

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

Irwan Irawan^{1*}, Khoiri Rozi², Ismoyo Haryanto²

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 : ironeiraone@gmail.com

Abstrak

Studi ini mengkaji performa aerodinamis yang terjadi pada BFS dengan menggunakan fluida gas butena jika diterapkan variasi sudut kemiringan, tinggi langkah, dan variasi kecepatan yang berbeda. Penelitian ini menggunakan solusi numerik *Computational Fluid Dynamics*, dimana perangkat lunak yang digunakan adalah ANSYS 16. Model turbulensi yang digunakan dalam penelitian ini adalah *k-ε realizable* dengan perlakuan fungsi dinding *non-equilibrium*. Pengaruh perubahan tinggi dan sudut kemiringan step terhadap karakteristik aliran dipelajari dengan menggunakan kecepatan $U_{\infty} = 5; 10; \text{ dan } 15 \text{ m/s}$. Hasil simulasi dari penelitian ini menemukan bahwa pengaruh perubahan tinggi step mempengaruhi intensitas turbulensi dan pembentukan resirkulasi. Semakin tinggi step membuat zona resirkulasi lebih besar dan jarak reattachment. Efek dari perubahan sudut kemiringan step menyebabkan pengurangan ukuran zona resirkulasi dan jarak reattachment yang lebih pendek di sisi hilir atau dekat dinding step. Peningkatan kecepatan tidak menyebabkan perubahan signifikan pada zona resirkulasi dan jarak reattachment. Namun, perubahan variasi ini menghasilkan energi kinetik turbulen yang meningkat dengan setiap peningkatan kecepatan dan koefisien gesekan dengan setiap peningkatan kecepatan.

Kata Kunci: *backward facing step; gas butena; k-ε realizable*

Abstract

This study examines the aerodynamic performance that occurs in BFS using butene gas fluid when different tilt angles, step heights and speed variations are applied. This research uses Computational Fluid Dynamics numerical solutions, where the software used is ANSYS 16. The turbulence model used in this research is k-ε realizable with non-equilibrium wall function treatment. The effect of changing the height and inclination angle of the step on the flow characteristics was studied using speeds $U_{\infty} = 5; 10; \text{ and } 15 \text{ m/s}$. The simulation results from this research found that the influence of changes in step height affects the intensity of turbulence and the formation of recirculation. The higher the step creates a larger recirculation zone and reattachment distance. The effect of changing the step inclination angle causes a reduction in the size of the recirculation zone and a shorter reattachment distance on the downstream side or near the step wall. Increasing the speed does not cause significant changes in the recirculation zone and reattachment distance. However, this change in variation produces turbulent kinetic energy that increases with each increase in speed and the coefficient of friction with each increase in speed.

Keywords: *backward facing step; butene gas; k-ε realizable*

1. Pendahuluan

Backward facing step (BFS) merupakan representasi model saluran yang tereksansi secara tiba-tiba pada bagian *downstream* [2]. Model saluran semacam ini bisa ditemukan pada berbagai aplikasi praktis dalam bidang keteknikan seperti aliran melewati *combustion chamber*, aliran melewati pipa di sistem refinery gas atau chemical. Model saluran ini dapat digunakan sebagai representasi model aliran terseparasi dalam saluran pada sistem perpipaan. Adanya aliran separasi ini menyebabkan penurunan tekanan (*pressure drop*) dan menghasilkan kehilangan momen atau energi yang harus diatasi dengan menggunakan tenaga pemompaan tambahan [8].

Perubahan tiba-tiba dalam orientasi dinding disaluran secara signifikan mempengaruhi karakteristik aliran didekat dinding dan terkadang menyebabkan separasi dan *reattachment*. Aliran dibedakan dengan perubahan karakter panjang *reattachment* untuk berbagai bilangan Reynolds [9]. Aliran BFS sudah menarik ketika masalah mekanika fluida biasanya ditangani hanya oleh teori aliran potensial. Teori aliran potensial memungkinkan perlakuan aliran BFS menghasilkan

pola aliran yang tidak menunjukkan apapun, seperti daerah separasi ataupun resirkulasi dibelakang *step*. Oleh karena itu teori potensial tidak menunjukkan separasi yang diharapkan secara umum dari mengalir disudut atas *step*, begitu pula sudut bawah tidak menghasilkan wilayah vortisitas seperti yang diharapkan dari pertimbangan Moffatt [5].

Medan aliran melewati BFS telah dipelajari secara eksperimental dan numerik. Medan aliran tersendiri secara umum terbagi menjadi beberapa daerah, seperti *shear layer*, *recirculation zone*, *reattachment zone*, dan *redeveloping zone* [7]. *Boundary layer* terpisah dari permukaan dinding dibelakang *step*, dan terbentuklah *shear layer*, disertai dengan pembentukan *recirculation zone* diantara *shear layer* dan dinding. Posisi dimana *shear layer* membengkok dan menumbuk dinding adalah *reattachment zone* [4].

Panjang *reattachment* dan zona resirkulasi bertambah seiring dengan bertambahnya ketinggian *step* [3]. Panjang *reattachment* umumnya 5-19 h (h adalah tinggi *step*) dan bervariasi dengan bilangan Reynolds. Setelah *reattachment*, aliran secara bertahap bertransisi menjadi aliran yang berkembang penuh (*fully developed flow*). Namun, studi telah menunjukkan bahwa *boundary layer* tidak dapat pulih ke aliran berkembang penuh pada 52 h *downstream* jauh dari *step*. Panjang saluran BFS yang dipelajari pada penelitian sebelumnya sebagian besar kurang dari 50 h, dimana aliran belum pulih menjadi aliran berkembang penuh [10].

Secara umum, separasi dan *reattachment* aliran dalam pipa menyebabkan peningkatan *drag* dan *pressure drop* yang signifikan, yang berdampak positif pada laju perpindahan panas. Terlepas dari minat tekniknya, kesederhanaan geometri BFS membuatnya menjadi fenomena ekspansi mendadak yang cocok untuk mempelajari karakteristik aliran fluida dan perpindahan panas melalui simulasi dan eksperimen [1]. Geometri saluran BFS dapat ditemukan dalam sistem pemanas dan pendingin misalnya dalam penukar panas, dan proses kimia [6].

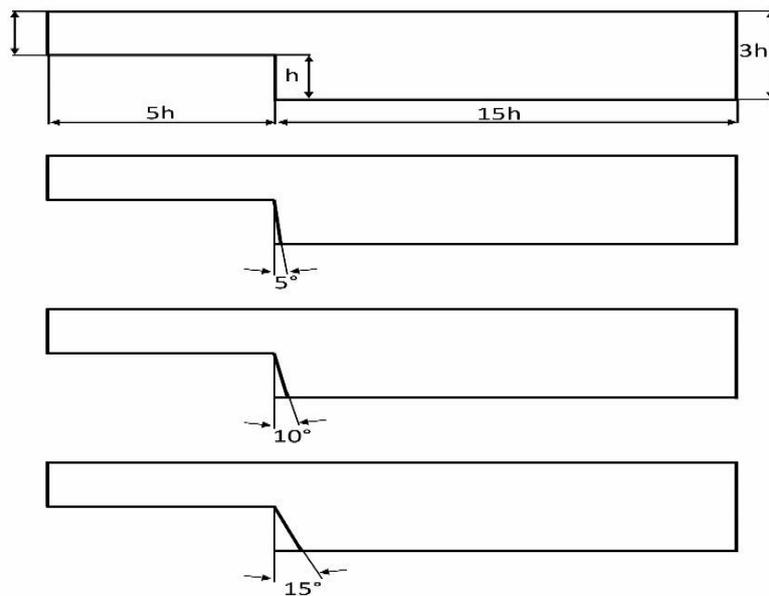
Sampai saat ini telah banyak dilakukan kajian-kajian berkaitan dengan aliran melewati geometri BFS baik secara analitikal, numerical dan eksperimental. Namun demikian masih banyak aspek parameter yang memungkinkan untuk dikaji lebih lanjut guna memahami secara detail fenomena aliran melewati BFS. Maka penelitian ini dilakukan dengan menguji BFS model untuk beberapa variasi ketinggian dan kemiringan *step*. Metode yang digunakan dalam studi ini menggunakan pendekatan komputasi numerik dengan software Ansys FLUENT.

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

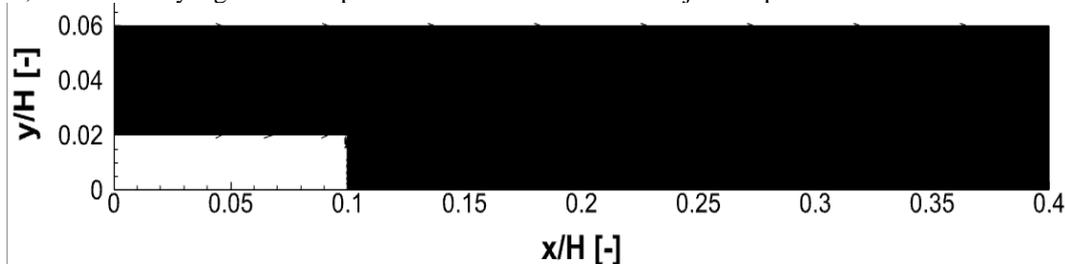
Model Geometri yang digunakan pada studi ini merupakan model 2 dimensi dengan 3 model variasi ketinggian *step* yaitu $h/H = 0,33; 0,41; 0,50$. Pada setiap ketinggian akan diterapkan variasi kemiringan sudut $\theta = 5^\circ; 10^\circ; 15^\circ$.



Gambar 1 Model Geometri 2D

2.2. Meshing

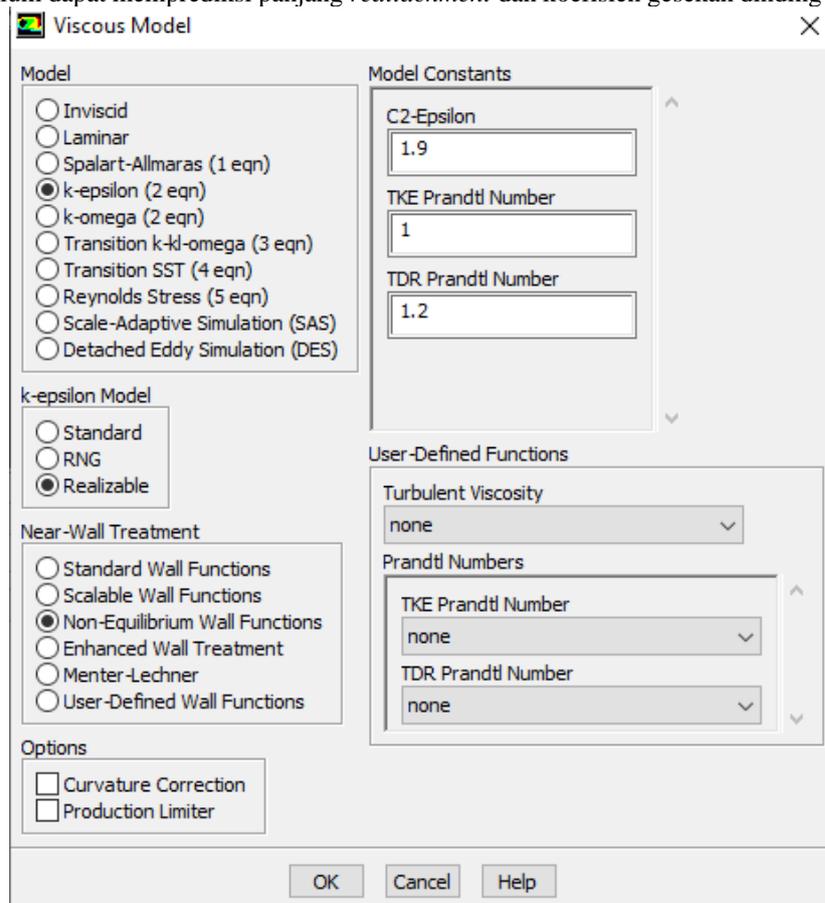
Pada studi ini strategi untuk membuat mesh pada model yang diuji adalah menggunakan metodologi *near wall treatment* yaitu susunan *grid* pada sekitar permukaan *wall* lebih rapat dan kemudian disusun merenggang seiring menjauh dari permukaan *wall* baik pada *upstream* maupun pada *downstream*. Kemudian untuk susunan *grid* di sekitar *step*, *grid* disusun lebih rapat pada area dekat *step* dan merenggang seiring menjauhi *step* baik pada arah *upstream* maupun arah *downstream*, model mesh yang belum diaplikasikan variasi *incline* ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Model Meshing BFS

2.3. Setup Model Aliran BFS

Pada studi ini model yang digunakan adalah *k-ε Realizable*. Pemodelan ini dipilih karena bisa memberikan performa yang baik untuk aliran yang melibatkan separasi dan resikulasi. Kim et al. dan Eiamsaard dan Promvonge membandingkan keakuratan beberapa model turbulensi dan *near-wall* untuk mensimulasikan BFS aliran dan hasil menunjukkan bahwa model turbulensi *k-ε RNG* dan model turbulensi *k-ε realizable* dikombinasikan dengan fungsi dinding non-ekuilibrium dapat memprediksi panjang *reattachment* dan koefisien gesekan dinding yang paling akurat [9].



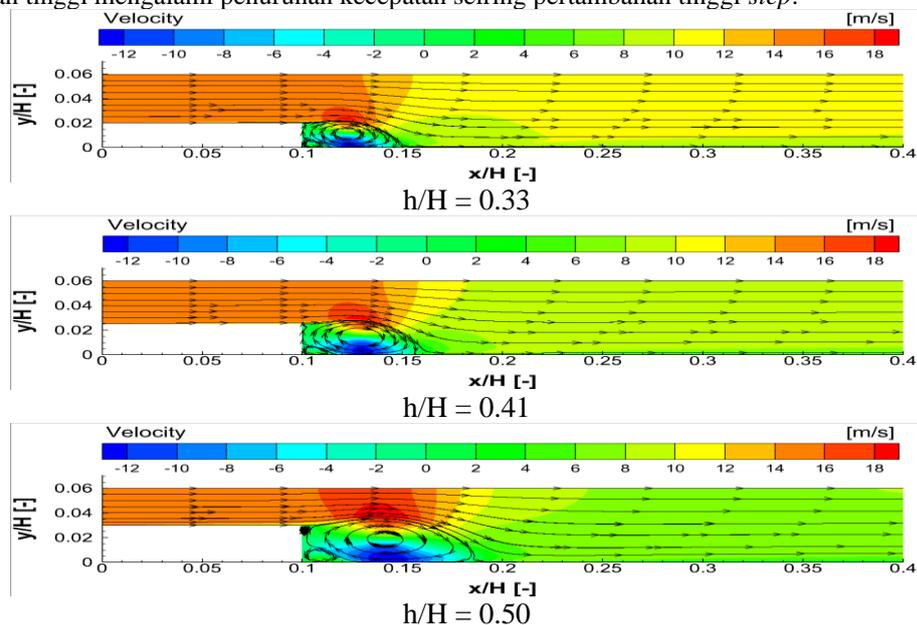
Gambar 3 Setting model turbulen.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Struktur Aliran dan Distribusi Kecepatan

Hasil-hasil simulasi struktur aliran dan distribusi kecepatan dengan variasi ketinggian step $h/H = 0.33$; 0.41 ; dan 0.50 pada kecepatan $U_\infty = 15$ m/s disajikan pada Gambar 4. Plot diurutkan dari atas ke bawah berdasarkan urutan tinggi step rendah ke tinggi. Besar kecepatan ditandai oleh degradasi warna yaitu kecepatan rendah ditandai warna biru dan kecepatan tinggi ditandai dengan warna merah. Dari plot untuk ketiga kecepatan yang diuji, secara umum ditemukan struktur aliran yang terbentuk hampir mirip pada ketiga variasi tinggi step, terlihat adanya perubahan ukuran zona resirkulasi seiring kenaikan variasi ketinggian step pada ketiga kecepatan. Semakin tinggi variasi ketinggian step semakin besar zona resirkulasi dan semakin panjang zona *reattachment*.

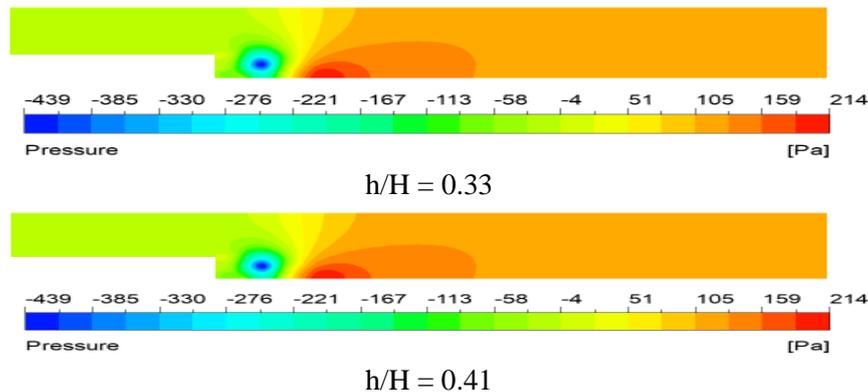
Pada plot ditemukan tiga zona resirkulasi pada pojok bawah step bagian *upstream*, pada atas step bagian *downstream*, dan pada pojok bawah step bagian *downstream*. Pada variasi tinggi $h/H = 0.33$, muncul resirkulasi diujung bawah step dengan ukuran lebih kecil kemudian bertambah besar seiring dengan kenaikan tinggi step. Pada variasi tersebut juga didapati ukuran zona resirkulasi yang lebih besar pada *downstream*. Dari plot juga ditemukan area aliran berkecepatan rendah dan tinggi yang masing-masing berkecepatan rendah terkonsentrasi pada zona resirkulasi, sedangkan area kecepatan tinggi terdistribusi pada bagian *downstream* di atas zona resirkulasi. Area aliran baik berkecepatan rendah maupun berkecepatan tinggi mengalami penurunan kecepatan seiring pertambahan tinggi step.

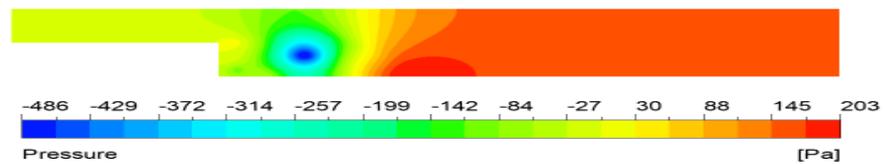


Gambar 4 Struktur Aliran pada $U_\infty = 15$ m/s dengan $\theta = 0^\circ$

3.2. Distribusi Tekanan

Besarnya tekanan ditandai oleh degradasi warna yang ada di bawah plot, tekanan rendah ditandai warna biru dan tekanan tinggi ditampilkan oleh warna merah. Secara umum pola distribusi pada ketiga kecepatan yang diuji menunjukkan tidak terjadi perubahan pola distribusi secara signifikan, akan tetapi nilai distribusi tekanan dan zona maksimum tekanan seiring penambahan variasi ketinggian step mengalami perubahan yang signifikan. Area aliran tekanan tinggi terdistribusi pada bagian *downstream* tepatnya diujung zona *reattachment*.



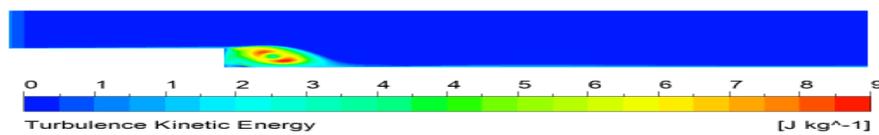


$h/H = 0.50$

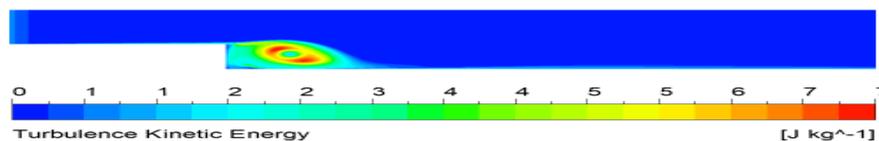
Gambar 5 Distribusi Tekanan pada $U_\infty = 15$ m/s dengan $\theta = 0^\circ$

3.3. Distribusi Energi Kinetik Turbulen

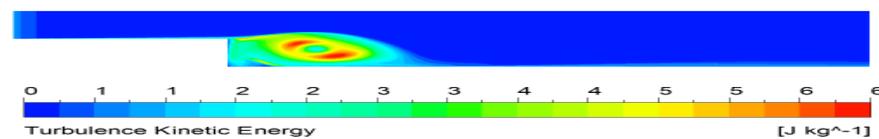
Hasil simulasi distribusi energi kinetik turbulen pada $U_\infty = 15$ m/s dengan tiga variasi ketinggian step $h/H = 0.33$; 0.41 ; dan 0.50 ditampilkan pada Gambar 6. Warna biru menandakan nilai energi kinetik turbulen rendah dan warna merah menandakan energi kinetik turbulen tinggi. Pola distribusi energi kinetik turbulen tidak ada perubahan secara signifikan, akan tetapi seiring penambahan variasi ketinggian *step* zona nilai maksimum mengalami perubahan signifikan.



$h/H = 0.33$



$h/H = 0.41$



$h/H = 0.50$

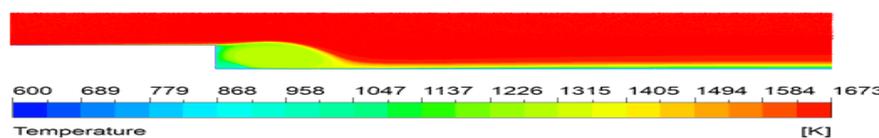
Gambar 6 Distribusi Energi Kinetik Turbulen pada $U_\infty = 15$ m/s dengan $\theta = 0^\circ$

3.4. Distribusi Temperature

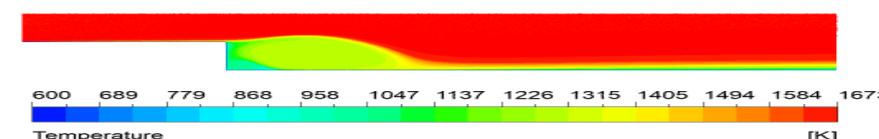
Gambar 7 menampilkan hasil simulasi distribusi temperatur dengan variasi tiga ketinggian step $h/H = 0.33$; 0.41 ; dan 0.50 pada kecepatan $U_\infty = 15$ m/s.



$h/H = 0.33$



$h/H = 0.41$



$h/H = 0.50$

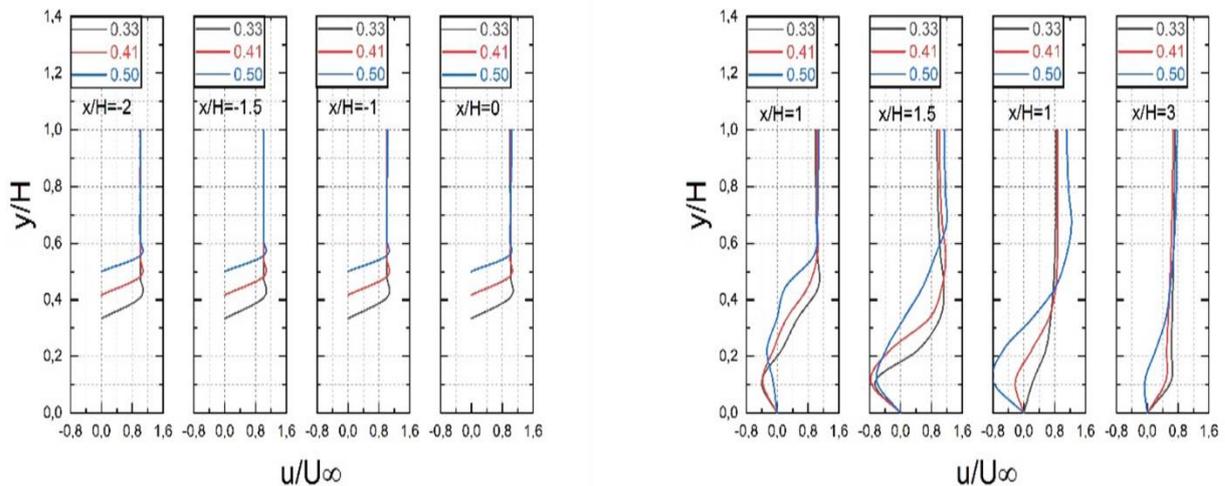
Gambar 7 Distribusi Temperature pada $U_\infty = 15$ m/s dengan $\theta = 0^\circ$

Plot disusun dari atas ke bawah berdasarkan urutan variasi ketinggian dari kecil ke besar. Besarnya temperatur ditandai oleh degradasi warna yang ada di bawah plot, temperatur rendah ditandai warna biru dan tekanan tinggi ditandai oleh warna merah. Distribusi temperatur memiliki pola yang sama, zona resirkulasi dan *downstream* dekat *wall* mengalami penurunan temperatur. Seiring penambahan variasi ketinggian *step*, semakin besar juga zona yang bertemperatur rendah mengikuti ukuran zona resirkulasi.

3.5. Profil Kecepatan

Gambar 8 menampilkan hasil simulasi profil kecepatan pada tiga variasi ketinggian *step* $h/H = 0.33$; 0.41 ; dan 0.50 dengan $U_\infty = 515$ m/s. Susunan plot baris atas adalah *upstream* dari titik $x/H = -2$ hingga $x/H = 0$, sedangkan baris bawah adalah *downstream* dari titik $x/H = 1$ sampai $x/H = 3$. Untuk ketiga kecepatan pada bagian *downstream*, terlihat jelas bahwa efek viskos secara signifikan mempengaruhi kecepatan aliran pada daerah dari permukaan *wall* sampai $y/H = 6$. Pada daerah dalam rentang $y/H > 6$ jauh di depan *step* nilai kecepatan cenderung uniform, efek viskositas terbatas dari permukaan sampai $y/H < 6$. Makin mendekati *step* di posisi $x/H = 1$ terjadi gangguan, ditandai perubahan kecepatan secara signifikan diatas permukaan *step*.

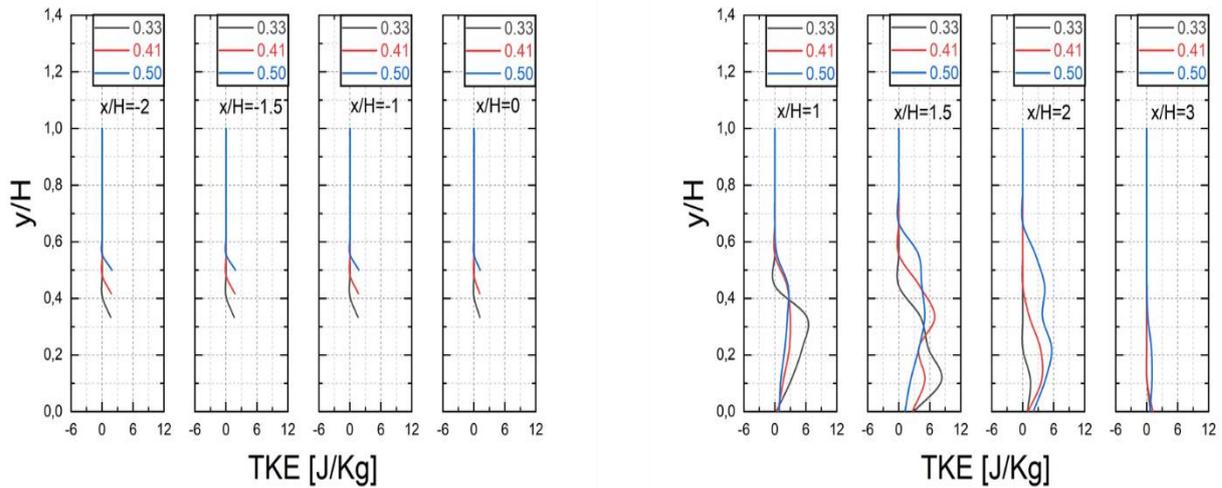
Untuk bagian *downstream* terlihat aliran mengalami resirkulasi pada posisi $x/H = 1$ ditandai dengan kecepatan bernilai negative. Aliran terdeteksi akan kembali steady pada posisi $x/H = 3$ dimana aliran berada jauh dibelakang zona resirkulasi, hal ini terjadi adanya transfer energi antara aliran yang tidak terseparasi menuju aliran terseparasi. Selain itu, dari plot memperlihatkan perbedaan perubahan kecepatan cukup signifikan akibat adanya perubahan *streamline* aliran menuju *downstream*.



Gambar 8 Profil Kecepatan pada $U_\infty = 15$ m/s dengan $\theta = 0^\circ$

3.6. Profil Energi Kinetik Turbulen

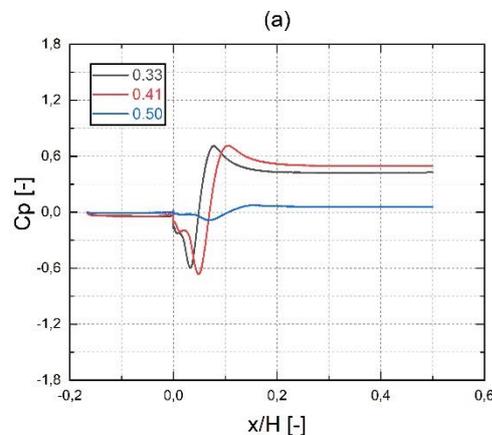
Hasil simulasi energi kinetik turbulen pada $U_\infty = 15$ m/s. Untuk tiga variasi tinggi *step* $h/H = 0.33$; 0.41 ; dan 0.50 diplot pada Gambar 9. Pada sisi *upstream* terlihat energi kinetik turbulen agak terpengaruh pada lokasi yang dekat dengan permukaan samapai pada $y/H < 6$, adapun pada daerah $y/H > 6$ energi kinetik turbulen hampir tidak terlihat dimana kondisi aliran yang terjadi adalah *frestream*. Untuk ketiga variasi ketinggian yang diuji diperoleh nilai turbulen energi kinetik tertinggi terjadi pada ketinggian *step* paling besar yaitu di $h/H = 0.33$. Daerah energi kinetik turbulen maksimum meningkat cukup kuat tepat pada $x/H = 0$ yaitu pada $0,0 < y/h < 0,6$, kemudian pada *downstream* dibelakang *step* pengaruh separasi *bubble* terhadap energi kinetic turbulen melemah pada wilayah $0,0 < y/H < 0,6$. Di sini pada *downstream* juga terlihat pada ketinggian *step* besar menghasilkan energi kinetic paling besar jika dibandingkan dengan dua ketinggian *step* yang lebih kecil pada $h/H = 0.33$ dan 0.41 .



Gambar 9 Profil Energi Kinetik Turbulen pada $U_{\infty} = 15$ m/s dengan $\theta = 0^{\circ}$

3.7. Profil Koefisien Tekanan

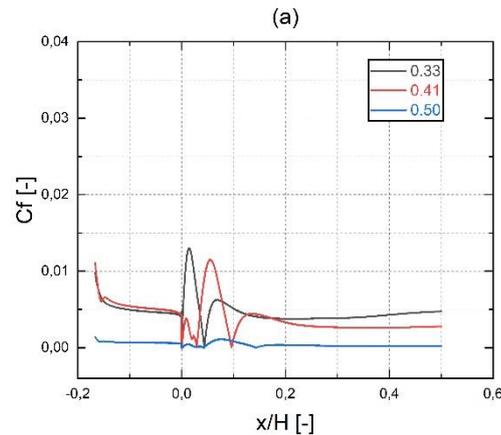
Gambar 10 menampilkan hasil simulasi profil koefisien tekanan statis untuk variasi ketinggian step $h/H = 0.33$; 0.41 ; dan 0.50 dengan $U_{\infty} = 15$ m/s. Dari tiga variasi tinggi step yang diuji tersebut terlihat memiliki nilai C_p hampir sama pada bagian *upstream*. Tekanan pada dinding *upstream* turun secara konstan menuju step. Setelah melewati step, pada ketinggian step $h/H = 0.33$, 0.41 mengalami penurunan drastis tidak seperti pada $h/H = 0.50$. Masih di dalam daerah resirkulasi, tekanan selanjutnya mengalami kenaikan secara cepat hingga menuju daerah *reattachment*. Kenaikan tekanan tetap terjadi tetapi secara perlahan dan terus naik hingga ke titik di *outlet* menuju tekanan konstan. Berdasarkan grafik yang ditampilkan Gambar 4.19, semakin rendah step semakin lama waktu dan panjang jarak yang dibutuhkan untuk mencapai tekanan konstan. Dengan kata lain ketinggian step mempengaruhi *recovery* aliran setelah mengalami separasi.



Gambar 10 Profil Koefisien Tekanan pada $U_{\infty} = 15$ m/s dengan $\theta = 0^{\circ}$

3.8. Profil Koefisien Friksi

Hasil simulasi energi kinetik turbulen pada $U_{\infty} = 5$; 10 ; dan 15 m/s. Untuk tiga variasi tinggi step $h/H = 0.33$; 0.41 ; dan 0.50 diplot pada Gambar 11. Pada sisi *upstream* terlihat energi kinetik turbulen agak terpengaruh pada lokasi yang dekat dengan permukaan sampai pada $y/H < 6$, adapun pada daerah $y/H > 6$ energi kinetik turbulen hampir tidak terlihat dimana kondisi aliran yang terjadi adalah *frestream*. Untuk ketiga variasi ketinggian yang diuji diperoleh nilai turbulen energi kinetik tertinggi terjadi pada ketinggian step paling besar yaitu di $h/H = 0.33$. Daerah energi kinetik turbulen maksimum meningkat cukup kuat tepat pada $x/H = 0$ yaitu pada $0,0 < y/h < 0,6$, kemudian pada *downstream* dibelakang step pengaruh separasi *bubble* terhadap energi kinetic turbulen melemah pada wilayah $0,0 < y/H < 0,6$. Di sini pada *downstream* juga terlihat pada ketinggian step besar menghasilkan energi kinetic paling besar jika dibandingkan dengan dua ketinggian step yang lebih kecil pada $h/H = 0.33$ dan 0.41



Gambar 11 Profil Koefisien Tekanan pada $U_{\infty} = 15$ m/s dengan $\theta = 0^{\circ}$

4. Kesimpulan

1. Zona resirkulasi mengalami pengecilan ukuran secara signifikan seiring pertambahan sudut inclaine step. Distribusi kecepatan di *upstream* tinggi sedangkan di *downstream* rendah, sebaliknya distribusi tekanan di *upstream* rendah sedangkan di *downstream* tinggi setelah menjauhi step. Sesuai dengan prinsip hukum Bernoulli, ketika kecepatan meningkat, tekanan akan menurun (kecepatan aliran berbanding terbalik dengan tekanan).
2. Zona dengan energi kinetik turbulen tinggi mendominasi pada daerah dekat permukaan *wall* di *downstream* terutama pada zona resirkulasi. Efek penambahan tinggi *step* berdampak pada peningkatan energi kinetik turbulen, sedangkan efek penambahan sudut *inclaine* step berdampak pada penurunan nilai energi kinetik turbulen.
3. Nilai koefisien friksi secara umum hampir sama pada *upstream* $h/H = 0.41$; dan 0.50 dari *inlet* sampai tepat pada permukaan step. Pada sisi *downstream* nilai koefisien friksi terlihat meningkat untuk ketiga variasi sudut *inclaine* *step*. Daerah fluktuasi gesekan tinggi terjadi pada daerah belakang *step*, kemudian nilai koefisien friksi untuk ketiga variasi sudut *inclaine* *step* mengalami perubahan relative konstan.

Daftar Pustaka

- [1] Abd Rahim Abu Talib, A. K. (2021). Fluid Flow And Heat Transfer Over Corrugated Backward Facing Step Channel. *Case Studies in Thermal Engineering*
- [2] Alibek Issakhov, Y. Z. (2021). Mixed Convection In A Channel With Buoyancy Force Over Backward And Forward Facing Steps: The Effects Of Inclination And Geometry . *Case Studies in Thermal Engineering* .
- [3] Ayad S. Abedalh, Z. A. (2021). Mixed Convective Of Hybrid Nanofluids Flow In A Backward-Facing Step . *Case Studies in Thermal Engineering*.
- [4] FERDY. (2017). Studi Numerik Karakteristik Aliran Melalui Backward Facing Step Dengan Penambahan Stagger Rectangular Bump Pada Sisi Upstream. *Its*.
- [5] G. Biswas, M. B. (2004). Backward-Facing Step Flows for Various Expansion Ratios at Low and Moderate Reynolds Numbers. *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 126 363.
- [6] Mohamad Klazly, G. B. (2022). Heat Transfer Enhancement For Nanofluid Flows Over A Microscale Backward-Facing Step. *Alexandria Engineering Journal*.
- [7] Mohamad Klazly, U. M. (2022). Comparison of Single-Phase Newtonian And Non-Newtonian Nanofluid And Two-Phase Models For Convective Heat Transfer Of Nanofluid Flow In Backward-Facing Step. *Journal of Molecular Liquids*.
- [8] Saad Inam, M. L. (2022). Hybrid Forced-Buoyancy Convection in A Channel With A Backward Facing Step. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- [9] W.A. Xie, G. X. (2022). Flow Instability And Heat Transfer Enhancement of Unsteady Convection in A Step Channel. *Alexandria Engineering Journal*.
- [10] Yan Zhang, K. Y. (2023). Deposition Characteristics of Particles in Backward-Facing Step Flow And A Radiant Syngas Cooler . *Case Studies in Thermal Engineering*.