

DISTRIBUSI TEKANAN AKIBAT EFEK SECONDARY FLOW DAN SEPARASI PADA INNER WALL DARI RECTANGULAR ELBOW

Sugeng Tirta Atmaja, Khoiri Rozi*

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

*E-mail: paman_rozi@yahoo.com

ABSTRAK

Studi ini dibuat untuk menguji karakteristik aliran yang melewati elbow. Hasil-hasil pengukuran tekanan statis pada daerah inner surface menunjukkan bahwa aliran pada sisi upstream mengalami akselerasi secara gradual dan kemudian melewati convex wall/suction side, kondisi aliran dipercepat secara tajam sampai di $\theta = 45^\circ$. Kondisi aliran menuju downstream saluran menunjukkan bahwa aliran diperlambat secara gradual sampai pada exit saluran di $x/L = 1,0$ dimana aliran mengalami separasi.

Kata kunci: *angle of attack, blockage effect, saddle point, separation line, imprint horseshoe vortex.*

PENDAHULUAN

Aliran sekunder dan separasi merupakan fenomena fisis yang sering muncul ditemukan dalam aliran fluida. *Secondary flow* merupakan bentuk aliran yang arahnya orthogonal terhadap arah aliran utama. Munculnya secondary flow disebabkan karena adanya interaksi fisis antara lapisan batas (*boundary layer*) dan *pressure gradient* pada permukaan dinding-dinding yang berdekatan. Keberadaan aliran ini menyebabkan instabilitas pada aliran utama (*primary flow*). Sedangkan, separasi merupakan terangkatnya *boundary layer* meninggalkan permukaan karena aliran mengalami *defisit momentum* dan *losses kinetic energy* akibat *adverse pressure gradient*. Dalam engineering, munculnya kedua fenomena tersebut dapat ditemukan pada aliran melalui interaksi *wing-fuselage* pesawat terbang, aliran pada sambungan *blade-hub* mesin-mesin fluida famili *turbomachinery*, aliran pada *sail-hull* kapal, aliran pada interaksi *briade-piers*, aliran dalam saluran dan aliran melewati saluran sejenisnya.

Sejumlah implikasi muncul karena formasi aliran ini. Adanya *multiple vortex* pada aliran melewati *wing-fuselage* menjadikan *blockage* dan *disturbance* yang berdampak pada performa aerodinamis *lift/drag* dan stabilitas penerbangan. Meningkatnya laju perpindahan panas, *wall shear stress* dan fluktuasi tekanan pada *blade-hub* karena *horseshoe vortex* secara langsung mempengaruhi efisiensi mesin. Keberadaan aliran sekunder pada *sail-hull* mempengaruhi *wake* yang akan mengurangi performa propelle. Munculnya *local erosion* karena *scouring* dan *sediment transport* pada konstruksi menjadikan tanah dan bebatuan fondasi terkikis meninggalkan dasar jembatan. Kondisi demikian dapat memperlemah konstruksi dan akhirnya membuat collapse-nya jembatan. Demikian separasi dan *secondary flow* pada saluran menyebabkan penyumbatan sehingga mengurangi *flow rate*.

Cuming [1] secara analitis mengkaji keberadaan *secondary flow* menyimpulkan bahwa *secondary flow* pada *square pipe* lebih kuat daripada dalam *circular pipe*. Stewartson dkk [2] mengkaji fenomena tumbukan

boundary layer menunjukkan adanya *collision structure* dalam *inner wall*. Dengan tinjauan sama seperti [1,2], Dey [3] menganalisa *secondary boundary layer* dan *shear stress* mendapatkan bahwa *thickness* dari *secondary boundary layer* pada dinding *outer pipe* meningkat secara gradual, kemudian tumbuh cepat pada titik separasi *secondary boundary layer*. Beliau juga mendapatkan *wall shear stress* meningkat terhadap□ pada *outer pipe* kemudian menurun mencapai minimum pada titik separasi *secondary boundary layer*. Wilson [4] mengkajian seperti [1-3] untuk *turbulent boundary layer* memperoleh bahwa aliran *boundary layer* saat masuk akan memisah menjadi *core flow* dan *turbulent component*.

Secara eksperimental beberapa kajian aliran dalam *curved duct* dilakukan oleh Patel [5], Meroney and Bradshaw [6], Enayet dkk [7], Sudo dkk [8], Mandal dkk [9] dan Abhari dkk [10]. Patel [5] menguji pengaruh kelengkungan saluran terhadap *turbulent boundary layer* menemukan bahwa kelengkungan dapat mengurangi *entrainment*. Pertumbuhan *turbulent boundary layer* dikaji oleh Meroney and Bradshaw [6]. Mereka mendapatkan bahwa *shaer stress* dalam *convex surface* turun drastis pada daerah *near wall*. Enayet dkk [7] dengan Laser Doppler mengukur tekanan statis pada permukaan berhasil menunjukkan perkembangan tekanan yang disebabkan adanya *secondary flow* dalam bentuk sepasang counter-rotating vortex arah aliran. Kekuatan dan karakter *secondary flow* ini ditemukan bergantung pada *thickness* dan kondisi inlet boundary layer. Sudo dkk [8] dalam kajian seperti [5,6] untuk aliran turbulen mendapatkan bahwa *secondary flow* intensitasnya naik secara signifikan pada *bend exit* dan kemudian perlahan-lahan melemah pada lokasi jauh dari *streamwise downstream*. Mandal dkk [9] dari eksperimennya berkesimpulan bahwa resirkulasi terbentuk pada daerah sekitar *corner* sesaat setelah terjadi separasi aliran. Ditemukan panjang separasi bubble meningkat seiring kenaikan *Re*. Abhari dkk [10] membuat kajian eksperimen dan numerik menemukan

bahwa pola aliran di dalam bend sangat dipengaruhi oleh keberadaan secondary flow dan gaya sentrifugal.

Kajian numerik aliran melewati *curved duct* dilakukan Lopez dan Oberkampf [11], Raisee dkk [12], Sheu dan Tsai [13,14] dan Rudolf dan Desova [15]. Lopez dan Oberkampf [11] secara numerik mengkaji pola aliran laminar pada *curved duct* berkesimpulan bahwa aliran dalam saluran didominasi oleh adanya *secondary flow*, *longitudinal vortex* dan *reverse flow*. Raisee dkk [12] dalam investigasinya mengenai pertumbuhan aliran turbulen berkesimpulan bahwa dampak *curvature* dari *square bend* menginduksi gerakan *secondary flow* lebih kuat dibandingkan dari *rectangular bend*. Sheu dan Tsai [13,14] secara bersama-sama mencoba mensimulasikan topologi aliran dalam *curved duct*. Hasil-hasil kajian mereka menyimpulkan bahwa pada sudut 0° sampai 40° aliran dekat *outer wall* diperlambat karena *adverse pressure gradient*, dan dipercepat pada *suction side* karena *favourable pressure gradient*. Dengan pendekatan seperti [11-14], Hasil simulasi Rudolf dan Desova [15] menunjukkan dissipasi energi aliran dalam *curved duct* berasal dari mutual transformation antara kinetics dan pressure energy akibat interaksi centrifugal force.

METODE PENELITIAN

Metode Eksperimen

Eksperimen pertama mengukur besarnya tekanan statis pada *inner* dan *outer surface*. *Pressure tap* dibuat sepanjang *convex* dan *concave wall* dengan menghubungkan selang ke manometer. Tekanan terbaca pada manometer sebagai beda ketinggian sebelum dan sesudah apparatus dioperasikan. Kecepatan dinyatakan sebagai *Reynold number* dengan persamaan:

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} D_h}{\mu} \quad (1)$$

Dimana Re adalah Reynold number, ρ (Kg/m^3) adalah densitas udara sebagai fluida kerja, U_{∞} (m/s) adalah kecepatan *free stream* udara dan μ (Pa/m/s) adalah viskositas dinamik udara. D_h adalah diameter hidrolis *rectangular elbow* yang dinyatakan dalam persamaan:

$$D_h = \frac{ab}{2(a+b)} \quad (2)$$

Dengan a = tinggi penampang saluran dan b = lebar penampang saluran. Koefisien tekanan statis dinyatakan dalam persamaan:

$$C_p = \frac{P_s - P_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2} \quad (3)$$

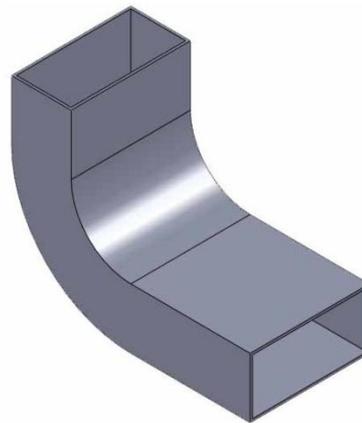
Dimana C_p = koefisien *static pressure recovery*, P_s = Tekanan statis local (Pa), P_{∞} = Tekanan stagnasi aliran (Pa), ρ = densitas udara (Kg/m^3), U_{∞} = Kecepatan *free stream* (m/s).

Eksperimen kedua dilakukan dengan teknik *surface flow visualization* (SFV) untuk melihat *limiting*

streamline akibat separasi tiga dimensi (3D). Visualisasi menggunakan campuran *titanium dioxide* (TiO_2), *thinner* dan *oleic acid* (asam oleat). Campuran homogen dioleskan pada permukaan uji. Prosedur pengambilan visualisasi sebagai berikut: (i) Membuat campuran homogen *titaniumdioxide*, *thinner* dan *oleic acid* atau *palm oil* dengan perbandingan 2:5:1. (ii) Memoleskan campuran pada permukaan yang divisualisasi. (iii) Memasang model dan menghidupkan apparatus. (iv) Mematikan apparatus kemudian mengambil gambar pola visualisasi.

Model/Saluran Uji

Model uji adalah *curved duct* dengan dengan dimensi penampang 50 mm x 100 mm, diameter dalam 50 mm dan diameter luar 100 mm. Sepanjang bagian tengah saluran dibuat *pressure tap* untuk mengukur tekanan statis. *Tap-tap* ini dihubungkan dengan selang ke pipa-pipa manometer untuk mengukur tekanan. Model dan lokasi pengukuran seperti Gambar 1.

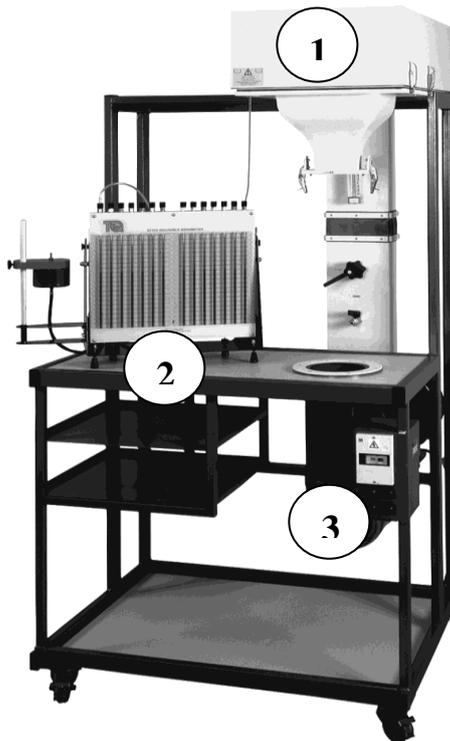


Gambar 1. Model 90° Curved Duct

Wind Tunnel dan Alat Ukur

Eksperimen dilakukan di Laboratorium Thermofluida, Jurusan Teknik Mesin UNDIP menggunakan Airflow Bench. Alat ini adalah jenis *open wind tunnel* dengan penampang 50 mm x 100 mm. Airflow Bench berfungsi untuk menguji performance saluran yang secara khusus untuk fenomena internal flow dengan menggerakkan aliran udara kedalam model test. Dalam apparatus terdapat nosel digunakan untuk menaikkan kecepatan aliran *free stream* sebelum masuk lokasi pengukuran. Sebelum masuk nosel, udara melalui *honeycomb* supaya aliran *uniform* dalam *settling chamber*.

Manometer berfungsi untuk mengambil data tekanan statis saluran dengan mencatat perbedaan ketinggian pipa manometer sebelum dan sesudah apparatus dioperasikan. Motor Listrik berfungsi menggerakkan Fan yang akan menyuplai aliran udara ke lorong pengujian. Komponen-komponen utama dalam peralatan uji ini diperlihatkan dalam gambar 4 di bawah: 1. Airflow Bench. 2. Manometer, 3. Motor Listrik.



Gambar 2. Apparatus Airflow Bench

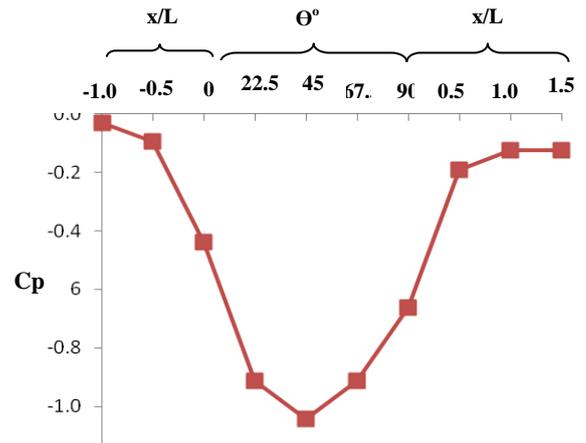
HASIL EKSPERIMEN

Distribusi Tekanan pada Inner Wall

Hasil-hasil pengukuran tekanan statis pada *convex wall* diplot seperti grafik gambar 5. Kecendrungan pola dan karakteristik aliran untuk ketiga pengukuran sama. Hal ini ditandai dengan bentuk grafik distribusi tekanan ketiganya adalah identik. Analisa melalui grafik C_p ini dapat dibagi menjadi tiga lokasi daerah pengukuran, yaitu daerah *upstream* (inlet saluran), daerah *convex surface* dan daerah *downstream* (exit saluran).

Daerah Upstream, $x/L = -1.0 - x/L = 0.0$

Pada lokasi upstream berangkat dari $x/L = -1,0$ aliran mengalami percepatan secara gradual sampai di titik $x/L = -0,5$. Momentum aliran cukup kuat untuk mengatasi gaya viskos aliran. Energi kinetis aliran meningkat cukup signifikan sehingga mampu membawa aliran dalam kondisi *favorable*, dimana tekanan mengalami penurunan arah aliran. Kondisi aliran mengalami percepatan lagi secara tajam dari titik pengukuran di $x/L = -0,5$ sampai menuju inlet belokan pada $x/L = 0,0$ ($\Theta = 0^\circ$), dalam daerah ini momentum aliran sangat besar sehingga energi kinetis aliran cukup kuat untuk mengalir memasuki saluran secara smooth karena dalam daerah *favorable pressure gradient*. Untuk pengukuran Re yang berbeda, tidak ditemukan perbedaan signifikan pada daerah *upstream* ini.



Gambar 3. Grafik profil koefisien tekanan statis pada Inner Surface

Daerah Convex Surface, $\Theta = 0^\circ - \Theta = 90^\circ$

Pada *convex wall* dari lokasi titik pengukuran di $\Theta = 0^\circ$ sampai $\Theta = 22,5^\circ$, aliran mengalami percepatan cukup tajam, ini menjadikan penurunan tekanan aliran cukup signifikan. Momentum aliran bertambah kuat untuk mengatasi efek viskos, akibatnya energi kinetis aliran mampu membawa aliran secara nyaman mengikuti lintasan *convex wall*. Dari grafik terlihat aliran mengalami percepatan lagi dari titik $\Theta = 22,5^\circ$ sampai $\Theta = 45^\circ$, dalam daerah ini penurunan aliran tidak setajam pada lokasi dari $\Theta = 0^\circ - \Theta = 22,5^\circ$. Kondisi ini, aliran pada situasi *favorable pressure gradient*. Pada titik $\Theta = 45^\circ$ kecepatan aliran mencapai maksimum. Setelah melewati titik $\Theta = 45^\circ$, aliran seolah-olah dipaksa melewati diffuser, aliran mengalami perlambatan sampai $\Theta = 67,5^\circ$. Momentum aliran berkurang karena menghadapi kenaikan *adverse pressure gradient*. Energi kinetis aliran menurun seiring dengan kenaikan tekanan.

Kemudian, mulai dari $\Theta = 67,5^\circ$ aliran mengalami perlambatan sekali lagi cukup besar sampai di $\Theta = 90^\circ$, ini mengindikasikan kuatnya *adverse pressure gradient* yang dialami aliran. Momentum aliran tidak mampu menghadapi kuatnya kenaikan tekanan sehingga diperkirakan energi kinetis aliran berkurang cukup besar.

Daerah Downstream, $x/L = 0.0 - x/L = 1.5$

Hasil-hasil pengukuran pada lokasi daerah downstream menunjukkan pada daerah $x/L = 0$ ($\Theta = 90^\circ$) sampai di $x/L = 0,5$ aliran mengalami perlambatan cukup kuat. Adanya penurunan momentum aliran secara drastis pada daerah ini, sehingga energi kinetis aliran tidak mampu mengimbangi kuatnya peningkatan *adverse pressure gradient*. Dari titik $x/L = 0,5$ sampai $x/L = 1,0$ aliran mengalami perlambatan lagi, namun tidak sekuat pada daerah sebelumnya. Diperkirakan aliran mengalami sedikit recovery tekanan. Dari titik pengukuran $x/L = 1,0$ aliran mulai terseparasi. Hal ini ditandai dengan tidak adanya perubahan tekanan menuju lokasi $x/L =$

1.5. Untuk ketiga pengukuran dengan Re berbeda hampir diperoleh titik lokasi keberangkatan separasi yang sama di $x/L = 1,0$.

KESIMPULAN

Hasil-hasil pengukuran pada inner wall diperoleh bahwa perilaku aliran fluida pada sisi upstream mengalami akselerasi secara gradual dan kemudian melewati convex wall/suction side, kondisi aliran dipercepat secara tajam sampai di $\Theta = 45^\circ$, kemudian menuju downstream saluran, aliran diperlambat secara gradual sampai pada exit saluran di $x/L = 1,0$ dimana aliran mengalami separasi.

DAFTAR PUSTAKA

1. Cuming, H. G., "The Secondary Flow in Curved Pipes", Aeronautical Research Council, Reports and Memoranda No. 2880, London, 1955.
2. Stewartson K., Cebeci T., and Chang K. C., "A Boundary layer Collision in Curved Duct", Q. Jl Mech Appl Math, Vol XXXIII, Pt. 1, 1980.
3. Dey S., "Secondary boundary layer and wall shear for fully developed flow in curved pipes", *Proc. R. Soc. Lond. A* (2002) 458, 283–298.
4. Wilson P. L., "On the Core Flow and Turbulent Boundary Layer in a Curved Duct", PhD Thesis University of London, 2003.
5. Patel, V. C., "The Effects of Curvature on the Turbulent Boundary Layer", Aeronautical Research Council, Reports and Memoranda No. 3599*, London, 1969.
6. Meroney, R. N and Bradshaw, P., "Turbulent Boundary Layer Growth Over a Longitudinally Curved Surface", *AIAA Journal*, vol. 13, No. 11, pp. 1448-1453, 1975.
7. Enayet, M. M., Gibson, A. M. M. M., Taylor, K. P., and Yianneskis, M., "Laser-Doppler measurements of laminar and turbulent flow in a pipe bend", *Int. J. Heat & Fluid Flow* 0142-727X/82/030213-075.
8. Sudo K., Sumida M., and Hibara H., "Experimental Investigation on Turbulent Flow in a Square-Sectioned 90-Degree Bend", *Experiments in Fluids* (30) 246-252 Springer-Verlag, 2001.
9. Mandal A., Bhattecharjee S., Debnath R., Roy D., and Majumder S., "Experimental Investigation of Turbulent Fluid Flow through a Rectangular Elbow", *International Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 2(6), 2010, 1500-1506.
10. Abhari, M. N., Ghodsiana, M., Vaghefi, M., and Panahpur, N., "Experimental and numerical simulation of flow in a 90° bend", *Flow Measurement and Instrumentation* 21 (2010) 292–298.
11. Lopez A. R and Oberkampf W. L., "Numerical Simulation of Laminar Flow in a Curved Duct", *AIAA Paper* 95-0865, 1995.
12. Ráisee M., Alemi H., and Lacovides H., "Prediction of Developing Turbulent Flow in 90°-Curved Ducts Using Linear and Non-Linear Low- Re k - ϵ models", *International Journal for Numerical Method in Fluids*, 51:1379–1405, 2006.
13. Sheu T. W. H and Tsai S. F., "Vortical Flow Topology in a Curved Duct with 90° Bend", *Proceeding of the 4th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics*, pp.121-129, Elounda, Greece, August 21-23, 2006.
14. Tsai S. F., and Sheu T. W. H., "Numerical Exploration of Flow Topology and Vortex Stability in a Curved Duct", *International Journal for Numerical Method in Engineering*, 2006.
15. Rudolf, P., and Desová, M., "Flow characteristics of curved ducts", *Applied and Computational Mechanics* 1 (2007) 255 – 264.