

Studi Eksperimental Tentang Pengaruh Perubahan Diameter Lubang Orifice Terhadap Karakteristik Boundary Layer Aliran Hilir

Hariyo Priambudi Setyo Pratomo

Dosen Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Mesin - Universitas Kristen Petra

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan diameter lubang *orifice* terhadap karakteristik aliran *down stream* dalam penampang *circular*. Adanya *orifice* dalam sistem saluran akan menyebabkan terjadinya *vortex* pada *down stream region* aliran yang diduga sangat mempengaruhi karakteristik aliran dalam pergerakannya ke arah *down stream*. *Vorticity* yang dikandung oleh *vortex* akan berakumulasi dengan *vorticity* aliran sehingga mempengaruhi karakteristik *boundary layer* yang terbentuk; antara lain : ketebalan *boundary layer* dan *velocity profile*.

Pengaruh perubahan diameter lubang *orifice* terhadap karakteristik aliran *down stream* dapat diketahui dengan mengukur tekanan statis dan tekanan dinamis sepanjang penampang untuk mengetahui ketebalan *boundary layer* dan *velocity profile* yang terbentuk.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *boundary layer* berkembang semakin cepat pada diameter lubang *orifice* yang paling kecil, karena *vortex* yang terjadi pada *down stream region* paling besar.

Kata kunci: *vortex*, *down stream*, *vorticity*, *boundary layer*, *velocity profile*.

Abstract

Goal of this experiment is knowing about influence of orifice's hole diameter variation to characteristics of down stream flow in circular ducting. The presence of orifice in channel system will cause any vortex at down stream region of flow, which was predicted could influence characteristics of flow in its moving to down stream direction. Vorticity which is contained by vortex will accumulate with flow vorticity, so that can influences produced boundary layer characteristics, involving boundary layer thickness and velocity profile.

Influence of orifice's hole diameter variation to characteristics of down stream flow can be known by measuring static pressure and dynamic pressure along cross section to find out boundary layer thickness and velocity profile.

The experiment results show that boundary layer develops faster at the smallest orifice's hole diameter, because vortex that happened at down stream region was the biggest.

Keywords: *vortex*, *down stream*, *vorticity*, *boundary layer*, *velocity profile*.

Daftar Notasi

x	sumbu koordinat	w	komponen kecepatan arah z
y	sumbu koordinat	\bar{V}	kecepatan rata-rata
z	sumbu koordinat	A	luasan
H	shape factor	t	tebal orifice
l	reattachment point	m	massa
h_{LT}	head loss total	U_o	kecepatan free stream
h_L	head loss major	ℓ_e	entrance length
ω	rotation	D	diameter saluran
n	eksponen power law	d	diameter lubang orifice
Re	angka Reynold	Dp	pressure drop
u	komponen kecepatan arah x	p	tekanan stagnasi
v	komponen kecepatan arah y	p_o	tekanan statis
		L	panjang saluran
		C_p	koefisien tekanan
		R	jari-jari
		d^*	displacement thickness
		m	absolute viscosity
		r	density

Catatan : Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Juli 2002. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 4 Nomor 2 Oktober 2002.

G	circulation
h_{Lm}	head loss minor
e	kekasaran pipa
K_L	loss coefficient
g	konstanta gravitasi
l_{eq}	panjang ekuivalen
T	interval waktu
u'	komponen fluktuasi kecepatan arah sumbu x
I	intensitas turbulen
t_{yx}	shear stress
t_{lam}	laminar shear stress
t_{turb}	turbulent shear stress
v'	komponen fluktuasi kecepatan arah sumbu y
C_f	koefisien skin friction
C_D	koefisien drag
F_D	gaya drag
d	disturbances thickness
q	momentum thickness
u	kinematic viscosity
x	vorticity

1. Pendahuluan

Aliran dalam suatu saluran (*internal flow*), sejauh tidak mengalami gangguan, akan mempunyai karakteristik *boundary layer* dan harga *vorticity* tertentu yang hanya dipengaruhi oleh viskositas fluida dengan *solid surface* yang halus. Hanya dalam daerah tipis yang berdekatan dengan *solid surface*, efek viskositas begitu penting. Pada daerah ini terjadi gesekan antara lapisan fluida yang berdekatan dengan *solid surface* dengan *solid surface* itu sendiri.

Gesekan ini menimbulkan tegangan geser yang meningkatkan *vorticity* pada daerah antara *boundary layer* dengan *solid surface* sehingga *boundary layer* cepat berkembang. Karakteristik *boundary layer* dan *vorticity* yang terjadi sangat mempengaruhi besarnya *losses* yang terjadi dalam aliran internal yang nampak dengan adanya *pressure drop*. Apabila aliran mengalami gangguan yang mendadak, maka akan mempengaruhi karakteristik *boundary layer* yang terbentuk, yaitu: ketebalan (*displacement* dan *momentum thickness*), profil kecepatan, dan *shape factor*.

Orifice merupakan salah satu jenis *flow meter* yang dipasang pada setiap sambungan pipa yang mana dalam pemasangannya menimbulkan gangguan aliran. Adanya penambahan *orifice* dalam suatu sistem saluran dapat dianggap sebagai suatu *immersed body* yang akan mengganggu aliran di dalamnya. Hal ini akan mengakibatkan terjadinya *wake region* yang mengandung *vortex* sehingga aliran mengalami separasi. *Vortex* ini akan meningkatkan akumulasi *vorticity* pada *down stream* setelah aliran mengalami relaksasi yang mempunyai kontribusi terhadap perkembangan

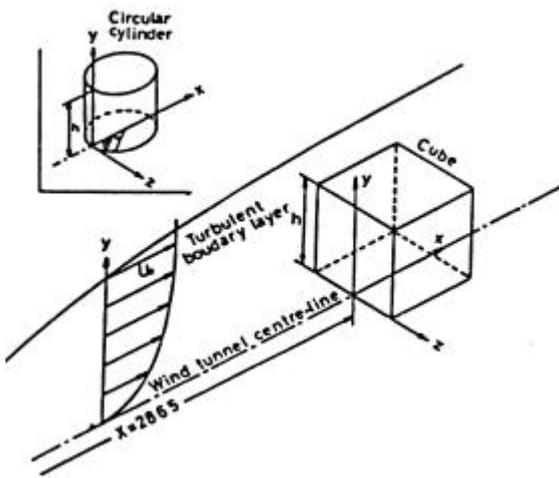
boundary layer dan mengakibatkan terjadinya *losses* pada aliran yang diwujudkan dengan adanya *pressure drop* sepanjang dinding saluran. Penambahan *orifice* ini menimbulkan *drag force* pada *up stream* sehingga aliran mengalami separasi pada *down stream region*. Meskipun *vortex* dapat dihilangkan, *vorticity* yang ditimbulkan mempunyai kontribusi terhadap perkembangan *boundary layer*. Semakin kecil diameter *orifice*, semakin besar *vortex* yang terjadi dan akumulasi *vorticity* pun semakin besar yang mana hal ini mengakibatkan *boundary layer* semakin cepat berkembang. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh perubahan diameter *orifice* ($D_{orifice}$) terhadap karakteristik *boundary layer* pada arah *down stream* yang meliputi: *velocity profile* ($u = f(y)$), *displacement thickness* (δ^*), *momentum thickness* (θ), dan *shape factor* (H).

2. Dasar Teori

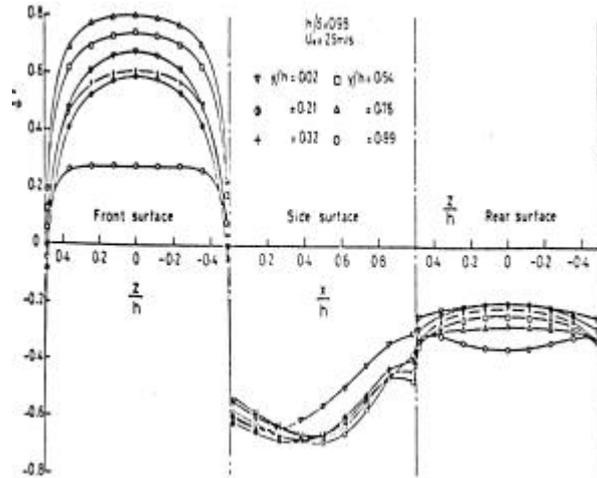
2.1 Penelitian Drag pada Benda Pejal 3D yang tercelup dalam Boundary Layer Turbulen

Penelitian yang telah dilakukan oleh H. Sakamoto, M. Moriya, S. Taniguchi, dan M. Arie^[6] tentang *drag* yang terbentuk pada benda pejal 3 dimensi yang tercelup tegak lurus dalam aliran turbulen, berhasil mengukur secara detil distribusi tekanan pada sisi depan, sisi samping, dan sisi belakang benda pejal (kubus dan silinder sirkular vertikal) dan perkembangan *boundary layer* pada *down stream region* setelah aliran mengalami relaksasi. Mereka melakukan variasi ketinggian (h) benda pejal: untuk kubus mulai dari 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, dan 70 mm; untuk silinder sirkular vertikal mulai dari 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 25, 30, 40, dan 46 mm, dimana diameter dan ketinggiannya sama besar.

Pada Gambar 1 terlihat bahwa secara keseluruhan, harga *coefficient of pressure* (C_p) pada sisi depan kubus mempunyai harga C_p yang lebih tinggi daripada sisi samping dan belakang.



Gambar 1. Skema benda pejal yang tercelup tegak lurus dalam aliran turbulen (H. Sakamoto, M. Moriya, S. Taniguchi, dan M. Arie)^[6]



Gambar 2. Distribusi tekanan pada permukaan kubus (H. Sakamoto, M. Moriya, S. Taniguchi, dan M. Arie)^[6]

Pada Gambar 1 terlihat bahwa secara keseluruhan, harga *coefficient of pressure* (C_p) pada sisi depan kubus mempunyai harga C_p yang lebih tinggi daripada sisi samping dan belakang.

Hal ini disebabkan karena pada sisi depan terjadi kenaikan tekanan yang ditimbulkan oleh *vortex* aliran balik. Pada posisi *pressure tap* semakin menurun (y/h), efek *vortex* aliran balik semakin kuat mempengaruhi kenaikan tekanan pada sisi depan, sebaliknya semakin ke atas efek ini semakin hilang dan digantikan oleh efek *negative suction* kecepatan *free stream* aliran. Dalam hal ini, tekanan dinamis mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan posisi *pressure tap*. *Coefficient of pressure* (C_p) dirumuskan sebagai :

$$C_p = \frac{p - p_o}{1/2 \cdot \rho U_o^2} \quad (1)$$

Pada sisi samping harga C_p lebih kecil (berharga negatif) dan seiring dengan pergerakan posisi *pressure tap* semakin ke belakang, harga C_p semakin naik. Hal ini disebabkan karena aliran mengalami *bubble separation* mulai dari ujung atas dan mencapai relaksasi pada ujung belakang kubus. Demikian juga halnya pada sisi belakang, aliran mengalami separasi dan terbentuk *wake region*, harga C_p juga lebih kecil (berharga negatif) dan mempunyai harga yang relatif sama untuk tiap posisi *pressure tap*.

Drag yang terbentuk pada sisi depan benda pejal menunjukkan harga yang semakin besar untuk pertambahan ketinggian benda pejal. Gambar 3 dan 4 menunjukkan bahwa harga *coefficient of drag* (C_D) semakin meningkat untuk pertambahan rasio ketinggian-*displacement thickness* (h/d) benda pejal. *Coefficient of drag* (C_D) dirumuskan sebagai :

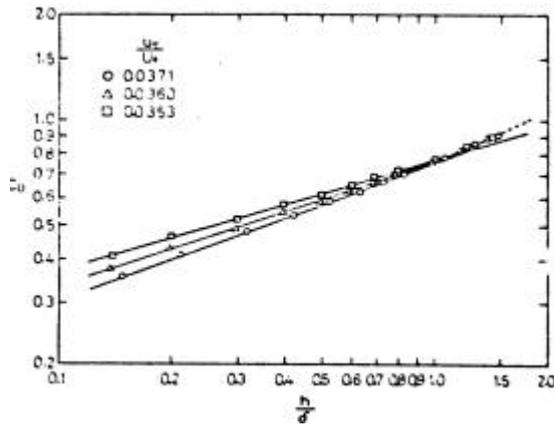
$$C_D = \frac{D}{1/2 \cdot \rho U_o^2 h^2} \quad (2)$$

Coefficient of turbulent drag (C_{Dt}) untuk sisi depan dalam *boundary layer* turbulen mempunyai harga semakin meningkat seiring dengan kenaikan angka *Reynold* turbulen (hu_t/ν).

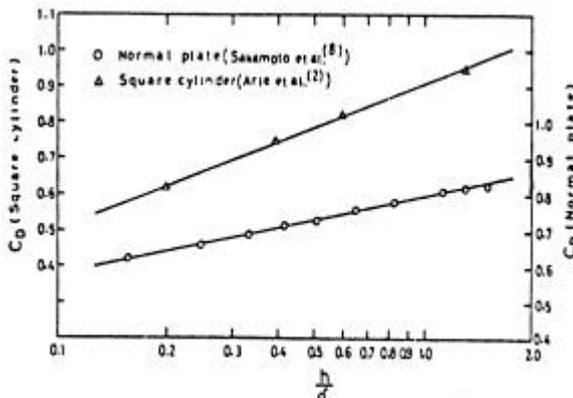
Secara umum dapat dituliskan hubungan fungsional tanpa dimensi untuk *coefficient of drag* (C_D) sebagai berikut :

$$C_D = f\left(\frac{u_t}{U_o}, \frac{h}{d}, \frac{hu_t}{\nu}\right) \quad (3)$$

Tabel 1 menunjukkan tingkat perkembangan karakteristik *boundary layer* turbulen untuk perubahan angka *Reynold*. Seiring dengan kenaikan angka *Reynold*, *boundary layer* akan semakin cepat berkembang dan aliran dalam pergerakannya ke arah *down stream* semakin bersifat turbulen yang ditunjukkan dengan harga *shape factor* (H) yang semakin kecil. Secara umum dapat disimpulkan bahwa dengan kenaikan angka *Reynold*, *wake region* yang terbentuk di belakang benda pejal akan semakin besar dan setelah mencapai relaksasi aliran semakin bersifat turbulen dalam pergerakannya ke arah *down stream*.



Gambar 3. Hubungan antara C_D dan h/d untuk kubus (H. Sakamoto, M. Moriya, S. Taniguchi, dan M. Arie)^[6]



Gambar 4. Hubungan antara C_D dan h/d untuk silinder sirkular dan plat datar (H. Sakamoto, M. Moriya, S. Taniguchi, dan M. Arie)^[6]

Tabel 1. Karakteristik boundary layer turbulen untuk kubus dan silinder sirkular vertical (H. Sakamoto, M. Moriya, S. Taniguchi, dan M. Arie)^[6]

Table 1(a) Characteristics of the undisturbed turbulent boundary layer at the location of a cube ($X = 2665 \text{ mm}$)

RUN	$U_0 \text{ m/s}$	$\delta \text{ mm}$	$\delta^+ \text{ mm}$	$\theta \text{ mm}$	R_g	u_y/U_0	H
1	15	48.6	7.5	5.4	5164	0.0371	1.40
2	20	51.6	7.9	5.8	7396	0.0360	1.36
3	25	50.4	7.6	5.6	8926	0.0353	1.34

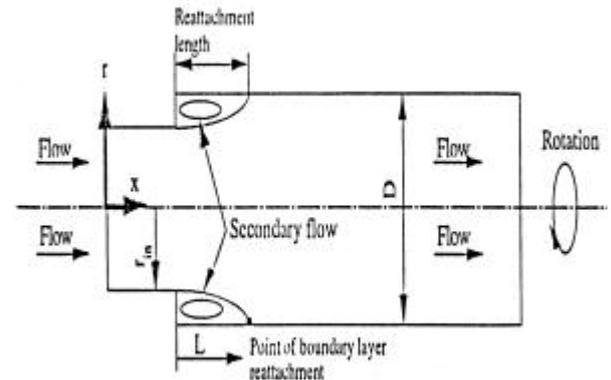
Table 1(b) Characteristics of the undisturbed turbulent boundary layer at the location of a vertical circular cylinder ($X = 2355 \text{ mm}$)

RUN	$U_0 \text{ m/s}$	$\delta \text{ mm}$	$\delta^+ \text{ mm}$	$\theta \text{ mm}$	R_g	u_y/U_0	H
1	12	30.0	4.9	3.5	2523	0.0408	1.40
2	16	39.0	6.3	4.5	4286	0.0384	1.38
3	20	44.8	6.6	4.9	5904	0.0376	1.34

2.2 Penelitian Aliran Sekunder dalam Saluran yang Berotasi Aksial dengan Perluasan Penampang

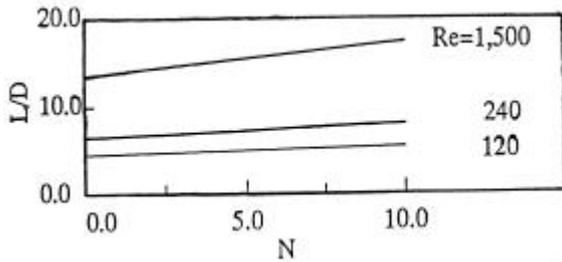
Penelitian tentang fenomena terbentuknya *wake region* pada aliran yang mengalami

perubahan penampang juga telah dilakukan oleh Shuichi Torii dan Wen Jei Yang^[5]. Mereka meneliti tentang aliran sekunder yang terjadi dalam saluran *circular* yang diputar secara aksial dengan perluasan penampang. Penelitian ini dilakukan dengan merubah kecepatan putar dan angka *Reynold* sehingga diketahui pengaruhnya terhadap aliran sekunder yang terjadi dan dihubungkan dengan perpindahan panas.



Gambar 5. Skema sistem aliran berotasi secara aksial dengan sudden expansion (Shuichi Torii dan Wen Jei Yang)^[5]

Gambar 6 menunjukkan pengaruh dari perubahan angka *Reynold* dan kecepatan putar terhadap panjang *reattachment* untuk aliran dengan perluasan penampang. Dari gambar ini dapat diketahui bahwa semakin besar angka *Reynold* dan semakin tinggi kecepatan putar mengakibatkan *reattachment point* semakin panjang. Hal ini mengindikasikan bahwa aliran sekunder (*wake region* yang terbentuk) akan semakin luas untuk angka *Reynold* yang semakin besar dan kecepatan putar saluran *circular* yang semakin tinggi. Aliran dalam pergerakannya ke arah *down stream* akan semakin bersifat turbulen untuk angka *Reynold* dan kecepatan putar saluran *circular* yang tinggi. Hal ini disebabkan karena akumulasi antara *vorticity* yang dikandung oleh *vortex* dalam *wake region* dan *vorticity* aliran setelah aliran mencapai *reattachment point* berlangsung kuat sehingga dalam pergerakannya ke arah *down stream* gerakan antar partikel fluida sangat acak.



Gambar 6. Pengaruh perubahan angka Reynold dan kecepatan putar terhadap reattachment point (Shuichi Torii dan Wen Jei Yang)^[5]

2.3 Karakteristik Boundary Layer

1. *Disturbance thickness (d)*, didefinisikan sebagai jarak antara *solid surface* sampai pada titik tertentu yang kecepatannya berharga 99% dari kecepatan *free stream* ($0.99U$).
2. *Displacement thickness (d*)*, menunjukkan adanya defisit massa di dekat *solid surface* karena pengaruh gaya *viscous*.

$$d^* = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \approx \int_0^d \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \tag{4}$$

3. *Momentum thickness (q)*, menunjukkan adanya defisit momentum di dalam *boundary layer* karena pengaruh gaya *viscous*.

$$q = \int_0^{\infty} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \approx \int_0^d \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \tag{5}$$

4. **Profil Kecepatan**
 Profil kecepatan aliran *laminar* di atas pelat datar dalam fungsi *y* dapat, dan dinyatakan:

$$\frac{u}{U} = 2\left(\frac{y}{d}\right) - \left(\frac{y}{d}\right)^2 = 2h - h^2 \tag{6}$$

Profil kecepatan untuk aliran *turbulen* dapat dinyatakan:

$$\frac{u}{U} = \left(\frac{y}{d}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{7}$$

5. **ShapeFactor**
Shape Factor menyatakan perbandingan antara defisit massa (d^*) dengan defisit momentum (q) dalam *boundary layer region*.

$$H = \frac{d^*}{q} \tag{8}$$

3. Peralatan dan Metode Penelitian

Saluran Uji

Spesifikasi :

- Bahan : pelat baja
- Diameter : 35 cm
- Panjang : 180 cm

Pengukuran tekanan statis pada dinding saluran uji dilakukan dengan membuat *pressure tap* berdiameter 1 mm dengan jumlah 8 buah untuk tiap penampang melintang dan jarak antar penampang melintang adalah 5 cm.

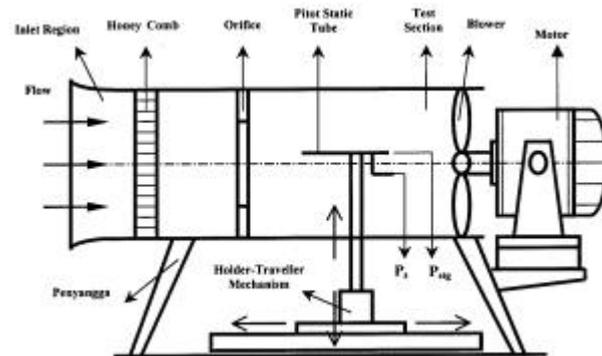
Orifice

Orifice yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai 3 variasi *diameter* ($D_{orifice}$), berturut-turut adalah : $D_{orifice} = 0.25D$, $D_{orifice} = 0.50D$, dan $D_{orifice} = 0.75D$. D adalah diameter penampang *circular* dengan ukuran 35 cm. Bahan *orifice* terbuat dari pelat besi dengan ketebalan 1 mm.

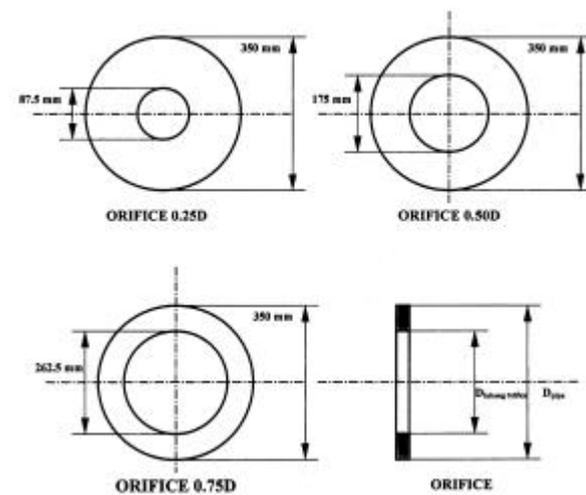
Blower

Spesifikasi :

- Jenis : *suction blower*
- Putaran : 2820 rpm
- Daya : 2.2 kW



Gambar 9. Skema Alat Penelitian



Gambar 10. Skema Orifice

Manometer

Spesifikasi :

- Jenis : *inclined manometer* dengan sudut kemiringan 15° .
- Fluida : kerosene ($SG_{\text{kerosene}} = 0.815$)
- Range : 0 – 300 mm
- Skala : 1 mm

Pitot Tube

Alat ini digunakan untuk mengukur tekanan statis dan tekanan stagnasi pada penampang melintang di sepanjang saluran uji.

Holder dan Traveller Mechanism

Holder digunakan sebagai pemegang *pitot tube*, sedangkan *traveller mechanism* memungkinkan holder dapat bergerak naik-turun dan maju-mundur pada daerah pengambilan data.

Honey Comb

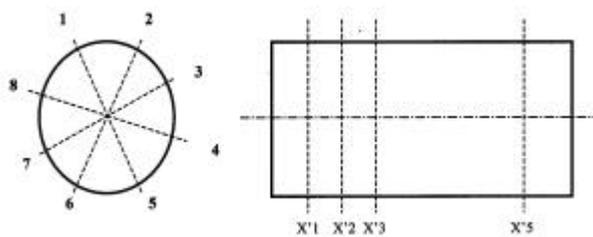
Spesifikasi :

- Bahan : karton tebal
- Diameter: 35 cm
- Jejaring : 2 x 2 cm
- Tebal : 5 cm

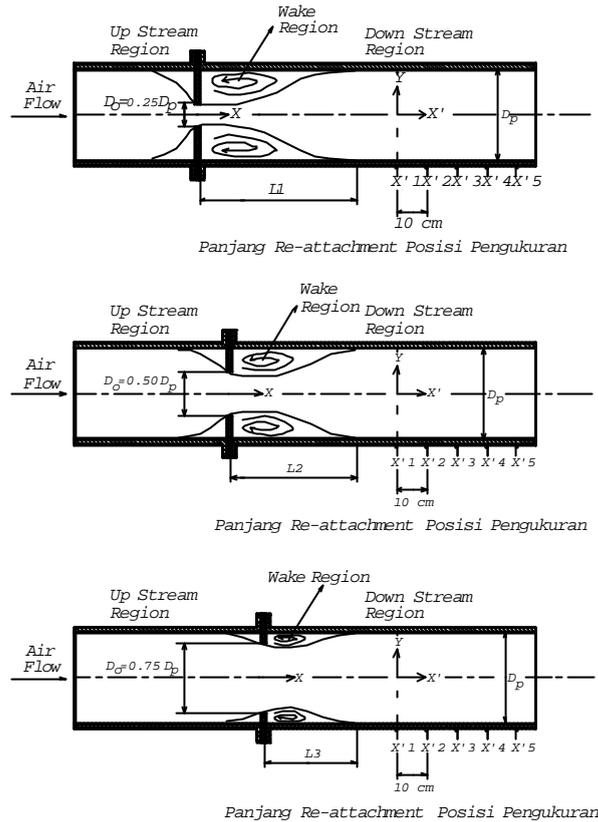
Metode Penelitian

Pengambilan data meliputi 3 tahapan sebagai berikut :

1. Pengukuran beda tekanan statis antara center dan dinding di sepanjang penampang melintang saluran uji.
2. Pengukuran tekanan statis dinding di sepanjang saluran uji arah *down stream* setelah *reattachment orifice*.
3. Pengukuran tekanan dinamis di setiap penampang melintang saluran uji arah *down stream* setelah *reattachment orifice*.



Gambar 11. Posisi pengukuran Tekanan Statis Dinding dan Tekanan Dinamis



Gambar 12. Posisi Pengukuran Karakteristik Aliran Setelah Down Stream Orifice

4. Analisa Hasil Eksperimen dan Diskusi

Adanya efek *viscous* dalam aliran menimbulkan gesekan antara partikel fluida dengan partikel fluida yang lain. Pengaruh viskositas yang paling besar terjadi di dalam daerah *boundary layer* dan daerah di luar *boundary layer* dapat diabaikan efek viskositasnya. Pada daerah di dalam *boundary layer* terjadi gesekan antara partikel fluida dengan *solid surface* yang memenuhi *no slip condition*. Adanya gesekan ini akan meningkatkan tegangan geser dan menimbulkan gerakan acak antar partikel fluida yang ditransmisikan ke arah *down stream* dan ke arah *freestream*. Transmisi ke arah *free stream* semakin kecil karena transfer momentum antar *layer* pada arah ini semakin hilang, sehingga pada daerah ini aliran dapat dikatakan *frictionless flow*, efek *viscous* diabaikan. Transmisi ke arah *down stream* semakin besar sehingga gerakan partikel fluida semakin acak. Gerakan acak antar partikel fluida ini menimbulkan rotasi partikel fluida yang disebut *vorticity*. Gangguan yang terjadi pada aliran turbulen diinterpretasikan sebagai *turbulent spot*, yaitu daerah kecil di dekat *solid surface* yang akan meletup jika gangguan yang diberikan sangat besar (tidak bisa diredam oleh

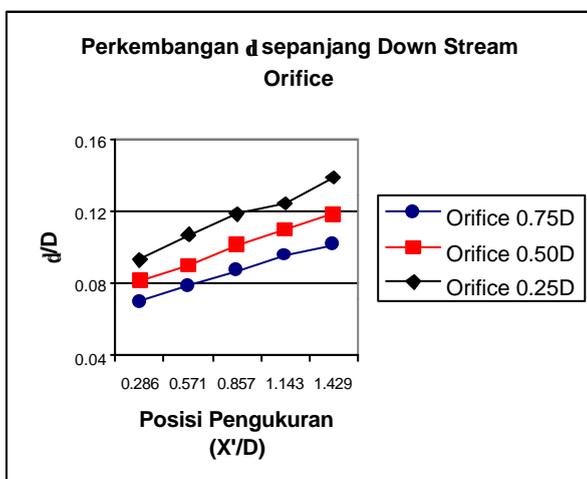
gaya *viscous*). Letupan inilah yang menimbulkan gerakan acak partikel fluida yang menginduksikan fluktuasi kecepatan (u' , v' , w') serta meningkatkan rotasi fluida.

Pada dasarnya, setiap aliran fluida mengandung *vorticity* karena adanya efek *viscous* yang menyebabkan terjadinya *velocity gradient* antar *layer*. *Vorticity* inilah yang mendorong perkembangan *boundary layer*. Adanya *orifice* menimbulkan separasi aliran yang mengandung *vortex*. Semakin kecil diameter *orifice*, intensitas *vortex* yang ditimbulkan akan semakin besar. Pada saat aliran mencapai *recovery*, *vortex* akan hilang dan aliran mengalami kondisi paralel. Meskipun demikian, *vorticity* yang dikandung oleh *vortex* tidak hilang dan berakumulasi dengan *vorticity* yang dikandung oleh aliran fluida sehingga mendorong perkembangan *boundary layer* yang semakin cepat.

4.1 Analisa Hasil Eksperimen

Displacement Thickness (d)

Dari Grafik 1, terlihat bahwa perkembangan *boundary layer* paling cepat ditunjukkan oleh konfigurasi *orifice* $0.25D$ dan semakin menurun secara berurutan sesuai dengan ukuran diameter *orifice*, $0.50D$ dan $0.75D$. Pada posisi pengukuran yang paling awal, *disturbance thickness* untuk konfigurasi *orifice* $0.25D$ mempunyai harga yang paling besar. Hal ini disebabkan karena tingkat akumulasi *vorticity* yang dikandung oleh *vortex* dan aliran fluida paling besar dihasilkan oleh konfigurasi *orifice* $0.25D$. *Vortex* yang dihasilkan oleh *orifice* $0.25D$ paling besar dibandingkan dengan kedua *orifice* yang lain sehingga *vorticity* yang dikandung pun juga paling besar dibandingkan dengan kedua *orifice* yang lain.

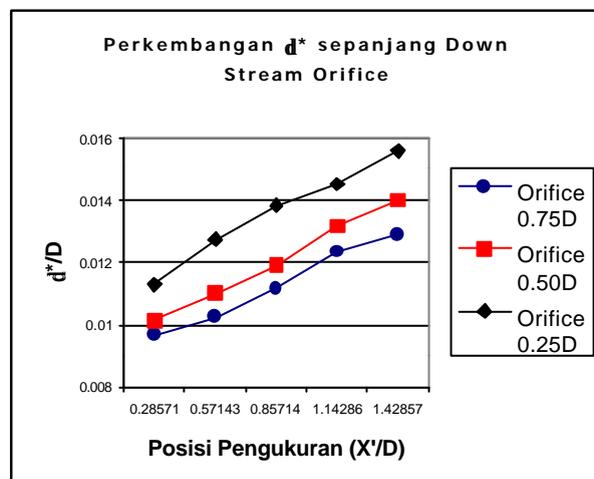


Grafik 1. Perkembangan *Disturbance Thickness* (d)

Vorticity yang besar inilah yang berakumulasi dengan *vorticity* yang dikandung oleh aliran fluida sehingga *boundary layer* semakin cepat berkembang daripada kedua *orifice* yang lain. Adanya akumulasi *vorticity* ini menyebabkan meningkatnya gradien kecepatan dan tegangan geser, sehingga *boundary layer* semakin cepat berkembang.

Disturbances Thickness (d^*)

Adanya akumulasi *vorticity* yang dikandung oleh *vortex* dan aliran fluida menyebabkan seolah-olah partikel fluida mengalami perlambatan ke arah *down stream*, sehingga defisit massa yang terjadi juga semakin besar ke arah *down stream*. Semakin besar *displacement thickness*, semakin besar pula defisit massa yang dialami oleh aliran fluida dan *boundary layer* juga semakin cepat berkembang. Akumulasi *vorticity* yang dikandung oleh *vortex* dan aliran fluida akan meningkatkan gesekan dan tegangan geser antar partikel fluida di dalam *boundary layer region*. Semakin besar tingkat akumulasi ini menyebabkan gesekan dan tegangan geser antar partikel fluida juga semakin besar, sehingga perlambatan yang dialami oleh partikel fluida ke arah *down stream* semakin besar pula. Aliran fluida juga mengalami defisit massa yang semakin besar.



Grafik 2. Perkembangan *Displacement Thickness* (d^*)

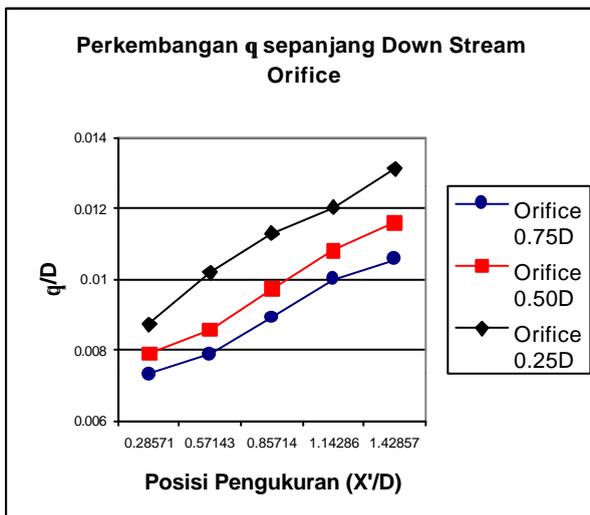
Dari Grafik 2, nampak bahwa *displacement thickness* paling besar dihasilkan oleh *orifice* $0.25D$ dan menurun secara berurutan untuk kedua *orifice*, $0.50D$, dan $0.75D$. Pada awal pengukuran konfigurasi *orifice* $0.25D$ mempunyai harga *displacement thickness* yang paling besar. Hal ini disebabkan karena *orifice* $0.25D$ menghasilkan tingkat akumulasi *vorticity* yang paling besar dibanding dengan kedua

orifice yang lain, sehingga menyebabkan tegangan geser dan gradien kecepatan yang paling besar dibanding dengan kedua orifice yang lain. Defisit massa yang dialami oleh konfigurasi ini juga paling besar.

Momentum Thickness (q)

Adanya defisit massa pada saat *boundary layer* berkembang ke arah *down stream* menyebabkan terjadinya defisit momentum. *Momentum thickness* mengindikasikan adanya defisit momentum yang terjadi pada aliran, di mana semakin besar harga *momentum thickness*, semakin besar pula defisit momentum yang terjadi dan sebaliknya. Semakin ke arah *down stream*, defisit momentum yang terjadi semakin besar karena adanya akumulasi *vorticity* antara partikel fluida dengan *solid surface* sehingga tegangan gesernya meningkat.

Pada Grafik 3, ditunjukkan bahwa defisit momentum yang paling besar dialami oleh konfigurasi orifice 0.25D. Pada awal pengukuran terlihat bahwa konfigurasi orifice 0.25D memiliki harga *momentum thickness* yang paling besar. Pada konfigurasi ini, akumulasi *vorticity* yang dikandung oleh *vortex* dan aliran fluida juga paling besar, sehingga tegangan geser dan gesekan antara partikel fluida dengan *solid surface* menghasilkan akumulasi yang sangat besar.

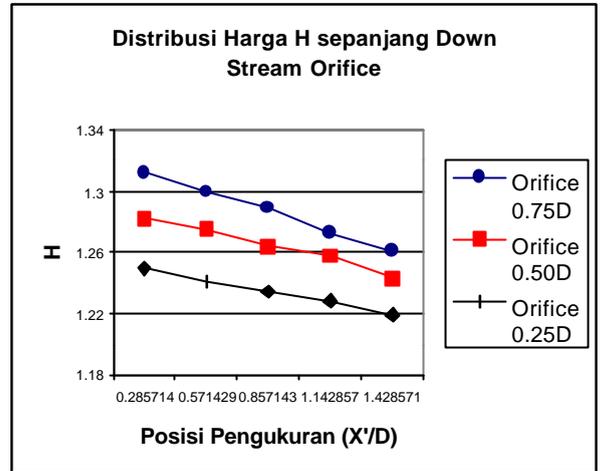


Grafik 3. Perkembangan *Momentum Thickness* (q)

Shape Factor (H)

Harga *shape factor* (H) merupakan indikasi intensitas turbulen secara kualitatif. Semakin kecil harga *shape factor*, intensitas turbulen suatu aliran yang dihasilkan akan semakin besar. Pada aliran turbulen, defisit momentum mempunyai harga yang besar karena gerakan

partikel yang semakin acak menyebabkan tegangan geser dan gesekan antara partikel fluida dan *solid surface* semakin besar pula. Semakin turbulen suatu aliran menunjukkan defisit momentum yang semakin besar, sehingga harga *shape factor* semakin kecil.



Grafik 4. Distribusi *Shape Factor* (H)

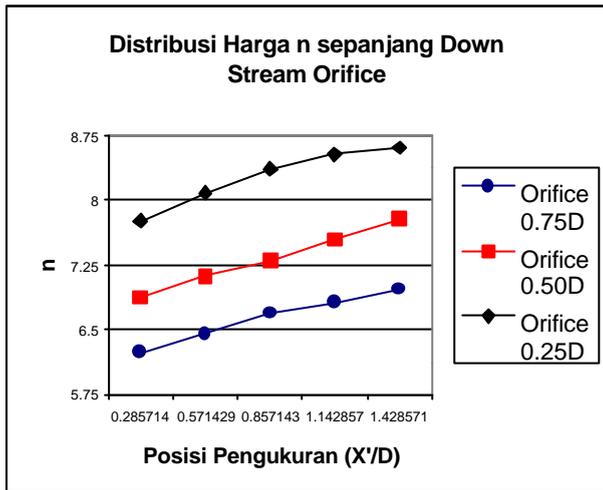
Dari Grafik 4, nampak bahwa harga *shape factor* yang paling kecil ditunjukkan oleh konfigurasi orifice 0.25D. Ini menunjukkan bahwa aliran melalui orifice 0.25D paling turbulen atau mempunyai intensitas turbulen yang tinggi dibandingkan dengan kedua orifice yang lain. Pada konfigurasi orifice 0.25D, dihasilkan tingkat akumulasi *vorticity* yang paling besar, sehingga gerakan antara partikel fluida semakin acak dan *boundary layer* semakin cepat berkembang. Aliran dengan intensitas turbulen yang tinggi bersifat tahan terhadap separasi.

Power Law (n)

Harga eksponen *power law*, n menentukan bentuk profil kecepatan *boundary layer* yang besarnya dipengaruhi oleh angka *Reynold*. Semakin besar angka *Reynold*, harga n akan semakin besar dan profil kecepatan yang terjadi akan semakin tumpul (*fuller*). Dari hasil perhitungan data eksperimen, nampak bahwa harga n mengalami kenaikan ke arah *down stream*, yang berarti profil kecepatan akan semakin tumpul (*fuller*). Profil kecepatan akan semakin tumpul ke arah *down stream* karena momentum aliran pada daerah *free stream* bertambah.

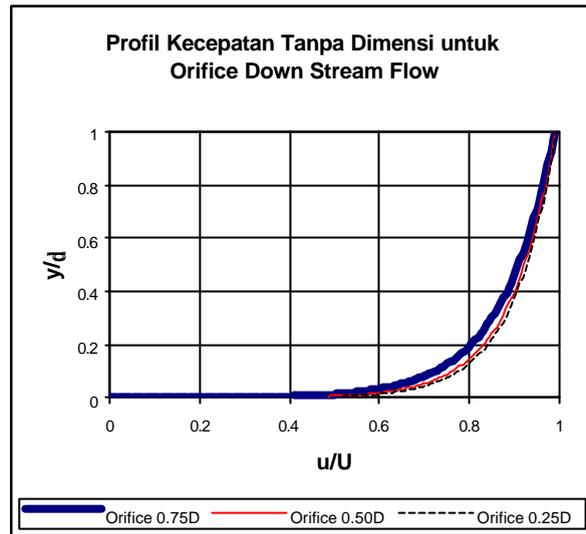
Namun demikian pertambahan momentum aliran ini tidak sebanding dengan defisit momentum yang terjadi pada *boundary layer region* ke arah *down stream*. Oleh karena itu tidak dapat dikatakan bahwa aliran mengalami

pertambahan momentum, karena defisit momentum yang terjadi lebih besar daripada pertambahan momentum aliran. Pada Grafik 5, terlihat bahwa harga eksponen *power law*, *n* paling besar dimiliki oleh *orifice 0.25D* dan mengalami penurunan secara berurutan untuk *orifice 0.50D*, dan *0.75D*. Hal ini berarti bahwa profil kecepatan untuk *orifice 0.25D* lebih tumpul (*fuller*) dibanding dengan kedua *orifice* yang lain.



Grafik 5. Distribusi *Power Law* (*n*)

bahan momentum pada daerah *free stream* semakin besar dalam pergerakannya ke arah *down stream*. Namun demikian tidak dapat dikatakan aliran fluida mengalami pertambahan momentum dalam pergerakannya ke arah *down stream*, karena defisit momentum yang terjadi akibat gesekan antar partikel terlalu besar dibanding dengan pertambahan momentum pada daerah *free stream*.



Grafik 6. Profil Kecepatan Tanpa Dimensi

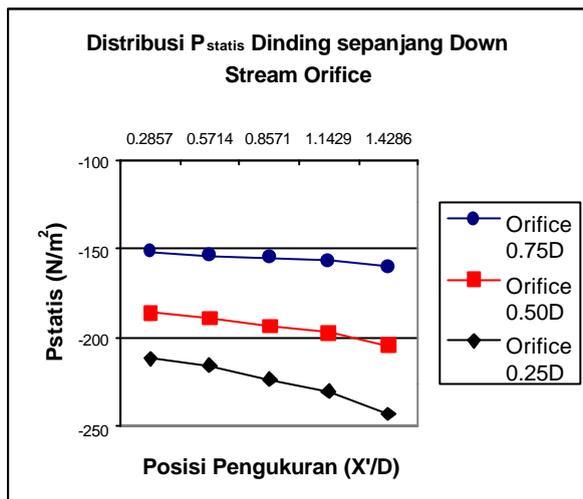
Profil Kecepatan Tanpa Dimensi

Bentuk profil kecepatan tanpa dimensi sangat dipengaruhi oleh harga eksponen *power law*, *n*. Semakin besar harga *n*, maka bentuk profil kecepatan tanpa dimensi semakin tumpul (*fuller*) dan hal ini berarti aliran tersebut semakin turbulen. Pada Grafik 6, secara keseluruhan terlihat bahwa profil kecepatan tanpa dimensi untuk konfigurasi *orifice 0.25D* berbentuk paling tumpul dibanding dengan kedua konfigurasi yang lain. Hal ini disebabkan karena pada konfigurasi *orifice 0.25D* terjadi akumulasi *vorticity* yang paling kuat sehingga menyebabkan gerakan acak antar partikel fluida yang besar. Pada kondisi ini, aliran bersifat sangat turbulen.

Secara keseluruhan, semakin ke arah *down stream* profil kecepatan tanpa dimensi untuk ketiga *orifice* semakin berbentuk tumpul. Hal ini disebabkan karena akumulasi *vorticity* ke arah *down stream* semakin kuat, sehingga semakin ke arah *down stream* gerakan acak antar partikel fluida semakin besar. Gerakan acak antar partikel fluida ini semakin kuat dalam pergerakannya ke arah *down stream*, sehingga transfer energi antar *layer* semakin besar pula karena setiap partikel fluida saling bertumbukan. Hal ini menyebabkan pertam-

Pressure Drop (Dp)

Setelah aliran melalui *orifice* mengalami *recovery flow* (kondisi aliran paralel), hasil pengukuran tekanan statis di sepanjang dinding saluran mengalami penurunan ke arah *down stream* yang disebabkan oleh adanya gesekan antara partikel fluida dengan *solid surface* di sepanjang saluran. Penambahan *orifice* pada sistem saluran mengakibatkan terjadinya separasi aliran pada *down stream region*. Adanya separasi ini menimbulkan *vortex* yang terdapat di dalam *low pressure region* (*wake region*). Meskipun setelah mencapai *recovery flow vortex* dapat hilang, tetapi *vorticity* yang dikandung oleh *vortex* tersebut berpotensi untuk berakumulasi dengan *vorticity* aliran. Karena adanya akumulasi ini, maka tegangan geser dan gesekan antara partikel fluida dengan *solid surface* menjadi meningkat. Sehingga seolah-olah partikel fluida dalam pergerakannya ke arah *down stream* mengalami perlambatan atau defisit massa. Dapat dikatakan pula bahwa ada sejumlah partikel fluida yang tertahan dalam daerah tertentu sepanjang *down stream* aliran. Adanya fenomena ini mengakibatkan tekanan statis di sepanjang dinding saluran mengalami penurunan.



Grafik 7. Distribusi Tekanan Statis (P_{statis})

Dari Grafik 7, terlihat bahwa penurunan tekanan statis yang paling besar terjadi pada konfigurasi *orifice 0.25D* dan meningkat secara berurutan untuk *orifice 0.50D*, dan *0.75D*. Konfigurasi *orifice 0.25D* menghasilkan penurunan tekanan statis dinding yang paling besar karena pada konfigurasi ini dihasilkan *vortex* yang paling besar akibat dari separasi aliran. Meskipun *vortex* ini dapat dihilangkan pada saat aliran mencapai *recovery flow*, tetapi *vorticity* yang dimilikinya berpotensi sangat kuat untuk berakumulasi dengan *vorticity* aliran. Hal ini menyebabkan tingkat akumulasi yang paling besar, sehingga ke arah *down stream* aliran, akumulasi *vorticity* semakin besar seiring dengan meningkatnya tegangan geser dan gesekan antara partikel fluida dengan *solid surface*. Pada akhirnya, penurunan tekanan statis di sepanjang dinding saluran paling besar untuk *orifice 0.25D*.

4.2 Diskusi

Hasil penelitian ini semakin mendukung penelitian yang telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Telah diketahui bahwa adanya benda pejal yang tercelup tegak lurus dalam aliran fluida dengan kecepatan *free stream* tertentu akan menimbulkan gaya *drag* pada sisi *up stream* dan akan menghancurkan tekanan total pada sisi *down stream*, sehingga menimbulkan *vortex* dalam *wake region*. Kedua peristiwa ini sangat mempengaruhi tingkat perkembangan *boundary layer* dalam *down stream region* setelah aliran mencapai *reattachment point*. Pada sisi *down stream*, yaitu pada saat aliran sesaat melintasi benda pejal, dapat dikatakan aliran mengalami *pressure gradient* yang diwujudkan dengan meluasnya penampang saluran secara mendadak (*sudden*

expansion) sehingga menimbulkan *vortex* dalam *wake region*; aliran dikatakan mengalami separasi. Semakin besar ukuran geometri benda pejal dan semakin tinggi angka *Reynold*, *wake region* yang terbentuk akan semakin besar pula dan aliran setelah mencapai *reattachment point* semakin turbulen. Hal ini mengindikasikan bahwa *boundary layer* semakin cepat berkembang dalam pergerakan aliran ke arah *down stream*.

Demikian pula pada aliran yang melewati saluran dengan perluasan penampang pada *down stream region* akan menimbulkan aliran sekunder yang mengandung *vortex* separasi yang mana *wake region* yang terbentuk tergantung pada besarnya angka *Reynold*. Semakin besar angka *Reynold* dan rasio perubahan luas penampang saluran, *wake region* yang terjadi akan semakin luas dan sebaliknya. Aliran yang melintasi *orifice* dapat dianalogikan dengan penelitian tentang benda pejal yang tercelup dalam aliran dan aliran yang melewati saluran dengan perluasan penampang pada *down stream region*. Pada *up stream region* akan timbul gaya *drag* yang mengakibatkan *vortex* balik dan pada *down stream region* seolah-olah aliran melintasi saluran dengan perluasan penampang yang mendadak sehingga aliran mengalami separasi. *Wake region* yang terbentuk sangat dipengaruhi oleh ukuran diameter lubang *orifice*. Semakin kecil diameter lubang *orifice*, semakin besar *wake region* yang terjadi dan hal ini mengindikasikan *coefficient of losses* yang semakin besar dan demikian pula sebaliknya. Hasil penelitian ini sangat sesuai dengan penelitian tentang benda tercelup dalam aliran dan aliran yang melintasi saluran dengan perluasan penampang secara mendadak, dimana perkembangan *boundary layer* paling cepat dihasilkan oleh ukuran diameter lubang *orifice* yang paling kecil.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa eksperimen yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Diameter lubang *orifice* yang paling kecil menghasilkan penurunan tekanan yang paling besar, karena terjadi *wake region* yang paling besar dimana dalam daerah ini terkandung *vortex* yang sangat besar. Setelah *vortex* tersebut hilang karena aliran telah mencapai relaksasi, *vorticity* yang dikandung oleh *vortex* tersebut menghasilkan akumulasi yang paling besar dengan

- vorticity* yang dikandung oleh aliran sehingga menghasilkan penurunan tekanan yang paling besar ke arah *down stream*.
2. Diameter lubang *orifice* yang paling kecil menghasilkan perkembangan *boundary layer* yang paling cepat ke arah *down stream* karena terjadi akumulasi *vorticity* yang paling kuat antara *vorticity* yang dikandung oleh *vortex* dan *vorticity* yang dikandung oleh aliran akibat adanya efek *viscous*.
 3. Efek *viscous* yang terjadi di dekat permukaan *solid* yang dialami oleh aliran dalam pergerakannya ke arah *down stream* mengakibatkan aliran fluida mengalami defisit massa. Diameter lubang *orifice* yang paling kecil menghasilkan defisit massa yang paling besar, karena *boundary layer* paling cepat berkembang.
 4. Diameter lubang *orifice* yang paling kecil juga menghasilkan defisit momentum yang paling besar karena adanya efek *viscous* di dekat permukaan *solid* yang dialami oleh aliran fluida dalam pergerakannya ke arah *down stream* sebagai akibat dari akumulasi *vorticity* yang paling kuat yang terbawa ke arah *down stream*.
 5. Diameter lubang *orifice* yang paling kecil juga menghasilkan intensitas turbulen yang paling kuat yang dialami oleh aliran fluida dalam pergerakannya ke arah *down stream*. Fenomena ini disebabkan oleh akumulasi *vorticity* yang sangat kuat, sehingga menghasilkan gerakan partikel fluida yang sangat acak dan transfer momentum partikel fluida yang paling besar antar *layer* yang terbawa ke arah *down stream*. Hal ini ditunjukkan oleh harga *shape factor* yang paling kecil. Semakin kuat intensitas turbulen yang dialami oleh aliran fluida mengakibatkan aliran semakin sulit untuk terseparasi.
 3. Walter R. Debler, *Fluid Mechanics Fundamentals*, Prentice Hall Inc., 1990.
 4. Okishi T. H., *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.
 5. Torii S. and Yang W. Jei, *Secondary Flow and Heat Transfer in an Axially Rotating Flow Passage with Sudden Expansion*, vol. 5, pp. 115-124, *Journal of Flow Visualization & Image Processing*, 1998.
 6. Sakamoto H., Moriya M., Taniguchi S., and Arie M., *The Form Drag of Three Dimensional Bluff Bodies Immersed in Turbulent Boundary Layers*, vol. 104, pp. 206-213, *Journal of Fluid Engineering*, 1982.

Penghargaan

Penghargaan istimewa untuk Dr. Ing. Herman Sasongko sebagai Ketua Program Pasca Sarjana Teknik Mesin ITS Surabaya dan pembimbing utama dalam penelitian ini

Daftar Pustaka

1. Robert W. Fox and Alan T. Mc. Donald, *Introduction to Fluid Mechanics*, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc., 1985.
2. Schlichting Hermann, Dr., *Boundary Layer Theory*, 7th edition, Mc. Graw Hill Company, 1978.