

VARIASI MUSIMAN TINGGI LAPISAN PENCAMPURAN POLUTAN DI PULAU JAWA

Iis Sofiati

Bidang Pengkajian Ozon dan Polusi Udara – Pusat Pemanfaatan Sains Atmosfer dan Iklim
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional/ LAPAN
Jl. dr. Djundjuran No. 133 - Bandung.
Email: iis_sofiati@bdg.lapan.go.id

Abstrak

Faktor-faktor meteorologi memiliki pengaruh yang cukup besar dalam penyebaran polusi udara, salah satunya adalah tinggi lapisan pencampuran. Tinggi lapisan pencampuran menyatakan tinggi lapisan di atas permukaan tanah tempat terjadinya pencampuran polutan dengan baik dan disebabkan oleh turbulensi mekanik atau turbulensi konvektif/ termis (Emeis, 2004). Dalam makalah ini, dilakukan kajian variasi tinggi lapisan pencampuran yang merupakan salah satu keluaran software The Air Pollution Model (TAPM), dan dijalankan pada sistem workstation berbasis windows. Dari hasil terlihat bahwa tinggi lapisan pencampuran yang terjadi di wilayah Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur mempunyai nilai maksimum pada siang atau sore hari, sedangkan nilai minimumnya terjadi pada pagi dan malam hari. Tinggi lapisan pencampuran maksimum rata-rata yang terjadi di Jawa Timur lebih tinggi dibandingkan dengan Jawa Barat dan Jawa Tengah.

Dari penelitian ini diharapkan dapat mengetahui distribusi tinggi lapisan pencampuran secara musiman yang mempengaruhi konsentrasi dan penyebaran polusi udara di P. Jawa, sehingga menjadi pertimbangan guna pengembangan tata guna lahan dan industri yang ramah atau berwawasan lingkungan.

Kata kunci: Polusi udara, The Air Pollution Model (TAPM), tinggi lapisan pencampuran.

Abstract

Meteorology factors have a large influence to the air pollution dispersions, and one is a mixing height. Mixing height is a mixed layer over ground base which is a place of a good pollutant mixing, and due to mechanic turbulence or convective turbulence (Emeis, 2004). In this paper, we used The Air Pollution Model (TAPM) software which developed by CSIRO-Australia and driven by workstation system based on windows. As a results show that a value of mixing height in the West Java, the Center Java, and the East Java have a maximum values in the day or afternoon, meanwhile a minimum value has occur in the night and in the morning. The average of mixing height maximum which are occurs at East Java are higher then at West and Center Java.

From this research hope that we can found the distribution of mixing height seasonally which has influence to the concentration and dispersion of air pollution in Java island, with the result that will be a good consideration for the method of making use of land and industrial intimate terms or environmental concept.

Keywords: Air Pollution, The Air Pollution Model (TAPM), mixing height.

1. PENDAHULUAN

Penyebaran polusi udara baik secara kimia atau secara biologi, pada prinsipnya tergantung pada informasi emisi yang mengeluarkan, faktor meteorologi, dan informasi dari penerima (Stern, 1984). Perkiraan konsentrasi polutan pada penerima bisa diketahui dengan menggunakan model penyebarannya. Faktor meteorologi seperti arah dan kecepatan angin, stabilitas atmosfer, curah hujan, dan tinggi lapisan pencampuran menentukan penyebaran polutan. Angin kencang lebih bergolak (turbulen) daripada angin lemah, sehingga konsentrasi polutan lebih cepat menjadi encer (Bayong, 1993). Stabilitas atmosfer menentukan penyebaran secara horizontal dan vertikal. Atmosfer labil menyebabkan konsentrasi polutan berkurang, sedangkan atmosfer stabil meningkatkan konsentrasi polutan.

Konsentrasi polutan pada permukaan bumi selain dipengaruhi oleh sumber polutan juga dipengaruhi oleh tinggi lapisan pencampuran. Tinggi lapisan pencampuran

menyatakan batas atmosfer dimana udara yang tercemar dapat bercampur dengan udara di atasnya yang lebih bersih. Jika tinggi lapisan percampuran tinggi, maka konsentrasi polutan akan menjadi encer. Sebaliknya jika tinggi lapisan percampuran rendah maka akan menghasilkan konsentrasi polutan yang pekat.

Penelitian mengenai tinggi lapisan percampuran di LAPAN telah dilakukan sebelumnya oleh Soedono (1997-1998), yang menghitung nilai tinggi lapisan percampuran untuk beberapa kota di pulau Jawa, yaitu Bandung, Bogor, Solo, dan Cirebon. Anondo (1999-2000) melakukan penelitian di Pacitan dan Pameungpeuk. Pada penelitian tersebut, tinggi lapisan percampuran dihitung dengan menggunakan persamaan gaya apung termal per satuan massa dan ditentukan dengan bantuan suhu udara vertikal yang diukur dengan radiosonde, selanjutnya data ini diplot terhadap ketinggian pada aerogram.

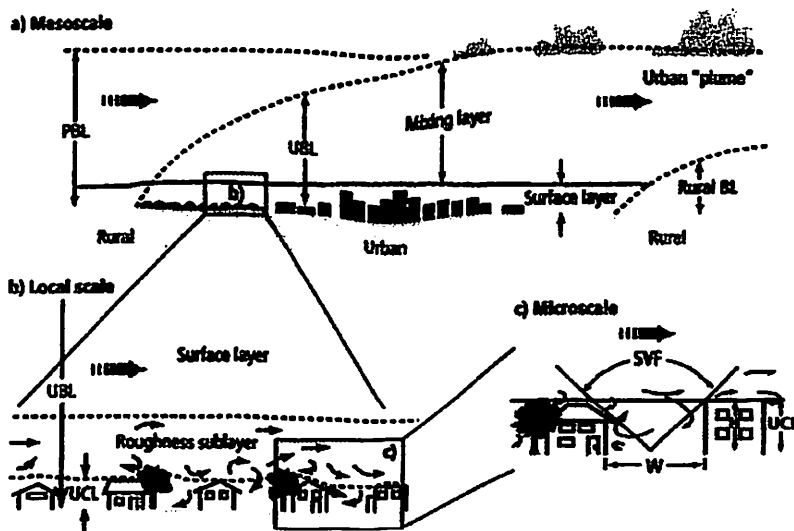
Untuk penelitian ini, dilakukan kajian variasi tinggi lapisan percampuran yang merupakan salah satu keluaran *software The Air Pollution Model (TAPM)* (Hurley, 2005). Ketinggian tinggi lapisan percampuran dapat mempengaruhi konsentrasi dan penyebaran polusi udara yang berasal dari sumber polutan ataupun dari industri dan transportasi yang lokasinya masih dalam perencanaan, atau perkembangan suatu wilayah. Dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi pertimbangan guna pengembangan tata guna lahan dan industri yang ramah atau berwawasan lingkungan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Faktor meteorologi memiliki pengaruh yang cukup besar dalam penyebaran polusi udara, salah satunya yaitu tinggi lapisan percampuran atau tinggi campuran (Kukkonen *et al.*, 1999). Menurut Emeis (2004), definisi dari mixing layer adalah: tinggi lapisan percampuran di atas permukaan tanah tempat terjadinya percampuran polutan dengan baik, karena turbulensi mekanik (disebabkan oleh gesekan antara permukaan bumi dan udara yang bergerak di atasnya) atau turbulensi konvektif/ termis (disebabkan oleh pemanasan radiasi matahari). Sedangkan tinggi lapisan percampuran (mixing depth) adalah: ketinggian vertikal dari mixing layer (lihat Gambar 2.1).

Pengertian lain dari tinggi lapisan percampuran yaitu lapisan dekat permukaan dimana terjadi perubahan pemanasan, momentum, kelembaban, dan parameter lainnya antara bumi dan atmosfer (Baklanov *et al.*, 2004). Ketinggian dari tinggi lapisan percampuran dapat bervariasi, dimana pada siang hari ketinggiannya dapat mencapai beberapa ribu kaki (1 kaki = 0.3 m), sedangkan pada malam hari ketinggiannya hanya beberapa ratus kaki. Tinggi lapisan percampuran lebih rendah pada lapisan stabil atau inversi ketimbang pada lapisan labil (Suharsono, 1985).

Pada umumnya, tinggi lapisan percampuran akan tinggi pada siang hari dan rendah pada malam hari. Di siang hari, ketinggian tinggi lapisan percampuran akan rendah pada saat matahari terbit, dan ketinggian maksimum akan dicapai pada tengah hari. Hal ini sangat erat kaitannya dengan inversi. Polutan sangat dibatasi dari udara di bawah inversi. Jika proses ini berlangsung cukup lama udara di bawah inversi menjadi tercampur sempurna dan polutan cenderung mencapai konsentrasi yang seragam. Karena alasan ini maka Suharsono (1985) mengartikan tinggi lapisan percampuran atau mixing depth sebagai ketebalan (kedalaman) udara di bawah inversi. Semakin kecil mixing depth-nya, makin besar konsentrasinya karena polutan yang dikeluarkan oleh seluruh tenaga sumber pencemar terdapat di dalam mixing depth. Angin yang lemah dan langit cerah dimana sering menyertai antisisiklon cenderung memperberat polutan yang berakumulasi pada mixing layer paling sedikit selama malam hari.



Gambar 2.1. Skema dari the urban boundary layer termasuk lapisan vertikal dan skalanya. (Sumber: Oke, 1997 dalam Fisher, B., 2006).

Ketika suhu parcel udara lebih panas daripada lingkungannya, parcel akan terus naik. Ketika suhu parcel lebih dingin daripada lingkungannya, parcel akan turun. Salah satu cara untuk menggambarkan tinggi lapisan percampuran, yaitu dengan menganggap parcel merupakan udara dekat permukaan, dimana suhunya sama dengan suhu permukaan maksimum harian. Parcel diangkat secara adiabatik kering hingga mencapai suhu udara ambien, yang diperoleh dari pengukuran radiosonde. Ketinggian dimana suhu parcel yang diangkat sama dengan temperatur udara ambien disebut tinggi lapisan percampuran (Ferguson, 1998).

Di daerah tropik biasanya banyak sinar matahari pada siang hari dan matahari sering bersinar lebih lama. Meskipun ada lapse rate atau tidak, pada lapisan paling bawah akan stabil selama malam hari dan segera menjadi tak stabil setelah matahari terbit dimana beberapa polutan yang berakumulasi pada malam hari akan cepat disebarkan.

3. DATA DAN METODOLOGI

3.1. Data

Data-data yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Synoptic (SAS) tahun 2005 dari CSIRO- Australia.
- Meteorologi permukaan kota Jakarta, Bandung, Jogjakarta, Malang, dan Surabaya tahun 2005.
- Radiosonde kota Jakarta dan Surabaya tahun 2005, serta kota Bandung tahun 2004.

3.2. Metodologi

Langkah pertama untuk proses running adalah menentukan waktu dan domain simulasi atau besarnya wilayah yang akan disimulasikan. Kemudian tentukan koordinat titik pusat simulasi, setelah itu tentukan domain simulasi (luas daerah yang disimulasikan) yang dibagi menjadi beberapa grid. Jumlah grid yang digunakan yaitu 60×60 . Ukuran tiap luas gridnya untuk domain terbesar diambil seluas $10000 \text{ m} \times 10000 \text{ m}$ sebagai nesting pertama. Dari domain terbesar ini dilakukan nesting kedua, yaitu dengan ukuran grid $3000 \text{ m} \times 3000 \text{ m}$. Kemudian, ukuran grid untuk nesting ketiga yaitu $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$,

sehingga luasan domainnya mencakup luasan 600 km x 600 km untuk domain besar, dan 60 km x 60 km untuk domain kecil.

Pada penentuan distribusi tinggi lapisan pencampuran untuk setiap grid dilakukan proses ekstrak, dan untuk mendisplaykannya digunakan *software Geographical Information System (GIS)*. Selanjutnya dilakukan perbandingan nilai tinggi lapisan pencampuran keluaran TAPM dengan perhitungan dari data peluncuran radiosonde. Perhitungan nilai tinggi lapisan pencampuran dari data radiosonde dapat dihitung dengan menggunakan rumus dari Karppinen, et al. (2001), sebagai berikut:

$$h = \frac{4.5}{g_1 + 0.005} ; g_1 = \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{(z_2 - z_1)} ; g_1 > 0.01 \text{ } ^\circ K/m ; \theta = T(1000/p)^{0.286} \dots \quad (3.1)$$

dimana θ_1 dan θ_2 adalah suhu potensial yang diukur pada ketinggian z_1 dan z_2 .

Perumusan lain yang digunakan dalam penelitian ini yaitu dengan memasukkan perbedaan nilai kecepatan angin seperti yang diukur di kota Bandung, juga dari Karppinen, et al., 2001, yaitu:

$$h = c \frac{\Delta U}{g_1 + 0.005} ; c = 1.8 \text{ Ks / m} \dots \dots \dots (3.2)$$

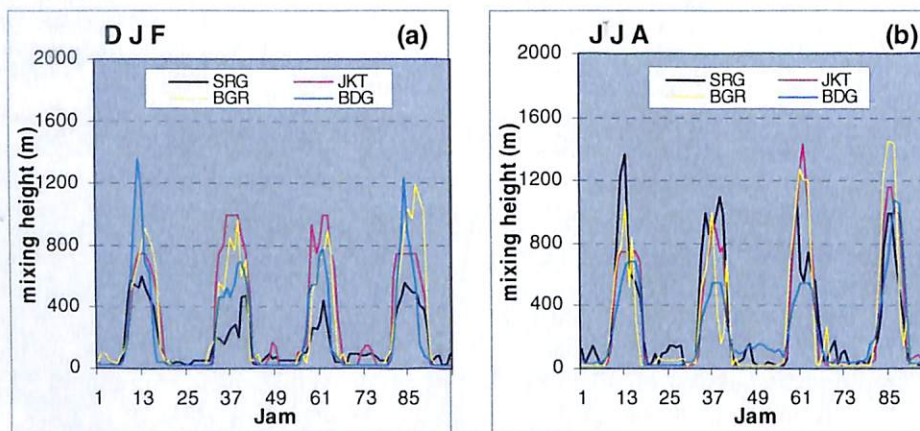
dimana ΔU adalah perbedaan nilai kecepatan angin per ketinggian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Variabilitas tinggi lapisan pencampuran di beberapa kota di Jawa Barat

Variabilitas tinggi lapisan pencampuran di daerah Jawa Barat diwakili oleh 4 kota, yaitu Serang, Jakarta, Bogor, dan Bandung. Nilai yang didapat merupakan hasil running TAPM selama 4 hari untuk setiap musim (hujan, kemarau, transisi hujan-kemarau, transisi kemarau-hujan). Sebelum dilakukan proses running, terlebih dahulu ditentukan hari yang akan di running yang disesuaikan dengan data meteorologi permukaan.

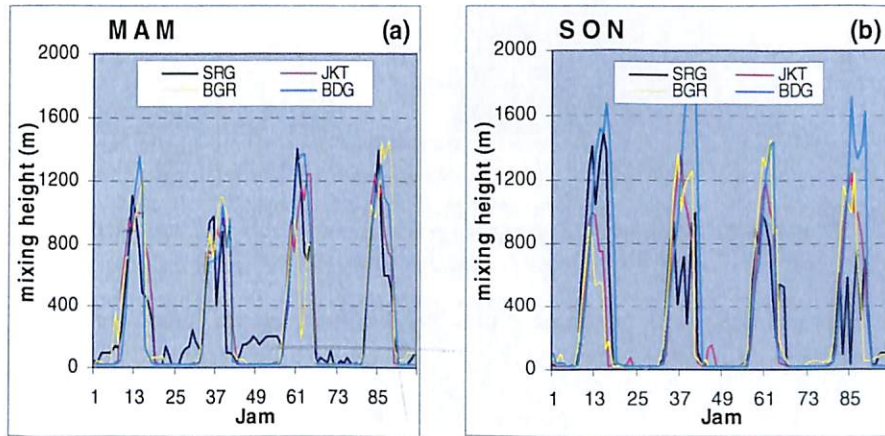
Pada musim hujan yaitu pada bulan Desember-Januari-Februari (DJF), variasi nilai tinggi lapisan pencampuran berkisar antara 30 – 1300 m, dengan nilai tertinggi berada di Bandung (± 1300 m).



Gambar 4.1. Variabilitas tinggi lapisan pencampuran di kota Serang, Jakarta, Bogor, dan Bandung pada musim hujan (a) dan kemarau (b) tahun 2005.

Ketinggian tinggi lapisan pencampuran yang tinggi terjadi pada waktu siang hingga sore hari, sedangkan pada malam hari dan pagi hari nilainya berkisar antara 30 – 100 m. Variasi tinggi lapisan pencampuran terendah terdapat di Serang dengan nilai berkisar 30 – 600 m, seperti dapat dilihat pada Gambar 4.1 (a).

Pada musim kemarau Juni-Juli-Agustus (JJA), variasi ketinggian tinggi lapisan pencampurannya memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan pada musim hujan. Tinggi lapisan pencampuran memiliki nilai yang tinggi pada waktu siang hari yang nilainya berkisar antara 500 – 1400 m, dengan nilai tertinggi berada di daerah Bogor (\pm 1400 m). Sedangkan pada malam hari ketinggiannya relatif rendah dengan nilai berkisar antara 20 – 200 m. Bandung memiliki nilai variasi tinggi lapisan pencampuran yang rendah dibandingkan 3 kota lainnya, dengan kisaran nilai 20 – 1000 m, dan dapat dilihat pada Gambar 4.1. (b).



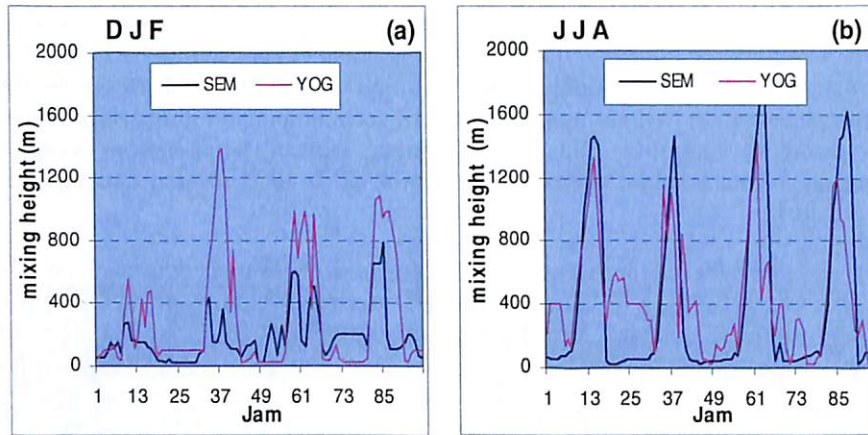
Gambar 4.2. Sama seperti Gambar 4.1, tetapi untuk musim hujan-kemarau (a) dan kemarau-hujan (b).

Untuk musim transisi hujan-kemarau (h-k) atau pada bulan Maret-April-Mei (MAM), variasi tinggi lapisan pencampurannya berkisar antara 20 – 1500 m. Tinggi lapisan pencampuran yang tinggi terjadi pada waktu siang hingga sore hari dengan kisaran nilai 800 – 1500 m. Pada malam hingga pagi hari nilainya berkisar antara 20 – 300 m. Dapat dilihat bahwa di Serang pada waktu malam hingga pagi hari ketinggian tinggi lapisan pencampurannya masih cukup tinggi dibandingkan di 3 kota lainnya, sehingga polutan masih dapat tersebar dengan jangkauan yang cukup luas (Gambar 4.2 (a)).

Gambar 4.2 (b) menunjukkan nilai variasi tinggi lapisan pencampuran pada musim transisi kemarau-hujan (k-h) September-Oktober-November (SON) yang memiliki variasi yang tinggi dibandingkan musim-musim lainnya, yaitu mencapai \pm 1800 m yang berada di Bandung. Ketinggian tinggi lapisan pencampuran pada siang hingga sore hari berkisar antara 500 – 800 m, sedangkan pada malam dan pagi hari berkisar antara 20 – 150 m. Dari hasil terlihat bahwa variabilitas nilai tinggi lapisan pencampuran pada musim transisi terlihat lebih tinggi dibandingkan dengan musim hujan ataupun kemarau. Hal ini terjadi karena pada musim transisi kecepatan angin rata-rata lebih tinggi daripada musim lainnya, sehingga mempengaruhi stabilitas atmosfer yang dapat menentukan ketinggian tinggi lapisan pencampuran.

4.2. Variabilitas tinggi lapisan percampuran di beberapa Kota di Jawa Tengah

Variabilitas tinggi lapisan percampuran di daerah Jawa Tengah diwakili oleh 2 kota, yaitu Semarang dan Yogyakarta yang dihasilkan dari 4 hari running TAPM untuk tiap musim.

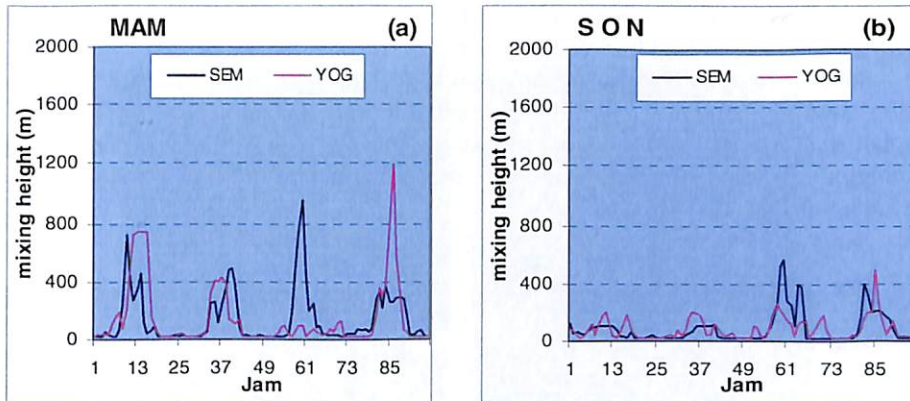


Gambar 4.3. Variabilitas tinggi lapisan percampuran di kota Semarang dan Jogjakarta pada musim hujan (a) dan kemarau (b) tahun 2005.

Dari Gambar 4.3 (a) dapat dilihat bahwa pada musim hujan variabilitas tinggi lapisan percampuran di Yogyakarta lebih besar dibandingkan Semarang. Variasi nilai tinggi lapisan percampuran berkisar antara 20 – 800 m untuk Semarang, dan 20 – 1400 m untuk Yogyakarta. Nilai tinggi lapisan percampuran yang tinggi terjadi pada siang hingga sore hari, yang nilainya berkisar antara 310-800 m untuk Semarang, dan 400 – 1400 m untuk Yogyakarta. Untuk malam hingga pagi hari variabilitas tinggi lapisan percampurannya masih lebih besar Semarang dibandingkan Yogyakarta, dengan nilai tinggi lapisan percampuran berkisar antara 24 - 270 m untuk Semarang, dan 24 – 130 m untuk Yogyakarta.

Gambar 4.3 (b) menunjukkan variabilitas tinggi lapisan percampuran pada musim kemarau yang jauh lebih tinggi dibandingkan pada musim hujan. Nilainya berkisar antara 20 – 1700 m untuk Semarang, dan 20 – 1500 m untuk Yogyakarta. Nilai tinggi lapisan percampuran yang tinggi terjadi sekitar siang hingga sore hari dengan variasi tinggi lapisan percampuran yang lebih besar terjadi di Semarang, dan keadaan tinggi lapisan percampuran pada malam hingga pagi hari untuk Yogyakarta terlihat tinggi dengan kisaran nilai 20 – 600 m.

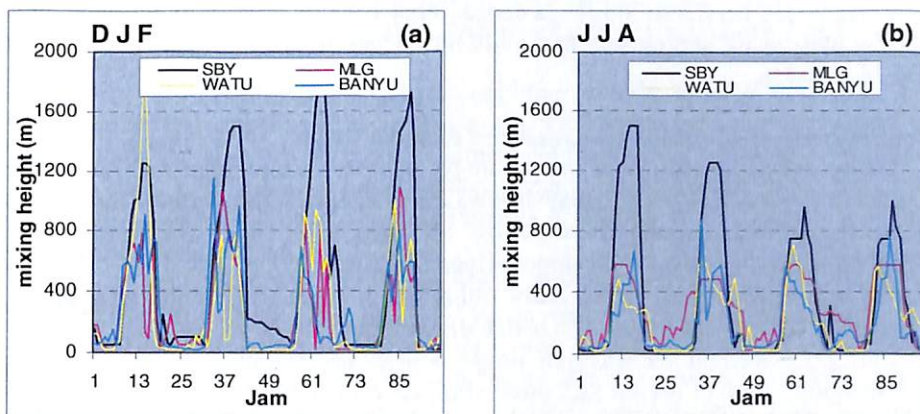
Kemudian Gambar 4.4 (a) menunjukkan nilai mixing heigt pada musim transisi hujan-kemarau (h-k), dan variabilitas tinggi lapisan percampuran berkisar antara 20 – 1000 m untuk Semarang, dan 20 – 1200 m untuk Yogyakarta. Kisaran nilai tinggi lapisan percampuran pada siang hingga sore hari yaitu 45 – 1200 untuk Yogyakarta, dan di Semarang yaitu 200 – 1000 m. Sedangkan malam hingga pagi hari kisaran nilai di Yogyakarta yaitu 20 – 127 m, dan untuk Semarang yaitu 20 – 80 m. Pada musim transisi kemarau-hujan (k-h) yang ditunjukkan oleh Gambar 4.4 (b), variabilitasnya lebih kecil dibandingkan musim transisi h-k, dimana untuk Semarang nilainya berkisar antara 20 - 570 m, dan 20 – 500 m untuk Yogyakarta. Ketinggian tinggi lapisan percampuran meningkat pada hari ketiga dan keempat simulasi untuk Yogyakarta dan Semarang.



Gambar 4.4. Sama seperti Gambar 4.3, tetapi untuk musim transisi h-k (a) dan k-h (b).

4.3. Variabilitas tinggi lapisan percampuran di beberapa kota di Jawa Timur

Variabilitas tinggi lapisan percampuran di daerah Jawa Timur diwakili oleh 4 kota, yaitu Surabaya, Malang, Watukosek, dan Banyuwangi yang didapat dari 4 hari running TAPM pada masing-masing musim. Pada musim hujan seperti yang terlihat pada Gambar 4.5 (a) bahwa variabilitas tinggi lapisan percampuran terbesar berada di Surabaya, dengan ketinggian maksimumnya yaitu 1816 m yang terjadi pada siang hari. Untuk Watukosek, Malang, dan Banyuwangi ketinggian maksimumnya yaitu 1800 m, 1087 m, dan 1142 m berturut-turut. Kisaran nilai tinggi lapisan percampuran pada siang hingga sore hari untuk wilayah Jawa Timur yaitu 92 – 1816 m, dan pada malam hingga pagi hari yaitu 24 – 290 m.

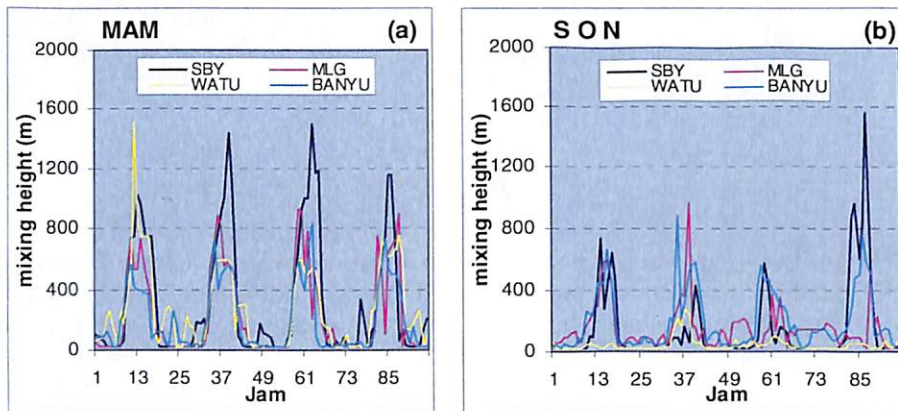


Gambar 4.5. Variabilitas tinggi lapisan percampuran di kota Surabaya, Malang, Watukosek, dan Banyuwangi pada musim hujan (a) dan kemarau (b) tahun 2005.

Pada musim kemarau seperti yang terlihat pada Gambar 4.5 (b), variabilitas tinggi lapisan percampurannya lebih rendah dibandingkan musim hujan, tetapi Surabaya tetap memiliki nilai variabilitas tinggi lapisan percampuran terbesar dengan ketinggian maksimum 1500 m yang terjadi pada siang hari. Untuk Malang, Watukosek, dan Banyuwangi memiliki nilai maksimum 579 m, 702 m, dan 876 m berturut-turut. Sedangkan keadaan tinggi lapisan percampuran pada malam hingga pagi hari, untuk

wilayah Malang memiliki ketinggian yang tinggi dibandingkan daerah yang lainnya. Kisaran nilai tinggi lapisan pencampuran pada siang hingga sore hari yaitu 300 – 1500 m, dan pada malam hingga pagi hari yaitu 25 – 383 m.

Sama seperti musim hujan dan kemarau, pada musim transisi h-k pun wilayah Surabaya masih memiliki variabilitas tinggi lapisan pencampuran terbesar dengan ketinggian maksimumnya yaitu 1500 m. Kisaran nilai tinggi lapisan pencampuran pada siang hingga sore hari yaitu 100 – 1500 m, dan pada malam hingga pagi hari yaitu 20 – 258 m, dapat dilihat pada Gambar 4.6 (a).



Gambar 4.6 Sama seperti Gambar 4.5, tetapi untuk musim hujan-kemarau (a) dan kemarau-hujan (b)

Pada musim transisi k-h seperti yang terlihat pada Gambar 4.6 (b), variabilitas tinggi lapisan pencampurannya lebih rendah dibandingkan musim transisi h-k. Ketinggian maksimumnya masih berada di Surabaya dengan nilai 1558 m. Kisaran nilai tinggi lapisan pencampuran pada siang hingga sore hari yaitu 35 – 1558 m, dan pada malam hingga pagi hari yaitu 24 – 200 m.

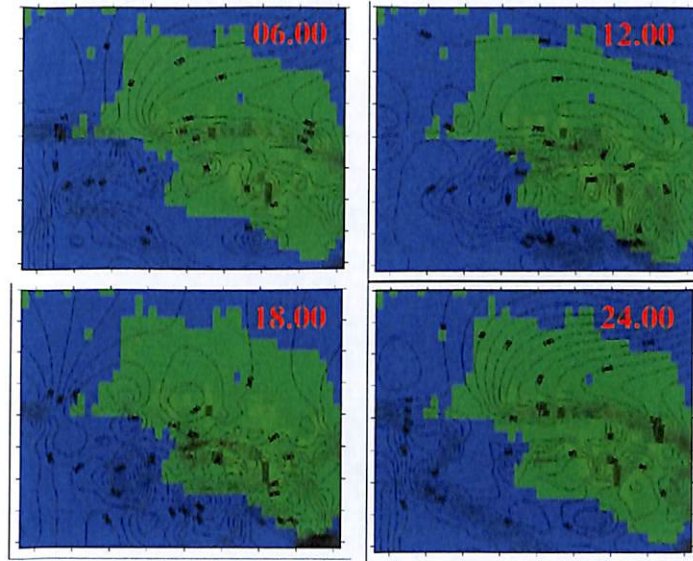
4.4. Variabilitas tinggi lapisan pencampuran di Jawa Barat

Selanjutnya dianalisa nilai variasi tinggi lapisan pencampuran rata-rata di Jawa Barat, dengan me-running seluruh wilayah Jawa Barat selama 4 hari berturut-turut, dengan titik pusat simulasi berada pada koordinat $(-6.53^0, 106.37^0)$. Gambar 4.7 menunjukkan variabilitas nilai tinggi lapisan pencampuran pada pukul 06.00, 12.00, 18.00, dan 24.00 pada musim hujan. Dari hasil terlihat bahwa nilai tinggi lapisan pencampuran maksimum pada jam 6.00 pagi rata-rata adalah 325 m dan minimumnya 40.78 m.

Dari hasil terlihat bahwa nilai tinggi lapisan pencampuran yang hampir sama secara horizontal terlihat di sekitar titik pusat simulasi yang memanjang dari arah Timur ke Barat, dengan nilai tinggi lapisan pencampuran berkisar (80-160) m, seperti yang terlihat pada Gambar 4.7. Sedangkan pada pukul 12.00, nilai maksimum tinggi lapisan pencampuran rata-rata adalah 916.56 m dan minimumnya 49.95 m. Nilai mixing yang rendah terdapat di kabupaten Bandung dan daerah dekat pantai Selatan, seperti yang terlihat pada Gambar 4.7.

Nilai tinggi lapisan pencampuran maksimum rata-rata yang terjadi pada pukul 18.00 adalah 1530.92 m, dan nilai minimumnya adalah 47.81 m. Distribusi nilai tinggi lapisan pencampuran yang tinggi banyak terdapat di wilayah Selatan Jawa Barat. Kemudian, nilai tinggi lapisan pencampuran maksimum yang terjadi pada pukul 24.00 adalah 365.45 m, dan nilai minimumnya adalah 44.17 m. Nilai tinggi lapisan pencampuran

yang sama secara horizontal memanjang dari arah Timur ke arah Barat seperti yang terjadi pada pukul 6.00 dan 24.00.



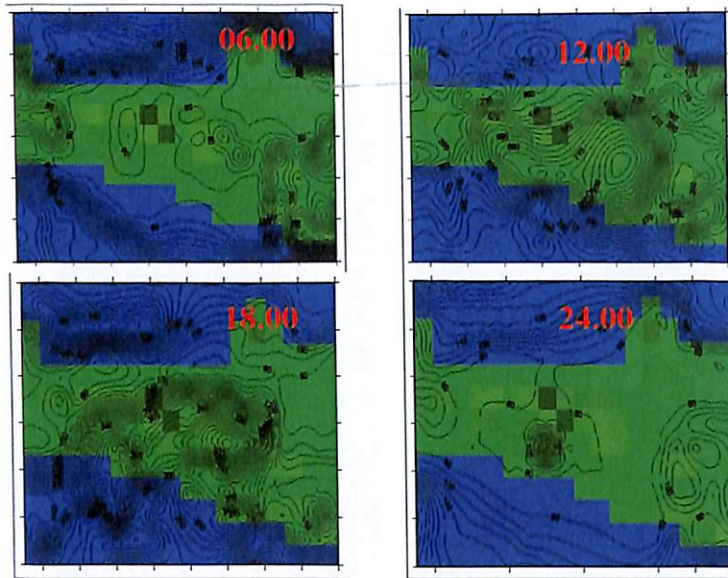
Gambar 4.7. Variabilitas tinggi lapisan pencampuran pukul 06.00, 12.00, 18.00, dan 24.00 rata-rata untuk 4 hari proses running pada musim hujan, tahun 2005 di Jawa Barat.

4.5. Variabilitas tinggi lapisan pencampuran di Jawa Tengah

Untuk wilayah Jawa Tengah seperti yang terlihat pada Gambar 4.8, nilai tinggi lapisan pencampuran rata-rata yang terjadi pada pukul 6.00 pagi adalah 371.13 m dan nilai minimumnya adalah 44.80 m.

Distribusi nilai tinggi lapisan pencampuran yang mempunyai nilai rendah banyak terdapat di dataran sedangkan nilai tinggi lapisan pencampuran yang tinggi banyak terdapat di lautan. Pada pukul 12.00, nilai tinggi lapisan pencampuran maksimum rata-rata adalah 902.65 m dan nilai minimumnya adalah 49.20 m. Fluktuasi nilai tinggi lapisan pencampuran yang rendah dan yang tinggi merata di seluruh wilayah Jawa Tengah seperti yang terlihat pada Gambar 4.8.

Sedangkan pada pukul 18.00 nilai tinggi lapisan pencampuran maksimum rata-rata adalah 585 m dan minimumnya adalah 48.50 m, seperti yang terlihat pada Gambar 4.8. Penyebaran nilai tinggi lapisan pencampuran yang terjadi pada pukul 18.00 ini hampir sama dengan yang terjadi pada pukul 12.00, hanya nilainya lebih rendah. Selanjutnya nilai tinggi lapisan pencampuran rata-rata yang terjadi pada pukul 24.00, dimana nilai maksimumnya adalah 380.30 m dan nilai minimumnya adalah 46.5 m. Nilai tinggi lapisan pencampuran yang tinggi terjadi di wilayah Selatan Jawa Tengah.



Gambar 4.8. Variabilitas tinggi lapisan pencampuran pukul 06.00, 12.00, 18.00, dan 24.00 rata-rata untuk 4 hari proses running pada musim hujan, tahun 2005 di Jawa Tengah.

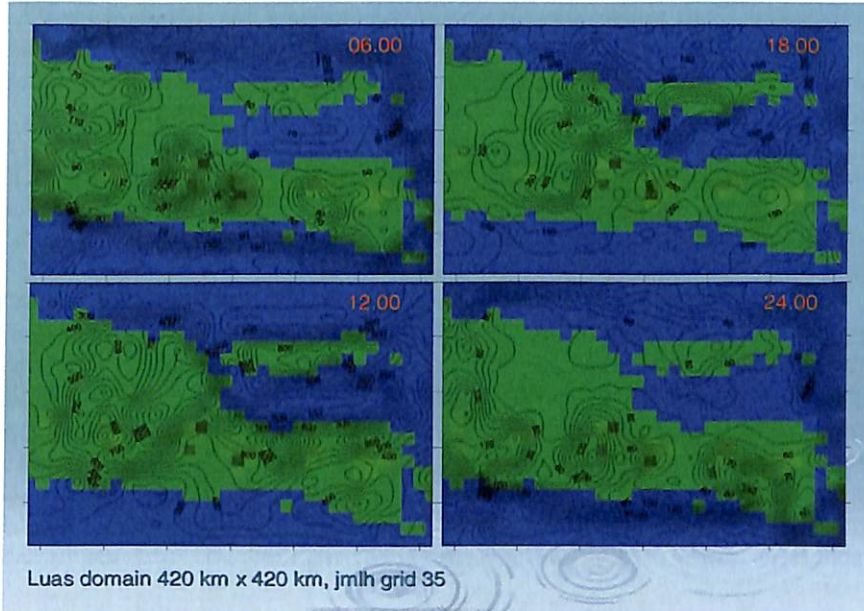
4.5. Variabilitas tinggi lapisan pencampuran di Jawa Timur

Untuk wilayah Jawa Timur variasi nilai tinggi lapisan pencampuran rata-rata didapat dengan merunning seluruh wilayah Jawa Timur selama 4 hari berturut-turut dengan titik pusat simulasi berada pada koordinat $(-7.25^0, 112.47^0)$. Gambar 4.9 menunjukkan variabilitas nilai tinggi lapisan pencampuran pada pukul 06.00, 12.00, 18.00, dan 24.00 pada saat musim hujan. Dari hasil terlihat bahwa nilai tinggi lapisan pencampuran rata-rata yang terjadi pada pukul 06.00 mempunyai nilai maksimum sebesar 300 m dan nilai minimumnya sebesar 45 m. Pada pukul 12.00 terjadi kenaikan tinggi lapisan pencampuran secara signifikan dengan nilai maksimum mencapai 1100 m dan nilai minimumnya masih dalam ketinggian yang tidak jauh berbeda dengan yang terjadi pada pukul 06.00 yaitu sebesar 50 m. Kemudian pada pukul 18.00 nilai maksimum tinggi lapisan pencampuran sedikit menurun yaitu sebesar 1000 m dan nilai minimumnya masih tetap sama sebesar 50 m.

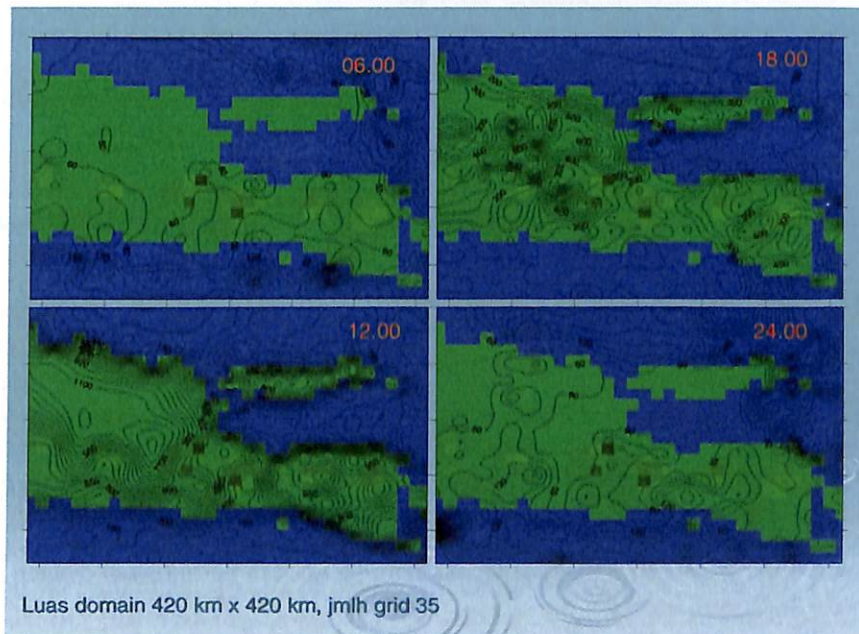
Selanjutnya pada pukul 24.00 nilai tinggi lapisan pencampuran maksimum terus menurun yaitu sebesar 400 m dan minimumnya sebesar 50 m, serta banyaknya nilai tinggi lapisan pencampuran di daratan sebelah utara.

Pada musim kemarau proses running dilakukan sama seperti pada musim hujan yaitu selama 4 hari berturut-turut. Gambar 4.10 menunjukkan variabilitas nilai tinggi lapisan pencampuran pada pukul 06.00, 12.00, 18.00, dan 24.00 pada saat musim kemarau. Dimana pada pukul 06.00 nilai maksimum tinggi lapisan pencampuran sebesar 900 m dan nilai minimumnya yaitu 40 m. Nilai tinggi lapisan pencampuran yang sama banyak terjadi di wilayah Jawa Timur bagian Utara dan sebaliknya untuk bagian Selatan, nilai tinggi lapisan pencampuran bervariasi tajam sehingga terlihat kontur tinggi lapisan pencampuran yang memusat di satu titik. Pada pukul 12.00 nilai maksimum tinggi lapisan pencampuran terjadi pada ketinggian 1100 m, sama seperti pada waktu musim hujan dan nilai minimumnya yaitu 50 m. Sedangkan pada pukul 18.00 nilai tinggi lapisan pencampuran maksimum terjadi pada ketinggian mencapai 1000 m dan nilai minimumnya masih sama

yaitu sebesar 50 m. Selanjutnya pada pukul 24.00 nilai tinggi lapisan pencampuran maksimum menurun yaitu sebesar 600 m dan nilai minimumnya sebesar 40 m, sedikit menurun dibandingkan dengan yang terjadi pada pengamatan sebelumnya.



Gambar 4.9. Variabilitas tinggi lapisan pencampuran pukul 06.00, 12.00, 18.00, dan 24.00 rata-rata untuk 4 hari proses running pada musim hujan, tahun 2005 di Jawa Timur.



Gambar 4.10. Sama seperti Gambar 4.9, tetapi untuk musim kemarau.

Nilai tinggi lapisan percampuran maksimum rata-rata yang terjadi di Jawa Timur lebih tinggi dibandingkan dengan Jawa Barat dan Tengah. Dari hasil terlihat bahwa nilai tinggi lapisan percampuran yang terjadi di wilayah Jawa Barat dan Jawa Tengah, dan Jawa Timur mempunyai nilai maksimum pada siang atau sore hari, sedangkan nilai minimumnya terjadi pada pagi dan malam hari. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut, bahwa pada siang hari radiasi surya memanaskan atmosfer dan permukaan bumi, dan suhu atmosfer normal akan menurun dengan meningkatnya ketinggian. Jika tidak ada kabut, radiasi surya yang memanaskan tanah menyebabkan lapse rate sama atau lebih besar daripada dry adiabatic lapse rate, dengan percampuran udara yang baik sehingga ketinggian dari mixing depth (tinggi lapisan percampuran) cukup besar. Kemudian jika lapse rate lebih besar dari dry adiabatic lapse rate, parcel udara dalam pergerakan vertikal akan terus bergerak dengan sendirinya dan pada siang hari ini, atmosfer dikatakan tidak stabil. Udara akan bergerak bebas dari satu ketinggian ke ketinggian lainnya dan beberapa polutan disebarkan dengan bebas ke atas dan ke bawah.

Sebaliknya, pada malam hari terjadi pendinginan dan hilangnya radiasi panas ke langit yang tidak berawan. Udara di dekat tanah berubah menjadi dingin dan suhunya menurun lebih rendah dari udara yang berada di atasnya, karena itu terjadilah inversi. Inversi adalah lapisan yang sangat stabil sehingga pertukaran udara vertikal hampir terhambat sempurna, karena inversi sendiri bertindak sebagai sebuah tutup dimana beberapa pergerakan udara vertikal yang dapat menembusnya hanya berjalan lambat, sehingga tinggi lapisan percampuran akan menurun setinggi batas inversi. Kemudian sewaktu pendinginan telah lewat malam hari, inversi tersebut mungkin bergerak ke atas beberapa ratus meter. (Stern AC., et al, 1984; Seinfeld JH and Pandis SN., 1998; Suharsono H. 1985).

4.7. Validasi nilai tinggi lapisan percampuran dari TAPM dan Radiosonde

Selanjutnya membandingkan nilai tinggi lapisan percampuran yang merupakan hasil proses running TAPM dengan hasil perhitungan dari data radiosonde sebagai validasi. Data radiosonde yang tersedia untuk seluruh stasiun adalah peluncuran jam 07.00 pagi, kecuali untuk kota Bandung jam peluncurannya seperti yang tertera pada Tabel 4.1. Ada beberapa metoda yang bisa digunakan untuk menghitung nilai tinggi lapisan percampuran dari data radiosonde seperti (Kitaigorodskii and Joffe, 1988; Zitiinkevich, 1989; Karppinen, 2001; Baklanov 2004; Fisher, 2001 and 2006), tetapi dalam makalah ini dipilih (Karppinen, 2001), karena data dalam proses perhitungan harus sesuai dengan yang tersedia.

Perhitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan (3.1) dan (3.2) termasuk perhitungan koefisien korelasi, hasil lengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.1. Koefisien korelasi untuk kota Jakarta mempunyai nilai yang paling kecil yaitu sebesar 0.30, nilai seperti ini diduga dikarenakan perhitungan tinggi lapisan percampuran dari radiosonde sebaiknya dengan melibatkan data kecepatan angin (Karppinen, 2001), karena kota Jakarta banyak dipengaruhi oleh angin lokal (angin darat dan laut). Sebaliknya, koefisien korelasi untuk kota Bandung mempunyai nilai yang paling besar yaitu sebesar 0.80. Untuk kota Bandung, data peluncuran radiosonde yang tersedia lebih komplis termasuk data arah dan kecepatan angin yang dilibatkan dalam proses perhitungan, sehingga nilai tinggi lapisan percampuran yang didapat dari hasil proses running dengan perhitungan dengan data radiosonde tidak jauh berbeda.

Tabel 4.1. Perbandingan nilai tinggi lapisan percampuran (m) dari TAPM dan radiosonde.

No.	Stasiun	Tanggal/ Bln	TAPM	Radiosonde	Koeff. Korelasi Per lokasi
1	Jakarta	08/ 02 (jam 07.00)	25.80	19.44	0.30
		09/ 02 "	24.40	15.52	
		10/ 02 "	24.94	16.02	
		04/ 04 "	25.50	31.70	
		05/ 04 "	26.00	14.42	
		06/ 04 "	23.60	15.96	
		07/ 04 "	24.10	16.08	
		15/ 07 "	21.40	16.38	
		16/ 07 "	18.30	16.75	
		17/ 07 "	18.00	14.91	
		2	Surabaya	09/ 08 (jam 07.00)	
11/ 08 "	16.40			18.78	
15/ 08 "	22.50			23.27	
15/ 10 "	22.40			14.85	
17/ 10 "	24.92			26.33	
01/ 12 "	24.20			24.20	
27/ 12 "	23.20			23.30	
29/ 12 "	22.90			22.90	
31/ 12 "	24.30			21.24	
3	Bandung			10/ 04 (jam 19.00)	59.00
		14/ 04 "	22.50	51.63	
		17/ 04 (jam 07.00)	47.92	47.79	
		22/ 04 "	18.20	17.72	
		24/ 04 (jam 19.00)	21.90	26.08	
		25/ 04 (jam 07.00)	46.00	53.46	
		26/ 04 (jam 19.00)	22.60	26.61	
		28/ 04 (jam 07.00)	17.20	27.26	
		29/ 04 "	46.00	59.08	
		02/ 05 (jam 19.00)	22.40	21.25	
		07/ 05 (jam 07.00)	17.00	17.07	
		08/ 05 "	17.20	24.17	
		16/ 07 "	18.30	16.75	
17/ 07 "	18.00	14.91			

5. KESIMPULAN

- ❖ Variasi tinggi lapisan percampuran yang terjadi di Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur mempunyai nilai maksimum (600-1200 m) pada siang atau sore hari dan nilai minimumnya terjadi pada pagi dan malam hari (25-35 m).
- ❖ Nilai tinggi lapisan percampuran yang terjadi di P. Jawa secara musiman terlihat bervariasi. Di Jawa Barat tinggi lapisan percampuran terbesar terjadi pada musim transisi dengan nilai maksimum mencapai 1900 m, sedangkan terkecil terjadi pada musim hujan dengan tinggi lapisan percampuran maksimum rata-rata

sebesar 1000 m. Di Jawa Tengah tinggi lapisan pencampuran maksimum terbesar terjadi pada musim kemarau sebesar 1800 m, dan tinggi lapisan pencampuran maksimum terkecil terjadi pada musim transisi yaitu rata-rata sebesar 100 m. Untuk Jawa Timur tinggi lapisan pencampuran maksimum terbesar terjadi pada musim hujan sebesar 1900 m, dan terkecil pada musim transisi dengan nilai maksimum sebesar 400 m. Hal ini menunjukkan bahwa pada tahun pengamatan (2005) tinggi lapisan pencampuran tidak selalu tergantung pada musim, tetapi yang paling mempengaruhi nilainya adalah kestabilan atmosfer.

- ❖ Nilai tinggi lapisan pencampuran yang didapat dari hasil proses running TAPM dibandingkan dengan hasil perhitungan dari data radiosonde sebagai validasi, mempunyai nilai koefisien korelasi yang bervariasi (Jakarta = 0.30, Surabaya = 0.56, dan Bandung = 0.80). Dari hasil keseluruhan menunjukkan bahwa nilai tinggi lapisan pencampuran keluaran TAPM cukup valid.

DAFTAR RUJUKAN

- Anondo dkk., (1999-2000). *Proceeding Kumpulan Laporan Akhir Program Penelitian*, Pusfatsatklm LAPAN, Bandung.
- Balkanov et al. 2004. The Urban Surface Energy Budget and Tinggi lapisan pencampuran in European Cities: Data, Models and Challenges for Urban Meteorology and Air Quality. *Final Report of Working Group 2 of COST-715 Action*, Denmark.
- Bayong T. 1993. Meteorologi dan Dispersi Pencemaran Atmosfer, Kursus Pemodelan dan Simulasi Komputer Masalah Lingkungan. Kampus ITB, 1-11 September 1993.
- Emeis S., Munkel C., Vogt S., Müller W., Schafer K., 2004. Atmospheric Boundary Layer Structure from Simultaneous SODAR, RASS and Ceilometer Measurements. *Atmospheric Environmental*, 38, 273-286.
- Ferguson SA., 1998. *Air Quality Climate in the Columbia River Basin*, General Technical Report United States Department of Agriculture Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland Oregon.
- Fisher B.E.A., Kukkonen, J., and Schatzmann, M. 2001: Meteorology Applied to Urban Air Pollution Problems COST 715, *Int. J. Environmental and Pollution*, 16, 560-569.
- 2006: Meteorology Applied to Urban Air Pollution Problems COST 715, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 555-564.
- Hurley P. 2005. *The Air Pollution Model (TAPM) Version 3: User Manual*. CSIRO Atmospheric Research. Australia.
- Karppinen et al. 2001. Evaluation of Inversion Strengths and Tinggi lapisan pencampurans During Extremely Stable Atmospheric Stratification, *Int. J. Environment and Pollution*, 16:1-6.
- Kitaigorodskii, S. A. and Joffre, S. M. (1988): In Search of a Simple Sacling for The Height of The Stratified Atmospheric Boundary Layer. *Tellus* 40 A, 419-433.
- Kukkonen, J., Kontinen, M., Bremer, P., Salmi, T. and Saari, H. (1999), The Seasonal Variation of Urban Air Quality in Northern European Conditions. *Int. J. Environment and Pollution*, (in print).
- Seinfeld JH, Pandis SN. 1998. Atmospheric Chemical Transport Models. Di dalam: Wiley J and Sons. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Canada. 1193-1194.
- Soedono dkk., (1997-1998). *Proceeding Kumpulan Laporan Akhir Program Penelitian*, Pusfatsatklm- LAPAN, Bandung.
- Stern AC, Boubel RW, Turner DB, Fox DL. 1984. *Fundamentals of Air Pollution*. Academic Press. London.

- Suharsono H. 1985. *Pengaruh Cuaca dan Iklim terhadap Polusi Udara*. Fakultas Pasca Sarjana, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Zitilkevich, S. S. 1989: Velocity Profiles, The Resistance Law and The Dissipation Rate of Mean Flow Kinetic Energy in a Neutrally and Stably Stratified Planetary, Boundary Layer, *Boundary Layer Meteorology*, 46, 367-387.