

STUDI NUMERIK PENGARUH KETINGGIAN STEP TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN MELALUI BACKWARD-FACING STEP

*Alvindriyove¹, Khoiri Rozi², Berkah Fajar TK³

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

^{2,3}Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: alvindriyove@gmail.com

Abstrak

Studi ini berhubungan dengan karakteristik aliran yang terbentuk setelah melalui backward-facing step. Karakteristik aliran yang terbentuk terdiri dari separasi aliran, resirkulasi, dan reattachment. Dalam menganalisis karakteristik aliran ini digunakan metode simulasi dengan software ANSYS FLUENT 2016 dan *shear stress transport* (SST) $k-\omega$ sebagai model turbulennya. Efek-efek perubahan ketinggian step terhadap karakteristik aliran diuji menggunakan bilangan Reynold sebesar $Re = 1,3 \times 10^4$. Hasil-hasil simulasi dari penelitian ini ditemukan bahwa zona resirkulasi mengalami pembesaran dan titik reattachment mengalami pemanjangan pada daerah *downstream*. Tekanan dan energi kinetik turbulen berkurang dengan diberikan penambahan ketinggian pada step. Perubahan energi kinetik turbulen secara signifikan hanya terjadi pada daerah *downstream*. Sedangkan pada daerah *upstream*, distribusi energi kinetik turbulen hanya terjadi di dinding dan sedikit di area inlet. Koefisien friksi mengalami fluktuasi cukup kuat pada dinding sisi *downstream*.

Kata kunci: *backward-facing step*; bilangan reynold; energi kinetik turbulen; SST $k-\omega$

Abstract

This study is concerned to the characteristics of the flow that are form after passing through the backward-facing step. The flow characteristics formed consist of flow separation, recirculation, and reattachment. In analyzing the characteristics of this flow, the simulation method is used with ANSYS FLUENT 2016 software and $k-\omega$ shear stress transport (SST) as the turbulence model. The effects of changes in step height on flow characteristics were tested by using Reynold numbers of $Re = 1.3 \times 10^4$. The simulation results from this study found that the recirculation was enlarged and the reattachment point is elongated in the downstream region. Pressure and turbulent kinetic energy decrease with increasing step height. Significant changes in turbulent kinetic energy only occur in the downstream region. Whereas in the upstream area, the distribution turbulent kinetic energy only occurs in the walls and a little in the inlet area. The friction coefficient fluctuates quite strongly on the downstream side.

Keywords: *backward-facing step*; reynold number; SST $k-\omega$; turbulence kinetic energy

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 all [1], melakukan penelitian menggunakan pengukuran laser-doppler untuk mengamati panjang *reattachment* dalam backward-facing step yang dilalui aliran laminar, transisi dan turbulent. Zajec et all [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 all [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 Penelitian

Dalam penelitian ini memiliki beberapa tahapan yang digunakan yaitu:

2.1 Geometri model

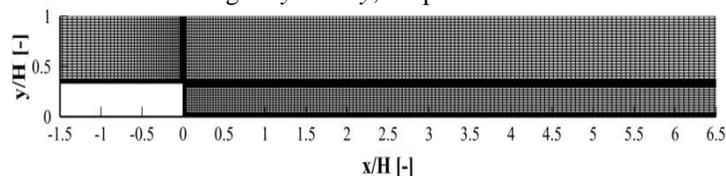
Geometri BFS yang digunakan adalah dalam bentuk dua dimensi dengan variasi ketinggian *step* $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$ dan bilangan Reynold $Re = 1,3 \times 10^4$. Geometri BFS yang digunakan dalam penelitian ini sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Detail dimensi BFS tinggi step awal $h = 50 \text{ mm}$, tinggi outlet $H = 150 \text{ mm}$, panjang *upstream* $= 1,67H$, dan panjang *downstream* $= 6,67H$.



Gambar 1. Geometri model *forward-facing step*

2.2 Mesh generation dan kondisi batas

Pada studi simulasi ini digunakan bentuk *mesh quadrilateral 2D*. Kelebihan jenis *mesh* ini adalah mampu menyelesaikan permasalahan yang lebih kompleks serta dapat memvisualisasikan karakteristik aliran yang terjadi di sekitar permukaan FFS dengan akurat, Sehingga dapat memberikan data output yang sesuai dengan hasil eksperimen. Kelebihannya lainnya adalah stabilitas *processing*, tingkat akurasi, dan efisiensi waktu dimana membutuhkan waktu yang singkat dibandingkan dengan model 3D. Nilai kerapatan *grid* yang berkualitas dapat diperoleh menggunakan *tool edge sizing* dan *face meshing*. Setelah dilakukan uji *grid independency*, jumlah *cells* yang digunakan dalam simulasi ini berjumlah 474439 elemen dengan nilai maksimal maksimal *skewness* 0,49 dan nilai minimal *orthogonal quality* sebesar 0,71. Skema diskretisasi *mesh* dengan kerapatan *mesh* yang tinggi di sekitar dinding sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2. Kondisi-kondisi batas yang digunakan pada simulasi ini adalah pada sisi masuk didefinisikan sebagai *velocity inlet*; *stationary wall* pada sisi *upstream*, *step*, dan *downstream*; sisi atas didefinisikan dengan *symmetry*; adapun sisi *outlet* didefinisikan *outflow*.



Gambar 2. Mesh pada *forward-facing step*

2.3 Model turbulen

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 ω dalam model turbulen ini dirumuskan sebagai:

Nilai k (Turbulence kinetic energy)

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

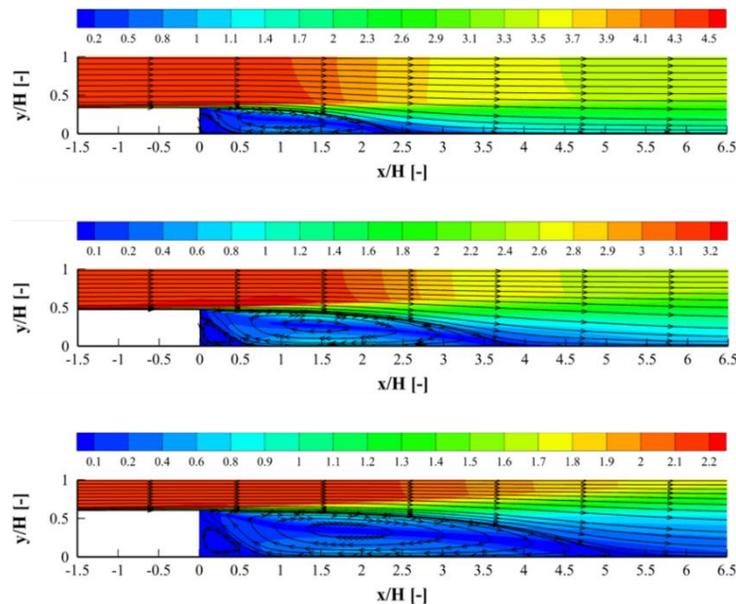
Nilai ω (Specific dissipation rate)

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

3. Hasil dan pembahasan

3.1 Struktur aliran dan distribusi kecepatan

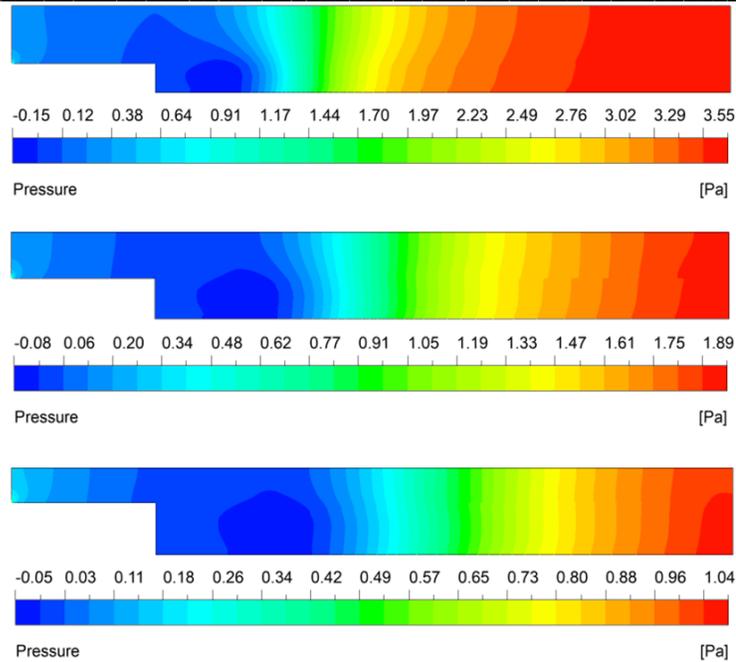
Hasil simulasi pada Gambar 3 menunjukkan struktur aliran dan distribusi kecepatan pada $Re = 1,3 \times 10^4$ dengan variasi ketinggian step $h/H = 0,33, 0,47, \text{ dan } 0,60$. Plot disusun dari ketinggian step yang rendah ke yang lebih tinggi. Degradasi warna yang ditampilkan dalam plot merepresentasikan 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 reattachment. 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

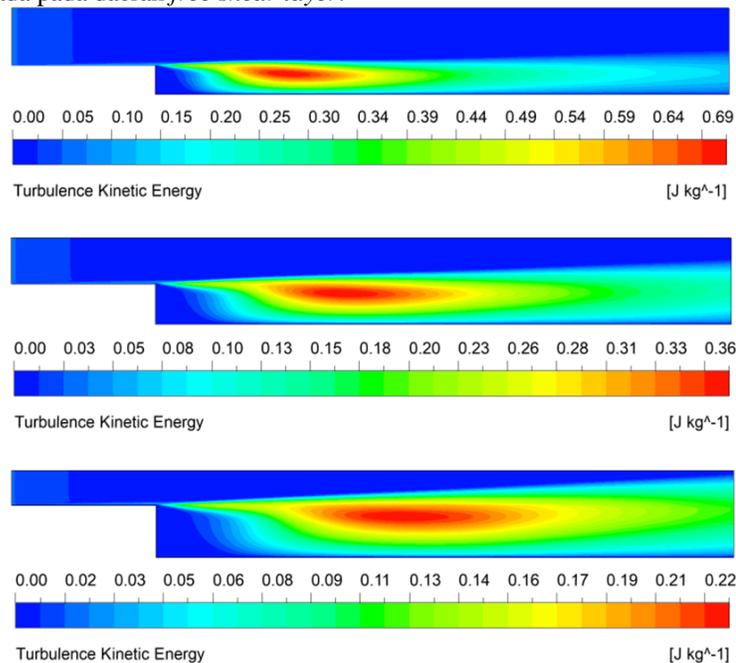
Distribusi tekanan pada simulasi dengan menerapkan $Re = 1,3 \times 10^4$ dan variasi ketinggian step $h/H = 0,33, 0,47, \text{ dan } 0,60$ ditunjukkan pada Gambar 4. Besarnya tekanan direpresentasikan dengan degradasi warna yang berada di bawah plot, mulai dari warna biru sampai menjadi warna merah. 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 $h/H = 0,33, 0,47, \text{ dan } 0,60$, 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 turbulen

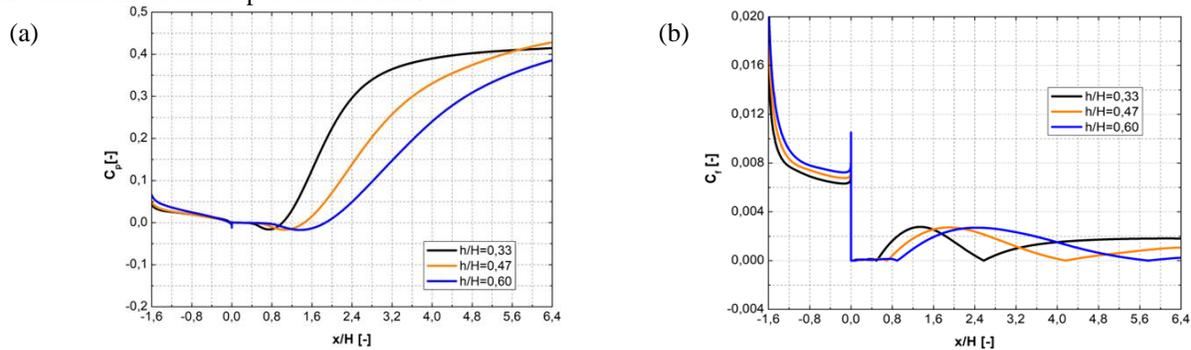
Distribusi energi kinetik turbulen dari hasil simulasi pada $Re = 1,3 \times 10^4$ dengan variasi ketinggian $step\ h/H = 0,33, 0,47$ dan $0,60$ ditunjukkan pada Gambar 5. Distribusi energi kinetik turbulen direpresentasikan oleh degradasi warna dari biru menuju merah seperti yang ada pada bawah plot. 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 $Re = 1,5 \times 10^4$ dengan tiga variasi tinggi $step\ h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$

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 $Re = 1,3 \times 10^4$. Tekanan pada dinding upstream turun secara konstan menuju step. Setelah melewati step, dalam daerah resirkulasi, tekanan masih mengalami penurunan namun dengan grafik lebih melengkung. Masih di dalam daerah resirkulasi, 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 4.9, semakin tinggi step semakin lama waktu dan panjang jarak yang dibutuhkan untuk mencapai tekanan konstan.



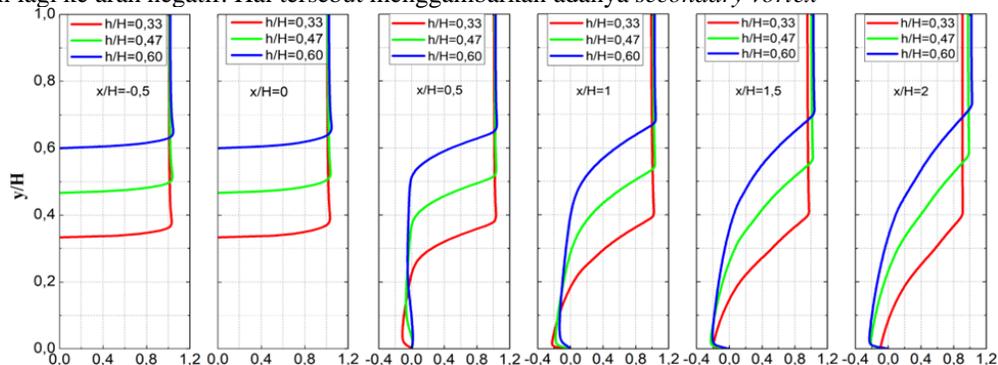
Gambar 6. karakteristik permukaan *forward-facing step* dengan variasi tiga ketinggian *step* $h/H = 0,33$; $0,47$; dan $0,60$ pada $Re = 1,5 \times 10^4$ untuk (a) Koefisien tekanan (C_p); (b) Koefisien friksi (C_f)

3.5 Koefisien friksi (C_f)

Hasil simulasi profil koefisien friksi pada $Re = 1,3 \times 10^4$ ditampilkan pada Gambar 6(b) dengan variasi ketinggian step $h/H = 0,33$, $0,47$, dan $0,60$. 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 $h/H = 0,60$. 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. Seperti yang terlihat pada grafik di Gambar 6(b) terdapat tiga titik yang menunjukkan titik *reattachment* untuk setiap penerapan ketinggian step yang berbeda.

3.6 Profil kecepatan

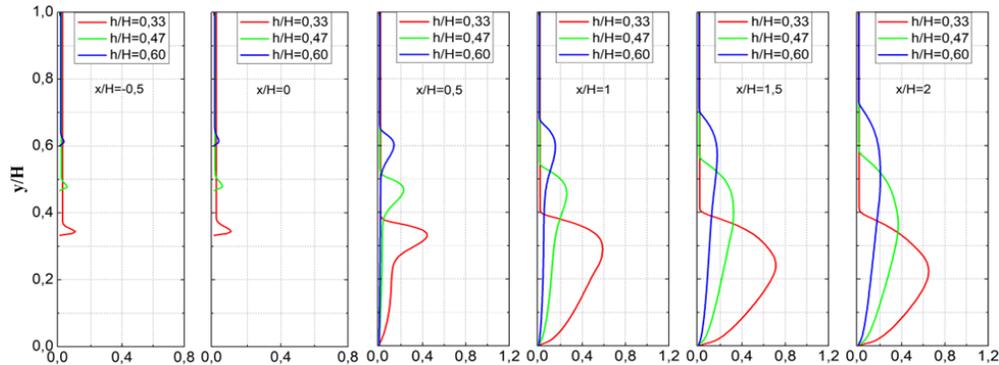
Penggambaran profil kecepatan pada kelengkungan ujung step $r/H = 0$ dapat dilihat pada Gambar 7. Pengamatan untuk profil kecepatan dilakukan dengan memotong *upstream* di beberapa titik dan begitu pula pada bagian *downstream* untuk bilangan Reynold, $Re = 1,3 \times 10^4$, dan ketiga variasi ketinggian step, $h/H = 0,33$, $0,47$ 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 $r/H = 0,16$ dan $0,25$, kecepatan di dekat dinding meningkat dari nol kemudian turun lagi ke arah negatif. Hal tersebut menggambarkan adanya *secondary vortex*



Gambar 7. Profil kecepatan dengan *upstream* menuju *downstream* pada $Re = 1,3 \times 10^4$ dengan tiga variasi ketinggian *step* $h/H = 0,33$; $0,47$; dan $0,60$

3.7 Profil energi kinetik turbulen

Grafik profil energi kinetik dari data simulasi BFS dengan variasi ketinggian step $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$ untuk $Re = 1,3 \times 10^4$ terdapat pada Gambar 8. Pengamatan untuk profil energi kinetik turbulen dilakukan dengan mengambil dua sampel titik potong di upstream dan empat sampel titik potong di downstream. Baik sisi *upstream* maupun *downstream*, hasil simulasi dalam bentuk profil energi kinetik turbulen menunjukkan tren yang sama ketika dilakukan penambahan ketinggian step. Di mana penambahan ketinggian step menyebabkan energi kinetik turbulen berkurang. Profil energi kinetik pada bagian upstream bertumbuh dari titik potong $x/H = -0,5$ ke $x/H = 0$. Profil energi kinetik bagian downstream juga bertumbuh jika dilihat dari empat sampel titik potong. Akan tetapi, pada titik potong $x/H = 2$ memperlihatkan pola profil energi kinetik turbulen yang berbeda.



Gambar 8. Profil energi kinetik turbulen dari *upstream* menuju *downstream* pada $Re = 1,3 \times 10^4$ dengan tiga variasi ketinggian *step* $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil-hasil simulasi yang telah diuji dengan aliran melewati *backward-facing step*, berikut merupakan kesimpulan yang dapat dirangkum: Perubahan tinggi *step* dapat mempengaruhi pembentukan separasi dan resirkulasi yang terjadi pada daerah *downstream*. Semakin besar ketinggian *step* maka area resirkulasi yang terbentuk semakin meluas pada daerah *downstream* begitupun juga dengan titik reattachment mengalami pemanjangan. Peningkatan ketinggian *step* juga mempengaruhi nilai C_p dan C_f .

5. 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] Kim, J. Y., Ghajar, A. J., Tang, C., & Foutch, G. L. (2005). *Comparison of near-wall treatment methods for high Reynolds number backward-facing step flow*. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 19(7), 493-500.
- [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.