

## STUDI NUMERIK MEDAN ALIRAN MELALUI *BACKWARD FACING STEP* DENGAN VARIASI KETINGGIAN DAN SUDUT KEMIRINGAN *STEP*

Damar Fiqri Sembodo<sup>1</sup>, Khoiri Rozi<sup>2</sup>, Ismoyo Haryanto<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 : [damar01.fiqrisembodo@gmail.com](mailto:damar01.fiqrisembodo@gmail.com)

### Abstrak

Studi ini mengkaji lebih jauh performa aerodinamis yang terjadi pada BFS jika diterapkan variasi sudut kemiringan, tinggi langkah, dan variasi bilangan Reynolds 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 bilangan Reynolds  $Re$   $1,5 \times 10^4$  dan  $9 \times 10^4$ . 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 lebih lama. 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 bilangan Reynolds tidak menyebabkan perubahan signifikan pada zona resirkulasi dan jarak *reattachment*. Namun, perubahan variasi ini menghasilkan energi kinetik turbulen yang meningkat dengan setiap peningkatan bilangan Reynolds dan koefisien gesekan menurun dengan setiap peningkatan bilangan Reynolds.

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

### Abstract

*This study further examines the aerodynamic performance that occurs in BFS when different variations of slope angle, step height, and Reynolds number variations are applied. This study uses a computational fluid dynamics numerical solution, where the software used is ANSYS 16. The turbulence model used in this study is k-ε realizable with non-equilibrium wall function treatment. The effect of changing the height and angle of inclination of the steps on the flow characteristics was studied using the Reynolds Re numbers  $1.5 \times 10^4$  and  $9 \times 10^4$ . The simulation results from this study found that the effect of changing the step height affects the intensity of turbulence and the formation of recirculation. The higher step makes the recirculation zone bigger and the reattachment distance longer. The effect of changing the inclination angle of the steps leads to a reduction in the size of the recirculation zone and a shorter reattachment distance downstream or near the step wall. Increasing the Reynolds number does not cause significant changes in the recirculation zone and reattachment distance. However, this variational change results in a turbulent kinetic energy that increases with each increase in the Reynolds number and the coefficient of friction decreases with each increase in the Reynolds number.*

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

### 1. Pendahuluan

Aliran melewati *backward-facing step* (BFS) memiliki karakteristik sangat kompleks karena di dalamnya mengandung beragam struktur aliran seperti aliran separasi, resirkulasi, dan *reattachment*. Pola aliran seperti ini banyak ditemukan dalam berbagai aplikasi praktis, aerofoil pesawat terbang, *diffuser*, filter, konstruksi bangunan, perpipaan, pendingin,

*turbine blade*, dan sebagainya. Dalam mempelajari karakteristik aliran ini geometri BFS sering digunakan karena aliran terseparasi yang terbentuk memiliki titik separasi tunggal yang tidak berubah dan dinamika *wake* yang tidak terpengaruh oleh *downstream*. Bentuk geometri BFS dapat dilihat sebagai representatif model saluran dengan geometri mengalami pembesaran secara tiba-tiba pada daerah *downstream*.

Berbagai parameter yang mempengaruhi medan aliran melewati BFS seperti tinggi step, bentuk step (*sharp, inclined, rounded*), dan jenis aliran (laminar dan turbulen) telah diuji. Nie et al [7] melakukan simulasi untuk mempelajari aliran yang melewati BFS dan efek perubahan ketinggian step. Penelitian dilakukan dengan menggunakan  $Re = 343$ . Dengan ekspansi rasio konstan, hasil studinya ditemukan bahwa area zona resirkulasi meningkat seiring peningkatan ketinggian step. Togun et al [8] dengan studi serupa melakukan simulasi terhadap BFS namun disertai dengan penambahan *obstacle* sebelum step. Hasilnya BFS dengan *obstacle* mengalami peningkatan koefisien perpindahan panas.

Eksperimen dengan memodifikasi bentuk step dilakukan oleh Lal dan Ratha [6]. Hasilnya menunjukkan bahwa pada saat kondisi aliran yang sama, panjang *reattachment* BFS dengan step melengkung lebih pendek dari pada BFS dengan step vertikal. Bravo dan Zheng [2] melakukan penelitian pada BFS dengan sudut step yang melengkung. Bravo dan Zheng membandingkan hasil penelitian mereka dengan Nakagawa dan Nezu dan didapatkan hasil bahwa panjang *reattachment* berkurang sekitar 27% ketika step dimodifikasi melengkung pada ujungnya. Eaton dan Johnson [3] mengobservasi tren panjang *reattachment* meningkat dengan bertambahnya *expansion ratio*. Efek *expansion ratio* terhadap panjang *reattachment* juga diteliti oleh Kuehn [5] dengan mengubah sudut dinding atas pada lokasi step dan mengubah ketinggian step. Hasil yang sama didapatkan seperti Eaton dan Johnson di mana panjang *reattachment* bertambah.

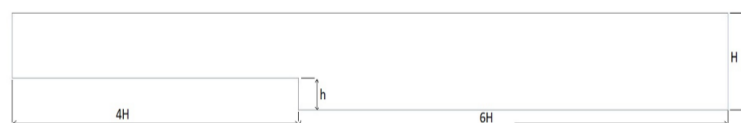
Berbagai metode telah digunakan untuk mengamati karakteristik aliran yang melalui BFS. Armali et al [1], melakukan penelitian menggunakan pengukuran laser-doppler untuk mengamati panjang *reattachment* dalam backward-facing step yang dilalui aliran laminar, transisi dan turbulen. Zajec et al [9], melakukan pengukuran PIV 2 dimensi pada air yang mengalir pada BFS. Hasil eksperimen dapat menangkap bidang kecepatan, resirkulasi, titik *reattachment*, dan fluktuasi kecepatan yang dihasilkan dengan cukup jelas. Pada studi lainnya, Zajec et al [10] membandingkan hasil studi dari backward-facing step dengan menggunakan metode PIV dan metode Direct Numerical Simulation (DNS). Metode laser-doppler, PIV, dan DNS merupakan metode yang akurat dalam mengamati karakteristik aliran melalui BFS. Namun karena keterbatasan alat dan sumber komputasi, pengujian pada studi ini menggunakan metode Reynolds Average Navier Stokes Equations (RANS) melalui *software* ANSYS FLUENT.

## 2. Metode Perancangan

Dalam penelitian ini memiliki beberapa tahapan yang digunakan yaitu:

### 2.1. Geometri Model

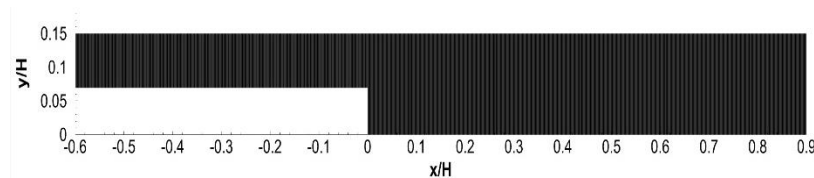
Geometri penelitian *backward facing step* yang digunakan adalah dalam bentuk 2Dimensi dengan 3 Model tinggi step yaitu  $h/H = 0,33; 0,46; \text{ dan } 0,6$ . Pada setiap model akan diterapkan variasi kemiringan yaitu  $= 30^\circ, 45^\circ \text{ dan } 60^\circ$ . Kemudian dalam simulasi aliran fluida diterapkan variasi bilangan Reynold yaitu  $1.5 \times 10^4 \text{ dan } 9 \times 10^4$



**Gambar 1.** Geometri model *backward-facing step*

## 2.2. Mesh generation dan kondisi batas

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 menjauhi dari permukaan wall baik pada *upstream* maupun pada *downstream*. Grid disusun lebih rapat pada area dekat step dan merenggang seiring menjauhi step baik pada arah *upstream* maupun arah *downstream*. Grid yang digunakan dalam studi ini adalah quadrilateral sebagaimana yang digunakan Singh dkk [4]. Bentuk grid ini mempunyai kelebihan mampu menyelesaikan permasalahan yang lebih kompleks serta dapat memvisualisasikan karakteristik aliran yang terjadi di sekitar permukaan BFS dengan akurat, Sehingga dapat memberikan data output yang sesuai dengan hasil eksperimen. Kelebihannya lainnya adalah stabilitas prosesing, tingkat akurasi, dan efisiensi waktu. Nilai kerapatan grid yang berkualitas dapat diperoleh menggunakan tool *edge sizing* dan *face meshing*. *Edge sizing* adalah alat bantu pembagi *mesh* sesuai dengan jumlah number of division yang ditentukan yakni bernilai 500 pada setiap *edge*, adapun *face meshing* berfungsi untuk menyeragamkan bentuk *mesh* dengan bentuk quadrilateral.



Gambar 2. Mesh pada forward-facing step.

## 2.3. Dimensioning Komponen Sistem Refrigerasi

Simulasi dalam studi ini menggunakan model turbulen SST  $k-\omega$  sebagaimana digunakan oleh J. Y. Kim [4]. Model ini dipilih dikarenakan dapat menangkap fenomena separasi dan resirkulasi aliran secara detail dan akurat. Masing-masing  $k$  dan  $\omega$  dalam model turbulen ini dirumuskan sebagai:

Nilai  $k$  (Turbulence kinetic energy)

$$\frac{\partial \rho k}{\partial x} = P_k - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x} \right]$$

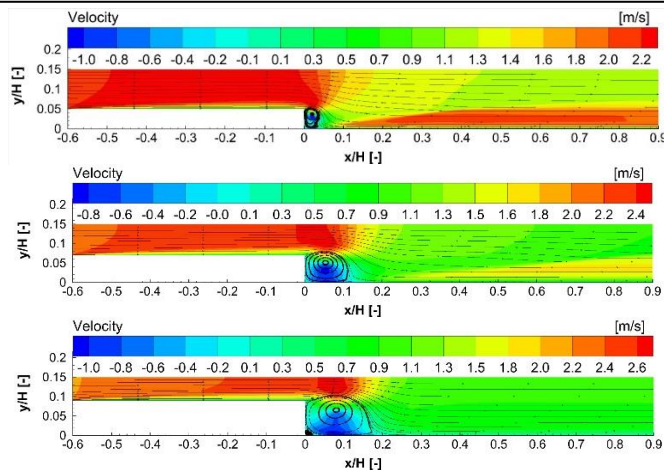
Nilai  $\omega$  (Specific dissipation rate)

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial x} = \gamma P_\omega - \beta \rho \omega^2 + 2\rho(1 - F_1)\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x} \right]$$

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Struktur aliran dan distribusi kecepatan

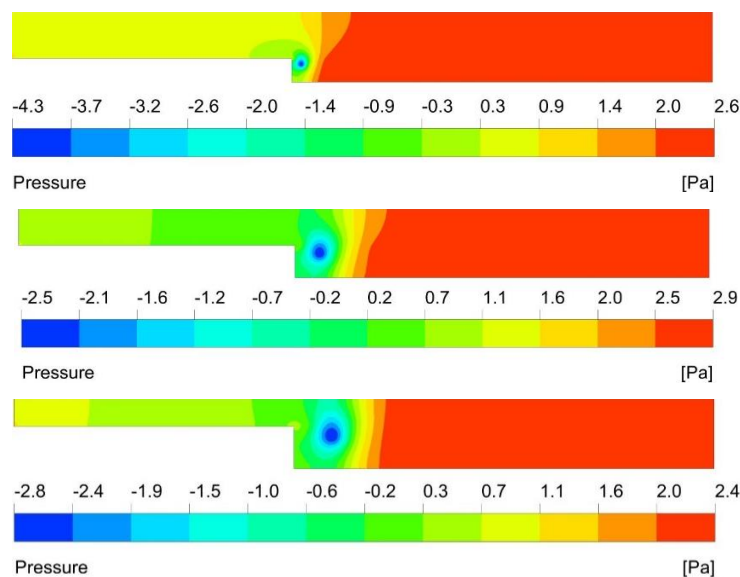
Hasil simulasi pada Gambar 3 menunjukkan struktur aliran dan distribusi kecepatan pada  $Re = 1,5 \times 10^4$  dengan variasi ketinggian step  $h/H = 0.33, 0.47, \text{ dan } 0.60$ . Plot disusun dari ketinggian step yang rendah ke yang lebih tinggi. Degradasi warna yang ditampilkan dalam plot merepresentasikan besar dan kecil kecepatan yang terdistribusi di seluruh bagian BFS. Sedangkan rantai panah yang memanjang dari inlet sampai ke outlet merepresentasikan struktur aliran. Struktur aliran memperlihatkan titik separasi aliran pada ujung step, zona resirkulasi yang berada di depan step, dan daerah reattachment di bagian downstream. Resirkulasi membesar seiring kenaikan step dimana resirkulasi terbesar terjadi ketika ukuran step  $h/H = 0.60$  dan begitu pula dengan panjang reattachement. Pada ujung bagian bawah step terlihat resirkulasi aliran yang lebih kecil, dan putaran berlawanan arah dengan resirkulasi utama atau *primary vortex* yang disebut *secondary vortex*. Zona resirkulasi memiliki kecepatan yang paling rendah di tandai dengan warna gradasi biru.



**Gambar 3.** Struktur aliran dan distribusi kecepatan pada  $Re = 1,5 \times 10^4$  dengan tiga variasi ketinggian *step*  $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$ .

### 3.2. Distribusi Tekanan

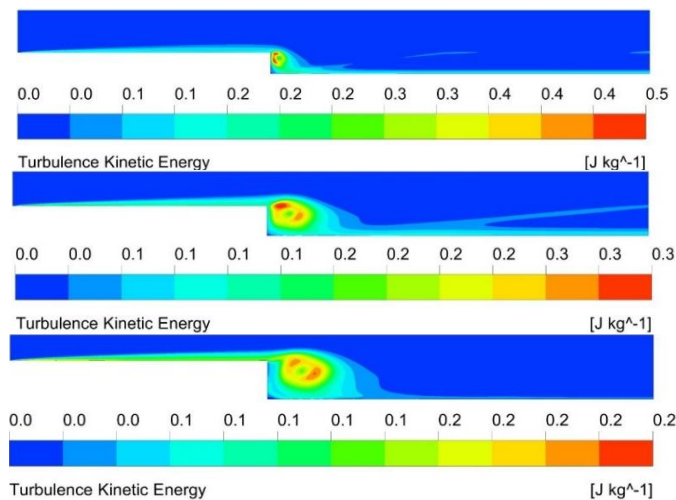
Distribusi tekanan pada simulasi dengan menerapkan  $Re = 1,3 \times 10^4$  dan variasi ketinggian *step*  $h/H = 0.33, 0.47,$  dan  $0.60$  ditunjukkan pada Gambar 4. Besarnya tekanan direpresentasikan dengan degradasi warna yang berada di bawah plot, mulai dari warna biru sampai menjadi warna merah. Bagian *upstream* nampak memiliki area dengan tekanan yang relatif rendah yang ditandai dengan kontur berwarna biru. Sedangkan bagian *downstream* memiliki area dengan tekanan yang mengalami peningkatan searah sumbu  $x$ . Hal ini ditandai dengan gradasi warna dari biru pada *step* hingga menjadi merah pada bagian *outlet*. Daerah yang memiliki tekanan rendah pada *downstream* yang bahkan tekanannya lebih rendah dari bagian *upstream* merupakan daerah resirkulasi aliran. Dengan kata lain, daerah resirkulasi selain memiliki kecepatan yang rendah juga memiliki tekanan yang rendah. Jika dilihat dari perbandingan tekanan pada masing-masing *step*  $h/H = 0.33, 0.47,$  dan  $0.60$ , distribusi tekanan mengalami perubahan setiap kenaikan tinggi *step*. Pada *step*  $h/H=0,33$  tekanan *downstream* paling tinggi pada *downstream* dan terus menurun seiring kenaikan ketinggian *step*. Area yang memiliki fluktuasi tekanan yang mana besar tekanan berubah secara cepat terjadi di daerah sekitar titik reattachment.



**Gambar 4.** Distribusi tekanan pada  $Re = 1,5 \times 10^4$  dengan tiga variasi ketinggian *step*  $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$ .

### 3.3. Distribusi Energi Kinetik

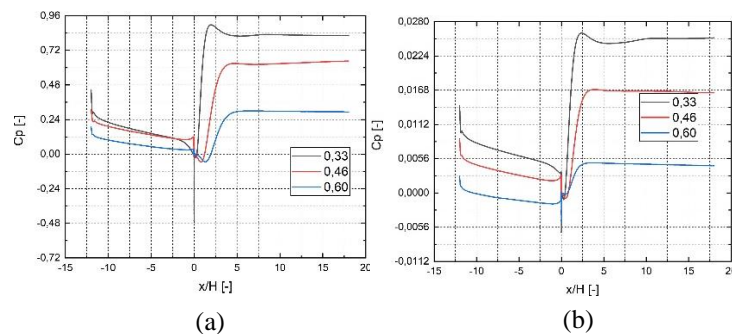
Distribusi energi kinetik turbulen dari hasil simulasi pada  $Re = 1,3 \times 10^4$  dengan variasi ketinggian step  $h/H = 0,33, 0,47$  dan  $0,60$  ditunjukkan pada Gambar 5. Distribusi energi kinetik turbulen direpresentasikan oleh degradasi warna dari biru menuju merah seperti yang ada pada bawah plot. Berdasarkan hasil simulasi, besar energi kinetik turbulen berbanding terbalik dengan penambahan ukuran dari step. Dimana terlihat energi kinetik turbulen tertinggi terdapat pada simulasi aliran dengan menggunakan step  $h/H = 0,33$  dan yang terendah terdapat pada simulasi dengan step terbesar,  $h/H = 0,60$ . Posisi pusat energi kinetik turbulen pada Gambar 5 jika dibandingkan dengan plot struktur aliran dan distribusi kecepatan pada Gambar 3, pusat energi kinetik turbulen berada pada daerah *free shear layer*.



**Gambar 5** Distribusi energi kinetik turbulen pada sudut  $\theta = 0^\circ$  dan  $Re = 1,5 \times 10^4$  dengan variasi ketinggian step  $h/H = 0,33; 0,46; \text{ dan } 0,6$

### 3.4. Koefisien Tekanan ( $C_p$ )

Bentuk pola grafik dari hasil simulasi profil tekanan statis ( $C_p$ ) ditampilkan pada Gambar 6 membandingkan  $C_p$  untuk setiap kenaikan ketinggian step pada  $Re = 1,5 \times 10^4$  dan  $Re = 9 \times 10^4$ . Tekanan pada dinding upstream turun secara konstan menuju step. Setelah melewati step, pada ketinggian step  $h/H = 0,33$  mengalami penurunan drastic tidak seperti pada  $h/H = 0,46$  dan  $0,60$ . Masih di dalam daerah resikulasi, tekanan selanjutnya mengalami kenaikan secara cepat hingga menuju daerah *reattachment*. Kenaikan tekanan tetap terjadi namun secara perlahan dan terus naik hingga ke titik di outlet menuju tekanan konstan. Berdasarkan grafik yang ditampilkan Gambar 4.11, 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.

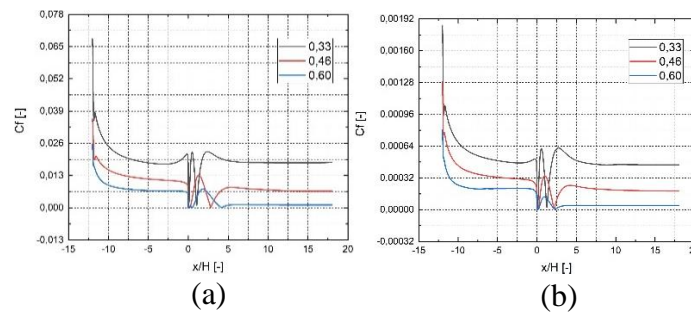


**Gambar 6** Profil koefisien tekanan ( $C_p$ ) dengan sudut  $\theta = 0^\circ$  pada a)  $Re = 1,5 \times 10^4$  dan b)  $Re = 9 \times 10^4$



### 3.5. Koefisien Friksi

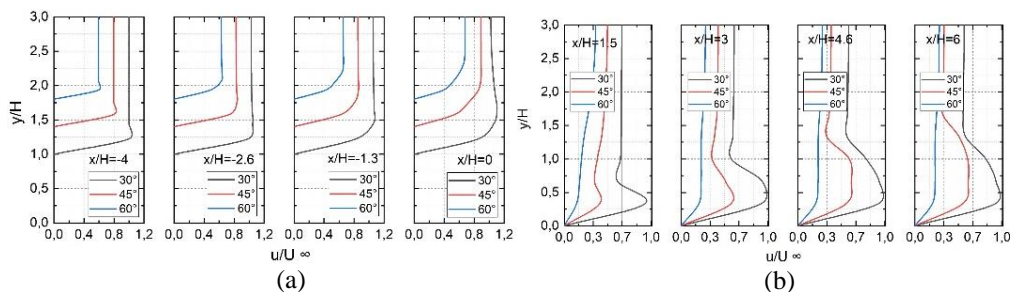
Hasil simulasi profil koefisien friksi pada  $Re = 1,5 \times 10^4$  dan  $Re = 9 \times 10^4$  ditampilkan pada Gambar 7 dengan variasi ketinggian step  $h/H = 0.33, 0.47, \text{ dan } 0.60$ . Dari tiga variasi tinggi step yang diuji tersebut terlihat memiliki nilai koefisien friksi hampir sama pada bagian *upstream*. Untuk  $Re = 1,5 \times 10^4$  pada sisi *upstream* terlihat ketiga tinggi step yang diuji memiliki nilai koefisien friksi hampir sama yang ditandai kurva ketiganya berimpit dari inlet sampai tepat pada permukaan step. Pada sisi *upstream*, secara keseluruhan nilai koefisien friksi terlihat meningkat untuk ketiga ketinggian yang diuji, di mana nilai koefisien friksi terbesar terbentuk simulasi dengan step  $h/H = 0,60$ . Sedangkan diantara kedua Reynold tersebut koefisien friski justru menurun, walaupun sangat kecil, di simulasi pada bilangan Reynold yang lebih tinggi, yaitu  $Re = 9 \times 10^4$ . Koefisien friction bisa menjadi parameter pembantu dalam memperkirakan panjang *reattachment* di daerah *downstream*. Ketika koefisien friksi bernilai nol, shear velocity juga bernilai nol. Kondisi ini menyiratkan adanya kemungkinan *reattachment* aliran pada lokasi tersebut.



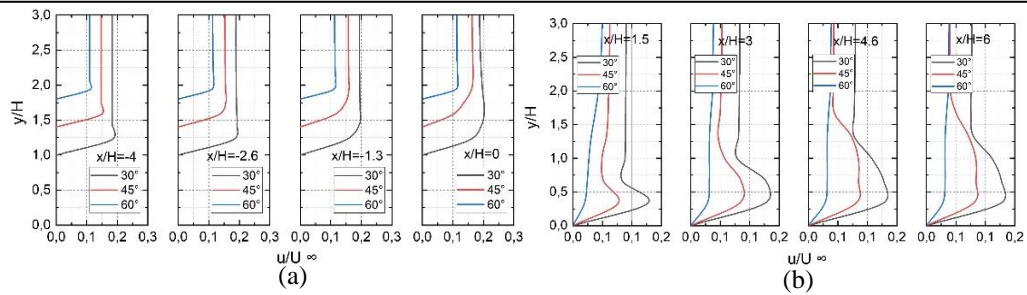
Gambar 7 Profil koefisen friksi ( $C_f$ ) dengan sudut  $\theta = 0^\circ$  pada a)  $Re = 1,5 \times 10^4$  dan b)  $Re = 9 \times 10^4$

### 3.6. Profil Kecepatan

Penggambaran profil kecepatan pada kelengkungan ujung step  $\theta = 0^\circ$  dapat dilihat pada Gambar 8. Pengamatan untuk profil kecepatan dilakukan dengan memotong *upstream* di beberapa titik dan begitu pula pada bagian *downstream* untuk bilangan Reynold,  $Re = 1,5 \times 10^4$ , dan ketiga variasi ketinggian step,  $h/H = 0.33, 0.47 \text{ dan } 0.60$ . Profil kecepatan menunjukkan tren yang sama untuk kedua bilangan Reynold. Aliran pada sisi *upstream* mengalami gradasi kecepatan dari nol hingga mencapai kecepatan *freestream*. Daerah dimana kecepatan mengalami gradasi ini yang dinamakan *boundary layer*. Pada bagian *downstream* ditemukan kecepatan yang bernilai negatif di setiap sempel, yang mana artinya ke empat titik berada dalam daerah resirkulasi. Titik potong  $x/H = 0,5$  pada  $r/H = 0,16 \text{ dan } 0,25$ , kecepatan di dekat dinding meningkat dari nol kemudian turun lagi ke arah negatif. Hal tersebut menggambarkan adanya *secondary vortex*.



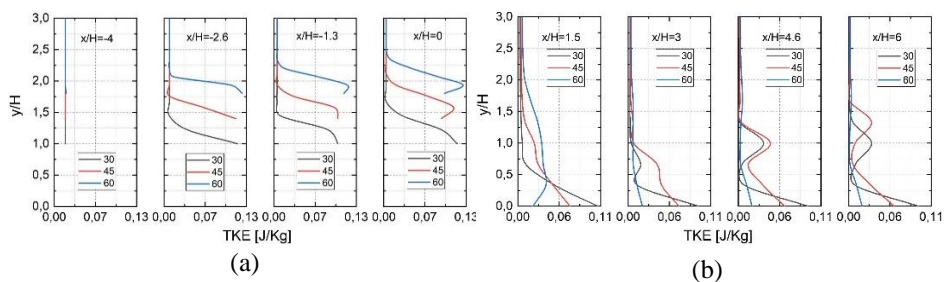
Gambar 8 Profil kecepatan pada  $Re = 1,5 \times 10^4$  dengan sudut  $\theta = 0^\circ$  pada a) *upstream* dan b) *downstream*



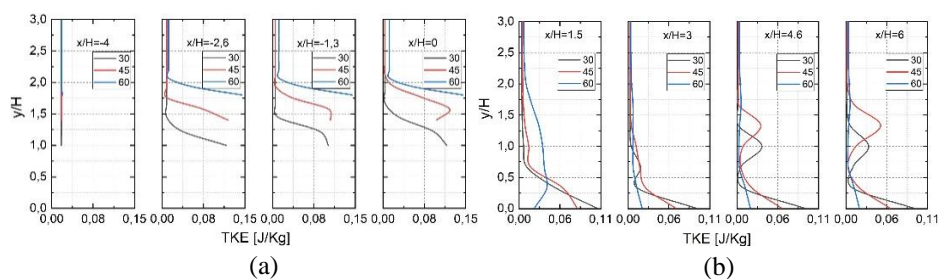
**Gambar 9** Profil kecepatan pada  $Re = 9 \times 10^4$  dengan sudut  $\theta = 0^\circ$  pada a) upstream dan b) downstream

### 3.7. Profil Energi Kinetik Turbulen

Hasil simulasi energi kinetik turbulen pada  $Re = 1,5 \times 10^4$  dan  $9 \times 10^4$  untuk tiga tinggi step  $h/H = 0,33; 0,46; \text{ dan } 0,6$  diplot pada Gambar 4.9 dan 4.10. Pada sisi *upstream* terlihat energi kinetik turbulen terpengaruh secara kuat pada lokasi yang dekat dengan permukaan samapai pada  $y/H < 0,2$ , adapun pada daerah  $y/H > 0,2$  energi kinetik turbulen hampir tidak terlihat dimana kondisi aliran yang terjadi adalah freestream. Untuk ketiga variasi ketinggian yang diuji diperoleh nilai turbulen energi kinetik tertinggi terjadi pada ketinggian step paling kecil yaitu di  $h/H = 0,33$ . Daerah energi kinetik turbulen maksimum meningkat cukup kuat tepat pada  $x/H = 1.5$  yaitu pada  $0,0 < y/h < 1,5$ , kemudian pada daerah downstream dibelakang step pengaruh separasi bubble terhadap energi kinetic turbulen melemah pada wilayah  $0,0 < y/H < 1,6$ . Di sini pada *downstream* juga terlihat pada ketinggian step kecil masih menciptakan energi kinetic paling besar jika dibandingkan dengan dua ketinggian step yang lebih besar pada  $h/H = 0,47$  dan  $0,60$ .



**Gambar 10** Profil energi kinetik turbulen pada  $Re = 1,5 \times 10^4$  dengan sudut  $\theta = 0^\circ$  pada a) upstream dan b) downstream



**Gambar 11** Profil energi kinetik turbulen pada  $Re = 9 \times 10^4$  dengan sudut  $\theta = 0^\circ$  pada a) upstream dan b) downstream

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis dari hasil penelitian terhadap karakteristik aliran fluida dalam *Forward facing step*, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Ukuran zona resirkulasi kecepatan mengalami pengecilan ukuran secara signifikan seiring penambahan sudut kemiringan step. Distribusi daerah kecepatan tinggi di upstream mengalami penurunan seiring dengan kenaikan kemiringan sudut step.
2. Penurunan distribusi tekanan secara substansial terjadi seiring penambahan sudut kemiringan step baik pada daerah upstream dan downstream. Nilai koefisien tekanan mengalami penurunan seiring dengan kenaikan sudut kemiringan step.
3. Area berenergi kinetik turbulen tinggi mendominasi pada daerah dekat permukaan wall baik pada upstream maupun downstream. Efek penambahan kemiringan sudut berdampak pada penurunan nilai energi kinetik turbulen.
4. Nilai koefisien friksi secara umum hampir sama dari inlet sampai tepat pada permukaan step. Daerah fluktuasi gesekan tinggi terjadi pada daerah depan step, kemudian mengalami perubahan relative konstan. Efek sudut step mengakibatkan penurunan nilai koefisien friksi.

#### Daftar Pustaka

- [1] Armaly, B. F., Durst, F., Pereira, J. C. F., & Schönung, B. (1983). *Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow*. *Journal of fluid Mechanics*, 127, 473-496.
- [2] Bravo, H. R., & Zheng, Y. H. (2000). *Turbulent flow over step with rounded edges: experimental and numerical study*. *Journal of hydraulic engineering*, 126(1), 82-85.
- [3] Eaton, J. K. & Johnston, J. P., (1981). *A review of research on subsonic turbulent flow reattachment*. *AIAA journal*, 19(9), 1093-1100.
- [4] Singh, A., Paul, A. and Ranjan, P. (2011) 'Investigation of reattachment length for a turbulent flow over a backward facing step for different step angle', *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3(2), pp. 84–88.
- [5] Kuehn, D. M., (1980). *Effects of adverse pressure gradient on the incompressible reattaching flow over a rearward-facing step*. *AIAA journal*, 18(3), 343-344.
- [6] Lal, K. G., & Ratha, D. G. (2016). *Analysis of Heat Transfer and Flow Over a Backward Facing Step* (Doctoral dissertation).
- [7] 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(22), 4713-4720.
- [8] Togun, H, dkk. (2014). *Numerical study of heat transfer and laminar flow over a backward facing step with and without obstacle*. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, 86, 717-721.
- [9] Zajec, B., Oder, J., & Matkovič, M. (2018). *Two-dimensional PIV Measurements of Water Flow Over a Backward-facing Step*. *Proceedings of the NENE*.
- [10] Zajec, B., Matkovič, M., Kosanič, N., Oder, J., Mikuž, B., Kren, J., & Tiselj, I. (2021). *Turbulent Flow over Confined Backward-Facing Step: PIV vs. DNS*. *Applied Sciences*, 11(22), 10582.