

## EFEK SECONDARY FLOW DAN SEPARASI TERHADAP POLA DISTRIBUSI TEKANAN PADA OUTER WALL DARI RECTANGULAR ELBOW

**Khoiri Rozi\*, Sugeng Tirta Atmaja**

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

\*Email: paman\_rozi@yahoo.com

### ABSTRAK

*Studi ini secara umum dibuat untuk menguji karakteristik aliran melewati outer wall dari elbow. Hasil-hasil pengukuran tekanan statis pada outer surface ditemukan bahwa aliran mula-mula mengalami deselerasi melewati concave wall/pressure side sampai di  $\Theta = 45^\circ$  dan kemudian menuju downstream aliran mengalami recovery dengan penambahan kecepatan secara gradual dan sampai di  $x/L = 1,0$  pada exit saluran aliran diprediksi mengalami terseparasi secara masive.*

**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 *bridge-piers*, aliran dalam saluran dan aliran melewati saluran sejenisnya.

Sejumlah implikasi muncul karena aliran ini. Adanya *multiple vortex* pada aliran *wing-fuselage* menjadikan *blockage* dan *disturbance* yang berefek pada performa aerodinamis *lift/drag* dan stabilitas penerbangan. Meningkatnya laju perpindahan panas, *shear stress* dan fluktuasi tekanan pada *blade-hub* karena *horseshoe vortex* secara langsung akan mempengaruhi efisiensi mesin. Keberadaan aliran sekunder pada *sail-hull* akan mempengaruhi *wake* yang berdampak pada menurunnya performa propelle. Munculnya *local erosion* karena *scouring* dan *sediment transport* pada dasar konstruksi menjadikan tanah dan bebatuan fondasi terkikis meninggalkan dasar jembatan. Kondisi demikian dapat memperlemah konstruksi dan akhirnya membuat collapse-nya jembatan. Demikian keberadaan 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] mengkaji 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 *shear 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 pasang 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 Oberkamp [11], Raisee dkk [12], Sheu dan Tsai [13,14] dan Rudolf dan Desova [15]. Lopez dan Oberkamp [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 kinetiks dan pressure energy akibat interfensi 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,  $\rho$  ( $\text{Kg/m}^3$ ) adalah densitas udara sebagai fluida kerja,  $U_{\infty}$  (m/s) adalah kecepatan *free stream* udara dan  $\mu$  (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:

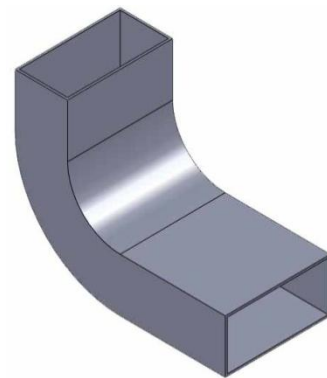
$$C_p = \frac{P_s - P_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2} \quad (3)$$

dimana  $C_p$  = koefisien *static pressure recovery*,  $P_s$  = Tekanan statis local (Pa),  $P_{\infty}$  = Tekanan stagnasi aliran (Pa),  $\rho$  = densitas udara ( $\text{Kg/m}^3$ ),  $U_{\infty}$  = 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* ( $\text{TiO}_2$ ), *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 menhidupkan 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 dalam Gambar 3.



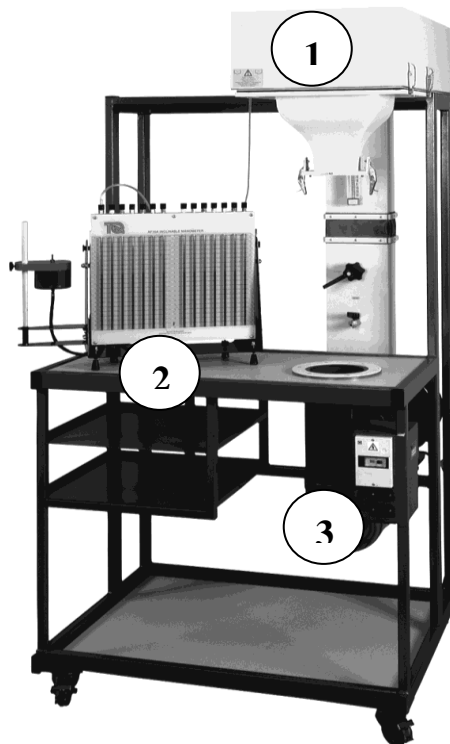
Gambar 3. Model 90° Curved Duct

### 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. Dalam apparatus terdapat nosel digunakan untuk menaikan 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 4. Apparatus Airflow Bench

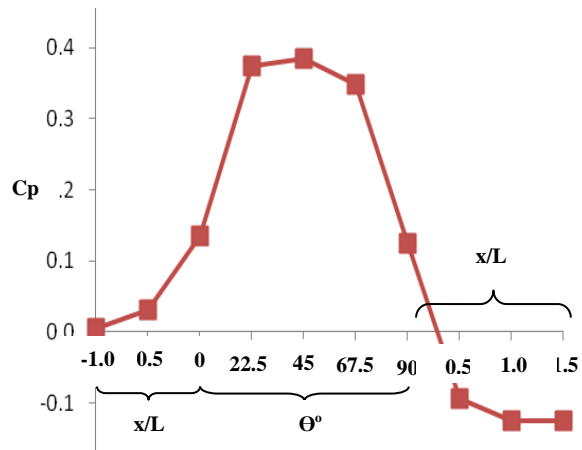
### HASIL EKSPERIMEN

#### Distribusi Tekanan pada Outer Wall

Hasil-hasil pengukuran tekanan statis pada *ouet wall* seperti grafik gambar 5. Analisa grafik  $C_p$  pada *outer wall* dapat dibagi menjadi tiga lokasi daerah pengukuran, yaitu daerah *upstream* (inlet saluran), daerah *concave surface* dan daerah *downstream* (exit saluran).

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

Pada lokasi *upstream*, berangkat dari titik  $x/L = -1,0$  aliran mengalami deselerasi secara gradual sampai di titik  $x/L = -0,5$ . Momentum aliran mengalami penurunan karena mendapat hambatan gaya viskos aliran, sehingga energi kinetis aliran turun cukup signifikan. Kondisi aliran demikian dalam *unfavorable zone*, dimana tekanan aliran bergerak naik, sehingga *pressure gradient* menjadi *adverse*. Aliran mengalami deselerasi lagi secara tajam dari titik pengukuran di  $x/L = -0,5$  sampai menuju inlet belokan di  $x/L = 0,0$  ( $\Theta = 0^\circ$ ), dalam daerah ini momentum aliran sangat lemah sehingga energi kinetis aliran tidak mampu membawa aliran masuk secara *smooth* karena dalam daerah *adverse pressure gradient*. Untuk pengukuran dengan  $Re$  yang berbeda, tidak ditemukan perbedaan signifikan pada daerah *upstream*.



Gambar 5. Grafik profil koefisien tekanan statis pada Outer Surface

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

Pada *concave surface* dari lokasi titik pengukuran di  $\Theta = 0^\circ$  sampai  $\Theta = 22,5^\circ$ , aliran mengalami deselerasi cukup kuat, hal ini menjadikan peningkatan tekanan cukup signifikan. Momentum aliran bertambah lemah untuk mengatasi efek viskos, akibatnya energi kinetis aliran tidak mampu membawa aliran secara nyaman mengikuti lintasan *concave wall*. Dari grafik terlihat aliran mengalami separasi dari titik  $\Theta = 22,5^\circ$  sampai  $\Theta = 45^\circ$ , dalam daerah ini hampir tidak ada perubahan tekanan, karena pada daerah ini aliran mengalami resirkulasi atau separasi *bubble*. Kondisi aliran pada *unfavorable pressure gradient*. Pada daerah  $22,5^\circ < \Theta < 45^\circ$  kecepatan aliran mencapai minimum dan konstan. Kemudian aliran bergerak menuju  $\Theta = 67,5^\circ$ . Setelah melewati titik  $\Theta = 45^\circ$ , aliran sedikit mengalami pemulihan (*recovery*), kecepatan aliran berangsur-angsur naik namun kondisi masih pada *zona adverse pressure gradient*. Momentum secara gradual meningkat meskipun kondisi aliran seakan-akan dipaksa melewati diffuser.

Pada daerah  $67,5^\circ < \Theta < 90^\circ$  aliran mengalami penambahan kecepatan cukup signifikan, diperkirakan momentum aliran naik secara tajam. Energi kinetis aliran juga bertambah besar seiring dengan kenaikan momentum aliran. Mulai dari  $\Theta = 67,5^\circ$  aliran mengalami percepatan lagi cukup besar sampai di  $\Theta = 90^\circ$ , ini mengindikasikan adanya pemulihan kecepatan aliran meskipun dalam daerah *adverse pressure gradient*. Pola aliran masih terlihat sama dari  $\Theta = 90^\circ$  sampai di  $x/L = 0,5$ , dimana aliran diduga kuat mengalami penambahan momentum cukup besar sehingga energi kinetis aliran masih cukup mampu membawa partikel-partikel fluida menuju exit saluran. Hasil penelitian ini, secara umum pada pengukuran tekanan statis belum ditemukan perubahan pola aliran yang signifikan.

#### 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 penambahan

kecepatan, ini berarti ada proses pemulihan (*recovery*) terhadap momentum aliran sehingga energi kinetis aliran berangsur naik. Peningkatan energi kinetis ini untuk menghadapi kenaikan *adverse pressure gradient*. Aliran masih mampu bergerak melewati saluran dengan merasakan efek viskos dan seolah-olah dipaksa melewati diffuser/ekspansi.

Dari titik  $x/L = 0,5$  sampai  $x/L = 1,0$  aliran mengalami akselerasi lagi, namun penambahan kecepatan ini tidak sekuat di daerah pengukuran sebelumnya, *recovery* aliran masih berlangsung. Hasil pengukuran mulai berbeda pada lokasi  $1.0 < x/L < 1.5$ . Dari titik pengukuran  $x/L = 1,0$  aliran diprediksi mulai terseparasi.

### KESIMPULAN

Hasil-hasil eksperimen distribusi tekanan statis pada outer wall ditemukan aliran mula-mula mengalami deselerasi melewati concave wall atau pressure side sampai di  $\Theta = 45^\circ$  dan kemudian menuju downstream aliran mengalami *recovery* dengan penambahan kecepatan secara gradual dan sampai di  $x/L = 1,0$  aliran terseparasi.

### 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., 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 Fluid* (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. Raisee M., Alemi H., and Lacovides H., "*Prediction of Developing Turbulent Flow in 90°-Curved Ducts Using Linear and Non-Linear Low-Re  $k-\epsilon$  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 4<sup>th</sup> 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.