

EFEK KETINGGIAN STEP PADA PEMBENTUKAN SEPARASI DAN RESIRKULASI ALIRAN MELALUI *ROUNDED FORWARD-FACING STEP*

*Wimar Sabiq Alfani¹, Khoiri Rozi², Bambang Yuniarto³

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: wimarwsa@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui performa aerodinamika medan aliran melalui *forward-facing step*. Efek-efek perubahan ketinggian step dan bilangan Reynolds terhadap karakteristik aliran disimulasikan. Metode dalam studi ini menggunakan software ANSYS FLUENT dengan model turbulen $k-\epsilon$ realizable. Hasil penelitian didapatkan bahwa Area aliran balik kecepatan rendah maupun kecepatan tinggi mengalami penurunan kecepatan seiring pertambahan nilai ketinggian step. Penurunan tekanan secara substansial terjadi seiring penambahan ketinggian step untuk kedua bilangan Reynolds yang diuji. Area aliran berenergi kinetik turbulen tinggi terbentuk pada daerah sangat dekat permukaan wall baik pada sisi upstream maupun downstream. Nilai koefisien friksi hampir sama dari inlet sampai tepat pada permukaan step. Pada sisi downstream nilai koefisien friksi terlihat meningkat untuk ketiga variasi ketinggian step.

Kata kunci: bilangan Reynolds; *forward-facing step*; $k-\epsilon$ realizable; koefisien friksi

Abstract

This study aims to determine the aerodynamic performance of the flow field through forward-facing step. The effects of changes in step height and Reynolds numbers on flow characteristics are simulated. The method in this study uses ANSYS FLUENT software with a turbulent $k-\epsilon$ realizable model. The results of the study found that the Area of backflow of low velocity or high velocity experienced velocity drop along with increase in the value of step height. Pressure drop sequence substantially occurred as increase of the step heights for the two Reynolds numbers tested. Areas of high turbulent kinetic energy flow are formed on is a very close area wall surface either on is an upstream side or downstream. The value of the friction coefficient is almost the same from the inlet to exactly the surface of the step. On the downstream side the value of the friction coefficient is noticeably increasing for all three variations in the height of the step.

Keywords: *forward-facing step*; friction coefficient; $k-\epsilon$ realizable; Reynolds number

1. Pendahuluan

Struktur aliran terseparasi telah dipelajari selama beberapa dekade belakangan baik secara numerik, teoritis maupun eksperimental guna memahami fisis aliran dari kinerja dan karakteristiknya. Fenomena aliran terseparasi pada saluran *forward-facing step* seringkali ditemukan pada berbagai desain sistem rekayasa seperti pada sayap pesawat terbang, sudu-sudu turbin dan kompresor, diffuser, saluran-saluran sudden contraction dan expansion, combustion chamber, dll. Secara fisis struktur aliran terseparasi adalah sangat kompleks yang ditandai oleh terbentuknya ketidakstabilan dan munculnya multiple-vortex. Ketidakstabilan pada free shear layer adalah sumber utama dari struktur koheren yang terlihat jelas [8]. Dalam upaya untuk menyederhanakan karakteristik aliran para peneliti telah banyak melakukan studi secara numerik maupun eksperimental. Berbagai parameter seperti tinggi step, bentuk step (sharp, inclined, rounded), dan rezim aliran (laminar dan turbulen) telah diuji. Eppink dan Casper [4] melakukan kajian tentang pengaruh variasi kemiringan dengan sudut 30° dan 45° . Kemiringan pada step berhasil mengubah aliran rata-rata, mengurangi separasi dan pembalikan aliran silang di daerah downstream.

Camussi et al [2] melakukan eksperimen fluktuasi tekanan pada FFS 2D melalui velocimetry PIV menunjukkan bahwa struktur aliran yang paling relevan adalah gelembung resirkulasi yang tidak stabil terbentuk di daerah reattachment downstream.

Awasthi et al [1] melakukan eksperimen pada Virginia tech wall jet wind tunnel dengan dikalkulasi menggunakan persamaan Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) equations. Dengan memvariasikan radius rounded sebesar $r/H = 0\%$, 6.25% , 12.5% , 25% , 50% , dan 100% menghasilkan kesimpulan bahwa semakin kecil radius rounded maka akan

menghasilkan nilai panjang reattachment yang semakin besar. Hao, dkk [10] melakukan penelitian pengembangan dari Awasthi dkk dengan metode Numerik yang dilakukan dengan hanya menambahkan profil rounded. Hasil studi tersebut menyatakan, bahwa penambahan rounded berpengaruh terhadap karakteristik aliran fluida.

Essel dan Tachie [5] melakukan penelitian menggunakan Metode Numerik mengenai efek perubahan bilangan Reynold dan beda kekasaran permukaan di sisi upstream terhadap karakteristik aliran. Model divariasikan dengan Re sebesar 4940, 8400, 8650 untuk permukaan yang halus dan Re sebesar 5100, 8200, 8600 untuk permukaan yang kasar. Hasil penelitian didapatkan bahwa dengan komparasi bilangan Reynold dan kekasaran permukaan dapat mengurangi panjang reattachment hingga 40%.

Fiorentini et al [7] menggunakan mikrofon piezoresistive dan mengamati bahwa bilangan Reynolds mempengaruhi ukuran dan intensitas resirkulasi pada downstream sedangkan daerah upstream tetap relatif stabil. Sedangkan Iftekhar dan Agelin-Chaab [9] menguji efek gradien tekanan dan bilangan Reynolds pada aliran turbulen. Hasilnya ditemukan bahwa rata-rata panjang reattachment meningkat dengan seiring bertambahnya bilangan Reynolds.

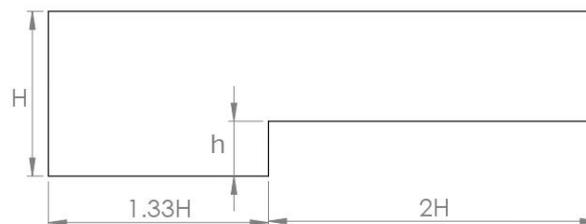
Costantini et al [3] melakukan studi secara eksperimental dengan teknik Temperature-Sensitif Paint (TSP). Hasil studinya menunjukkan bahwa gradien tekanan negatif yang menyebabkan peningkatan bilangan Reynolds transisi. Sedangkan pengurangan bilangan Reynolds transisi disebabkan efek ketidaksempurnaan permukaan. Fang et al [6] menguji separasi aliran turbulen pada $Re = 180$ dan menemukan bahwa intensitas turbulensi meningkat saat step didekati dan mencapai nilai maksimum di sepanjang separasi boundary layer di atas step.

Untuk memahami lebih detail karakteristik forward facing step flow perlu dilakukan penelitian secara terus menerus baik secara teoritis, numerik maupun eksperimental. Cukup banyak penelitian tentang fenomena aliran melewati forward facing step, namun sampai saat ini masih ada beberapa aspek parameter yang perlu dikaji lebih lanjut guna memperoleh gambaran lebih detail mengenai kinerja dan karakteristik aliran. Sehingga, dalam studi ini fenomena aliran melalui forward facing step dipelajari secara numerik dengan menggunakan software ANSYS FLUENT. Efek-efek perubahan geometri ketinggian step dan bilangan Reynold terhadap karakteristik aliran yang disimulasikan.

2. Bahan dan Metode Penelitian

2.1. Geometri model

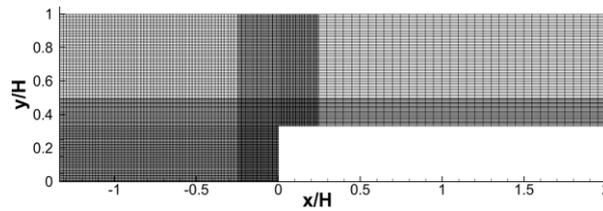
Geometri model uji yaitu forward-facing step yang digunakan pada studi ini adalah dalam bentuk 2 Dimensi dengan variasi ketinggian yaitu $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$. Kemudian dalam simulasi aliran fluida diterapkan variasi bilangan Reynold yaitu $1,3 \times 10^4$. Dari bilangan Reynold tersebut, sebagaimana persamaan akan didapatkan nilai kecepatan inlet fluida sebagai input dari *pre-processing* nantinya. Geometri model forward-facing step yang digunakan dalam penelitian ini dengan spesifikasi dimensi yaitu : tinggi step (h) 50 mm; tinggi inlet (H) 150 mm; panjang upstream $1,33H$; panjang downstream $2H$ sebagaimana diperlihatkan pada gambar 1.



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

2.2. Mesh generation dan kondisi batas

Strategi untuk membuat mesh pada studi ini menggunakan teknik 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. Kemudian untuk susunan grid di sekitar step, grid disusun lebih rapat pada area dekat step yaitu rentang $-0,25 < x/H < 0$ daerah upstream dan rentang $0 < x/H < 0,25$ daerah downstream, kemudian disusun merenggang seiring menjauhi step baik pada arah upstream maupun pada arah downstream. Untuk mendapatkan nilai kerapatan grid yang berkualitas digunakan 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. Bentuk grid untuk meshing yang digunakan dalam studi simulasi ini adalah *quadrilateral*. Grid ini mampu menyelesaikan permasalahan yang lebih kompleks memiliki akurasi yang lebih baik. Selain itu bentuk grid ini memiliki kemudahan dalam menjalankannya karena tersedianya *automated generator mesh* serta cocok untuk semua domain fluida. Pada studi ini nilai *aspect ratio* bernilai 1 dan nilai *skewness* maksimal sebesar 0.3. Dengan hal ini maka kriteria kualitas mesh terpenuhi dalam melakukan simulasi sebagaimana kriteria yang disarankan dalam ANSYS User guide. Hasil meshing dalam penelitian ini seperti pada Gambar 2 untuk mesh pada rounded *forward-facing step*.



Gambar 2. Mesh pada *forward-facing step*.

2.3. Model turbulen

Simulasi dalam studi ini menggunakan model turbulen $k-\epsilon$ Realizable dan Nonequilibrium wall function. Model ini dipilih dikarenakan dapat menangkap fenomena separasi dan resirkulasi aliran secara detail dan akurat pada aliran ketika melewati perubahan penampang secara tiba-tiba. Masing-masing k dan ϵ dalam model turbulen ini dirumuskan sebagai berikut:

➤ 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) :

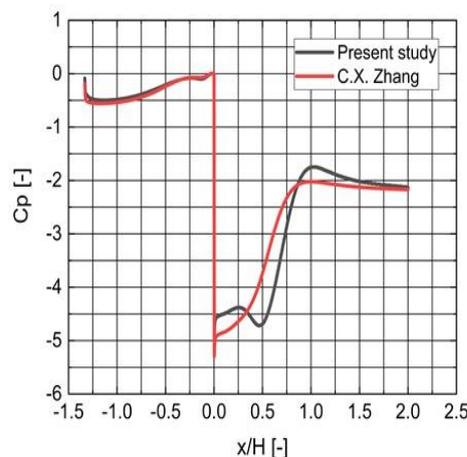
$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad } \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

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 [11]. Properties fluida kerja dalam simulasi ini adalah udara dengan *density* (ρ) $1,225 \text{ kg/m}^3$ dan *viskositas absolute* (μ) $1,7894 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$.

2.4. Kondisi batas dan validasi

Kondisi-kondisi batas yang digunakan pada simulasi ini adalah pada sisi inlet, wall, sisi outlet, inlet didefinisikan *velocity inlet*. Dinding saluran didefinisikan sebagai wall dan simetris. Sedangkan outlet didefinisikan sebagai outflow. Definsi wall digunakan pada sisi upstream, step, dan downstream. Sedangkan dinding bagian atas geometri didefinisikan *symmetry*.

Hasil simulasi pada penelitian ini dibandingkan dengan hasil penelitian numerik yang dilakukan oleh C.X. Zhang [12]. Validasi dilakukan dengan membandingkan nilai koefisien Tekanan (C_p) yang dihasilkan pada FFS. Desain kemudian dianalisis secara numerik dengan model turbulensi standard $k-\epsilon$ Hasil perbandingan seperti pada Gambar 3.



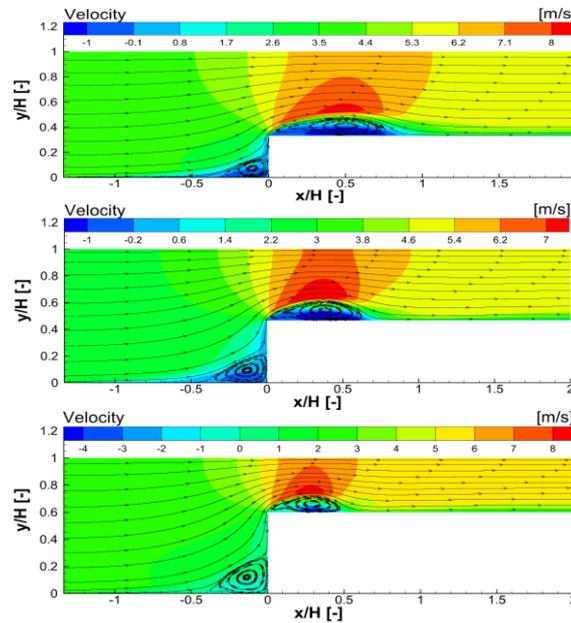
Gambar 3. Validasi hasil penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

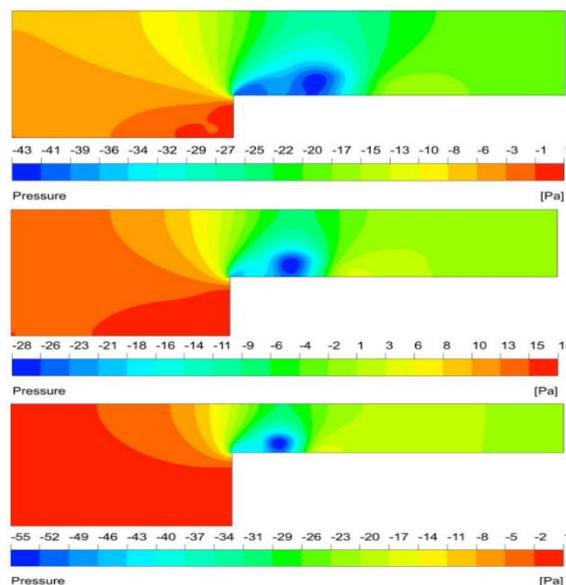
3.1. Struktur Aliran dan Distribusi Kecepatan

Hasil-hasil simulasi struktur aliran dengan besar kecepatan diplot jadi satu pada variasi ketinggian step $h/H = 0,33$; $0,47$; dan $0,60$ dengan $Re = 1,3 \times 10^4$ diplot dalam gambar 3. Dalam plot ini disusun dari variasi ketinggian step yang kecil ke yang besar adalah dari atas ke bawah. Besar kecepatan direpresentasikan oleh degradasi warna yang ada di atas plot. Secara umum ditemukan struktur aliran yang terbentuk berbeda pada ketiga variasi ketinggian. Terlihat adanya

perubahan ukuran zona resirkulasi seiring perubahan variasi ketinggian step. Untuk daerah upstream pada ketinggian step $h/H = 0,33$ ditemukan muncul resirkulasi di ujung bagian bawah step kemudian pada tinggi step $h/H = 0,47$; zona resirkulasi tampak menjadi lebih besar dan pada tinggi step $h/H = 0,60$ zona resirkulasi bertambah menjadi lebih besar. Sedangkan pada sisi downstream, terlihat zona resirkulasi berukuran besar pada $h/H = 0,33$; kemudian ukuran zona resirkulasi mengecil dan panjang reattachment menjadi lebih pendek seiring bertambahnya ketinggian step pada $h/H = 0,47$ dan $0,60$. Dari plot ditemukan dua area aliran berkecepatan rendah dan tinggi yang masing-masing untuk area berkecepatan rendah terkonsentrasi pada zona resirkulasi di pojok bawah step, sedangkan area berkecepatan tinggi terdistribusi pada bagian downstream. Area aliran baik berkecepatan rendah maupun berkecepatan tinggi mengalami penurunan kecepatan signifikan seiring pertambahan ketinggian step.



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



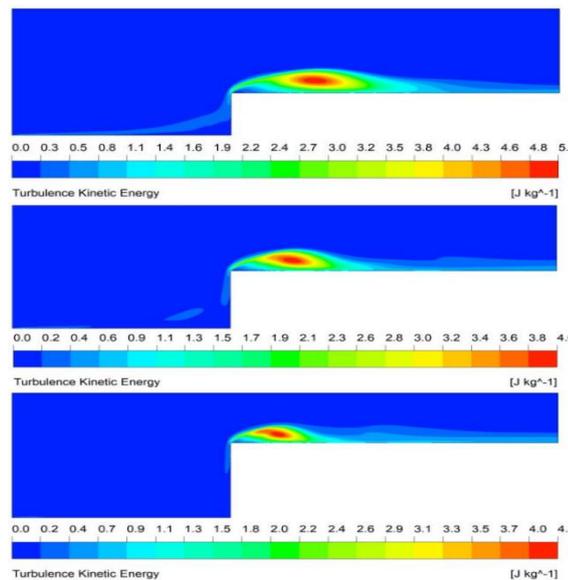
Gambar 4. Distribusi tekanan dari upstream menuju downstream dengan tiga variasi ketinggian step $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$ pada $Re = 1,3 \times 10^4$.

3.2. Distribusi Tekanan

Distribusi tekanan hasil simulasi dengan variasi ketinggian step $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$ pada $Re = 1,3 \times 10^4$ disajikan pada gambar 4. Sama seperti susunan plot sebelumnya, urutan dari atas ke bawah adalah rounded step dari kecil ke besar. Besar tekanan direpresentasikan oleh degradasi warna yang ada di bawah plot. Secara umum Pola distribusi tekanan pada setiap variasi ketinggian mengalami perubahan signifikan seiring dengan kenaikan tinggi step baik pada daerah upstream maupun daerah downstream. Area aliran tekanan tinggi terbentuk pada ujung pojok step bagian upstream dan area aliran bertekanan rendah terdistribusi pada bagian downstream. Juga ditemukan peningkatan tekanan secara substansial terjadi seiring penambahan ketinggian step. Dari pola distribusi tekanan menggambarkan pola yang hampir sama, Pada sisi upstream daerah tekanan minimum pada $h/H = 0,33$ kemudian dengan kenaikan tinggi step $h/H = 0,47$ menyebabkan penambahan luasan daerah tekanan tinggi pada ujung bawah step. Pada ketinggian $h/H = 0,60$ daerah tekanan semakin membesar. Sementara itu, pada bagian downstream ditemukan daerah tekanan terbesar di ketinggian $h/H = 0,33$ dan area tekanan ini semakin mengecil seiring bertambahnya kenaikan ketinggian step pada $h/H = 0,47$ kemudian daerah tekanan semakin kecil dari sebelumnya yang terjadi pada variasi step tertinggi yaitu ketinggian $h/H = 0,60$.

3.3. Distribusi Energi Kinetik Tubulen

Gambar 5 menunjukkan plot hasil-hasil studi distribusi energi kinetik turbulen pada variasi radius ketinggian step $h/H = 0,33; 0,47; \text{ dan } 0,60$ dengan bilangan Reynold $Re = 1,3 \times 10^4$. Disusun sama seperti susunan plot-plot sebelumnya yaitu variasi radius rounded dari kecil ke besar adalah dari atas ke bawah. Besar energi kinetik turbulen direpresentasikan oleh degradasi warna yang ada di bawah plot. Berdasarkan plot secara umum ditemukan pola distribusi energi kinetik turbulen yang terbentuk pada upstream dan downstream pada ketiga variasi ketinggian step yang diuji. Area aliran berenergi kinetik turbulen tinggi terbentuk pada daerah sekitar permukaan wall baik bagian upstream maupun downstream. Dari plot terlihat area berenergi kinetik turbulen rendah mendominasi aliran yang terdistribusi secara luas pada upstream. Hal ini mengindikasikan bahwa turbulensi aliran hanya terjadi pada daerah step dan permukaan wall bagian downstream akibat dari viskositas fluida. Pada sisi upstream dari ketiga ketinggian step terlihat distribusi energi kinetik pada daerah resirkulasi memiliki nilai energi kinetik yang lebih rendah. Pada ketinggian step $h/H = 0,33$ terlihat zona resirkulasi energi kinetik turbulen memiliki sedikit turbulensi di dekat daerah step. Seiring dengan kenaikan ketinggian step turbulensi aliran semakin mengecil dan menghilang. Sedangkan area aliran sisi downstream terlihat daerah resirkulasi akibat dari viskositas fluida. Pada ketinggian step $h/H = 0,33$ terlihat zona resirkulasi energi kinetik turbulen memiliki daerah turbulensi yang besar. Perubahan terlihat pada $h/H = 0,47$ dimana daerah turbulensi energi kinetik turbulen mengalami pengecilan akan tetapi reattachment memanjang dari sebelumnya. Kemudian area energi kinetik turbulen kembali mengalami pengecilan dan reattachment semakin memanjang seiring bertambahnya tinggi step seperti pada ketinggian step $h/H = 0,60$.

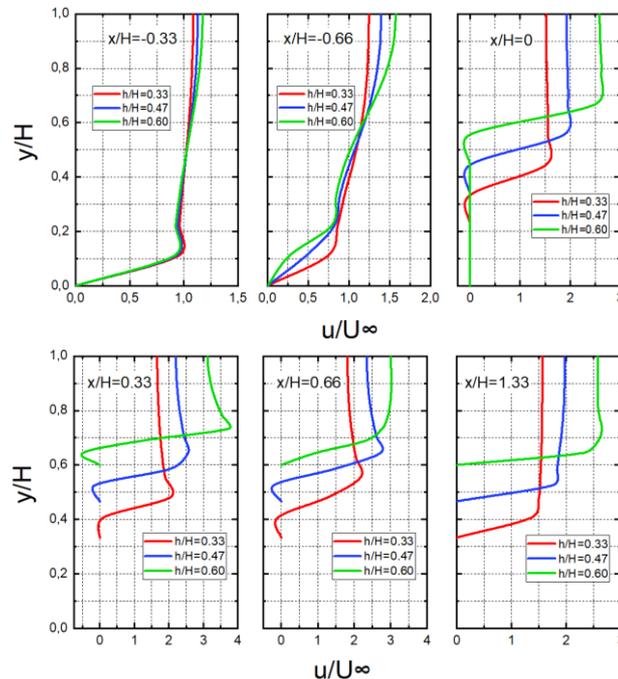


Gambar 5. Distribusi energi kinetik turbulen dari upstream menuju downstream dengan tiga variasi rounded step $r/H = 0,08; 0,17; \text{ dan } 0,25$ pada $Re = 1,3 \times 10^4$.

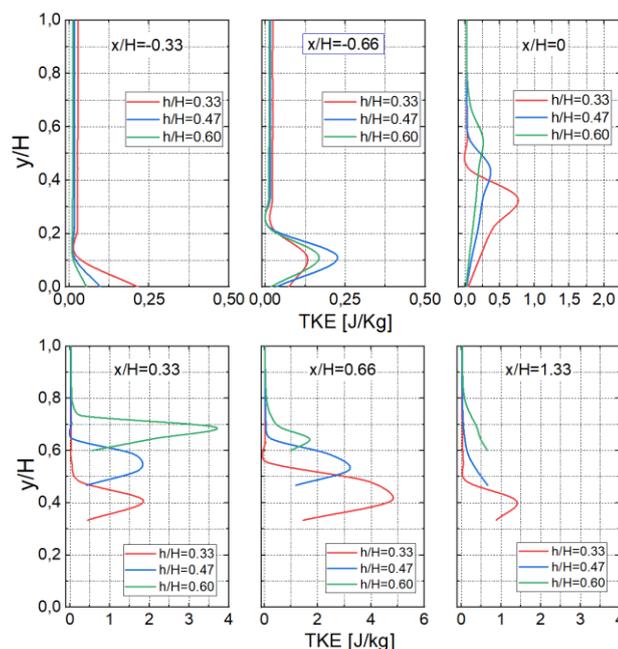
3.4. Profil Kecepatan

Hasil-hasil simulasi profil kecepatan pada tiga variasi ketinggian step $h/H = 0,33; 0,47 \text{ dan } 0,60$ dengan bilangan Reynolds $= 1,3 \times 10^4$ disajikan pada gambar 6. Susunan plot dari atas ke bawah adalah bagian upstream dan

downstream yang ditandai dengan simbol garis warna untuk membedakan variasi ketinggian step. Tren profil kecepatan untuk ketiga variasi ketinggian step hampir tidak berubah dari permukaan wall menuju zona freestream. Untuk bagian upstream, pada daerah di $y/H > 0,2$ dan $x/h = -0,33$ nilai kecepatan cenderung uniform, efek viskositas terbatas dari permukaan sampai $y/H < 0,2$. Makin mendekati step di posisi $x/H = -0,16$ mulai terjadi perubahan kecepatan secara signifikan pada daerah di atas permukaan step, Untuk bagian downstream terlihat aliran mengalami resirkulasi pada posisi $x/H = 0,33$ ditandai dengan kecepatan bernilai negatif. Aliran akan kembali normal pada posisi $x/H = 0,66$, dan 1.33 dimana aliran berada jauh dibelakang zona resirkulasi, Efek variasi ketinggian step hampir tidak berdampak pada aliran sisi upstream yang ditandai dengan berimpitnya nilai kecepatan ketiganya dari ujung upstream sampai dinding step.



Gambar 6. Profil rasio kecepatan (normalized velocity) dari upstream menuju downstream dengan tiga variasi ketinggian step pada $Re = 1,3 \times 10^4$



Gambar 7. Profil energi kinetik turbulen dari upstream menuju downstream dengan tiga variasi ketinggian step pada $Re = 1,3 \times 10^4$

3.5. Profil Energi Kinetik Turbulen

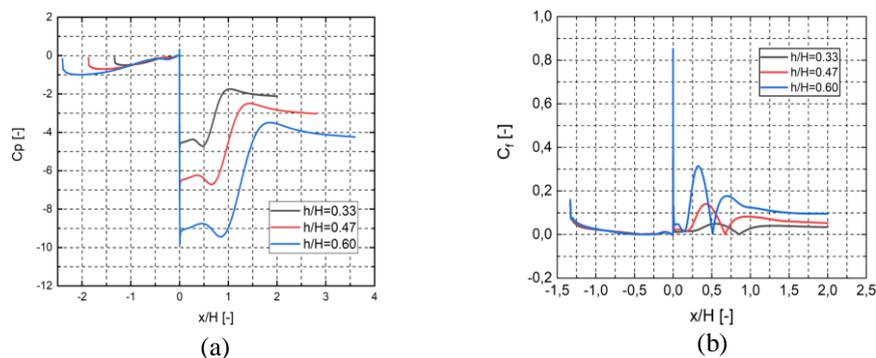
Plot profil energi kinetik turbulen pada bagian upstream dan downstream dalam saluran forward-facing step yang diuji pada variasi ketinggian step $h/H = 0,33$; $0,47$; dan $0,60$ dengan bilangan Reynolds $= 1,3 \times 10^4$ diplot pada gambar 7. Dengan susunan plot yang sama dari plot sebelumnya yaitu dari atas ke bawah adalah bagian upstream dan downstream dengan simbol garis warna untuk membedakan variasi rounded step. Untuk Re yang diuji pada sisi upstream maupun downstream terlihat bahwa tren profil kecepatan untuk ketiga variasi rounded step hampir tidak berubah dari permukaan wall menuju zona freestream. Untuk sisi upstream dapat dilihat energi kinetik turbulen terpengaruh secara kuat pada lokasi sangat dekat pada permukaan sampai pada $y/H < 0,2$, kemudian pada daerah $y/H > 0,2$ energi kinetik turbulen hampir tidak terlihat dimana kondisi aliran disini adalah freestream. Untuk ketiga variasi ketinggian yang diuji diperoleh nilai turbulen energi kinetik tertinggi terjadi pada ketinggian step paling kecil yaitu di $h/H = 0,33$. Pada daerah ini efek ketiga variasi ketinggian step hampir tidak terlihat karena besar energi kinetik turbulen memiliki nilai yang hampir sama. Daerah energi kinetik turbulen tinggi meningkat cukup kuat tepat pada $x/H = 0$ yaitu pada $0,0 < y/h < 0,5$, kemudian pada arah downstream pengaruh separasi bubble terhadap energi kinetik turbulen melemah pada wilayah $0,3 < y/H < 0,6$. Di sini pada $x/H = 0,33$ pada ketinggian step $h/H = 0,33$ memiliki nilai energi kinetik paling besar kemudian mengalami penurunan pada $x/H = 0,66$, nilai energi kinetik tertinggi dimiliki oleh variasi ketinggian step $h/H = 0,60$ dibandingkan step yang lainnya.

3.6. Profil Koefisien Tekanan (C_p)

Hasil-hasil simulasi profil koefisien tekanan statis pada tiga variasi ketinggian step $h/H = 0,33$; $0,47$ dan $0,60$ dengan $Re = 1,3 \times 10^4$ diplot pada gambar 8a. Koefisien tekanan ketiga variasi ketinggian 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 C_p pada awalnya turun pada daerah resirkulasi pada rentang $x/H = 0,0$ sampai sekitar $x/H = 1,0$ kemudian ketiga nilai C_p 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.

3.7. Profil Koefisien Friksi (C_f)

Hasil-hasil simulasi profil koefisien friksi pada tiga variasi ketinggian step $h/H = 0,33$; $0,47$ dan $0,60$ dengan $Re = 1,3 \times 10^4$ diplot pada gambar 8b. hasil koefisien friksi 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 $h/H = 0,33$. Daerah fluktuasi gesekan tinggi terjadi pada rentang $x/H = 0,0$ sampai sekitar $x/H = 1,0$ kemudian koefisien mengalami perubahan secara konstan. Dengan adanya perubahan bilangan Reynold dapat dilihat dari plot grafik koefisien friksi lebih besar bilangan Reynold $Re = 1,3 \times 10^4$.



Gambar 8. karakteristik permukaan *forward-facing step* dengan variasi tiga ketinggian step $h/H=0,33$; $0,47$; dan $0,60$ pada $Re = 1,3 \times 10^4$ untuk (a) koefisien tekanan (C_p); (b) koefisien gesek (C_f).

4. Kesimpulan

Dalam penelitian ini dapat disimpulkan bahwa; Area aliran balik kecepatan rendah maupun kecepatan tinggi mengalami penurunan kecepatan secara signifikan seiring pertambahan nilai radius rounded step. Nilai kecepatan aliran dengan radius rounded step kecil lebih tinggi dibandingkan nilai kecepatan aliran dengan radius rounded step lebih besar. Penurunan tekanan secara substansial terjadi seiring penambahan ketinggian step untuk bilangan Reynolds yang diuji. Pada daerah dekat step di $x/H = 0,0$ sampai $x/H = 1,0$ terjadi penurunan nilai koefisien tekanan cukup kuat untuk ketiga variasi rounded step, kemudian tekanan kembali konstan hingga titik reattachment tercapai. Area aliran berenergi kinetik turbulen tinggi terbentuk pada daerah sangat dekat permukaan wall baik pada sisi upstream maupun

downstream. Area berenergi kinetik turbulen rendah sangat mendominasi aliran yang terdistribusi secara luas pada bagian upstream. Pada sisi downstream seiring penambahan tinggi step maka distribusi energi kinetik turbulen semakin mengecil. Nilai koefisien friksi hampir sama dari inlet sampai tepat pada permukaan step. Pada sisi downstream nilai koefisien friksi terlihat meningkat untuk ketiga variasi radius rounded step. Daerah fluktuasi gesekan tinggi terjadi pada rentang $x/H = 0,0$ sampai sekitar $x/H = 1,0$ kemudian koefisien mengalami perubahan secara konstan.

5. Daftar Pustaka

- [1] Awasthi, M., Devenport, W. J., Glegg, S. A. L., Forest, J. B., Pressure fluctuations reduced by forward facing step immersed in a turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech*, v. 756, pp.384-421, 2014.
- [2] Camussi, R., Felli, M., Pereira, F., Alonso, G., Di Marco, A., Statistical properties of wall pressure fluctuations over a forward-facing step, *PHYSICS OF FLUIDS*, v. 20, 2008.
- [3] Costantinia, M., Risiusa, S., Kleina, C., Experimental investigation of the effect of forward-facing steps on boundary layer transition, *Procedia IUTAM* v. 14, pp152-162, 2015.
- [4] Eppink, J.L., & Casper, C. Effects of Forward-Facing Step Shape on Stationary Crossflow Instability Growth and Breakdown. Research Aerospace Engineer, Flow Physics and Control Branch, M.S. 170, AIAA Member. Undergraduate Student, Department of Mechanical Engineering. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [5] Essel, E. E., Tachie, M. F., Upstream roughness and Reynolds number effects on turbulent flow structure over forward-facing step. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2017, 66: 226-242.
- [6] Fang, X., Tachie, M. F., Bregstrom, D. J., Direct numerical simulation of turbulent flow separation induced by a forward-facing step, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 87, 2021.
- [7] Fiorentini, E., Felli, M., Pereira, F., Camussi, R., Di Marco, A., Wall pressure fluctuations over a forward-facing step, 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conferences, 2007.
- [8] Hussain, A. F., 1986. Coherent structures and turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 173, pp. 303-356.
- [9] Iftekhhar, H., Agelin-Chaab, M., Structure of turbulent flows over forward-Ko138, 2016.
- [10] J. Hao and M. Wang, 2014. Effect of step rounding on noise from forward-facing steps, 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, p. 2462.
- [11] Versteeg, H. K., Malalasekera, W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method, London, Pearson education, 2007.
- [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