

Uji Pergerakan Angin di Sekitar Model Gedung dengan Terowongan Angin

Wind Movement Test Surrounding Building Model Using Wind Tunnel

FARIDUZZAMAN

Peneliti Balai Besar Teknologi Aerodinamika, Aeroelastika dan Aeroakustika
Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi
Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan, Provinsi Banten, 15314 INDONESIA
fariduzzaman@bppt.go.id

ABSTRACT

Wind disturbance surrounding a building is an important environmental case because it can give various problems, for instance the decrease of comfort level and produce air pollution. It might also give damages on several parts of adjacent structures. These disturbances should be anticipated since the beginning of construction, in particular during the design processes. The most practical way to find solutions of these wind problems is by using simulation or testing a model in a wind tunnel. The following paper will describe study results on simulating wind environments surrounding a building.

Keywords: *wind engineering, wind tunnel, air pollution, environmental aerodynamics, street level wind*

ABSTRAK

Gangguan angin sekitar gedung adalah kasus lingkungan yang penting karena bisa menimbulkan beberapa masalah, antara lain: penurunan tingkat kenyamanan dan produksi polusi udara. Hal ini juga bisa memacu kerusakan pada beberapa bagian struktur sekitarnya. Gangguan ini sudah tentu harus diantisipasi sejak awal konstruksi, yakni selama proses perancangan. Metoda yang paling praktis untuk mencari solusi masalah angin ini adalah dengan simulasi atau pengujian model di terowongan angin. Makalah akan menguraikan beberapa kasus pengujian dalam simulasi lingkungan angin sekitar bangunan dalam terowongan angin.

Kata kunci: angin dalam rekayasa, terowongan angin, polusi udara, aerodinamika lingkungan, angin permukaan tanah

1. PENDAHULUAN

Angin adalah pergerakan udara di sekitar kita, yang terjadi karena perbedaan tekanan atau suhu dari dua lokasi bahkan dua regional^(1,2). Namun disamping pergerakan udara tersebut terjadi pula aspek fisika dan kimia berikut:

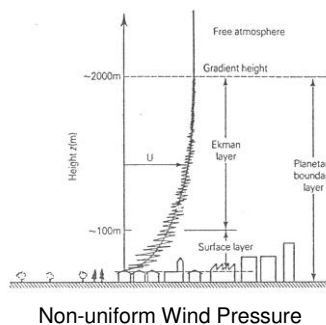
- a. Angin juga membawa energi (kinetik dan potensial) yang mungkin berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya. Seperti angin puting beliung, angin permukaan gedung tinggi dan fenomena aeroelastik jembatan bentang panjang dan sebagainya⁽³⁾.
- b. Di dalam angin juga bisa terbawa udara panas, gas-gas berbahaya atau partikel-partikel polutan yang ikut berpindah atau menempel di lingkungan yang di lalunya. Seperti debu vulkanik, awan panas, asap pabrik dan sebagainya^(4,5).

Atmosfir bumi terbagi atas beberapa lapisan⁽⁶⁾, dimana lapisan yang terdekat ke permukaan bumi adalah yang paling penting untuk dikaji dan dicermati oleh para ahli aerodinamika lingkungan^(7,8). Di mana pada lapisan ini manusia hidup dan tinggal, juga hampir sebagian besar, objek dan struktur non-aeronautika yang dibangun manusia berada. Pada lapisan inilah terjadi:

- a. Interaksi partikel udara dengan pollutant atau dispersi polutan di udara⁽⁹⁾
- b. Interaksi angin dengan permukaan bumi yang tidak rata. Sehingga distribusi kecepatan angin membentuk suatu profil yang disebut dengan Lapis Batas Atmosfir (LBA) atau *Atmospheric Boundary Layer (ABL)*⁽¹⁰⁾

Sebagai dukungan pada kegiatan industri konstruksi, maka beberapa negara telah membuat kategorisasi *terrain* dan mencantulkannya dalam *Wind Code* atau *Standard Wind Engineering* yang berlaku di negara tersebut^(1,7,8). Sekurangnya ada empat klasifikasi *terrain* yang populer digunakan⁽¹⁾:

- Terrain terbuka (*open terrain*): lautan/samudera, bandara
- Terrain daerah pinggir kota (suburban): daerah berhutan, pedesaan
- Terrain tengah kota (urban): kota besar, perkampungan padat
- Terrain tepi pantai (*sea coast*)



Gambar 1. Struktur *Atmospheric Boundary Layer (ABL)*⁽¹⁾

Dengan demikian gedung-gedung tinggi akan menerima beban angin yang tidak merata disepanjang ketinggiannya, semakin naik ketinggian maka semakin besar pula tekanan angin yang diterima dinding gedung tersebut. Karena itulah dalam uji model gedung di terowongan angin, keberadaan generator ABL sering merupakan keharusan.

Karakteristik yang penting untuk di replika oleh generator ABL adalah:

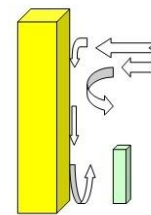
- Variasi kecepatan rata-rata angin terhadap ketinggian
- Variasi intensitas turbulen dan skala-integral terhadap ketinggian
- Spectra dan spectra-silang turbulensi sepanjang alur angin (sumbu-X), memotong angin (sumbu-Y) dan arah vertikal (sumbu-Z).

Selain pola aliran angin yang berubah sekitar gedung, pada gedung tinggi juga dapat terjadi :

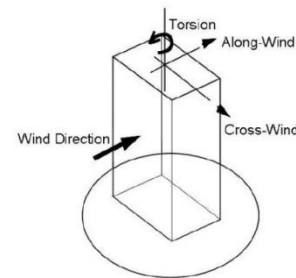
- Defleksi angin kecepatan tinggi dari ketinggian ke permukaan tanah (*street level wind*)
- Respons dinamik yang timbul sebagai gerakan searah angin (*along-wind*) gerakan ke samping (*cross-wind*) dan gerakan memutar (*torsion*)

- Respons statik yang timbul sebagai variasi distribusi tekanan pada seluruh permukaan gedung

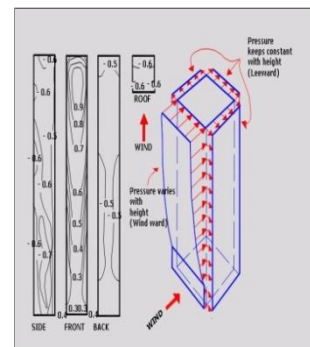
Dengan berdirinya gedung-gedung tinggi dipermukaan bumi, maka angin kecepatan tinggi dari bagian atas dengan mudah dibelokkan ke permukaan tanah (*street level*). Akibatnya pengguna jalan atau orang-orang yang beraktifitas di jalan atau pelataran sekitar gedung tinggi, akan merasakan aliran angin yang lebih cepat dan turbulen di banding pelataran tanpa gedung tinggi. Bahkan angin yang dibelokkan ke permukaan tanah ini bisa saja merusak struktur terdekat apabila kekuatan strukturnya kurang.



Gambar 2. Defleksi aliran angin kecepatan tinggi ke permukaan tanah



Gambar 3. Respon dinamik gedung tinggi⁽²⁾



Gambar 4. Distribusi tekanan di dinding gedung (*façade*)⁽⁴⁾

Aspek lingkungan lain yang erat kaitannya dengan aliran angin adalah proses dispersi polutan dari suatu industri ke udara atau atmosfer permukaan bumi.

Proses industrialisasi adalah suatu proses pembangunan kehidupan yang senantiasa dinantikan setiap negara. Namun pembangunan

industri yang dirancang tidak cermat, akan menimbulkan dampak buruk, seperti pencemaran (polusi) pada lingkungan hidup: flora, fauna dan manusia sekitarnya, bahkan mengancam keselamatan dan kesehatan pekerjanya^(5,10,11,12,13,14).

Dengan kemajuan teknologi yang ada saat ini, sesungguhnya industri akan mampu menghilangkan/ meminimalkan dampak polusi. Pada dasarnya polusi itu terjadi karena pihak industri kurang berusaha menerapkan teknologi penanggulangan kesehatan lingkungan. Suatu keadaan yang umumnya didorong oleh pertimbangan ekonomis⁽⁵⁾. Cara yang paling praktis menanggulangi polusi adalah pencegahan dan prediksi sejak dini, terhadap kemungkinan buruk yang mungkin terjadi. Desain industri dan lokasi pembangunannya, dikaji dengan melalui riset intensif terlebih dahulu. Salah satu metoda prediksi yang populer untuk analisis dampak polusi cerobong pabrik, adalah metoda eksperimen di terowongan angin. Dengan terowongan angin beberapa variable desain industri yang spesifik dapat diuji/ disimulasikan dan perilakunya dianalisis^(15,16,17,18).

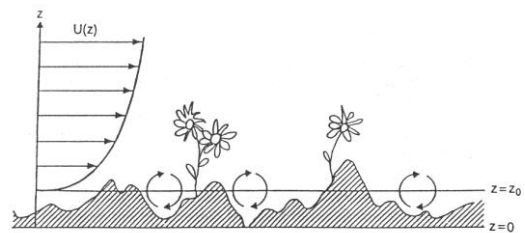
Tulisan ini akan membahas beberapa metoda analysis untuk kajian lingkungan angin sekitar model gedung di terowongan angin, berdasarkan pengalaman penulis dalam beberapa simulasi terowongan angin. Ada dua studi kasus eksperimen yang akan dijelaskan: induksi angin pada transmisi kabel sutet dan induksi angin pada dispersi polutan dari cerobong asap.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Profil Angin Permukaan Bumi

Data angin suatu kawasan umumnya diperoleh dari station meteorologi terdekat, dimana ketinggian alat ukur yang baku adalah 10m dari permukaan tanah. Dengan demikian ketinggian ini dapat didefinisikan sebagai ketinggian awal dari ABL (*Roughness Length*) yang diberi notasi z_0 .

Dalam arti fisika, z_0 adalah ukuran karakteristik vortex yang terjadi akibat gesekan udara dengan permukaan bumi yang beragam. z_0 adalah suatu ketinggian dari permukaan bumi dimana kecepatan rata-rata anginnya adalah nol, lihat Gambar 5. Kecepatan aliran udara selanjutnya akan naik sedemikian rupa sehingga diujung ketinggian *roughness* seolah-olah ada permukaan baru, z .



Simplified illustration of the roughness length z_0 . (After Petersen et al. (1980). Reproduced by permission of Rise National Laboratory, Denmark).

Gambar 5. Definisi *Roughness Length*, z_0 (4)

Jika permukaan bumi berupa hutan lebat, maka ketinggian *roughness* merupakan tambahan ketinggian dari rata-rata tinggi pohon d. Di terowongan angin, ketinggian z_0 disimulasikan dengan susunan balok yang dirancang berdasarkan hubungan matematis sebagai berikut⁽⁴⁾:

$$z_0 = 0.5h \frac{A_r}{A_t} \dots\dots\dots (1)$$

- dimana,
 h : tinggi elemen roughness,
 A_r : luas permukaan elemen roughness yang tegak lurus arah angin
 A_t : luas permukaan tanah per elemen roughness

Selanjutnya profil angin yang membentuk suatu kurva khas dapat didekati dengan suatu model persamaan matematik berpangkat (*power equation*)^{(1), (2)}.

$$U(z) = U(z_{ref}) \left[\frac{z}{z_{ref}} \right]^\alpha \dots\dots\dots (2)$$

- dimana,
 $U(z)$: kecepatan di ketinggian z ,
 $U(z_{ref})$: kecepatan di ketinggian reference z_{ref}
 α : faktor pangkat yang nilainya tergantung kepada roughness of terrain
 z_{ref} : ketinggian dari permukaan bumi

Nilai α ditentukan berdasarkan survey langsung ke lapangan sekitar objek yang akan dianalisis, atau menggunakan nilai generik yang ditentukan oleh *Wind Code Standard* yang berlaku di suatu negara. Mayoritas negara-negara menerapkan 4 kategori ABL: *Coastal* (tepi pantai), *Open Terrain* (daerah terbuka), *Suburban* (pinggiran kota) dan *Urban* (tengah kota)⁽¹⁾. Contohnya ada di Tabel 1 berikut,

Ketinggian lapis batas atau *Planetary Boundary Layer* dinyatakan dengan simbol δ . Pada ketinggian δ inilah kecepatan angin mulai *uniform*, besar kecepatan hampir konstan walaupun ketinggian terus bertambah.

Tabel 1. Faktor Pangkat dan Kedalaman ABL secara generik⁽¹⁾

| No | Areas / Terrain | ANSI A58.1-1982 | |
|----|--------------------|-----------------|--------------|
| | | α | δ (m) |
| 1. | Coastal | 0.1 | 213 |
| 2. | Open terrain | 1/7 | 274 |
| 3. | Suburban | 1/(4.5) | 366 |
| 4. | Urban/Large cities | 1/3 | 457 |

Persamaan (2) diatas berlaku dengan anggapan bahwa:

- α adalah konstan sampai dengan ketinggian gradient δ (ketebalan lapis batas)
- δ adalah fungsi dari α juga

Ketinggian *reference*, z biasanya digunakan ketinggian standar 10m (33ft) yang merupakan ketinggian bakupenempatan alat-alat ukur meteorologi. Dapat pula digunakan $z = \delta$, jika hal ini yang dipakai, maka sebagai *reference* dan G adalah kecepatan angin yang *uniform* di ketinggian $z_{ref} = \delta$, maka kecepatan angin didaerah *gradient* z_g dapat ditulis(4):

$$U(z_g) = G \left(\frac{z_g}{\delta} \right)^\alpha \quad \dots\dots\dots(3)$$

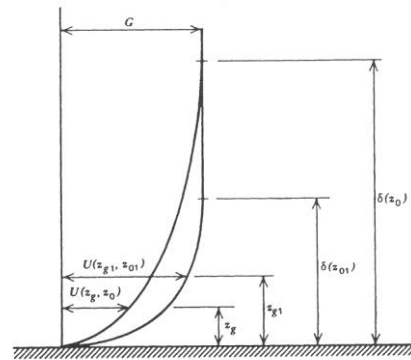
Persamaan (3) juga memberikan konsekwensi kesetaraan ABL (*Jensen Rule*) antara lingkungan terowongan angin dan lingkungan aktual:

$$\frac{U(z)}{U(\delta)} = \left[\frac{z}{\delta} \right]^\gamma \Bigg|_{aktual} = \frac{U(z)}{U(\delta)} = \left[\frac{z}{\delta} \right]^\gamma \Bigg|_{terowongan\ angin} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{z_{PT}}{\delta_{PT}} = \frac{z_{TA}}{\delta_{TA}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{U_{PT}(z)}{G} = \frac{U_{TA}(z)}{U_{TA}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

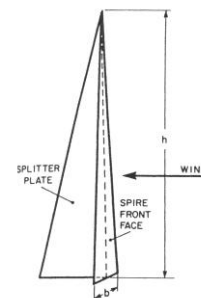
Untuk *roughness length* z_0 yang berbeda, ketinggian gradient δ maupun profilnya akan berbeda pula, lihat Gambar 6.



Gambar 6. Profil angin dan notasi⁽⁴⁾.

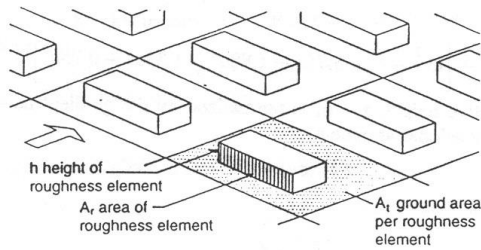
Nilai α untuk terowongan angin maupun keadaan sesungguhnya di alam adalah sama. Jadi profil ABL di terowongan angin harus dirancang sedemikian rupa sehingga memberikan profil angin yang sama dengan keadaan lingkungan sesungguhnya (aktual).

Dalam uji terowongan angin, replika ABL dikendalikan oleh suatu perangkat yang ditempatkan di bagian depan model dan dapat disebut sebagai ABL generator. Komponen-komponennya merupakan kombinasi dari: *spires, roughness, barriers, bar, atau wire-screen*. Dalam kajian lingkungan angin ini penulis menggunakan generator ABL dengan kombinasi komponen *spires* dan *roughness*.



Gambar 7. Geometri dan Struktur *Spires*⁽¹⁾

Spires adalah salah satu komponen ABL yang berfungsi mengganggu aliran secara *logaritmik* atau eksponensial. Karena profil yang diinginkan di ABL adalah eksponensial, maka *spires* juga harus memberikan perubahan geometri gangguan yang eksponensial. *Roughness* dibuat dari deretan balok, yang disusun teratur dan jarak antar balok D , setiap balok memiliki tinggi k .

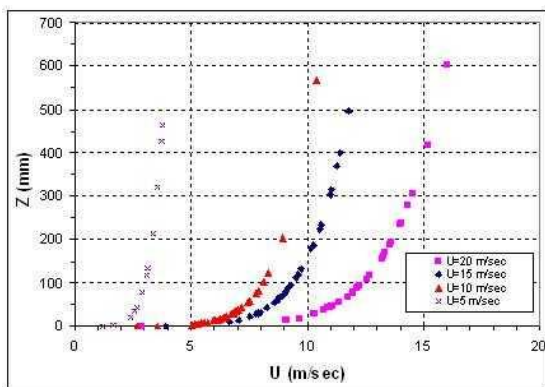


Gambar 8. *Roughness simulator*⁽⁴⁾

Sebagai studi kasus, berikut akan diuraikan hasil simulasi ABL untuk *open terrain* di sekitar model jembatan bentang panjang. Dengan data dimensi jembatan sebagai berikut:

Tabel 2. Data dimensi uji jembatan

| Bagian | Jemb. Aktual | Jemb. Model |
|--------------------|--------------|-------------|
| Bentang Total | 818 m | 3.27 m |
| Bentang Tengah | 434 m | 0.12 m |
| Lebar Dek | 30 m | 0.02 m |
| Tinggi Dek | 5 m | 0.544 m |
| Tinggi Pylon | 136 m | 1.736 m |
| Tinggi Dek ke Bumi | 35 m | 0.14 m |



Gambar 9. ABL generator dan hasil simulasinya

Dari Gambar 9. tampak bahwa profil ABL akan berbeda-beda dengan perubahan kecepatan angin, dengan demikian ABL harus di atur sedemikian rupa sehingga disesuaikan dengan rencana pengujian yang akan dilakukan.

Pengalaman menunjukkan bahwa hanya dari susunan *spires* dan *roughness* maka ABL dapat dibentuk secara memadai untuk uji terowongan angin model-model non-aeronautika, seperti gedung dan jembatan.



Gambar 10. ABL Generator dan Hasil Simulasi

2.2 Studi Kasus-1: Induksi Angin Pada Jaringan Sutet

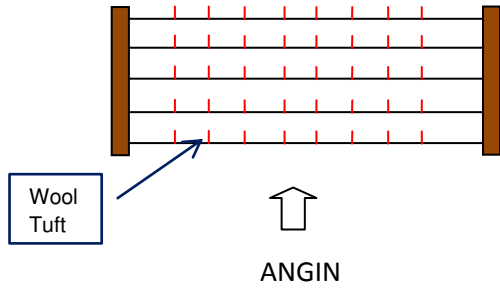
Kajian eksperimen dilakukan untuk sebuah desain stadion yang akan dibangun berdekatan dengan kabel transmisi listrik extra tinggi (sutet). Dengan demikian kehadiran stadion tersebut dikhawatirkan akan mengganggu sistem transmisi kabel ekstra tinggi.

Untuk kajian ini maka dibuat sebuah model uji stadion di terowongan angin menggunakan Terowongan Angin ILST (*Indonesian Low Speed Tunnel*) seperti ditunjukkan di Gambar 11. Metoda identifikasi dilakukan dengan cara kombinasi antara visualisasi aliran menggunakan *tuft* dan pengukuran tingkat turbulensi angin menggunakan *hot-wire probe*.



Gambar 11. Model struktur dengan *Wool Tuft Rig* di posisi model tiang dan kabel transmisi

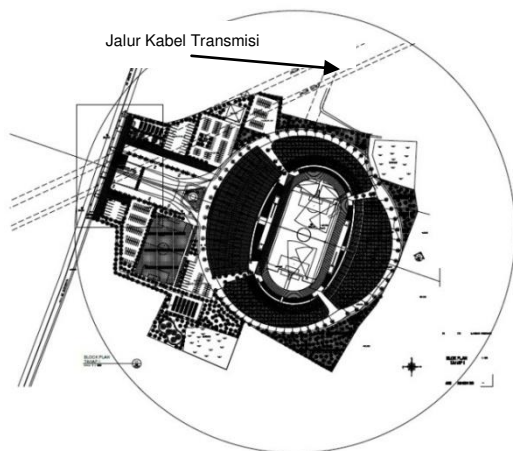
Benang-benang *tuft* di pasang dalam bentuk *grid*, memanjang searah jalur transmisi kabel sutet, sedangkan *probe hotwire* dipasang pada posisi model tiang transmisi dengan dua ketinggian 8cm dan 10cm dari lantai seksi uji (atau setara dengan 12m dan 15m dari permukaan tanah pada lingkungan struktur sebenarnya). Kemudian angin dialirkan melalui model pada 8 sudut datang angin: 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° dan 315°.



Gambar 12. Wool Tuft Rig



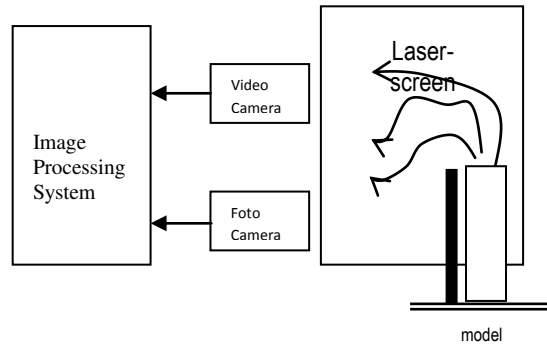
Gambar 13. Kabel transmisi dan lokasi struktur dalam proses konstruksi



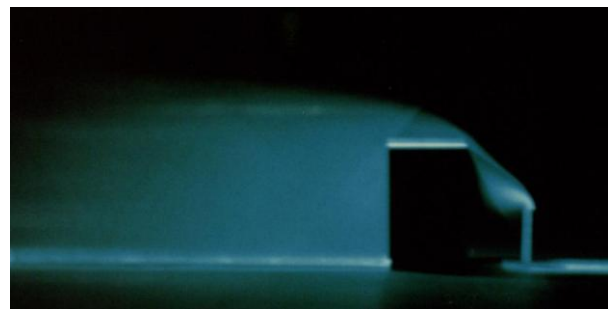
Gambar 14. Posisi jalur kabel transmisi di sekitar stadion

2.3 Studi Kasus-2: Induksi Angin Pada Dispersi Polutan

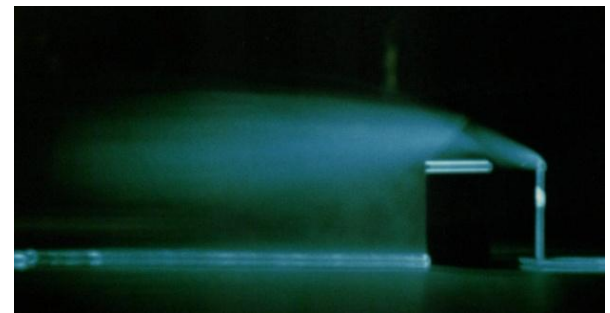
Tipikal kajian eksperimental dilakukan dengan metoda visualisasi asap (*smoke flow visualization*) dan penguraian warna (*discoloration*). Metoda visualisasi asap digunakan untuk menganalisa proses difusi polutan ke atmosfer, sedangkan metoda *discoloration* digunakan untuk analisis deposisi polutan dipermukaan bumi. Metoda ini mengikuti proses yang diuraikan rujukan ⁽⁶⁾.



Gambar 15. Sketsa tata letak model dan instrumentasi yang digunakan



Gambar 16. Hasil rekaman visual ($h_g > h_c$)



Gambar 17. Hasil rekaman visual ($h_g = h_c$)

Sebagai model adalah susunan gedung dan cerobong yang dipasang sebagai model generik, dimana ada variasi ketinggian antara ketinggian cerobong-asap (*chimney*) h_c , terhadap ketinggian gedung h_g yang tingginya 250mm, $h_g > h_c$ atau $h_g = h_c$. Eksperimen juga dilakukan dengan memperhatikan parameter kesetaraan rasio kecepatan semburan gas atau polutan dari cerobong (V_g) terhadap kecepatan aliran angin di terowongan angin (V_a). Dengan demikian hasil eksperimen ini dapat diterapkan pula jika ada industri yang memiliki konfigurasi gedung yang setara.

Illuminasi di berikan dengan perangkat *laser screen* dimana penyinaran berbentuk kipas dan memotong aliran udara yang telah diberi asap,

Sedangkan metoda *discoloration* dilakukan dengan cara melapisi seluruh permukaan model dan lantai sekitarnya dengan kertas lakmus. Hasil nya kemudian direkam dengan *still* dan *video camera* untuk diolah lebih lanjut menggunakan perangkat pengolah citra (*image processing*).

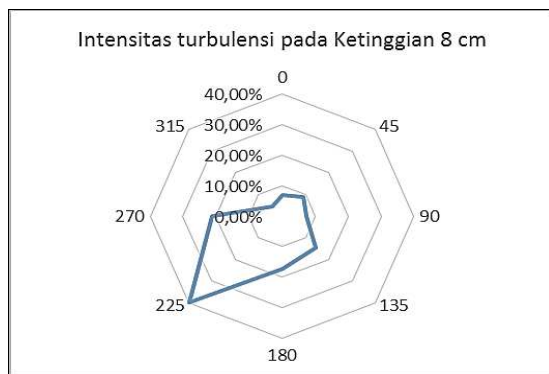
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Studi Kasus-1: Induksi Angin Pada Jaringan Sutet

Pengukuran intensitas turbulensi udara sekitar posisi kabel transmisi sutet, yang dilakukan pada 2 ketinggian probe, hasilnya di tunjukkan di Tabel 3 dan 4 serta Gambar 18 dan 19.

Tabel 3. Intensitas turbulen (Tinggi Probe 8cm)

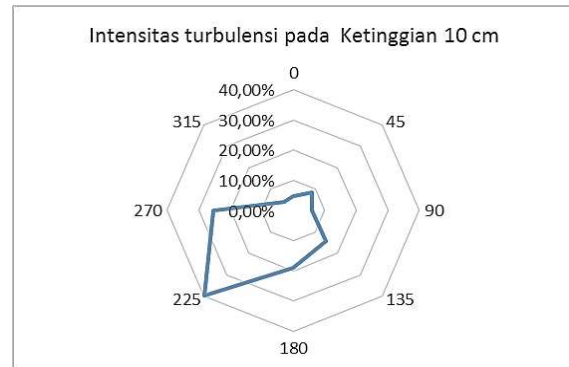
| No. | Sudut (deg) | Intensitas Turbulensi (%) |
|-----|-------------|---------------------------|
| 1 | 0 | 6,8 |
| 2 | 45 | 9,0 |
| 3 | 90 | 7,3 |
| 4 | 135 | 14,5 |
| 5 | 180 | 17,4 |
| 6 | 225 | 39,8 |
| 7 | 270 | 21,2 |
| 8 | 315 | 4,4 |



Gambar 18. Pengukuran pada probe 8 cm

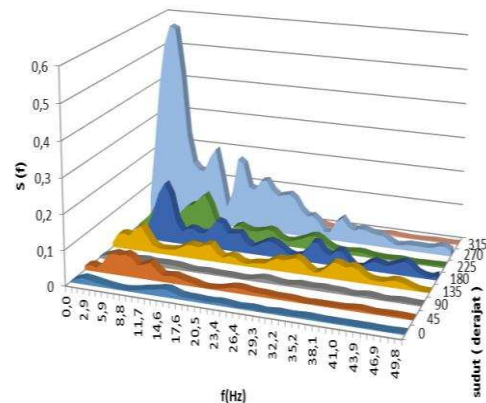
Tabel 4. Intensitas turbulen (Tinggi Probe 10cm)

| No. | Sudut (deg) | Intensitas Turbulensi (%) |
|-----|-------------|---------------------------|
| 1 | 0 | 4,9 |
| 2 | 45 | 8,5 |
| 3 | 90 | 5,8 |
| 4 | 135 | 14,5 |
| 5 | 180 | 19,0 |
| 6 | 225 | 39,8 |
| 7 | 270 | 25,3 |
| 8 | 315 | 4,0 |



Gambar 19. Pengukuran pada Probe 10 cm

Kemudian untuk mengetahui energi maupun frekuensi osilasi yang mungkin akan menginduksi struktur kabel transmisi secara dominan, maka data pengukuran dari hotwire dianalisis dengan Frequency Analyzer. Gambar 20 dan 21, menunjukkan hasilnya yang ditampilkan dalam bentuk PSD (*Power Spectral Density*).

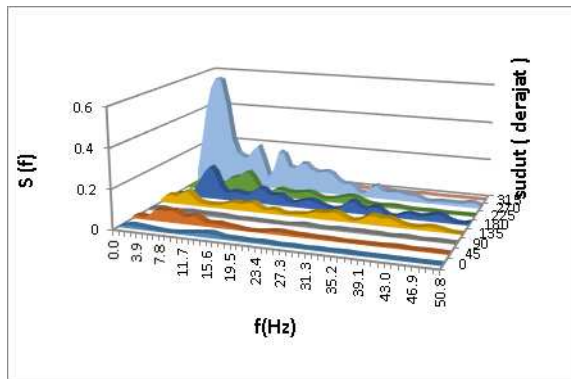


ketinggian *hot-wire* 8 cm dari lantai

Gambar 20. Hasil analisis PSD (*Power Spectral Density*)

Tampak bahwa aliran angin menimbulkan induksi osilasi yang dominan ketika sudut datang angin 225 derajat dari utara, baik untuk ketinggian probe 8cm maupun 10cm, dan frekuensi yang tereksitasi adalah 3,9Hz.

Dengan kata lain, struktur jaringan kabel transmisi akan aman jika memiliki frekuensi natural yang tidak berdekatan dengan 3,9Hz. Jika ternyata berada disekitar frekuensi tersebut, maka perencana harus mengulang proses desain berikut revisi material yang akan digunakan.

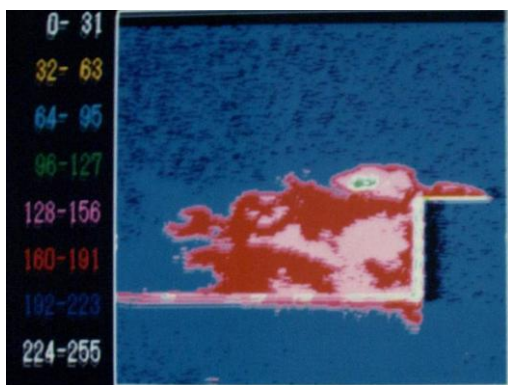


ketinggian hot-wire 10 cm dari lantai

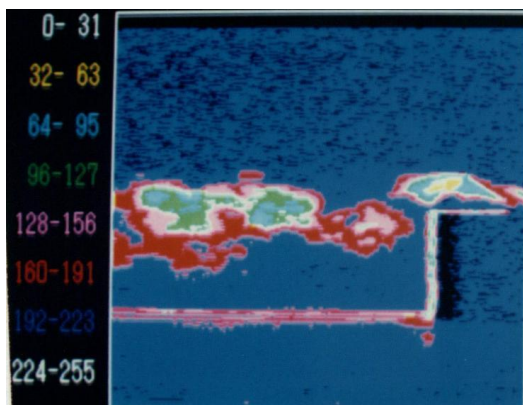
Gambar 21. Hasil analisis PSD (*Power Spectral Density*)

3.2 Studi Kasus-2: Induksi Angin pada Dispersi Polutant

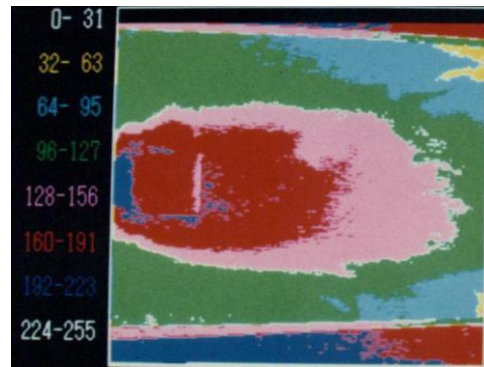
Pengukuran dispersi polutan untuk medan aliran ditunjukkan di Gambar 22 dan 23, dan pengukuran konsentrasi deposisi polutan pada dinding model gedung dan permukaan tanah ada di Gambar 24 dan 25.



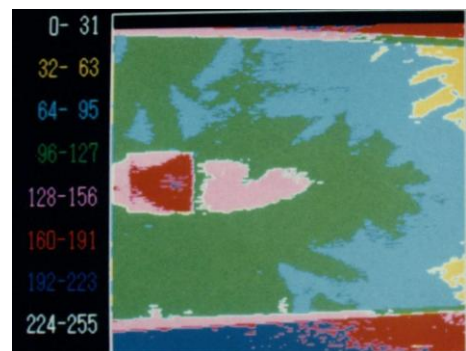
Gambar 22. Hasil analisis Image Processing pada medan aliran ($h_g > h_c$)



Gambar 23. Hasil analisis Image Processing pada medan aliran, ($h_g = h_c$)



Gambar 24. Hasil analisis Image Processing pada deposisi polutan di permukaan tanah/gedung, ($h_g > h_c$)



Gambar 25. Hasil analisis Image Processing pada deposisi polutan di permukaan tanah/gedung, ($h_g = h_c$)

Untuk mendapatkan gambaran nilai secara kuantitatif dari hasil eksperimen, maka parameter jarak atau parameter dimensi dapat dinormalisasi terhadap ketinggian gedung, sedangkan konsentrasi polutan disuatu titik dapat dinormalisasi terhadap konsentrasi polutan yang tertinggi.

Hasil analisis dengan sistem pengolah citra di atas, membagi distribusi konsentrasi polutan kepada 8 kategori yang dinyatakan menjadi 8 warna: putih, kuning, cyan, hijau, pink, merah, biru dan abu-abu. Warna putih menyatakan daerah dengan konsentrasi polutan tertinggi dan warna abu-abu menyatakan daerah dengan konsentrasi polutan terendah. Dengan demikian, kuantitas lain dapat dinormalisasikan terhadap konsentrasi tertinggi dinyatakan dengan warna putih. Seperti ditunjukkan di Tabel 5.

Analisis deposisi polutan di permukaan tanah dan dinding gedung, juga mengelompokkan pada 8 kategori dengan 8 warna: putih, kuning, cyan, hijau, pink, merah, biru dan abu-abu, namun urutannya yang terbalik dimana warna putih untuk konsentrasi terendah dan warna abu-abu

untuk konsentrasi tertinggi. Seperti ditunjukkan di Tabel 6.

Tabel 5. Kuantifikasi warna medan aliran

| No. | Kategori Warna | Konsentrasi |
|-----|----------------|----------------|
| 1 | putih | 100 % - 87.5 % |
| 2 | kuning | 87.5 % - 75 % |
| 3 | cyan | 75 % - 62.5 % |
| 4 | hijau | 62.5 % - 50 % |
| 5 | pink | 50 % - 37.5 % |
| 6 | merah | 37,5 % - 25 % |
| 7 | biru | 25 % - 12,5 % |
| 9 | abu-abu | 12,5 % - 0 % |

Tabel 6. Kuantifikasi warna deposisi permukaan

| No. | Kategori Warna | Konsentrasi |
|-----|----------------|----------------|
| 1 | putih | 0 % - 12,5 % |
| 2 | kuning | 12,5 % - 25 % |
| 3 | cyan | 25 % - 37,5 % |
| 4 | hijau | 37,5 % - 50 % |
| 5 | pink | 50 % - 62,5 % |
| 6 | merah | 62,5 % - 75 % |
| 7 | biru | 75 % - 87,5 % |
| 8 | abu-abu | 87,5 % - 100 % |

Dari citra hasil analisis dispersi polutan di udara Gambar 22 dan 23, tampak bahwa jika $h_g > h_c$ konsentrasi polutan sekitar gedung cukup tinggi sampai dengan jarak longitudinal $3.54h_g$ dengan konsentrasi antara 75 % - 62.5 %. Berbeda dengan kasus ketika $h_g = h_c$, konsentrasi polutan sekitar gedung menurun.

Hasil analisis yang ditunjukkan di Gambar 24 dan 25, tampak bahwa deposisi tertinggi sekitar gedung juga terjadi ketika $h_g > h_c$ dengan konsentrasi cukup tinggi: 75 % - 62.5 %, sampai dengan jarak longitudinal $2.31h_g$.

4. KESIMPULAN

Dari metoda analisis eksperimental di terowongan angin maka dapat diperoleh data simulasi efek angin pada lingkungan sekitarnya, secara fisika dan kimia.

Studi kasus pertama, membantu perencana gedung untuk lebih berhati-hati, tidak merencanakan suatu gedung yang di kemudian hari akan membahayakan lingkungannya. Studi kasus kedua, membantu para perencana kawasan industri untuk lebih berhati-hati terhadap efek dispersi polutan. Dengan eksperimen ini, pemahaman tentang pola penyebaran polutan, baik dispersi di udara maupun deposisi dipermukaan sekitarnya,

menjadi lebih jelas. Efek polusi pada sekitar gedung akan tinggi apabila ketinggian cerobong lebih rendah terhadap ketinggian gedung ($h_g > h_c$).

Hasil eksperimen ini juga dapat digunakan untuk model industri secara generik apabila posisi cerobong dan gedung memenuhi kaidah kesetaraan yang digunakan, antara lain bentuk dan ukuran geometri, serta rasio kecepatan semburan gas atau polutan dari cerobong terhadap aliran angin, V_g/V_a .

Pemodelan terowongan angin terkadang cukup sederhana, namun dengan metoda yang sama analisis ini dapat digunakan untuk model yang lebih kompleks, terutama untuk model-model industri yang sebenarnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis sampaikan kepada tim pengujian stadion yang telah bekerja sungguh-sungguh sehingga diperoleh data yang diperlukan. Begitupula terima kasih disampaikan untuk anggota troika pengujian yang bersama-sama melakukan pengujian dengan penulis, antara lain: Matza Gusto Andika, ST., MT. dan Drs. Dadang Kuswandi.

DAFTAR PUSTAKA

1. Simiu, E. & Scanlan, R. H., (1996), Wind Effects on Structures. (3rd Ed.).New York: John Wiley and Sons Inc.
2. P. Sachs, (1978), Wind Forces in Engineering, Pergamon Press, Oxford.
3. J. Hay, (1992) Response of Bridge To Wind, HMSO Publication, London.
4. Dyrbye, C. & Hansen, S.O., (1997), Wind Loads on Structures, John Wiley & Sons, Chichester.
5. Scorer, R., (1968); Air Pollution, Pergamon Press, Oxford.
6. Okamoto, H.; Nishijima, S, Kinoshita, S. dan Maeda, H., (1979), Experimental Studies on The Prediction of Atmospheric Environmental Pollution, Mitsubishi Heavy Industries Ltd. R&D Center, Tokyo.
7. Holmes, J., Tamura, Y., and Krishna, P., (2009), 11th Americas Conference on Wind Engineering, June 22-26, 2009, San Juan, Puerto Rico.
8. Holmes, J., Tamura, Y., and Krishna, P., (2008), Wind loads on low, medium and

- high-rise buildings by Asia-Pacific codes, Proceedings The 4th International Conference on Advances in Wind and Structures (AWAS'08), 29-31 May 2008, Jeju, Korea.
9. Jian Hang a, Mats Sandberg b,* , Yuguo Li a, Leif Claesson, (2009), Pollutant dispersion in idealized city models with different urban morphologies, *Journal Atmospheric Environment* 43 6011–6025.
 10. Tomas, J.M., Pourquie, M.J.B.M., & Jonker, H.J.J. (2015), The influence of an obstacle on flow and pollutant dispersion in neutral and stable boundary layers, *Journal Atmospheric Environment* 113 2015 236e246.
 11. Heist, D., Isakov, V., Perry, S., Snyder, M., Venkatram, A., Hood, C., Stocker, J., Carruthers, D., Arunachalam, S., & Owen, R.C., (2013), Estimating near-road pollutant dispersion: A model inter-comparison, *Journal Transportation Research Part D* 25 93–105.
 12. Shen, Z., Wang, B., Cui, G., & Zhang, Z..., (2015) Flow pattern and pollutant dispersion over three dimensional building arrays, *Journal Atmospheric Environment* 116 202e215.
 13. Gromke, C., (2011), A vegetation modeling concept for Building and Environmental Aerodynamics wind tunnel tests and its application in pollutant dispersion studies, *Journal Environmental Pollution* 159 2094e2099.
 14. Hang, J., Li, Y., Sandberg, M., Buccolieri, R., & Sabatino, S.D., (2012), The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas, *Journal Building and Environment* 56 346e360.
 15. Hajra, B., Stathopoulos, T. & Bahloul, A., (2011), The effect of upstream buildings on near-field pollutant dispersion in the built environment, *Journal Atmospheric Environment* 45 4930e4940.
 16. Steven G. Perry b, Vlad Isakov b, David K. Heist, (2011), Tracer studies to characterize the effects of roadside noise barriers on near-road pollutant dispersion under varying atmospheric stability conditions, *Journal Atmospheric Environment* 44 204e214.
 17. Chavez, M., Hajra, B., Stathopoulos, T., Bahloul, A., (2012), Assessment of near-field pollutant dispersion: Effect of upstream buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 104–106 509–515.
 18. Y. Zhang, Y., Kwok, K.C.S., Liu, X.-P. & Niu, J.-L., (2015), Characteristics of air pollutant dispersion around a high-rise building, *Journal Environmental Pollution* 204 280e288.