

## KAJIAN EKSPERIMENTAL DAN SIMULASI NUMERIK DISTRIBUSI TEKANAN STATIS PADA *SUDDEN EXPANSION CHANNEL*

\*Sigit Prabowo<sup>1</sup>, Khoiri Rozi<sup>2</sup>, Bambang Yuniarto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup> Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

\*E-mail: [sigitprabowo777@gmail.com](mailto:sigitprabowo777@gmail.com)

### Abstrak

*Dalam sudden expansion channel banyak fenomena yang terjadi seperti resirkulasi, separasi atau vortex yang muncul dalam aliran. Pada penelitian ini menggunakan sudden expansion dengan ER 4:7. Aliran fluida adalah turbulen steady dengan variasi Re 80000 sampai 120000. Metode eksperimen untuk mengukur distribusi tekanan statis pada expansion surface. Metode numerik dilakukan dengan menggunakan software Ansys 14 dengan input yang sama parameter eksperimen. Semakin tinggi Re, maka coefficient pressure ( $C_p$ ) akan semakin besar. Pada daerah upstream ditunjukkan bahwa momentum aliran cukup kuat untuk mengatasi gaya viskos, sehingga energi kinetik aliran meningkat cukup signifikan untuk membawa aliran dalam kondisi favorable. 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. Hasil Visualisasi barisan skin friction line pada expansion surface menunjukkan adanya penundaan separasi seiring peningkatan Re. Aliran tidak simetris tapi berbelok. Pada hasil simulasi menunjukkan kesamaan dengan hasil eksperimen.*

**Kata kunci:** sudden, turbulen, separasi, tekanan

### Abstract

*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 4:7. The flow is turbulent steady with Re number 80000 to 120000. Experimental studies to measure the static pressure distribution on the sudden expansion surface. Method numerically using software Ansys 14 with the inputs are same with experiment parameter. When Re increase, the pressure coefficient ( $C_p$ ) will be even greater. In the upstream region indicated that the momentum flow is strong enough to overcome the viscous force, so that the kinetic energy flow increased significantly to bring the flow under favorable conditions. In the upstream region, the expansion area towards the speed increases, contrary to the more downstream toward the exit channel velocity decreases, this is because the strength of the adverse pressure gradient (APG) at the end of the end of the line. Results Visualization lineup skin friction line on the surface indicates expansion concomitant increase in delay separation Re. The flow is not symmetrical but turn. In the simulation results show similarities with the experimental results.*

**Keyword:** sudden, turbulent, separation, pressure

## 1. PENDAHULUAN

*Sudden expansion channel* adalah saluran yang terekspansi secara tiba-tiba pada bagian downstream. Bentuk saluran ini banyak diterapkan dalam dunia industri. Pada bidang *heat exchanger*, *sudden expansion* digunakan untuk menurunkan kecepatan sehingga perpindahan panas berlangsung lebih efisien, dan pada *gas turbine sudden expansion channel* berfungsi untuk menaikkan 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  $\text{NO}_x$ .

Meskipun *sudden expansion* banyak kegunaannya, tetapi banyak fenomena yang sangat kompleks seperti munculnya separasi, resirkulasi maupun *vortex*. Separasi aliran mengakibatkan adanya *blockage* pada aliran utama yang berakibat pada pengurangan debit (*flow rate*). Resirkulasi aliran dan *vortex* menyebabkan adanya aliran balik (*back flow*) sehingga mengganggu aliran utama. Berdasarkan uraian di atas, jelas bahwa karakteristik aliran melalui *sudden expansion channel* sangat kompleks sehingga perlu dilakukan kajian secara terus-menerus dengan berbagai variabel.

Dalam penelitian ini menggunakan metode eksperimen dan simulasi numerik. Kajian eksperimental dengan mengukur distribusi tekanan statis pada permukaan yang nantinya disajikan dalam bentuk *coefficient pressure* ( $C_p$ ) dan menggunakan visualisasi aliran dengan menggunakan teknik *surface flow visualization* (SFV) untuk menggambarkan

topologi aliran *skin friction line* dengan adanya variasi Re, sedangkan kajian simulasi numerik menggunakan paket *software* Ansys- Fluent 14.

Kajian tentang *sudden expansion* telah dilakukan oleh banyak peneliti, diantaranya Armaly [1], menggunakan *laser doppler* untuk meneliti *sudden expansion channel* dengan ER 1:1.94 dan variasi Re 70-8000. Hasil yang diperoleh adalah panjang *reattachment* meningkat untuk aliran laminar dengan adanya kenaikan Re. Francine Battaglia, dkk [2], meneliti secara numerik dan eksperimental dengan berbagai variasi ER dan Re 50-200. Bifurkasi simetris ditemukan pada Re rendah, mewakili transisi dari simetris berkembang ke jet asimetris. Re kritis pada titik bifurkasi ditentukan untuk berbagai rasio ekspansi. Chiang and Tony [3], menggunakan simulasi numerik membandingkan dengan Armaly [1]. Adanya kesamaan hasil dengan eksperimen Armaly untuk  $Re < 400$ , seiring meningkatnya Re maka *longitudinal vortices* menjadi lebih jauh.

Koronaki [4], meneliti dengan simulasi numerik dengan berbagai model simulasi. Hasil yang diperoleh model *RNG k-ε* merupakan model paling baik dengan penorepan *non-equilibrium wall function*. Spazzini, dkk [5], dengan eksperimen FFP (*Forward Flow Probability*) dan PIV mendapatkan adanya *bubble recirculation* ditandai dengan frekuensi yang lebih rendah dibandingkan dengan frekuensi pada *flapping motion*. Chiang, dkk [6], menggunakan simulasi numerik dengan Re 60, mendapatkan ketika AR mencapai nilai kritis maka akan terjadi perbedaan *bifurcation* antar sisi, karena adanya *eddy* yang besar. Perilaku aliran 3-D berlaku. Hawa and Ruzak [6], dengan simulasi numerik dan analisis asimtot mendapatkan hasil adanya dari interaksi antara efek disipasi viskos, gangguan konveksi aliran pada bagian *base symmetric flow* di *downstream* dan konveksi aliran pada *upstream* yang terganggu oleh gangguan 2-D *asymmetric*.

Nie and Armaly [7], menggunakan *laser doppler* dengan variasi  $98.5 < Re < 525$ , mendapatkan *reattachment* aliran laminar naik seiring naiknya Re, untuk aliran transisi berkurang dengan kenaikan Re dan *reattachment* aliran *turbulent* cenderung tetap. Mansoori, dkk [8], menggunakan simulasi numerik dengan variasi Re 635009-731754 mendapatkan hasil *realizable k-ε* memberikan prediksi yang akurat. R.C. Lima [8], menggunakan metode simulasi FEM dan FVM dengan variasi  $100 \leq Re \leq 2500$ , mendapatkan adanya peningkatan *non-linear* dari panjang *reattachment* yang sesuai dengan hasil eksperimen. Vikram Roy [9], meneliti secara numerik menggunakan *k-ε model* dengan kecepatan udara 1-40 m/s. Hasil yang diperoleh yaitu ukuran dan kekuatan *bubble resirculation* menurun dengan meningkatnya Re, tetapi ukuran dan kekuatan dari *bubble resirculation* meningkat dengan peningkatan rasio ekspansi.

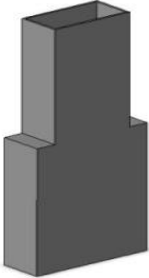
Adapun tujuan yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah untuk memperoleh karakteristik pemulihan tekanan statis pada *sudden expansion channel* dan mengetahui topologi aliran pada *expansion surface* model percobaan. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui efek perubahan *Reynolds number* terhadap pemulihan tekanan pada *sudden expansion channel*.

## 2. METODE PENELITIAN

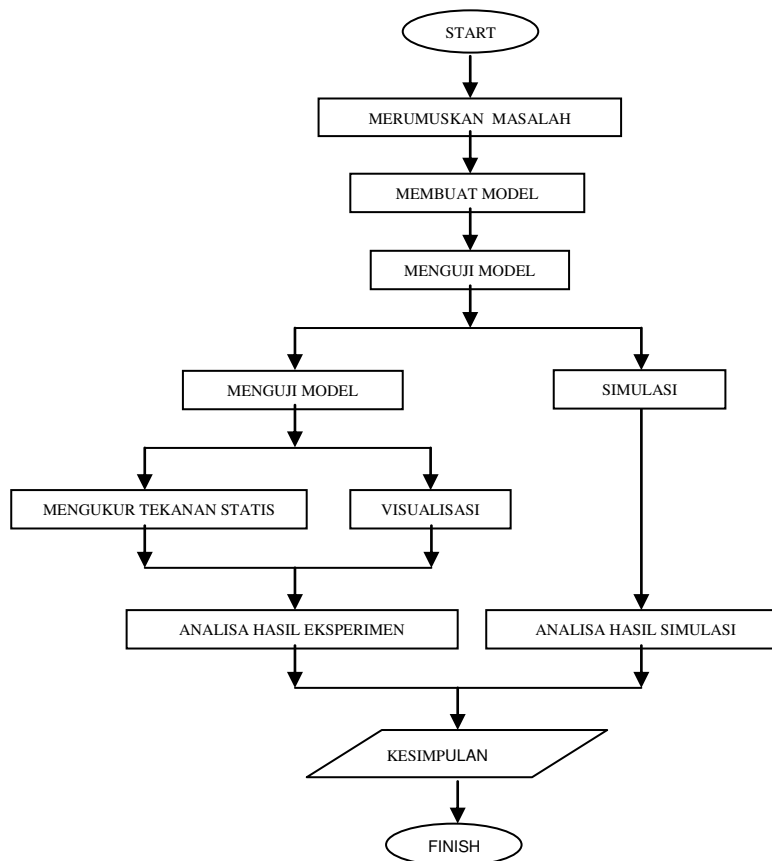
### 2.1 Deskripsi Masalah

Model terbuat dari aluminium dengan panjang *upstream* ( $L_u$ )=180 mm dan panjang *downstream* ( $L_d$ ) 200 mm. Pada permukaan dibuat *pressure tap* dengan diameter ( $d_{tube}$ ) = 2 mm.

Tabel 1. Spesifikasi model

| Model                                                                               | Parameter | Dimension | Unit   |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|--------|
|  | $A_i$     | 100 x 50  | $mm^2$ |
|                                                                                     | $A_o$     | 200 x 50  | $mm^2$ |
|                                                                                     | $L_u$     | 180       | mm     |
|                                                                                     | $L_d$     | 200       | mm     |
|                                                                                     | ER        | 1:2       |        |
|                                                                                     | $D_h$     | 0.0667    | mm     |
| Koordinat titik-titik pengukuran                                                    |           |           |        |

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah geometri saluran berpenampang *rectangular*, *turbulent steady*, efek kekasaran permukaan diabaikan. Kecepatan udara pada sisi *inlet* adalah *fully developed* dengan variasi Re yang digunakan adalah  $8.0 \times 10^4$ ,  $1.0 \times 10^5$  dan  $1.2 \times 10^5$ . Udara yang bekerja pada temperature 303 K diasumsikan *incompressible* dengan properties:  $\rho = 1,165 \text{ kg/m}^3$  dan  $\mu = 1.86 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ .



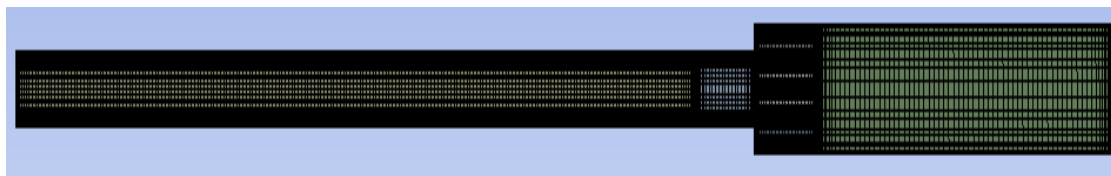
Gambar 1. Flowchart penelitian

## 2.2 Metode Eksperimen

Metode eksperimen I dilakukan dengan mengukur tekanan statis permukaan. *Pressure tap* dihubungkan dengan selang ke pipa manometer dimana tekanan terbaca sebagai beda tinggi pada pipa sebelum dan sesudah apparatus dioperasikan. Dari pengujian nanti ditampilkan distribusi tekanan statis pada *sudden expansion* dengan menggunakan *Cp*. Eksperimen II dilakukan dengan menggunakan teknik *surface flow visualization* yang melihat *shears stress trajectory* akibat dari separasi aliran 3D.

## 2.3 Simulasi Ansys -Fluent

Penggenerasian mesh dilakukan pada menu mesh Ansys setelah pembuatan model telah selesai pada *design modeler*. *Meshing* dilakukan untuk membagi model menjadi bentuk *cell/ node* sehingga dapat dihitung secara diskritisasi dengan program fluent. Pada model ini menggunakan *mesh sizing*, dengan kriteria *mesh* garis agar bisa dilakukan *treatment* pada daerah *wall*.



Gambar 2. Penggenerasian mesh

*Sudden expansion* adalah kasus aliran dalam (*internal flow*) dimana dinding diasumsikan berada dalam keadaan *no-slip wall condition*. Kondisi kecepatan masuk (*velocity inlet*) diterapkan pada batas masuk. Untuk sisi keluarnya pada bagian ujung *sudden expansion channel* diterapkan kondisi *pressure outlet*. Untuk dinding, dipilih tipe *wall*.



**Gambar 3.** Kondisi batas yang diterapkan pada domain komputasi

Simulasi ada Ansys-Fluent 14 dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

- 1) Melakukan *import file mesh sudden expansion* ke Ansys Workbench
- 2) Menentukan formulasi *solver* dan model fisik permasalahan
- 3) Menentukan jenis dan sifat material.
- 4) Menentukan kondisi batas model yang dibuat.
- 5) Menentukan parameter kendali solusi (*solution control*)
- 6) Melakukan tebakan awal (*initialize*) medan aliran
- 7) Melakukan proses perhitungan (iterasi)
- 8) Melakukan *post processing* dengan menampilkan nilai dan gambar kontur.

## 2.4 Penentuan Solusi

Pemilihan model solusi yang digunakan dalam proses simulasi ini menggunakan model solusi seperti dalam Tabel 2. dibawah ini.

**Tabel 2.** Model solusi dalam simulasi

| <i>Calculation Method</i>         | <i>Steady</i>                 |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| <i>Viscous Model</i>              | <i>Realizable k-ε</i>         |
| <i>Near-Wall Treatment</i>        | <i>Standard wall function</i> |
| <i>Pressure-Velocity Coupling</i> | <i>SIMPLE</i>                 |
| <i>Pressure</i>                   | <i>2nd Order</i>              |
| <i>Momentum</i>                   | <i>2nd Order</i>              |
| <i>Turbulent kinetic Energy</i>   | <i>2nd Order Upwind</i>       |
| <i>Turbulent Disipation Rate</i>  | <i>2nd Order Upwind</i>       |
| <i>Transient Formulation</i>      | <i>2nd Order Upwind</i>       |

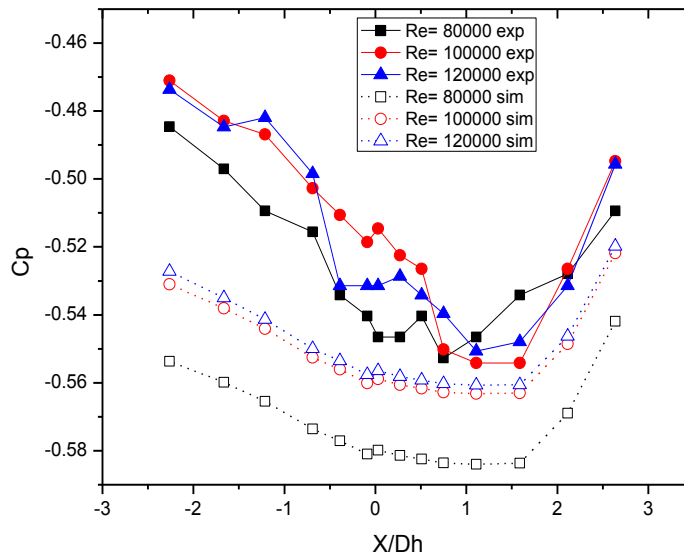
## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Distribusi tekanan yang dinyatakan dalam *pressure coefficient (Cp)*

#### 3.1.1 Distribusi Tekanan pada $Y/Dh = 0,00$

Hasil eksperimen dan simulasi pengukuran distribusi  $C_p$  pada  $Y/Dh = 0.0$  yang ditunjukkan pada Gambar 4. dibawah ini. Pada hasil eksperimen yang ditunjukkan dengan garis lurus, tekanan menurun cukup tajam pada  $Re = 80.000$  dari *inlet* sampai  $X/Dh = -0,36$ . Hal ini disebabkan karena efek viskos dari dinding saluran yang luas permukaannya masih konstan. Pada  $X/Dh = -0,36$  sampai dengan  $X/Dh = 1,0$ , awalnya stabil dan kemudian sedikit mengalami kenaikan. Hal ini disebabkan karena momentum dari fluida tidak mampu melawan kuatnya *adverse pressure gradient* yang berasal dari sisi *downstream*, dimana tekanan pada sisi *downstream* lebih tinggi dari sisi *upstream*. Oleh karena itu tekanannya menjadi sedikit naik dan menjadikan kondisi *unfavorable* pada aliran. Pada daerah ini separasi aliran mulai terjadi karena efek ekspansi dan *adverse pressure gradient*. Setelah memasuki area *downstream*, tekanan akan turun kembali dari  $0,03 \leq X/Dh \leq 1,59$  tekanan turun karena efek ekspansi dan kemudian naik kembali dari  $1,59 \leq X/Dh \leq 2,64$  akan naik kembali karena mulai terjadi *reattachment* dari aliran, yang ditandai dengan naiknya tekanan.

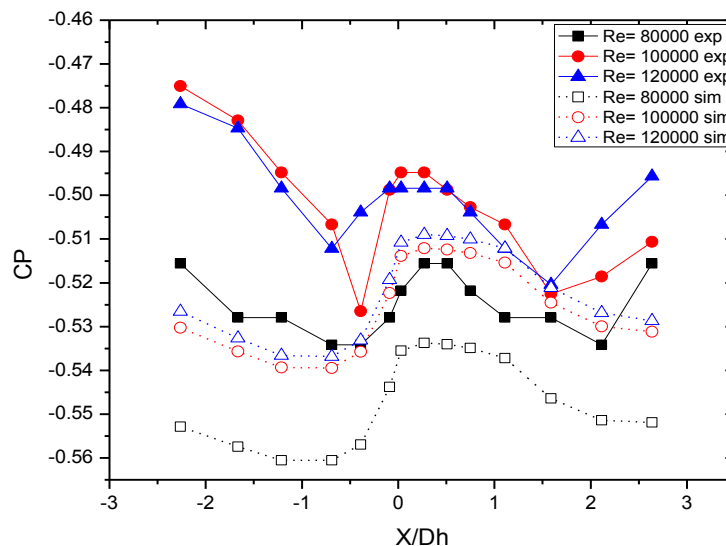
Untuk hasil simulasi, pada ketiga variasi  $Re$ , tekanan menurun secara signifikan dari *inlet* sampai  $X/Dh = 0,0$ . Hal ini disebabkan karena efek viskos dari dinding saluran yang luas permukaannya masih konstan, sehingga *boundary layer* mulai berkembang mulai dari sisi inlet. Pada  $0,0 \leq X/Dh \leq 1,11$  tekanan tetap menurun walaupun sudah memasuki daerah *downstream*. Hal ini dikarenakan adanya separasi aliran dan kemudian menimbulkan zona *diffuser* pada *downstream*, tekanan akan naik kembali dari  $X/Dh = 0,1$  sampai akhir saluran. Tekanan masih tetap naik, diprediksi aliran belum mencapai akhir *reattachment* dalam saluran *sudden expansion*.



Gambar 4. Distribusi  $C_p$  pada  $Y/Dh = 0.0$

### 3.1.2 Distribusi Tekanan pada $Y/Dh = -0.72$

Hasil eksperimen pengukuran distribusi tekanan pada  $Y/Dh = -0.72$  ditunjukkan dengan garis lurus. Nilai  $C_p$  pada  $Re = 80000$ , ketika memasuki sisi *upstream* tekanan mengalami penurunan, ketika interval  $X/Dh = -2,26$  sampai  $X/Dh = -0,39$  tekanan bernilai turun karena momentum tidak dapat menahan *adverse pressure gradient* sehingga mempunyai nilai tekanan yang cenderung konstan. Pada  $Re = 100000$  dan  $12000$  ketika udara masuk dari *upstream* menuju *downstream* terjadi penurunan tekanan secara signifikan, akan tetapi pada  $Re = 100000$  penurunan tekanan sampai pada  $X/Dh = -0,69$  sedangkan pada  $Re = 120000$  penurunan terjadi hingga posisi  $X/Dh = -0,39$ . Selanjutnya mengalami kenaikan nilai *coefficient pressure* dikarenakan adanya kecepatan aliran yang menurun yang tidak mampu membuat aliran *unfavorable* akibat adanya *adverse pressure gradient* yang besar pada daerah dekat *downstream* yang berlawanan arah dengan aliran utama, sehingga kecepatan menurun dan membuat nilai *coefficient pressure* naik sampai pada posisi  $X/Dh = 0,75$  nilai tekanan cenderung konstan hal tersebut dikarenakan ketika memasuki *downstream*, momentum aliran mampu menahan *adverse pressure gradient*, pada posisi  $X/Dh = 0,75$  aliran terseparasi sehingga tekanan pada daerah  $X/Dh = 0,75$  sampai dengan  $X/Dh = 2,64$  mengalami penurunan.



Gambar 5. Distribusi  $C_p$  pada  $Y/Dh = -0.72$

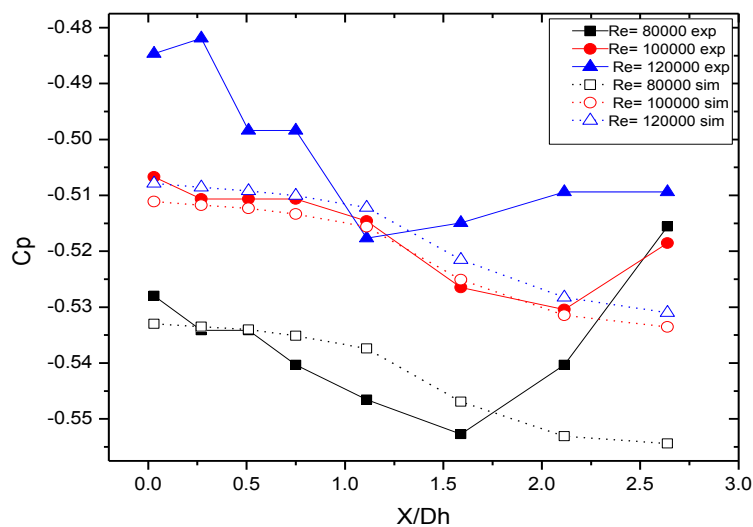
Pola grafik antara hasil eksperimen dan simulasi hampir sama. Nilai *coefficient pressure* pada  $Re = 80000$ , ketika memasuki sisi *upstream* tekanan mengalami penurunan, ketika interval  $X/Dh = -2,26$  sampai  $X/Dh = -0,39$  tekanan bernilai turun karena momentum tidak dapat menahan *adverse pressure gradient* sehingga mempunyai nilai tekanan yang cenderung konstan. Pada  $Re = 100000$  dan  $12000$  ketika udara masuk dari *upstream* menuju *downstream* terjadi penurunan tekanan secara signifikan, akan tetapi pada  $Re = 100000$  penurunan tekanan sampai pada  $X/Dh = -0,69$  sedangkan pada  $Re = 120000$  penurunan terjadi hingga posisi  $X/Dh = -0,39$ . Selanjutnya mengalami kenaikan nilai *coefficient pressure* dikarenakan adanya kecepatan aliran yang menurun yang tidak mampu membuat aliran *unfavorable*

akibat adanya *adverse pressure gradient* yang besar pada daerah dekat *downstream* yang berlawanan arah dengan aliran utama, sehingga kecepatan menurun dan membuat nilai *coefficient pressure* naik sampai pada posisi  $X/D_h=0,75$  nilai tekanan cenderung konstan hal tersebut dikarenakan ketika memasuki *downstream* momentum aliran mampu menahan *adverse pressure gradient*, pada posisi  $X/D_h=0,75$  aliran terseparasi sehingga tekanan pada daerah  $X/D_h=0,75$  sampai dengan  $X/D_h=2,64$  mengalami penurunan.

### 3.1.3 Distribusi Tekanan pada $Y/D_h = -1.28$

Hasil eksperimen didekat dinding *sudden expansion channel* mengalami penurunan yang tajam, karena pada zona tersebut merupakan daerah resirkulasi. Ketika udara memasuki *downstream* dan terjadi perbedaan penampang. Momentum tidak lagi mampu menahan gaya friksi dan *adverse pressure gradient* sehingga terjadi aliran resirkulasi pada daerah dinding-dinding yang mengalami perbedaan penampang. Pada bagian akhir sekitar  $X/D_h > 2$  mengalami kenaikan akibat adanya *reattachment* aliran.

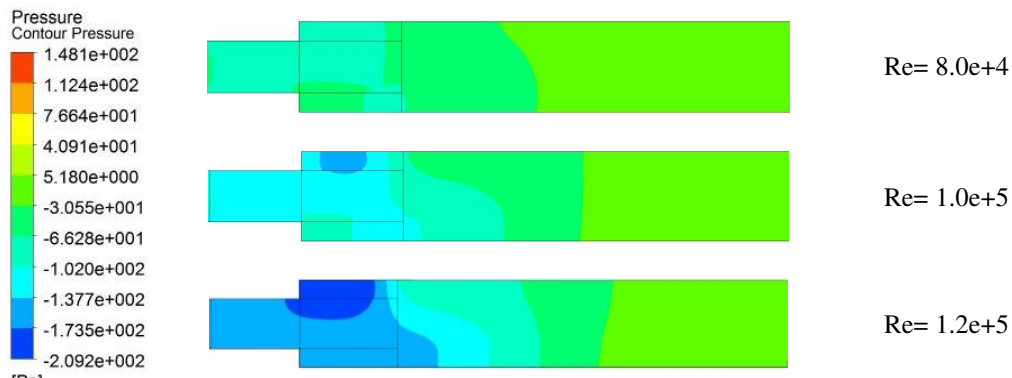
Pada hasil simulasi, tekanan cenderung turun, zona resirkulasi akan membentuk efek *nozzle* sehingga tekanan dekat dinding *downstream* akan menurun ketika menjauh dari sisi *downstream*, hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 6. dimana dari ketiga variasi Re tersebut terjadi penurunan tekanan. Pada zona tersebut ternyata masih merupakan zona resirkulasi.



Gambar 6. Distribusi  $C_p$  pada  $Y/D_h = -1.28$

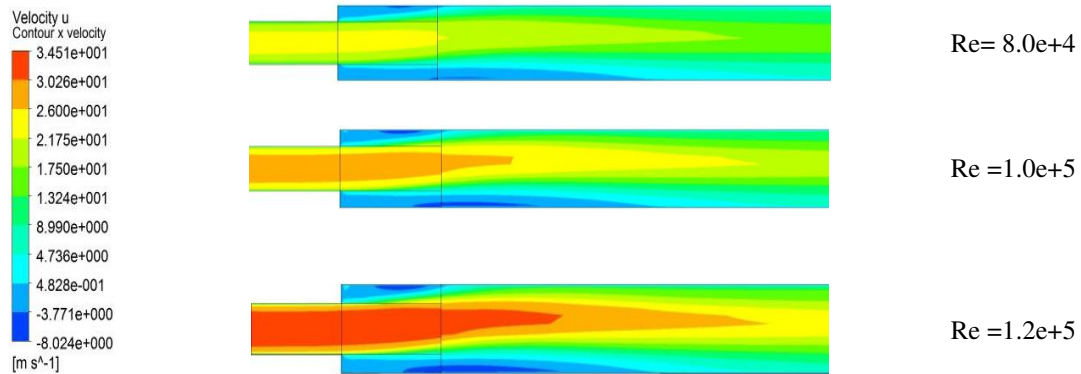
## 4.2 Hasil Simulasi Menggunakan ANSYS-FLUENT 14

Dari hasil simulasi diperoleh bahwa dengan semakin meningkatnya Re, maka nilai tekanan statis akan menurun dan nilai  $C_p$  akan naik. Hal ini dikarenakan semakin besar kecepatan fluida, maka nilai tekanan dinamisnya semakin besar sehingga tekanan statis fluida menjadi turun sehingga nilai  $C_p$  menjadi naik.



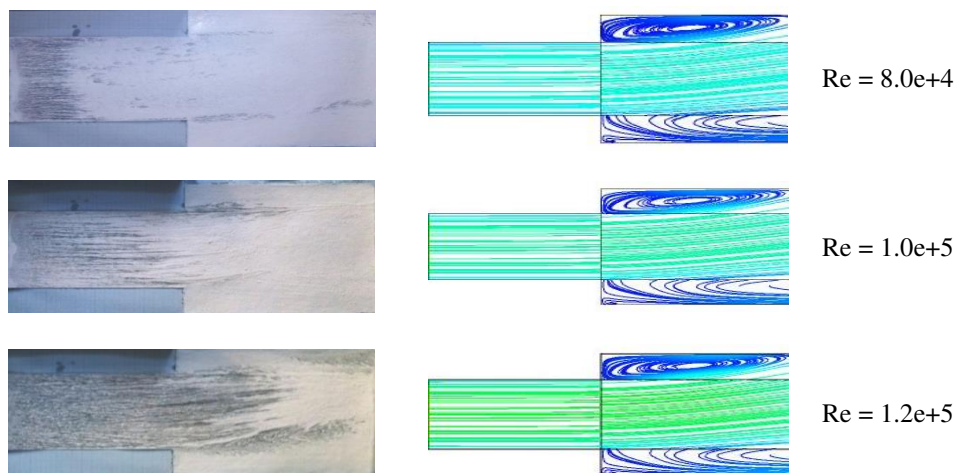
Gambar 7. Hasil simulasi kontur distribusi tekanan statis

Untuk profil *x-velocity* dari ketiga variasi Re menunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya Re, maka kecepatannya akan semakin besar. Begitu juga dengan panjang daerah resirkulasi pada bagian *downstream* akan semakin panjang.



**Gambar 8.** Hasil simulasi kontur *x-velocity*

Perbandingan *streamline* antara hasil eksperimen dan simulasi dapat dilihat pada Gambar 9. yang menunjukkan kesamaan pola. Dengan meningkatnya *Re*, maka aliran akan mengalir semakin *attachment* menuju daerah ekspansi. Hal ini dapat dilihat pada hasil visualisasi yaitu semakin tipisnya kandungan *oil flow* karena goresan aliran pada permukaan, sedangkan pada hasil simulasi ditunjukkan dengan peningkatan intensitas warna hijau yang lebih tajam yang berarti bahwa kecepatannya semakin besar.



**Gambar 9.** Perbandingan *streamline* hasil eksperimen dan simulasi numerik

#### 4. KESIMPULAN

Hasil-hasil pengukuran tekanan statis secara umum menunjukkan bahwa pola aliran mengalami perubahan signifikan dengan perubahan *Re*. Semakin tinggi *Re*, maka kecepatan yang dihasilkan semakin tinggi, sehingga *coefficient pressure* (*C<sub>p</sub>*) akan semakin besar. Pada daerah *upstream* ditunjukkan bahwa momentum aliran cukup kuat untuk mengatasi gaya viskos, sehingga energi kinetik aliran meningkat cukup signifikan untuk membawa aliran dalam kondisi *favorable*. 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 berbagai *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, setelah itu aliran diperlambat sampai keluar dari saluran. Namun pada eksperimen ini panjang zona resirkulasi belum diketahui karena terbatasnya alat uji dan alat ukurnya.

Hasil visualisasi barisan *skin friction line* pada *expansion surface* menunjukkan adanya penundaan separasi seiring peningkatan *Re*. Aliran tidak simetris, tetapi berbelok ke arah tekanan yang lebih rendah. Pada hasil simulasi menunjukkan kesamaan dengan hasil eksperimen, meskipun nilainya menunjukkan adanya perbedaan.

#### 5. REFERENSI

- [1]. Armaly, B.F., dkk, 1983, *Experimental and Theoretical Investigation of Backward-Facing Step Flow*, Institute of Hydromechanics, Section III : Mechanics of Turbulent Flows, University of Karlsruhe, KaiserstraBe 12, D-7500 Karlsruhe, F.R.G.

- [2]. Battaglia, Francine. dkk., 1996, *Bifurcation of Low Res Number Flow in Symmetric Channels*, The Pennsylvania State University, University Park, PA 26802, USA.
- [3]. Koronaki, E.D. dkk., 2000, *Numerical Study of Turbulent Diesel Flow in a Pipe with Sudden Expansion*, Mechanical Engineering Department, Zografou Campus, 15780 Athens, Greece.
- [4]. Spazzini P. G., Iuso G., Onorato M., and G. M. Di Cicca, 2001, *Unsteady behavior of back-facing step flow*, Experiments in Fluids 30 (2001) 551-561 © Springer-Verlag.
- [5]. Chiang, T. P. dkk., 2001, *Spanwise Bifurcation in Plane-Symmetric Sudden-Expansion Flows*, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, Republic of China.
- [6]. Hawa, T. and Z.Rusak, 2000, *The Dynamics of a Laminar Flow in a Symmetric Channel with a Sudden Expansion*. J. Fluid Mech., vol. 436, pp. 283{320. Printed in the United Kingdom c2001 Cambridge University Press.
- [7]. 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.
- [8]. Mansoori, Abbas and Lari, M.R.B., 2007, *Evaluation of Turbulent Models in Sudden Expansion Analysis at High Res Numbers*, Proceedings of the 5th IASME / WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics, Athens, Greece, August 25-27, 2007.
- [9]. Lima, R.C. dkk., 2008, *Numerical Study of Three Recirculation Zones in the Unilateral Sudden Expansion Flow*, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, CEP 12228-900, São José dos Campos, SP, Brazil.
- [10]. Roy, Vikram. dkk., 2010, *Analysis of the Turbulent Fluid Flow in an Axisymmetric Sudden Expansion*, International Journal of Engineering Science and Technology Vol. 2(6), 1569-1574