

## STUDI NUMERIK PENGARUH VARIASI KEMIRINGAN DAN KETINGGIAN STEP TERHADAP MEDAN ALIRAN MELALUI BACKWARD-FACING STEP

Heydar Nur Fahmi<sup>1\*</sup>, Khoiri Rozi<sup>2</sup>, Berkah Fajar TK<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. Soedarto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*Email : [heydarnurfahmi@gmail.com](mailto:heydarnurfahmi@gmail.com)

### Abstrak

Penelitian ini mengkaji performa aliran saat melewati saluran tertutup berbentuk backward-facing step (BFS). Metode penelitian yang digunakan adalah Computational Fluid Dynamics (CFD) berbasis ANSYS FLUENT 2022 dengan model turbulensi k- $\epsilon$  realizable. Pengaruh kemiringan dan perubahan tinggi step terhadap karakteristik distribusi aliran disimulasikan dengan dua variasi bilangan Reynolds yaitu  $Re = 1,5 \times 10^4$  dan  $9 \times 10^4$ . Hasil simulasi dari penelitian ini mengungkapkan bahwa perubahan kemiringan dan ketinggian step menyebabkan perubahan pada zona resirkulasi. Dimana efek perubahan kemiringan step memperlihatkan bahwa semakin besar sudut kemiringan step menyebabkan semakin berkurangnya zona resirkulasi dan panjang reattachment yang terbentuk. Sebaliknya, semakin bertambah tinggi step menyebabkan semakin besar zona resirkulasi dan panjang jarak reattachment yang terbentuk. Pengaruh perubahan energi kinetik turbulen dan distribusi tekanan akibat perubahan kemiringan dan ketinggian step juga ditemukan dalam penelitian ini. Setiap penambahan sudut kemiringan step menyebabkan energi kinetik turbulen dan distribusi tekanan semakin kecil. Sedangkan setiap kenaikan ketinggian step menyebabkan energi kinetik turbulen dan distribusi tekanan semakin besar. Efek perbedaan antara dua bilangan Reynolds yang diuji pada semua variasi kemiringan dan ketinggian step juga menghasilkan perubahan terhadap pola pembentukan resirkulasi dan panjang reattachment dari backward-facing step yang diuji.

**Kata Kunci:** *backward facing step; computational fluid dynamics; k- $\epsilon$  realizable*

### Abstract

*This study aims to examine the flow performance when passing through a backward-facing step (BFS) channel. The method used in this research is Computational Fluid Dynamics (CFD) based on ANSYS FLUENT 16 with a realizable k- $\epsilon$  turbulence model. The effect of changing the height and slope of the steps on the flow characteristics is simulated with two different Reynolds numbers, namely  $Re = 1.5 \times 10^4$  and  $9 \times 10^4$ . The simulation results from this study reveal that changes in step height cause changes in the recirculation zone and reattachment distance, where the higher the step, the larger the recirculation zone and the longer the reattachment distance is formed. The effect of changing the slope angle of the steps in this study shows that the greater the slope of the steps, the less the recirculation zone and the reattachment length are formed. In this study it was also found that at each step height increase the turbulent kinetic energy increases. Meanwhile, the increase in the angle of inclination of the step causes the turbulent kinetic energy to decrease. The effect of changing the difference between the two Reynolds numbers tested did not produce significant changes to the pattern of recirculation formation and reattachment length with respect to all variations of step height and step slope from the backward-facing step that was tested.*

**Keywords:** *backward facing step; computational fluid dynamics; k- $\epsilon$  realizable*

## 1. Pendahuluan

Separasi aliran turbulen terjadi pada beberapa aplikasi industri seperti kendaraan darat, pesawat terbang, atau pada aliran internal. Fenomena separasi aliran internal yang disebabkan oleh perubahan mendadak pada geometri penampang uji sudah banyak dipelajari secara umum. Pentingnya aliran tersebut untuk peralatan teknik telah dipelajari dalam banyak publikasi dan pengujian guna mengembangkan teknik eksperimental dan teoretis lanjutan dalam mempelajari aliran dengan daerah separasi dengan cermat [1]. Menurut Swift [10] dalam tesisnya pada tahun 2009, perubahan distribusi tekanan akibat separasi aliran dapat meningkatkan gaya hambat dan menurunkan gaya dorong secara signifikan. Hal ini

tentu sangat merugikan sehingga perlu dilakukannya studi dan pengujian guna mengurangi dampak kerugian yang ditimbulkan. Salah satu studi yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan konfigurasi yang disederhanakan. Konfigurasi akademis yang disederhanakan umumnya dipelajari untuk lebih memahami mekanisme dinamika aliran yang terjadi dalam aliran yang diuji. Lapisan batas yang terseparasi karena *adverse pressure gradient* pada aliran *Backward Facing Step* (BFS) adalah model konfigurasi yang paling banyak dipelajari karena kesederhanaan relatif dari konfigurasi ini memungkinkan untuk menyoroiti beberapa fenomena tidak stabil yang secara jelas terkait dengan separasi aliran (*separated flow*) [4] baik aliran dalam maupun luar.

Fenomena aliran yang kompleks terjadi pada aliran BFS dimana akan terjadi separasi, resirkulasi, *reattachment*, dan *recovery*. Separasi aliran adalah peristiwa terpisahnya aliran fluida dari permukaan benda secara langsung. Separasi aliran yang terjadi pada BFS diawali dengan adanya aliran fluida yang mengalami tegangan geser akibat bersentuhan dengan permukaan solid. Tegangan geser ini dapat terus-menerus mempengaruhi lapisan-lapisan aliran fluida hingga pada suatu titik aliran fluida tidak lagi dapat menahan tegangan geser bersamaan dengan *adverse pressure gradient* dan terbentuklah separasi aliran. Lokasi bergabungnya kembali aliran yang terseparasi menuju aliran mula disebut titik *reattachment*. Setelah titik *reattachment*, aliran akan kembali pulih dan membentuk *boundary layer* baru yang disebut *recovery zone*.

BFS adalah salah satu model aliran separasi yang representatif, yang sangat signifikan baik dalam pengembangan teoretis maupun rekayasa. Seperti diketahui bahwa separasi aliran pada BFS memungkinkan terjadinya tambahan hambatan aliran dan kebisingan bahkan pesawat dapat terhenti dalam kondisi kritis. Pemahaman umum tentang ilmu fisika pada aliran BFS telah menjadi salah satu topik hangat dalam beberapa tahun terakhir [2]. Pengujian secara eksperimental telah dilakukan oleh Ötügen [9] yang mempelajari pengaruh rasio ekspansi terhadap *separated shear layer* dan aliran *reattachment*. Armaly et al. [1] menguji secara numerik dan eksperimental tentang variasi bilangan Reynold terhadap panjang zona *reattachment* dan menemukan bahwa panjang zona *reattachment* akan meningkat pada aliran laminar ( $RE < 1200$ ), menurun pada aliran transisi ( $1200 < RE < 6600$ ), dan relatif stabil pada aliran turbulen ( $RE > 6600$ ). Hal ini juga dikuatkan dengan penelitian Nadge & Govardhan [6] yang melakukan studi panjang *reattachment* pada bilangan Reynold tinggi. Pengujian lain seperti pada aliran turbulen *subsonic* [3] dan pengaruh *heat transfer* [7,8] serta *skin friction* [5] juga telah diuji baik secara eksperimental maupun numerik.

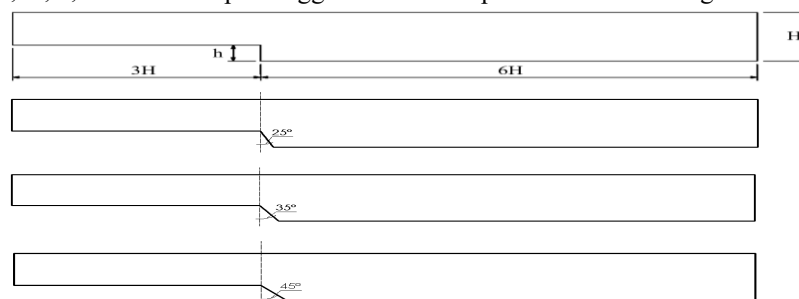
Cukup banyak studi tentang fenomena aliran melewati BFS yang telah diuji, namun sampai saat ini masih ada beberapa parameter yang perlu dikaji lebih lanjut guna memperoleh gambaran lebih detail terhadap kompleksitas fenomena separasi aliran. Dalam studi ini, fenomena aliran pada BFS dipelajari secara numerik dan CFD menggunakan *software* ANSYS FLUENT. Efek-efek perubahan pada geometri kemiringan dan ketinggian *step* terhadap karakteristik aliran akan disimulasikan.

## 2. Metode Perancangan

Pada perancangan ini, data-data yang digunakan merupakan hasil simulasi dari *software* ANSYS Fluent dan juga hasil studi literatur. Hasil pada *software* didapatkan dengan memasukkan data input yaitu model geometri, *meshing*, dan setup permodelan. Dengan memasukkan data awal, *software* dapat melakukan perhitungan sehingga muncul data-data hasil komputasi yang kemudian akan digunakan sebagai hasil simulasi. Penjelasan mengenai metode pengambilan data secara lebih rinci dijelaskan pada bagian berikut:

### 2.1. Model Geometri

Model Geometri yang digunakan pada studi ini merupakan model 2 dimensi dengan 3 model variasi ketinggian *step* yaitu  $h/H = 0,33; 0,46; 0,60$ . Pada setiap ketinggian akan diterapkan variasi kemiringan sudut  $\theta = 25^\circ; 35^\circ; 45^\circ$ .

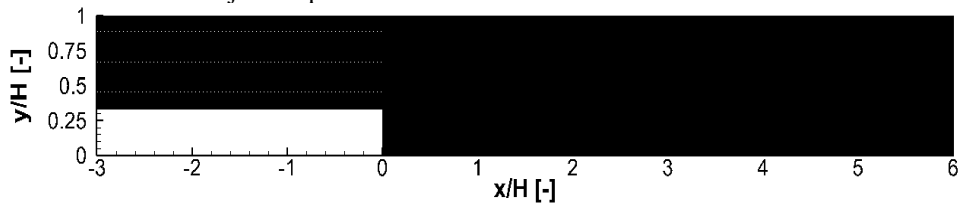


Gambar 1 Model Geometri 2D

### 2.2. Meshing

*Meshing* merupakan tahapan dimana domain dibagi menjadi bagian-bagian kecil yang nantinya akan digunakan untuk perhitungan persamaan dalam *software* CFD. Tujuan dilakukannya *meshing* yaitu untuk membuat perhitungan saat

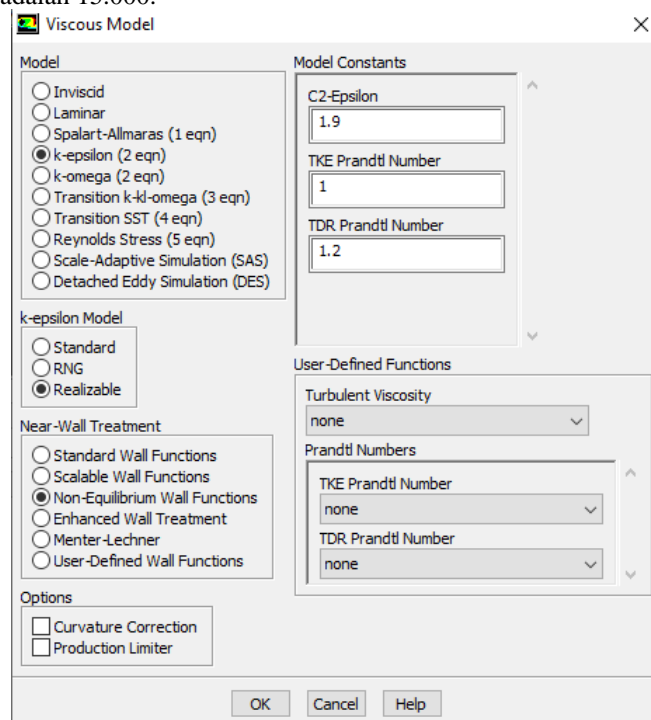
proses *running* menjadi lebih detail dan akurat. Selain dari ukurannya, bentuk *meshing* juga berpengaruh dalam proses simulasi. Pada studi ini, *mesh* pada model yang diuji menggunakan metode *near-wall treatment* yaitu grid yang tersusun pada sekitar permukaan *wall* lebih rapat dan kemudian merenggang seiring menjauhi permukaan *wall*. Susunan grid di sekitar *step* disusun lebih rapat pada area dekat *step* merupakan titik konsentrasi dimana fenomena separasi aliran akan lebih diperhatikan. Susunan *grid* pada sekitar *step* merenggang seiring menjauhi *step* baik pada arah *upstream* maupun arah *downstream*. Model *mesh* ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2 Contoh Hasil Meshing

### 2.3. Setup Model Aliran BFS

Studi ini menggunakan simulasi dengan model turbulente SST k- $\epsilon$  Realizable sebagaimana yang digunakan oleh Stephens [5]. Model ini dipilih karena dapat memberikan performa yang baik pada analisa aliran separasi dan pusaran (eddy). Kemudian untuk *near-wall treatment* yang dipilih adalah *non-equilibrium wall function*. Batas iterasi yang digunakan pada simulasi ini adalah 15.000.



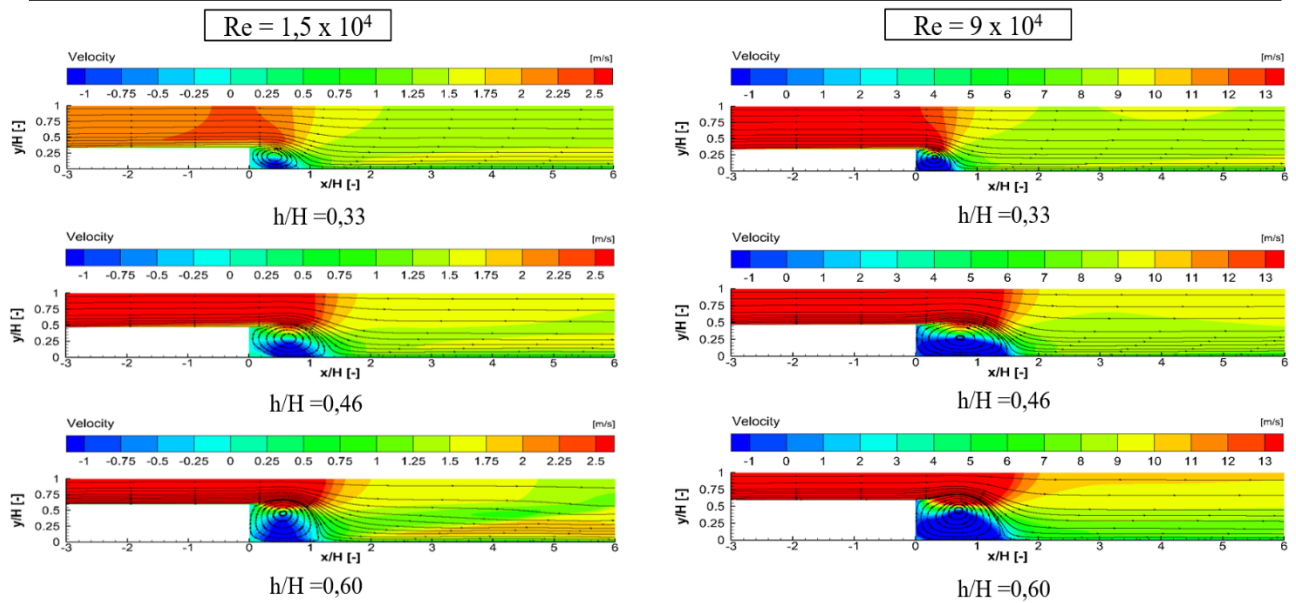
Gambar 3 Setup Model Aliran pada ANSYS Fluent

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Struktur Aliran dan Distribusi Kecepatan

Hasil simulasi struktur aliran dan distribusi kecepatan dengan dua nilai Re ditampilkan dalam kontur pada Gambar 4. Skala dengan gradasi warna pada bagian atas masing-masing kontur menunjukkan nilai kecepatan. Nilai kecepatan minimal direpresentasikan dengan warna biru sedangkan nilai kecepatan maksimal direpresentasikan dengan warna merah. Hasil simulasi disusun secara urut dari atas ke bawah dengan urutan ketinggian *step* terkecil hingga terbesar. Garis dengan anak panah menunjukkan garis aliran dari *inlet* menuju *outlet*.

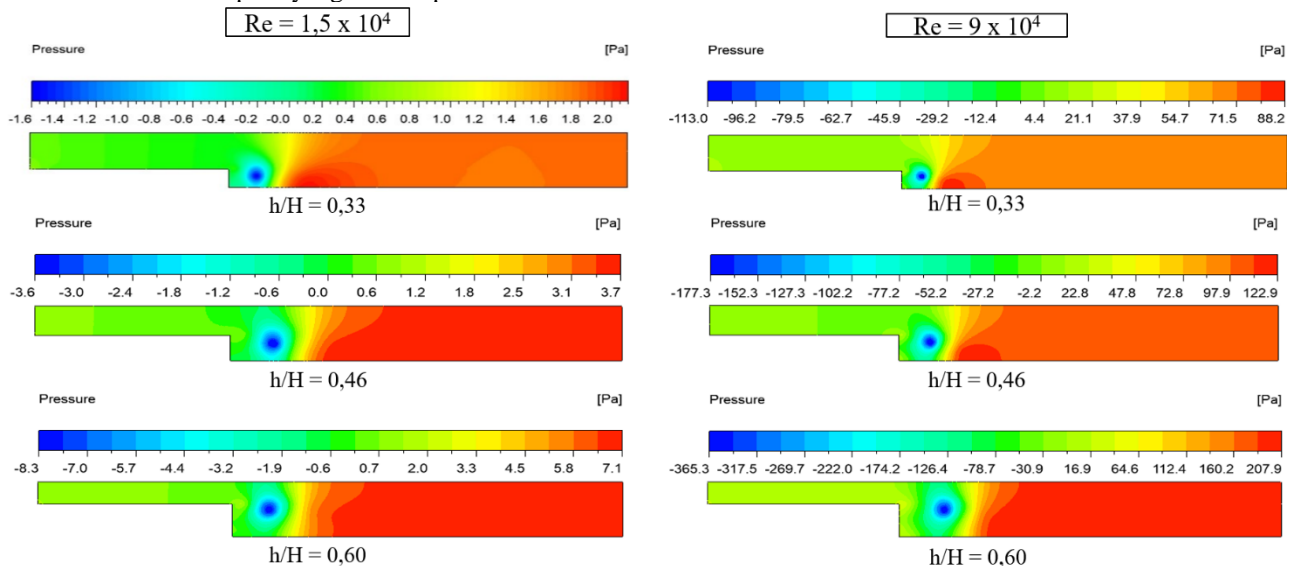
Gambar 4 menunjukkan adanya peningkatan distribusi kecepatan seiring bertambahnya ketinggian *step*. Nilai Re yang lebih tinggi juga menunjukkan adanya penambahan distribusi kecepatan pada masing-masing ketinggian. Zona resirkulasi secara signifikan terpengaruh oleh perubahan ketinggian *step*. Semakin besar rasio ketinggian *step*, semakin luas zona resirkulasi. Peningkatan luas zona resirkulasi diikuti dengan penambahan panjang titik *reattachment*. Pada Re yang lebih besar, luasan zona resirkulasi terlihat mengalami peningkatan walau tidak signifikan.



Gambar 4 Struktur Aliran dan Distribusi Kecepatan

### 3.2. Distribusi Tekanan

Hasil simulasi distribusi tekanan dengan variasi rasio ketinggian *step* ditampilkan pada Gambar 5. Pemberian 2 nilai *Re* yang berbeda diberikan untuk melihat perubahan dsitribusi pada bilangan *Re* yang jauh berbeda. Skala pada kontur distribusi tekanan ditampilkan seperti pada Gambar 4 struktur aliran dan distribusi kecepatan dengan nilai tekanan minimal direpresentasikan dengan warna biru dan nilai maksimal direpresentasikan dengan warna merah. Daerah dengan distribusi tekanan tinggi terletak pada daerah *downstream* setelah zona resirkulasi. Nilai tekanan maksimal terletak pada titik *reattachment* sedangkan nilai tekanan minimal terletak pada pusat zona resirkulasi. Daerah dengan distribusi nilai tekanan minimal cenderung bergerak searah sumbu *x* menuju *outlet* dan mengalami perluasan seiring dengan bertambahnya rasio ketinggian *step*. Daerah distribusi tekanan tinggi semakin bertambah pada daerah *downstream* seiring dengan bertambahnya rasio ketinggian *step* yang dimulai dari titik *reattachment*. Pada  $Re\ 9 \times 10^4$ , distribusi tekanan tinggi pada *downstream* cenderung lebih kecil pada masing-masing ketinggian. Hanya saja, nilai tekanannya jauh lebih besar secara keseluruhan seperti yang terlihat pada skala.

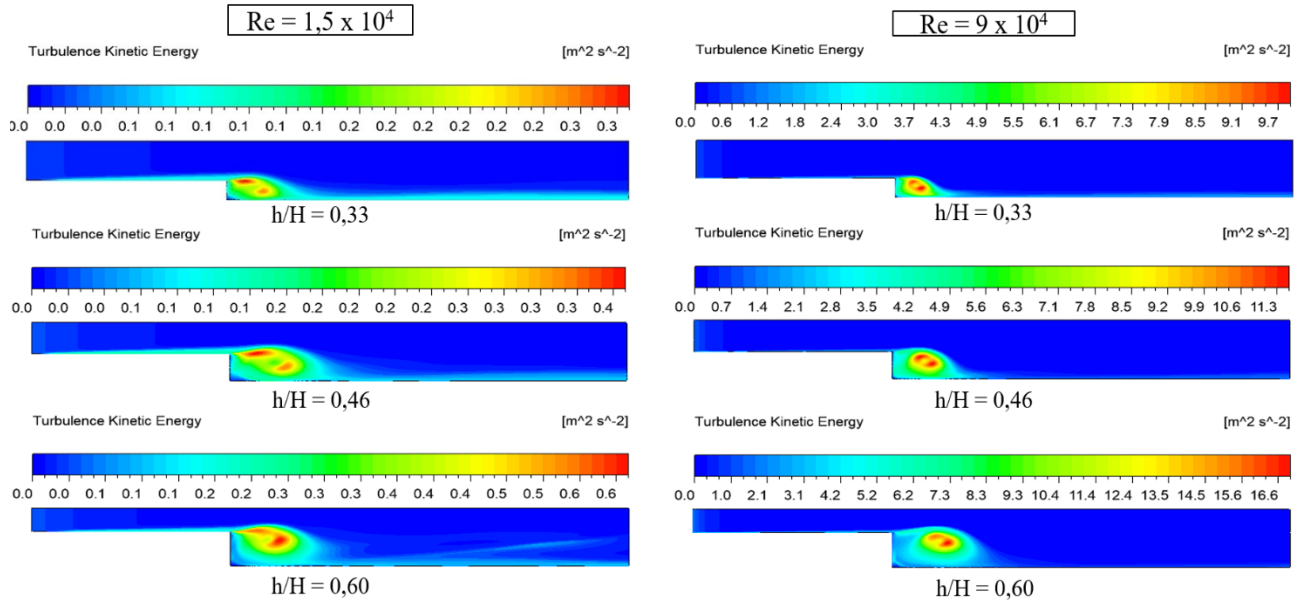


Gambar 5 Distribusi Tekanan

### 3.3. Distribusi Energi Kinetik Turbulen

Gambar 6 menunjukkan hasil simulasi variasi rasio ketinggian *step* pada  $Re = 1,5 \times 10^4$  dan  $9 \times 10^4$ . Besar energi kinetik turbulen ditunjukkan pada skala di atas kontur dengan nilai minimal direpresentasikan oleh warna biru dan nilai maksimal direpresentasikan oleh warna merah. Energi kinetik turbulen terpusat pada daerah *boundary layer* dan daerah

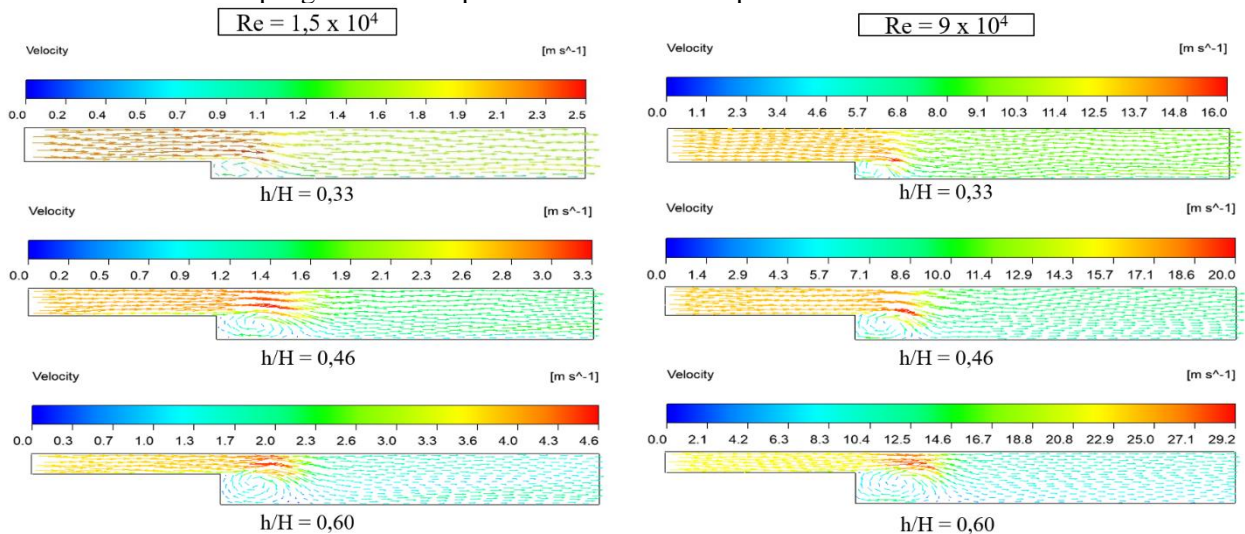
*downstream* tepatnya pada daerah resirkulasi. Pada  $Re$  yang berbeda, daerah dengan energi kinetik turbulen tidak berubah secara signifikan. Perubahan yang dapat dilihat hanya pada nilai energi kinetik turbulen pada skala yang semakin membesar seiring bertambahnya nilai  $Re$ . Pada rasio ketinggian yang berbeda, semakin besar rasio ketinggian *step* maka daerah dengan energi kinetik turbulen tinggi semakin meluas diiringi dengan bertambahnya daerah dengan distribusi energi kinetik maksimal.



**Gambar 6** Distribusi Energi Kinetik Turbulen

### 3.4. Vektor Kecepatan

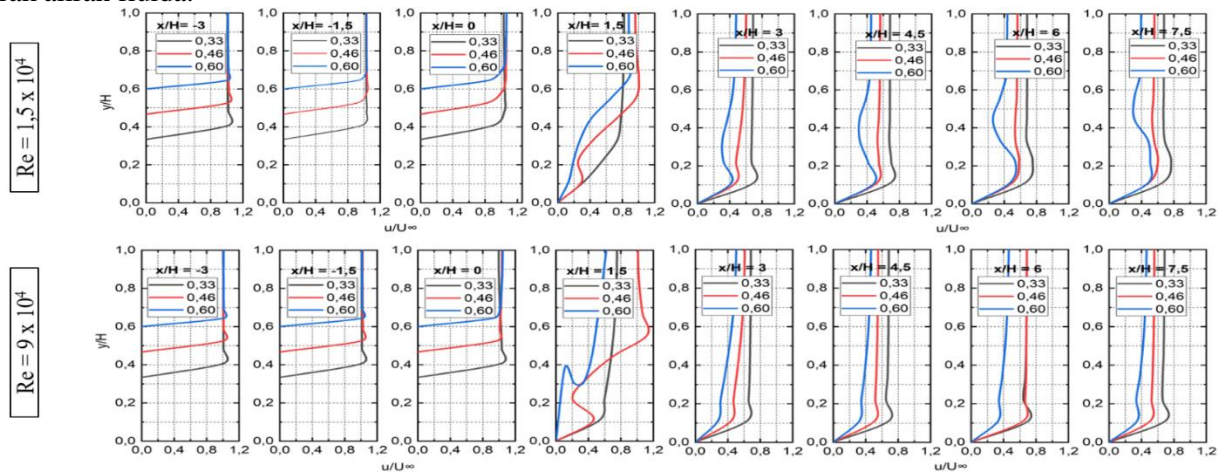
Hasil simulasi vektor kecepatan pada  $Re = 1,5 \times 10^4$  dan  $9 \times 10^4$  dengan tiga variasi ketinggian *step*  $h/H$  dapat dilihat pada Gambar 7. Seperti susunan plot-plot sebelumnya, hasil simulasi disusun secara bertingkat berdasarkan rasio ketinggian. Plot hasil simulasi vektor kecepatan menggunakan skala dengan gradasi warna dari biru ke merah. Warna biru menunjukkan kecepatan vektor minimal dan warna merah menunjukkan kecepatan vektor maksimal. Anak panah menunjukkan arah gerak aliran pada suatu titik dengan panjang yang mengikuti besar kecepatan vektor pada titik tersebut. Nilai vektor kecepatan maksimal terdapat pada bagian atas zona resirkulasi akibat kembalinya aliran resirkulasi ke dalam aliran mula. Nilai vektor minimal terdapat pada sepanjang *wall*, inti resirkulasi, dan titik *reattachment*. Pada sudut *step* setiap variasi rasio ketinggian, ditemukan aliran resirkulasi sekunder dengan arah aliran berlawanan arah aliran resirkulasi primer. Pengaruh perubahan  $Re$  hanya terlihat pada nilai vektor kecepatan yang semakin tinggi seiring bertambahnya nilai  $Re$ . Perubahan  $Re$  tidak berpengaruh terhadap distribusi vektor kecepatan secara keseluruhan.



**Gambar 7** Kontur Vektor Kecepatan

### 3.5. Profil Kecepatan

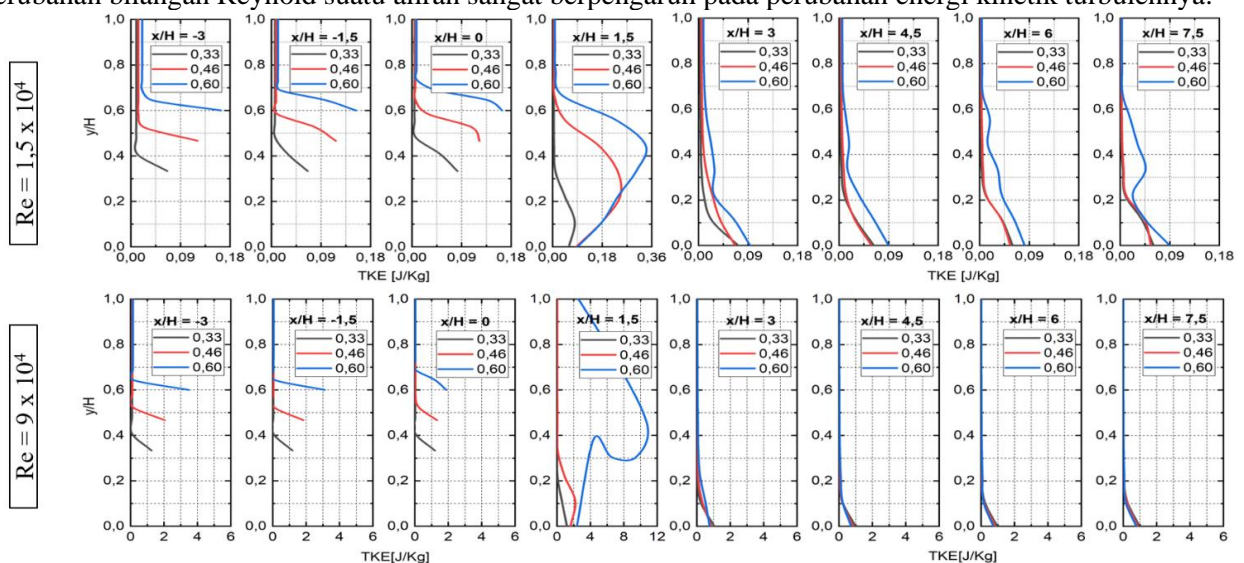
Gambar 8 menampilkan hasil simulasi profil kecepatan pada tiga variasi ketinggian *step*  $h/H = 0,33$ ;  $0,46$ ; dan  $0,60$  dengan  $Re = 1,5 \times 10^4$  dan  $9 \times 10^4$ . Pada bagian *downstream* ( $x/H > 0$ ), dapat dilihat bahwa efek viskos sangat mempengaruhi kecepatan aliran yang menimbulkan adanya *boundary layer* akibat perubahan kecepatan. Dari kedua nilai  $Re$ , Efek perubahan bilangan Reynold hampir tidak berdampak pada pola aliran sisi *upstream*. Titik  $x/H = 1,5$  yang merupakan zona resirkulasi memiliki aliran yang sangat tidak stabil dan tidak seragam. Kecepatan aliran terdeteksi akan kembali *steady* pada posisi  $x/H = 3$  dimana aliran berada setelah zona resirkulasi. Hal ini terjadi akibat adanya peningkatan *adverse pressure gradient* yang semakin meningkat akibat ekspansi pada penampang. Pada nilai tertentu, *adverse pressure gradient* dapat merubah arah gerak aliran fluida.



Gambar 8 Profil Kecepatan

### 3.6. Profil Energi Kinetik Turbulen

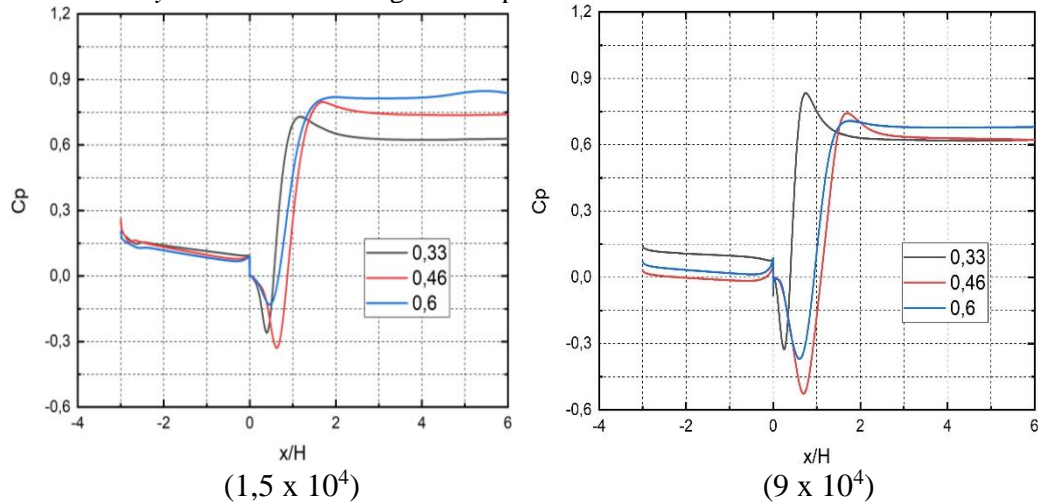
Plot hasil simulasi energi kinetik turbulen pada  $Re = 1,5 \times 10^4$  dan  $9 \times 10^4$  untuk variasi ketinggian *step*  $h/H = 0,33$ ;  $0,46$ ; dan  $0,60$  dapat dilihat pada Gambar 9. Terlihat energi kinetik turbulen pada daerah  $y/H > 0,8$  sangat stabil karena kondisi aliran adalah *freestream*. Energi kinetik turbulen cenderung semakin tinggi seiring bertambahnya rasio ketinggian *step*. Energi kinetik turbulen tertinggi terjadi pada ketinggian *step*  $h/H = 0,60$  pada lokasi  $x/H = 1,5$  pada pusat aliran resirkulasi pada daerah sekitar  $y/H = 0,4$ . Dapat dilihat bahwa hanya pada  $x/H = 1,5$  yang mengalami kenaikan energi kinetik turbulen seiring bertambahnya  $y/H$  sedangkan untuk lokasi  $x/H$  yang lain cenderung mengalami penurunan. Nilai energi kinetik turbulen dengan  $Re = 9 \times 10^4$  secara menyeluruh jauh lebih besar jika dibandingkan dengan  $Re = 1,5 \times 10^4$ . Hal ini menunjukkan perubahan bilangan Reynold suatu aliran sangat berpengaruh pada perubahan energi kinetik turbulennya.



Gambar 9 Profil Energi Kinetik Turbulen

### 3.7. Profil Koefisien Tekanan

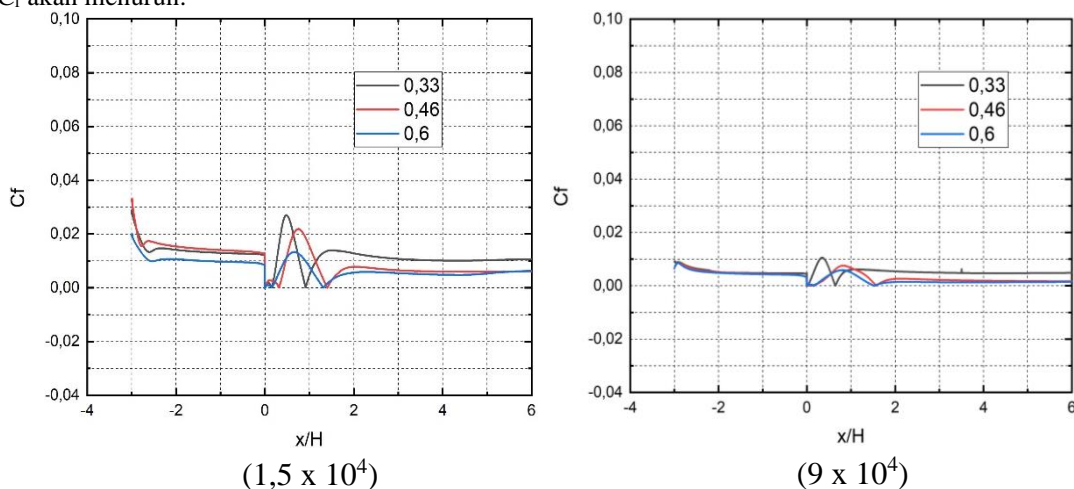
Hasil simulasi profil koefisien tekanan statis ditampilkan pada Gambar 10 untuk variasi ketinggian *step*  $h/H = 0,33; 0,46; \text{ dan } 0,60$  dengan  $Re = 1,5 \times 10^4$  dan  $9 \times 10^4$ . Dari tiga variasi ketinggian *step* yang diuji, terlihat tekanan pada daerah *upstream* turun secara perlahan dan konstan menuju  $x/H = 0$ . Setelah melewati  $x/H = 0$ , nilai  $C_p$  mengalami penurunan tiba-tiba dengan  $C_p$  bernilai negatif akibat arah aliran yang menjauhi permukaan *wall*. Nilai  $C_p$  kemudian meningkat secara drastis hingga mencapai titik *reattachment*. Setelah titik *reattachment*, nilai  $C_p$  cenderung menurun secara perlahan hingga mencapai zona *recovery boundary layer*. Berdasarkan hasil simulasi profil  $C_p$  dengan variasi ketinggian *step*, semakin rendah rasio ketinggian *step* maka semakin panjang jarak yang dibutuhkan untuk mencapai tekanan stabil. Dengan kata lain ketinggian *step* mempengaruhi *recovery* aliran setelah mengalami separasi.



Gambar 10 Profil Koefisien Tekanan

### 3.8. Profil Koefisien Friksi

Gambar 11 menampilkan hasil simulasi profil koefisien friksi untuk variasi ketinggian *step*  $h/H = 0,33; 0,46; \text{ dan } 0,60$  dengan  $Re = 1,5 \times 10^4$  dan  $9 \times 10^4$ . Ketiga variasi ketinggian *step* yang diuji terlihat memiliki tren yang hampir sama dan stabil pada bagian *upstream*. Tepat pada  $x/H = 0$  nilai koefisien friksi menurun tiba-tiba. Sepanjang lokasi  $0 < x/H < 2$  nilai koefisien friksi cenderung naik dan turun secara signifikan kemudian naik menuju nilai konstan setelah memasuki zona *recovery*. Dari ketiga variasi ketinggian *step* semakin tinggi rasio ketinggian *step* maka fluktuasi pada grafik nilai  $C_f$  akan semakin menurun. Pada kedua Gambar dapat dilihat bahwa semakin besar bilangan Reynold maka nilai pada fluktuasi  $C_f$  akan menurun.



Gambar 11 Profil Koefisien Tekanan

#### 4. Kesimpulan

1. Ukuran zona resirkulasi mengalami pengecilan secara signifikan seiring penambahan sudut kemiringan *step* dan mengalami pembesaran seiring penambahan rasio ketinggian h/H.
2. Distribusi tekanan secara substansial menurun seiring pertambahan sudut kemiringan dan meningkat seiring pertambahan rasio ketinggian h/H.
3. Area dengan energi kinetik turbulen tinggi mendominasi pada daerah dekat permukaan *wall* baik pada *upstream* maupun *downstream*. Efek penambahan kemiringan berpengaruh terhadap penurunan energi kinetik turbulen. Sedangkan penambahan rasio ketinggian h/H mengakibatkan peningkatan energi kinetik turbulen.
4. Nilai koefisien tekanan secara umum hampir tidak mengalami perbedaan. Nilai koefisien tekanan cenderung meningkat seiring mengalami penurunan seiring bertambahnya rasio ketinggian *step*.
5. Nilai koefisien friksi menunjukkan adanya daerah fluktuasi gesekan tinggi pada daerah awal *step* dan kemudian kembali relatif konstan. Efek peningkatan sudut *step* mengakibatkan pertambahan panjang daerah fluktuasi koefisien friksi. Nilai fluktuasi koefisien friksi juga semakin menurun seiring bertambahnya rasio ketinggian *step*.

#### Daftar Pustaka

- [1] Armaly B. F., Durst F., Pereira J. C. F., & Schonung B. (1983). *Experimental and Theoretical Investigation of Backward-Facing Step Flow*. *Journal of Fluid Mechanics* 127, 473-496.
- [2] Chen Lin, dkk. (2018). *A review of Backward-Facing Step (BFS) flow mechanisms, heat transfer and control*. *Thermal Science and Engineering Progress* 6, 194.
- [3] Eaton J. K. & Johnston J. P. (1981). *A Review of Research on Subsonic Turbulent Flow Reattachment*. *AIAA Journal* 19 (9), 1093-1100.
- [4] Graziani A., et.al. (2017). *Scaling and flow dependencies over forward-facing steps*. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 67, 220.
- [5] Jovic S. & Driver D. (1994). *Reynolds number effect on the skin friction in separated flows behind a backward-facing step*. *Experiments in Fluids* 18 (6), 464-467.
- [6] Nadge P. M., & Govardhan R. N. (2014). *High Reynolds number flow over a backward-facing step: structure of the mean separation bubble*. *Experiments in Fluids* 1657(55), 1-22.
- [7] Nie J. H. & Armaly B. F. (2002). *Three-dimensional convective flow adjacent to backward-facing step effects of step height*. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45, 2431-2438.
- [8] Nie J. H. & Armaly B. F. (2004). *Reverse flow regions in three-dimensional backward-facing step flow*. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47, 4713-4720.
- [9] Ötügen M. V. (1991). *Expansion ratio effects on the separated shear layer and reattachment downstream of a backward-facing step*. *Experiments in Fluids* 10, 273-280.
- [10] Swift K. M. (2009). *An Experimental Analysis of the Laminar Separation Bubble At Low Reynolds Numbers*. Master Thesis, University of Tennessee.