

KAJIAN EKSPERIMEN DAN SIMULASI NUMERIK KARAKTERISTIK PEMULIHAN TEKANAN PADA *SUDDEN EXPANSION CHANNEL*

* A.Fikry Nur Ilmi¹, Khoiri Rozi², Bambang Yunianto²

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: a.fikrynurilmi@gmail.com

Abstrak

Sudden expansion adalah bentuk saluran terekspansi secara tiba-tiba dari daerah upstream menuju downstream. Banyak sekali fenomena yang terjadi dalam sudden expansion channel meliputi resirkulasi, separasi maupun vortex yang timbul pada aliran. Pada penelitian sekarang menggunakan pipa sudden expansion dengan ER 1:2. Aliran pada sudden expansion merupakan turbulen dengan bilangan Reynold 80000 s/d 120000. Kajian sudden expansion channel menggunakan metode eksperimental dan numerik. Penelitian secara eksperimental menggunakan wind tunnel open circuit AIRFLOW BENCH AF10 untuk mengukur distribusi tekanan statis pada sudden expansion channel. Metode numeric dengan menggunakan paket software ANSYS 14 dengan parameter input sesuai dengan eksperimen. Didapatkan hasil semakin tinggi bilangan Reynold maka kecepatan yang dihasilkan akan semakin tinggi, sehingga coefficient pressure akan semakin besar. Pada daerah ditunjukkan momentum aliran cukup kuat untuk mengatasi gaya viskos, sehingga energy kinetis aliran mampu membawa aliran dalam kondisi favorable. Ketika memasuki downstream aliran tersparasi sehingga membentuk zona resirkulasi pada daerah dinding expansion. Nilai coefficient pressure meningkat seiring dengan adanya kenaikan bilangan Reynold.

Kata Kunci: *sudden*, separasi, tekanan, aliran

Abstract

Sudden expansion is the expanded form of the channel abruptly from the upstream to the downstream. Lots of phenomena that occur in a sudden expansion channel include recirculation, separation or vortex that arises in the flow. In the present study using a pipe with a sudden expansion of ER 1:2. The sudden expansion flow is turbulent with Reynolds number 80000 up to 120000. Studies sudden expansion channel using experimental and numerical methods. Experimental studies using open-circuit wind tunnel airflow BENCH AF10 to measure the static pressure distribution on the sudden expansion channel. While the numerical analysis using FLUENT 14.0 ANSYS with the input parameters in accordance with the experiment. Result showed higher Reynolds number the velocity generated will be higher, so the pressure coefficient will be higher. In upstream region indicated flow momentum is strong enough to overcome the viscous force, so that the kinetic energy is able to flow with the flow in favorable conditions. When entering the downstream was separated until recirculation zone forming on the walls of the expansion area. Pressure coefficient values increase with an increase in Reynolds number.

Keywords: *sudden*, separation, pressure, flow

1. PENDAHULUAN

Sudden Expansion channel adalah sebuah saluran yang terekspansi secara tiba-tiba pada bagian *downstream*. Bentuk saluran ini banyak diterapkan dalam dunia industri. Dibidang *heat exchanger*, *sudden expansion* digunakan untuk menurunkan kecepatan sehingga perpindahan panas berlangsung lebih efisien, dan pada *gas turbine sudden expansion channel* berfungsi untuk menaikan tekanan kerja dalam ruang bakar (*combustion chamber*) dan mengoptimalkan pencampuran bahan bakar. Kemudian pada proses pembakaran dalam *burner* digunakan untuk meningkatkan efek *flame luminosity* dan menurunkan NO_x .

Meskipun pada aplikasinya *sudden expansion* banyak digunakan, akan tetapi banyak fenomena yang sangat kompleks seperti munculnya separasi, resirkulasi, maupun *vortex*. Separasi aliran mengakibatkan adanya *blockage* pada aliran utama yang berakhir pada pengurangan debit (*flow rate*). Resirkulasi aliran dan *vortex* menyebabkan adanya aliran balik (*back flow*) sehingga mengganggu aliran utama.

Armaly dkk [1] dengan menggunakan teknik Laser-Doppler. Teknik ini digunakan untuk mengukur distribusi kecepatan dan panjang reattachment pada downstream back-ward facing step dalam saluran dua dimensi menggunakan $70 < Re < 8000$. Didapatkan variasi wilayah aliran yang digolongkan pada variasi panjang separasi berdasarkan Re dan menunjukkan primary zone recirculating flows serta penambahan wilayah aliran separasi downstream pada step dan di kedua sisi saluran yang di uji.

Spazzini dkk [2] melakukan hal yang serupa tentang perilaku ketidakstabilan aliran. Perhatian utama ditunjukan pada gerak frekuensi rendah dan pengukuran skin friction untuk memperoleh waktu yang ditempuh dari step sampai downstream pada daerah reattachment

Nie dkk [3] pada penelitian ini mengamati aliran 3D *backward facing step* dilakukan untuk melakukan pemetaan *boundary* arus balik (*reverse flow*) yang berkembang pada geometri sebagai fungsi dari perubahan Re . Pengamatan dilakukan pada bilangan reynold antara 100 sampai dengan 8000 sehingga mencakup aliran laminar, transisi dan turbulen. Pada aliran laminar daerah resirkulasi bertambah panjang seiring dengan kenaikan bilangan reynold. Pada aliran transisi resirkulasi cenderung menurun dengan kenaikan bilangan reynold, sedangkan pada turbulen resirkulasi cenderung konstan.

Jongebloed [4] Penelitian numerik dilakukan pada pengaruh bilangan Reynolds pada pemisahan dan titik reattachment pada *backward facing step*. Kedua aliran laminar maupun turbulen dipertimbangkan untuk aliran viskos *two-dimensionless*, mengabaikan kompresibilitas, pemberian panas, dan gaya dari luar. *steady-state coupled pressure and velocity* digunakan untuk aliran laminar dan *steady-state segregated pressure-velocity* digunakan dengan $k-\epsilon$ wall-enhance model turbulen yang digunakan. Ekspansi rasio tinggi inlet ke outlet tinggi adalah 1,942. Hasilnya dibandingkan dengan eksperimental dan numerik data. Penelitian dengan bilangan reynolds rendah ($Re < 400$) dan nomor Reynolds tinggi ($Re > 15000$).

Youngmin Bae, dkk [5] melakukan penelitian numerik dengan menyelidiki aliran turbulen pada sudden expansion channel dengan chamfer edge. Dengan bantuan software CFD versi 12.0, serangkaian simulasi numerik dilakukan pada ukuran chamfer bervariasi 0,02-0,5, rasio ekspansi antara 2 dan 6, dan dengan sudut kemiringan mencapai 450 di sejumlah Reynolds dari 3×10^5 . Pertama, penelitian menyajikan dan menganalisa penurunan tekanan lokal di seluruh sudden expansions tanpa chamfer. Ketergantungan penurunan koefisien tekanan pada parameter geometris utama diselidiki secara menyeluruh. Akhirnya, baru meneliti sudden expansi dengan menggunakan chamfer dengan variasi ukuran dan sudut tertentu. Simulasi untuk turbulen digunakan metode $k-\epsilon$ sebagai model yang dianggap mempunyai hasil yang paling baik.

Koronaki, dkk [6] menggunakan tiga model two-equation dan second-moment closure diimplementasikan dalam kasus aliran turbulen pada diesel dengan sudden expansion channel. Dengan menggunakan standar $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$ dan two scale $k-\epsilon$ model. RNG $k-\epsilon$ model memprediksi transisi cukup realistis dari nilai tinggi ke nilai rendah η sebagai perubahan rezim aliran dari non-equilibrium ke equilibrium turbulensi.

Chiang dkk [7] dengan meneliti steady bifurcation pada aliran tiga dimensi simetri sudden expansion. Ketika aspect ratio saluran melebihi nilai kritis, step height bifurcation berkembang pada symmetry breaking orientation yang berbeda pada sisi kiri dan kanan saluran dan percabangan arah spanwise.

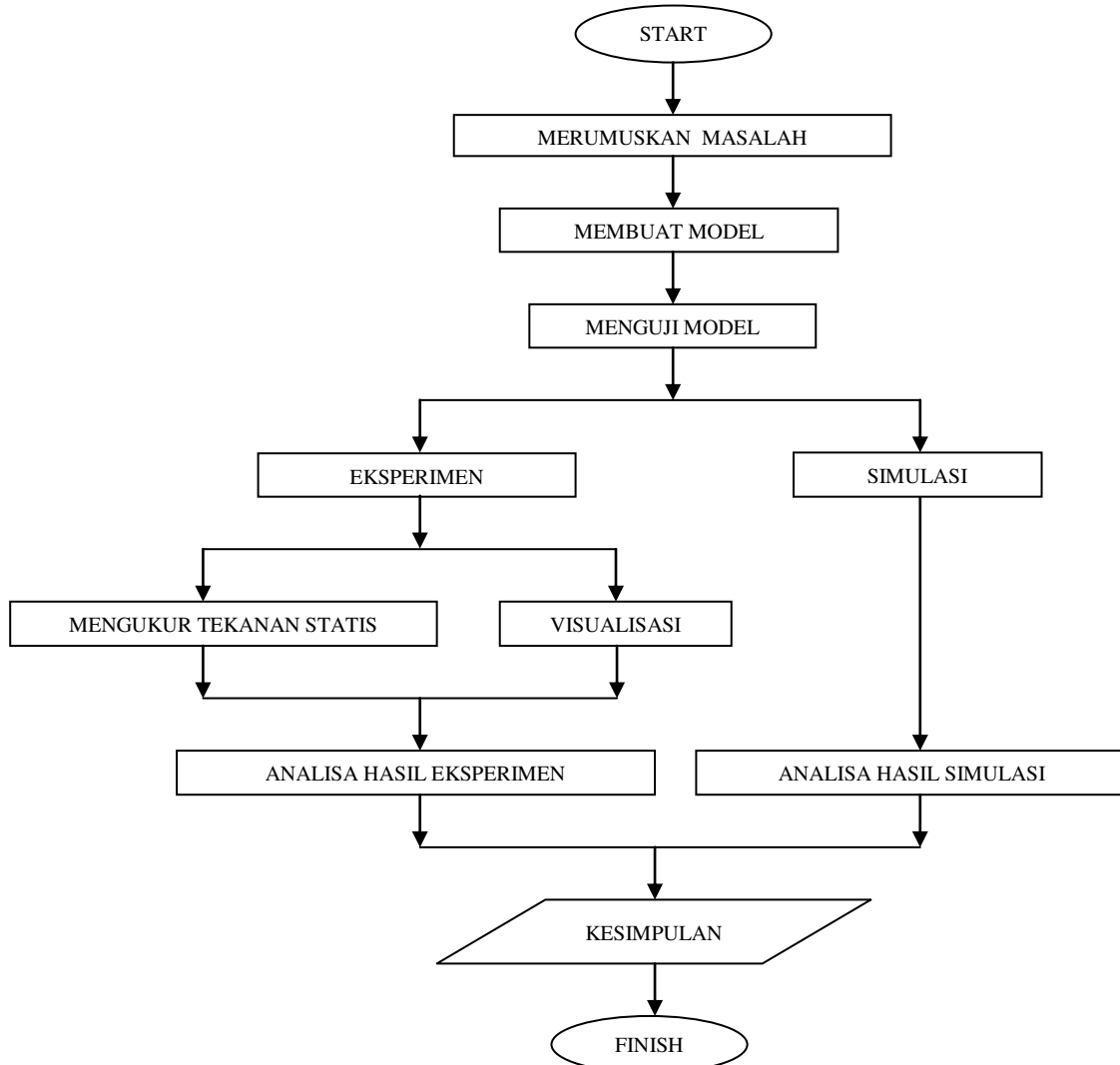
Sanjay, dkk [8] melakukan perhitungan dengan menggunakan metode resolusi tinggi untuk berbagai bilangan Reynolds dalam kisaran 50 sampai dengan 800. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk bilangan Reynolds rendah, aliran tersparasi simetris. Setelah bilangan Reynolds ditingkatkan, percabangan terjadi di sejumlah Reynolds kritis dan pemisahan gelembung yang berbeda bentuk dan ukuran pada dinding bawah dan atas. Ketidaksimetrisan menjadi lebih kuat dengan meningkatnya bilangan Reynolds sampai aliran menjadi time dependent.

Konstantinos [9] dengan menggunakan software ILES dengan high-order methods (3rd dan 5th -order MUSCL, 5th -order WENO scheme) menangkap fitur aliran dan kondisi aliran pada sudden expansion channel. Hasil penelitian menunjukan bahwa intensitas dari turbulent intensity dan subsequently, puncak energi kinetik paling besar pada bilangan reynold yang kecil yang dikaji. Selain itu zona resirkulasi primer dan vortex naik dengan seiring bertambahnya bilangan reynold.

Adapun tujuan yang ingin diperoleh dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- 1) Memperoleh karakteristik pemulihan tekanan dan distribusi tekanan statis pada sudden expansion channel
- 2) Mengetahui efek perubahan Reynolds number terhadap pemulihan tekanan pada sudden expansion channel
- 3) Mengetahui pola topologi aliran dalam sudden expansion channel

2. METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 1. Flowchart Penelitian

2.1 Metode Eksperimen

Metode eksperimen ini digunakan untuk mengukur tekanan statis pada permukaan dari *sudden contraction channel*. Dilakukan pengukuran tekanan terhadap *pressure tap* yang telah dibuat dalam alat uji. Dengan menghubungkan *pressure tap* dengan pipa-pipa manometer menggunakan selang dengan diameter 2 mm. Hasil yang terbaca dalam manometer berupa beda ketinggian pada pipa sebelum dan sesudah apparatus dioperasikan. Pada penelitian *sudden expansion* yang dilakukan, Model terbuat dari aluminium dengan panjang upstream (L_u)=180mm, dan panjang downstream (L_d) 200mm dengan dimensi inlet (A_i)=100 x 50 mm² dan outlet (A_o)=200 x 50 mm², Sehingga mempunyai Expansion ratio (ER)= 1:2. Pada permukaan dibuat *pressure tap* dengan diameter (d_{tube}) = 2 mm. Eksperimen dilakukan di Laboratorium Thermofluida, Jurusan Teknik Mesin UNDIP menggunakan *Airflow Bench AF 10A* seperti pada Gambar 2. 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.

Tabel 1. Menunjukkan tekanan awal pengukuran.

Volt (V)	U_{udara} (m/s)	P_{total} (pascal)	P_{statis} (pascal)	Reynold
49	19.05	261.63	50.13	8×10^4
55.9	23.82	401.17	70.67	1×10^5
81.9	28.58	575.6	99.80	$1,2 \times 10^5$



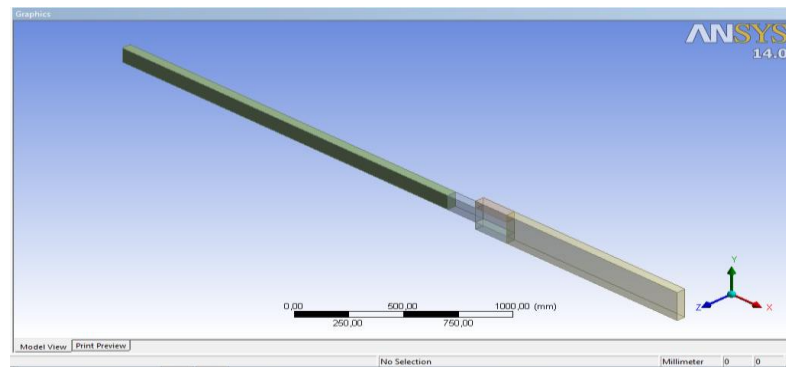
Gambar 2. AIR FLOW BENCH AF 10A

2.2 Simulasi CFD

Computational fluid dynamics atau yang biasa disebut dengan CFD adalah suatu alat bantu yang dapat menganalisa aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena yang berkaitan dengan reaksi kimia dengan menggantikan system persamaan diferensial dengan sebuah persamaan aljabar yang diselesaikan menggunakan perhitungan komputer.

2.2.1. Deskripsi Model

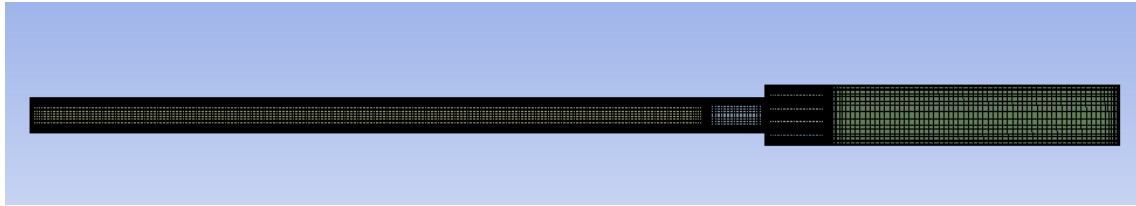
Model yang digunakan adalah pipa *sudden expansion* dengan luas penampang inlet adalah $100 \times 50 \text{ mm}^2$ dan penampang outlet $200 \times 50 \text{ mm}^2$. Panjang dari pipa *sudden contraction* adalah 380 mm seperti pada Gambar 3. aliran fluida yang masuk adalah udara dengan temperature 303K. Fluida mengalir dalam pipa dengan kecepatan antara 19.05 sampai 28.58 m/s.



Gambar 3. Deskripsi model

2.2.2. Penggenerasian Mesh

Penggenerasian mesh dilakukan pada menu mesh ANSYS setelah pembuatan model telah selesai pada desain modeler. Meshing dilakukan untuk membagi model menjadi bentuk *cell/node* sehingga dapat dihitung secara diskritisasi dengan program fluent. Pada model ini menggunakan mesh *edge* ,dengan kriteria mesh *number of division* yang di sesuaikan fungsinya pada model. Kondisi batas pada eksperimen dimasukkan dengan memilih face pada geometri lalu menginput name selection dengan nama yang di inginkan. Gambar . 4 menunjukkan *meshing* pada pipa.



Gambar 4. Meshing pada pipa

2.3 Simulasi ANSYSFLUENT

Simulasi ada ANSYSFLUENT dilakukan dengan tahapan-tahapan sebagai berikut:

1. Melakukan *import file mesh generator* ANSYS *Workbench* atau mengkoneksikan jalur lintas mesh-FLUENT.
2. *File* yang diimport merupakan domain komputasi aliran yang ingin ditinjau dan diteliti.
3. Melakukan pengecekan *grid*.
4. Menentukan formulasi solver dan model fisik permasalahan (misalnya jenis aliran 95aminar/turbulen, inviskos, *steady* dan melibatkan perpindahan panas atau tidak).
5. Menentukan jenis dan sifat material.
6. Menentukan kondisi batas model yang dibuat.
7. Menentukan parameter kendali solusi (*solution control*)
8. Melakukan tebakan awal (*initialize*) medan aliran
9. Melakukan proses perhitungan (iterasi)
10. Melakukan *postprocessing* dengan menampilkan nilai dan Gambar kontur.

Adapun kondisi batas pada permukaan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kondisi Batas Pipa *Sudden Expansion*

Parameter	Sisi Inlet			Sisi Outlet		
Reynold	80000	100000	120000	80000	100000	120000
Velocity Inlet	19.05	23.82	28.58			
Tekanan statis	50.13	70.67	99.80			
Turbulent intensity	3.9	3.79	3.71	3.9	3.79	3.71
Hidraulic diameter	0.0667			0.08		

2.4 Penentuan Solusi

Pemilihan model solusi yang digunakan dalam proses simulasi ini menggunakan model solusi seperti dalam Tabel

3.

Tabel 3. Model solusi dalam simulasi

<i>Scheme</i>	<i>SIMPLE</i>
<i>Viscous Model</i>	<i>Realizable k-ε</i>
<i>Near-Wall Treatment</i>	<i>Standard wall function</i>
<i>Gradient</i>	<i>Least Squares Cell Based</i>
<i>Pressure</i>	<i>Second Order</i>
<i>Momentum</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Turbulent Dissipation Rate</i>	<i>Second Order Upwind</i>

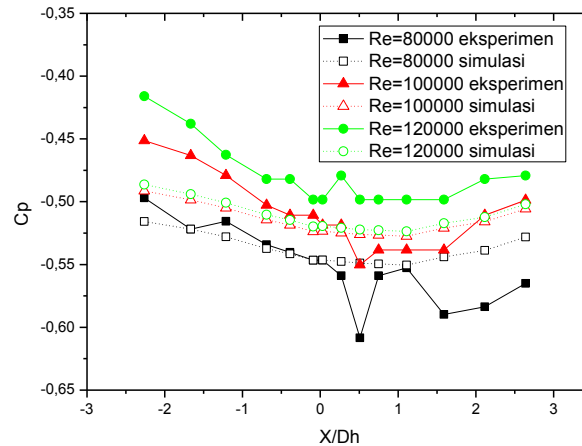
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Grafik distribusi tekanan untuk melihat, kondisi pemulihan tekanan, dengan menganalisa pada hasil eksperimental, yang nantinya dibandingkan dengan hasil dari simulasi.

3.1 Distribusi Tekanan pada Pipa *Sudden Contraction* pada $Y/D_h = 0.06$

Dari hasil eksperimen didapatkan distribusi tekanan statis pada expansion surface yang ditunjukkan pada Gambar 5. Dilihat grafik nilai coefficient pressure pada bilangan Reynold 80000, 10000 dan 120000 ketika udara memasuki sisi upstream menuju downstream adanya efek viscous pada dinding yang membentuk boundary layer akibatnya momentum

aliran naik sehingga terjadi penurunan tekanan secara signifikan pada rentang $x/D_h = -2,26$ sampai dengan $x/D_h = 0,00$, sampai di downstream tekanan masih terjadi penurunan sampai posisi $x/D_h = 1,59$ tapi penurunan tersebut secara perlahan. Pada downstream efek viskous tidak terlalu mempengaruhi aliran akan tetapi perubahan penampang akan membuat momentum aliran menjadi lemah dan menimbulkan efek adverse pressure gradient (ADP), sehingga penurunan tekanan tidak secara signifikan.

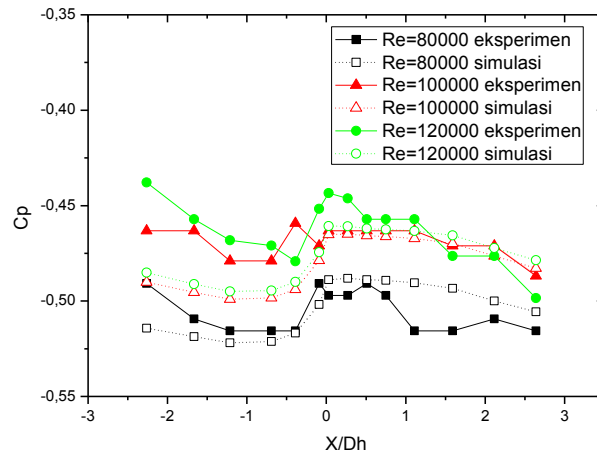


Gambar 5. Distribusi Koefisien Tekanan di Permukaan *Surface expansion* pada $Y/D_h = 0,00$ dengan menggunakan metode Ekeperimen dan Simulasi

Ketika memasuki downstream pada posisi $x/D_h = 1,59$ sampai posisi $x/D_h = 2,64$ terjadi kenaikan nilai coefficient pressure, hal tersebut dimungkinkan karena adanya zona diffuser akibat perbedaan penampang yang mengakibatkan kenaikan tekanan dari momentum yang tidak mampu menahan adverse pressure gradient yang mengakibatkan kondisi unfavorable.

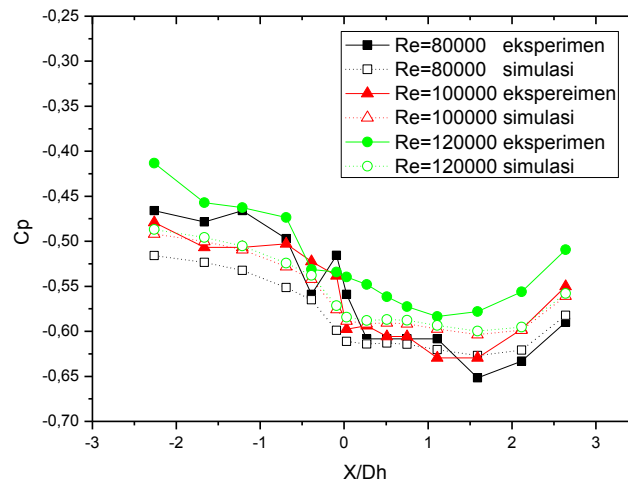
Dari hasil Simulasi ada bilangan reynold 80000, 100000 dan 120000 ketika udara memasuki inlet hingga downstream terjadi penurunan tekanan secara signifikan yang diakibatkan adanya efek viskous fluida pada dinding sehingga momentum aliran meningkat yang dapat membawa aliran dalam kondisi favorable. kemudian pada kondisi $x/D_h = 0,00$ pada bilangan reynold 80000, 100000, dan 120000 mengalami penurunan secara perlahan, dan pada rentan $x/D_h = 1,11$ dan $x/D_h = 1,59$ mempunyai nilai yang cenderung tetap, hal ini disebabkan momentum aliran mampu menghadapi adverse pressure gradient, setelah melewati posisi $x/D_h = 1,59$ terjadi kenaikan nilai tekanan hal itu diakibatkan aliran tidak mampu lagi menahan adanya *adverse pressure gradient* akibat sehingga tekanan dinamik menurun. Hal itu juga disebabkan adanya efek dari zona *diffuser* yang mengakibatkan kecepatan menurun dan tekanannya naik

Gambar 6 menunjukkan distribusi tekanan pada *surface expansion* pada $Y/D_h = 0,72$. Grafik dibuat dengan menggunakan data-data hasil eksperimen dan simulasi. Tekanan aliran turun ketika akan memasuki daerah *downstream* karena 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 dekat downstream tekanan mengalami recovery sehingga terjadi kenaikan tekanan pada daerah downstream.



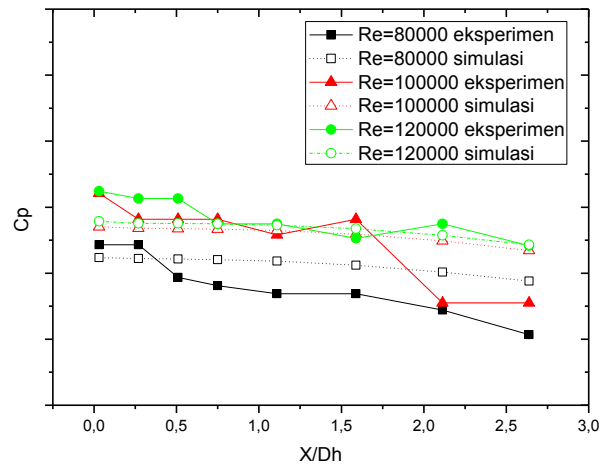
Gambar 6. Distribusi Koefisien Tekanan di Permukaan *Surface Expansion* pada $Y/D_h=0,72$ dengan menggunakan metode Eksperimen dan Simulasi

Gambar 7 menunjukkan grafik distribusi tekanan pada $Y/D_h = -0,72$ pada daerah upstream tekanan cenderung turun ketika memasuki daerah downstream aliran kembali mengalami pemulihan tekanan yang dikarenakan efek diffuser sehingga tekanan naik.



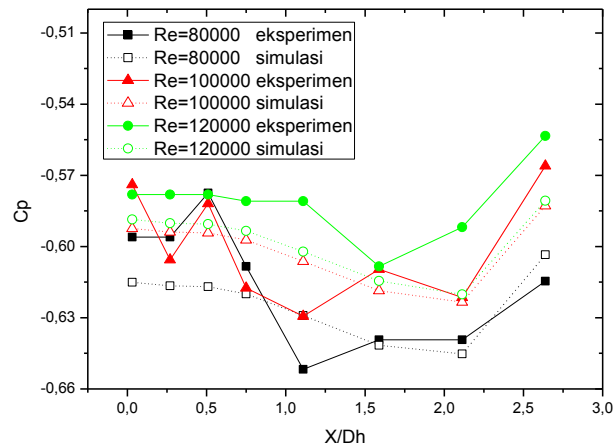
Gambar 7. Distribusi Koefisien Tekanan di Permukaan *Surface Expansion* pada $Y/D_h=-0,72$ dengan menggunakan metode Eksperimen dan Simulasi

Gambar 8 menunjukkan distribusi tekanan pada daerah step dekat dinding pada grafik menunjukkan adanya penurunan nilai coefficient pressure hal tersebut dikarenakan efek nozzle yang ada pada daerah dinding step yang mengakibatkan zona resirkulasi. Pada daerah dekat dinding step nilai tekanan lebih tinggi dibandingkan dengan daerah mendekati point reattachment sehingga terjadi penurunan tekanan.



Gambar 8. Grafik Distribusi Koefisien Tekanan di Permukaan *Surface Expansion* pada $Y/Dh=1,47$ dengan menggunakan metode Eksperimen dan Simulasi

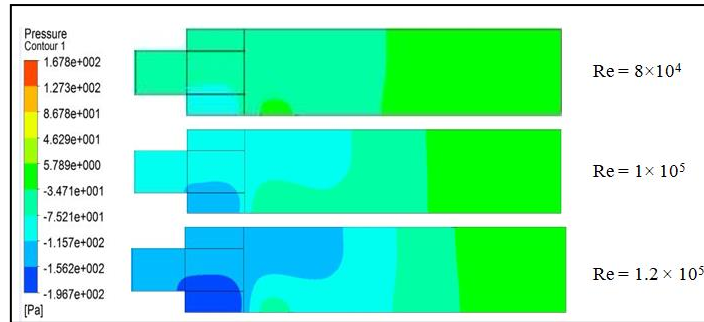
Gambar 9 menunjukkan distribusi tekanan pada daerah dekat dinding expansion awal mula terjadi penurunan tekanan kemudian pada daerah $1,59 \leq X/Dh \leq 2,11$ terjadi kenaikan tekanan pada daerah downstream, hal tersebut dimungkinkan sudah selesainya daerah resirkulasi sehingga tekanan mengalami pemulihan.



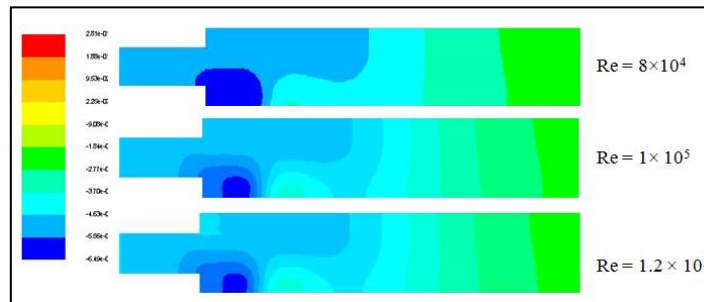
Gambar 9. Distribusi Koefisien Tekanan di Permukaan *Surface Expansion* pada $Y/Dh= -1,47$ dengan menggunakan metode Eksperimen dan Simulasi

3.2. Analisa kontur tekanan pada pipa sudden contraction

Pada gambar 10 adalah gambar dari kontur distribusi *coefficient pressure* pada *sudden expansion channel* dengan variasi bilangan Reynold yaitu 80000, 100000, dan 120000. Ketika udara memasuki *upstream* sampai *downstream* terjadi penurunan tekanan secara signifikan karena efek *viscous* pada dinding fluida sehingga fluida membentuk profil kecepatan, yang mengakibatkan kenaikan tekanan dinamik pada daerah *upstream* menuju ke *downstream*.



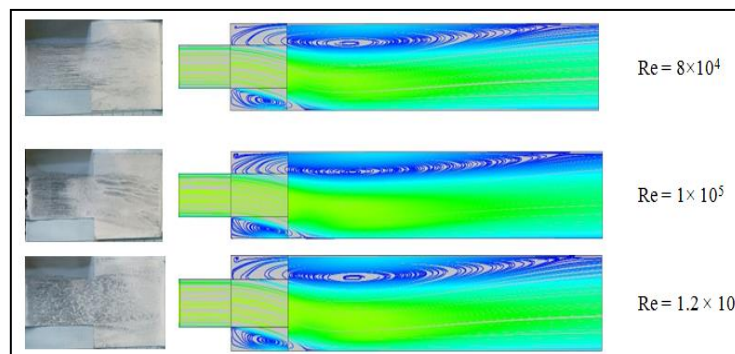
Gambar 10. Kontur tekanan statik



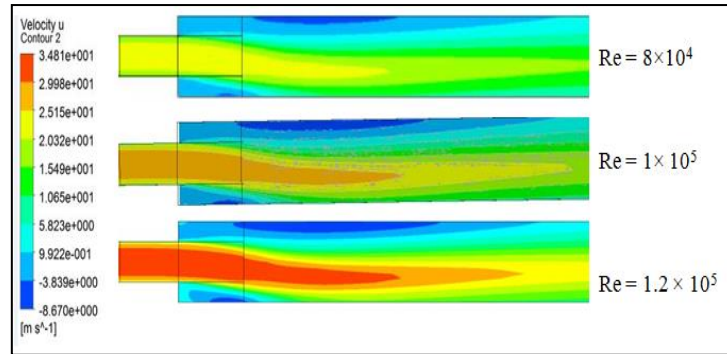
Gambar 11. Kontur *coefficient pressure* pada bilangan reynold

Ketika udara memasuki *downstream* efek *viscous* tidak terlalu berpengaruh besar sehingga ada penurunan tekanan akan tetapi cenderung konstan. Hal yang mempengaruhi perubahan aliran yang utama pada daerah *downstream* adalah perubahan penampang tiba-tiba (*expansion*) sehingga aliran yang lepas dari dinding *upstream* harus melawan *adverse pressure gradient* yang arahnya berlawanan dari arah utama pada *downstream*, sehingga terjadi adanya *reattachment* dimana aliran yang lepas dari dinding *upstream* akan berusaha untuk menyentuh dinding kembali sehingga nantinya akan terbentuk lapisan batas aliran kembali. Pada kontur *coefficient pressure* pada *downstream* terlihat perbedaan yang mencolok antar sisi hal itu terjadi pada bilangan reynold 80000, 100000, dan 120000. Perbedaan tersebut disebabkan adanya *adverse pressure gradient* yang tidak mampu ditahan oleh energi kinetis dari fluida sehingga fluida dengan kecepatan tertentu akan memilih daerah dimana kontur tekanan pada fluida tersebut lebih rendah sehingga aliran tersebut berubah arah pada daerah yang mempunyai tekanan yang rendah.

Gambar 12 adalah visualisasi barisan *skin friction line* pada *expansion surface* dengan variasi Re. Pada visualisasi Re = 80000 aliran dalam posisi awal terseparasi karena kurangnya momentum. Dengan kenaikan Re pada Re = 100000 dan Re = 120000 aliran mengalami penundaan separasi hal ini ditunjukkan dengan mundurnya *separation line*. Separasi aliran semakin mundur atau tertunda dengan kenaikan Re hal ini bias dilihat pada visualisasi pada Re = 100000 dan Re = 120000. Pada bagian *downstream* pola aliran menyerupai gelombang yang unsimetris. Hal ini ditunjukkan dengan adanya goresan *skin friction line* pada permukaan yang tak simetris antara *upper* dan *lower surface*.



Gambar 12. Visualisasi *skin friction line* pada *expansion surface*



Gambar 13. Kontur kecepatan pada *middle plan*

4. KESIMPULAN

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

- 1) Dari hasil pengujian didapatkan distribusi tekanan statis berbeda pada sudden expansion antara step , hal tersebut mengakibatkan aliran menjadi berbelok arah menuju tekanan yang lebih rendah
- 2) Semakin tinggi bilangan reynold maka akan sebanding lurus dengan nilai *coefficient pressure*
- 3) Hasil visualisasi aliran dengan menggunakan metode *skin friction* didapatkan aliran mengalami pembelokan dikarenakan tidak mampunya aliran melawan adverse pressure gradient dari salah satu sisi.

5. REFERENSI

- [1] ArmalyB. F., DurstF., PereiraJ. C. F., and SchonungB., “Experimental and Theoretical Investigation of Backward-Facing Step Flow”, J . Fluid Mech. (1983)vol. 127, pp. 473-496,1983.
- [2] SpazziniP.G., LusoG., OnoratoM., ZurloN., and Di CiccaG.M.,“Unsteady Behaviour of Back-Facing Step Flow”, Experiments in Fluids 30 (2001) 551-561, Springer-Verlag, 2001.
- [3] Nie J. H., and Armaly B. F., “Reverse flow regions in three-dimensional backward-facing step flow”, International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 4713–4720.
- [4] Jongebloed,Luke,. “Numerical Study Using Fluent of the Separation and reattachment Points for Backward-Facing Step Flow”Rensselear Polytechnich Institute Hartford,2008.
- [5] Young Min Bae andYoung In Kim. “Prediction of Local Pressure Drpo for Turbulent Flow In Axisymmetric sudden Expansion With Chamferes Edge” Elsevier : Chemical Engineering Research and Design .2013
- [6] Koronaki,ED , dkk. “ Numerical Study of Turbulent Diesel Flow In a PipeWith Sudden Expansion Channel”. Elsevier:Applied Mathematical Modelling 25(2001) 319-333.
- [7] ChiangT. P., SheuT.W.H., HwangR.R., and SauA., “*Spanwise Bifurcation in Plane-Symmetric Sudden-Expansion Flows*”, Physical Review E, Volume 65, 016306, 2001.
- [8] Patel, Sanjay., and Drikakis, Dimitris., “Large eddy simulation of bifurcating and transitional suddenly expanded flows”, European Conference on Computational Fluid Dynamics, The Netherlands, 2006.
- [9] Karantonis,Konstantinos . “ *Modelling and Simulation Of Turbulence in Unsteady Separated And Suddenly-Expanded Flows*”. Thesis Cranfield university. 2012