

STUDI NUMERIK PENGARUH ALIRAN FLUIDA PANAS PADA SALURAN INCLINED BACKWARD FACING STEP

Bara Julio Rivo^{1*}, Khoiri Rozi², Bambang Yunianto²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*Email : baraaajr@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini mengkaji performa aliran saat melewati saluran tertutup berbentuk backward-facing step (BFS). Untuk memahami lebih lanjut mengenai karakteristik aliran pada saluran backward facing step Perlu dilakukan penelitian secara berkelanjutan, baik dalam kerangka teoritis maupun eksperimental. Dalam penelitian ini, fenomena aliran melalui backward facing step diinvestigasi secara numerik menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent. Efek-efek perubahan kemiringan, perubahan slope pada step, suhu aliran, dan Reynold number terhadap karakteristik aliran pada backward facing step disimulasikan. Metode penelitian yang digunakan adalah Computational Fluid Dynamics (CFD) berbasis ANSYS FLUENT 2022 dengan model turbulensi k- ϵ realizable. Fluida yang digunakan pada penelitian ini adalah butana. Pengaruh kemiringan dan perubahan tinggi step terhadap karakteristik distribusi aliran disimulasikan dengan kecepatan fluida inlet 10 m/s. Hasil simulasi dari penelitian ini mengungkapkan bahwa perubahan kemiringan dan ketinggian step menyebabkan perubahan pada zona resirkulasi. Zona resirkulasi memiliki pengaruh terhadap perpindahan panas pada aliran backward facing step. Semakin bertambahnya sudut kemiringan step maka kecepatan maksimum pada zona resirkulasi juga meningkat. Hal ini juga mengakibatkan pertambahan panjang daerah fluktuasi koefisien friksi. Nilai fluktuasi koefisien friksi juga semakin menurun seiring bertambahnya rasio ketinggian step. Nilai koefisien tekanan cenderung meningkat seiring mengalami penurunan seiring bertambahnya rasio ketinggian step

Kata Kunci: *backward facing step; computational fluid dynamics; k- ϵ realizable*

Abstract

This study examines flow performance when passing through a closed channel in the form of a backward-facing step (BFS). To understand more about the flow characteristics of the backward facing step channel, it is necessary to conduct research on an ongoing basis, both in theoretical and experimental frameworks. In this study, the phenomenon of flow through the backward facing step was investigated numerically using ANSYS Fluent software. The effects of slope changes, slope changes in step, flow temperature, and Reynold number on flow characteristics in backward facing step are simulated. The research method used is ANSYS FLUENT 2022-based Computational Fluid Dynamics (CFD) with a realizable k- ϵ turbulence model. The fluid used in this study is butane. The effect of slope and step height changes on flow distribution characteristics is simulated with an inlet fluid velocity of 10 m/s. The simulation results of this study revealed that changes in slope and step height caused changes in the recirculation zone. The recirculation zone has an influence on heat transfer in the backward facing step flow. As the tilt angle of the step increases, the maximum speed in the resirculation zone also increases. This also results in an increase in the length of the area of fluctuation of the coefficient of friction. The value of fluctuations in the friction coefficient also decreases as the step height ratio increases. The value of the pressure coefficient tends to increase as it decreases as the step height ratio increases

Keywords: *backward facing step; computational fluid dynamics; k- ϵ realizable*

1. Pendahuluan

Aliran Backward facing step adalah salah satu model aliran separasi yang sangat penting dalam pengembangan teoritis maupun engineering [2]. Backward Facing Step atau sudden expansion banyak ditemukan dalam berbagai aplikasi praktis, aerofoil pesawat terbang, diffuser, filter, konstruksi bangunan, perpipaan, pendingin, turbine blade, dan sebagainya [1]. Secara umum, fenomena separasi dan reattachment dari aliran dalam ekspansi menyebabkan peningkatan drag dan pressure drop yang berdampak pada perpindahan panas [3].

Backward facing step dianggap sebagai model aliran separasi yang representatif, dan diketahui bahwa pada BFS, terjadi separasi aliran yang dapat menyebabkan hambatan aliran. Pemahaman umum mengenai fisika aliran dalam konteks BFS telah menjadi fokus perhatian yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir [1].

Pemahaman umum tentang ilmu fisika pada aliran BFS telah menjadi salah satu topik hangat dalam beberapa tahun terakhir [2]. 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 [10]. 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.

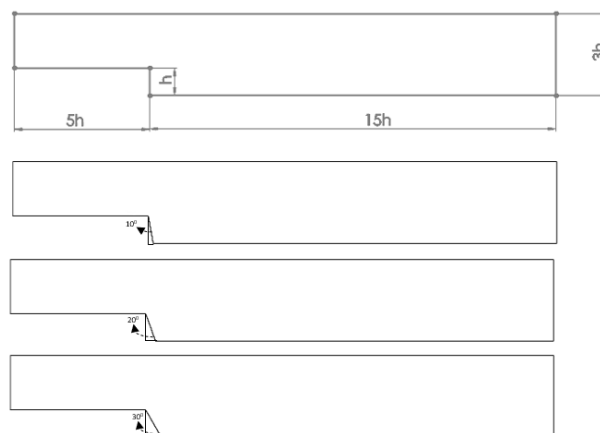
Untuk memahami lebih lanjut mengenai karakteristik aliran pada saluran backward facing step Perlu dilakukan penelitian secara berkelanjutan, baik dalam kerangka teoritis maupun eksperimental. Meskipun sudah banyak studi tentang backward facing step hingga saat ini, masih terdapat beberapa parameter yang memerlukan pemeriksaan lebih lanjut guna mendapatkan pemahaman yang lebih rinci mengenai kompleksitas aliran terutama pada temperature fluida. Dalam penelitian ini, fenomena aliran melalui backward facing step diinvestigasi secara numerik menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent. Efek-efek perubahan kemiringan, perubahan slope pada step, suhu aliran, dan Reynold number terhadap karakteristik aliran pada backward facing step disimulasikan.

2. Metode Perancangan

Pada simulasi 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

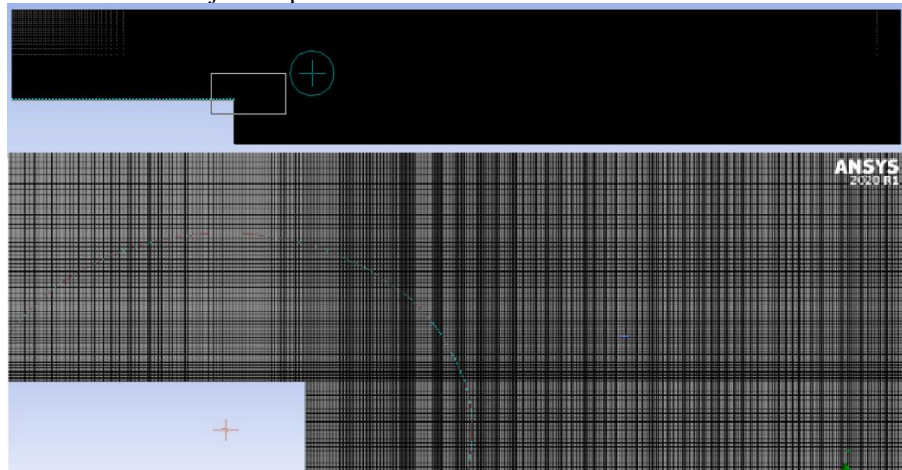
Model Geometri yang digunakan pada studi ini merupakan model 2 dimensi dengan variasi ketinggian step yaitu $h/H = 0,33$. Pada setiap ketinggian akan diterapkan variasi kemiringan sudut $\theta = 10^\circ; 20^\circ; 30^\circ$.



Gambar 1 Model Geometri 2D

2.2. Meshing

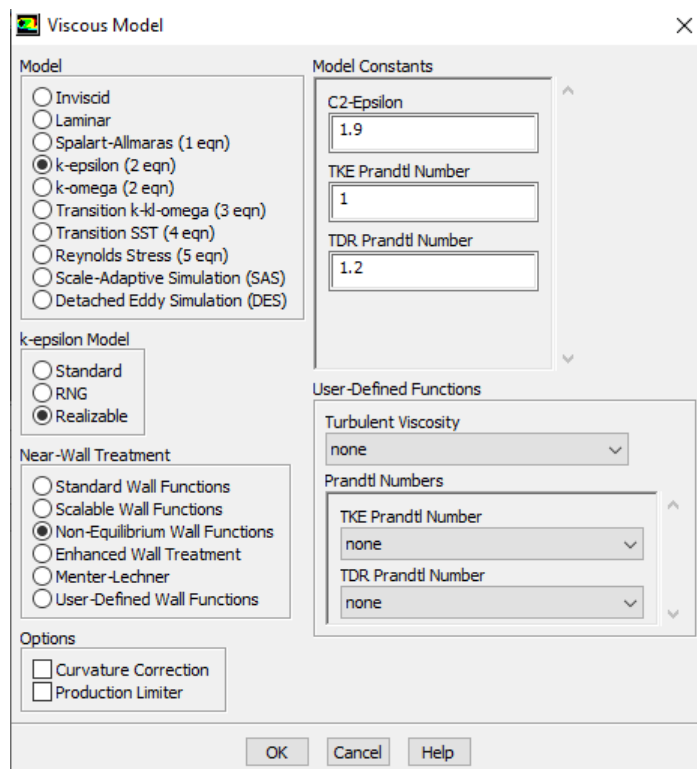
Meshing merupakan tahapan dimana domain dibagi menjadi bagian-bagian kecil yang nantinya akan digunakan untuk perhitungan persamaan dalam *software* CFD. Tujuan dilakukannya *meshing* yaitu untuk membuat perhitungan saat proses *running* menjadi lebih detail dan akurat. Selain dari ukurannya, bentuk *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 turbulent SST k- ϵ Realizable sebagaimana yang digunakan oleh Stephens [4]. 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 6.000.



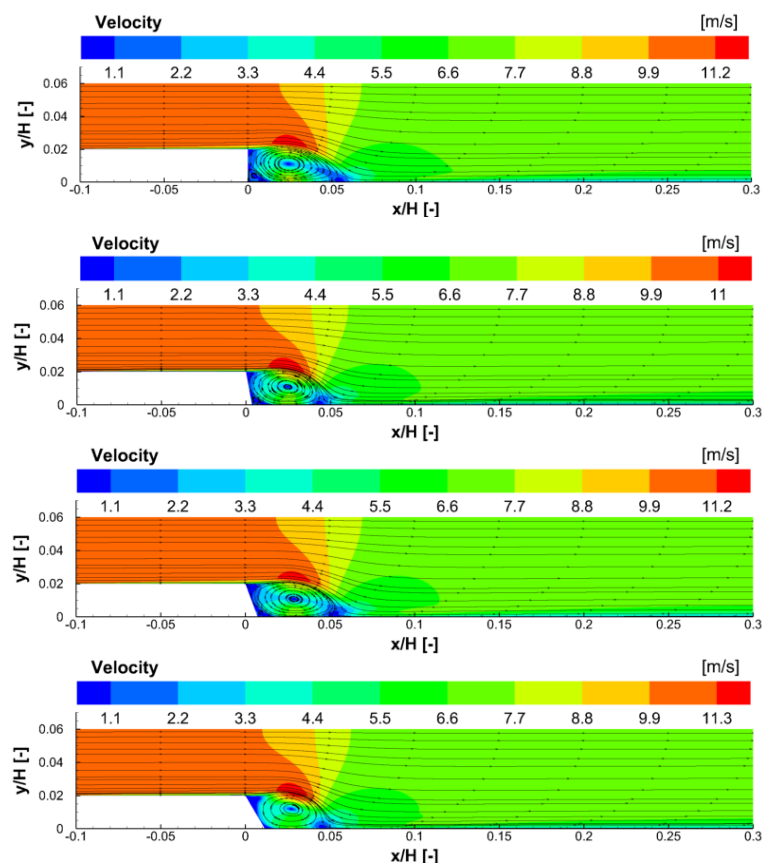
Gambar 3 Setup Model Aliran pada ANSYS Fluent

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Struktur Aliran dan Distribusi Kecepatan

Hasil simulasi struktur aliran dan distribusi kecepatan dengan $U_\infty = 10$ m/s 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*.

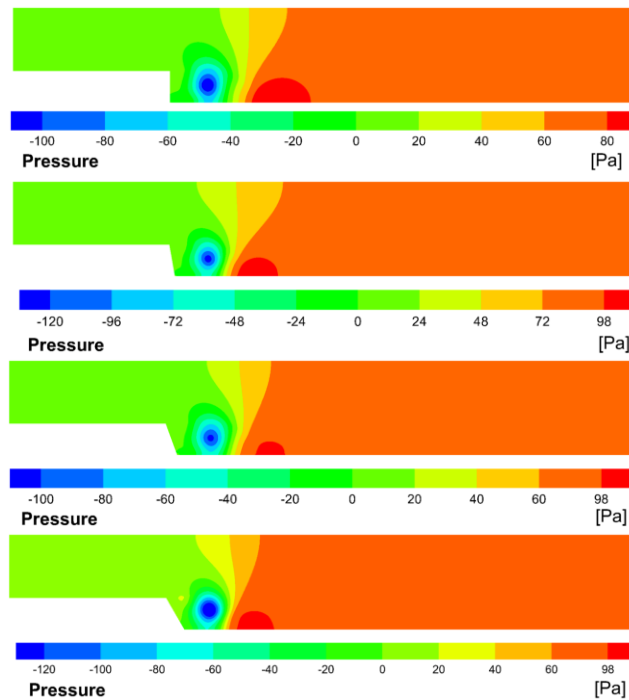
Gambar 4 menunjukkan adanya peningkatan distribusi kecepatan seiring bertambahnya ketinggian *step*. Semakin meningkat sudut kemiringan *step*, zona resirkulasi semakin mengecil, diikuti dengan penurunan panjang titik *reattachment*. Semakin meningkatnya sudut *step* berpengaruh terhadap kecepatan fluida pada daerah resirkulasi. Terdapat perubahan ukuran zona resirkulasi seiring dengan peningkatan kemiringan sudut pada ketiga kecepatan. Terdapat perubahan ukuran zona resirkulasi seiring dengan peningkatan kemiringan sudut pada ketiga kecepatan. Pada sudut kemiringan $\theta = 10^\circ$, terdapat resirkulasi di ujung bawah *step*. Seiring meningkatnya sudut, terjadi resirkulasi di ujung atas *step*.



Gambar 4 Struktur Aliran dan Distribusi Kecepatan

3.2. Distribusi Tekanan

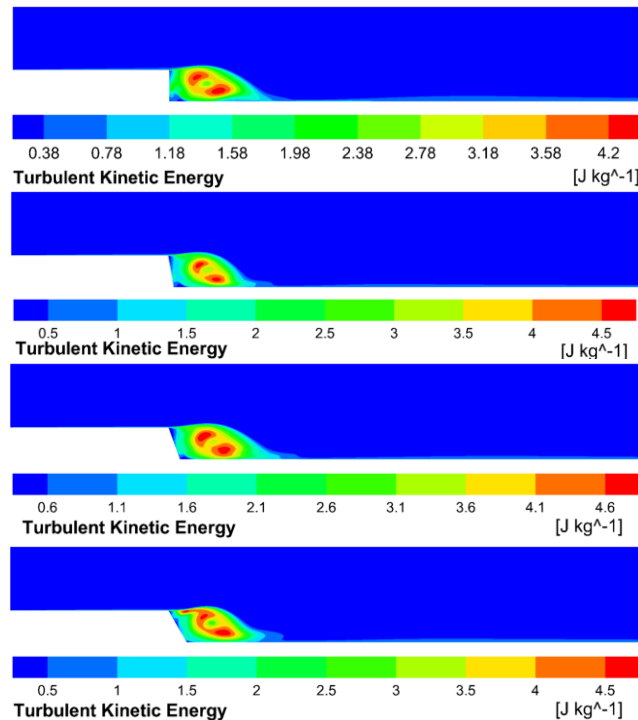
Hasil simulasi distribusi tekanan dengan variasi rasio kemiringan *step* ditampilkan pada Gambar 5. Skala pada kontur distribusi tekanan ditampilkan seperti pada Gambar 4 struktur aliran dan distribusi kecepatan dengan nilai tekanan minimal direpresentasikan dengan warna biru dan nilai maksimal direpresentasikan 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. Secara umum, pola distribusi tekanan mengalami perubahan signifikan dengan kenaikan kemiringan *step* baik pada daerah upstream maupun daerah downstream. Area aliran tekanan tinggi terdistribusi pada bagian downstream tepatnya di ujung bawah zona resirkulasi dan area aliran berenergi rendah terdistribusi pada bagian inti zona resirkulasi.



Gambar 5 Distribusi Tekanan

3.3. Distribusi Energi Kinetik Turbulen

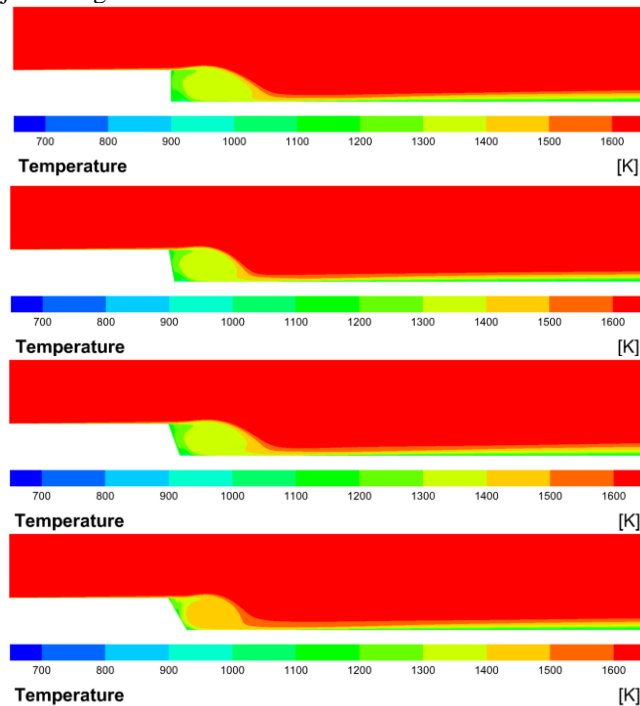
Gambar 6 menunjukkan hasil simulasi variasi rasio ketinggian *step* pada $U_\infty = 10$ m/s. Besar energi kinetik turbulen direpresentasikan oleh skala dengan gradasi warna yang ada di atas plot. Energi kinetik turbulen rendah direpresentasikan warna biru dan energi kinetik turbulen tinggi direpresentasikan oleh warna merah. Berdasarkan plot kemiringan *step* hanya mempengaruhi nilai energi kinetik maksimal. Nilai energi kinetik maksimal cenderung dan meningkatnya sudut kemiringan *step*. Kemiringan *step* juga berpengaruh pada zona resirkulasi yang semakin mengecil seiring meningkatnya kemiringan sudut *step*.



Gambar 6 Distribusi Energi Kinetik Turbulen

3.4. Distribusi Temperatur

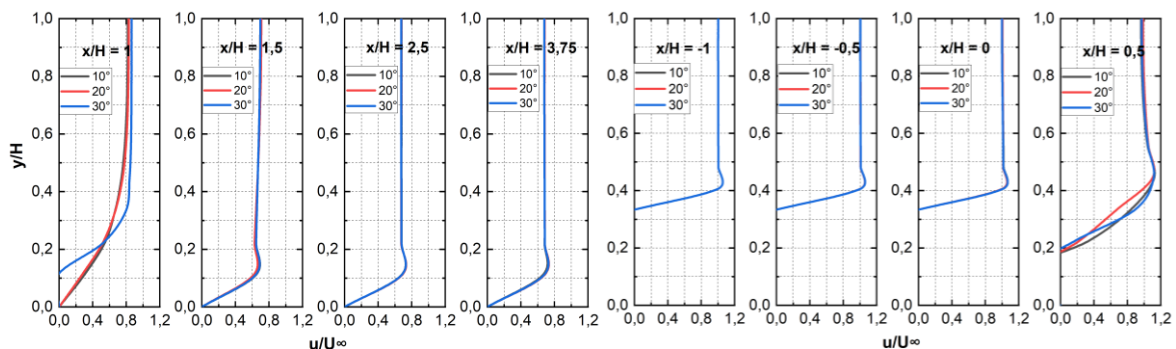
Hasil simulasi distribusi temperatur pada $U_\infty = 10$ m/s dengan tiga variasi kemiringan sudut step dapat dilihat pada Gambar 7. Sebagaimana susunan plot sebelumnya, variasi kemiringan sudut kecil ke besar diurutkan dari atas ke bawah. Besar temperatur direpresentasikan oleh skala dengan gradasi warna yang ada di atas plot. Temperatur rendah direpresentasikan warna hijau dan temperatur tinggi direpresentasikan oleh warna merah. Seperti halnya dengan plot energi kinetik turbulen, plot temperatur juga lebih difokuskan pada daerah downstream, mengingat perubahan temperatur di daerah upstream sangat minim. Daerah upstream terlihat memiliki temperatur yang relatif tinggi. Sebaliknya, bagian downstream mengalami penurunan temperatur sepanjang sumbu x, terlihat dari gradasi warna dari merah di area step menjadi hijau di bagian outlet.



Gambar 7 Kontur Distribusi Temperatur

3.5. Profil Kecepatan

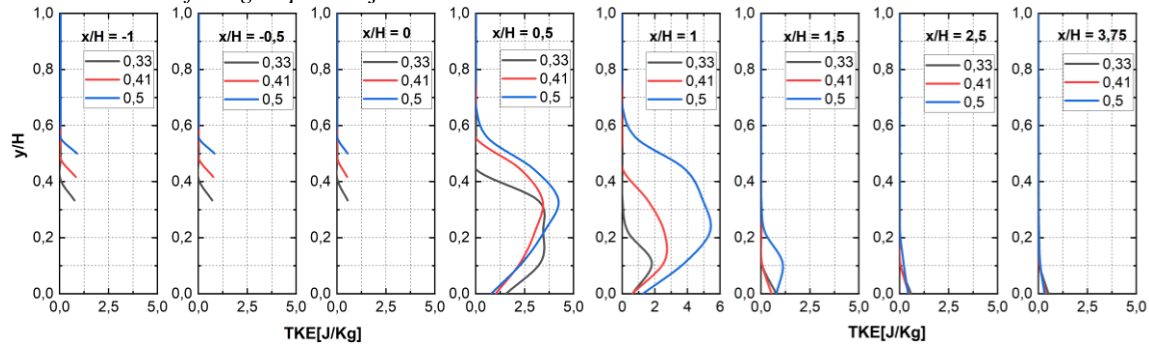
Gambar 8 menampilkan hasil simulasi profil kecepatan pada tiga variasi ketinggian *step* $h/H = 0,33$ dengan $U_\infty = 10$ m/s. Pada bagian *downstream* ($x/H > 0$), Dapat dilihat pada bentuk grafik dimana kecepatan pada daerah wall bernilai 0 dan kemudian secara signifikan meningkat hingga pada kecepatan free stream. Pada daerah upstream ($x/H < 0$), nilai kecepatan aliran free stream cenderung sama pada ketiga variasi ketinggian. Pada titik $x/H = 1$ memiliki grafik yang sangat tidak seragam dan tidak teratur. Hal ini menandakan adanya turbulensi akibat separasi aliran. Pada titik $x/H = 2,5$ yang merupakan daerah setelah zona resirkulasi, memiliki grafik yang mulai stabil akibat adanya transfer energi dari aliran resirkulasi menuju aliran mula. Hal ini terjadi akibat adanya peningkatan *adverse pressure gradient* yang semakin meningkat akibat ekspansi pada penampang.



Gambar 8 Profil Kecepatan

3.6. Profil Energi Kinetik Turbulen

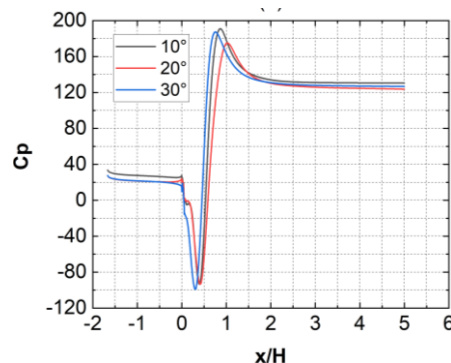
Plot hasil simulasi energi kinetik turbulen pada $U_\infty = 10$ m/s untuk variasi ketinggian *step* $h/H = 0,33$ dapat dilihat pada Gambar 9. Profil energi kinetik turbulen cenderung meningkat pada permukaan *wall* dan mulai stabil setelah mencapai aliran *free stream*. Pada lokasi $x/H = 0,5$ dan $x/H = 1$ terjadi resirkulasi yang ditandai dengan adanya ketidakstabilan profil energi kinetik turbulen pada semua variasi kemiringan *step*. Pada tampilan profil energi kinetik turbulen yang lebih cermat, nilai kestabilan energi kinetik turbulen semakin menurun seiring bertambahnya lokasi x/H . Hal ini menandakan semakin berkurangnya energi kinetik turbulen pada daerah *freestream* seiring perjalanan aliran fluida pada saluran *backward facing step* menuju *outlet*.



Gambar 9 Profil Energi Kinetik Turbulen

3.7. Profil Koefisien Tekanan

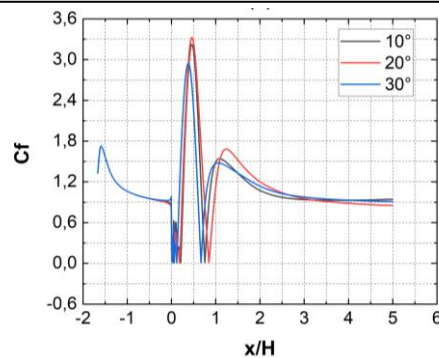
Hasil simulasi profil koefisien tekanan statis ditampilkan pada Gambar 10 untuk variasi ketinggian *step* $h/H = 0,33$ dengan $U_\infty = 10$ m/s. Tekanan pada dinding upstream turun perlahan searah sumbu x sampai awal *step* pada titik $x/H = 0$. nilai C_p mengalami penurunan tiba-tiba dan sedikit naik pada daerah awal *step* yang menunjukkan daerah resirkulasi sekunder. Nilai C_p kemudian meningkat secara drastis setelah melewati inti resirkulasi hingga mencapai titik reattachment. Tekanan berfluktuasi hingga berada pada nilai paling rendah dan kemudian kembali naik secara pesat sampai kisaran titik $x/H = 1$. Rentang antara titik tekanan paling rendah dan titik tekanan paling tinggi diduga merupakan tempat terjadinya zona resirkulasi. Tekanan akan menurun sedikit setelah meninggalkan zona resirkulasi hingga mencapai nilai stabil. Hasil grafik C_p pada $h/H = 0,33$ sebagaimana terlihat pada Gambar 4.10.



Gambar 10 Profil Koefisien Tekanan

3.8. Profil Koefisien Friksi

Gambar 11 menampilkan hasil simulasi profil koefisien friksi untuk variasi ketinggian *step* $h/H = 0,33$ dengan $U_\infty = 10$ m/s. Grafik koefisien friksi pada $h/H = 0,33$ memiliki tren yang hampir sama untuk semua variasi yang ditandai dengan plot yang saling berhimpit. Saat koefisien friksi mencapai nilai nol, shear velocity juga menjadi nol, mengindikasikan kemungkinan adanya reattachment aliran pada lokasi tersebut. Semakin meningkatnya sudut *step*, reattachment length semakin mengecil. Panjang daerah fluktuasi ini menunjukkan titik reattachment setelah zona resirkulasi dimana aliran kembali pulih. Pada grafik dapat dilihat bahwa reattachment length pada saluran dengan sudut *step* 30° lebih pendek dibandingkan sudut lainnya.



Gambar 11 Profil Koefisien Tekanan

4. Kesimpulan

1. Zona resirkulasi memiliki pengaruh terhadap perpindahan panas pada aliran backward facing step.
2. Semakin bertambahnya sudut kemiringan step maka kecepatan maksimum pada zona resirkulasi juga meningkat. Hal ini juga mengakibatkan pertambahan panjang daerah fluktuasi koefisien friksi.
3. Nilai fluktuasi koefisien friksi juga semakin menurun seiring bertambahnya rasio ketinggian step.
4. Nilai koefisien tekanan cenderung meningkat seiring mengalami penurunan 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.