

EFEK VARIASI TINGGI *STEP* TERHADAP SEPARASI DAN RESIRKULASI ALIRAN PADA *FORWARD-FACING STEP* DENGAN $Re = 1,5 \times 10^4$

*Utsman Heru¹, Khoiri Rozi², Ismoyo Haryanto³

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: othmanheru@gmail.com

Abstrak

Fenomena aliran terseparasi seringkali muncul dan ditemukan pada banyak aplikasi praktis seperti aliran pada sayap pesawat terbang, aliran melewati sudu-sudu turbin dan kompresor, aliran dalam *diffuser*, aliran pada saluran-saluran *sudden contraction* dan *expansion* serta aliran pada *combustion chamber* dan masih banyak lagi. Struktur aliran terseparasi telah dipelajari selama beberapa dekade belakangan baik secara numerik, teoritis maupun eksperimental guna memahami fisis aliran dari kinerja dan karakteristiknya. Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari pengaruh tinggi *step* terhadap karakteristik aliran di atas *forward facing step*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *computational fluid dynamic* (CFD) menggunakan *software* Ansys Fluent dengan model turbulen $k-\epsilon$ *realizable*. Model *forward-facing step* yang diujikan terdapat tiga variasi tinggi yang diterapkan yaitu $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$ dan bilangan Reynolds sebesar $Re = 1,5 \times 10^4$. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa secara umum untuk semua variasi ketinggian teridentifikasi muncul dua zona resirkulasi baik pada sisi *upstream* maupun pada *downstream*. Efek peningkatan tinggi *step* dapat menyebabkan zona sirkulasi di bagian *upstream* semakin besar, serta dapat menunda separasi dan mengurangi zona resirkulasi di bagian *downstream*. Koefisien tekanan berkurang dengan meningkatnya tinggi *step*, namun koefisien gesekan akan semakin meningkat. Namun, intensitas energi kinetik turbulen yang semakin kecil seiring kenaikan tinggi *step*.

Kata kunci: *circulation zone; forward-facing step; friction coefficient; separation*

Abstract

The phenomenon of separated flow occurs frequently and is found in many practical applications such as flow in aircraft wings, flow through turbine and compressor blades, flow in diffusion, flow in sudden contraction and expansion channels as well as in combustion chambers and many more. The structure of separated flow has been studied over the past decades numerically, theoretically and experimentally to understand the flow physics of its performance and characteristics. This research was conducted to study the effect of step height on the flow characteristics above the forward facing step. The method used in this research is Computational Fluid Dynamic (CFD) where the software used is Ansys Fluent with a realizable $k-\epsilon$ turbulent model. The forward-facing step model used has three variations in height, namely $h/H = 0.33; 0.47; \text{ and } 0.60$ and the Reynolds number is $Re = 1.5 \times 10^4$. The results show that in general, all variations in height appear in two recirculation zones, both upstream and downstream. The effect of increasing height can cause the circulation zone in the upstream to be larger, and it can delay the separation and reduce the recirculation zone in the downstream. The coefficient of pressure decreases with high strokes, but overcoming will increase. However, the intensity of the turbulent kinetic energy decreases as the step increases.

Keywords: *circulation zone; forward-facing step; friction coefficient; separation*

1. Pendahuluan

Forward-facing step (FFS) merupakan sebuah *representative geometry* saluran yang terkonstruksi secara tiba-tiba pada bagian *downstream*. Struktur aliran melalui saluran seperti ini adalah sangat kompleks karena didalamnya mengandung separasi, resirkulasi, dan *reattachment*. Medan aliran ini berkaitan dengan berbagai masalah dalam rekayasa yang ditemukan dalam peralatan seperti *heat exchanger*, ruang bakar, peralatan sistem energi dan proses kimia, juga ruang pendinginan pada sudu-sudu turbin.

Banyak studi berkaitan berbagai parameter seperti tinggi *step*, bentuk ujung *step* (*sharp, inclined, dan rounded*), kekasaran permukaan, dan rejim aliran (*laminar dan turbulen*) telah diuji pada aliran FFS baik secara teoritis, numerik, maupun eksperimental. Awasthi et al [1] mengukur efek variasi tinggi *step* terhadap fluktuasi tekanan dan menemukan

bahwa gerakan kuasi-periodik secara koheren visibilitasnya tumbuh dengan cepat seiring bertambahnya ukuran *step*. Camussi et al [2] dalam kajian serupa menemukan bahwa resirkulasi *bubble* adalah struktur aliran yang paling relevan di daerah *reattachment*. Kajian bagian *upstream* dibuat oleh Efimtsov et al [3] dan menemukan bahwa fluktuasi tekanan melebihi fluktuasi lapisan batas pada smooth wall tanpa gradien tekanan hingga 30 dB dengan daerah fluktuasi meluas hingga 100h di *upstream*.

Fiorentini et al [5] dengan mikrofon piezoresistif mengamati bahwa Reynolds number mempengaruhi ukuran dan intensitas resirkulasi pada *downstream* sedangkan daerah *upstream* tetap stabil. Nagano dan Hattori [7] meneliti efek rasio kontraksi terhadap panjang *reattachment* dan menemukan adanya penambahan panjang *reattachment* seiring dengan naiknya rasio kontraksi, namun, memendek di *downstream*. Graziani et al [6] menguji struktur separasi *bubble upstream* dan menunjukkan adanya ketidakstabilan konvektif dan fenomena di dalam lapisan geser yang berkontribusi pada pengaturan aliran terpisah. Pearson et al [8] mempelajari hubungan antara posisi separasi *upstream* dan bentuk dua dimensi separasi. Daerah separasi diperlihatkan tumbuh secara simultan baik dalam arah normal dinding maupun arah arus.

Stüer et al [11] menggunakan visualisasi dengan *hydrogen bubble* mengkonfirmasi secara topologi perilaku *streamline* dan *vorticity line*. Separasi aliran diselidiki di bawah kondisi laminar menggunakan teknik gelembung hidrogen untuk visualisasikan dan PTV untuk mengevaluasi medan kecepatan 3-D dalam representasi Euler di sekitar *step*. Sherry et al [10] mengukur panjang *reattachment* dari zona sirkulasi dengan menggunakan PIV. Aliran *Bluff body* diamati dengan titik separasi tetap yang terletak di tepi terdepan langkah resirkulasi wilayah dimensi dicirikan diatas angka Reynolds (1400–19000).

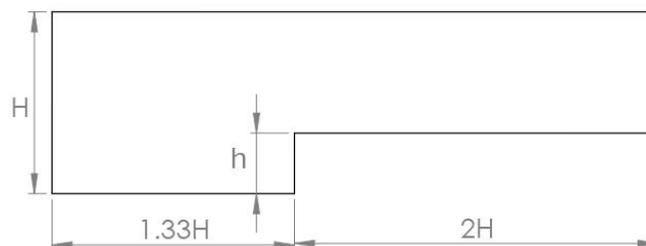
Essel dan Tachie [4] menguji pengaruh bilangan Reynolds dan kekasaran dinding *upstream* struktur turbulensi di daerah resirkulasi dan *reattachment* dari *forward facing step*. Skala resirkulasi *bubble* tidak tergantung pada kekasaran dan bilangan Reynolds; namun, kekasaran secara signifikan meningkatkan koherensi spasial dan skala integral di luar resirkulasi *bubble*. Ren and Wu [9] menguji kekasaran permukaan terhadap lapisan batas turbulen dan melihat bahwa aliran terpisah setelah langkah dilemahkan oleh kekasaran permukaan sementara aliran di depan langkah tidak berubah terhadap kondisi permukaan. Di wilayah resirkulasi hilir ditemukan sangat bergantung pada kekasaran spesifik. Studi simulasi ini dibuat untuk menguji pengaruh perubahan ketinggian *forward-facing step* dengan menggunakan paket *software* ANSYS FLUENT.

2. Metode penelitian

Dalam penelitian ini memiliki beberapa tahapan yang digunakan yaitu.

2.1 Geometri model

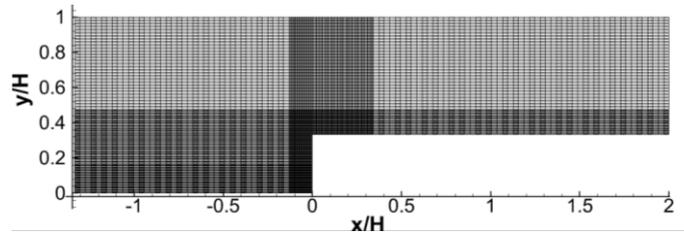
Geometri *forward facing step* yang digunakan adalah dalam bentuk 2 Dimensi dengan variasi ketinggian *step* $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$ dan bilangan Reynold $Re = 1,5 \times 10^4$. Geometri FFS yang digunakan dalam penelitian ini sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1. Spesifikasi dimensi FFS tinggi Inlet $H = 150 \text{ mm}$, tinggi *step* $h = 50, 70, 90 \text{ mm}$, panjang *upstream* $= 1,33H$, panjang *downstream* $= 2H$, rasio kontraksi $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$.



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 mempunyai kelebihan 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 procesing, 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*. *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*. Setelah dilakukan uji *grid independency*, jumlah *cell* yang digunakan dalam simulasi ini berjumlah 850.000 elemen dengan nilai maksimal *skewness* $1,3185 \times 10^{-10}$ dan nilai *orthogonal quality* sebesar 1. 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 *k-ε Realizable* dan *No-Equilibrium wall function* sebagaimana digunakan oleh Zhang [12]. Model ini dipilih dikarenakan dapat menangkap fenomena separasi dan resirkulasi aliran secara detail dan akurat. Masing-masing *k* dan *ε* dalam model turbulen ini dirumuskan sebagai:

- Nilai *k* (Turbulence kinetic energy)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \epsilon \quad (1)$$

- Nilai epsilon-*ε* (Dissipation rate)

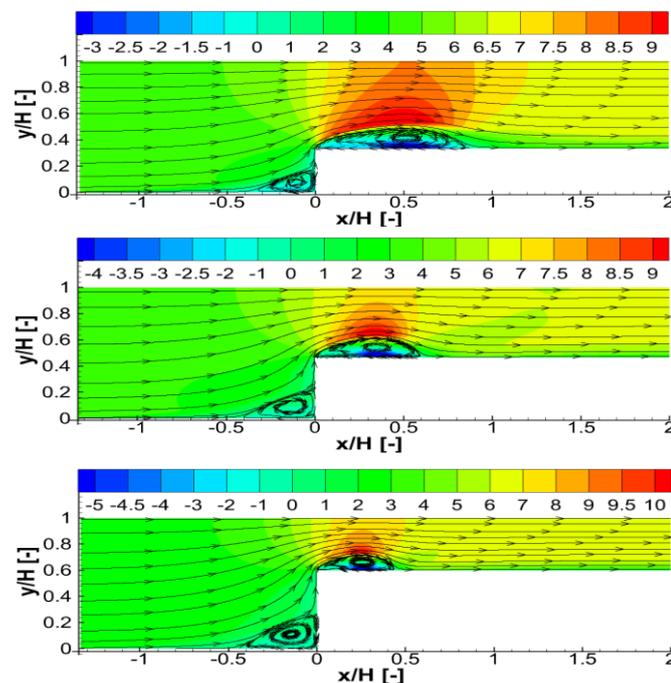
$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad } \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

dengan nilai konstanta $C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\epsilon = 1,30$; $C_{1\epsilon} = 1,44$ dan $C_{2\epsilon} = 1,92$ detail informasi tentang persamaan model turbulen ini bisa ditemukan dalam Versteeg and Malalasekera [13].

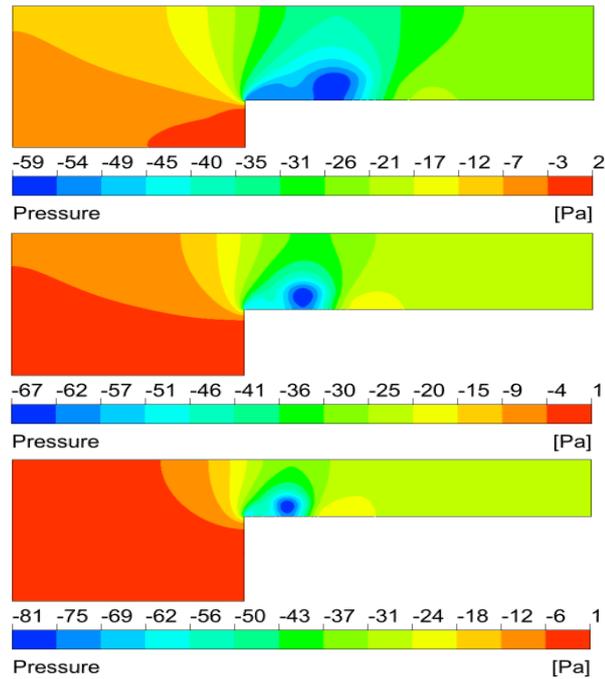
3. Hasil dan pembahasan

3.1 Struktur aliran dan distribusi kecepatan

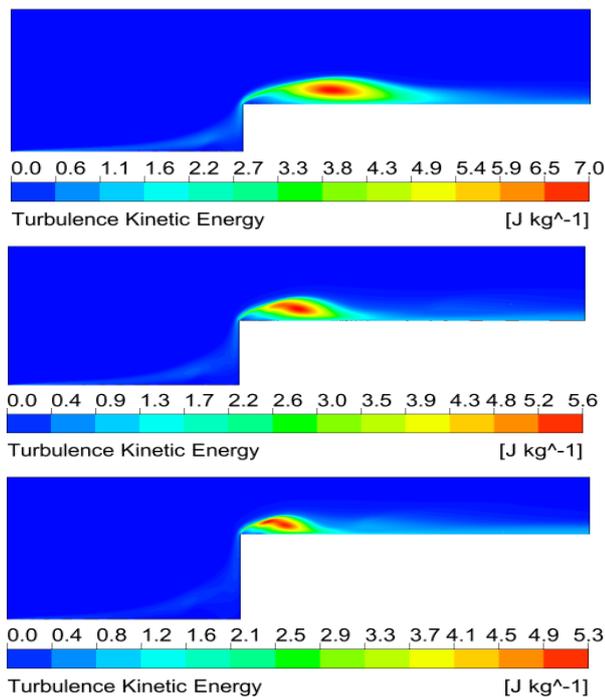
Hasil-hasil simulasi struktur aliran dan distribusi kecepatan diplot menjadi satu pada Gambar 3. Dalam plot ini disusun variasi ketinggian *step* dari atas ke bawah adalah $h/H = 0,33$; $0,47$; dan $0,60$ dengan $Re = 1,5 \times 10^4$. Besar kecepatan direpresentasikan oleh degradasi warna yang ada di atas plot. Kecepatan rendah direpresentasikan warna biru dan kecepatan tinggi direpresentasikan oleh warna merah. Pada daerah *upstream* terjadi perubahan zona resirkulasi setiap perubahan ketinggian *step*. Pada $h/H = 0,33$ ditemukan muncul resirkulasi di ujung bagian bawah *step* kemudian pada tinggi *step* $h/H = 0,47$; dan $0,60$ zona resirkulasi tampak menjadi lebih besar. Pada sisi *downstream*, terlihat resirkulasi yang besar pada $h/H = 0,33$; kemudian ukurannya mengecil seiring bertambahnya tinggi *step* pada $h/H = 0,47$ dan $0,60$. Dari plot juga menunjukkan bahwa panjang *reattachment* semakin memendek seiring dengan pertambahan tinggi *step*. Demikian juga terlihat area distribusi kecepatan tinggi semakin berkurang seiring kenaikan tinggi *step*.



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



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



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

3.2 Distribusi tekanan

Distribusi tekanan hasil simulasi pada bilangan Reynold $Re = 1,5 \times 10^4$ dengan variasi ketinggian *step* $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$ disajikan pada Gambar 4. Sama seperti susunan plot sebelumnya, plot disusun dari atas ke bawah berdasarkan urutan variasi ketinggian dari kecil ke besar. Besarnya tekanan direpresentasikan oleh degradasi warna yang ada di bawah plot, tekanan rendah direpresentasikan warna biru dan tekanan tinggi direpresentasikan oleh warna merah. Secara umum teridentifikasi area aliran tekanan tinggi terbentuk pada bagian *upstream* tepatnya di ujung pojok *step* bawah dan area bertekanan rendah terdistribusi pada bagian *downstream*. Dari plot memperlihatkan bahwa setiap

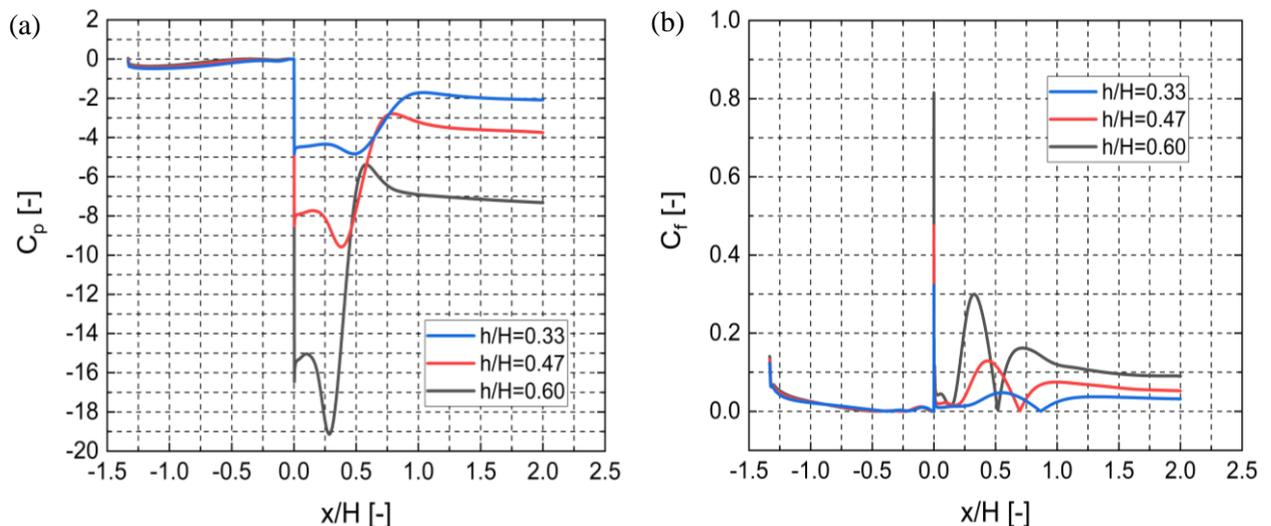
perubahan tinggi *step* menyebabkan perubahan nilai tekanan pada daerah *upstream* dan *downstream*. Pada pada sisi *upstream*, dengan kenaikan tinggi *step* menyebabkan penambahan luasan daerah tekanan tinggi pada ujung bawah *step*. Sedangkan pada bagian *downstream* ditemukan daerah tekanan minimum terendah di $h/H = 0,33$ dan area tekanan ini teridentifikasi akan semakin berkurang seiring kenaikan ketinggian *step* pada $h/H = 0,47$ dan $0,60$. Secara umum peningkatan tinggi *step* mengakibatkan perubahan area distribusi tekanan tinggi dan rendah baik pada *upstream* maupun pada *downstream*.

3.3 Distribusi energi kinetik tubulen

Gambar 5 menunjukkan plot hasil-hasil studi distribusi energi kinetik turbulen pada variasi ketinggian *step* $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$ dengan bilangan Reynold $Re = 1,5 \times 10^4$. Seperti susunan plot sebelumnya, urutan dari atas ke bawah adalah variasi ketinggian dari kecil ke besar. Besar energi kinetik turbulen direpresentasikan oleh degradasi warna yang ada pada bawah plot. Warna biru mempresentasikan nilai energi kinetik turbulen rendah dan warna merah mempresentasikan energi kinetik turbulen tinggi. Secara umum pada plot ditemukan area aliran berenergi kinetik turbulen hanya terjadi sangat dekat permukaan *wall* sepanjang sisi *upstream* maupun *downstream*. Dari plot terlihat area berenergi kinetik turbulen rendah mendominasi aliran yang terdistribusi secara luas pada *upstream*. Hal ini mengindikasikan bahwa efek viskositas hanya terjadi pada daerah *step* dan permukaan *wall* bagian *downstream*. Berdasarkan plot pada setiap tinggi *step* terlihat distribusi energi kinetik pada daerah resirkulasi sisi *upstream* memiliki nilai energi kinetik yang lebih rendah. Di sini ditemukan pengurangan nilai energi kinetik secara bertahap pada pusaran aliran. Pada tinggi $h/H = 0,33$ terlihat nilai energi kinetik turbulen memiliki nilai terbesar tepatnya pada daerah *downstream*. Perubahan terlihat pada $h/H = 0,47$ dimana daerah nilai energi kinetik turbulen tinggi turun secara signifikan. Kemudian area energi kinetik turbulen tinggi kembali mengalami penurunan seiring bertambahnya ketinggian pada $h/H = 0,60$ sebagaimana terlihat pada Gambar 5.

3.4 Koefisien tekanan (C_p)

Profil koefisien tekanan statis hasil-hasil simulasi pada $Re = 1,5 \times 10^4$ dengan variasi tinggi *step* $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$ ditampilkan pada Gambar 6(a). Dari tiga variasi tinggi *step* yang diuji tersebut terlihat memiliki nilai koefisien tekanan yang hampir sama pada bagian *upstream* yang ditunjukkan dengan garis plot ketiganya berimpit dimulai dari sisi *inlet* hingga pada titik sebelum melewati *step*. Pada sisi *downstream*, terlihat tren nilai koefisien tekanan pada awalnya turun pada daerah resirkulasi sampai di $x/H = 0,25$ kemudian ketiga nilai koefisien ini naik secara drastis sesaat akan keluar dari zona resirkulasi dan jauh menuju *downstream* koefisien tekanan relatif konstan jauh di belakang *step* setelah titik *reattachment* tercapai.



Gambar 6. karakteristik permukaan *forward-facing step* dengan variasi tiga ketinggian *step* $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$ 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-hasil simulasi nilai koefisien friksi pada $Re = 1,5 \times 10^4$ dengan variasi ketinggian *step* $h/H = 0,33; 0,47$ dan $0,60$ diplot pada Gambar 6(b). Pada sisi *upstream* terlihat ketiga tinggi *step* yang diuji memiliki nilai koefisien friksi yang hampir sama yang ditandai kurva ketiganya berimpit dari *inlet* sampai tepat pada permukaan *step*. Pada sisi *downstream* nilai koefisien friksi terlihat meningkat untuk ketiga ketinggian yang diuji dengan nilai koefisien friksi

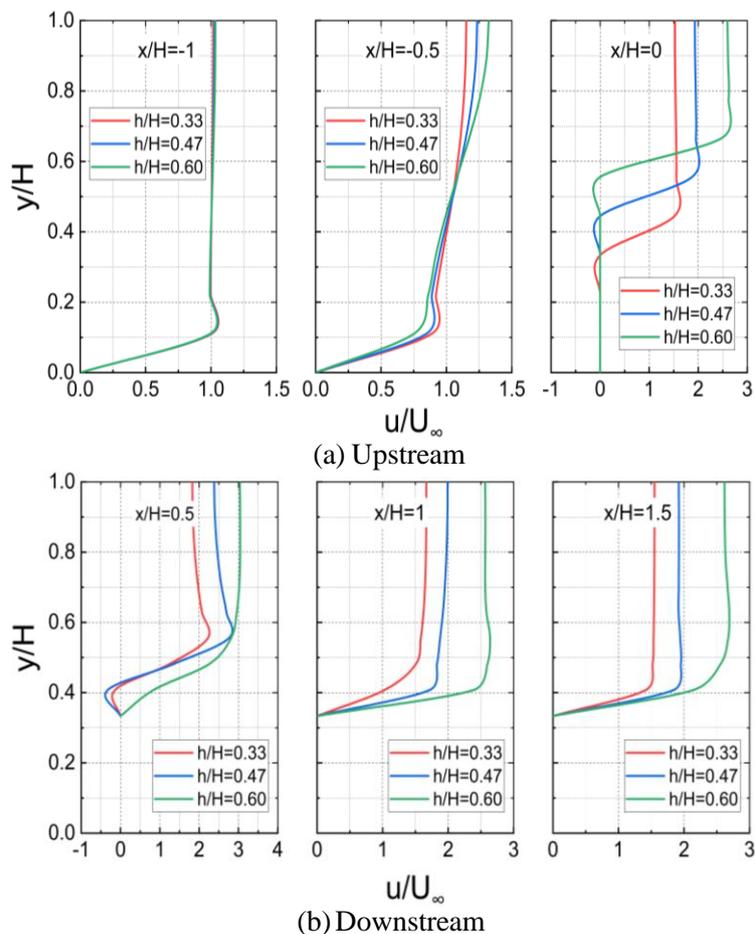
terbesar terbentuk pada pada $h/H = 0,60$. Daerah fluktuasi gesekan tinggi terjadi pada rentang $x/H = 0,0$ sampai sekitar $x/H = 0,1$ seperti ditampilkan pada plot Gambar 6(b).

3.6 Profil kecepatan

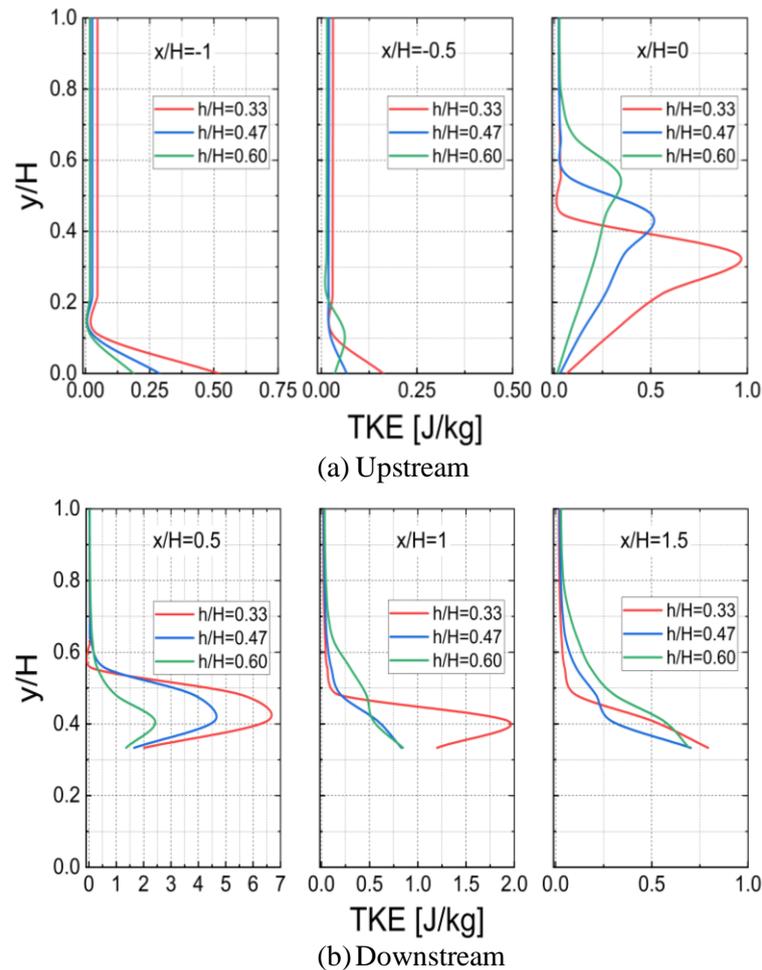
Gambar 7(a) dan (b) adalah profil kecepatan hasil-hasil simulasi pada tiga ketinggian *step* $h/H = 0,33; 0,47$ dan $0,60$ dengan bilangan Reynold $Re = 1,5 \times 10^4$. Dari grafik Gambar 7(a) untuk bagian *upstream* diperlihatkan bahwa pada daerah *upstream* di $y/H > 0,2$ dan $x/h = -1$ nilai kecepatan cenderung *uniform*, efek viskositas terbatas dari permukaan sampai $y/H < 0,2$. Makin mendekati *step* di posisi $x/H = -0,5$ mulai terjadi perubahan kecepatan secara signifikan pada daerah di atas permukaan *step*, hal ini dikarenakan adanya penyempitan *streamline* sehingga tekanan mengalami penurunan secara drastis. Untuk bagian *downstream* pada Gambar 7(b) terlihat aliran mengalami resirkulasi pada posisi $x/H = 0,5$ ditandai dengan kecepatan bernilai negatif. Aliran akan kembali normal pada posisi $x/H = 1$, dan $1,5$ dimana aliran berada jauh dibelakang zona resirkulasi, hal ini terjadi adanya transfer energi antara aliran yang tidak terseparasi menuju aliran terseparasi. Selain itu, di sini memperlihatkan perbedaan perubahan kecepatan cukup signifikan akibat adanya perubahan *streamline* aliran menuju *downstream*.

3.7 Profil energi kinetik turbulen

Profil energi kinetik turbulen pada *forward-facing step* yang diuji dengan $Re = 1,5 \times 10^4$ untuk tiga variasi tinggi *step* $h/H = 0,33; 0,47$; dan $0,60$ diplot pada Gambar 8(a) dan (b). Secara umum dengan adanya kenaikan variasi ketinggian *step* menyebabkan penurunan nilai energi kinetik turbulen secara substansial baik pada daerah *upstream* maupun *downstream*. Pada sisi *upstream* (Gambar 8(a)), dapat dilihat energi kinetik turbulen terpengaruh secara kuat pada lokasi sangat dekat permukaan sampai pada $y/H < 0,2$, kemudian pada daerah $y/H > 0,2$ energi kinetik turbulen hampir tidak terlihat dimana kondisi aliran adalah *freestream*. Ditemukan nilai turbulen energi kinetik tertinggi terjadi pada $h/H = 0,33$. Energi kinetik turbulen meningkat cukup kuat tepat pada $x/H = 0$ yaitu pada $0,0 < y/h < 0,8$, kemudian pada arah *downstream* pengaruh separasi *bubble* terhadap energi kinetik turbulen melemah pada wilayah $0,25 < y/H < 0,6$. Di sini pada $x/H = 0,5$ pada ketinggian *step* $h/H = 0,60$ memiliki nilai energi kinetik paling besar kemudian mengalami penurunan pada $x/H = 1$ dan seterusnya nilai energi kinetik tertinggi dimiliki oleh variasi ketinggian *step* $h/H = 0,33$ dibandingkan *step* yang lainnya.



Gambar 7. Profil kecepatan dengan tiga variasi ketinggian *step* $h/H = 0,33; 0,47$; dan $0,60$ pada $Re = 1,5 \times 10^4$ untuk (a) *Upstream*; (b) *Downstream*.



Gambar 8. Profil energi kinetik turbulen dengan tiga variasi ketinggian *step* $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$ pada $Re = 1,5 \times 10^4$ untuk (a) *Upstream*; (b) *Downstream*.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil-hasil simulasi aliran melewati *forward-facing step*, beberapa kesimpulan dapat dirangkum sebagai berikut: Perubahan tinggi *step* sangat mempengaruhi pembentukan separasi dan resirkulasi baik pada *upstream* maupun *downstream*. Semakin besar ketinggian *step* maka area resirkulasi yang terbentuk makin membesar pada *upstream*, sedangkan pada *downstream* area resirkulasi mengalami pengecilan. Peningkatan ketinggian juga mengakibatkan terjadinya separasi pada bagian *downstream* lebih cepat.

5. Daftar Pustaka

- [1] Awasthi, M., Devenport, W. J., Glegg, S. A. L., 2014, "Pressure fluctuations produced by forward steps immersed in a turbulent boundary layer", *J. Fluid Mech*, Vol. 756, pp.384-421.
- [2] Camussi, R., Felli, M., Pereira, F., Aloisio, G., 2008, "Statistical properties of wall pressure fluctuations over a forward-facing *step*", *Physics of Fluids*, Vol. 20.
- [3] Efimtsov, B. M., Kozlov, N. M., Kravchenko, S. V., 1999, "Wall pressure-fluctuation spectra at small forward-facing steps", *AIAA Paper*, AIAA-99-1964.
- [4] Essel, E. E., Tachie, M. F., 2017, "Upstream roughness and Reynolds number effects on turbulent flow structure over forward-facing steps," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 66, pp. 226-242.
- [5] Fiorentini, E., Felli, M., Pereira, F., Camussi, R., 2007, "Wall pressure fluctuations over a forward-facing *step*", 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference.
- [6] Graziani, A., Uysteyruyst, D., Lippert, M., 2018, "Dynamics of the recirculating areas of a forward-facing *step*", *Experiments in Fluids* Vol.59, No.154, pp.1-18.
- [7] Nagano, Y., Hattori, H., 2010, "Investigation of turbulent boundary layer over forward-facing *step* via direct numerical simulation", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 3, No. 31, pp. 284-294.
- [8] Pearson, D. S., Goulart, P. J., Ganapathisubramani, B., 2013, "Turbulent separation upstream of a forward-facing

- step", *J. Fluid Mechanics*, Vol. 724, pp. 284-304.
- [9] Ren, H., Wu, Y., 2011, "Turbulent boundary layers over smooth and rough forward-facing steps", *Physics of Fluids*, Vol. 23, No. 4.
- [10] Sherry, M., Lo Jacono D., Sheridan, J., 2010, "An experimental investigation of the recirculation zone formed downstream of a forward-facing step", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 98, No. 12, pp. 888-894.
- [11] Stüer, H., Gyr, A., Kinzelbach, W., 1999, "Laminar separation on a forward-facing step," *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol. 18, No. 4, pp. 675-692.
- [12] Zhang, C. X., 1994, "Numerical predictions of turbulent recirculating flows with a k-e model," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 1, No. 51, pp.177-201.
- [13] Versteeg, H. K., Malalasekera, W., 2007, "An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method", Pearson education, London.