

KAJIAN EKSPERIMENTAL DISTRIBUSI LONGITUDINAL ALIRAN DALAM SUDDEN EXPANSION CHANNEL

*Nurul Chomar¹, Khoiri Rozi², Bambang Yunianto³

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

^{2,3}Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: nurulchomar@gmail.com

Abstrak

Sudden Expansion channel merupakan bentuk saluran yang terekspansi secara tiba-tiba pada bagian downstream. penggunaan saluran ini dalam dunia industri menimbulkan masalah-masalah aliran, seperti munculnya separasi, resirkulasi, vortex, fluktuasi, dan turbulensi. Separasi aliran menjadikan *blockage* yang mengurangi debit. Resirkulasi dan *vortex* menyebabkan *backflow* sehingga mengganggu aliran utama. Sedangkan, fluktuasi dan turbulensi membuat vibrasi yang berdampak kebocoran. Kompleksitas aliran ini jelas berdampak negatif sehingga perlu dieliminasi dalam medan aliran. Penting mengkaji aliran dalam sudden expansion channel lebih dalam guna mendapatkan gambaran utuh dan detail *Sudden Expansion channel*. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik aliran dalam saluran *sudden expansion channel*. Eksperimen pertama, mengambil data tekanan statis pada surface expansion dan stepped wall, hasil yang diperoleh dalam bentuk coefficient pressure (C_p). Percobaan kedua menggunakan metode visualisasi aliran. Percobaan yang telah dilakukan menunjukkan bahwa aliran mengalami perubahan signifikan seiring perubahan bilangan Reynolds. Bilangan Reynolds tinggi menghasilkan kecepatan yang lebih tinggi, sehingga koefisien tekanan (C_p) semakin kecil. Di wilayah upstram menunjukkan momentum aliran cukup kuat untuk mengatasi gaya Viscos, sehingga energi kinetik aliran mampu membawa aliran dalam kondisi favorable. Sedangkan, pada downstream tekanan mengalami kenaikan mengindikasikan terjadi pemulihan dan secara bertahap diperlambat hingga mencapai kecepatan konstan, dan diperlambat sampai keluar saluran. Hasil visualisasi skin friction line pada expansion surface semakin meningkatnya bilangan Reynold, separasi aliran mengalami penundaaan. Pada stepped wall ditemukanememukan zona resirkulasi dib.lakang wall.

Kata kunci: koefisien tekanan, separasi aliran, *stepped wall*, *skin friction line*, *surface expansion*.

Abstract

Sudden Expansion Channel is a channel that forms suddenly expanded in the downstream. the use of these channels in the industrialized world cause flow problems, such as emergence of separation, recirculation, vortex, fluctuations and turbulence. Flow separation makes the blockage that reduces discharge. Recirculation and vortex causes backflow thus disturbing the main flow. Meanwhile, fluctuations and turbulence makes vibrations that affect leakage. The complexity of the flow is clearly negative impact that needs to be eliminated in the flow field. Important examine the sudden expansion flow channel in order to get a more complete picture and details *Sudden Expansion Channel*. This study was conducted to determine the characteristics of the flow in a sudden expansion channel. The first experiment, retrieve static pressure data on surface expansion and stepped wall, the results obtained in the form of pressure coefficient (C_p). The second experiment using flow visualization methods of the experiments that have been done show that the flow undergo significant changes as change of the Reynolds number. Higher Re resulting higher speed, so the pressure coefficient (C_p) is getting smaller. In the upstream region indicated flow momentum is strong enough to withstand the viscos forces, so the kinetic energy in the flow stream is able to bring favorable. Meanwhile, the downstream pressure is obtained, recovering, and then gradually slowed until it reaches a constant speed, then slowed down again towards the exit channel. Results visualization in line of skin friction line indicates the expansion of surface separation delay with increases in Reynolds number. On the stepped wall found the recirculation zone behind the wall.

Keywords: *surface expansion*, *stepped wall*, *separation*, *skin friction line*, *coefficient pressure*.

1. PENDAHULUAN

Sudden expansion channel merupakan bentuk saluran yang terekspansi secara tiba-tiba pada bagian downstream. Perubahan ini membentuk zona resirkulasi yang menyebabkan peningkatan *losses* dan separasi aliran. *Losses* dan separasi inilah yang mempengaruhi kinerja saluran. *Losses* menyebabkan penurunan momentum sehingga aliran menjadi terseparasi. Penggunaan model *sudden expansion channel* dapat ditemukan pada beberapa bidang engineering seperti diperalatan penukar panas (*heat exchanger*), turbin gas (*gas turbine*), dan *burners*. Pentingnya pemanfaatan *sudden expansion channel* dalam gas turbine untuk menurunkan tekanan kerja supaya diperoleh proses pencampuran bahan bakar yang optimal. Hal ini penting dalam konteks untuk meningkatkan efisiensi engine, dengan *specific fuel consumption* (SFC) dan emisi gas buang rendah. Sehingga penting mengetahui karakter aliran dalam ruang bakar untuk mengontrol proses pembakaran menjadi lebih maksimal dan sempurna. Dalam *burners*, model saluran seperti ini digunakan untuk meningkatkan lumen api (*flames luminosity*) sehingga dapat menurunkan emisi NOx dari api gas alam[1].

Pemakaian model saluran ini dalam keteknikan sering menimbulkan masalah-masalah aliran, yaitu munculnya separasi, resirkulasi, fluktuasi, dan turbulensi. Separasi aliran menjadikan *blockage* sehingga mengurangi debit. resirkulasi menyebabkan *backflow* sehingga mengganggu aliran utama.

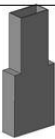
Sedangkan, fluktuasi dan turbulensi membuat peningatan vibrasi konstruksi perpipaan yang berdampak pada kebocoran[1].

Berdasarkan uraian di atas, jelas bahwa aliran melewati *sudden expansion channel* sangat kompleks dan berdampak negatif pada kinerja saluran sehingga perlu dieliminasi dalam medan aliran. Oleh karenanya penting mengkaji aliran dalam *sudden expansion channel* guna mendapatkan gambaran detail untuk kepentingan desain perpipaan yang tepat sesuai kondisi lapangan. Maka dari itu, penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan mengukur distribusi tekanan statis pada permukaan dan visualisasi *skin friction line* pada variasi *Reynolds number* (*Re*).

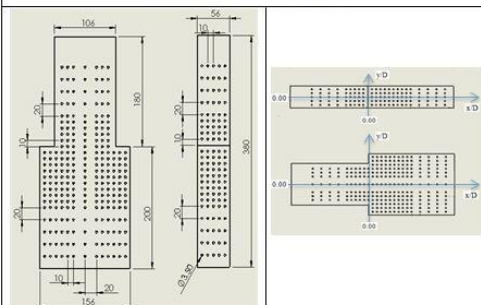
2. METODOLOGI

Model *sudden expansion channel* terbuat dari *stainless steel* berdimensi penampang inlet (A_i) = 50 x 100 mm², penampang exit (A_e) = 50 x 150 mm², panjang upstream (L_u) = 180 mm, panjang downstream (L_d) = 200 mm, *expansion ratio* (ER) = 3:2. Sepanjang permukaan dibuat *pressure tap* berdiameter dalam (d_{tube}) = 3 mm dengan spesifikasi model dan koordinat lokasi pengukuran dalam Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Model

Model	Parameter	Dimension	Unit
	A_i	50 x 100	mm ²
	A_e	50 x 150	mm ²
	L_u	180	mm
	L_d	200	mm
	ER	150:100 (3:2)	
	D_h	0.667	m

Koordinat titik-titik pengukuran



2.1 Metode Eksperimen 1

Eksperimen pertama dilakukan untuk mengukur tekanan statis permukaan. *Pressure tap* dihubungkan melalui selang ke pipa-pipa manometer, dimana tekanan terbaca sebagai beda tinggi pada pipa sebelum dan sesudah apparatus dioperasikan. Variasi kecepatan dalam penelitian ini dinyatakan sebagai *Reynold number* (*Re*) dengan persamaan [2]:

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

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 yang dinyatakan dalam persamaan [2]:

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

Dengan a = tinggi penampang saluran dan b = lebar penampang saluran. Koefisien tekanan statis dinyatakan dalam persamaan [2]:

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

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).

$$P_t = P_s + \frac{1}{2} \rho v_{udara}^2 \text{ sehingga } P_t - P_s = \frac{1}{2} \rho v_{udara}^2$$

$$\rho_{air} g \Delta h = \frac{1}{2} \rho v_{udara}^2 \text{ maka}$$

$$v_{udara} = \sqrt{\frac{2 \rho_{air} g \Delta h}{\rho_{udara}}} \quad (4)$$

Dimana P_t = tekanan total (Pa), P_s = tekanan statis local (Pa), $g = 10 \text{ m/s}^2$, v_{udara} = kecepatan free stream (m/s).

Prosedur pengukuran tekanan sebagai berikut: Pertama, memasang model pada apparatus dan menghubungkan pipa ke manometer. Kedua, mencatat tinggi kolom fluida dalam pipa manometer sebelum apparatus dioperasikan. Ketiga, menghidupkan apparatus dengan kecepatan pengukuran. Keempat, mencatat beda ketinggian kolom fluida kerja (air) pada kolom pipa manometer sebelum dan sesudah apparatus dijalankan.

2.2 Metode Eksperimen II

Eksperimen kedua dilakukan dengan surface flow visualization (SFV) untuk melihat shear stress trajectory akibat separasi aliran 3-D. Sebagaimana dijelaskan Peak dan Tobak [3-5] memfokuskan pada separasi aliran 3-D memberikan panduan penggunaan teknik *surface flow visualization* untuk menggambarkan skin friction line pada permukaan. Permukaan yang akan divisualisasi adalah *expansion surface* dan *stepped wall* dari dinding-dinding *sudden expansion channel*. Visualisasi ini menggunakan media campuran *homogen titanium dioxide* (TiO_2), *thinner*, asam oleat (*oleic acid*), *silicon oil*, parafin cair, dan *palm oil*. Prosedur pengambilan visualisasi: Pertama membuat campuran homogen serbuk titanium dioxide (TiO_2), asam oleat (*oleic acid*), thinner, silicon oil, parafin cair, dan palm oil dengan perbandingan 3:2:1:1:1:2. Kedua, memoleskan campuran media (deposit oil) tersebut pada media kertas ke kedua permukaan, yaitu *expansion surface* dan *stepped wall*. Ketiga memasang kertas yang telah diolesi deposit oil ke model *expansion channel*. Keempat, memasang model dalam lorong pengujian (apparatus). Kelima, menjalankan apparatus dengan menghidupkan blower. Keenam, mematikan apparatus dan kemudian mengambil gambar barisan skin friction line.

3.4 Wind Tunnel

Eksperimen dilakukan di Laboratorium Thermofluida, Jurusan Teknik Mesin UNDIP menggunakan Airflow Bench AF 10A. *Airflow Bench* berfungsi untuk menguji performance saluran yang secara khusus untuk fenomena internal flow dengan menggerakkan aliran udara kedalam model test. Wind tunnel terdiri dari beberapa bagian yang masing-masing mempunyai fungsi sendiri-sendiri. Bagian-bagian wind tunnel adalah : (a) Nozzle digunakan untuk menaikkan kecepatan aliran *free stream* dari ruangan terbuka; (b) saluran uji berfungsi sebagai tempat pengujian benda kerja dengan dimensi penampang 50 mm x 100 mm; (c) Fan jenis aksial berfungsi untuk penggerak udara dari ruangan terbuka supaya melewati saluran pengujian dengan kecepatan tertentu. Komponen pendukungnya adalah manometer yang berfungsi mengukur tekanan statis.



Gambar 1. Inclinable manometer dan Blower

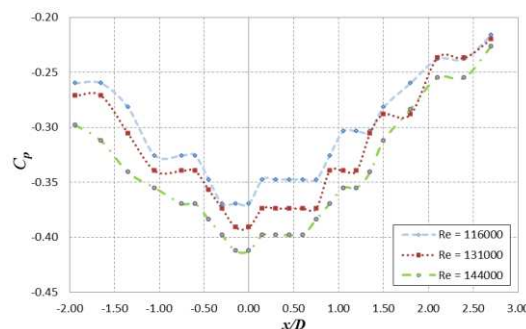


Gambar 2. Air flow bench dan Manometer

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Distribusi Tekanan pada *Expansion Surface*

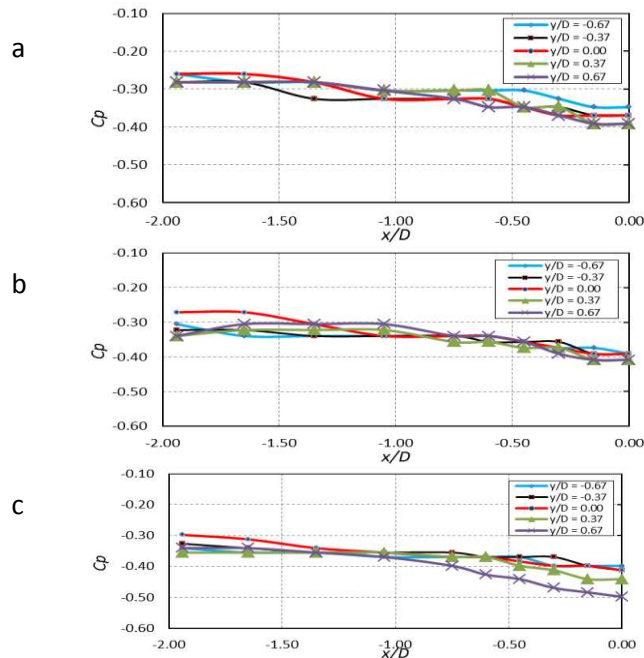
Dari data eksperimen didapatkan distribusi tekanan pada *expansion surface* yang ditunjukkan pada Gambar 3. Pada ketiga pengukuran dengan Re berbeda, secara umum tekanan sisi *upstream* mengalami penurunan cukup tajam dari $x/D = -1.94$ sampai $x/D = -1.05$ dikarenakan kuatnya efek *viscous*. Kemudian pada rentang $-1.05 \leq x/D \leq -0.60$ tekanan aliran cenderung konstan yang dimungkinkan terbentuk *bubble separation* untuk pengukuran pada $Re = 1.16 \times 10^5$, $Re = 1.31 \times 10^5$, pada kedua kondisi pengukuran ini aliran mulai terseparasi di $x/D = -1.05$ dan kemudian *reattachment* pada permukaan di $x/D = -0.60$. Namun, tekanan terus turun pada pengukuran dengan $Re = 1.44 \times 10^5$. Ini berarti momentum alirannya masih cukup melawan gaya *viscous* fluida. Pada lokasi berikutnya, $-0.60 \leq x/D \leq 0.00$ tekanan aliran sekali lagi mengalami penurunan cukup signifikan sampai memasuki *sudden expansion* di $x/D = 0.00$ pada ketiga pengukuran, dimana aliran dalam *favorable* karena energi kinetis aliran cukup mampu melawan *adverse pressure gradient*. Pada daerah *downstream*, aliran seakan-akan memasuki *diffuser* sehingga terjadi kenaikan sesaat dari $x/D = 0.00$ sampai $x/D = 0.15$. Pada daerah ini aliran dalam kondisi *unfavorable* karena *adverse pressure gradient*. Aliran akhirnya terseparasi berawal di $x/D = 0.15$ dan *reattachment* pada $x/D = 0.75$. Hal ini ditunjukkan dengan tidak adanya perubahan tekanan pada daerah pengukuran tersebut. Pengukuran berikutnya menemukan kenaikan tekanan cukup besar pada rentang $0.75 < x/D < 1.05$. Kondisi aliran pada daerah ini menghadapi kuatnya *adverse pressure gradient* sehingga aliran mengalami defisit momentum dan berada dalam zona *unfavorable*. Pada rentang lokasi berikutnya tekanan aliran terus mengalami kenaikan sampai di exit saluran, $x/D = 2.75$.



Gambar 3. Grafik distribusi tekanan pada *expansion surface*

3.1.1 Profil Tekanan pada *Upstream*

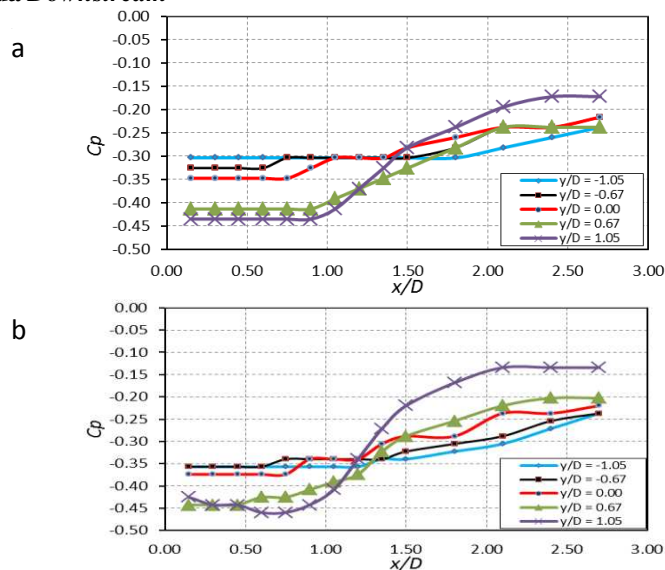
Dibawah ini adalah nilai C_p pada berbagai bilangan Re . Pada Gambar 4 menggambarkan grafik C_p pada $Re = 1.16 \times 10^5$, $Re = 1.31 \times 10^5$, $Re = 1.44 \times 10^5$ pada upstream expansion surface. Dari grafik dapat terlihat untuk wilayah upstream, profil tekanan menunjukkan bahwa pada semua nilai y/D tidak terjadi perbedaan nilai C_p yang signifikan, nilai C_p hampir sama pada setiap nilai y/D . Hal ini menunjukkan bahwa pada wilayah upstream pola aliran yang terbentuk simetris antara sisi atas dan bawahnya.

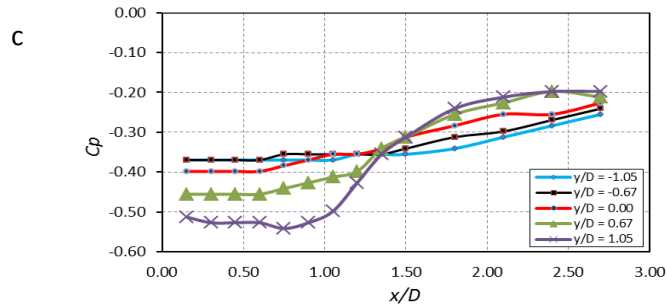


Gambar 4. Grafik distribusi tekanan pada upstream expansion surface (a) $Re = 1.16 \times 10^5$ (b) $Re = 1.31 \times 10^5$ (c) $Re = 1.44 \times 10^5$

Dari grafik dapat terlihat bahwa nilai C_p mengalami penurunan seiring dengan semakin mendekati wilayah ekspansi. Hal ini disebabkan karena momentum aliran yang terjadi 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. karena energi kinetis aliran cukup mampu melawan *adverse pressure gradient*.

3.1.2 Profil Tekanan pada *Downstream*





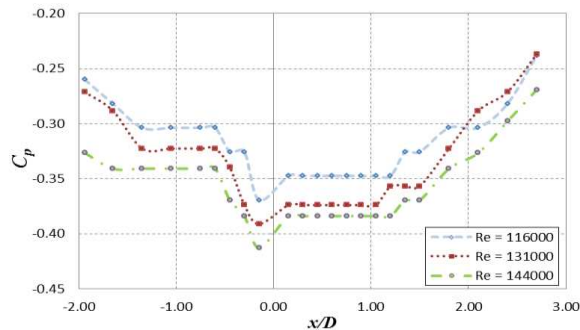
Gambar 5. Grafik distribusi tekanan pada *downstream expansion surface* (a) $Re = 1.16 \times 10^5$, (b) $Re = 1.31 \times 10^5$ (c) $Re = 1.44 \times 10^5$

Dari grafik dapat terlihat bahwa nilai C_p mengalami peningkatan seiring dengan semakin keluar saluran. Kondisi aliran pada daerah ini menghadapi kuatnya *adverse pressure gradient* sehingga aliran mengalami defisit momentum dan berada dalam zona *unfavorable*. Dari ketiga grafik data terlihat panjang zona separasi yang berbeda antara $y/D = -1.05$ dengan $y/D = 1.05$, hal ini menunjukkan bahwa aliran yang terjadi tidak simetris antara sisi bawah dan sisi atasnya.

3.2 Distribusi Tekanan pada *Stepped Wall*

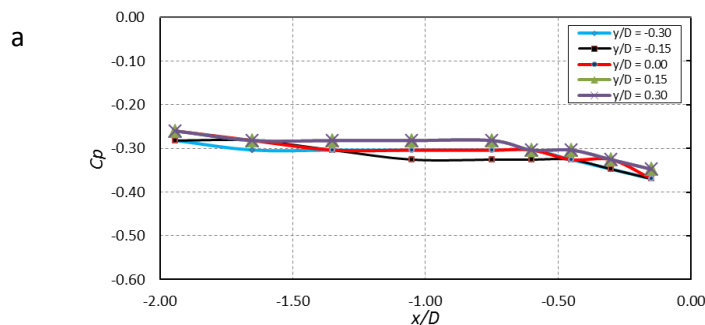
Pada Gambar 6 memperlihatkan distribusi tekanan pada *stepped wall* sepanjang saluran. Tekanan aliran daerah *upstream* cenderung turun secara moderat di $-1.94 < x/D < -1.35$ untuk kelima pengukuran pada Re yang berbeda. Kondisi berikutnya, pada daerah $-1.35 < x/D < -0.50$ tekanan aliran konstan. Diprediksi pada daerah ini aliran mengalami *bubble* separasi karena defisit momentum. Kecenderungan aliran mengalami penurunan tekanan cukup kuat pada lokasi $x/D = -0.50$ sampai $x/D = -0.25$. Pada zona ini aliran dalam *favorable* karena momentumnya masih cukup mampu melawan *adverse pressure gradient*.

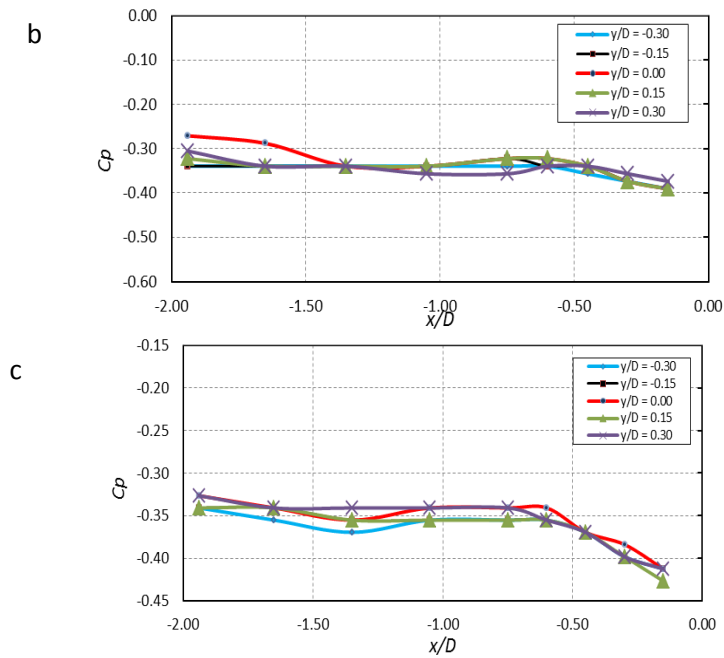
Pola distribusi tekanan yang terbentuk hampir sama pada *expansion surface*, dimana pada daerah *downstream* aliran paska memasuki *expansion area* mengalami *massive* separasi karena lemahnya momentum akibat kuatnya kenaikan *adverse pressure gradient*. Tekanan secara simultan mengalami kenaikan sampai exit saluran, sehingga aliran dalam zona *unfavorable*.



Gambar 6. Grafik distribusi tekanan pada *Stepped Wall*

3.2.1 Profil Tekanan pada *Upstream*

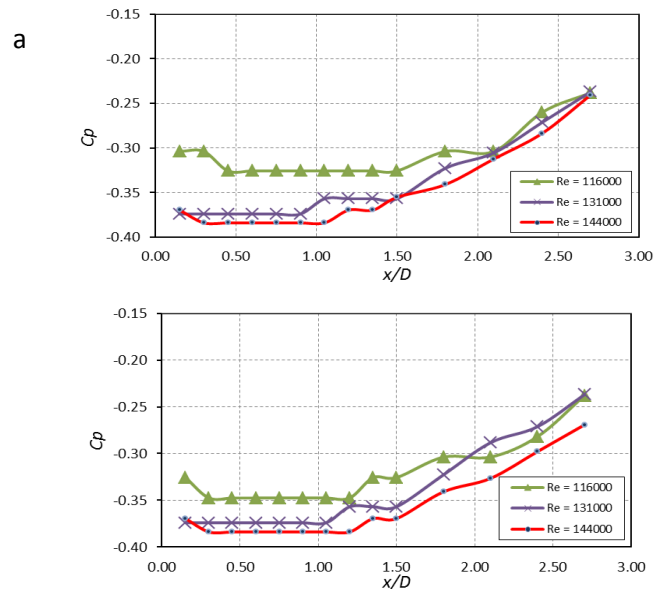


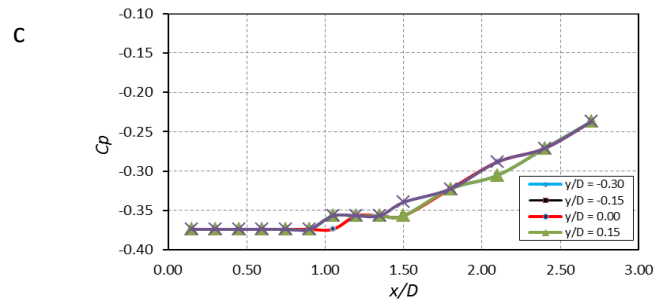


Gambar 7. Grafik distribusi tekanan pada *upstream stepped wall* (a) $Re = 1.16 \times 10^5$, Grafik 4.6 (b) $Re = 1.31 \times 10^5$ (c) $Re = 1.44 \times 10^5$

Dari grafik dapat terlihat bahwa nilai C_p mengalami penurunan seiring dengan semakin mendekati ke wilayah ekspansi. Hal ini disebabkan karena momentum aliran yang terjadi 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 karena energi kinetis aliran cukup mampu melawan *adverse pressure gradient*.

3.2.2 Profil Tekanan pada *Upstream*





Gambar 8. Grafik distribusi tekanan pada *upstream stepped wall* (a) $Re = 1.16 \times 10^5$, Grafik 4.6 (b) $Re = 1.31 \times 10^5$ (c) $Re = 1.44 \times 10^5$

Gambar 8 menunjukkan profil tekanan pada *downstream stepped wall* pada berbagai Re . Dari grafik dapat terlihat pada semua y/D separasi area yang terjadi yaitu $0.15 \leq x/D \leq 1.35$ dengan nilai $C_p = -0.384$. Kemudian dari $1.50 \leq x/D \leq 2.70$ tekanan mengalami kenaikan cukup tajam dikarenakan berkurangnya momentum sehingga mengalami perlambatan kecepatan aliran sampai pada $x/D = 2.70$ dengan nilai $C_p = -0.240$ pada $y/D = -0.30$, $C_p = -0.254$ pada $y/D = -0.15$, $y/D = 0.15$ dan $y/D = 0.30$, $C_p = -0.269$ pada $y/D = 0.00$.

Pada *downstream stepped wall* pola aliran yang terjadi hampir sama pada berbagai nilai y/D nya. Hal ini menunjukkan bahwa pola aliran yang terjadi simetris pada *downstream stepped wall*. Berbeda dengan yang terjadi pada *downstream expansion surface* dimana pola aliran yang terjadi pada sisi bawah dan atas nya berbeda. Hal ini dapat dikonfirmasi melalui visualisasi aliran yang telah dilakukan.

4. KESIMPULAN

- 1) Hasil-hasil pengukuran tekanan statis secara umum menunjukkan bahwa pola aliran mengalami perubahan signifikan dengan perubahan Reynold number. Semakin tinggi Re , maka kecepatan yang dihasilkan semakin tinggi, sehingga coefficient pressure (C_p) akan semakin kecil. Pada daerah *upstream* ditunjukkan bahwa momentum aliran cukup kuat untuk mengatasi gaya viskos, sehingga energi kinetis aliran meningkat cukup signifikan untuk membawa aliran dalam kondisi favorable.
- 2) Pada daerah *upstream*, semakin menuju area ekspansi maka kecepatan meningkat, sebaliknya pada *downstream* semakin menuju exit saluran maka kecepatan semakin menurun, ini dikarenakan kuatnya adverse pressure gradient (APG) pada ujung akhir saluran. Pola kecepatan aliran pada variasi Re menunjukkan bahwa semakin tinggi Re maka kecepatan yang dihasilkan akan semakin kuat. Sedangkan, pada sisi *downstream* diperoleh bahwa tekanan aliran mengalami recovery karena efek *reattachment* aliran dan kemudian secara gradual kecepatan aliran diperlambat sampai mencapai konstan dan selanjutnya diperlambat sampai keluar saluran. Separasi yang terjadi tidak simetris antara sisi kiri dan sisi kanan *downstream*. Hal ini dikarenakan nilai bilangan Reynold pada daerah tersebut telah melewati nilai Reynold kritisnya sehingga aliran semakin acak, dan akan bergerak kearah tekanan yang lebih rendah. Akibatnya aliran akan tidak simetris.
- 3) Hasil visualisasi barisan skin friction line pada *expansion surface* menunjukkan adanya penundaan separasi seiring peningkatan Reynolds number. Pada *stepped wall* ditemukan adanya zona resirkulasi di belakang wall.

5. REFERENSI

- [1] Kumar A., and Yajnik K. S., "Flow in a Channel with a Symmetric Sudden Expansion", 6th Australian Hydraulics and Fluid Mechanics Conferences Adelaide, Australia, 5-9 December (1977).
- [2] Mansoori, Abbas., and Lari, M.R.B., "Evaluation of turbulent models in sudden expansion analysis at high Reynolds numbers", Proceedings of the 5th IASME / WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics, Athens, Greece, August 25-27, 2007.
- [3] Tobak M and Peake, D. J., "Topology of Two-dimensional and Three dimensional Separated Flows" AIAA 12th Fluid and Plasma Dynamics Conferences, July 23-25, 1979, Virginia, USA.
- [4] Tobak M and Peake, D. J., "Topology of Three-dimensional and Three dimensional Separated Flows" Ann. Rev. Fluid Mech. 1982. 14:61-85
- [5] Peake, D. J., and Tobak M "Topology of Three-dimensional Separation and Reattachments" NASA TECHNICAL Memorandum 84221, March 1982.