

ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN KECEPATAN UDARA PADA SALURAN PENAMPANG PERSEGI

Chandra Bhuana¹⁾

Abstract: The study is aimed at finding out the influence of hydraulic radius to equivalent length of fully developed flow; and identifying the characteristics of boundary layer 'development' when it reaches the fully developed area as a result of hydraulic radius-changes. The hydraulic radius of each was made different, but their height was the same; i.e. 200 mm. The first wind tunnel's width was 270 mm, the second was 320 mm, and the other one was 400 mm. The results reveal that there has been a correlation between the thickness of boundary layer, the length of wind tunnel, and Reynolds figures, that is, $\delta/x = 2.1525/Re^{0.3254}$, and the correlation between equivalent length and fully developed area was obtained by $Le/Dh=3.10 Re^{1/6}$. This suggests that the Blausius formula can be applied to determining an equivalent of fully developed area in squared-surface wind tunnels, but the constant changed from 4.4 to. 3.10.

Keywords: Fluid flow, Hydraulic radius, and Wind tunnel.

I. PENDAHULUAN

Suatu fluida yang mengalir, baik secara internal maupun eksternal, akan membentuk lapisan batas pada daerah hulu aliran. Lapisan batas terjadi karena pada saat aliran fluida tepat di tepi depan suatu benda, terbentuk tegangan geser yang besar yang disebabkan oleh hambatan geser *viscous* terhadap partikel fluida.

Konsep lapisan batas pertama kali dikemukakan oleh Prandtl pada tahun 1904. Kemudian, pada tahun 1908 Blausius merumuskan hubungan antara tebal lapisan batas dengan jarak dari daerah sisi masuk aliran. Hingga saat ini analisis dan pengujian fenomena lapisan batas pada suatu aliran semakin berkembang. Khusus pengujian lapisan pada berbagai bentuk benda banyak dilakukan dalam *wind tunnel*. Untuk pengujian lapisan batas dalam *wind tunnel* dibutuhkan kondisi ideal agar diperoleh akurasi pengukuran yang tinggi. Kondisi ideal pengujian adalah kondisi dalam keadaan aliran udara telah berkembang penuh. Oleh karena itu, jika dilakukan pengujian aliran dalam *wind tunnel*, pada daerah sisi masuk

¹ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang

fluida harus dipasang pengarah aliran berupa nosel atau *difuser*. *Difuser* ini berfungsi mempercepat terbentuknya aliran berkembang penuh dalam saluran. Di samping itu, bentuk dan panjang saluran juga berpengaruh terhadap karakteristik lapisan batas dan daerah aliran berkembang penuh (Streeter, 1985). Menurut Schlichting (1979), pada *wind tunnel* berpenampang bundar untuk aliran laminar terdapat korelasi yang sangat jelas antara besar bilangan Reynolds, diameter saluran, dan panjang masuk hingga terbentuknya aliran berkembang penuh (*entry length*), Le . Demikian pula halnya terhadap aliran turbulen, hanya saja pada aliran ini daerah lapisan batasnya akan meluas lebih cepat sehingga panjang ekuivalen relatif lebih pendek dibandingkan dengan aliran laminar.

White, F.M. (1991), menyatakan bahwa untuk terbentuknya daerah aliran berkembang penuh pada penampang bundar, hubungan tersebut di atas dalam bentuk korelasi seperti persamaan (1) dan (2) berikut ini.

untuk aliran laminar,

$$\frac{Le}{d} \approx 0,06 Re \quad \dots\dots\dots (1)$$

untuk aliran turbulen,

$$\frac{Le}{d} \approx 4,4 Re^{1/6} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Berdasarkan kenyataan di atas, pertanyaan kemudian muncul ialah apakah korelasi tersebut dapat juga digunakan pada aliran fluida dalam *wind tunnel* yang berpenampang segi empat, atau apakah juga akan memberikan bentuk korelasi yang jelas antara panjang masuk, jari-jari hidraulik, besar bilangan Reynolds, serta pengaruh perubahan jari-jari hidraulik *wind tunnel* terhadap panjang masuk daerah lapisan batas sampai terbentuknya aliran berkembang penuh.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini dititik beratkan pada masalah yaitu: bagaimana karakteristik pertumbuhan lapisan batas sampai aliran mencapai daerah aliran berkembang penuh akibat perubahan jari-jari hidraulik?, dan bagaimana pengaruh jari-jari hidraulik terhadap panjang masuk sampai terbentuknya daerah aliran berkembang penuh?.

Penelitian ini bertujuan menentukan karakteristik pertumbuhan lapisan batas pada daerah aliran berkembang penuh dan pengaruh jari-jari hidraulik terhadap panjang masuk sampai terbentuknya aliran berkembang penuh. Penelitian ini dilakukan hanya pada daerah aliran turbulen. Benda uji berupa *wind tunnel* dibuat sebanyak tiga buah dengan jari-jari hidraulik yang berbeda, yaitu 0,058 m, 0,062 m, dan 0,067 m. Setiap benda uji diberi perlakuan variasi kecepatan udara sebanyak empat tingkat. Sifat fisik udara diambil dari buku acuan, berdasarkan temperatur dan tekanan udara di dalam laboratorium.

II. METODE PENELITIAN

Variabel penelitian yang digunakan yaitu tiga variasi perubahan jari-jari hidraulik dan empat tingkat kecepatan aliran fluida. Desain penelitian yang dimaksud ialah strategi perolehan data dalam penelitian, yaitu berupa penentuan variabel penelitian, penentuan jari-jari hidraulik *wind tunnel*, besarnya tebal lapisan batas dan panjang masuk aliran berkembang penuh.

Variabel penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

a. Jari-jari hidraulik (R_h)

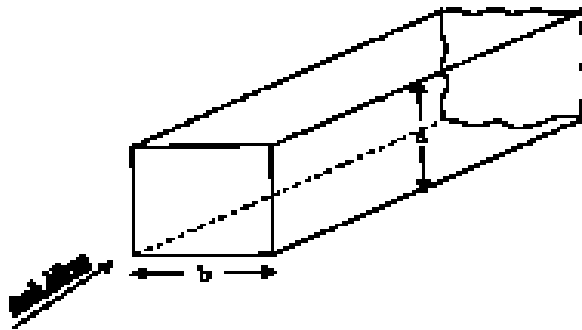
Variabel jari-jari hidraulik (R_h) adalah 0,057 m, 0,062 m, dan 0,067 m. Penentuan besarnya nilai jari-jari hidraulik ini mengacu pada kondisi dimensi peralatan yang digunakan dan secara toeretis dinyatakan bahwa pembuatan *wind tunnel* persegi harus memenuhi kondisi aspek rasio : $1/3 \leq \text{aspek rasio} \leq 3$.

b. Tingkat kecepatan aliran fluida

Variabel tingkat kecepatan aliran fluida sangat ditentukan oleh kondisi bukaan katup sebagai bukaan kondisi penelitian. Hal ini dilakukan karena pada bukaan katup inilah yang memberikan perubahan yang sangat signifikan pada aliran fluida di dalam *wind tunnel* persegi, pada saat pengujian awal, untuk setiap perubahan jari-jari hidraulik *wind tunnel* persegi.

Ukuran benda uji dibuat tiga macam yaitu dengan jari-jari hidraulik yang berbeda dan tinggi serta panjang yang konstan yaitu 200 mm dan 11.000 mm. Jari-jari hidraulik benda uji mempunyai ukuran tinggi dan lebar berikut ini.

Benda uji	Tinggi a (mm)	Lebar b (mm)	R_h (mm)
1	200	270	58
2	200	320	62
3	200	400	67



Gambar 1. Seksi Uji

Aliran Berkembang Penuh Dalam Saluran

A. Aliran Laminar

Aliran laminar didefinisikan sebagai aliran atau fluida yang bergerak dalam lapisan-lapisan atau lamina-lamina, dengan satu lapisan meluncur secara lancar pada lapisan yang bersebelahan, dengan saling tukar momentum secara molekuler.

Kecenderungan ke arah kestabilan dan turbulensi diredam oleh gaya geser viskous yang memberikan tahanan terhadap gerakan relatif lapisan-lapisan fluida yang bersebelahan.

Osborne Reynolds pada tahun 1883 menerbitkan sebuah risalah tentang beberapa eksperimen yang dilakukannya untuk mempelajari aliran dalam pipa kaca . Ia adalah orang pertama yang berhasil menggambarkan dua regim aliran derngan jelas yaitu laminar dan turbulen.

Bilangan Reynolds selalu penting dengan atau tanpa permukaan bebas dan merupakan parameter utama yang mengorelasikan perilaku kekentalan semua fluida Newton, dengan:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Menurut Olson (1993), profil kecepatan untuk aliran laminar dalam sebuah pipa bundar harus memenuhi persamaan (4):

$$u = \frac{1}{4\mu} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) (R^2 - r^2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

sehingga gradien tekanannya dinyatakan menurut aliran laminar sebagai:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{128 \mu Q}{\rho D^4} \quad \dots\dots\dots (5)$$

Ekspresi ini telah dibuktikan melalui eksperimen dan dapat diterapkan pada perhitungan-perhitungan rekayasa, dengan angka Reynolds sampai sekitar 2000.

B. Aliran Turbulen

Pada aliran turbulen dalam sebuah pipa, fluktuasi kecepatan radial menimbulkan pertukaran momentum yang lebih besar antar lapisan fluida yang bersebelahan. Akibatnya, profil kecepatan lebih rata dibandingkan dengan laminar. Karena kecepatan pada dinding pipa sama dengan nol, hal ini menimbulkan gradien kecepatan yang sangat besar pada dinding pipa dengan tegangan geser dinding yang lebih tinggi daripada aliran laminar pada angka Reynolds yang sama. Jika jarak y diukur dalam arah radial dari dinding pipa, garis sumbu pipa pada $Y= R$, $U = U_{\max}$ maka:

$$\frac{U_{\max} - U}{\sqrt{\tau_0 / \rho}} = \frac{U_{\max} - U}{v_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{R}{Y} \dots (6)$$

dengan v_* kecepatan geser. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa $k=0,4$. Konsep Prandtl tidak berlaku pada garis sumbu pipa, dengan perpindahan momentum melintang harus sama dengan nol karena aliran yang simetri atau pada dinding pipa dimana perpindahan momentum didominasi oleh geseran viskous. Daerah dekat dinding ini juga disebut sublapisan viskous. Persamaan (6) juga berlaku untuk bilangan Reynolds yang sangat tinggi.

C. Jari-jari Hidraulik

Untuk saluran yang berpenampang empat persegi, hubungan antara tekanan dengan tegangan geser dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan (7) berikut ini:

$$pA - (p + dp)A + \tau_0 s dx = 0 \dots\dots\dots (7)$$

dengan s adalah perimeter (keliling penampang), sehingga diperoleh:

$$\tau_0 = \frac{A}{s} \frac{\Delta p}{l} \dots\dots\dots (8)$$

dengan l adalah panjang saluran.

Hubungan antara tegangan geser (τ_0) dengan koefisien gesek (f) adalah:

$$\tau_0 = \frac{1}{4} f \frac{1}{2} \rho v^2 \dots\dots\dots (9)$$

Dari persamaan (8) dan (9) diperoleh:

$$\Delta p = f \frac{s}{4} \frac{l}{A} \frac{\rho v^2}{2} \dots\dots\dots (10)$$

Jika jari-jari hidraulik (R_H) = A/s , diperoleh:

$$R_h = f \frac{1}{4\Delta p} \frac{\rho v^2}{2} \dots\dots\dots (11)$$

Untuk saluran empat persegi panjang, jari-jari hidraulik adalah:

$$R_h = \frac{ab}{2(a + b)} \dots\dots\dots (12)$$

dengan a dan b berturut-turut adalah lebar dan tinggi penampang.

Diameter hidraulik untuk saluran persegi adalah:

$$D_h = 4 R_h \dots\dots\dots (13)$$

D. Teori Lapisan Batas

Konsep lapisan batas pertama kali diperkenalkan oleh Prandtl pada tahun 1904. Lapisan batas adalah daerah yang alirannya terhambat yang di dalamnya terkonsentrasi efek-efek viskositas. Lapisan batas menebal sebesar δ dalam arah yang sama dengan arah aliran. Akibatnya, perubahan kecepatan dari nol di permukaan plat hingga U pada jarak δ semakin jauh semakin besar. Tebal lapisan batas δ didefinisikan sebagai jarak suatu titik kontrol di dalam medan aliran terhadap dinding permukaan benda. Pada titik tersebut kecepatan aliran telah mencapai $0,99 U$. Hubungan antara bilangan Reynolds karakteristik Re_x dengan tebal lapisan batas δ oleh Blasius dinyatakan dalam bentuk persamaan:

untuk aliran laminar

$$\frac{\delta}{x} = \frac{5,0}{Re_x^{1/2}} \dots\dots\dots (14)$$

untuk aliran turbulen

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0,370}{Re_x^{1/5}} \dots\dots\dots (15)$$

sedangkan untuk terbentuknya daerah aliran berkembang penuh pada penampang bundar, dikemukakan oleh White F. M., (1994) dalam bentuk korelasi sebagai berikut:

untuk aliran laminar,

$$\frac{Le}{d} \approx 0,06 Re \dots\dots\dots (16)$$

untuk aliran turbulen,

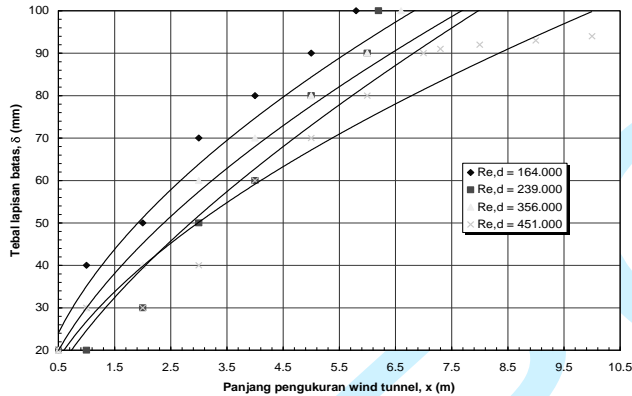
$$\frac{Le}{d} \approx 4,4 Re^{1/6} \dots\dots\dots (17)$$

Pengukuran distribusi head dilakukan pada sepanjang permukaan benda uji (arah horisontal), jarak rata-rata setiap titik 10 cm hingga diperoleh jumlah posisi titik horisontal yang maksimum (titik dimana terdeteksi posisi awal aliran berkembang penuh). Adapun pada arah vertikal dilakukan pengukuran rata-rata sebanyak 10 titik yang jaraknya 10 mm. Untuk hal ini setiap benda uji diberi perlakuan empat tingkat kecepatan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

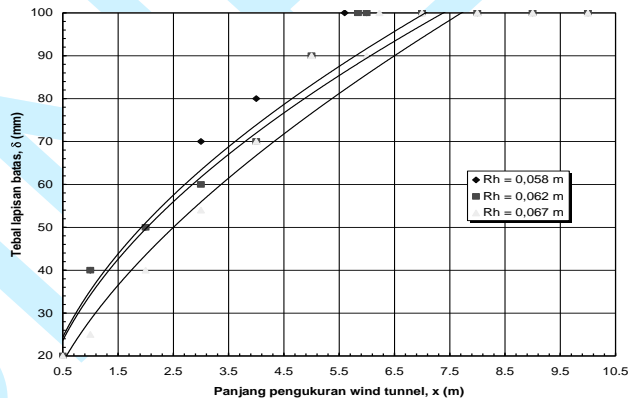
Berikut ini ditampilkan hasil penelitian dalam bentuk grafik dan persamaan regresi serta koefisien korelasinya.

A. Tebal Lapisan Batas sebagai Fungsi Jarak Pengukuran *Wind Tunnel* pada Bilangan Berbeda

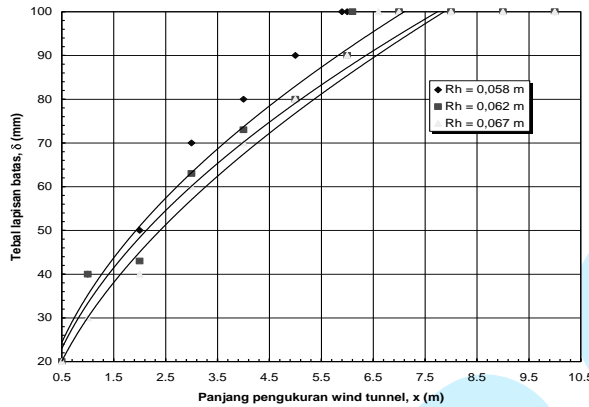


Gambar 2. Tebal Lapisan Batas sebagai Fungsi Jarak Pengukuran *Wind Tunnel* pada Bilangan Reynolds Berbeda.

Pertumbuhan lapisan batas untuk setiap jari-jari hidraulik memperlihatkan bentuk kurva yang sama. Tebal lapisan batas semakin membesar seiring dengan pertambahan jarak pengukuran *wind tunnel*..



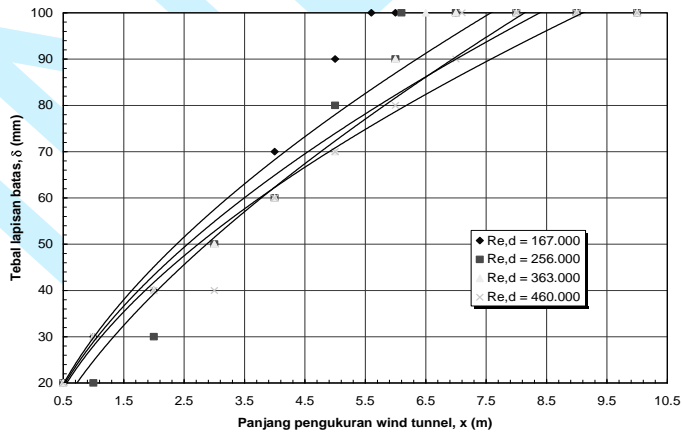
Gambar 3 Grafik Tebal Lapisan Batas (δ) terhadap Jarak Pengukuran *Wind Tunnel* (x) pada bilangan Reynolds $1,67 \cdot 10^5$



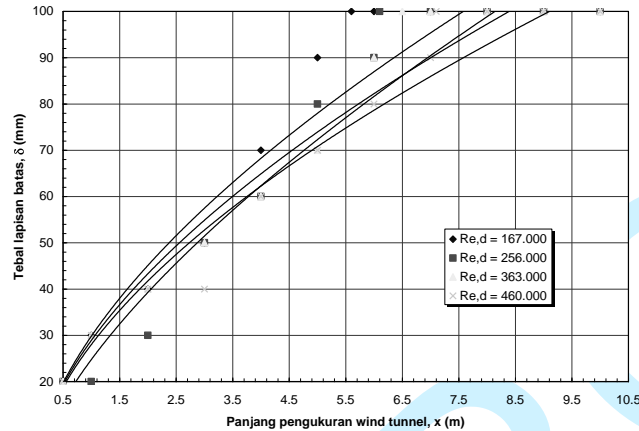
Gambar 4. Grafik Tebal Lapisan Batas (δ) terhadap Jarak Pengukuran Wind Tunnel (x) pada Bilangan Reynolds $2,2 \cdot 10^5$

Hal yang menarik dari Gambar 2 s.d. Gambar 4 ialah bilangan Reynolds sangat mempengaruhi perkembangan tebal lapisan batas pada tiap perubahan jari-jari hidraulik. Dari Gambar 2 s.d. Gambar 4 terlihat adanya regresi tebal lapisan batas terhadap jarak pengukuran *wind tunnel* pada bilangan Reynolds yang berbeda yang mendekati hubungan persamaan untuk penampang bundar.

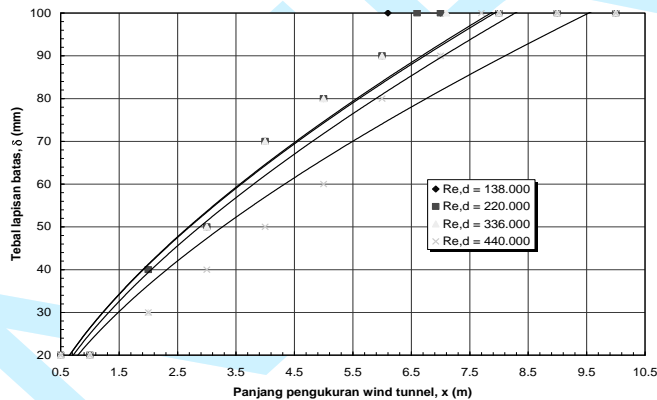
B. Tebal Lapisan Batas sebagai Fungsi Jarak Pengukuran *Wind Tunnel* pada Jari-jari Hidraulik Berbeda



Gambar 5. Grafik Tebal Lapisan Batas (δ) terhadap Jarak Pengukuran pada Jari-jari Hidraulik (R_h) = 0,058 m



Gambar 6. Grafik Tebal Lapisan Batas(δ) terhadap Jarak Pengukuran pada Jari-jari Hidraulik (R_h) = 0,062 m

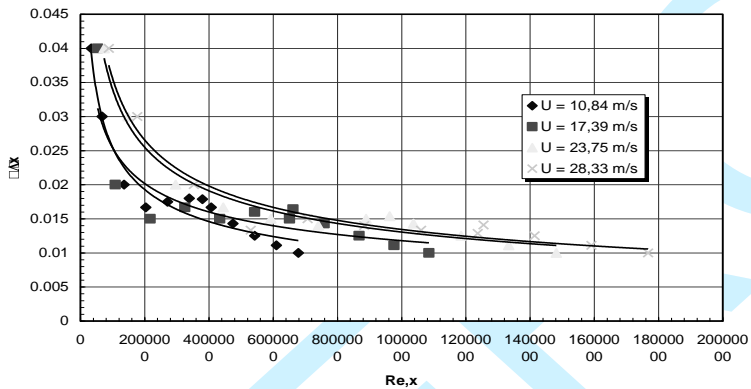


Gambar 7. Grafik Tebal Lapisan Batas (δ) terhadap Jarak Pengukuran *Wind Tunnel* (x) pada Jari-jari Hidraulik (R_h) = 0,067 m.

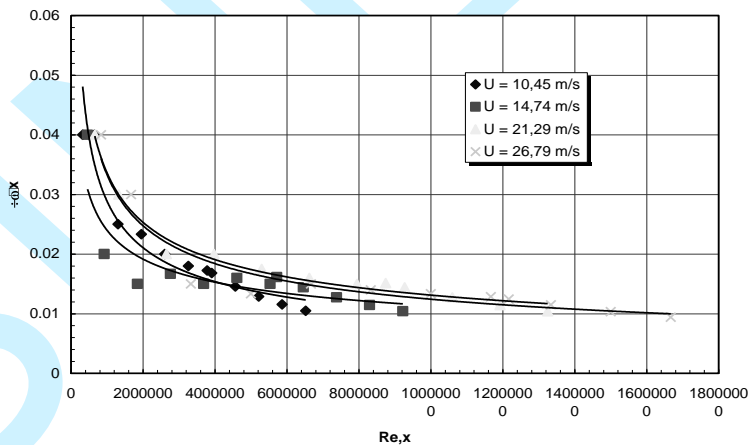
Dari Gambar 5 sampai Gambar 7 secara umum memperlihatkan perbedaan perkembangan tebal lapisan batas untuk tiap perubahan jari-jari hidraulik sampai terjadinya panjang ekuivalen aliran berkembang penuh. Pada jari-jari hidraulik yang besar cenderung mempunyai panjang ekuivalen aliran berkembang penuh yang lebih panjang, hal ini juga berlaku untuk tiap perubahan bilangan Reynolds. Gambar 5 sampai Gambar 7 menunjukkan pula adanya hubungan yang kuat antara tebal lapisan batas dengan jarak pengukuran wind tunnel, terlihat dari persamaan regresi dan koefisien korelasi yang dihasilkan.

C. Perbandingan Tebal Lapisan Batas Terhadap Panjang Wind Tunnel Sebagai Fungsi Bilangan Reynolds

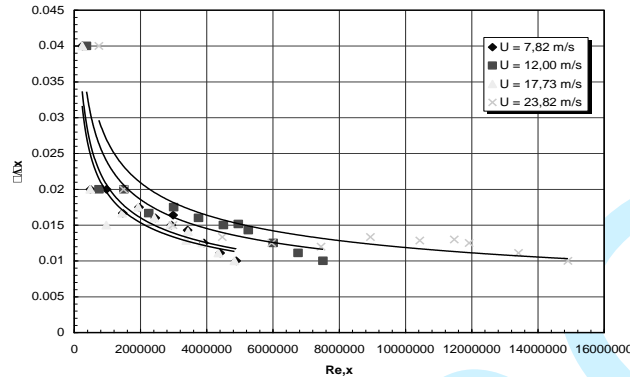
Nilai δ/x akan semakin kecil bila bilangan Reynolds semakin diperbesar, hal ini berlaku umum untuk tiap aliran bebas dan perubahan jari-jari hidraulik. Dari gambar 8 sampai dengan 10 terlihat adanya hubungan yang kuat antara δ/x dengan bilangan Reynolds pada bermacam-macam aliran bebas.



Gambar 8. Grafik Tebal Lapisan Batas (δ) terhadap Panjang Wind Tunnel (x) Sebagai Fungsi Bilangan Reynolds (Re_x) pada Jari-jari Hidrolik (R_h) 0,058 m



Gambar 9. Grafik Tebal Lapisan Batas (δ) terhadap Panjang Wind Tunnel (x) Sebagai Fungsi Bilangan Reynolds (Re_x) pada Jari-jari Hidrolik (R_h) 0,062 m



Gambar 10. Grafik Tebal Lapisan Batas (δ) terhadap Panjang Wind Tunnel (x) Sebagai Fungsi Bilangan Reynolds (Re_x) pada Jari-jari Hidrolik (R_h) 0,067 m

IV. KESIMPULAN

Dari hasil dan pembahasan di atas, diperoleh beberapa kesimpulan sebagaimana berikut ini.

1. Karakteristik pertumbuhan tebal lapisan batas sampai aliran mencapai aliran berkembang penuh akibat perubahan jari-jari hidraulik dan bilangan Reynolds, dapat dilihat pada :

- a. Hubungan antara tebal lapisan batas dengan panjang pengukuran ujung *wind tunnel* pada bilangan Reynolds $1,38 \cdot 10^5$ sampai $4,6 \cdot 10^5$ adalah :

$$\delta_{(R_h = 0,058 \text{ m})} = 24,745 x^{0,6661}$$

- b. Hubungan antara tebal lapisan batas dengan panjang pengukuran *wind tunnel* pada jari-jari hidraulik 0,058 m sampai 0,067 m adalah :

$$\delta_{(Re = 1,67 \cdot 10^5)} = 28,427 x^{0,6156}$$

2. Pengaruh jari-jari hidraulik dan bilangan Reynolds terhadap panjang ekuivalen daerah aliran berkembang penuh, yaitu :

- a. Hubungan antara panjang ekuivalen daerah aliran berkembang penuh dengan bilangan Reynolds adalah :

$$- Le_{(R_h = 0,058 \text{ m})} = 0,3722 Re_d^{0,2249}$$

- b. Hubungan antara panjang ekuivalen daerah aliran berkembang penuh dengan jari-jari hidraulik, adalah :

$$- Le_{(Re = 1,67 \cdot 10^5)} = 64,28 R_h^{0,8621}$$

3. Secara umum penelitian ini mendekati karakteristik teoretis *wind tunnel* penampang bundar aliran turbulen. Hal ini dapat dilihat dari hubungan :

a. Perbandingan $\frac{\delta}{x}$ terhadap Re , adalah :

$$\text{- Blasius : } \frac{\delta}{x} = \frac{0,370}{Re^{1/5}}$$

$$\text{- Fox : } \frac{\delta}{x} = \frac{0,382}{Re^{1/5}}$$

$$\text{- Hasil Penelitian : } \frac{\delta}{x} = \frac{2,1525}{Re^{0,3254}}$$

b. Perbandingan $\frac{Le}{d}$ terhadap Re , adalah :

$$\text{- Blasius : } \frac{Le}{d} = 4,4 Re^{1/6}$$

$$\text{- Hasil penelitian : } \frac{Le}{D_h} = 3,10 Re^{1/6}$$

c. Hasil ini menunjukkan bahwa formula Blasius dapat digunakan untuk menentukan panjang masuk sampai terbentuknya daerah aliran berkembang penuh pada penampang persegi hanya saja nilai konstantanya berubah dari 4,4 menjadi 3,10.

V. DAFTAR PUSTAKA

Olson R.M. & Wright S.J; “*Dasar-Dasar Mekanika Fluida Teknik*”, Edisi kelima, Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Umum; 1993.

Schlichting,H.; “*Boundary-Layer Theory*”, New York: McGraw-Hill Book Company; 1979.

Streeter,L.V., and E.B.Wylie, “*Fluid Mechanics*”, NewYork: McGraw-Hill,Inc; 1985.

White F.M.; “*Viscous Fluid Flow*”, Second Edition, New York: McGraw-Hill Book Company; 1991.

White F.M.; “*Fluid Mechanics*”, Third Edition, New York: McGraw-Hill Book Company; 1994.