

STUDI PARAMETRIK PENGARUH ROUGHNESS TERHADAP PROFIL KECEPATAN LAPISAN BATAS PADA SIMULASI ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER DI WIND TUNNEL (PARAMETRIC STUDY OF ROUGHNESS INFLUENCE TOWARD THE BOUNDARY LAYER VELOCITY PROFILE ON THE SIMULATION OF ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER IN THE WIND TUNNEL)

Subagyo

UPT-LAGG, BPPT

e-mail: subagyo@bppt.go.id, cpbagyo@yahoo.com

ABSTRACT

The influence of wind forces acting on tall buildings is crucial to be understood in designing and analyzing high buildings. This is necessary so that the buildings which were designed comply with the safety design criteria. The wind influence in this case affected by wind speed profile. This wind speed profile is represented by vale of curve which is located in the boundary layer. Boundary layer in this case refers to Atmospheric Boundary Layer (ABL). ABL is the part of the atmosphere which is directly influence towards the Earth's surface. Flow velocity profile on ABL can have a slope or steep gradient it is depended on the characteristics of the upstream surface. ABL can be constructed through two methods: Experiments and Numerical Simulations. ABL reconstruction study in this paper uses experimental methods. In experiments, the reconstruction is usually performed with the ABL try and error, it is necessary to guide the trend of ABL parameters to make it easier and more effective in the ABL generation. Keywords: *ABL, Wind, Force, Building, Simulation, Experiment*

ABSTRAK

Pengaruh kekuatan angin yang bekerja pada gedung tinggi sangat penting untuk dipahami berkaitan dengan desain dan analisis bangunan tinggi. Hal ini diperlukan agar bangunan yang dirancang dapat memenuhi kriteria aman. Pengaruh angin dalam hal ini dipengaruhi oleh profil kecepatan angin yang merupakan kurva lengkung yang terletak di batas lapisan. Dalam hal ini lapisan batas biasanya disebut dengan *Atmospheric Boundary Layer* (ABL). ABL adalah bagian dari atmosfer yang berimbas langsung terhadap permukaan bumi. Profil kecepatan aliran pada ABL dapat memiliki gradien landai atau curam tergantung pada karakteristik dari permukaan hulu. ABL dapat diketahui dan direkonstruksi melalui dua metode yaitu eksperimen dan simulasi numerik. Penelitian rekonstruksi ABL dalam makalah ini menggunakan metode eksperimen. Dalam eksperimen atau percobaan, rekonstruksi ABL biasanya dilakukan dengan *try and error*, perlu untuk mengetahui kecenderungan parameter ABL untuk membuatnya lebih mudah dan lebih efektif dalam membangun ABL. Kata kunci: *ABL, Angin, Gaya, Bangunan, Simulasi, Eksperimen*

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengaruh angin terhadap gaya-gaya yang bekerja pada bangunan tinggi

merupakan hal yang penting untuk dianalisis dalam perancangan sebuah bangunan tinggi. Hal ini diperlukan agar bangunan yang dirancang bisa

memenuhi kriteria aman. Pengaruh angin dalam hal ini dipengaruhi oleh profil kecepatan angin yang merupakan daerah aliran yang berada di dalam lapisan batas. Lapisan batas pada kasus ini biasa disebut dengan *Atmospheric Boundary Layer*.

Atmospheric Boundary Layer adalah bagian dari atmosfer yang langsung berpengaruh terhadap permukaan bumi. Profil kecepatan aliran pada *Atmospheric Boundary Layer* bisa memiliki gradien yang landai maupun curam bergantung pada karakteristik permukaan *upstream*.

Atmospheric Boundary Layer (ABL) bisa direkonstruksi melalui dua metode, yaitu Eksperimen dan Simulasi Numerik. Penelitian rekonstruksi ABL dalam makalah ini menggunakan metode eksperimen. Dalam Eksperimen, rekonstruksi ABL biasanya dilakukan dengan *try and error*, perlu adanya panduan kecenderungan dari parameter-parameter ABL untuk mempermudah dan lebih efektif dalam merekonstruksi ABL.

1.2 Tujuan

Ada pendefinisian yang perlu diketahui terlebih dahulu sebelum mengidentifikasi tujuan penelitian yakni yang dimaksud dengan elemen kekasaran. Elemen kekasaran adalah elemen yang menggantikan kekasaran permukaan yang terbuat dari kotak persegi dengan ukuran dan ketinggian yang akan diatur untuk memperoleh ABL yang diharapkan.

Selanjutnya tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

Mengidentifikasi kecenderungan pengaruh kecepatan, kerapatan elemen kekasaran, dan tinggi elemen kekasaran terhadap parameter ABL koefisien pangkat α .

Mengidentifikasi kecenderungan pengaruh kecepatan, kerapatan elemen kekasaran, dan tinggi elemen kekasaran

terhadap parameter-parameter ABL tebal lapisan batas δ .

2 METODE

ABL mempunyai profil kecepatan yang unik sesuai dengan posisi geografis dari lokasi yang direkonstruksi. Metode rekonstruksi adalah dengan metode eksperimen di terowongan angin dengan menguji sampel dengan kerapatan elemen kekasaran dan tinggi elemen kekasaran di terowongan.

3 TEORI DASAR

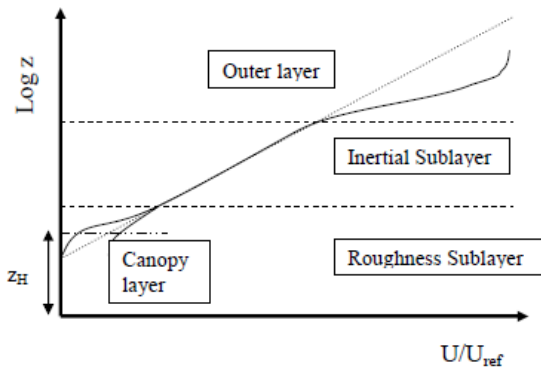
Pada bab ini akan dijelaskan mengenai teori-teori yang menjadi landasan dalam eksperimen. Berturut-turut akan dipaparkan teori mengenai aliran melalui permukaan kasar, *morphometric methods* dan *wind tunnel theory*.

3.1 Aliran Melalui Permukaan Kasar

Perlu diketahui tentang struktur aliran yang melalui *rough surface*. *Shear stress* pada aliran yang melalui permukaan kasar didominasi oleh *drag* elemen kekasaran, berbeda dengan pada aliran *smooth* yang didominasi oleh viskositas (Raupach et al., 1991) [Benson, J., 2005]. Struktur aliran yang melalui permukaan kasar dapat dilihat pada Gambar 3-1, biasanya diidentifikasi melalui lapisan-lapisan berikut,

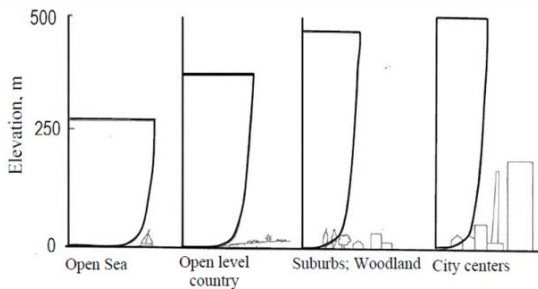
- a. *Roughness Sublayer* (RS) dimana kecepatan tidak homogen secara horizontal sebagaimana aliran dipengaruhi oleh elemen kekasaran,
- b. *Inertial Sublayer* (IS) dimana aliran homogen secara horizontal dan aliran hanya bervariasi tergantung tinggi (z).

Ketebalan RS tergantung dari geometri permukaan yang biasanya 2 sampai 5 kali tinggi elemen kekasaran (Cheng and Castro, 2002) [Benson, J., 2005]. Di dalam RS terdapat *canopy layer* yang memiliki tebal di bawah RS, dimana aliran tidak homogen terhadap *space*.



Gambar 3-1: Ilustrasi *Inertial Sublayer* dan *Roughness Sublayer* [Benson, J., 2005]

Profil tegangan geser pada RS juga tidak homogen secara horizontal, namun di IS tegangan geser diperkirakan konstan terhadap tinggi dan homogen secara horizontal.



Gambar 3-2: *Mean wind velocity* di dalam *boundary layer* pada beberapa *terrain*. [_____, Simulation of Natural Wind in Wind Tunnel]

Power Law [Simiu, E., Scanlan, R.H., 1996] pada profil kecepatan dinyatakan,

$$\frac{U(z)}{G} = \left(\frac{z}{\delta}\right)^\alpha \quad (3-1)$$

dengan,

- U(z) : kecepatan pada ketinggian z,
- G : kecepatan pada ketinggian z=δ,
- Δ : tebal lapisan batas,
- α : *power law exponent*.

Adapun *Logarithmic Law* [Simiu, E., Scanlan, R.H., 1996] mengikuti persamaan,

$$\frac{U(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3-2)$$

dengan,

- U(z) : kecepatan rata-rata pada ketinggian z,
- u*≡√(τ₀/ρ) : *shear velocity*

- z₀ : *roughness length* (sangat kecil),
- κ : konstanta von Karman ≅ 0.4.

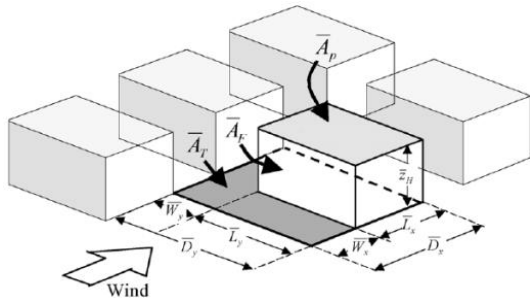
Pada penelitian ini profil kecepatan menggunakan *Power Law* dengan parameter koefisien pangkat α dan tebal lapisan batas δ. Dibawah ini contoh dari *wind code* yang digunakan oleh Taiwan yang dapat dilihat pada Tabel 3-1.

Tabel 3-1: KATEGORI EKSPOSURE DARI TAIWAN WIND CODE. [Jing-Jong Jang, et al, 2009]

<i>Exposure Categories</i>	<i>Character of Exposure</i>	α	Z _g (m)
<i>Exposure A</i>	<i>Large city centers with at least 50% of the buildings having a height in excess of 20 m.</i>	0.32	500
<i>Exposure B</i>	<i>Urban and suburban areas, or other terrain with numerous closely spaced obstructions having the size of single family dwellings or larger.</i>	0.25	400
<i>Exposure C</i>	<i>Open terrain with scattered obstructions having heights generally less than 10 m. This category includes flat open country and grasslands.</i>	0.15	300

3.2 Morphometric Methods

Gaya hambat permukaan tergantung dari bentuk dan ukuran elemen kekasaran, yang diformulasikan dengan variabel Z₀ (*roughness length*, dimana U=0) dan d (*displacement height*). *Morphometric method* mengkaitkan tinggi elemen kekasaran dengan nilai Z₀ dan d Grimmond and Oke (1999), Macdonald et al. (1998) [Simiu, E., Scanlan, R.H., 1996].



Gambar 3-3: Idealisasi dimensi *morphometric surface roughness*. [Benson, J., 2005]

Metode ini mengacu pada geometri yang ditunjukkan pada Gambar 3-3. Metode ini memperkenalkan tiga variabel,

- Height based (Tinggi elemen), H
- Height dan *plan area fraction*

$$\lambda_p = A_p/A_T \tag{3-3}$$

- Height dan *frontal area index*

$$\lambda_f = A_f/A_T \tag{3-4}$$

Untuk menghitung z_0 and d Counihan (1971) memberikan persamaan berikut:

$$z_0 = (1.08\lambda_p - 0.08)H \tag{3-5}$$

$$d = (1.4352\lambda_p - 0.0463)H \tag{3-6}$$

Counihan (1971) membatasi persamaan ini pada $\lambda_p < 0.25$

3.3 Wind Tunnel Theory

Penggunaan *wind tunnel* untuk studi dibutuhkan untuk penyederhanaan kompleksitas *real life roughness* menjadi elemen kekasaran yang berupa balok-balok kecil. Selain itu, penggunaan *wind tunnel* juga bagus untuk studi struktur lapisan batas yang membutuhkan perubahan ketinggian elemen kekasaran secara mudah. Eksperimen pada skala penuh sangat sulit dilakukan dan membutuhkan alat ukur yang tinggi yang menghabiskan biaya yang besar. Adapun di *wind tunnel* bisa dengan mudah mengatur elemen kekasaran sesuai dengan studi. Akan tetapi, eksperimen di *wind tunnel* harus

menghasilkan data yang karakteristiknya sesuai dengan ABL yang sesungguhnya.

Profil kecepatan harus diukur pada ujung *upstream* dan *downstream* diperbandingkan. Hal ini dilakukan karena lapisan batas yang dihasilkan pada *wind tunnel* harus *equilibrium* dengan permukaan, profil kecepatan dan karakteristik turbulen tidak boleh berubah secara signifikan terhadap *fetch*.

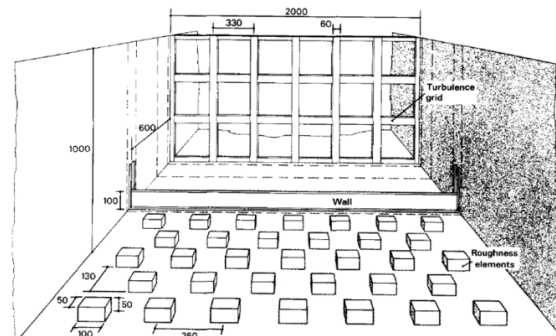
Jika elemen kekasaran terlalu besar maka aliran akan mengalami penambahan tekanan atau memiliki *pressure gradient* yang tidak nol akibat dinding *wind tunnel*, dan mengakibatkan akselerasi aliran yang terkena *blockage*. *Blockage coefficient* didefinisikan sebagai,

$$\Phi = A_{proj}/A_{wt} \tag{3-7}$$

Dimana, A_{proj} adalah luas dari *obstacle* yang diproyeksikan terhadap *cross section wind tunnel* A_{wt} adalah luas *cross section wind tunnel cross-sectional area*. Batasan yang ditentukan oleh VDI (2000) adalah $\Phi \leq 5\%$.

4 INSTALASI EKSPERIMEN

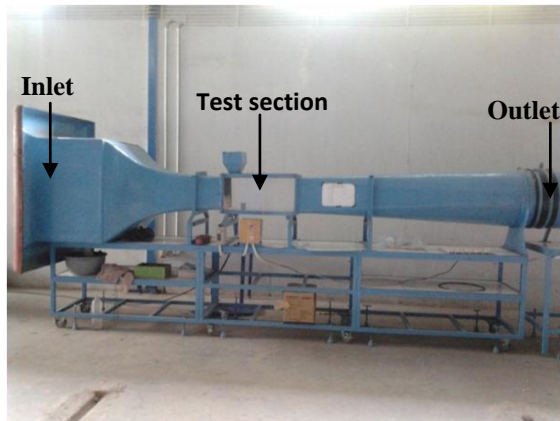
Pada bab ini akan disajikan tentang langkah-langkah atau prosedur eksperimen, yang meliputi pembahasan *wind tunnel*, model, dan alat ukur yang digunakan. Berikut ini adalah beberapa konfigurasi eksperimen yang telah dilakukan oleh Cook [Cook, N.J., 1978], NUS [____, Simulation of Natural Wind in Wind Tunnel], dan Kozmar [Kozmar, H., 2011].



Gambar 4-1: Konfigurasi Eksperimen yang dilakukan oleh Cook. [Cook, N.J., 1978]

4.1 Wind Tunnel

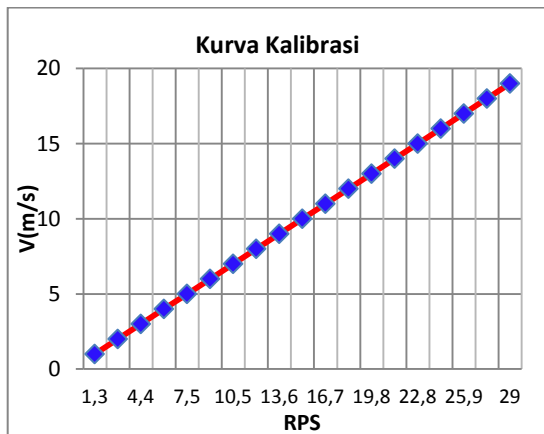
Wind Tunnel yang digunakan dalam eksperimen ini adalah Sand Erosion Wind Tunnel – LAGG dengan ukuran seksi uji 300 mm x 300 mm x 675 mm dengan tipe open wind tunnel (Gambar 4-2 dan 4-3), memiliki RPS controller untuk mengatur kecepatan aliran dengan mengatur putaran fan. Kalibrasi kecepatan dengan RPS dapat dilihat di Gambar 4-4.



Gambar 4-2: Sand Erosion Wind Tunnel UPT-LAGG BPPT



Gambar 4-3: Seksi Uji Sand Erosion Wind Tunnel UPT-LAGG BPPT



Gambar 4-4: Grafik Kalibrasi Sand Erosion Wind Tunnel UPT-LAGG BPPT

4.2 Model

Elemen-elemen kekasaran yang digunakan adalah balok-balok kayu balsa yang ditempelkan pada board sesuai dengan kerapatan. Kerapatan roughness di definisikan sebagai,

$$\lambda = \lambda_p = A_p / A_T \tag{3-8}$$

Dengan A_p adalah luas proyeksi balok terhadap board, A_T adalah luas daerah yang di sekitar balok (lihat Gambar 3-3 pada bab 3).

Pada eksperimen ini digunakan spire (turbulence generator) dengan tipe Irwin yang berbentuk segitiga dengan penyangga (Gambar 4-5). Dengan $h=125$ mm, $b=20$ mm, $l=30$ mm (tipe Irwin [Simiu, E., Scanlan, R.H., 1996]).

Nilai-nilai di atas dihitung berdasarkan persamaan 7.2.1 pada textbook Simiu dan Scanlan [Simiu, E., Scanlan, R.H., 1996],

Dengan mengasumsikan

$$\delta = 10 \text{ cm} = 0.1 \text{ m}, \alpha = 0.21.$$

Dari asumsi di atas maka,

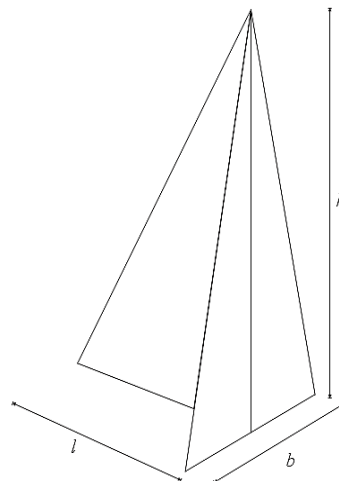
$$h = \frac{1.39\delta}{1 + \frac{\alpha}{2}}$$

$$h = \frac{0.139}{1 + \frac{0.105}{2}} \text{ m} = 0.125 \text{ m} = 125 \text{ mm}$$

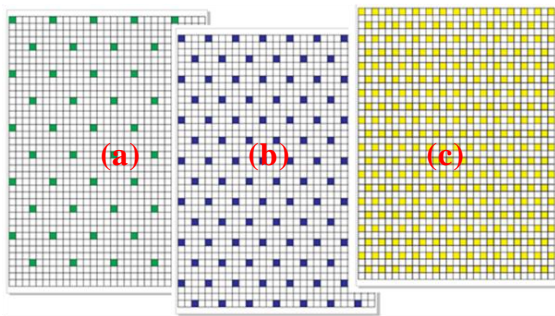
$$l = \frac{h}{4} = \frac{125}{4} \text{ mm} \cong 30 \text{ mm}$$

$$b = 0.14h = 0.14 \times 125 \text{ mm} \cong 20 \text{ mm}$$

Perhatikan Gambar 4-5 adalah rancangan spire yang digunakan sebagai turbulence generator.



Gambar 4-5: Spire (turbulence generator)



Gambar 4-6: Board dengan lambda yang berbeda. lambda (a) 0.04, (b) 0.08, dan (c) 0.25



Gambar 4-7: Elemen kekasaran yang dipasang di Sand Erosion Wind Tunnel

4.3 Alat Ukur

Instrumen yang digunakan sebagai alat ukur adalah AIRFLOW TA460 dengan PROBE 486 yang bisa mengukur *mean velocity*. Alat ukur diletakan sejauh 60 mm dari ujung *roughness board* ke arah *downstream* (Gambar 4-8).



Gambar 4-8: Alat ukur terpasang di Wind Tunnel

Pengukuran dilakukan dengan urutan sebagai berikut,

- $U_{\infty}=9\text{m/s}, H=0, \lambda=0$
- $U_{\infty}=6\text{m/s}, H=10\text{mm}, \lambda=0.25$
- $U_{\infty}=9\text{m/s}, H=10\text{mm}, \lambda=0.25$
- $U_{\infty}=12\text{m/s}, H=10\text{mm}, \lambda=0.25$
- $U_{\infty}=9\text{m/s}, H=10\text{mm}, \lambda=0.04$
- $U_{\infty}=9\text{m/s}, H=10\text{mm}, \lambda=0.08$
- $U_{\infty}=9\text{m/s}, H=20\text{mm}, \lambda=0.04$
- $U_{\infty}=9\text{m/s}, H=30\text{mm}, \lambda=0.04$

Dengan U_{∞} kecepatan aliran *free stream*, H tinggi elemen kekasaran, λ kerapatan antar elemen kekasaran.

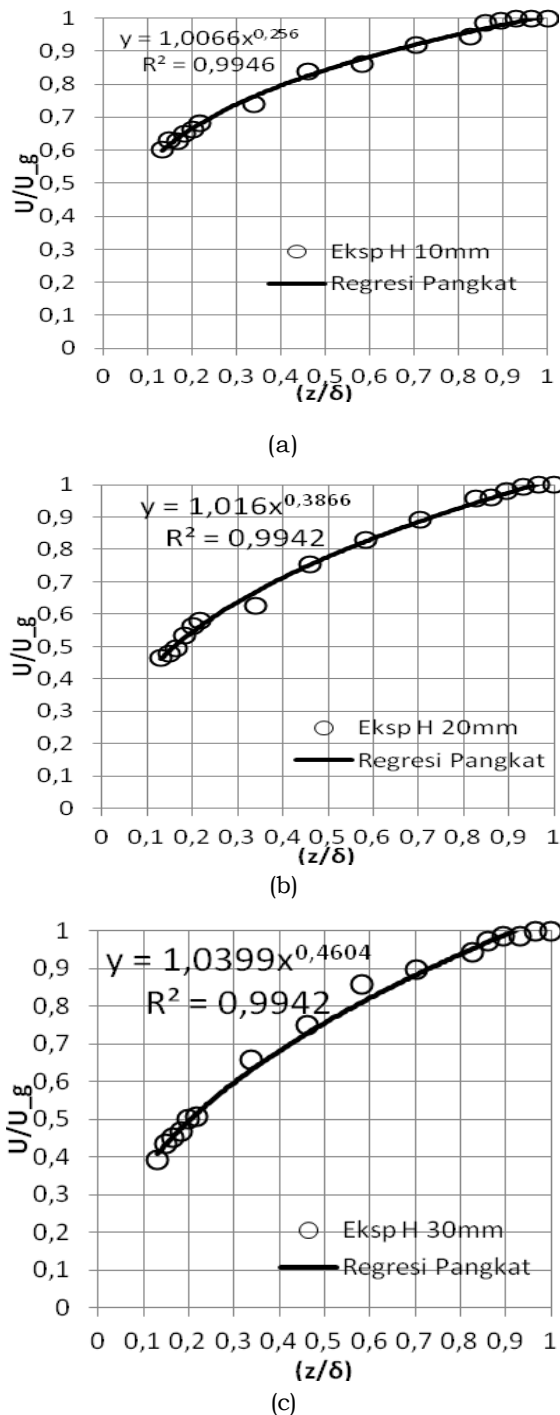
5 HASIL EKSPERIMEN DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini disajikan hasil-hasil eksperimen pada studi parameter pengaruh *roughness* terhadap lapisan batas menggunakan *Sand Erosion Wind Tunnel* LAGG-BPPT 30 cm x 30 cm x 67.5 cm, yaitu hasil eksperimen dengan variasi kecepatan aliran *freestream*, variasi tinggi elemen kekasaran, serta variasi kerapatan elemen kekasaran.

5.1 Pengaruh Kecepatan Aliran *Free stream* terhadap Parameter α Profil Kecepatan Lapisan Batas

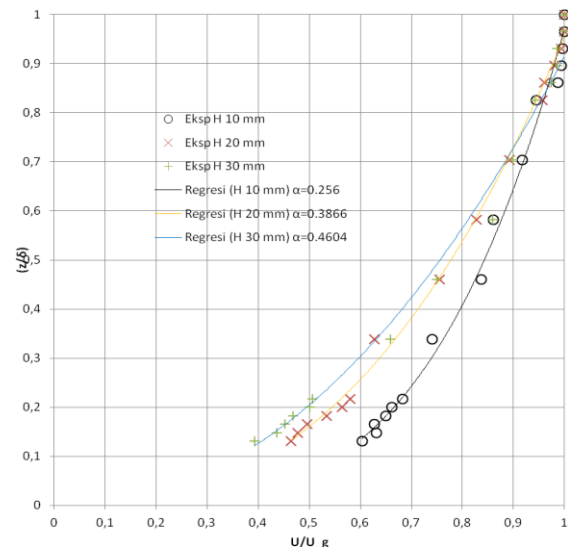
Studi parameter pertama yang dilakukan pada eksperimen ini adalah perubahan profil kecepatan lapisan batas terhadap perubahan kecepatan aliran *freestream*. Fokus pada eksperimen ini adalah memvariasikan kecepatan aliran *freestream* pada 6 m/s, 9 m/s, dan 12 m/s dengan tinggi dan kerapatan elemen kekasaran pada nilai yang tetap yaitu 10 mm dan 0.25. Gambar 5-1 menunjukkan profil kecepatan fungsi terhadap ketinggian yang didekati dengan *power regression* sehingga didapat parameter α untuk masing-masing kecepatan aliran *freestream* dimana z adalah ketinggian diukur dari *wall*, δ adalah tebal lapisan batas, U adalah kecepatan di dalam lapisan batas yang merupakan fungsi dari z, U_g adalah U saat $z=\delta$. Data

kecepatan diukur pada jarak 180 mm dari ujung *downstream* elemen kekasaran. Data kecepatan hanya bisa diukur mulai dari 15 mm dari *wall*, hal ini diakibatkan oleh alat ukur yang digunakan memiliki lubang probe yang letaknya 15 mm dari ujung, oleh karena itu data kecepatan pada $z=0$ tidak ada dalam grafik.



Gambar 5-1: Profil kecepatan pada Λ 0.04, $U_{freestream}$ 9 m/s, H (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm

Dari Gambar 5-2, profil kecepatan lapisan batas dari ketiga kecepatan aliran *freestream* tidak berbeda secara signifikan. Dari U_{∞} 6 m/s ke 9 m/s nilai α turun, namun dari 9 m/s ke 12 m/s nilai α hampir tidak berubah (Tabel 5-1). Hal ini terjadi karena lapisan batas yang terjadi disini adalah lapisan batas turbulen yang *chaotic* penuh dengan *eddy* [Pope, S.B., 2000] yang juga berkontribusi membentuk profil kecepatan pada lapisan batas, berbeda dengan lapisan batas laminar yang profil kecepatan pada lapisan batas hanya dipengaruhi viskositas yang merupakan fungsi dari kecepatan aliran *freestream*. Kecepatan *freestream* ini mempengaruhi bilangan Reynold, dan viskositas dipengaruhi oleh bilangan ini. Profil kecepatan pada lapisan batas turbulen juga dipengaruhi oleh viskositas, namun pada lapisan batas turbulen ada *eddy* yang membuat profil kecepatannya berbeda dengan lapisan batas laminar.



Gambar 5-2: Perbandingan profil kecepatan dengan ketinggian obstacle H 10, 20, 30 mm

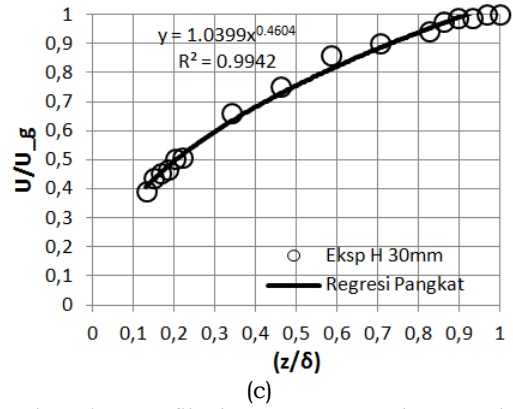
Tabel 5-1: NILAI KOEFISIEN A UNTUK $U_{FREESTREAM}$ 6, 9, 12 m/s

$U_{freestream}$	A
6 m/s	0.3645
9 m/s	0.3222
12 m/s	0.3261

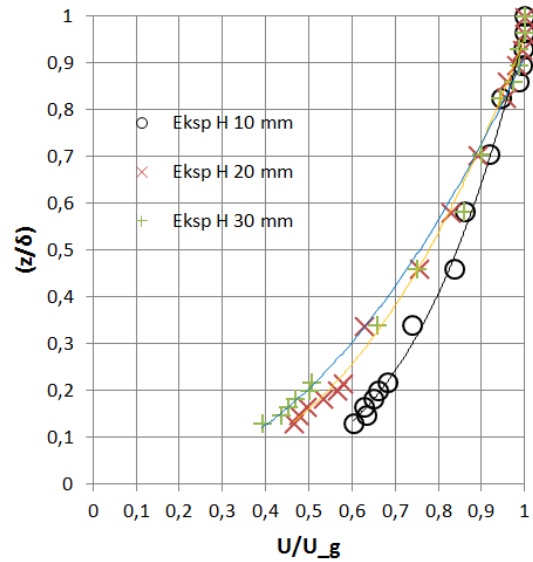
5.2 Pengaruh Tinggi Elemen kekasaran terhadap Parameter α Profil Kecepatan Lapisan Batas

Bidang *roughness* terdiri atas elemen-elemen yang memiliki ketinggian yang seragam pada eksperimen ini. Parameter berikutnya yang dicari pengaruhnya terhadap koefisien α adalah tinggi elemen kekasaran yang disimbolkan dengan H. Gambar 5-3 (a), (b) dan (c) menunjukkan tiga profil kecepatan untuk H 10 mm, 20 mm, dan 30 mm. Dari grafik tersebut memperlihatkan *power regression* untuk mencari nilai koefisien α masing-masing. Nilai R^2 untuk ketiga grafik semuanya lebih dari 0.99 yang artinya regresi cukup baik mendekati distribusi data.

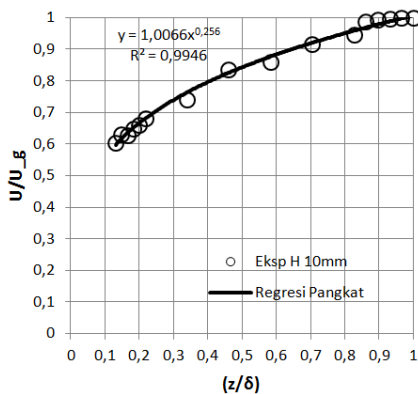
Gambar 5-4 menunjukkan perbedaan signifikan dan teratur pada profil kecepatan pada ketiga variasi H. Dari Tabel 5-2, terlihat bahwa kenaikan nilai H juga mempengaruhi kenaikan nilai koefisien α . Hal ini memberikan arti bahwa untuk membuat simulasi ABL daerah perkotaan di *Wind Tunnel*, diperlukan tinggi elemen kekasaran yang lebih tinggi dari simulasi ABL *open terrain*.



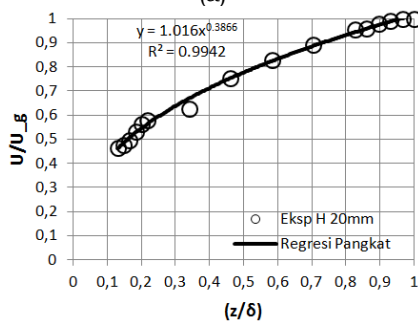
Gambar 5-3: Profil kecepatan pada Lambda 0.04, $U_{freestream}$ 9 m/s, H (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm



Gambar 5-4: Perbandingan Profil Kecepatan pada ketinggian *obstacle* H 10, 20, 30 mm



(a)



(b)

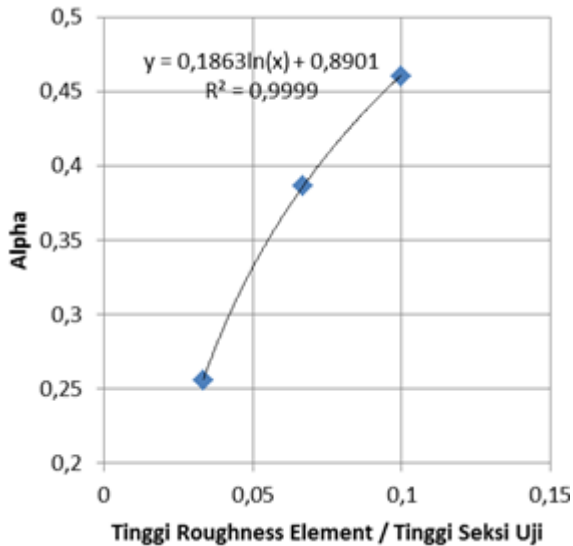
Tabel 5-2: NILAI KOEFISIEN α UNTUK KETINGGIAN OBSTACLE H 10, 20, 30 MM

Ketinggian <i>obstacle</i> H	α
10 mm	0.2560
20 mm	0.3866
30 mm	0.4604

Dari Gambar 5-5 terlihat bahwa hubungan α dan (Tinggi elemen kekasaran/Tinggi seksi uji) dari hasil *logarithmic regression* adalah

$$\alpha^* = 0.1863 \ln \frac{H}{L} + 0.8901 \quad (5-1)$$

Dengan L adalah tinggi seksi uji, H adalah tinggi *roughness* elemen, α^* adalah koefisien pangkat hasil regresi.



Gambar 5-5: Trendline perubahan alpha terhadap tinggi roughness yang dinormalisasi

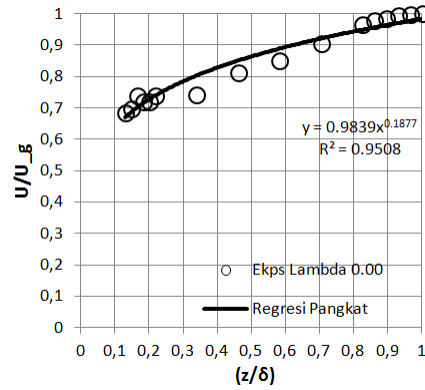
Tabel 5-3: PERBANDINGAN NILAI ALPHA HASIL PENGUKURAN DENGAN NILAI ALPHA HASIL REGRESI

Tinggi	α	α^*	Error
0.03	0.256	0.25646	0.2 %
0.07	0.387	0.38559	0.3 %
0.1	0.460	0.46112	0.2 %

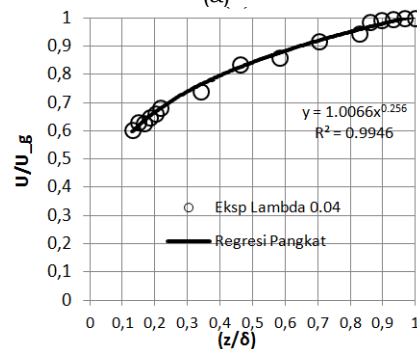
5.3 Pengaruh Kerapatan Elemen Kekasaran terhadap Parameter α Profil Kecepatan Lapisan Batas

Selain tinggi elemen kekasaran, parameter lain dari kekasaran adalah kerapatan elemen. Definisi kerapatan (λ) telah diulas pada bab sebelumnya. Gambar 5-6 menunjukkan empat variasi λ ; yaitu $\lambda=0$, $\lambda=0.04$, $\lambda=0.08$, dan $\lambda=0.25$ dengan nilai koefisien pangkat α masing-masing dari *power regression*. Sama seperti tinggi elemen kekasaran, kerapatan elemen kekasaran juga berbanding lurus dengan nilai koefisien α (Gambar 5-6 dan Tabel 5-4). Kombinasi dari kerapatan dan tinggi elemen bisa dijadikan parameter untuk mensimulasikan ABL di *Wind Tunnel* dengan baik. Lapisan batas turbulen memiliki aliran yang *chaotic* dengan kecepatan yang fluktuatif untuk setiap *point eulerian*. Dengan adanya elemen kekasaran yang tinggi dan cukup rapat, *eddy* akan semakin banyak terbentuk

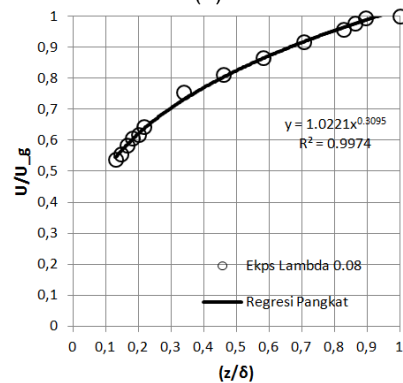
menambah energi kinetik pada aliran turbulen. Dan hal inilah yang terjadi pada angin yang melalui daerah perkotaan.



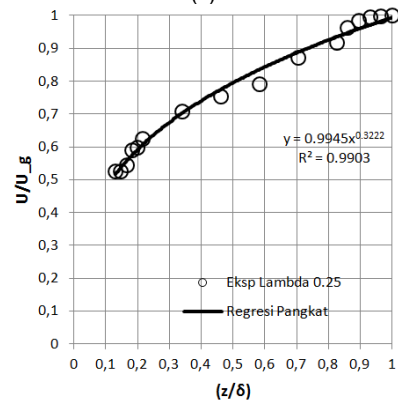
(a)



(b)



(c)

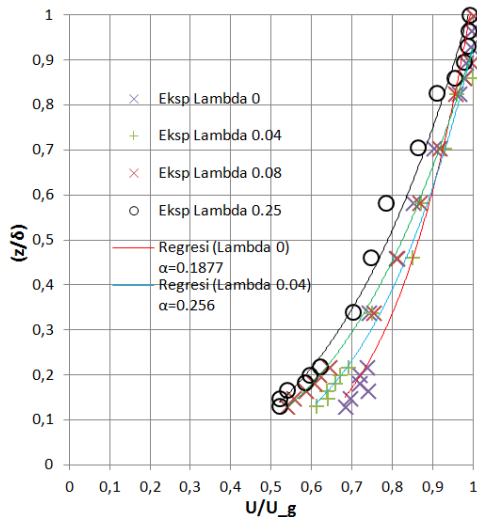


(d)

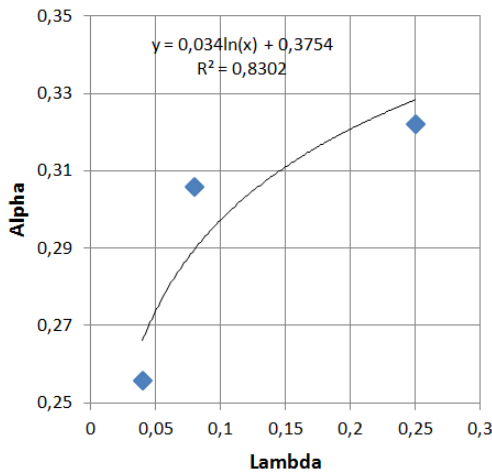
Gambar 5-6: Profil Kecepatan pada $U_{freestream}$ 9 m/s, H 30 mm, Lambda (a) 0, (b) 0.04, (c) 0.08, (d) 0.25

Tabel 5-4: NILAI KOEFISIEN ALPHA UNTUK LAMBDA 0, 0.04, 0.08, 0.25

Kerapatan obstacle	α
0	0.1877
0.04	0.256
0.08	0.3059
0.25	0.3222



Gambar 5-7: Perbandingan profil kecepatan pada Lambda 0, 0.04, 0.08, 0.25



Gambar 5-8: Trendline perubahan alpha terhadap lambda

Tabel 5-5: PERSENTASI KENAIKAN ALPHA TERHADAP KENAIKAN LAMBDA

lambda	α	Δ lambda	$\Delta \alpha$
0.04	0.256	-50%	-16%
0.08	0.306	Referensi	Referensi
0.25	0.322	+213%	+5%

Dari Gambar 5-8 terlihat bahwa hubungan α dan λ dari hasil *logarithmic regression* adalah

$$\alpha^* = 0.034 \ln \lambda + 0.3754 \quad (5-2)$$

Dengan α^* adalah koefisien pangkat hasil regresi.

Tabel 5-6: PERBANDINGAN NILAI ALPHA HASIL PENGUKURAN DENGAN NILAI ALPHA HASIL REGRESI

Lambda	α	α^*	Error
0.04	0.256	0.2656	3.7 %
0.08	0.306	0.2891	5.5 %
0.25	0.322	0.3279	1.8 %

5.4 Pengaruh Kecepatan Aliran *Free-Stream*, Tinggi *Roughness*, Kerapatan *Roughness* Terhadap δ Tebal Lapisan Batas

Dari hasil eksperimen menunjukkan bahwa tebal lapisan batas tidak terlalu dipengaruhi secara signifikan oleh kecepatan *freestream* maupun *roughness*. Tebal lapisan batas pada semua percobaan adalah ± 11.5 cm. Tebal lapisan batas diduga lebih dipengaruhi oleh tinggi *spire*, namun perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai pengaruh *spire* terhadap profil lapisan batas.

6 KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini penulis menyajikan kesimpulan dari hasil studi parameter dan saran untuk pengerjaan lebih lanjut.

6.1 Kesimpulan

Dalam simulasi *Wind Tunnel* ini dilakukan studi tentang pengaruh parameter kecepatan aliran *freestream*, tinggi elemen kekasaran, dan kerapatan elemen kekasaran terhadap nilai koefisien α yang merepresentasikan profil kecepatan lapisan batas berdasarkan *power law*. Dari hasil eksperimen ini penulis mengambil konklusi sebagai berikut,

- Perubahan kecepatan aliran *freestream* tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai α pada profil kecepatan lapisan batas.
- Penambahan ketinggian pada elemen kekasaran memberikan dampak

penambahan nilai koefisien α . Semakin tinggi elemen kekasaran pada simulasi *wind tunnel*, lapisan batas yang terjadi semakin menyerupai ABL pada daerah *Urban*. Begitupun sebaliknya, akan menyerupai ABL pada daerah *Rural*.

- Sama seperti ketinggian elemen kekasaran, kerapatan elemen kekasaran juga berbanding lurus dengan nilai koefisien α .
- Kecepatan *freestream* dan *roughness* tidak terlalu berpengaruh pada δ untuk tinggi *spire* yang konstan.

6.2 Saran

Eksperimen ini perlu *improvement* beberapa hal agar pengaruh-pengaruh parameter yang lain bisa diketahui untuk bahan pertimbangan desain simulasi ABL yang baik di *Wind Tunnel*. Hal-hal yang menjadi saran untuk pengembangan selanjutnya adalah sebagai berikut,

- Mengukur *turbulent intensity* pada lapisan batas, agar bisa diketahui data fluktuasi kecepatan.
- Melakukan studi parametrik pada *turbulent generator* atau *spire*, untuk melihat pengaruhnya terhadap koefisien α .
- Membuat *Wind Tunnel* khusus ABL, dengan elemen kekasaran yang bisa diatur dengan otomatis.

DAFTAR RUJUKAN

- _____, Simulation of Natural Wind in *Wind Tunnel*, The National University of Singapore.
- Benson, J., 2005. *Boundary-Layer Response to a Change in Surface Roughness*, Master Thesis, The University of Reading.
- Cook, N. J., 1978, *Wind-Tunnel Simulations of the Adiabatic Atmospheric Boundary Layer by Roughness, Barrier, and Mixing-Device Methods*, Journal of Industrial Aerodynamics, 157-176.
- Jing-Jong Jang, et al, 2009. *A Study of Wind Speed Profile of Taiwan Area*, The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering.
- Kozmar, H., 2011. *Truncated Vortex Generators for Part-Depth Wind-Tunnel Simulations of the Atmospheric Boundary Layer Flow*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 130-136.
- Pope, S. B., 2000, *Turbulent Flows*, Cambridge University Press.
- Sachs, P., 1988. *Wind Forces in Engineering*, 2nd Edition, Pergamon Press.
- Simiu, E., Scanlan, R.H., 1996. *Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design*, John Willey and Sons, Inc.

