

KARAKTERISTIK METEOROLOGI POLUSI UDARA DI SEKITAR GUNUNG API KRAKATAU

Sumaryati

Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Email : sumary.bdg@gmail.com

ABSTRAK

Gunung api mengemisikan senyawa-senyawa kimia ke atmosfer dalam bentuk gas maupun partikulat melalui proses *degassing* dan erupsi. Dampak dari emisi senyawa tersebut terhadap lingkungan atmosfer tergantung pada besarnya emisi dan bagaimana pola penyebarannya. Makalah ini menganalisis bagaimana karakter meteorologi sekitar gunung api Krakatau dengan menggunakan model meteorologi pada *The Air Pollution Model* (TAPM), dalam rentang waktu yang mewakili musim hujan, musim kemarau dan peralihannya ketika aktifitas gunung Krakatau dalam level normal. Analisis temporal parameter meteorologi dilakukan untuk parameter angin dan kestabilan atmosfer yang dinyatakan dalam besaran arah dan kecepatan angin, *turbulence kinetic energy*, dan *mixing height*. Analisis meteorologi polusi udara dikaitkan dengan potensi penyebaran material dari Krakatau ke lingkungannya. Hasilnya menunjukkan bahwa variasi musiman pada tahun 2011 maupun variasi harian lapisan *mixing height* cukup rendah kurang dari 400 m, yang terkait dengan *turbulence kinetic energy* yang rendah pula yaitu kurang dari $0,4 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Emisi dari Krakatau pada malam hari berpotensi sampai ke daerah pantai Jawa bagian barat pada musim hujan saja (Januari) dan daerah pantai Sumatera bagian selatan pada musim kemarau sampai peralihan musim kemarau ke hujan (Juli – Oktober).

Kata kunci: Krakatau, polusi udara, meteorologi, penyebaran

ABSTRACT

Volcanoes emit chemical compounds into the atmosphere in gaseous or particulate form through the degassing and eruption processes. The impact of emissions to the environment depends on the amount of emissions and how the pattern of compound dispersion. This paper analyzes how the meteorological character

around Krakatau volcano using meteorological models in The Air Pollution Model (TAPM), in the period of time that represents the rainy season, dry season and their transition when the Krakatau volcano activity in the normal level. Temporal analysis is carried out for the meteorological parameters of wind and atmospheric stability expressed in the wind speed and wind direction, turbulence kinetic energy, and mixing height. Meteorological analysis of air pollution emissions related to the potential dispersion of Krakatau emission to the environment. The results show that the seasonal and daily variations of mixing height is quite low of less than 400 m, which is associated with low turbulence kinetic energy that is less than $0.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Emissions of Krakatau in the evening could potentially get to the western coastal of Java during the rainy season (January) and the southern coastal of Sumatra in the dry season until the transition of dry season to rainy season (July-October).

Key words: Krakatau, air pollution, meteorology, dispersion

1 PENDAHULUAN

Wilayah Indonesia merupakan bagian dari *ring of fire*, yaitu daerah yang sering mengalami gempa bumi dan letusan gunung api. Salah satu gunung api yang terkenal di Indonesia adalah Krakatau yang pernah meletus dengan dahsyat tahun 1883, sehingga memusnahkan gunung Krakatau itu sendiri. Sekitar 40 tahun kemudian muncul gunung api Anak Krakatau, yang juga dikatakan sebagai gunung Krakatau (Wikipedia, 2012). Jadi gunung Krakatau yang disebut di sini sebenarnya adalah gunung anak Krakatau.

Gunung api merupakan salah satu sumber alami yang mengemisikan berbagai senyawa ke atmosfer seperti H_2O , H_2 , CO_2 , CO , SO_2 , H_2S , HCl , HF , dengan prosentase yang tidak sama dari setiap gunung api (USGS, Sawyer et al, 2008). Senyawa tersebut diemisikan melalui proses *degassing* dan letusan. Senyawa dari gunung api memegang peranan penting dalam proses evolusi komposisi atmosfer di awal terbentuknya bumi. Selain itu aktivitas gunung api juga menjadi kunci dalam perubahan temperatur atmosfer selain aktifitas matahari sebelum era industri (Shindell, et al, 2003).

...

Seiring dengan pertambahan jumlah penduduk dan perkembangan peradaban manusia, emisi dari kegiatan manusia (antropogenik) menjadi dominan dalam dinamika komposisi atmosfer. Hal itu terlihat dengan jelas pada peningkatan senyawa CO₂, CH₂ dan N₂O yang konsentrasinya meningkat drastis secara eksponensial sejak era industri (MacFarling-Meure et al., 2006). Oleh karena itu sejak era industri emisi senyawa-senyawa ke atmosfer dari kegiatan antropogenik mendapat perhatian lebih dalam dinamika komposisi atmosfer.

Gunung Krakatau yang terletak di Selat Sunda, terletak antara Sumatera bagian selatan dan Jawa bagian barat. Daratan Jawa bagian barat merupakan kawasan industri yang banyak menghasilkan senyawa-senyawa seperti yang diemisikan oleh gunung api antara lain CO₂, NO_x, SO₂ dan senyawa sulfur lain. Sedangkan daerah Sumatera relatif masih sedikit aktifitas industri dan transportasinya. Dalam tulisan ini akan dikaji karakteristik meteorologi sekitar Krakatau untuk mengetahui perkiraan sebaran dari emisi Gunung Krakatau saat aktifitas Krakatau normal.

2 DASAR TEORI

Polusi udara terkait dengan sumber emisi polutan dan penyebaran dari polutan tersebut ke lingkungannya. Penyebaran polutan ditentukan oleh beberapa parameter meteorologi yang disebut meteorologi polusi udara (*air pollution meteorology*). Tidak semua parameter meteorologi masuk dalam pembahasan meteorologi polusi udara, parameter faktor utama dalam meteorologi polusi udara adalah angin dan kestabilan.

Analisis angin terhadap penyebaran polusi udara meliputi arah dan lajunya. Arah dan laju angin menentukan ke mana polutan akan tersebar dan sejauh mana daerah yang dapat terjangkau oleh polutan tersebut.

Angin terjadi karena adanya perpindahan massa udara dari tekanan tinggi ke tekanan rendah, baik skala lokal maupun global. Angin dalam skala global, angin terjadi karena perbedaan pemanasan oleh matahari di daerah kutub dan ekuator serta efek rotasi bumi (gaya coriolis). Adanya pengaruh topografi, variasi harian dan musiman pemanasan permukaan bumi, dan variasi pemanasan permukaan bumi karena adanya badan air,

menyebabkan terjadinya angin skala lokal (Prawirowardoyo, 1996):...

Angin dapat dipandang sebagai gerakan fluida yang dibedakan menjadi angin laminer dan turbulen. Kriteria keduanya ditentukan oleh bilangan Reynold (Re). Dikatakan aliran laminer jika $Re < 2300$, dan turbulen jika $Re > 4000$, dan diantara keduanya disebut transien (The Engineering Toolbox, 2012). Angin turbulen sangat penting dalam penyebaran polusi udara. Dalam angin turbulen polutan dapat tercampur sempurna dengan udara sekitarnya. Hal itu tidak akan terjadi pada angin laminer.

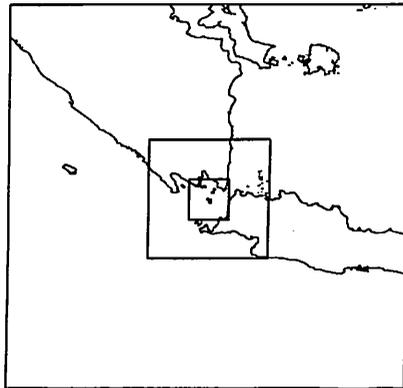
Besarnya energi turbulensi dinyatakan sebagai energi kinetik turbulensi (*turbulence kinetic energy*, TKE). Energi kinetik turbulensi merupakan besarnya energi kinetik rata-rata per satuan massa terkait dengan olakan (eddy) dalam aliran turbulen (Wikipedia, 2012). Semakin besar TKE pada suatu lapisan udara, maka pencampuran udara di lapisan tersebut akan semakin mudah. Aliran turbulen ini umumnya terjadi di lapisan bawah atmosfer. Lapisan udara dimana pencampuran udara ini bisa terjadi dengan mudah disebut sebagai lapisan *mixing height*.

3 METODOLOGI

Kajian meteorologi polusi udara ini menggunakan model meteorologi pada TAPM *the (air pollution model)*. Running model dilakukan pada tahun 2011 dalam rentang waktu sebagai berikut:

- 2 – 30 Januari (periode musim hujan)
- 1 – 30 April (periode musim peralihan hujan ke kemarau)
- 2 – 30 Juli (periode musim kemarau)
- 1 – 14 Oktober (periode musim peralihan kemarau ke hujan)

Aktifitas gunung Krakatau pada waktu tersebut dalam kondisi normal, sehingga emisi dari gunung api relatif kecil melalui mekanisme *degassing*. Proses *running* dilakukan dengan *nesting* tiga kali, masing-masing dengan resolusi 10 km, 3 km dan 1 km, pada domain dengan pusat di Krakatau bertepatan dengan koordinat ($6^{\circ} 6,5' \text{ LS}$; $105^{\circ} 25' \text{ BT}$) dan jumlah *grid* 100 x 100 (Gambar 3.1).



Gambar 3.1 Domain running meteorologi sekitar gunung Krakatau

Output model meteorologi dari TAPM ini terdiri dari banyak parameter meteorologi, tetapi yang dianalisa dalam makalah ini hanya parameter meteorologi yang terkait erat dengan penyebaran polusi udara yang meliputi angin dan kestabilan. Parameter angin dianalisa secara temporal kecepatan angin (laju dan arahnya), yang disajikan dalam bentuk *wind rose* pada titik Krakatau. Kestabilan atmosfer dianalisa secara temporal dalam besaran energi kinetic turbulensi atau TKE (turbulence kinetic energy) dan *mixing height*. Analisa temporal TKE dan *mixing height* berupa analisa harian dan musiman.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

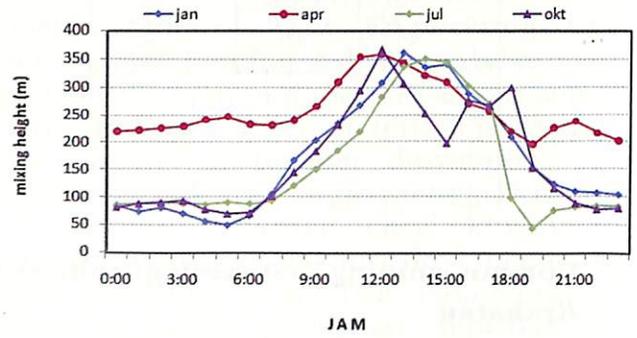
4.1 HASIL

Kajian meteorologi polusi udara ini merupakan output dari model meteorologi pada TAPM *the air pollution model* (TAPM). Dari hasil running dan kompilasi *outputnya* diperoleh hasil parameter *mixing height*, kestabilan dan angin di lingkungan gunung Krakatau sebagai berikut.

Mixing height

Mixing height ditampilkan pertama karena pada lapisan inilah yang akan dikaji bagaimana percampuran polutan udara

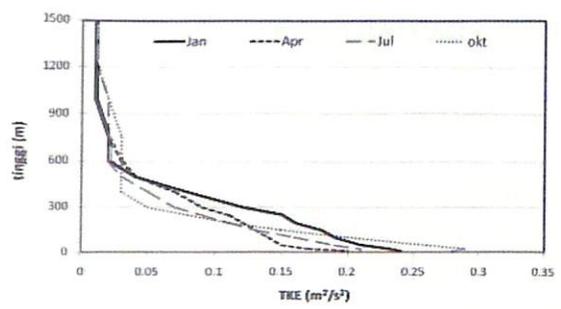
terjadi dengan sempurna. Variasi *mixing height* temporal harian pada bulan Januari (tanggal 2 - 30), April (tanggal 1 - 30), Juli (tanggal 2 - 30), dan Oktober (tanggal 1 - 14) tahun 2011 di Krakatau dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



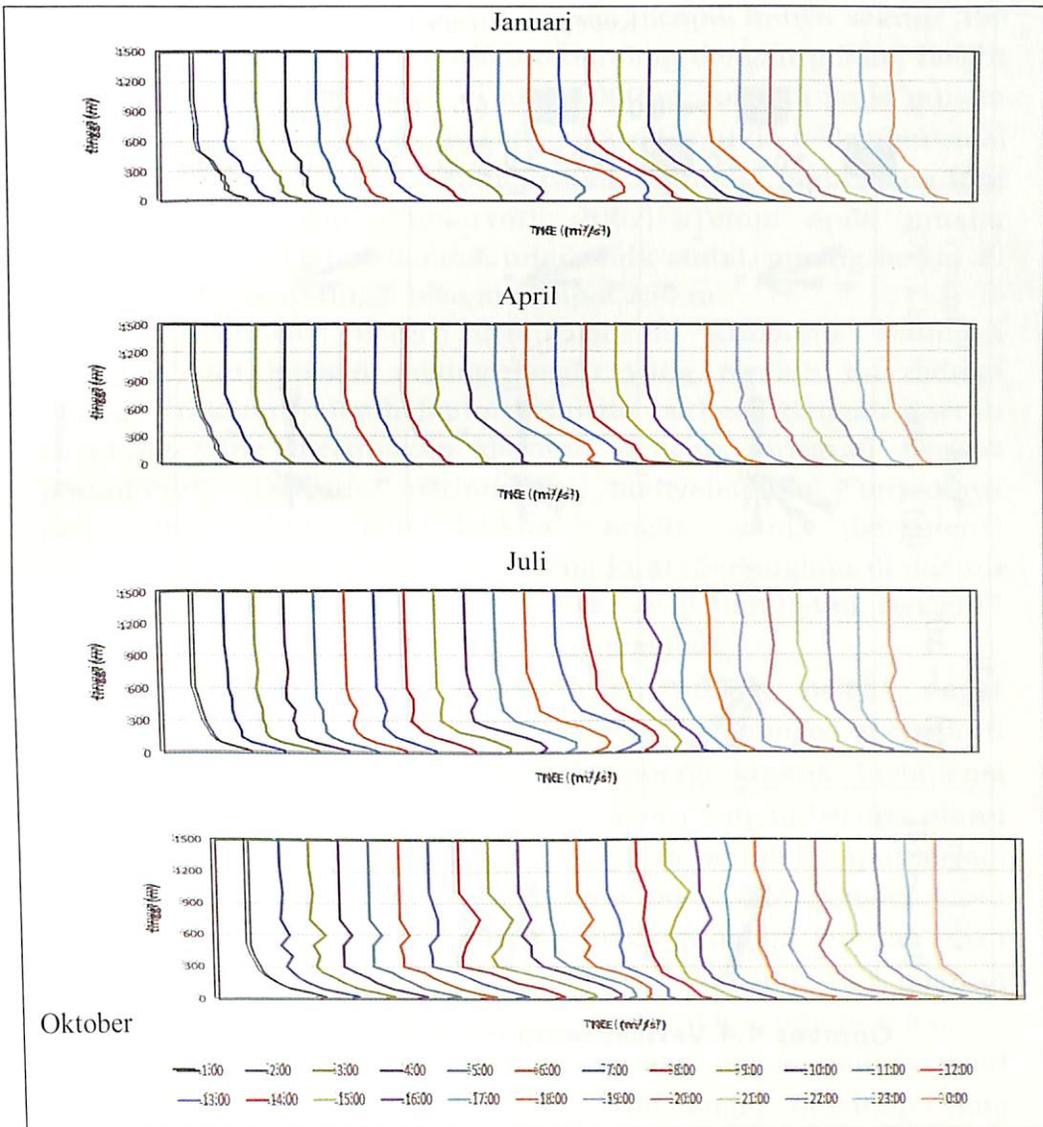
Gambar 4.1 Variasi temporal *mixing height* di sekitar Krakatau

Kestabilan

Kestabilan atmosfer di atas Krakatau dinyatakan dalam besaran energi kinetic turbulensi dengan variasi musimannya dan hariannya pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3. Nilai kestabilan paling kecil ditandai dengan nilai $0,01 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Pada lapisan dengan nilai tersebut olakannya sangat lemah, sehingga aliran anginnya dapat dikatakan sebagai angin laminar. Percampuran polutan dengan udara sekitarnya sudah tidak efektif lagi, karena tidak adanya pengadukan polutan dengan udara sekitarnya.



Gambar 4.2 Variasi TKE pada bulan Januari, April, Juli, dan Oktober 2011

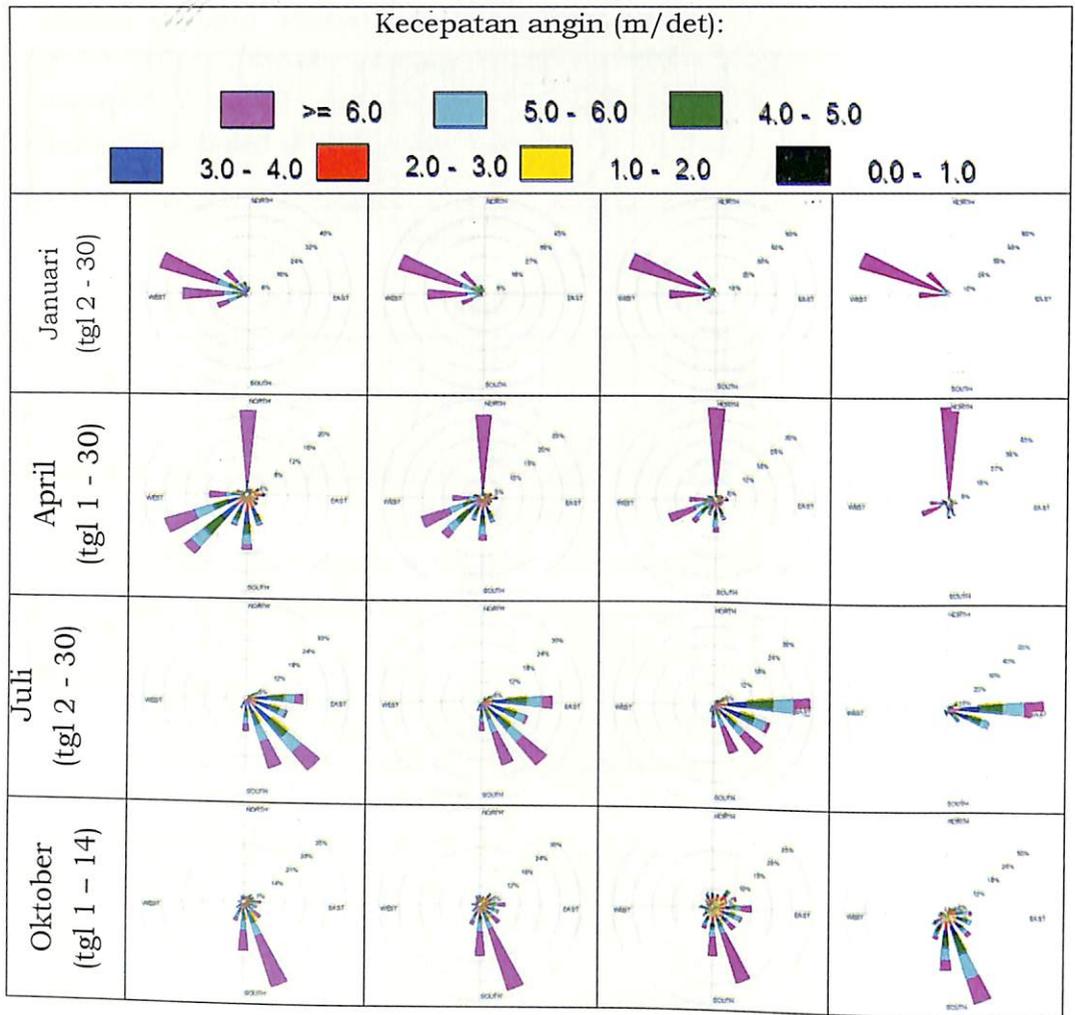


Gambar 4.3 Profil variasi harian (dari jam 1.00 sampai jam 00.00)TKE pada bulan Januari, April, Juli, dan Oktober tahun 2011

Angin

Kecepatan angin di sekitar Krakatau digambarkan dalam bentuk wind rose (Gambar 4.4). Penggambaran angin pada permukaan level 1 (10 m), level 4 (100 m), level 7 (250 m) dan level 14 (1000 m). Level 1, 4, dan 7 masih berada pada lapisan *mixing height*, dan level 14 sudah di atas *mixing height*.

| | | | |
|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| Level 1 (10 m) | Level 4 (100 m) | Level 7 (250 m) | Level 14 (1000 m) |
|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|



Gambar 4.4 Variasi temporal wind rose di Krakatau

4.2 PEMBAHASAN

Variasi harian *mixing height* terjadi secara normal dengan nilai rendah pada malam hari dan tinggi pada siang hari ditunjukkan di sekitar Krakatau. *Mixing height* terkait dengan energi kinetik turbulensi (TKE). Lapisan *mixing height* ditandai dengan nilai TKE yang tinggi dari lapisan permukaan tanah sampai lapisan dengan TKE rendah. Jika ada lapisan dengan TKE tinggi di atas lapisan dengan TKE rendah ini, lapisan dengan TKE tinggi tersebut sudah di atas lapisan *mixing height*.

Mixing height maksimum harian dicapai hanya sekitar 350 m, hal ini jauh lebih rendah jika dibanding dengan *mixing height* di Bandung yang mencapai di atas 1000 m, kecuali pada musim hujan yang hanya 800 m, hal itu juga ditunjukkan dengan nilai TKE yang sangat besar, yang mencapai $3,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ pada siang hari di musim kemarau (Sumaryati, 2007). Tetapi apda musim peralihan yang relative kondisi udara tidk stabil, *mixing height* di malam hari cukup tinggi bisa mencapai 250 m.

Rendahnya energi turbulensi di Krakatau sehingga menghasilkan lapisan *mixing height* yang rendah ini diduga karena Krakatau daerah lautan. Hal itu berbeda dengan daerah Bandung yang merupakan daratan dengan topografi berupa perbukitan. Dengan perbukitan menyebabkan terjadinya perpecahan dan pembelokkan angin yang berpotensi menyebabkan adanya trubulensi yang kuat. Sedangkan di daerah sekitar Krakatau yang berupa lautan, kecil hambatan topografi yang memecah dan membelokkan angin global.

Kondisi angin di atas lapisan *mixing height* dapat dikatakan homogen. Arah angin cenderung homogen mengikuti arah angin global, dan aliran. Nilai energi kinetik turbulensi besarnya $0,01 \text{ m}^2/\text{s}^2$, sehingga aliran udara (angin) berupa aliran laminer. Percampuran polutan pada lapisan ini tidak dapat terjadi denga mudah dan sempurna, karena tidak ada pengadukkan polutan ke lingkungan oleh adanya olakkan angin. Polutan akan bergerak laminer mengikuti arah angin. Percampuran polutan dengan udara sekitar terjadi dengan proses difusi dan adveksi.

Kecepatan angin yang digambarkan dalam bentuk wind rose (Gambar 4.4) menunjukkan arah angin dominan yang semakin homogen pada level yang lebih tinggi, kecuali pada bulan Oktober dan kecepatan angin yang tinggi. Dominan kecepatan angin di atas 6 m/s. Jarak Krakatau sampai ke daratan terdekat ke pulau Jawa atau Sumatera sekitar 40 km. Jika angin lurus, senyawa dari Gunung Krakatau bisa mencapai daratan Jawa atau Sumatera dalam waktu kurang dari 2 jam.

Percampuran polutan melalui proses difusi yang terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi dari dua masa udara. Percampuran polutan melalui proses difusi terjadi lebih lama dibanding dengan prose pengadukan karena adanya olakan dalam turbulensi.

Analisa meteorologi ini terjadi ketika aktifitas gunung Krakatau dalam kondisi normal, yang berarti emisi hanya terjadi dalam proses *degassing* saja. Pada proses *degassing* dalam aktifitas level normal ini tinggi kepulan tidak setinggi ketika ada letusan ataupun aktifitas gunung api di atas normal. Oleh karena kemungkinan besar ketika dalam gunung Krakatau pada level normal ini, kepulan emisinya pada siang masih berada dalam lapisan *mixing height*, sedangkan pada malam hari ketika *mixing height* hanya 50 m, bisa saja tinggi kepulannya melewati *mixing height*. Ketika aktifitas meningkat pada level yang lebih tinggi dengan urutan waspada, siaga, dan awas, bisa saja kepulan emisinya melampaui *mixing height* meskipun pada siang hari.

Tinggi kepulan terhadap lapisan *mixing height* menentukan bagaimana bentuk sebaran. Jika kepulan di bawah *mixing height*, di mana pada lapisan ini energi turbulensi sangat tinggi polutan akan cepat tercampur dengan udara sekitarnya, sehingga konsentrasi udara sekitarnya menjadi cepat homogen dengan konsentrasi yang relatif rendah dengan jarak yang tidak jauh. Sebaliknya jika kepulan di atas *mixing height*, polutan tidak tercampur tetapi akan membentuk aliran laminer mengikuti arah angin dan mampu menempuh jarak yang jauh. Untuk membedakan kedua kejadian itu secara sederhana dapat digambarkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Bentuk kepulan dari gunung api

Gambar 4.5 menggambarkan dua bentuk kepulan dari gunung api yang berbeda. Gambar 4.5a menunjukkan bawa tinggi kepulan di atas lapisan *mixing height* yang relatif stabil dengan energi kinetik turbulensi rendah dan Gambar 4.5b kepulan yang berada dalam lapisan *mixing height* yang tidak stabil dengan energi kinetik turbulensi yang tinggi. Percampuran polutan terjadi dengan sempurna pada Gambar 4.5b, sehingga polutan hanya

terdispersi pada jarak yang dekat dari sumber. Hal sebaliknya terjadi pada kejadian Gambar 4.5a.

Oleh karena itu jika tinggi kepulan tidak melampaui *mixing height*, kecil kemungkinan emisi dari gunung Krakatau sampai ke daratan Jawa atau Sumatera. Hal sebaliknya, jika bisa melampaui *mixing height* maka polutan bisa sampai di atas Jawa ataupun Sumatera tergantung arah angin. Material yang diemisikan oleh Krakatau pada malam hari atau jika aktifitas tinggi dengan tinggi kepulan lebih dari 400 m, lebih tinggi dari *mixing heightnya* pada bulan Januari berpotensi sampai ke daerah pantai Jawa bagian barat. Bulan April (musim peralihan dari hujan ke kemarau menghasilkan *mixing height* yang tinggi pada malam hari, sehingga jika aktifitas Krakatau hanya level normal, keputlannya tidak akan mencapai lapisan *mixing height* sehingga polutan hanya menyebar sekitar Krakatau. Tetapi jika kejadian yang sama tersebut terjadi pada bulan Juli - Oktober, polutan berpotensi ke pantai Sumatera bagian selatan.

5 KESIMPULAN

Berdasarkan running model meteorologi yang ada pada *the air pollution model* (TAPM) pada tahun 2011 dengan domain sekitar Krakatau yang mewakili periode empat musim, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Daerah sekitar Krakatau yang berupa lautan memiliki lapisan *mixing height* di sekitar Krakatau cukup rendah, kurang dari 400 m, demikian pula energi kinetik turbulensinya yang kurang dari $0,4 \text{ m}^2/\text{s}^2$.
- Potensi penyebaran material dari Krakatau sampai ke daerah pantai Jawa bagian barat terjadi pada musim hujan (Januari), sedangkan mencapai daerah pantai Sumatera bagian selatan pada musim kemarau sampai ke musim peralihan (Juli - Oktober).

DAFTAR RUJUKAN

- Mac Farling Meure, C., D. Etheridge, C. Trudinger, P. Steele, R. Langenfelds, T. van Ommen, A. Smith, and J. Elkins (2006) Law Dome CO₂, CH₄ and N₂O ice core records extended to 2000 years BP, *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L14810, doi:10.1029/2006GL026152
- Prawirowardoyo, S. 1996. *Meteorologi*, Penerbit ITB
- Sawyer, G.M. G.G. Salerno, J.S. Le Blond, R.S. Martin, L. Spampinato, T.J. Roberts, T.A. Mather, M.L.I. Witt, V.I. Tsanev, C. Oppenheimer), (2008) *Gas and aerosol emissions from Villarrica volcano, Chile* *Journal of Volcanology and Geothermal Research*
- Shindell D.T, G.A. Schmidt, R.L. Miller, dan M.E. Mann, (2003) *Volcanic and Solar Forcing of Climate Change during Preindustrial Era*. *Journal of Climate*, Vol. 16
- Sumaryati, (2007) Penetapan Beban Emisi Maksimum CO di Kawasan Industri Dayeuh Kolot, Thesis ITB.
- The engineering toolbox, Laminer, Transitional or Turbulent Flow
http://www.engineeringtoolbox.com/laminer-transitional-turbulent-flow-d_577.html diunduh Mei 2012
- USGS, Volcanic Gases and Their Effect,
<http://volcanoes.usgs.gov/hazards/gas/index.php>
(diunduh Januari 2012)
- Wikipedia, Krakatau <http://id.wikipedia.org/wiki/Krakatau>
(diunduh Mei 2012)
- Wikipedia, Turbulence kinetic energy
http://en.wikipedia.org/wiki/Turbulence_kinetic_energy
(diunduh Mei 2012)