

Pengelolaan Sumberdaya Air di DAS Brantas dengan Penerapan Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) untuk Keandalan Layanan Air

HARIANTO¹

Raymond Valiant RURITAN²

¹ Direktur Utama Perusahaan Umum (Perum) Jasa Tirta I, surel: harianto@jasatirta1.net

² Direktur Teknik Perusahaan Umum (Perum) Jasa Tirta I, surel: raymond@jasatirta1.co.id

Ringkasan – Pengelolaan sumberdaya air adalah konsep yang muncul karena keterbatasan air, yang diakibatkan berkembangnya berbagai aspek kehidupan: pemenuhan kebutuhan dasar manusia untuk makan dan minum, maupun kepada proses produksi dan pemberian nilai tambah pada berbagai proses – termasuk di dalamnya pemeliharaan lingkungan. Kegiatan modifikasi cuaca merupakan penerapan teknologi dalam usaha mengubah sifat-sifat ragawi dari air yang berada di atmosfer agar dapat dipergunakan meningkatkan ketersediaan air permukaan dengan tujuan kegiatan mengurangi risiko kelangkaan. Pendekatan ini merupakan instrumen teknologi dalam pengelolaan air untuk menjawab kelangkaan sebaran air permukaan. Manfaat dari penerapan teknologi modifikasi cuaca dalam bentuk penyemaian awan, dapat dilihat dari manfaat ekonomis yang diperoleh akibat meningkatnya ketersediaan air permukaan di waduk sebagai penyimpan air paling pokok di daerah aliran sungai Brantas. Perhitungan manfaat (*value pricing*) dilakukan dengan konversi secara ekonomi dari volume air tambahan yang diterima waduk, ke dalam nilai manfaat air untuk sektor pembangkitan energi listrik dan pertanian.

Kata Kunci – modifikasi cuaca, air permukaan, daerah aliran sungai

PENDAHULUAN

Setelah udara, air adalah sumberdaya pokok dan utama bagi kehidupan. Sebenarnya seluruh kehidupan di bumi ini bertalian dengan air. Oleh karena itu, pertumbuhan penduduk, kebutuhan pangan dan energi, serta perkembangan ekonomi, menempatkan pengelolaan air pada peran yang penting.

Uniknya, semua kebutuhan air yang berkaitan dengan hal-hal tersebut di atas bertumpu pada air tawar yang berjumlah terbatas. Keterbatasan air tawar, dalam persebarannya terhadap waktu, ruang, jumlah dan mutu, menyebabkan manusia menerapkan berbagai pendekatan teknologi untuk mengelola air sejak peradaban dimulai.

Teknologi untuk menyediakan, menghemat, dan mengolah air, akhirnya juga memasuki ranah klimatologi yang antara lain terwujud melalui kegiatan modifikasi cuaca. Kegiatan modifikasi ini merupakan upaya penyemaian awan (*cloud seeding*) yang diharapkan dapat menambah (atau mengurangi) ketebalan curah hujan pada suatu area tertentu.

Konsep Pengelolaan

Pengelolaan sumberdaya air adalah konsep yang muncul karena keterbatasan air, menyangkut berbagai aspek kehidupan: pemenuhan kebutuhan dasar manusia untuk makan dan minum, maupun kepada proses produksi dan pemberian nilai tambah pada berbagai proses – termasuk di dalamnya pemeliharaan lingkungan.

Keterbatasan air tawar mendorong manusia untuk mempelajari, menghasilkan pengetahuan dan menciptakan teknologi untuk menyediakan air bagi berbagai keperluan. Sebagai sumberdaya yang mengalir, air tunduk pada hukum gravitasi yang akhirnya dalam skala topografis menempatkannya dalam suatu yang dinamakan daerah aliran sungai.

Pengelolaan sumberdaya air telah disepakati sejak 1930-an memakai pendekatan daerah aliran sungai dengan pendekatan: satu sungai, satu rencana – yang kemudian ditambah – satu pengelolaan terpadu.

Kebutuhan Air

Kebutuhan air adalah sebuah konsep yang memiliki banyak ditakrifkan, baik oleh para peneliti maupun praktisi. Ada tiga pemahaman yang berkembang atas apa yang dinamakan kebutuhan air. Pemahaman pertama melihat kebutuhan air sebagai sesuatu yang harus segera terpenuhi pada waktu dan tempat tertentu. Pemahaman ini melihat air dalam kerangka sebab-akibat dari pertumbuhan penduduk, perkembangan ekonomi dan pemenuhan pangan. Air harus disediakan untuk keperluan-keperluan ini, terlepas dari tercukupi atau tidak oleh sumberdaya yang ada.

Pemahaman kedua melihat kebutuhan air sebagai sesuatu yang harus dipenuhi untuk keperluan dasar, seperti pemenuhan keperluan dasar: pangan, air minum dan sanitasi. Dalam hal ini dibedakan antara kebutuhan air untuk pemenuhan dasar manusia dengan kebutuhan untuk memproduksi benda-benda ekonomis lain (Gleick, 1996). Pemenuhan air untuk setiap kebutuhan adalah tujuan dari pengelolaan sumberdaya air. Dalam pemahaman ini, kebutuhan air berdiri di atas persoalan sosial-politik dan tak akan terpengaruh olehnya.

Pemahaman ketiga melihat kebutuhan air sebagai fungsi ekonomis. Kebutuhan air timbul karena adanya keperluan transaksional, di mana manusia bersedia mengeluarkan upaya (dan uang) untuk memperoleh air sesuai kebutuhannya. Dalam cara pandang ini, dikenal istilah «kebutuhan efektif» yang menunjukkan besarnya kesediaan manusia mengeluarkan «uang» untuk memperoleh air (Merret, 1997). Dengan sendirinya, kebutuhan air dalam pemahaman ini dianggap tunduk pada mekanisme pasar di mana air merupakan benda yang dapat ditransaksikan.

Ketersediaan Air

Ada banyak pemahaman terkait apa yang disebut ketersediaan air. Salah satu pemahaman yang lazim dianut para praktisi adalah jumlah dari seluruh air permukaan dalam suatu daerah aliran sungai sebagai air yang tersedia, dengan anggapan air adalah sumber yang terbarukan dan jumlah air yang terbarukan ini menjadi air yang sebenarnya tersedia. Pendekatan ini membuat jumlah air permukaan dapat dibagi terhadap jumlah penduduk, tidak saja dalam suatu daerah aliran sungai, namun juga dalam suatu negara, regional maupun benua (Shiklomanov, 1997).

Berpegangan pada pemahaman ini maka Indonesia memiliki ketersediaan air yang cukup besar, yakni setara 15.500 m³ per-kapita/tahun, suatu angka yang besar – hampir 25 kali dari rerata dunia (Sarwoko dan Anshori, 2003). Namun tentu saja angka yang demikian besar ini tak mencerminkan kenyataan bahwa penduduk di Jawa hanya memiliki potensi 1.523 m³ per-kapita/tahun sedangkan di Papua hampir 16.500 m³ per-kapita/tahun.

Pemahaman ini mendapat banyak kritik karena tidak memperhitungkan jumlah air yang tak terpakai, seperti halnya air pada saat terjadi banjir, atau air dengan kualitas rendah sehingga tak dapat dimanfaatkan.

Mempertimbangkan jumlah air yang tak dapat terpakai dapat dihitung kembali ketersediaan air yang sebenarnya, tentu dalam hal ini lebih rendah. Hoekstra (1999) mengutip penelitian Ambroggi (1980) menyebut ketersediaan air adalah sekitar 23% dari jumlah seluruh limpasan permukaan di suatu daerah aliran sungai, sedangkan penelitian Postel et.al (1993) menghitung sekitar 31%.

Hal lain yang dirasakan berpengaruh pada ketersediaan air adalah adanya variabilitas iklim (*climate variability*). Dalam perhitungan hidrologi, akan lebih «aman» memakai tahun yang kering dibandingkan tahun yang basah ketika dilakukan perkiraan besar ketersediaan air pada suatu daerah aliran sungai – sebab besaran air yang diperoleh akan lebih kecil sehingga peluang tak terpenuhi tentu saja lebih kecil dari nilai perkiraan yang besar.

Kelangkaan Air

Kelangkaan air adalah sebuah persoalan global; hanya 2,5% air di dunia ini bersifat tawar dan dua-per-tiga darinya tersimpan dalam bentuk es, salju atau terbekukan. Potensi air tawar ini masih terganggu dengan limbah (baik dari sumber manusia, industri dan pertanian) sebesar 2 juta ton yang diperkirakan setiap hari dibuang ke danau, waduk, rawa dan sungai-sungai di dunia.

Pencemaran terhadap air permukaan ini menjadi persoalan yang semakin besar, seiring pertumbuhan penduduk, perkembangan ekonomi dan tata-kelola sumberdaya alam yang bersifat ekstraktif. Sebagai akibatnya, ketimpangan dalam ketersediaan air yang layak dimanfaatkan akan semakin terasa. Asia yang memiliki 60% penduduk di dunia hanya memiliki 36% sumber air tawar dan bersama dengan meningkatnya pencemaran maka manfaat yang dapat dipetik dari sumber-sumber tersebut akan semakin mengecil (UNDP, 2004). Kesenjangan dalam memperoleh air akan terus berkembang, bila pada tahun 2000 ada sekitar 20 negara yang berhadapan dengan kelangkaan air maka pada 2050 akan ada 2 miliar penduduk di 48 negara yang mengalami kekurangan air secara kronik.

Bagaimana pun juga istilah kelangkaan air dapat dipahami dalam beragam situasi. Bila dipergunakan untuk negara-negara dengan iklim kering maka kelangkaan ini mengarah kepada periode-periode tertentu di mana ketersediaan air permukaan amat kecil. Istilah ini juga dapat dipakai untuk menamai periode di mana ada kekurangan air. Jika dipergunakan dalam konteks suatu negara atau bangsa, maka kelangkaan ini menunjukkan adanya persaingan untuk memperoleh air. Namun, tidak saja bagi negara dengan iklim kering, sebab di negara dengan iklim yang relatif basah sekalipun kekurangan air dapat terjadi dan kompetisi untuk memperoleh air dapat berlangsung secara keras.

Kelangkaan air dengan demikian dapat dilihat dalam empat sudut pandang. Pertama, kelangkaan air sebagai peristiwa di mana ada kekurangan air. Kekurangan ini dapat muncul karena tidak tercukupi pasokan air sehingga kebutuhan tak terpenuhi. Namun kelangkaan ini juga dapat terjadi bilamana kebutuhan air menjadi tidak terkendali dan melampaui ketersediaan sumberdaya air.

Sudut pandang kedua, kelangkaan air adalah persoalan pasokan. Bila ada kekurangan maka seharusnya pasokan ditingkatkan misalnya dengan membangun tandon, waduk dan juga – modifikasi cuaca untuk meningkatkan curah hujan.

Sudut pandang ketiga melihat bahwa air bersifat terbatas sehingga kelangkaan air adalah peristiwa di mana kebutuhan tidak terkendali. Pertumbuhan penduduk dan perkembangan ekonomi menjadi penyebab utama di mana kebutuhan air semakin meningkat sehingga mendorong pemanfaatan sumberdaya air yang ada sampai mendekati kondisi kritis atau bahkan melampaui kekritisannya itu sendiri (Falkenmark, 1997).

Sudut pandang ke empat melihat kelangkaan sebagai persoalan ekonomi. Artinya, nilai air akan menentukan penggerak-penggerak ekonomi untuk menyeimbangkan kebutuhan dan ketersediaan. Pandangan ini dicerminkan – antara lain – dalam Piagam Dublin (1992) tentang sumberdaya air, khususnya pernyataan ke empat: «*water has an economic value in all its competing uses and should be recognized as an economic good.*»

PENERAPAN TEKNOLOGI MODIFIKASI CUACA

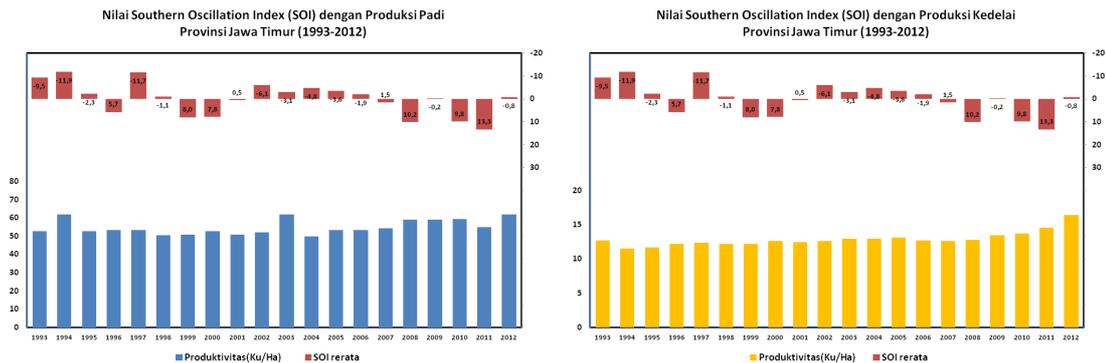
Kegiatan Modifikasi Cuaca

Kegiatan modifikasi cuaca merupakan penerapan teknologi dalam usaha mengubah sifat-sifat ragawi dari air yang berada di atmosfer agar dapat dimanfaatkan. Bila dimaksudkan bahwa modifikasi cuaca itu dihindaki untuk meningkatkan ketersediaan air maka tujuan kegiatan ini

adalah mengurangi risiko kelangkaan air dengan memperbesar pasokan air. Upaya mengurangi risiko kelangkaan air memang dapat ditempuh dengan memperbesar pasokan air, yang tidak saja dilakukan dengan modifikasi cuaca namun juga dengan cara konvensional membangun simpanan air (tandon atau waduk).

Secara garis besar kontribusi TMC dalam menambah curah hujan sudah diteliti UPT Hujan Buatan BPPT, dan dipandang mampu meningkatkan curah hujan alamiah antara 14-176% namun tingginya variabilitas curah hujan alam, disepakati tingkat keandalan TMC paling tidak dapat meningkatkan curah hujan alam sekitar 10% (Karsidi dan Tikno, 2007).

Adapun korelasi antara nilai Southern Oscillation Index (SOI) terhadap produksi beberapa bahan pokok pangan (seperti padi dan kedelai) masih perlu diteliti.



Gambar 1 - Perbandingan Southern Oscillation Index (SOI) terhadap produksi bahan pangan belum mencerminkan dampak terhadap eksternalitas ketersediaan air

Upaya memperbesar pasokan air sebenarnya berkaitan dengan menambah keandalan debit. Dalam pengelolaan sumberdaya air di suatu daerah aliran sungai, keandalan debit adalah kunci dari terciptanya pemenuhan berbagai kebutuhan air.

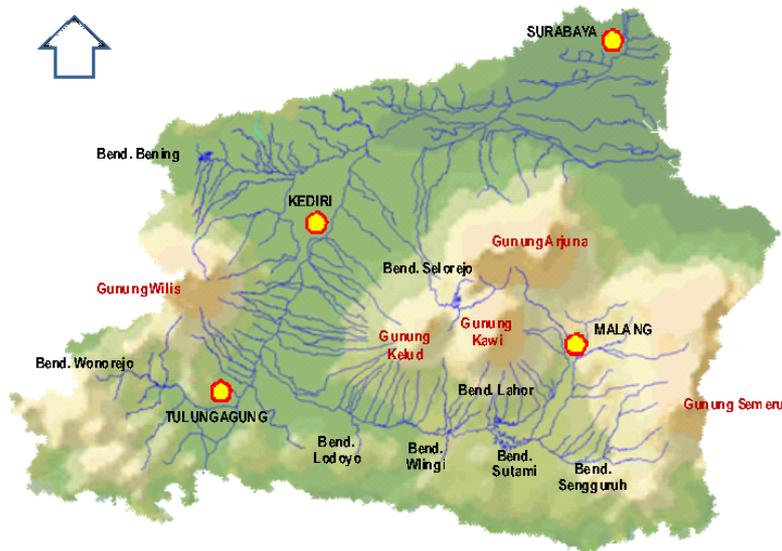
Pada umumnya air di sebuah daerah aliran sungai dapat dimanfaatkan bila aliran pokok di sungai-sungai cukup besar sepanjang masa, atau bila tidak, dapat disimpan di waduk atau tandon untuk mencukupi kebutuhan air sepanjang tahun. Bila suatu daerah aliran sungai tidak memiliki aliran pokok di sungai yang stabil maka dapat dibangun bendungan untuk menyimpan air (waduk).

Pada suatu daerah aliran sungai yang memiliki waduk, maka aliran pokok di sungai dapat ditampung/disimpan pada saat alirannya mencukupi dan dilepaskan sesuai keperluan sepanjang periode tertentu.

Untuk mengantisipasi ketersediaan air permukaan, TMC merupakan salah satu teknis yang telah mampu untuk mempercepat dan memperbanyak hujan melalui proses 'penyemaian awan' (*cloud seeding*). Teknologi ini telah banyak dimanfaatkan oleh para pengelola waduk terutama dalam rangka pengisian waduk dalam rangka meningkatkan ketersediaan air waduk sehingga berdampak pada meningkatkan keandalan waduk dalam memenuhi kebutuhan bagi kegiatan pembangkitan (tenaga listrik) dan / atau irigasi pertanian.

Modifikasi Cuaca di DAS Brantas

Brantas adalah sungai terbesar kedua di Provinsi Jawa Timur. Sungai sepanjang kurang lebih 320 km ini mengalir melalui 15 kabupaten dan kota, dengan luas daerah aliran sungai (DAS) seluas 11.800 km². Sungai ini berperan besar dalam menyediakan air untuk berbagai keperluan: pertanian, pembangkitan energi, air baku industri dan domestik, perikanan darat dan pariwisata. Daerah aliran sungai ini secara geografis memiliki bentuk memanjang walaupun oleh karena alirannya berputar searah jarum jam dari sumbernya di Gunung Arjuna. Curah hujan rerata di WS Kali Brantas sebesar 2.000 mm/tahun.



Gambar 2 - Daerah aliran sungai (DAS) Brantas, luas 11.800 km-persegi

Penduduk di DAS Brantas diperkirakan mencapai lebih dari 16 juta orang (angka tahun 2012) atau 43% dari penduduk Provinsi Jawa Timur. Kontribusi aktifitas di DAS Brantas setara dengan 59% dari produk domestik regional bruto untuk Provinsi Jawa Timur (2003).

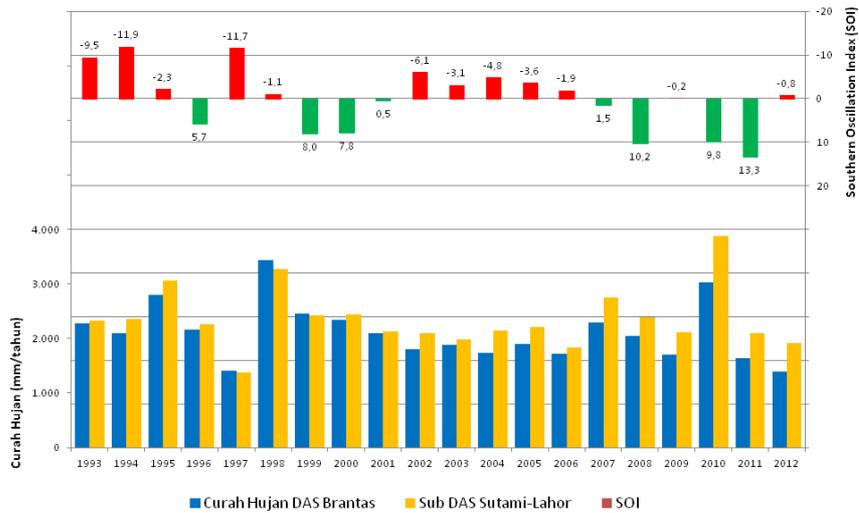
Karakteristik hidrologi Brantas dipengaruhi oleh aspek topografi dan klimatologi khas Nusantara. Topografi Pulau Jawa dibentuk oleh pergerakan tektonik, menyebabkan daerah aliran sungai dibentuk oleh apitan berbagai gunung berapi. Hal ini menyebabkan sungai di pulau ini menjadi curam dan pendek. Secara klimatologis, Jawa dipengaruhi oleh kemusiman muson dan pergerakan diapole.

Karakteristik ini, ditambah dengan kepadatan penduduk dan pertumbuhan ekonomi menyebabkan Pulau Jawa rentan pada bencana hidrologi (Pangesti dan Budinetro, 2003) yakni kekeringan (kekurangan air) dan banjir (kelebihan air).

Pelaksanaan teknologi modifikasi cuaca telah dilakukan sebanyak kurang lebih 4 kali, yakni berturut-turut 1998, 2007, 2012 dan 2013. Jika dicermati, kegiatan TMC pada awalnya dilaksanakan untuk menambah ketersediaan air, khususnya pada tahun kering secara hidrologis (1998) yang diindikasikan terpengaruh fenomena El-Niño. Namun, belakangan (2007, 2012 dan 2013) TMC diarahkan pada pemantapan aliran permukaan.

Pelaksanaan modifikasi cuaca dipusatkan pada bagian hulu dari daerah aliran sungai Brantas, yang mencakup daerah tangkapan air dari Bendungan Sengguruh, Sutami (Karangkates) dan Lahor seluas 2.170 km².

Nilai Southern Oscillation Index (SOI) dengan Curah Hujan DAS Brantas dan Sub DAS Sutami-Lahor (1993-2012)



Gambar 3 - Korelasi Curah Hujan Rerata di DAS Brantas dan Sub DAS Sutami-Lahor (1993-2012) dan Nilai Southern Oscillation Index (SOI)

ANALISIS MANFAAT PENERAPAN

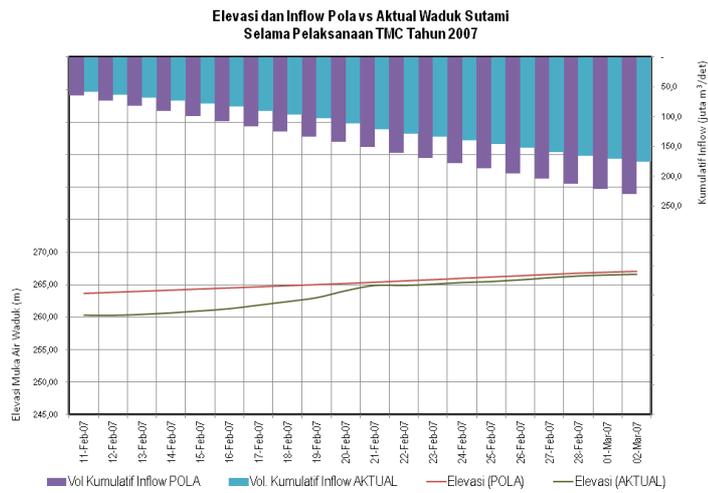
Curah Hujan

Pada setiap kegiatan TMC Data curah hujan harian diperoleh dari hasil pengamatan stasiun penakar curah hujan yang terpasang di Pos Meteorologi dan stasiun penakar curah hujan eksisting di wilayah DAS Kali Brantas Hulu yang dikelola oleh Perum Jasa Tirta I serta penakar hujan yang terletak di Lapangan Udara Abdulrahman Saleh.

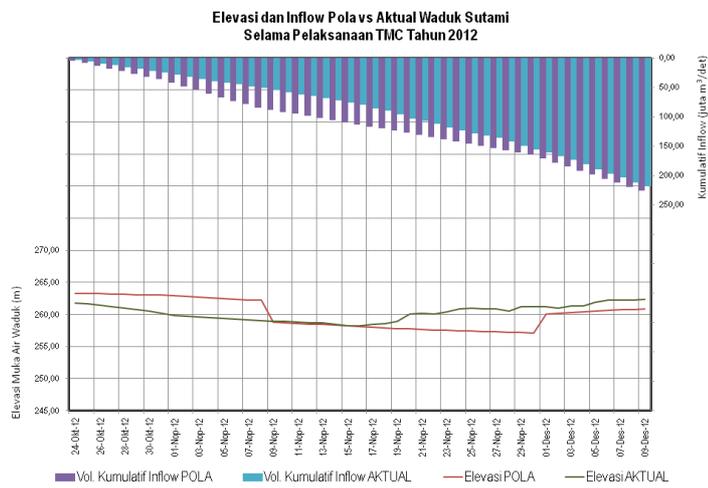
Pada kegiatan TMC pada tahun 2007 terlihat bahwa hasil analisa curah hujan harian rata-rata di sub DAS Sutami /Lahor curah hujan harian rata-rata di sub DAS Sutami/Lahor cenderung naik (di atas curah hujan harian rata-rata di DAS Brantas).

Untuk kegiatan TMC tahun 2012, secara umum rerata curah hujan yang terjadi selama kegiatan di DAS Brantas Hulu lebih tinggi dibandingkan DAS Brantas. Hal ini mengindikasikan konsentrasi curah hujan banyak terjadi di daerah target TMC.

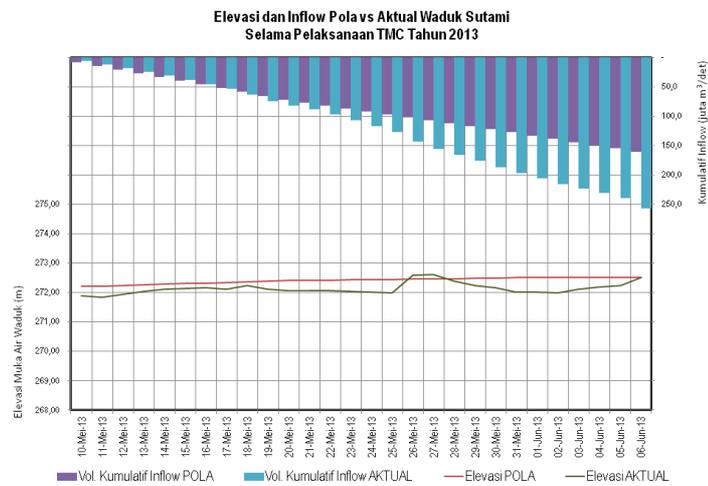
Serta untuk kegiatan TMC tahun 2013 secara umum distribusi spasial curah hujan di DAS Kali Brantas Hulu selama periode kegiatan TMC lebih banyak terkonsentrasi di sisi sebelah barat, tepatnya di daerah Tunggoro yang berada di lereng timur Gunung Kawi.



Gambar 4 - Volume inflow dan elevasi muka air Bendungan Sutami selama TMC tahun 2007



Gambar 5 - Volume inflow dan elevasi muka air Bendungan Sutami selama TMC tahun 2012



Gambar 6 - Volume inflow dan elevasi muka air Bendungan Sutami selama TMC tahun 2013

Aliran Permukaan

Volume air yang tertampung di waduk selama TMC, karena TMC dilaksanakan pada masa pengisian waduk, maka sebagian debit yang masuk ke waduk dikeluarkan untuk pembangkitan (PLTA) dan memenuhi kebutuhan di bagian hilir (irigasi, industri dan PDAM).

Pada kegiatan TMC tahun 2007, volume air hasil TMC dihitung dari pengurangan antara aliran aktual - aliran dasar/alami (dihitung dari rerata inflow sebelum kegiatan TMC, tanggal 1 Januari - 10 Pebruari 2007) yang masuk di dua waduk selama kegiatan TMC.

Sedangkan pada kegiatan TMC tahun 2012 dan 2013, tambahan air hasil TMC di DAS Kali Brantas Hulu dihitung dengan menggunakan pendekatan matematis yaitu jumlah aliran aktual dikurangi dengan aliran dasar (*baseflow*) selama periode kegiatan TMC.

Detail ringkasan pelaksanaan kegiatan TMC di DAS Brantas pada tahun 2007, 2012 dan 2013 seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1 - Ringkasan Pelaksanaan Kegiatan TMC di DAS Brantas Tahun 2007, 2012 dan 2013

Rincian	2007 ¹	2012	2013
Waktu pelaksanaan	11 Feb-2 Mar	23 Okt-7 Des	10 Mei-4 Jun
Jumlah hari kegiatan	20 hari	36 hari	20 hari
Jumlah penerbangan (<i>sortie</i>)	51	42	29
Jumlah Bahan Semai	55.825 kg	36.740 kg	34.000 kg
Volume Tambahan Inflow TMC:			
- Waduk Sengguruh	45.070.000	85.579.200	71.594.496
- Waduk Sutami	40.520.000	175.098.240	126.935.424
Total tambahan energi listrik	12.493.256	48.197.833	35.447.076
Tarif BJPSDA yang berlaku	Rp 44,58/kWh	Rp 149,37/kWh	Rp 149,37/kWh
Total Pendapatan	Rp 556.949.358	Rp 7.199.310.315	Rp 5.294.729.742
Prediksi Manfaat Irigasi (ha)	4.690	20.266	14.692
Nilai 5 ton/ha x harga GKP ²	Rp 77.381.944.444	Rp 334.389.000.000	Rp 242.411.400.000
Biaya pelaksanaan (Rp)	Rp 1.513.048.790 ³	Rp 4.099.788.000	Rp 2.277.660.000

Manfaat Penerapan

Manfaat dari penerapan teknologi modifikasi cuaca dalam bentuk penyemaian awan, dapat dilihat dari manfaat ekonomis yang diperoleh akibat meningkatnya ketersediaan air permukaan di waduk sebagai penyimpan air paling pokok di daerah aliran sungai Brantas. Aliran permukaan ke

¹ Evaluasi pada tahun 2007 dihitung dari pengurangan antara aliran aktual dikurangi aliran dasar/alami yang dihitung dari rerata *inflow* sebelum kegiatan TMC (tanggal 1 Januari – 10 Pebruari 2007) yang masuk ke dua waduk (Sutami dan Sengguruh) yang menjadi obyek kegiatan TMC.

² Manfaat untuk air irigasi dihitung dengan pendekatan nilai manfaat air di mana diasumsikan tambahan air dapat dipakai mengairi areal irigasi, walaupun pada musim hujan sebenarnya kebutuhan irigasi dari waduk relatif kecil bila dibanding pada musim kemarau. Kebutuhan air untuk tanaman padi sekali tanam per ha = 8.640 m³ (asumsi kebutuhan air 1 liter/detik/ha selama 100 hari). Tambahan volume inflow di Waduk Sutami = 126.935.424 m³ dapat mengairi sawah seluas 14.692 ha. Bila produksi tiap ha sawah sebesar 5 ton padi dengan harga Rp. 3.300/kg (sesuai Instruksi Presiden RI No. 3 tahun 2012), maka diperoleh nilai manfaat sebesar: 14.692 ha x 5 ton x Rp. 3.300 = Rp 242,41 miliar. GKP = gabah kering panen.

³ Biaya pelaksanaan pada tahun 2007 dihitung dari total biaya personil dan non personil (bahan, sewa pesawat dan lain-lain) oleh karena pada saat itu belum terbit Peraturan Pemerintah No. 36 tahun 2008 tentang Jenis dan Tarif atas Jenis Penerimaan Negara Bukan Pajak yang Berlaku pada BPPT.

Bendungan Sengguruh, Sutami dan Lahor bertambah sehingga meningkatkan keandalan pemberian layanan air.

Perhitungan manfaat (*value pricing*) dilakukan dengan konversi secara ekonomi dari volume air tambahan yang diterima waduk, ke dalam nilai manfaat air untuk sektor pembangkitan energi listrik dan pertanian. Perhitungan manfaat untuk sektor air baku tidak dilakukan oleh karena kompleksitas *value pricing* dari air dalam industri.

Sebagai gambaran, di DAS Brantas ada sejumlah pemanfaat air komersial, yang mencakup 8 pembangkit energi listrik tenaga air (PLTA) dengan kapasitas terpasang setara 280,62 mW, 144 industri yang berizin aktif dan 28 pemakai air baku untuk keperluan domestik, yang teregulasi pemanfaatan dan pengambilan air permukaannya (PJT-I, 2013). Manfaat yang diperoleh dari meningkatnya ketersediaan air dihitung dari pemanfaatan dan pengambilan air oleh sektor-sektor komersial tersebut.

KESIMPULAN

1. Kegiatan modifikasi cuaca merupakan penerapan teknologi dalam usaha mengubah sifat-sifat ragawi dari air yang berada di atmosfer agar dapat dipergunakan meningkatkan ketersediaan air permukaan dengan tujuan kegiatan mengurangi risiko kelangkaan.
2. Manfaat dari penerapan teknologi modifikasi cuaca dalam bentuk penyemaian awan, dapat dilihat dari manfaat ekonomis yang diperoleh akibat meningkatnya ketersediaan air permukaan di waduk sebagai penyimpan air paling pokok di daerah aliran sungai Brantas. Perhitungan manfaat (*value pricing*) dilakukan dengan konversi secara ekonomi dari volume air tambahan yang diterima waduk, ke dalam nilai manfaat air untuk sektor pembangkitan energi listrik dan pertanian.
3. Pelaksanaan kegiatan TMC di DAS Brantas pada akhir/awal musim terbukti memberi hasil yang cukup signifikan dibandingkan kegiatan TMC yang dilaksanakan pada tengah musim. Keberhasilan pelaksanaan TMC dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain, ketepatan waktu pelaksanaan TMC, potensi ketersediaan awan potensi hujan dan kondisi tiupan angin, mengingat aspek mikro dari DAS Brantas yang memiliki karakter hidrologis yang spesifik.
4. Secara umum kegiatan TMC di DAS Brantas dinilai cukup berhasil memenuhi sasaran menyediakan air permukaan dan meningkatkan keandalan pengisian air di waduk. Hal ini terlihat dari rata-rata hujan yang dihasilkan cukup signifikan dalam menghasilkan inflow ke waduk. Selain itu terjadi peningkatan muka air waduk selama periode TMC.

DAFTAR PUSTAKA

- Australian Government – Bureau of Meteorology (AGBM). (2013), Southern Oscillation Index (SOI). Diambil dari: <http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtml1.shtml> pada 9 Juni 2013.
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). (2007). *Laporan Kegiatan Pekerjaan Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) / Penyemaian Awan di Lokasi Daerah Tangkapan Waduk Sutami di DAS Kali Brantas Propinsi Jawa Timur Tanggal 11 Pebruari-2 Maret 2007*. Jakarta, Indonesia.
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). (2012). *Laporan Kegiatan Pelaksanaan Pekerjaan Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) / Penyemaian Awan di Daerah Tangkapan DAS Kali Brantas Propinsi Jawa Timur Tanggal 23 Oktober-7 Desember 2012*. Jakarta, Indonesia.
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). (2013). *Laporan Kegiatan Pekerjaan Jasa Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) di DAS Kali Brantas Provinsi Jawa Timur Tanggal 9 Mei s.d. 4 Juni 2013 (draft)*. Jakarta, Indonesia.
- Biro Pusat Statistik Republik Indonesia (BPS). (2013) *Data Statistik Tanaman Pangan*. Diambil dari: http://www.bps.go.id/tnmn_pgn.php?kat=3 pada 9 Juni 2013.
- Falkenmark, M. (1997), L'interaction de la société et du cycle hydrologique: un cadre conceptuel pour une approche globale. *Journal-des Sciences Hydrologiques* **42** (4): 421-454.
- Gleick, P. H. (1996), Basic Water Requirements For Human Activities: Meeting Basic Needs, *Water International* **21**: 83-92.
- Hoekstra, A. (1999), Appreciation of Water: Four Perspectives. *Water Policies* **1**. Elsevier Sciences. Hlm. 605-622.

- Japan International Cooperation Agency (JICA). (1998), *Development of the Brantas River Basin, Cooperation of Japan and Indonesia*. Tokyo, Japan: 108.
- Karsidi, A. dan Tikno, S. (2007), *Penerapan Teknologi Modifikasi Cuaca (Hujan Buatan) Sebagai Teknologi Alternatif Dalam Penyediaan Air Untuk Pengisian Dan Pengamanan Fungsi Waduk, Seminar Kondisi Sumber Daya Air untuk Mendukung Peningkatan Produksi Beras Sebesar 2 Juta Ton Tahun 2007*. Jakarta, Indonesia.
- Merret, J. (1997), *Introduction to the Economics of Water Resources, an International Perspective*. Rowman and Littlefield Publishers, Inc., Boston, Maryland, Amerika Serikat.
- Nippon Koei K.K. (1961), Comprehensive Report on the Kali Brantas Overall Project, Government of the Republic of Indonesia, Ministry of Public Works and Power, Jakarta, Indonesia: 3-14.
- Pangesti, D.R. and Budinetro, H.S. (2003), Drought and Flood Anticipation in Java, Indonesia in Proceedings of the 1st International Conference on Hydrology and Water Resources in the Asia Pacific Region 2, *Asia-Pacific Association of Hydrology and Water Resources*, Tokyo, Jepang: 775-780.
- Perum Jasa Tirta I (PJT-I). (2013). Laporan Akhir Tahun 2012. Malang, Indonesia.
- Sarwoko, A. dan Anshori, I. (2003), Keterpaduan pengelolaan sumberdaya air untuk pendayagunaan yang berkelanjutan. *Proceedings of the Seminar held by Food and Agriculture Organization (FAO) and Indonesian National Planning Board*. Jakarta, Indonesia: 7-22.
- Shiklomanov, I. A. (1997), *Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World: Assessment of Water Resources and Water Availability in the World*, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- United Nations Development Program (UNDP). (2004), *Water Governance for Poverty Reduction: Key Issues and the UNDP Response to Millenium Development Goals*. New York, United States of America.