

POTENSI HUJAN ES BERDASARKAN HASIL PENGAMATAN X-BAND RADAR MENGGUNAKAN METODE SEVERE HAIL INDEX

HAIL STONE POSSIBILITY FROM X-BAND RADAR OBSERVATION USING SEVERE HAIL INDEX METHOD

Noersomadi dan Tiin Sinatra*

Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

Jl. Dr. Djundjuran No.133 Bandung 40173*

Pos-el: noersomadi@lapan.go.id

ABSTRACT

Routine weather observations using Doppler X-band radar had been done during March 14 to 18, 2013 coincide with 6 hourly radiosonde balloons launching. The purpose of this research is to identify whether there are extreme conditions or hail stone during observation period. Hail stones were investigated using Severe Hail Index (SHI) method. SHI was calculated through integrating the energy flux (dE/dt) to the height different between 0°C (T_0) and -20°C (T_{m20}) temperature. The height of T_0 and T_{m20} were obtained from the nearest radiosonde launching, that showed the probability of hail stone occurrence. The SHI values was compared with the Vertically Integrated Liquid (VIL). The results showed the existence of cumulus cloud raised 9 km on March 18, 2013 at 16 LT, and have a high probability of hail stone, in which SHI and VIL have more values than the threshold of about 100 and 43 kg/m^2 , respectively. These were also identified by satellite observation.

Keywords: hail stone, radar, severe hail index.

ABSTRAK

Pengamatan rutin cuaca menggunakan radar X-band Doppler telah dilakukan selama periode 14 – 18 Maret 2013 bersamaan dengan peluncuran radiosonde tiap 6 jam. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi apakah selama periode pengamatan terdapat kejadian cuaca yang dapat dikategorikan sebagai cuaca ekstrem berupa hujan es. Investigasi hujan es dilakukan menggunakan metode *Severe Hail Index* (SHI). SHI dihitung dengan mengintegrasikan fluks energi kinetik per satuan waktu (dE/dt) terhadap beda ketinggian antara temperatur 0°C (T_0) dan -20°C (T_{m20}). Ketinggian T_0 dan T_{m20} diperoleh dari peluncuran radiosonde pada waktu yang terdekat dengan hasil pengamatan radar, yang menunjukkan adanya potensi hujan es. Nilai SHI yang dihasilkan dibandingkan dengan penghitungan nilai *Vertically Integral Liquid* (VIL). Hasil investigasi menunjukkan bahwa pada tanggal 18 Maret 2013 pukul 16 waktu lokal terdapat awan cumulus yang mencapai ketinggian 9 km dan berpotensi terjadi hujan es dengan nilai SHI dan VIL berturut-turut melebihi nilai ambang batas 100 dan 43 kg/m^2 . Awan tebal yang terindikasi berpotensi hujan es tersebut juga tampak dari hasil pengamatan satelit.

Kata kunci: hujan es, radar, *severe hail index*.

PENDAHULUAN

Salah satu fenomena yang termasuk dalam kategori cuaca ekstrem adalah kejadian hujan es (*hail stone*). Hujan es merupakan bencana alam hidrometeorologis yang terkait dengan badai atau petir, batuan es yang turun dapat mengakibatkan kerusakan properti.^{1,2} Oleh karena hujan es kerap menimbulkan kerugian, studi tentang hujan es menjadi perhatian tersendiri. Analisis terkait penentuan hujan es dari hasil observasi radar telah dilakukan pertama kali oleh Cook³ seiring dengan perkembangan teknologi radar untuk pemantauan cuaca berdasarkan perbedaan panjang gelombang sinyal yang dipancarkan, telah ditemukan beberapa algoritma untuk

menentukan batuan es dari data reflektivitas radar.

Observasi rutin menggunakan radar X-band Doppler (untuk selanjutnya disebut radar) dengan frekuensi 9,4 GHz telah dilakukan selama kurun waktu 14 – 18 Maret 2013 oleh Noersomadi dkk.⁴ di wilayah cekungan Bandung ($107,69^{\circ}\text{BT}$, $-6,97^{\circ}\text{LS}$). Pengamatan ini dilakukan bersamaan dengan peluncuran radiosonde setiap 6 jam di lokasi dengan jarak horizontal 16 km dari titik radar arah Barat Laut. Pengaturan teknik observasi radar adalah menggunakan metode *Plan Position Indicator* (PPI) atau *azimuthal equidistant* dan *Range Height Indicator* (RHI) atau *elevation equidistant*. Penjelasan rinci

mengenai skedul pengamatan PPI dan RHI akan diuraikan dalam Bab 3.

Makalah ini akan membahas penerapan algoritma *Severe Hail Index* (SHI) untuk menginvestigasi potensi hujan es serta penjelasan analisis fisis mengenai hasil yang diperlihatkan oleh radar dan radiosonde. Motivasi penelitian ini adalah untuk menganalisis apakah selama periode pengamatan menggunakan radar terjadi fenomena hujan es. Penerapan metode SHI diawali dengan identifikasi nilai reflektivitas radar di atas 54 dBz.^{5,6}

Secara umum radar cuaca dibagi menjadi tiga jenis berdasarkan panjang gelombang yang digunakan, yaitu S-band, C-band, dan X-band berturut-turut dari panjang gelombang yang terpanjang. Semakin kecil atau pendek panjang gelombang (X-band) tingkat kepekaan terhadap kandungan uap air di atmosfer semakin tinggi. Akan tetapi, radar X-band memiliki kelemahan berupa atenuasi besar, yang berarti bahwa jangkauan horizontal cakupan pengamatan radar lebih pendek dibanding radar C-band dan S-band.⁷

Pembentukan batuan es telah diidentifikasi oleh Kennedy⁸ melalui hasil pengamatan radar polarimetrik. Batuan es yang berpotensi menjadi penyebab turunnya hujan es dapat dianalisis melalui lapisan peleburan pada ketinggian dimana temperatur atmosfer 0°C. Pada pengamatan radar, lapisan tersebut diindikasikan oleh nilai reflektivitas radar tinggi, dan apabila melebihi 54 dBz maka dapat nilai estimasi hujan per satuan waktu dapat mencapai 100 mm/jam.⁹

Butiran batuan es dapat berukuran puluhan milimeter atau bahkan hingga mencapai 4 – 5 cm sebagaimana yang ditemukan oleh Knight¹⁰ pada 24 Juni 2006 di Boulder, Colorado, USA. Adapun investigasi hujan es melalui kajian berbasis model, telah menunjukkan hingga mencapai 2 cm.¹¹ Batuan es yang turun diakibatkan oleh aktivitas konvektif yang sangat kuat. Fenomena konvektif yang sangat kuat menyebabkan suplai uap air dari atmosfer bawah semakin bertambah. Dalam keadaan tersebut tetes hujan masih dalam keadaan fasa cair meski temperaturnya dibawah 0°C. Oleh karenanya, butiran es yang turun memiliki diameter besar dan turun dalam bentuk bebatuan akibat gesekan udara tidak mampu mengikis menjadi tetes hujan.

Berdasarkan literatur yang telah disebutkan di atas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mendeteksi fenomena yang terindikasi sebagai hujan es. Pendeteksian menggunakan indeks hujan lebat sangat bermanfaat untuk mitigasi bencana hidrometeorologi.

METODOLOGI

Investigasi potensi hujan es dalam penelitian ini menggunakan data dari dua instrumen, yakni radar dan radiosonde. Data radar berupa hasil pemindaian (*scanning*) metode PPI dan RHI. Skedul PPI adalah satu putaran 360° dari elevasi 0° sampai dengan 50° dengan interval 1°. Kecepatan putaran sebesar 18° per detik, yang berarti diperlukan waktu 20 detik untuk satu putaran. Dengan demikian satu *volume scan* PPI membutuhkan waktu sekitar 18 menit. Adapun untuk skedul RHI, radar memindai wilayah pada tiap azimuth 30° pada interval elevasi 0° – 80° dengan kecepatan 1° per detik. Artinya, satu skedul sapuan RHI pada azimuth 0°, 20°, 60°, ..., 330° memerlukan waktu kurang lebih 16 menit. Perpindahan skedul PPI dan RHI dilakukan secara otomatis.

Data radiosonde diperoleh dari situs (<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp>). Peluncuran radiosonde tiap 6 jam tersebut merupakan hasil kerjasama LAPAN dengan RISH Kyoto University. Data radiosonde digunakan untuk menentukan ketinggian dimana temperatur atmosfer mencapai 0°C (T0) dan -20°C (Tm20). Data MTSAT (<http://bisma.sains.lapan.go.id>) juga digunakan dalam penelitian ini sebagai pendukung analisis.

Pendeteksian kejadian hujan es diawali dengan melihat data reflektivitas radar pada *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI) pada ketinggian rendah. Dalam hal ini dipilih 3 km karena diasumsikan sudah tidak ada halangan atau pengaruh topografi pegunungan wilayah Bandung yang mencapai 2,5 km. Langkah selanjutnya adalah menentukan ketinggian reflektivitas maksimum hasil PPI *volume scan* (maxPPI).

Nilai SHI (persamaan 1) dari hasil integrasi perkalian fluks energi kinetik dengan fungsi pembobotan terhadap beda ketinggian T0 dan Tm20¹². Fungsi pembobotan yang dimaksud adalah fungsi yang bergantung pada temperatur radiosonde (persamaan 3) dan reflektivitas radar (persamaan 4). T0 dan Tm20 pada persamaan 3 sudah dijelaskan pada bab sebelumnya. Adapun Z_L dan Z_U berturut-turut adalah *lower* (40 dBz) dan *upper* (50 dBz) *reflectivity*.

$$SHI \equiv \frac{1}{10} \int_0^{H_{top}} w(z(h)) w_T(h) \dot{E}(z(h)) dh \tag{1}$$

$$\dot{E}(Z) = 5.0 \times 10^{-6} Z^{0.84} \tag{2}$$

$$W_T(H) = \begin{cases} 0 & \text{untuk } H \leq H_{T0} \\ \frac{H-H_{T0}}{H_{Tm20}-H_{T0}} & \text{untuk } H_{T0} \leq H \leq H_{Tm20} \\ 1 & \text{untuk } H \geq H_{Tm20} \end{cases} \quad (3)$$

$$W(Z) = \begin{cases} 0 & \text{untuk } Z \leq Z_L \\ \frac{Z-Z_L}{Z_U-Z_L} & \text{untuk } Z_L \leq Z \leq Z_U \\ 1 & \text{untuk } Z \geq Z_U \end{cases} \quad (4)$$

Analisis hujan es dilanjutkan dengan konfirmasi hasil SHI dengan nilai *Vertically Integrated Liquid* (VIL). Persamaan 5 menunjukkan formula untuk menghitung VIL yang hanya berdasarkan data radar, yaitu integrasi reflektivitas terhadap beda ketinggian puncak awan yang terdeteksi oleh radar. Satuan SHI dan VIL berturut-turut adalah J/ms dan kg/m².

$$\begin{aligned} VIL &\equiv \int_0^{H_{top}} M \cdot dh \\ &= 3.44 \times 10^{-3} \int_0^{H_{top}} Z^{4/7} \cdot dh \end{aligned} \quad (5)$$

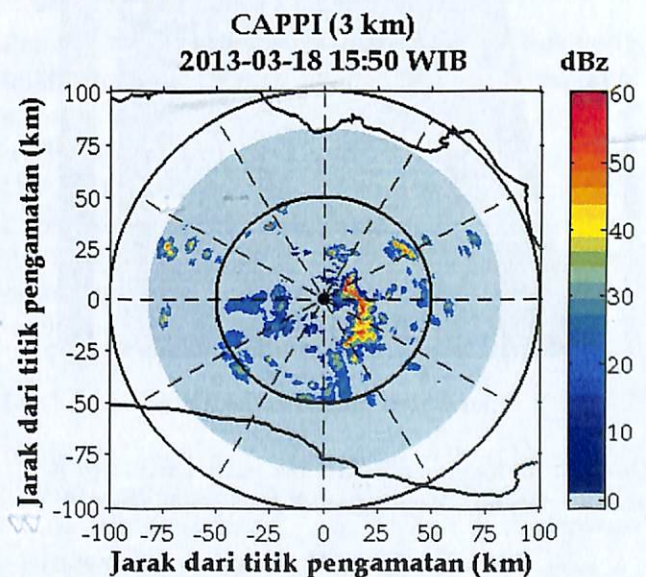
HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi hasil observasi radar yang berpotensi hujan es menunjukkan bahwa pada tanggal 18 Maret 2013 pukul 16.00 waktu lokal atau Waktu Indonesia Barat (WIB). Pembahasan selanjutnya mengambil studi kasus waktu pengamatan pada sore hari tersebut. Tampak jelas di sebelah timur titik pengamatan radar terdapat nilai CAPPI pada ketinggian 3 km yang melebihi ambang batas 54 dBz (Gambar 1). Terlihat bahwa awan tebal yang diindikasikan oleh reflektivitas lebih dari 50 dBz membentang dari azimut 60° sampai 150°. Meski terdapat awan konvektif skala kecil di bagian barat, akan tetapi tidak termasuk indikator adanya potensi hujan es karena nilai reflektivitas yang rendah (sekitar 20 dBz).

Hasil *scan* PPI pada waktu yang sama mengindikasikan adanya awan cumulus hingga mencapai 9 km (maxPPI), sebagaimana^{5,13} melakukan pengujian terhadap nilai maxPPI pada elevasi tinggi. Dalam makalah ini hanya akan ditampilkan hasil PPI pada elevasi 10° untuk menegaskan awan konvektif yang menjadi penyebab hujan es.

Data RHI untuk azimut 60° pada tanggal 18 Maret 2013 pukul 15:19 WIB ditunjukkan pada Gambar 2. Tampak bahwa puncak awan mencapai 9 km. Ketinggian ini yang dijadikan

sebagai parameter H_{TOP} dalam penghitungan integrasi SHI. Pada Gambar 2 tersebut terlihat nilai reflektivitas tinggi diantara ketinggian 1 – 7 km pada jarak horizontal 5 – 10 km dari titik radar. Berdasarkan data reflektivitas irisan awan tersebut dihitung fluks energi kinetik dan fungsi pembobotan (persamaan 2 dan 4). Data tinggi H_{T0} dan H_{Tm20} untuk menghitung fungsi pembobotan berdasarkan temperatur (persamaan 3) diperoleh dari pengamatan radiosonde tanggal 18 Maret 2013 pukul 13 WIB. Diketahui bahwa H_{T0} dan H_{Tm20} berturut-turut adalah 4174 dan 7677 meter diatas permukaan tanah.

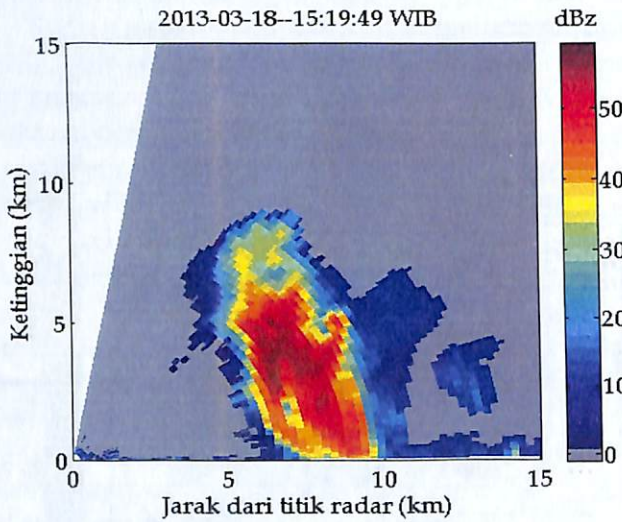


Gambar 1. Tampilan CAPPI data reflektivitas (Z) dalam satuan dBz di ketinggian 3 km.

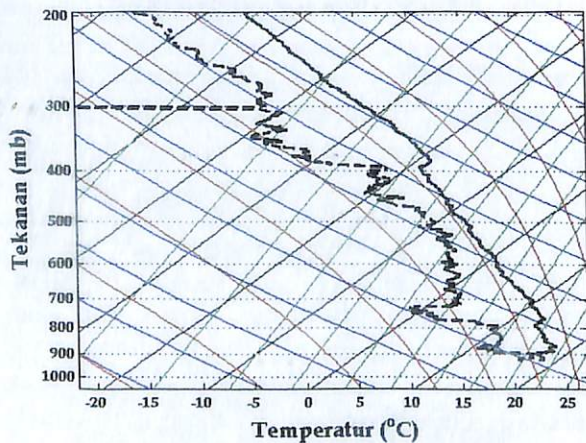
Awan cumulus yang diperlihatkan pada Gambar 2 memiliki diameter hanya 5 km dengan tinggi sekitar 10 km. Hal ini mengindikasikan adanya proses konvektif yang sangat kuat dan berpotensi terjadi hujan es. Grafik temperatur dalam diagram SkewT-logP sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 3, mengikuti garis adiabatik jenuh yang berarti bahwa atmosfer pada saat itu sangat lembap. Hal tersebut terlihat pula pada kurva kelembapan relatif yang menunjukkan kejenuhan atmosfer, terutama di lapisan 600 mb hingga 500 mb, dimana temperatur lingkungan mencapai 0°C dan -10°C.

Kondisi atmosfer yang sangat lembap ditunjukkan oleh data pengamatan radiosonde memicu percepatan proses pembentukan awan konvektif. Analisis ini diperkuat oleh Gambaran awan yang memiliki diameter hanya sekitar 5 km, yang mengindikasikan bahwa pergerakan naik ke atas uap air (*updraft*) sangat kuat dan sedikit

dipengaruhi oleh kecepatan angin horizontal. *Updraft* yang sangat kuat berpengaruh pada desakan uap air ke atas dan membentuk *super-cold water* atau air (cair) yang sangat dingin dengan temperatur dibawah 0°C. Secara penghitungan matematis, air yang sangat dingin ini memiliki kelembapan relatif di atas 100%. Air (cair) yang sangat dingin ini dapat berubah ke fasa padat dengan sangat cepat. Hal ini yang kemudian menyebabkan hujan es.¹⁰



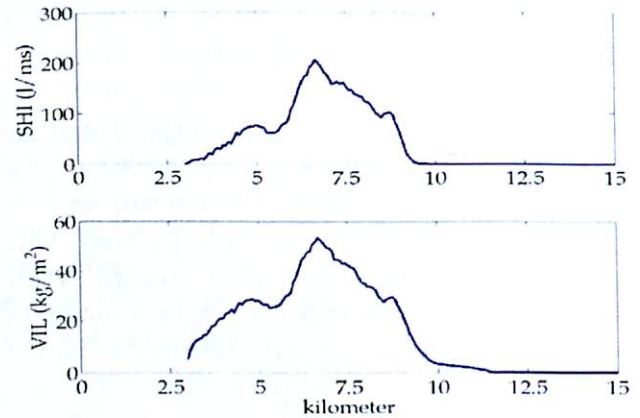
Gambar 2. Kontur reflektivitas radar hasil scan RHI pada azimut 60°. Ketinggian di atas antenna radar.



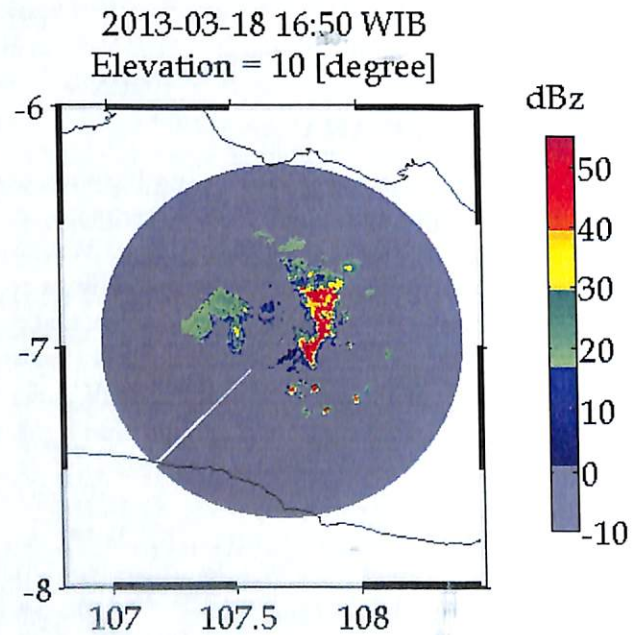
Gambar 3. Diagram SkewT-logP atau diagram termodinamika hasil pengamatan radiosonde pada tanggal 18 Maret 2013 pukul 13 WIB.

Grafik SHI dan VIL ditunjukkan pada Gambar 4. Nilai SHI pada rentang 6 – 8 km terlihat melebihi ambang batas 100 J/ms sebagai indikasi peluang hujan es.^{12,13} Demikian pula nilai VIL yang mencapai diatas 38 kg/m² sebagaimana diungkapkan oleh¹⁴ yang menyatakan sebagai bahwa nilai tersebut merupakan indikasi adanya batuan es. Adapun

nilai VIL yang melebihi 43 kg/m², sudah dapat dipastikan terdapat batuan es. Berdasarkan nilai ambang tersebut, terlihat pada jarak diantara 7 – 7,5 km dari titik radar terdapat batuan es.



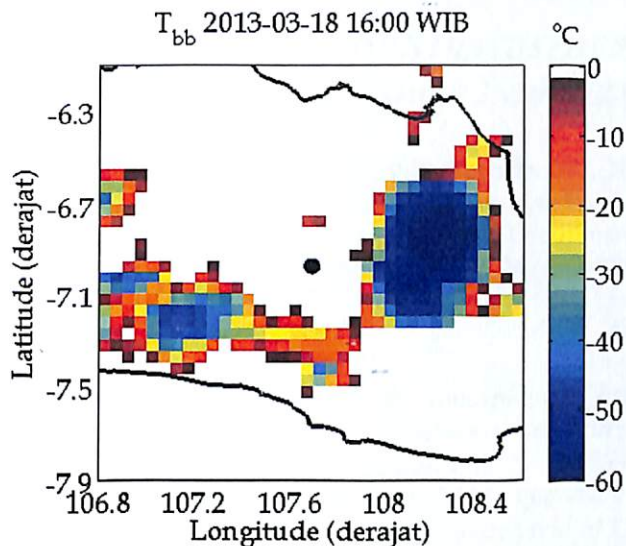
Gambar 4. Grafik SHI sebagai hasil integrasi fluks energi kinetik terhadap beda ketinggian T0 dan Tm20 (atas). Grafik VIL dari integrasi reflektivitas radar terhadap beda ketinggian. Sumbu-x adalah jarak horizontal pada azimut 60° dari titik radar.



Gambar 5. Hasil pengamatan PPI pada elevasi 10°. Resolusi horizontal adalah 250 m.

Berkaitan dengan sifat radar dengan panjang gelombang pendek, terlihat bahwa hasil RHI pada azimut 60° hanya mendeteksi awan tebal pada jarak horizontal 5 – 10 km dari radar. Sedangkan objek di belakang awan, hampir tidak tampak. Hal inilah yang menjadi indikasi bahwa radar dengan tipe ini memiliki atenuasi besar⁷. Artinya, apabila terdapat objek besar selain

ground-clutter, maka gelombang yang dipancarkan oleh radar teredam oleh objek tersebut, sehingga energi yang dipantulkan oleh objek lain dibelakangnya akan sangat lemah.



Gambar 6. Black body Temperature (Tbb) atau temperatur puncak awan hasil pengamatan MTSAT.

Gambar 5 mendeskripsikan data reflektivitas hasil pengamatan PPI pada elevasi 10° . Terdapat objek awan yang diindikasikan oleh nilai reflektivitas tinggi di bagian timur radar. Kurang lebih satu jam setelah awan yang terindikasi berpeluang terjadi hujan es, terdapat kumpulan awan yang semakin melebar.¹¹ Hal ini seakan memperlihatkan bahwa awan konvektif kian menjulang tinggi. Analisis ini diperkuat dengan hasil pengamatan satelit MTSAT pada tanggal 18 Maret 2013 pukul 16 WIB (Gambar 6). Pada arah Timur Laut dari titik pusat radar, terdapat gumpalan awan dengan temperatur puncaknya mencapai -60°C . Apabila diestimasi dengan menggunakan konstanta adiabatik jenuh, yakni temperatur udara lingkungan turun $6,5^\circ\text{C}$ tiap kenaikan satu kilometer, maka dari data H_{70} 4,2 km, tinggi puncak awan tersebut mencapai lebih dari 10 km.

KESIMPULAN

Analisis data hasil pengamatan radar telah menunjukkan adanya potensi hujan es yang terjadi pada tanggal 18 Maret 2013 pukul 16 WIB. Investigasi hujan es melalui penghitungan nilai SHI dengan menggunakan data reflektivitas radar dan data peluncuran radiosonde. Data reflektivitas radar untuk menghitung fluks energi kinetik dan fungsi pembobotan. Adapun data temperatur radiosonde adalah untuk menentukan ketinggian pada temperatur 0°C dan -20°C .

Tampilan awan dari scan RHI pada azimut 60° menunjukkan adanya batuan hujan es, dimana nilai SHI mencapai lebih dari 100 J/ms dan VIL diatas 43 g/m^2 .

Data reflektivitas radar pada elevasi 10° semakin memperkuat analisis adanya potensi hujan es disebabkan oleh proses konvektif yang sangat kuat. Hal tersebut terlihat pula dari hasil pengamatan satelit MTSAT yang memperlihatkan adanya gumpalan awan dengan temperatur puncaknya mencapai -60°C dengan tinggi awan mencapai lebih dari 10 km.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis sangat berterima kasih kepada tim yang telah bertugas dalam melaksanakan observasi selama kurun waktu 14 – 18 Maret 2013 di wilayah Bandung Timur dengan didanai oleh DIPA Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer LAPAN. Penulis juga berterima kasih kepada RISH Kyoto University yang menyediakan data radiosonde.

DAFTAR PUSTAKA

- ¹Hohl, R., Schisser, H.H., and Aller, D., 2002. *Hail event: the relationship between radar-derived hail kinetic energy and hail damage to buildings*. Atmos. Res. 63, 177-207.
- ²Palencia, C., D. Giaiotti, F. Stel, A. Castro, and R. Fraile, 2010. *Maximum hailstone size: Relationship with meteorological variables*. Atmos. Res. 96, 256-265.
- ³Cook, B.J., 1958. *Hail determination by radar analysis*. Mon. Wea. Rev. 435-438.
- ⁴Noersomadi, Sipayung, S.B., Krismianto, Rahayu, S.A., Nugroho, G.A., Sunarya, R., Safrudin, Maryadi, E., dan Halimurrahman, 2013. *Pengamatan Awan dan Variasi Curah Hujan Harian Menggunakan Transportable X-band Radar*. Prosiding SSA. 217-225.
- ⁵Holleman, I., Herman, R.A.W., Jeanette, R.A.O. And Silvia J.M.B., 2001. *Development of Radar-Based Product*, KNMI NL-3730 AE De Bilt.
- ⁶Auer A.H., Jr, 1994. *Hail recognition through the combined use of radar reflectivity and cloud-top temperatures*. Mon. Wea. Rev., 122, 2218-2221.
- ⁷Borowska, L., A. Ryzhkov, D. Zrnica, C. Simmer, and R. Palmer, 2011. *Attenuation and Differential Attenuation of 5-cm-wavelength radiation in melting layer*. J. Appl. Met. & Clim., 50, 59-76.

- ⁸Kennedy, P.C., S.A. Rutledge, W.A. Petersen, and V.N. Bringi, 2001. *Polarimetric radar observation of hail formation*, J. Appl. Met., 40, 1347-1366.
- ⁹Morin, E., W.F. Krajewski, D.C. Goodrich, X. Gao, and S. Sorooshian, 2003. *Estimating rainfall intensities from weather radar data: the scale-dependency problem*. J. Hydromet., 4, 782-797.
- ¹⁰Knight, C.A., P.T. Schlatter, and T.W. Schlatter, 2008. *An unusual hailstorm on 24 June 2006 in Boulder, Colorado. Part II: low-density growth of hail*, Mon. Wea. Rev., 136, 2833-2848.
- ¹¹Brimelow, J.C., G.W. Reuter, R. Goodson, and T.W. Krauss, 2005. *Spatial forecast of maximum hail size using prognostic model soundings and hailcast*, Weather and Forecasting, 21, 206-219.
- ¹²Witt, A., M.D. Eilts, G.J. Stumpf, J.T. Johnson, E. DeWayne M., and K. W. Thomas, 1998. *An enhanced Hail Detection Algorithm for the WSR-88D*. Weather and Forecasting, 13, 286-303.
- ¹³Waldvogel, A., B. Federer, and P. Grimm, 1979, *Criteria for the detection of hail cells*. J. Appl. Meteor., 18, 1521-1525.
- ¹⁴Edwards, R. and R. L. Thompson, 1998. *Nationwide comparisons of hail size with wsr-88d vertically integrated liquid water and derived thermodynamic sounding data*. Wea. and Forecasting, 13, 277-285.