

KAJIAN EKSPERIMENTAL DISTRIBUSI TEKANAN PADA *STEPPED WALL* DALAM *SUDDEN CONTRACTION CHANNEL*

*Sriyanto¹, Khoiri Rozi², Berkah Fajar TK²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: sriyantomesin@gmail.com

Abstrak

Penelitian secara eksperimental ini bertujuan memperoleh pola distribusi tekanan statis dan topologi *skin friction line* dalam *sudden contraction channel*. Hasil-hasil eksperimen pengukuran tekanan menunjukkan bahwa karakteristik aliran mengalami perubahan signifikan dengan perubahan *Reynold number* (Re). Pada *midspan*, secara umum harga koefisien tekanan menurun seiring dengan kenaikan Re. Pada daerah resirkulasi ditemukan adanya kenaikan nilai tekanan di depan *stepwall*. Hasil eksperimen visualisasi aliran diperoleh bahwa posisi titik separasi bergeser menuju *downstream* dengan kenaikan Re. Hal ini ditunjukkan adanya pergeseran daerah *attachment* atau *high shear stress* melebar ke arah *downstream*.

Kata kunci: *attachment*, koefisien tekanan, separasi aliran, *skin friction line*, *sudden contraction channel*.

Abstract

This experimental reaserch aimed at obtaining a static pressure distribution patterns and the topology of the skin friction line in sudden contraction channel. The result of experimental measurements of flo characteristics pressure shows that experienced significant change with the change of Reynold number (Re). On midspan, generally the pressure coefficient decreases with increase in recirculation region. On thr recirculation found any an increase of pressure in front of stepwall. The result of the experiment visualization the flow of obtained that position point the separation shifted toward downstream with a rise in Re. It is shown the presence of shifting the attachment or high shear stress dilated into the downstream.

Keywords: *attachment*, coefficient pressure, separation flow, *skin friction line*, *sudden contraction channel*.

1. Pendahuluan

Sudden contraction channel adalah model saluran yang terkontraksi secara tiba-tiba pada bagian *downstream*. Perubahan tiba-tiba ini membentuk zona sirkulasi, *bubble separation* dan *vortical flow* yang membuat kompleksitas struktur aliran. Menarik untuk dikaji dan diteliti dalam pembentukan struktur aliran ini karena pentingnya pemakai model saluran ini dalam industri pendinginan peralatan elektronik, reaktor nuklir, *turbine blades*, alat penukar panas (*heat exchanger*), *combustion chamber*, aliran dalam *diffuser* dan *valve* Saldana dkk. [1] dan dalam bidang *wind energy* Sherry dkk. [2]. *Bubble separation* dan *vortical flow* menurunkan *effective area* dan menaikkan resistansi aliran Ando and Shakouchi [3]. Dalam kontek seperti ini *control* dan *suppression* terhadap pembentukan *separation bubble* diperlukan. Dalam bidang hidrolika, menghindari *sudden transition* dalam *Sudden contraction channel* diperlukan untuk menjamin *energy lossess* dan turbulensi aliran sekecil mungkin Negrn [4].

Berdasarkan uraian singkat diatas dapat dilihat bahwa fenomena aliran dalam *sudden contraction channel* perlu dikaji lebih dalam guna mendapatkan informasi rinci untuk kepentingan acuan/referensi dalam mendesain *piping system* sesuai kondisi lapangan. Oleh karenanya, penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan mengukur distribusi tekanan statis, kecepatan lokal dan memvisualisasikan *skin friction line* pada variasi *Reynolds number* (Re).

Aliran yang dibatasi oleh internal *surfaces* saluran disebut aliran internal. Pola aliran internal ini bisa laminar atau turbulen, tergantung bilangan Reynold-nya. Apabila aliran dalam pipa dengan $Re \leq 2300$ pola alirannya dikatakan laminar, sebaliknya $Re \geq 2300$ maka kondisi dalam pipa adalah turbulen. Pada rezim aliran laminar sebuah pipa profil kecepatannya secara umum adalah parabolik. Untuk rezim aliran turbulen profil kecepatan aliran mendekati *uniform* karena energi kinetis aliran cukup mampu melawan efek *wall shear stress* pada zona di dalam *boundary layer*.

Kecepatan aliran dalam sebuah saluran bisa tinggi atau rendah tergantung pada desain dan pemakaiannya. Jika fluida mengalir pada kecepatan rendah dengan *Mach number* lebih kecil 0.3 disebut *subsonic* dan kecepatan alirannya

kurang dari 30 persen maka fluidanya dianggap inkompresibel. Jika *Mach number* lebih dari 0.3-1 namanya transonik. Maka fluidanya bersifat kompresibel yaitu densitas aliran berubah terhadap waktu.

Studi eksperimental dalam saluran *sudden contraction* telah dilakukan oleh Stevenson [5] secara eksperimental mempelajari aliran melewati *forward facing step* menunjukkan bahwa *pressure recovery coefficient* pada daerah *upstream*, *downstream* dan *step face* tidak dipengaruhi oleh *Reynold number*. *Pressure coefficient* jauh dari *downstream* sangat kuat tergantung pada rasio ketinggian *channel* terhadap ketinggian *step* (H/h_s).

Teknik visualisasi menggunakan *hydrogen bubble* digunakan Stuer dkk. [6] mengamati separasi aliran melalui *forward facing step* (FFS) dengan *test section* area 560 x 80 mm, $h_s = 20$ mm dan aspek rasio 4:1 menemukan adanya *separation bubble* secara *continue* sepanjang saluran. Dengan *hydrogen bubble* sebagai visualisasinya untuk mengkonfirmasi secara topologi perilaku dinamis *streamline* dan *vorticity line*.

Penambahan *obstacle* di depan *step wall* dilakukan Ando dan Shakouchi [3] mendapatkan ukuran zona resirkulasi berkurang seiring dengan penambahan *obstacle*, namun efek *obstacle* ini menjadi berkurang dengan kenaikan *Reynold number*. Sebagaimana dalam studinya ditunjukkan pengurangan tahanan aliran dengan penambahan *obstacle* tingkatan kontraksi $A_1/A_2 = 1.9$ dan $A_1/A_2 = 3.1$ kenaikan *Reynold number* $0 \leq Re \leq 3 \leq 10^4$. Pada efek L/H tingkatan kontraksi $A_1/A_2 = 1.9$ dan $A_1/A_2 = 3.1$ memodifikasi bagian *upstream* mendapatkan adanya pengurangan *drag* yang cukup signifikan dalam saluran.

Pengukuran fluktuasi tekanan oleh Largeau dan Morineire [7] diperoleh separasi *bubble* tereksansi arah *span* dengan diindikasikan perlambatan aliran sekitar $0.1U_c$ dibagian *upstream*. Secara topologi, ditemukan beberapa *saddle* dan *nodal points* di bagian depan *step*. Pada bagian *downstream* $h = 40$ dan 50 mm struktur *secondary* tereksansi dalam resirkulasi *bubble*. Rata-rata panjang *reattachment* adalah $4.5 \leq L_r/h \leq 5$ untuk $U_e = 15$ m/s dan $3.5 \leq L_r/h \leq 4$ untuk $U_e = 40$ m/s.

Eksperimen pengukuran panjang *reattachment* oleh Sherry dkk [2] dengan variasi $1400 \leq Re_h \leq 19000$ diperoleh $1.1h < X_L < 4h$ dan $1.9 < X_L < 4h$. Awasthi [8] dalam tesisnya menemukan fluktuasi tekanan tinggi pada posisi titik separasi, dimana medium *step* ($h/\delta = 15\%$) fluktuasi tekanan hampir 100 kali dibandingkan dengan *smooth surface* sedangkan untuk *large step* ($h/\delta = 60\%$), ditemukan fluktuasi tekanan mencapai 400 kali dari *smooth wall*. Visualisasi bagian *upstream* menunjukkan semakin besar *Re* maka *reattachment* akan semakin cepat.

Kajian efek perubahan rasio kontraksi oleh Negm [4] mengamati efek perubahan rasio kontraksi, CR = 0.33, 0.50 dan 0.667 dengan dimensi 30 x 40 cm² dan panjang *channel* 10.5 m. Hasilnya *energy losses* lebih besar pada CR yang kecil dengan panjang kontraksi konstan dan *energy losses* lebih besar pada panjang kontraksi yang lebih panjang dengan CR konstan.

Studi topologi Chiang dan Sheu [9] memberikan gambaran *separation line* pada *upstream* sedangkan *reattachment line* terbentuk pada *step plane* dan *downstream channel*. Kajian numerik tentang fenomena aliran dalam *sudden contraction* jelas mengkonfirmasi adanya *pitchfork bifurcation* dengan variasi CR dan *Re*.

Chiang dkk. [10] memberikan kesimpulan adanya keterkaitan antara ukuran resirkulasi dengan perubahan *Reynold number*, zona resirkulasi sebelum dan setelah *step* membesar ukurannya dan separasi terjadi lebih awal.

Analisa numerik Saldana dkk [1] dengan tiga parameter *Reynolds* yang berbeda pada saluran horizontal FFS memperoleh struktur aliran yang berbeda. Ukuran zona resirkulasi membesar seiring bertambahnya *Reynold number* sebelum dan setelah *step* serta terjadinya separasi lebih awal.

Analisa secara numerik aliran laminar oleh Mushate [11] dalam saluran *sudden contraction* menunjukkan daerah terseparasi membesar dengan kenaikan *Reynold number* dan pertumbuhan *boundary layer* lebih cepat pada *Reynold number* tertinggi.

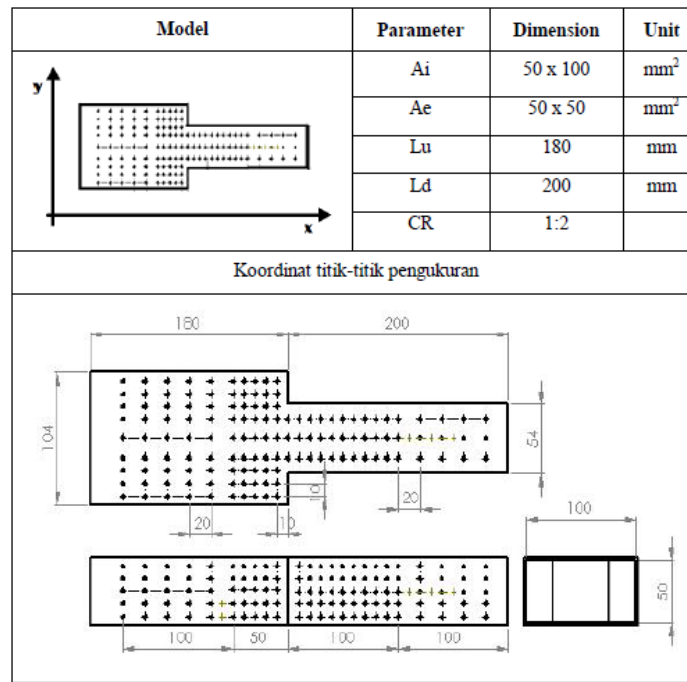
Orselli dan Lemos [12] membandingkan kerja numerik dan eksperimental pada saluran *sudden contraction* tanpa *porous insert*. Studi numeriknya ditemukan koefisien *minor losses* (K_c) lebih tinggi 30% dibandingkan eksperimen. Selain itu, penelitiannya mendapatkan bahwa *porous insert* dapat mengurangi efek resirkulasi. Sebagaimana hasil studinya dalam ditunjukkan perbandingan distribusi tekanan (C_p) pada $Re = 158.114$ dimana distribusi tekanan *porous insert* memiliki nilai C_p lebih rendah dari C_p saluran dengan *porous insert*. Pada saluran menggunakan *porous insert* terjadi beda distribusi tekanan karena *thickness* berbeda.

Tujuan penelitian ini adalah menelaah dan mengamati secara detil pola aliran dalam saluran *sudden contraction*. Secara khusus penelitian ini untuk memperoleh karakteristik spesifik aliran melalui distribusi tekanan, kecepatan dan topologi barisan *skin friction line* pada *contraction surface* dan *stepped wall* dengan variasi *Reynold number*.

2. Metode Penelitian

2.1 Test Model (Benda Uji)

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



Gambar 1. Model benda uji

2.2 Apparatus Wind Tunnel

Semua kegiatan eksperimen dilakukan di Laboratorium Thermofluida, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Diponegoro menggunakan *Airflow Bench* seperti Gambar 2.

Alat ini adalah jenis *open wind tunnel* dengan penampang 50 x 100 mm². *Airflow Bench* berfungsi untuk menguji performance saluran yang secara khusus untuk fenomena *internal flow* dengan menggerakkan aliran udara ke dalam model *test*.

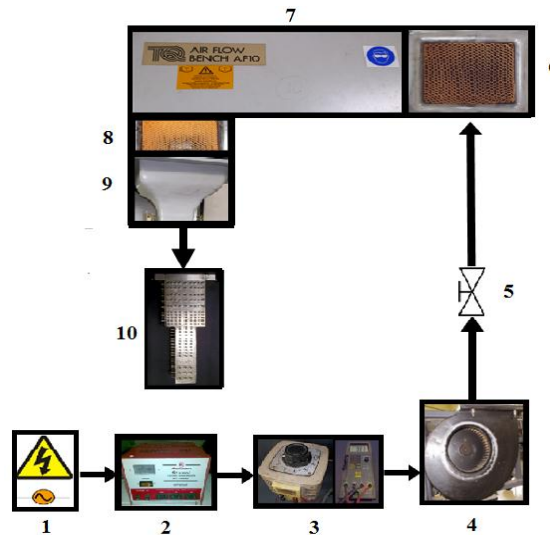


Gambar 2. Air flow bench dan Manometer

2.3 Teknik Pengambilan Eksperimen

Prosedur pengukuran tekanan sebagai berikut: (a) Memasang model pada *apparatus* dan menghubungkan pipa ke manometer. (b) Mencatat tinggi kolom fluida dalam pipa manometer sebelum *apparatus* dioperasikan. (c) Menghidupkan *apparatus* dengan kecepatan pengukuran. (d) Mencatat beda ketinggian kolom fluida kerja (air) pada kolom pipa manometer sebelum dan sesudah *apparatus* dijalankan.

Metode eksperimen pertama dapat dilihat pada Gambar 3 skema pengujian.

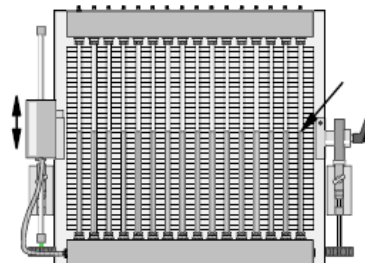


Gambar 3. Skema Pengujian

Keterangan: (1) Catu Daya; (2) Stabilizer; (3) Regulator; (4) Blower; (5) Valve; (6) Honeycomb; (7) Settling Chamber; (8) Honeycomb; (9) Nozzle; (10) Test Section.

Mengukur Distribusi Tekanan Statis: *Multi Tube Manometer* berfungsi untuk mengambil data tekanan statis saluran dengan mencatat perbedaan ketinggian pipa manometer sebelum dan sesudah apparatus dioperasikan pada setiap *tapping*. Spesifikasi manometer yang digunakan adalah skala pembacaan sampai 1 mm water = 0,0981 mb. Fluida kerja yang dipakai *water* dengan kemiringan nol (datar).

Pengisian Water Manometer: Pada saluran ini, *reservoir* terhubung dengan pipa-pipa manometer yang digunakan mengukur tekanan. Ketinggian air dalam *reservoir* tersebut sama dengan yang ada di pipa-pipa manometer. Pengisian air manometer dimasukkan pada *reservoir* sampai setengah dari total ketinggian *reservoir*. Ketinggian air yang berada di *reservoir* harus sama dengan ketinggian tabung manometer. Apabila ketinggiannya tidak sama saluran pipa pada manometer harus dibersihkan kembali.



Gambar 4. Pengisian water manometer

Cara Mengukur Tekanan: Tekanan atmosfer (p_0) adalah tekanan udara yang berada di daerah atmosfer bumi. Tekanan statik (p_{stat}) didapatkan dari tekanan yang tegak lurus dengan aliran fluida.

$$p_{stat} = \rho \cdot g \cdot h \quad (1)$$

Tekanan dinamik (p_{dyn}) didapat dari kecepatan aliran fluida dan merupakan selisih dari tekanan total dan tekanan statik.

$$p_{dyn} = \frac{1}{2} \rho \cdot W_{\infty}^2 \quad (2)$$

Tekanan total (p_{tot}) adalah jumlah keseluruhan tekanan atmosfer, tekanan statik dan tekanan dinamik.

$$p_{tot} = p_0 + p_{stat} + p_{dyn} \quad (3)$$

Cara Mengukur Kecepatan: Dalam pengukuran kecepatan digunakan *pitot static tube* untuk mengukur tekanan statis dan tekanan total. Selisih dari tekanan statis dengan tekanan total pada pengukuran di manometer adalah Δp .

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} (U_2^2 - U_1^2) \quad (4)$$

Karena *volume* pada saluran pipa manometer sama maka $U_1 = 0$. Perbedaan ketinggian maka digunakan dalam pengukuran kecepatan aliran fluida.

$$U_2 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{udara}}} \quad (5)$$

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:

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} D_h}{\mu} \quad (6)$$

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 sudden contraction* yang dinyatakan dalam persamaan:

$$D_h = \frac{2ab}{(a+b)} \quad (7)$$

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

$$C_p = \frac{P_s - P_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2} \quad (8)$$

Dimana C_p = koefisien *static pressure recovery*, P_s = tekanan statis lokal (Pa), P_{∞} = tekanan freestream (Pa), ρ = densitas udara (kg/m^3), U_{∞} = kecepatan *free stream* (m/s) Geratebau [13].

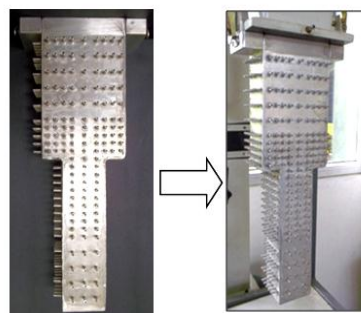
Pitot static tube: *Pito static tube* digunakan untuk mengukur tekanan statis dan tekanan total dari aliran yang keluar dari *Air flow bench A-10*. Sehingga bisa didapatkan perbedaan ketinggiannya untuk menghitung kecepatan udara yang keluar dari *air flow bench*.

Tabel 1. pengukuran kecepatan berdasarkan voltase

Volt (v)	h_0 (mm)	h_1 (mm)	Δh (mm)	v_{udara} (m/s)
85	22	68	46	27.40
95	22	80	58	30.77
105	22	84	62	31.82
115	22	88	66	32.83
145	22	92	70	33.80

2.4 Teknik Visualisasi Aliran

Eksperimen kedua dilakukan dengan *surface flow visualization* (SFV) untuk melihat *shear stress trajectory* akibat separasi aliran 3-D. Sebagaimana dijelaskan Tobak dan Peake [14] 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 *contraction surface* dan *stepped wall* dari dinding-dinding *contraction channel*.



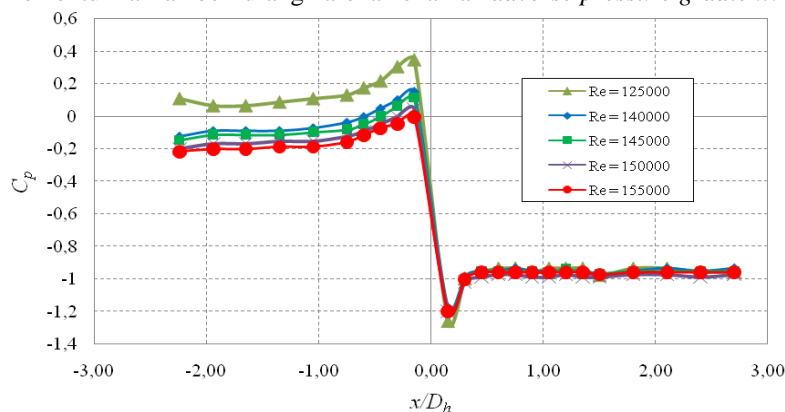
Gambar 5. Model dan penempatan dalam saluran pengujian

Prosedur pengambilan visualisasi: Pertama membuat campuran secara homogen serbuk *titanium dioxide*, *thinner* (pengencer) dan asam oleat (*oleic acid*) dengan perbandingan 2:5:1. Kedua, memoleskan campuran media tersebut pada *black paper* model dan memasangkan di kedua permukaan *contraction surface* dan *stepped wall*. Ketiga, memasang model *sudden contraction channel* dalam lorong pengujian. Keempat, menjalankan *apparatus* dengan menghidupkan *blower*. Kelima, mematikan *apparatus* kemudian mengambil saluran uji (model) untuk diambil gambar barisan *skin friction line* yang terbentuk.

3. Hasil-hasil Penelitian

3.1 Profil Distribusi Tekanan

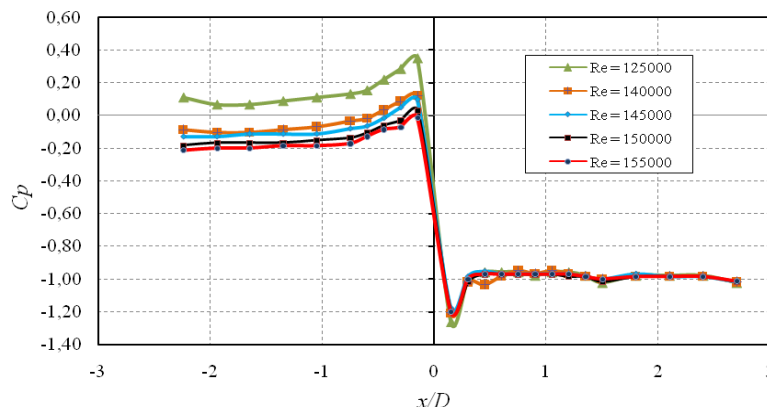
Dari data eksperimen didapatkan distribusi tekanan pada *stepped wall* yang ditunjukkan pada **Gambar 6** dengan lima variasi Re. Pada titik pengukuran awal di $x/D = -2.24$ nilai C_p untuk $Re = 125000$ sebesar 0.10, $Re = 140000$ sebesar -0.12, $Re = 145000$ sebesar -0.14, $Re = 150000$ sebesar -0.19 dan $Re = 155000$ nilai C_p sebesar -0.21. Pada rentang $-2.24 < x/D < -0.60$ aliran tersebut cenderung konstan. Diprediksi aliran mengalami sedikit *recovery* tekanan dan terjadi *bubble separation* karena defisit momentum. Namun, C_p mengalami kenaikan maksimal pada $-0.75 < x/D < -0.15$. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan maksimum terjadi pada $x/D = -0.15$ sehingga C_p pada $Re = 125000$ sebesar 0,34, $Re = 140000$ sebesar 0.15, $Re = 145000$ sebesar 0.11, $Re = 150000$ sebesar 0,04 dan $Re = 155000$ nilai C_p adalah 0., ini menunjukkan momentum aliran berkurang karena kenaikan *adverse pressure gradient*.



Gambar 6. Grafik distribusi tekanan *Stepped Wall*

Kemudian pada daerah *sudden contraction* mengalami penurunan tajam dari titik $x/D = -0.15$ sampai $x/D = 0.15$. Ini menunjukkan 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. Pada daerah ini momentum aliran sangat besar sehingga energi kinetis aliran cukup kuat untuk mengalir memasuki daerah *favorable pressure gradient*.

Pada titik $x/D = 0.15$ aliran mencapai tekanan minimumnya yaitu sebesar -1.26. Selanjutnya mengalami sedikit kenaikan C_p sampai di $x/D = 0.30$ sebesar -1.00 dan C_p tidak mengalami perubahan dari $x/D = 0.30$ sampai di *exit* saluran, $x/D = 2.70$. Hal ini disebabkan aliran mengalami sedikit *recovery* tekanan dan kemudian aliran mulai terseparasi.

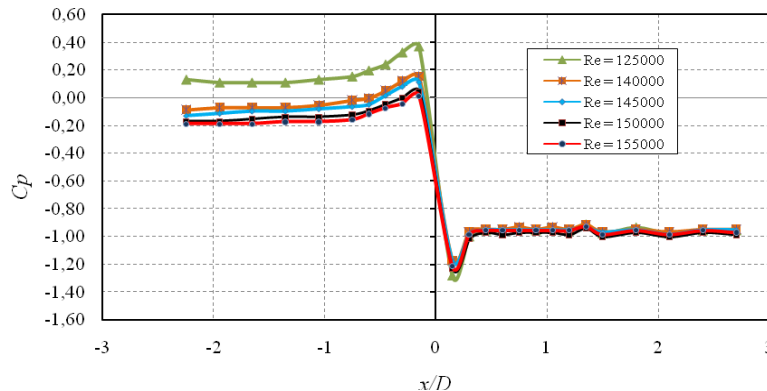


Gambar 7. Grafik distribusi tekanan pada *Stepped Wall* $y/D = -0.30$

Gambar 7 memperlihatkan distribusi tekanan pada *stepped wall* $y/D = -0.30$. Pada titik pengukuran awal di $x/D = -2.24$ nilai C_p untuk $Re = 125000$ sebesar 0,10, $Re = 140000$ sebesar -0,80, $Re = 145000$ sebesar -0.12, $Re = 150000$ sebesar -0.18 dan $Re = 155000$ nilai C_p sebesar -0.21. Pada rentang $-2.24 < x/D < -0.60$ kelima aliran tersebut cenderung konstan. Diprediksi aliran mengalami sedikit *recovery* tekanan dan terjadi *bubble separation* karena defisit

momentum. Namun, C_p mengalami kenaikan maksimal pada $-0.45 < x/D < -0.15$. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan maksimum terjadi pada $x/D = -0.15$ sehingga C_p pada $Re = 125000$ sebesar 0,34, $Re = 140000$ sebesar 0,12, $Re = 145000$ sebesar 0,09, $Re = 150000$ sebesar 0,03 dan $Re = 155000$ nilai C_p adalah 0,01 ini menunjukkan momentum aliran berkurang karena kenaikan *adverse pressure gradient*.

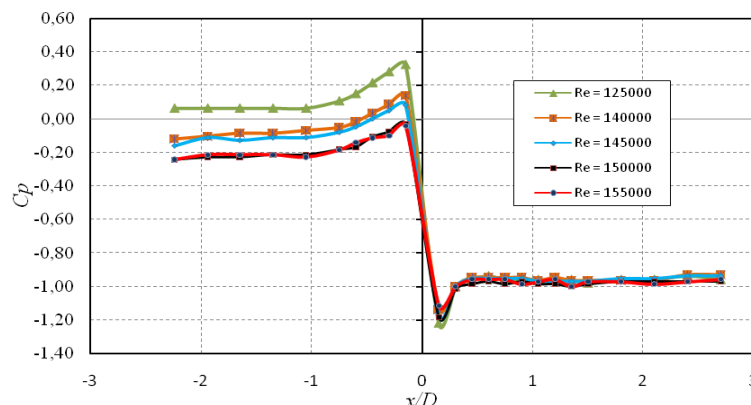
Kemudian pada daerah *sudden contraction* mengalami penurunan tajam dari titik $x/D = -0.15$ sampai $x/D = 0.15$. Ini menunjukkan momentum aliran cukup kuat untuk mengatasi gaya viskos aliran. Energi kinetis aliran meningkat cukup signifikan sehingga mampu membawa aliran dalam kondisi *favorable*, dimana tekanan mengalami penurunan arah aliran. Pada daerah ini momentum aliran sangat besar sehingga energi kinetis aliran cukup kuat untuk mengalir memasuki daerah *favorable pressure gradien*. Pada titik $x/D = 0.15$ aliran mencapai tekanan minimumnya yaitu sebesar -1.26. Selanjutnya mengalami sedikit kenaikan C_p sampai di $x/D = 0.30$ sebesar -1.01 dan C_p tidak mengalami perubahan dari $x/D = 0.30$ sampai di *exit* saluran, $x/D = 2.70$. Hal ini disebabkan aliran mengalami sedikit *recovery* tekanan dan kemudian aliran mulai terseparasi.



Gambar 8. Grafik distribusi tekanan pada *Stepped Wall* $y/D = -0.15$

Gambar 8 memperlihatkan distribusi tekanan pada *stepped wall* $y/D = -0.15$. Pada titik pengukuran awal di $x/D = -2.24$ nilai C_p untuk $Re = 125000$ sebesar 0,10, $Re = 140000$ sebesar -0,80, $Re = 145000$ sebesar -0,12, $Re = 150000$ sebesar -0,18 dan $Re = 155000$ nilai C_p sebesar -0,21. Pada rentang $-2.24 < x/D < -0.60$ kelima aliran tersebut cenderung konstan. Diprediksi aliran mengalami sedikit *recovery* tekanan dan terjadi *bubble separation* karena defisit momentum. Namun, C_p mengalami kenaikan maksimal pada $-0.45 < x/D < -0.15$. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan maksimum terjadi pada $x/D = -0.15$ sehingga C_p pada $Re = 125000$ sebesar 0,34, $Re = 140000$ sebesar 0,12, $Re = 145000$ sebesar 0,09, $Re = 150000$ sebesar 0,03 dan $Re = 155000$ nilai C_p adalah 0,01 ini menunjukkan momentum aliran berkurang karena kenaikan *adverse pressure gradient*.

Kemudian pada daerah *sudden contraction* mengalami penurunan tajam dari titik $x/D = -0.15$ sampai $x/D = 0.15$. Ini menunjukkan 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. Pada daerah ini momentum aliran sangat besar sehingga energi kinetis aliran cukup kuat untuk mengalir memasuki daerah *favorable pressure gradien*. Pada titik $x/D = 0.15$ aliran mencapai tekanan minimumnya yaitu sebesar -1.26. Selanjutnya mengalami sedikit kenaikan C_p sampai di $x/D = 0.30$ sebesar -1.01 dan C_p tidak mengalami perubahan dari $x/D = 0.30$ sampai di *exit* saluran, $x/D = 2.70$. Hal ini disebabkan aliran mengalami sedikit *recovery* tekanan dan kemudian aliran mulai terseparasi.

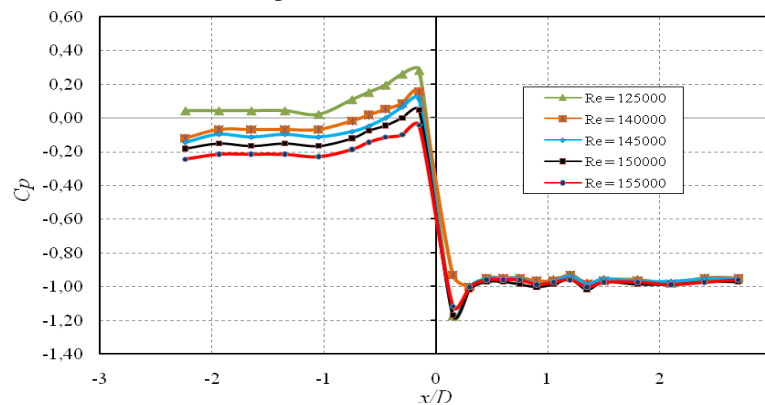


Gambar 9. Grafik distribusi tekanan pada *Stepped Wall* $y/D = 0.15$

Gambar 9 di atas memperlihatkan distribusi tekanan pada *stepped wall* $y/D = 0.15$. Pada titik pengukuran awal di $x/D = -2.24$ nilai C_p untuk $Re = 125000$ sebesar 0,10, $Re = 140000$ sebesar -0,80, $Re = 145000$ sebesar -0,12,

Re = 150000 sebesar -0.18 dan Re = 155000 nilai Cp sebesar -0.21. Pada rentang $-2.24 < x/D < -0.60$ kelima aliran tersebut cenderung konstan. Diprediksi aliran mengalami sedikit *recovery* tekanan dan terjadi *bubble separation* karena defisit momentum. Namun, Cp mengalami kenaikan maksimal pada $-0.45 < x/D < -0.15$. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan maksimum terjadi pada $x/D = -0.15$ sehingga Cp pada Re = 125000 sebesar 0,34, Re = 140000 sebesar 0.12, Re = 145000 sebesar 0.09, Re = 150000 sebesar 0,03 dan Re = 155000 nilai Cp adalah 0,01 ini menunjukkan momentum aliran berkurang karena kenaikan *adverse pressure gradient*.

Kemudian pada daerah *sudden contraction* mengalami penurunan tajam dari titik $x/D = -0.15$ sampai $x/D = 0.15$. Ini menunjukkan 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. Pada daerah ini mometum aliran sangat besar sehingga energi kinetis aliran cukup kuat untuk mengalir memasuki daerah *favorable pressure gradien*. Pada titik $x/D = 0.15$ aliran mencapai tekanan minimumnya yaitu sebesar -1.26. Selanjutnya mengalami sedikit kenaikan Cp sampai di $x/D = 0.30$ sebesar -1.01 dan Cp tidak mengalami perubahan dari $x/D = 0.30$ sampai di *exit* saluran, $x/D = 2.70$. Hal ini disebabkan aliran mengalami sedikit *recovery* tekanan dan kemudian aliran mulai terpeparasi.



Gambar 10. Grafik distribusi tekanan pada Stepped Wall $y/D = 0.30$

Gambar 10 memperlihatkan distribusi tekanan pada *stepped wall* $y/D = 0.30$. Pada titik pengukuran awal di $x/D = -2.24$ nilai Cp untuk Re = 125000 sebesar 0,10, Re = 140000 sebesar -0,80, Re = 145000 sebesar -0.12, Re = 150000 sebesar -0.18 dan Re = 155000 nilai Cp sebesar -0.21. Pada rentang $-2.24 < x/D < -0.60$ kelima aliran tersebut cenderung konstan. Diprediksi aliran mengalami sedikit *recovery* tekanan dan terjadi *bubble separation* karena defisit momentum. Namun, Cp mengalami kenaikan maksimal pada $-0.45 < x/D < -0.15$. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan maksimum terjadi pada $x/D = -0.15$ sehingga Cp pada Re = 125000 sebesar 0,34, Re = 140000 sebesar 0.12, Re = 145000 sebesar 0.09, Re = 150000 sebesar 0,03 dan Re = 155000 nilai Cp adalah 0,01 ini menunjukkan momentum aliran berkurang karena kenaikan *adverse pressure gradient*.

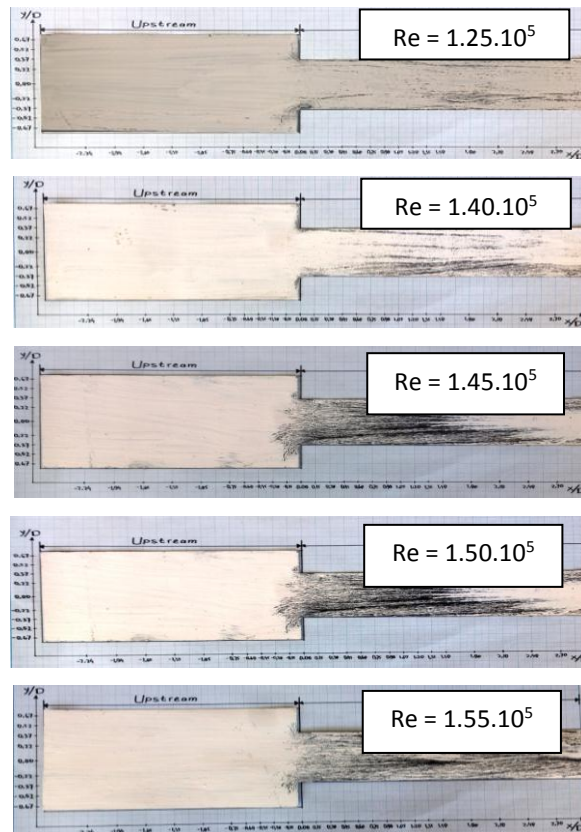
Kemudian pada daerah *sudden contraction* mengalami penurunan tajam dari titik $x/D = -0.15$ sampai $x/D = 0.15$. Ini menunjukkan momentum aliran cukup kuat untuk mengatasi gaya viskos aliran. Energi kinetis aliran meningkat cukup signifikan sehingga mampu membawa aliran dalam kondisi *favorable*, dimana tekanan mengalami penurunan arah aliran. Pada daerah ini mometum aliran sangat besar sehingga energi kinetis aliran cukup kuat untuk mengalir memasuki daerah *favorable pressure gradien*. Pada titik $x/D = 0.15$ aliran mencapai tekanan minimumnya yaitu sebesar -1.26. Selanjutnya mengalami sedikit kenaikan Cp sampai di $x/D = 0.30$ sebesar -1.01 dan Cp tidak mengalami perubahan dari $x/D = 0.30$ sampai di *exit* saluran, $x/D = 2.70$. Hal ini disebabkan aliran mengalami sedikit *recovery* tekanan dan kemudian aliran mulai terpeparasi.

3.2 Visualisasi Skin Friction

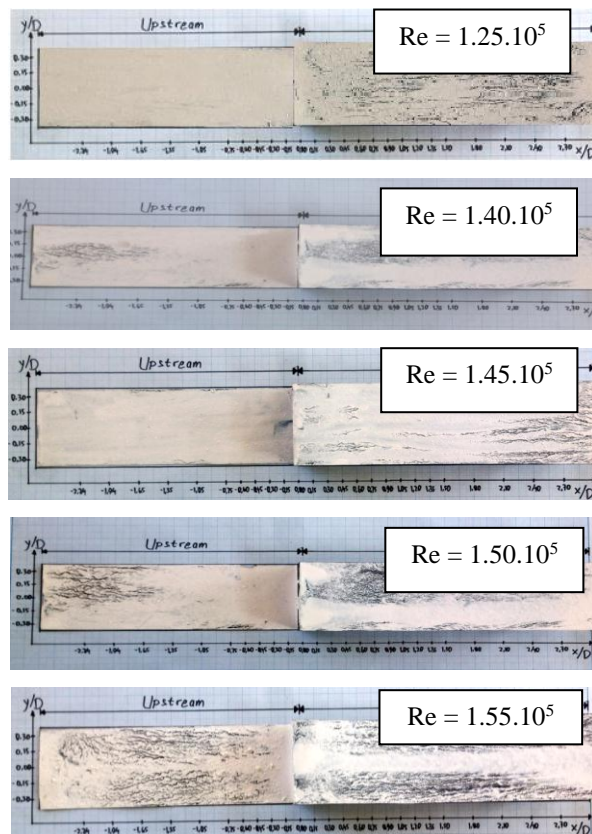
Gambar 11 merupakan visualisasi barisan *skin friction line* pada *contraction surface* dengan variasi Re. Pada visualisasi Re = 125000, aliran pada daerah sudut penyempitan penampang terjadi separasi yang dikarenakan kurangnya momentum. Dengan kenaikan Re pada Re = 140000, Re = 145000 dan Re = 150000 aliran mengalami penambahan luas *separation line* pada *sudden contraction area*. Kemudian separasi terbesar terjadi pada Re = 155000 saat aliran memasuki daerah *downstream*. Jadi semakin besar nilai Reynold maka akan semakin memperbesar terjadinya separasi pada daerah *downstream*. Hal ini ditunjukkan dengan semakin banyaknya goresan *skin friction line* di daerah permukaan *downstream* seiring bertambahnya Re.

Visualisasi *skin friction line* aliran pada *stepped wall* dengan variasi Re ditunjukkan pada Gambar 12 Dari visualisasi tampak jelas adanya zona resirkulasi pada daerah saat aliran masuk batas perubahan penampang tiba-tiba. Zona resirkulasi ini mengindikasikan *shear stress* tinggi karena goresan aliran pada permukaan. Sebelum memasuki daerah *sudden contraction* aliran tampak terpeparasi karena *deposit oil flow* terlihat pada daerah tersebut. Kemudian pada bagian *downstream* ditengarai *shear stress* cukup tinggi menandakan bahwa aliran *attachment* setelah melewati pengecilan penampang. Hal ini dapat dilihat semakin tipisnya kandungan *oil flow* karena goresan aliran pada

permukaan. Hasil visualisasi juga menunjukkan dengan semakin besarnya Re maka aliran *attachment* setelah *sudden contraction* akan semakin besar.



Gambar 11. Visualisasi *skin friction line* pada *contraction surface*



Gambar 12. Visualisasi *skin friction line* pada *stepped wall*

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan analisa yang telah dilakukan dalam pengujian ini, dapat disimpulkan bahwa :

- 1) Hasil-hasil pengukuran tekanan statis secara umum menunjukkan bahwa pola aliran yang terbentuk mengalami perubahan signifikan dengan variasi *Reynold number* 125000, 140000, 145000, 150000 dan 155000. Semakin tinggi *Re* maka koefisien tekanan yang dihasilkan semakin kecil.
- 2) Pada daerah *upstream* aliran mulai terseparasi dan mengalami *recovery* tekanan. Kemudian mendekati daerah *sudden contraction* energi kinetis aliran meningkat tajam sehingga mampu membawa aliran dalam kondisi *favorable*, dimana tekanan mengalami penurunan arah aliran. Pada daerah ini mometum aliran sangat besar sehingga energi kinetis aliran cukup kuat untuk mengalir memasuki daerah *favorable pressure gradien*. Hal ini menandakan bahwa terjadi penurunan tekanan dan kenaikan kecepatan pada bagian penyempitan penampang pada saluran. Begitu memasuki daerah *downstream* aliran mulai terseparasi lagi hingga *exit* saluran.
- 3) Dari hasil visualisasi barisan *skin friction line* pada *contraction surface* menunjukkan adanya penambahan luas daerah *sudden contraction* yang terseparasi seiring meningkatnya nilai *Re* pada aliran. Pada *stepped wall* terdapat zona resirkulasi pada daerah sebelum *sudden contraction* saluran.

5. Referensi

- [1] Saldana J. G. B., Diez P. Q., Silva F. S., and Mariscal I. C., 2007. Numerical simulation for the flow structures following a three-dimensional horizontal forward-facing step channel. LABINTHAP, Unidad Profesional Adolfo Lopez Mateos, Mexico City, Mexico.
- [2] Sherry, D. Lo Jacono and J. Sheridan, 2010. An experimental investigation of the recirculation zone formed downstream of a forward facing step. Fluid Laboratory for Aeronautical and Industrial Research, Departement of Mechanical and Aerospace Engineering, Monash University, Clayton, Victoria 3800, Australia.
- [3] Ando T. and Shakouchi T., 2004. Flow characteristics over forward facing step and through abrupt contraction pipe and drag reduction. Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ., Vol.29, pp. 1-8(2004).
- [4] Negm A. A. M., 2001. Flow Characteristics at Asymmetric Sudden Contraction. Sixth International Water Technology Conference, IWTC 2001, Alexandria, Egypt.
- [5] Stevenson, R. G., 1909. An experimental study of the flow of a subsonic and turbulent boundary layer over forward facing step. Aeronautical Engineer Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, USA.
- [6] Stier H., Gyr A., And Kinzelbach W., 1998. Laminar Separation On a Forward Facing Step. Eur. J. Mech. B/Fluid 18 (1999) 675-692, Elsevier, Paris.
- [7] Largeau J. F. and Moriniere V., 2007. Wall pressure fluctuations and topology in separated flows over a forward-facing step. Exp Fluids (2007) 42:21-40
- [8] Awasthi Manuj, 2012. High Reynolds Number Turbulent Boundary Layer Flow over Small Forward Facing Step. Master of Science, Aerospace Engineering, Blacksburg, Virginia.
- [9] Chiang T.P. and Sheu T.W.H., 2002. Bifurcation of Flow Through Plane Symmetric Channel Contraction. Departement of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University, 73 Chou-Shan Road, Taipei 106, Taiwan, R.O.C.
- [10] Chiang T. P., Sheu T.W.H. and Hwang R.R., 2002. Numerical studies of a three-dimensional flow in suddenly contracted channels. PHYSICS OF FLUIDS, VOLUME 14, NUMBER 5, MAY 2002.
- [11] Mushate K.S., 2007. Study of 2-D Laminar Flow In A pipe With A sudden Contraction of Cross Sectional Area. Eng. Technology, Vol.25, No.1
- [12] Orselli R.M. and Lemos M.J.S.D., 2002. Sudden Contraction in a Turbulent Flow With a Porous Insert". Latin American Journal of Solids and Structures, 2 (2005) 269-290.
- [13] Geratebau GmbH G.U.N.T., 1997. Equipment for Engineering Education. HM 225.01 Multi-Tube Manometer 16-fold for Air Flow Bench. Barsbuttel, Germany
- [14] Tobak M and Peake, D. J., 1982. Topology of Three-dimensional Separated Flow. Ann. Rev. Fluid Mech. 14:61-85