 2001.

Tgl.	Tj. Priok	Ps. Minggu	Ceng-kareng	Be-kasi	Bogor	Ban-dung
1		42,0	24,0	3,0	6,5	
2			2,8	1,0	2,1	1,4
3			2,1		6,1	
4	8,3		5,0		2,8	5,5
5	0,8				3,5	1,6
6	17,3		12,5		3,5	9,5
7					ttu	5,5
8					9,5	
9	24,1	53,0		54,0	10,2	5,0
10		40,0	1,0	12,0	ttu	2,0
11	39,1		56,2	23,0	21,0	0,8

Sumber: BMG

- 2) Duga Muka Air (DMA) pada tanggal 11 Maret di Saguling 637.68 m; Cirata 214.88 m dan Juanda 98.15 m (PJT II, 2001).
- 3) Rata-rata air masuk lokal (*inflow*) waduk Saguling 90.86 m³/det; Cirata 87.08 m³/det; dan Juanda 8.30 m³/det. Sedangkan rata-rata aliran total Citarum sebesar 186.23 m³/det (PJT II).

6.2. Periode selama kegiatan (12 Maret s.d. 11 April 2001)

Kondisi hidrologi selama kegiatan adalah sebagai berikut:

- 1) Hasil pengamatan kejadian hujan yang dipantau oleh Pos Meterologi (Posmet) dan penakar telemetering dari waduk Saguling menunjukkan bahwa setiap hari terjadi hujan di daerah Target (DAS Citarum). Rerata curah hujan wilayah terbesar 27.1 mm dan terkecil 0.4 mm. Kejadian hujan (*point rainfall*) terbesar adalah 109 mm di Lab. Beton (Waduk Djuanda) pada tanggal 13 Maret 2001.
- 2) Posisi Duga Muka Air di ketiga waduk telah mengalami kenaikan. Di waduk Saguling menjadi 641.66 m berarti terjadi kenaikan 3.84 m; di Cirata menjadi 216.85 m berarti mengalami kenaikan 1.90 m dan di Juanda menjadi 101.88 m terjadi kenaikan 3.68 m.
- 3) Kondisi rata-rata air masuk lokal di ketiga waduk juga mengalami kenaikan bila dibandingkan dengan periode sebelumnya. Di waduk Saguling air masuk rata-rata sebesar 171.22 m³/det; di Cirata sebesar 138.10 m³/det dan Juanda sebesar 17.49 m³/det. Sedangkan nilai rata-rata aliran total Citarum sebesar 326.81 m³/det. Jika dibandingkan dengan periode sebelumnya (1 s.d. 11 Maret 2001) berarti terjadi kenaikan sebesar 140.58 m³/det.
- 4) Volume total aliran Citarum sejak mulai kegiatan hingga tanggal 10 April 2001 adalah sebesar 847.33 juta m³.

7. KESIMPULAN

Dari kegiatan penerapan teknologi modifikasi cuaca di DAS Citarum tanggal 12 Maret s.d. 10 April 2001 dapat disimpulkan sebagai berikut:

- A. Kegiatan modifikasi cuaca di DAS Citarum tanggal 12 Maret s.d. 10 April 2001 dapat dinyatakan berhasil. Keberhasilan ini dinyatakan oleh tim evaluasi yang dipimpin oleh Dinas Pengelolaan Sumberdaya Air Provinsi Jawa Barat.
- B. Jumlah air yang tertampung di tiga waduk sebanyak 559.06 juta m³, merupakan selisih dari volume total aliran yang masuk (847.33 juta m³) dengan air yang dikeluarkan selama kegiatan di waduk Juanda sebesar 2887.27 juta m³.
- C. Jumlah tersebut dapat memperkecil defisit cadangan air ketiga waduk sehingga operasi ketiga waduk untuk tahun 2001 dan 2002 dapat diamankan.
- D. Teknologi modifikasi cuaca sangat bermanfaat bila dilaksanakan pada daerah yang memiliki waduk untuk menampung air hasil penyemaian dan periode yang tepat.

Daftar Pustaka

- Bell et al., 1999: Climate assessment for 1999. *Bulletin of the American Meteorology Society*, Vol. 8, No. 6, June 2000.
- BoM Australia, 2001: Internet at <http://BoM.Gov.Au/weather/nt>.
- Fu et al., 1990: Behavior of deep convective clouds in the tropical Pacific deduced from ISCCP radiances. *J. Climate* **3**, 1129-1152.
- Institute of Global Environment and Society (IGES), 2001: Internet at <http://grads.iges.org/pix/trop.fcst.htm>.
- PJT II, 2001: Kegiatan Penyemaian Awan/Hujan Buatan di DAS Citarum Tanggal 12 Maret s.d. 10 April 2001, Laporan PJT II kepada Menteri KIMPRASWIL, tidak diterbitkan.
- Sitorus, B. P., 2001: Teknologi Modifikasi Cuaca dengan Menerapkan Konsep Sistim dan Lingkungan, Tidak diterbitkan.

DATA PENULIS



Dra. Mimin Karmini, MSc. adalah seorang meteorologist dan peneliti di UPT Hujan Buatan – BPPT. Pendidikan S2 dalam bidang meteorologi diperoleh dari Saint Louis University, St. Louis – Missouri, USA tahun 1990. Bekerja di BPPT mulai tahun 1981. Sudah mengikuti operasional penyemaian awan (hujan buatan) sejak tahun 1982 sampai sekarang. Mengikuti penelitian dalam implementing cold cloud seeding di Thailand tahun 1991, mengikuti penelitian dalam implementing cloud seeding using hygroscopic flares di Coahuila – Mexico tahun 1996, mengikuti dan menjadi koordinator lapangan dalam penelitian implementing cloud seeding using flare technique, yang merupakan kerjasama antar pemerintah Indonesia (diwakili BPPT), Canada dan USA di Soroako – Sulawesi selatan tahun 1998 dan 1999.