

Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Dua Buah *Guide Vane* terhadap *Pressure Drop* Aliran didalam *Rectangular Elbow 90°*

Sutardi, Wawan Aries W., dan Amir Hakim

Laboratorium Mekanika Fluida,

Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, Surabaya 60111

Phone/Fax: 031-592-2941; ¹Email: sutardi@me.its.ac.id

Abstrak

Salah satu permasalahan yang dijumpai dalam sistem perpipaan dengan elbow 90° adalah *pressure drop*. *Pressure drop* yang terjadi di dalam elbow 90° disebabkan oleh efek gesekan, efek separasi (2-D) dan aliran sekunder. Penambahan sudu pengarah (*guide vane*) merupakan salah satu metode untuk mengurangi efek separasi aliran, meskipun di sisi lain adanya *guide vane* akan meningkatkan efek gesekan. Penelitian ini dimaksudkan untuk mengkaji fenomena aliran di dalam elbow 90° dan pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *pressure drop*.

Model uji yang digunakan berupa *rectangular elbow 90°* dengan radius ratio (r_m/D_h) 1.875 tanpa dan dengan dua buah *guide vane*. Angka Reynolds yang digunakan berdasarkan diameter hidrolis, yaitu $Re_{DH} \approx 2.1 \times 10^4$ dan 8.4×10^4 . Variabel yang diukur adalah tekanan stagnasi dan tekanan statis. Tekanan stagnasi diukur menggunakan Pitot tube sedangkan tekanan statis diukur dengan wall pressure tap. Penelitian ini juga didukung dengan visualisasi aliran secara eksperimen menggunakan asap dengan $Re_{DH} = 2100$. Pada $Re_{DH} = 21000$ penambahan dua *guide vane* tidak dapat mengurangi *pressure drop*, sedangkan untuk $Re_{DH} = 84000$ penambahan dua *guide vane* dapat meningkatkan *pressure drop* sebesar 33%. Pada $Re_{DH} = 21000$ *pressure drop* yang terjadi lebih kecil daripada $Re_{DH} = 84000$. Distribusi kecepatan pada sebuah penampang melintang mengindikasikan adanya pengaruh yang signifikan dengan pemasangan *guide vane*.

Kata kunci: *Elbow 90°*, *guide vane*, *pressure drop*, aliran sekunder, visualisasi aliran.

1. Pendahuluan

Sistem perpipaan memegang peranan penting untuk mendukung proses di industri, seperti pada industri pembangkit listrik, sistem perkapalan dan kilang minyak. *Elbow 90°* merupakan komponen sistem perpipaan berupa saluran pipa melengkung. Aliran di dalam *elbow* mengalami *pressure drop* lebih besar daripada aliran di dalam pipa lurus dengan panjang ekivalen sama. Hal ini disebabkan karena aliran di dalam *elbow* selain mengalami kerugian akibat gesekan (*friction loss*) juga mengalami kerugian akibat separasi (*separation loss*) dan *secondary flow* (*secondary loss*). Secara tidak langsung *pressure drop* dapat mengurangi *head* aliran, sehingga daya yang dibutuhkan oleh instalasi seperti pompa, kompresor, atau fan akan meningkat. Oleh sebab itu usaha untuk mengurangi besarnya *pressure drop* menjadi hal yang penting untuk dilakukan.

Aliran di dalam *elbow 90°* mengalami separasi pada sisi *inner* dan *outer wall*. Separasi terjadi akibat ketidakmampuan aliran melawan *adverse pressure gradient*, sehingga sebagian aliran akan terpisah dan berbalik arah dari aliran utamanya dan akan membentuk *vortex*. Terbentuknya *vortex* dapat mengurangi energi aliran. Sedangkan terbentuknya aliran sekunder (*secondary flow*) di dalam *rectangular elbow 90°* akibat adanya interaksi *boundary layer* pada *endwall flow*, efek yang ditimbulkan oleh adanya *secondary flow* ini adalah terjadinya penyumbatan aliran (*blockage effect*). *Secondary flow* merupakan gerakan pemisahan aliran dari *outer wall* menuju *inner wall* karena distribusi tekanan pada sisi *outer wall* lebih besar daripada sisi *inner wall*, hal ini memungkinkan partikel fluida bergerak dari

outer wall menuju *inner wall*. Besarnya angka Reynolds sangat kuat mempengaruhi terbentuknya *secondary flow*.

Beberapa penelitian yang terkait dengan karakteristik aliran didalam *elbow* diantaranya dikaji oleh Kim dan Patel (1994) yang mengukur distribusi tekanan di sepanjang *inner* dan *outer wall elbow* 90°. Cheng (1994) melakukan kajian dengan cara menginjeksikan zat warna didalam pipa transparan untuk mengetahui adanya separasi (*detachment*) aliran pada sisi *inner* dan *outer wall elbow* 90°. Marn dan Primoz (2006) melakukan studi numerik untuk mengidentifikasi adanya *secondary flow* pada tiap posisi di di dalam *circular elbow* 90°.

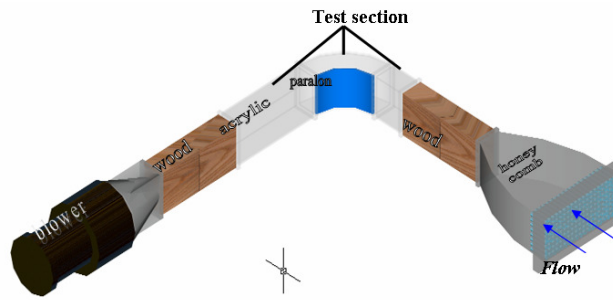
Salah satu usaha untuk mengurangi kerugian aliran di dalam *elbow* adalah dengan menambahkan sudu pengarah (*guide vane*). Penambahan *guide vane* sebagai usaha untuk mengurangi *separation loss*. Adanya *guide vane*, membuat aliran lebih mampu mengikuti kontur permukaan, dan diharapkan dari adanya penambahan *guide vane* dapat memecah terbentuknya *secondary flow*. Penelitian tentang *guide vane elbow* diantaranya dikaji oleh Liou dan Lee (2001), dimana mereka mengkaji pengaruh jumlah *guide vanes* pada *three-dimensional* (3-D) 60° bend terhadap komponen kecepatan longitudinal, radial dan *spanwise*. Kajian empiris dan analitis tentang pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *pressure drop* aliran pada *long radius rectangular elbow* 90° dengan variasi angka Reynolds belum banyak dilakukan. Oleh karena itu penelitian ini akan difokuskan tentang studi eksperimen pengaruh penambahan *guide vane* terhadap *pressure drop* aliran di dalam *rectangular elbow* 90° dengan *radius ratio* (R_m/D_h) 1.875, dan variasi angka Reynolds. Visualisasi aliran dengan menggunakan asap dapat memperjelas diskripsi aliran yang terjadi untuk kondisi di atas, dan dapat memberikan informasi tentang adanya *vortex* dan *secondary flow* di dalam *rectangular elbow* 90°.

2. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Mekanika Fluida Jurusan Teknik Mesin ITS. Peralatan penelitian berupa instalasi elbow dan perlengkapannya (Gbr. 1). Udara digerakkan oleh sebuah blower hisap dengan kapasitas 15 m³/menit dan putaran 2870 RPM. Udara dilewatkan sebuah *honey comb* untuk mengurangi derajat turbulensi. Model uji berupa elbow 90°, baik dengan dan tanpa *guide vane*. Radius kelengkungan dalam elbow sebesar 100 mm, sedangkan radius kelengkungan luar sebesar 150 mm. Penampang lintang elbow 5 cm horisontal dan 10 cm vertikal.

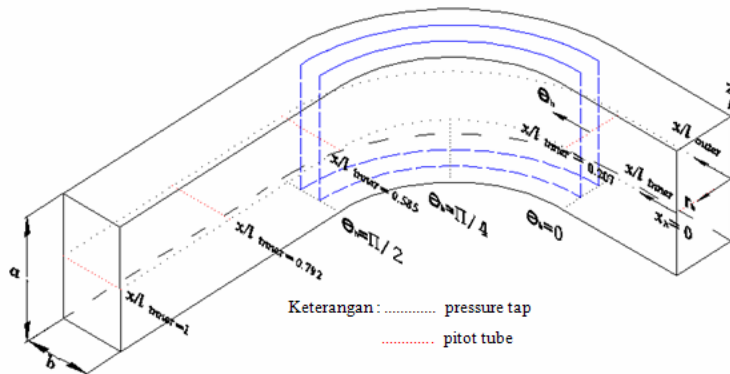
Pengukuran tekanan dilakukan menggunakan manometer miring yang diisi dengan minyak merah dengan $SG = 0.804$. Manometer tersebut dihubungkan baik ke *pressure tap* pada dinding *test section* (penampang uji) maupun pada Pitot tube, untuk mengukur kecepatan dan tekanan stagnasi. Sebuah *total pressure tube* dengan diameter luar sebesar 0.7 mm digunakan untuk memperoleh distribusi kecepatan pada penampang uji. Dalam eksperimen ini digunakan dua nilai kecepatan freestream, 5 dan 20 m/s, yang berkaitan dengan bilangan *Reynolds*, berdasar karakteristik panjang diameter hidrolis, sebesar 21000 dan 84000.

Metode visualisasi dilakukan dengan mengalirkan asap berkecepatan sekitar 0,5 m/s yang dilewatkan sepanjang *test section*. Gerakan asap tersebut direkam dengan kamera berkecepatan tinggi (~ 125 fps).

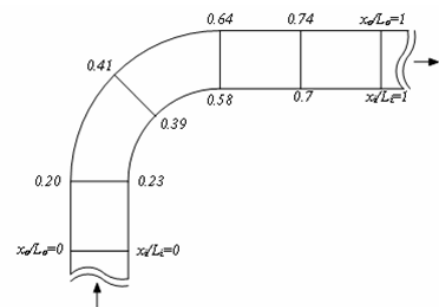


Gambar 1. Instalasi penelitian

Seperti ditunjukkan pada Gbr. 2, *wall pressure tap* dipasang di sepanjang dinding bagian tengah dari *test section* pada sisi *inner wall*, *outer wall* dan dinding bagian bawah *elbow*. Titik pengukuran tekanan statis dimulai dari titik yang berjarak 100 mm sebelum *upstream (inlet elbow)* sampai pada titik yang berjarak 200 mm sebelum *downstream (outlet elbow)*. Pada sisi *inner* dipasang 81 tap, sisi *outer* dipasang 98 tap dan di dinding bawah *elbow* dipasang 16 tap. Gambar 3 menunjukkan beberapa lokasi yang dikaji didalam studi ini searah streamline.



Gambar 2. Posisi pengukuran tekanan statis dan tekanan dinamis pada model uji.



Gambar 3. Lokasi-lokasi pengukuran pada seksi uji

3. Hasil Penelitian dan Analisa

- Distribusi tekanan (C_p)

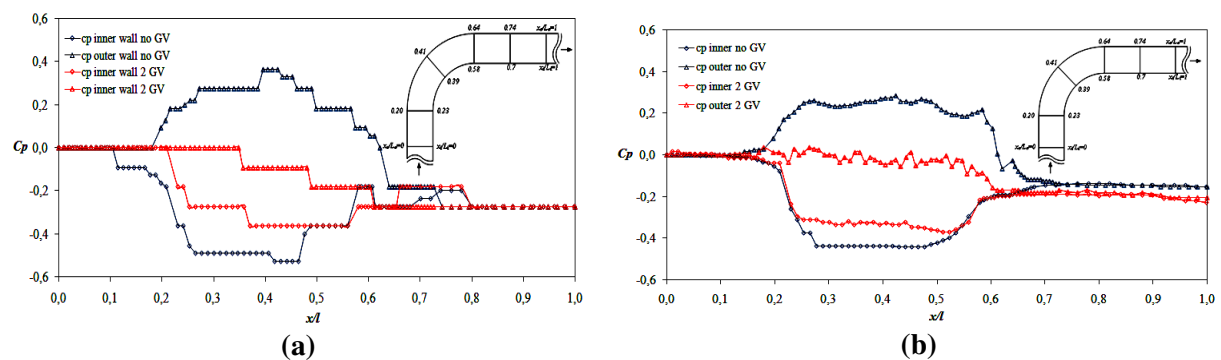
Gambar 4 menunjukkan distribusi *wall pressure coefficient* (C_p) di *midspan* dinding *inner* dan *outer* untuk bilangan Reynolds sebesar 21000 dan 84000 elbow tanpa dan dengan *guide vane*. Penambahan dua *guide vanes* memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap distribusi C_p , hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan *guide vane* secara signifikan pula mempengaruhi karakteristik aliran di sepanjang *test section*. Hal lain yang dapat diamati dari Gbr. 4 adalah posisi penunjukan harga C_p di sisi *inner* dan *outer* lebih cepat menunjukkan nilai yang sama dibandingkan dengan tanpa *guide vane*. Posisi penunjukan harga C_p yang sama untuk *elbow* dengan dua *guide vane* berturut-turut untuk bilangan Reynolds sebesar 21000 dan 84000 adalah $L = 250$ (tepat outlet elbow) dan $L = 283$ dari outlet elbow, sedangkan untuk *elbow* tanpa *guide vane* dan $L = 326$ mm dan $L = 326$ mm dari outlet elbow berturut-turut untuk bilangan Reynolds berurutan. Hal ini menguatkan sebuah pernyataan bahwa efek penambahan *guide vane* dapat mengurangi pengaruh keberadaan *elbow*. Sebuah aliran fluida mengalir pada sebuah saluran lengkung (*curvature duct*) dengan *radius ratio* (r/b) yang lebih besar maka seolah-olah aliran itu melewati saluran lurus, karena pada hakikatnya saluran lurus merupakan saluran lengkung dengan radius tak berhingga (∞). Begitu pula dengan adanya penambahan *guide vane* adalah dalam rangka memperbesar *radius ratio* (r/b), dimana r didefinisikan

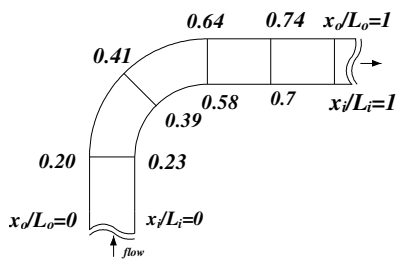
sebagai radius kelengkungan sedangkan b adalah jarak antar *boundary solid surface* yang melingkupi fluida.

Dari pemaparan di atas, secara sepihak menunjukkan efek positif penambahan *guide vane*, namun di lain pihak penambahan *guide vane* memberikan efek negatif yaitu memperluas bidang gesek, yang tentunya mengambil peran yang besar pula sebagai penyebab terjadinya *pressure drop* aliran. Untuk mengetahui efek dominan dari penambahan *guide vane* dibuktikan secara kuantitatif dengan mengkalkulasi harga *pressure drop*. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa harga *pressure drop* aliran yang direpresentasikan dengan selisih *pressure coefficient* (ΔC_p) tanpa *guide vane* untuk $Re = 21000$ dan $Re = 84000$ berturut turut adalah $\Delta C_p = 0.182$ dan $\Delta C_p = 0.1593$ pada *elbow* dengan dua buah *guide vane* untuk $Re = 21000$ dan $Re = 84000$ berturut turut adalah $\Delta C_p = 0.182$ dan $\Delta C_p = 0.213$ jika dibandingkan dengan *pressure drop* yang dihasilkan oleh *elbow* tanpa *guide vane*, bahwa pada $Re = 21000$ dengan penambahan dua *guide vane* tidak mengurangi besarnya *pressure drop*, sedangkan untuk $Re = 84000$ penambahan dua *guide vane* dapat menaikkan besar *pressure drop* sebesar 33%.

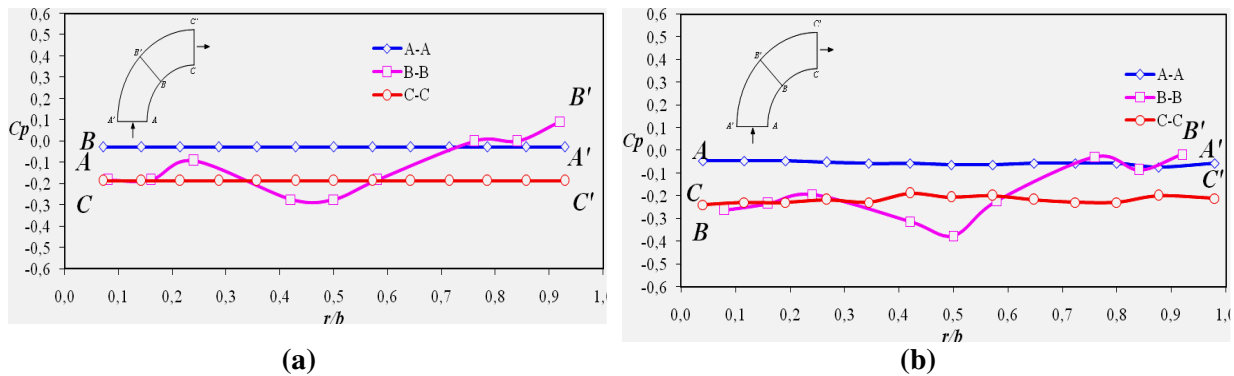
Penambahan *guide vane* memberikan pengaruh terhadap grafik C_p searah radial pada ketiga section tersebut (Gbr 5). Grafik C_p posisi tepat masuk dan tepat keluar *elbow* mempunyai *gradient* yang lebih kecil daripada *elbow* tanpa *guide vane*, hal ini mengindikasikan bahwa penambahan *guide vane* membuat profil kecepatan menjadi lebih *uniform* baik pada posisi *inlet* maupun *outlet elbow* sedangkan pada $\theta = 45^\circ$ *elbow* tidak lagi mengikuti persamaan Euler, karena konfigurasi grafiknya terbagi menjadi tiga daerah, yaitu daerah 1, 2 dan 3, masing-masing mempunyai sisi *inner* dan *outer*. Daerah 1, sisi *inner*-nya adalah dinding *inner elbow* sedangkan sisi *outer* adalah dinding *guide vane*, pada posisi pertama C_p mengalami kenaikan sampai mencapai dinding *guide vane*. Sedangkan pada daerah 2 sisi *inner* adalah dinding *guide vane* dekat dinding *inner* sedangkan sisi *outer* adalah *guide vane* dekat dinding *outer elbow*. Pada posisi pertama C_p mengalami penurunan sampai pada posisi *center* dari daerah 2, kemudian naik sampai mencapai posisi dinding *outer elbow*. Pada daerah 3 *trend* yang didapatkan sama dengan pada daerah 2 hanya saja harga C_p lebih besar dibanding harga C_p daerah 1 dan 2.

Nilai *pressure drop* tak berdimensi (ΔC_p) aliran sebagai parameter utama digunakan untuk melihat pengaruh penambahan *guide vane*. Koefisien minor losses yang dihitung berdasar *pressure drop* yang terjadi dirangkum pada Tabel I.





Gambar 4. Distribusi wall pressure coefficient (C_p) inner dan outer wall elbow tanpa guide vane untuk $Re_{DH} = 21000$ (a) dan 84000 (b).



Gambar 5. Distribusi wall pressure coefficient (C_p) searah normal/radial, pada tiga section (A-A', B-B', C-C') a). $Re_{DH} = 21000$, b). $Re_{DH} = 84000$.

- Distribusi kecepatan (u)

Gambar 6 dan 7 memperlihatkan perbandingan distribusi profil kecepatan dari *upstream* sampai *downstream elbow* dengan dan tanpa dua *guide vane* untuk $Re_{DH} = 21000$ dan $Re_{DH} = 84000$. Profil kecepatan diukur pada enam section dengan posisi sama dengan kecepatan pada *elbow* tanpa *guide vane*. Profil kecepatan pada section 1 (Gbr. 6a dan 7a) menunjukkan bentuk yang sama seperti profil kecepatan pada *elbow* tanpa *guide vane*. Profil kecepatannya menunjukkan profil *uniform*. Profil kecepatan pada section 2 (Gbr. 6b dan 7b) mempunyai kecenderungan terdefleksi ke sisi *inner*. Dari profil kecepatan ini belum terlihat pengaruh keberadaan *guide vane*, karena pengukuran dilakukan pada posisi 10 mm sebelum *guide vane*. Namun dari profil ini dapat diidentifikasi kecenderungan aliran lebih memilih untuk melewati ruang 1 daripada ruang 2 dan ruang 3. Ruang 1 adalah ruang yang dibatasi oleh *solid surface inner elbow* dan *guide vane*, sedangkan ruang 2 adalah ruang diantara dua *guide vane* dan ruang 3 adalah ruang diantara *solid surface outer elbow* dan *guide vane*. Adanya kecenderungan profil kecepatan yang berdefleksi ke sisi *inner* mengindikasikan bahwa aliran fluida lebih memilih untuk masuk ke ruang 1. Sesuai dengan perilaku aliran bahwa fluida yang akan mengalir dari daerah *favorable pressure gradient*.

Tabel 1. Koefisien *Minor losses*

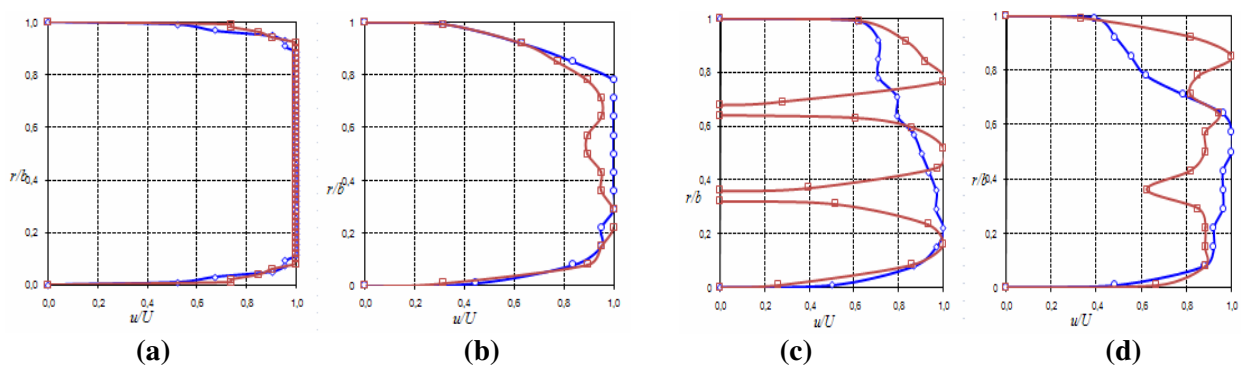
Rectangular elbow 90° $r/D_H = 1.875$	Koefisien <i>minor losses</i> (K)	
	$Re_{DH} = 21000$	$Re_{DH} = 84000$
Elbow tanpa <i>guide vane</i>	0.2731	0.1536
Elbow dengan 2 <i>guide vane</i>	0.2731	0.2162

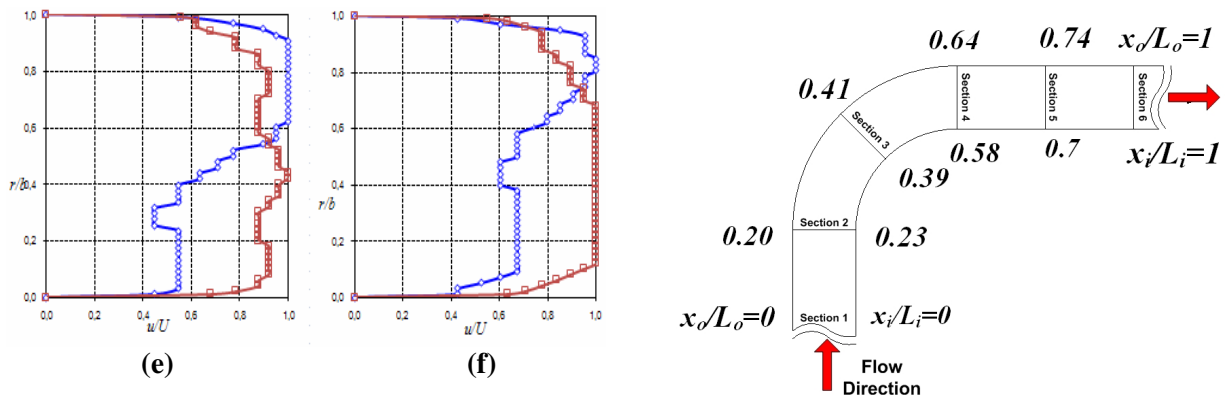
Pada *section 3* (Gbr. 6c dan 7c) terbentuk tiga profil kecepatan pada masing-masing ruang. Ketiga profil kecepatan tidak sepenuhnya menunjukkan profil kecepatan yang *uniform*. Adanya pengaruh kelengkungan nampak pada bentuk profil kecepatannya, kecepatan cenderung untuk terdefleksi ke sisi *inner*, meskipun kecepatan maksimum masih berada di sekitar *centerline*-nya. Hal ini disebabkan karena pada sisi *inner* tekanannya minimum, sehingga aliran fluida lebih memilih untuk berada pada posisi ini. Kecepatan rata-rata paling besar terletak pada ruang 1, hal ini menguatkan dugaan bahwa aliran fluida lebih memilih untuk memasuki ruang 1 dimana tekanannya minimum.

Pada *section 4* (Gbr. 6d dan 7d) ditunjukkan profil kecepatan setelah menyusuri *guide vane*. Pertemuan aliran dari ruang 1, 2 dan 3 dipisahkan oleh daerah berkecepatan minimum, yang populer dikenal sebagai istilah *wake*. *Wake* terbentuk tepat di sekitar *trailing edge guide vane* dengan kecepatan rendah. Pada *section* empat atau pada sisi *outlet elbow* ini secara jelas *mean velocity* bergeser ke sisi *outer*. Pengukuran dilakukan pada posisi 10 mm setelah *guide vane*. Jarak yang relatif kecil ini memungkinkan aliran fluida berdefleksi ke sisi *outer*, karena sisi *outer* berada pada daerah *favorable pressure gradient* sedangkan sisi *inner* berada pada daerah *adverse pressure gradient*.

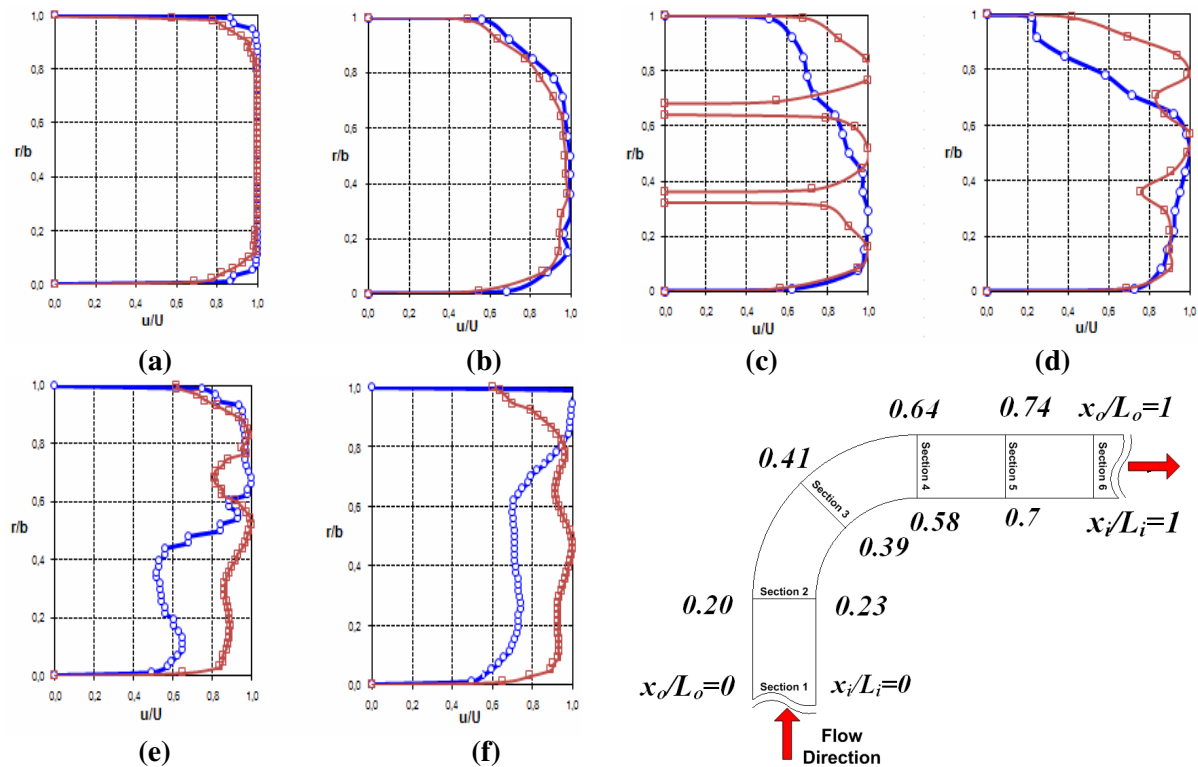
Pada *section 5* (Gbr. 6e dan 7e) ditunjukkan profil kecepatan yang sedang mengalami *recovery* untuk menyetabilkan aliran setelah melewati *wake*, ditandai dengan bergesernya posisi kecepatan minimum yang semula di *centerline* menuju ke atas. Kecepatan pada sisi *inner* menunjukkan profil yang mengurus dengan terus menggeser kecepatan minimum ke sisi *outer*, dan untuk menyeimbangkan profil di sisi *outer* terdesak. Pada *section 6* (Gbr. 6f dan 7f), profil menunjukkan kelanjutan dari proses *recovery*, kecepatan minimum semakin keatas untuk mendesak kecepatan maksimum pada sisi *outer*, sedangkan profil kecepatan pada sisi *inner* semakin mengurus, untuk $Re = 84000$ dapat diketahui bahwa akan muncul profil baru di sisi *inner* sebagai hasil dari proses terdesaknya kecepatan minimum menuju *outer*, dan terdesak profil di sisi *outer*.

Secara umum dapat dijelaskan bahwa penambahan dua *guide vane* belum mampu untuk membuat kecepatan *outlet elbow* sepenuhnya menjadi *uniform*, perlu jarak tertentu untuk mencapai *recovery* (pengembalian) profil kecepatan. Penambahan *guide vane* membuat profil kecepatan saat melintasi *elbow* sesaat *uniform*, namun setelah menuju *outlet elbow*, keberadaan *guide vane* juga memberikan efek terhadap karakteristik aliran.





Gambar 6. Distribusi profil kecepatan elbow dengan dan tanpa dua guide vane untuk $Re_{DH} = 21000$ pada section a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; f) 6



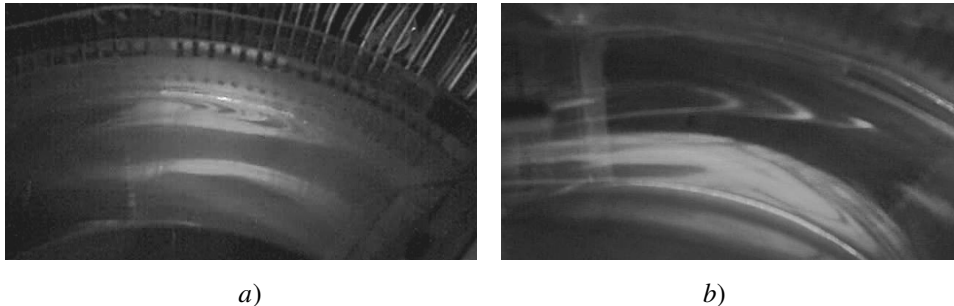
Gambar 7. Distribusi profil kecepatan elbow dengan dan tanpa dua guide vane untuk $Re_{DH} = 84000$ pada section a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; f) 6

- Hasil Visualisasi Asap

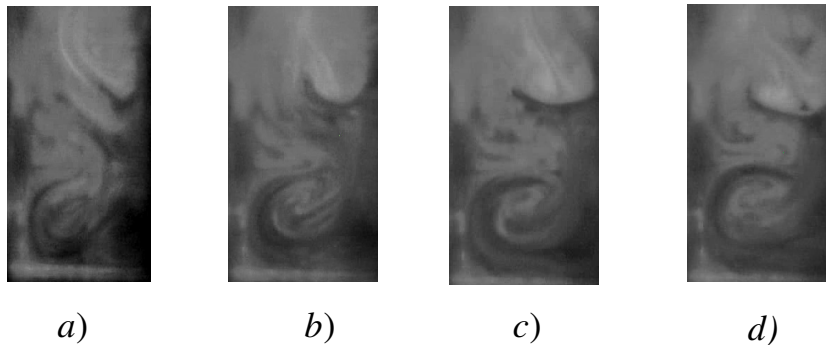
Gambar 8 menunjukkan hasil visualisasi asap untuk mengidentifikasi adanya separasi aliran di sisi *outer* dan *inner wall elbow*. Bentuk fisik dari separasi aliran berupa *vortex* yang berputar searah jarum jam (*clock wise*). *Vortex* ini merupakan aliran yang terjebak diantara *mainstream flow*, sehingga sebagian momentum yang dibawa aliran berkurang. Oleh karena itu fenomena separasi sangat erat kaitannya dengan *pressure drop* aliran.

Gambar 9 menunjukkan hasil visualisasi asap untuk mengidentifikasi keberadaan aliran sekunder yang disebabkan oleh perbedaan distribusi energi di sisi *outer* dan *inner* yang diamati pada *section 6*. Gambar – gambar yang ditampilkan pada bagian ini merupakan gambar sesaat (*frame*) yang diambil dari gambar – gambar bergerak (*movies*) sehingga bersifat *instantaneous*. Gambar – gambar ini disajikan per *sequence time* supaya dapat diamati pola perkembangannya. Pada sisi *cross section*

terlihat sebuah *vortex* yang berpusar di bagian *lower*. Dari waktu ke waktu *vortex* ini terlihat semakin jelas. Gerakan *vortex* ini berasal dari sisi *outer* menuju sisi *inner*, dari sisi *inner* menuju ke sisi *outer* lagi begitu seterusnya.



Gambar 8. Separasi aliran elbow tanpa guide vane di sisi a) Outer wall; b) Inner wall.



Gambar 9. Vortex di sisi cross section 6 persquence time a) $t = 0.07$ s; b) 0.13 s; c) 0.20 s; d) 0.27 s.

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisa kuantitatif dan kualitatif dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Pada *elbow* tanpa *guide vane* distribusi *wall pressure coefficient* (C_p) di posisi 0° , 45° dan 90° *elbow* mempunyai kecenderungan naik seiring dengan jari-jari kelengkungan, sedangkan pada *elbow* dengan dua *guide vane* kecenderungan grafiknya naik, turun dan naik kembali.
- 2) Tabel I menunjukkan bahwa penurunan konstanta minor losses (K) terjadi hanya pada penambahan satu *guide vane* dan terjadi pada $Re_{DH} = 21000$. Penambahan satu *guide vane* untuk $Re_{DH} = 84000$ justru memperbesar harga K , sementara penambahan dua *guide vane* tidak berkontribusi dalam penurunan harga K pada kedua harga Re_{DH} .
- 3) Profil – profil kecepatan baik pada $Re_{DH} = 21000$ maupun 84000 tidak menunjukkan adanya indikasi separasi aliran.
- 4) Dengan menggunakan bilangan *Reynolds* lebih rendah daripada bilangan *Reynolds* pada eksperimen, yaitu 21000 , hasil visualisasi asap menunjukkan adanya separasi aliran di sisi dinding *inner* dan *outer*.
- 5)

Ucapan Terima kasih

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya disampaikan kepada pemerintah Indonesia dengan dana Bank Dunia melalui Program I-MHERE yang dipercayakan kepada ITS sehingga tersedianya dana untuk penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Cheng, D.Y., 1994, Laminar Flow Elbow System and Method, *U.S. Patent Documents*, No. 5, 323-661.
- Kim, W.J. & Patel, C., 1994, Influence Of Streamwise Curvature On Longitudinal Vortices Imbeded In Turbulent Boundary Layers, *J. Computer Fluid*, vol. 23, 647-673.
- Liou, T.M. & Lee, H.L., 2001, Effects of Guide-Vane Number in a Three-Dimensional 60 Deg Curved Side-Dump Combustor Inlet, *J. Fluid Engineering*, vol 123, 211-218.
- Marn, J. & Primoz, T., 2006, Laminar Flow of Shear-Thickening Fluid in 90° Pipe Bend, *Fluid Dynamics Research*, vol 38, no. 5, 295-312.