

Analisis Perbandingan Velocity Dan Shear Stress Perkembangan Boundary Layer Flat Plate Menggunakan Turbulent Model $k - \epsilon$ (Standard, Realizable, RNG)

Setyo Hariyadi S.P.^{1,2}

¹Laboratorium Mekanika dan Mesin Fluida
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

²Akademi Teknik dan Keselamatan Penerbangan Surabaya

Kontak Person:

Setyo Hariyadi S.P.

¹Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

²Jemur Anyani I/73 Wonocolo Surabaya 60236 Indonesia Telp. 031-8410871
e-mail: hudzaifahsetyo@gmail.com

Abstrak

Pengertian lapisan batas adalah daerah dimana aliran mengalami hambatan karena adanya tegangan geser yang besar pada permukaan benda, sehingga partikel-partikel fluida terpaksa berhenti pada sekitar permukaan benda karena geseran viskos. Aliran fluida sejati mana pun selalu menunjukkan adanya suatu daerah yang alirannya terhambat, yaitu dekat batas yang kecepatannya relatif terhadap batas bervariasi antara nol pada batas hingga suatu harga yang dapat diduga dari solusi aliran potensial di titik yang agak jauh dari situ. Daerah yang alirannya terhambat ini disebut lapisan batas (boundary layer) dan ketebalan lapisan batas itu sendiri dinyatakan dengan δ . Proses pembentukan lapisan batas mungkin paling baik bila divisualisasikan dengan membayangkan aliran di sepanjang sebuah pelat rata. Misalkan ada aliran seragam sebuah fluida tak dapat mampat mendekati pelat dengan kecepatan freestream. Ketika fluida mencapai tepi sebelah depan, tegangan geser yang besar terbentuk dekat dengan permukaan pelat karena partikel-partikel fluida yang tiba di situ terpaksa berhenti dan partikel-partikel yang cukup dekat dan normal terhadap pelat dihambat oleh geseran viscous. Lapisan batas menebal dalam arah yang sama dengan arah aliran, akibatnya perubahan kecepatan dari nol di permukaan pelat hingga jarak tertentu pada jarak δ semakin jauh menjadi semakin besar. Laju perubahan kecepatan tadi menentukan gradient kecepatan di permukaan pelat dan karena itu tegangan gesernya juga.

Studi numerik telah dilaksanakan untuk menguji kinerja aerodinamis pada pelat datar dengan menggunakan beberapa turbulent model $k - \epsilon$ (Standard, Realizable, RNG). Kecepatan freestream yang digunakan yaitu kecepatan 10 m/s dan pada kondisi udara standard. Parameter yang dievaluasi meliputi shear stress dan profil kecepatan.

Dari penelitian tersebut didapatkan bahwa dengan penggunaan turbulent model $k - \epsilon$ Realizable menghasilkan yang terbaik dibandingkan turbulent model yang lain.

Kata kunci: lapisan batas, pelat datar, efek viscous, turbulent model, $k - \epsilon$ (Standard, Realizable, RNG)

1. Pendahuluan

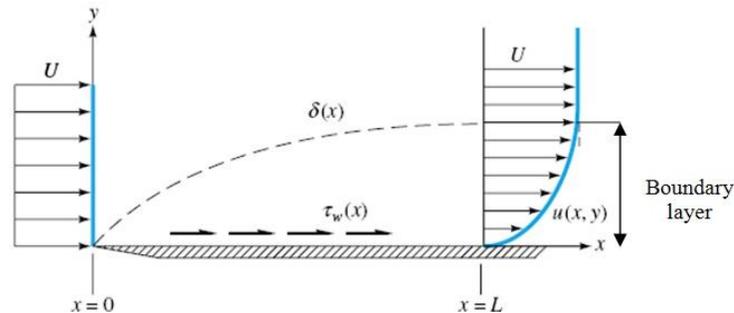
Pengertian lapisan batas adalah daerah dimana aliran mengalami hambatan karena adanya tegangan geser yang besar pada permukaan benda, sehingga partikel-partikel fluida terpaksa berhenti pada sekitar permukaan benda karena geseran viskos.

Aliran fluida sejati mana pun selalu menunjukkan adanya suatu daerah yang alirannya terhambat, yaitu dekat batas yang kecepatannya relatif terhadap batas bervariasi antara nol pada batas hingga suatu harga yang dapat diduga dari solusi aliran potensial di titik yang agak jauh dari situ. Daerah yang alirannya terhambat ini disebut lapisan batas (boundary layer) dan ketebalan lapisan batas itu sendiri dinyatakan dengan δ .

Proses pembentukan lapisan batas mungkin paling baik bila divisualisasikan dengan membayangkan aliran di sepanjang sebuah pelat rata. Misalkan ada aliran seragam sebuah fluida tak dapat mampat mendekati pelat dengan kecepatan freestream. Ketika fluida mencapai tepi sebelah depan, tegangan geser yang besar terbentuk dekat dengan permukaan pelat karena partikel-partikel fluida yang tiba di situ terpaksa berhenti dan partikel-partikel yang cukup dekat dan normal terhadap pelat dihambat oleh geseran viscous.

Lapisan batas menebal dalam arah yang sama dengan arah aliran, akibatnya perubahan kecepatan dari nol di permukaan pelat hingga u pada jarak δ semakin jauh menjadi semakin besar. Laju perubahan kecepatan tadi menentukan *gradient* kecepatan di permukaan plat dan karena itu tegangan gesernya juga.

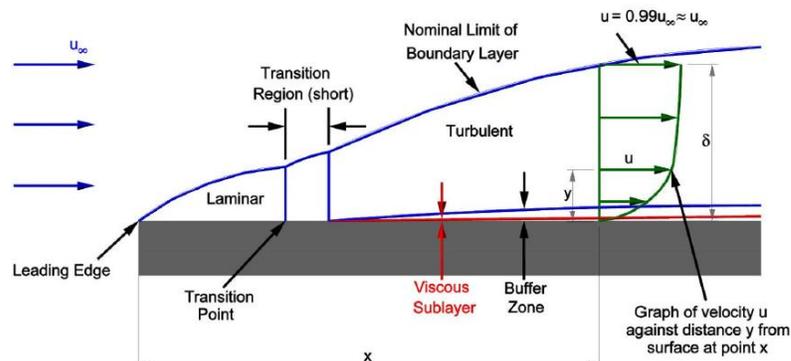
Pada gambar 1 ditunjukkan proses terbentuknya dan berkembangnya *boundary layer* untuk fluida *incompressible viscous* melalui *semiinfinite flat plate*. Pada awalnya, fluida mengalir dengan distribusi kecepatan yang *uniform* (U). Ketika melewati permukaan *flat plate*, aliran fluida tersebut mengalami gesekan sehingga bekerja tegangan geser ($\tau_w(x)$) pada bidang kontak antara fluida dengan permukaan *flat plate*. Adanya tegangan geser yang bekerja sepanjang aliran menghasilkan distribusi kecepatan. Distribusi kecepatan dimulai dari titik di permukaan *flat plate* yang mempunyai kecepatan nol sampai pada kecepatan mendekati harga kecepatan *uniform* pada jarak $\delta(x)$. Hal ini dikarenakan tegangan geser akan bernilai maksimum pada permukaan *flat plate*, sedangkan nilai tegangan geser akan berkurang pada titik yang semakin jauh letaknya dari *flat plate*.



Gambar 1. *Boundary Layer* pada *flat plate* untuk aliran *incompressible viscous* (White, 2001)

Boundary layer dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu *laminar boundary layer* dan *turbulent boundary layer*. Kedua jenis *boundary layer* tersebut tergantung pada bilangan Reynolds. Di dalam aliran fluida, proses peralihan dari *laminar boundary layer* ke *turbulent boundary layer* disebut sebagai transisi. Lamanya terjadi proses transisi dipengaruhi oleh gradien tekanan, kekasaran permukaan, perpindahan panas, gaya bodi dan gangguan aliran bebas (Fox, et al, 2004).

Proses pembentukan lapisan batas yang mengalami transisi dapat dilihat pada gambar 2. Ketika aliran melintasi plat datar, pada bagian depan partikel-partikel fluida yang cukup dekat terhadap plat dihambat oleh adanya tegangan geser yang besar. Lapisan batas menebal dalam arah yang sama dengan arah aliran. Pada lapisan batas ini terjadi perubahan kecepatan dari nol di permukaan pelat hingga mendekati harga kecepatan *free stream* pada jarak δ yang semakin jauh semakin besar. Begitu lapisan batas mulai menebal, ketidakstabilan pun terjadi dan mengakibatkan percampuran partikel (gerak acak) dan perubahan momentum dalam fluida hingga menyebabkan terbentuknya lapisan batas *turbulent*. Pada lapisan batas *turbulen*, profil kecepatan yang terbentuk lebih tebal (*full*) dengan gradien kecepatan di permukaan plat dan tegangan gesernya lebih tinggi daripada kondisi *laminar* maupun transisi.



Gambar 2. Aliran fluida di atas permukaan *flat plate* (Khatri, 2012)

CFD sangat berguna dalam berbagai variasi aplikasi yang akan digunakan nantinya. Tentu saja aplikasi yang dimaksudkan disini adalah aplikasi tentang aliran fluida pada sebuah tempat/alat atau lainnya. CFD banyak sekali digunakan dalam dunia industry. Sebagai contoh penggunaan CFD di industri adalah digunakan untuk mensimulasikan aliran diatas kendaraan atau bisa saja lebih spesifik dengan digunakannya CFD untuk mengamati interaksi propeler atau rotor dengan *aircraftfuselage*. Rotor dan propeler dapat direpresentasikan dengan modelling dengan variasi yang kompleks.

CFD singkatan dari *Computational Fluid Dynamics* sebuah teknik komputasi yang dapat digunakan untuk memprediksi, mensimulasikan dan menganalisa aliran fluida, perpindahan kalor, serta reaksi kimia. CFD menggunakan analisa numeric dengan metoda komputasional dengan menggunakan beberapa persamaan aliran dasar fluida seperti persamaan *Navier-Stokes*, dan persamaan/hukum kekekalan seperti kekekalan massa dan energi.

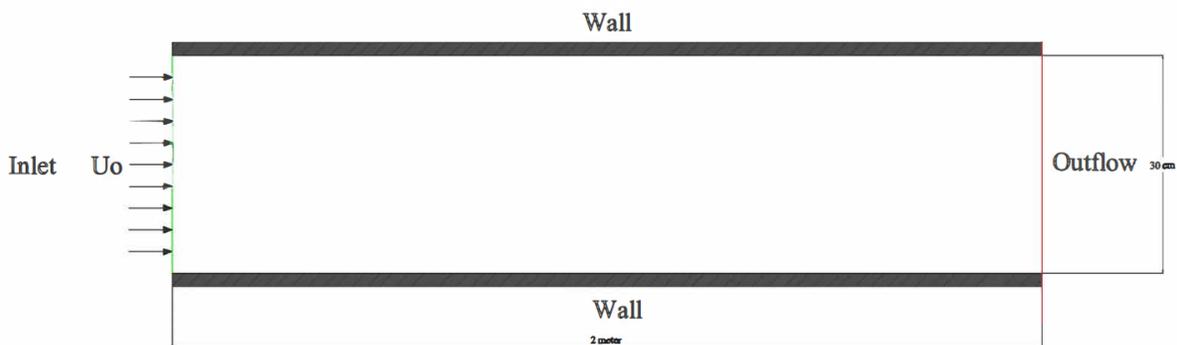
Sebagai sebuah ilmu yang baru berkembang, CFD mendapat perhatian khusus dari komunitas internasional seiring dengan perkembangan digital dengan bantuan computer. Perkembangan utama yang dilakukan mencakup dua hal penting. Pertama, bagaimana membuat sebuah model fenomena fluida fisik yang tidak bisa didapat dengan mudah dengan eksperimen, misalnya sistem/keadaan cuaca sebuah kendaraan supersonik luar angkasa. Yang kedua, kemampuan untuk menganalisa sistem yang telah dibuat sehingga dapat mengefektifkan pengeluaran biaya tanpa harus menggunakan prosedur pengujian secara langsung.

Munculnya ide untuk mengembangkan teknik komputasi dengan CFD ini merupakan kemajuan yang sangat berarti dalam perkembangan teknologi. Analisa yang dilakukan melalui sebuah simulasi sebelum prototype dibuat dapat meminimalisasi biaya karena dapat mencegah terjadinya kegagalan produk. Selain itu, dalam hal *product development* yang dilakukan sebuah perusahaan juga dapat disimulasikan dengan bantuan software berbasis CFD ini sebelum langsung dilakukan proses manufakturnya. Dengan bantuan software berbasis CFD ini juga mempermudah komunikasi antara bagian mekanik dan elektrik dalam perancangan sebuah produk pada perusahaan, dan secara langsung akan menghemat biaya.

Studi numerik telah dilaksanakan untuk menguji kinerja aerodinamis pada plat datar dengan menggunakan beberapa *turbulent modelk - ε (Standard, Realizable, RNG)*. Kecepatan *freestream* yang digunakan yaitu kecepatan 10 m/s dan pada kondisi udara standard. Parameter yang dievaluasi meliputi shear stress dan profil kecepatan

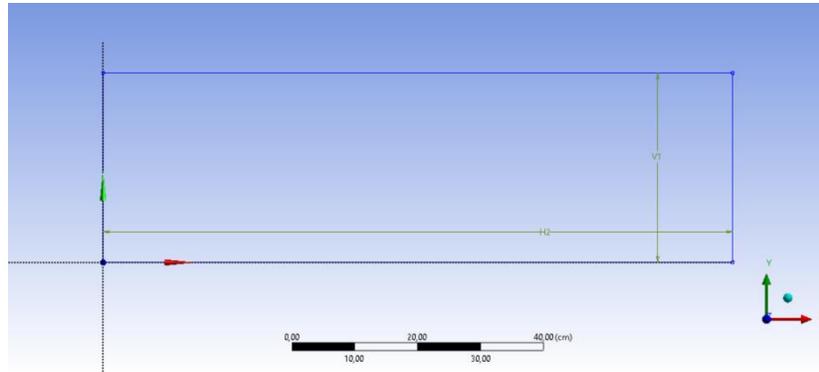
2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan simulasi numerik menggunakan software simulasi dengan *model turbulen k - ε (Standard, Realizable, RNG)*. Kecepatan aliran *freestream* yang akan digunakan sebesar 10 m/s. Model benda uji berupa plat datar. Gambar 3. merupakan domain simulasi serta kondisi batas yang digunakan dalam simulasi.



Gambar 3. Meshing dan domain pemodelan airfoil 2D

Dimensi pemodelan selanjutnya ditunjukkan pada gambar 4.

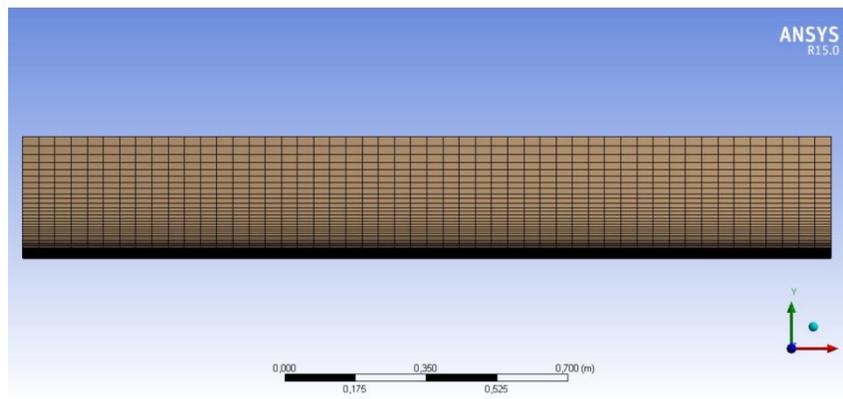


Gambar 4. Dimensi Pemodelan

Pada aplikasi ditentukan analisis 2 dimensi :

$$H2 = 200 \text{ cm} \quad V1 = 30 \text{ cm}$$

Setelah ditentukan *boundary condition*-nya maka selanjutnya *meshing* yang digunakan adalah *quadriateral* dan *edge sizing* di masing-masing sisi *boundary condition*.



Gambar 5. Meshing yang dihasilkan

Kondisi batas yang digunakan pada penelitian ini antara lain *inlet* : *velocity inlet*; *outlet* : *outflow*, *dinding* : *wall*. Aliran yang digunakan disini berupa aliran inkompresibel. *Velocity inlet* untuk mendefinisikan kecepatan aliran yang masuk. Kondisi batas *outflow* dipilih karena data aliran saat kondisi keluar tidak diketahui. *Wall* didefinisikan sebagai dinding dari aliran fluida yang terdapat di dalam saluran untuk membatasi fluida yang melintas.

Dalam penggunaan software simulasi memerlukan keakuratan data baik pada langkah post processing maupun preprocessingnya. Langkah grid independensi diperlukan untuk menentukan tingkat serta struktur grid terbaik dan terefisien agar hasil pemodelan mendekati sebenarnya. Pada penelitian ini membandingkan juga beberapa kerapatan meshing sebagaimana tampak pada tabel 1.

Tabel 1. Penentuan meshing dan minimal inflation

No	Jumlah Node/Grid	Y ⁺	Minimal Inflation
1	4141	14	0.0005
2	6161	6.6	0.00025
3	8181	4	0.00015
4	19701	0.98	0.000035

Reynolds Number yang digunakan adalah $12,52 \times 10^5$ sehingga aliran sudah mencapai turbulent.

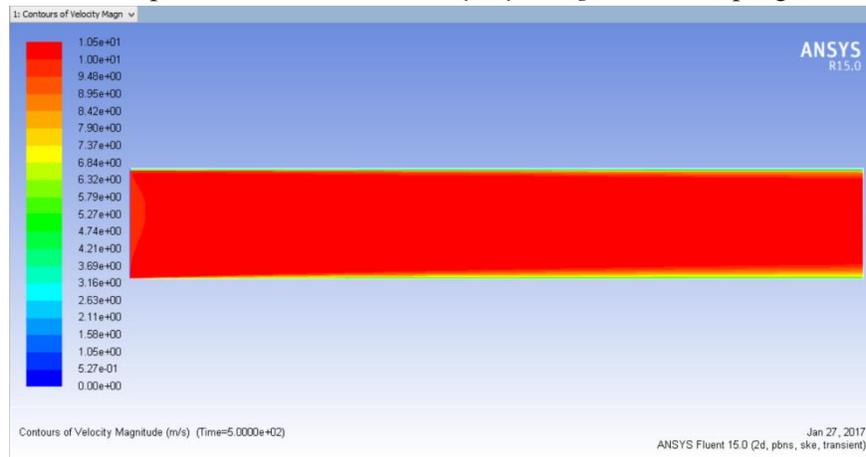
3. Hasil dan Pembahasan

Velocity Magnitude

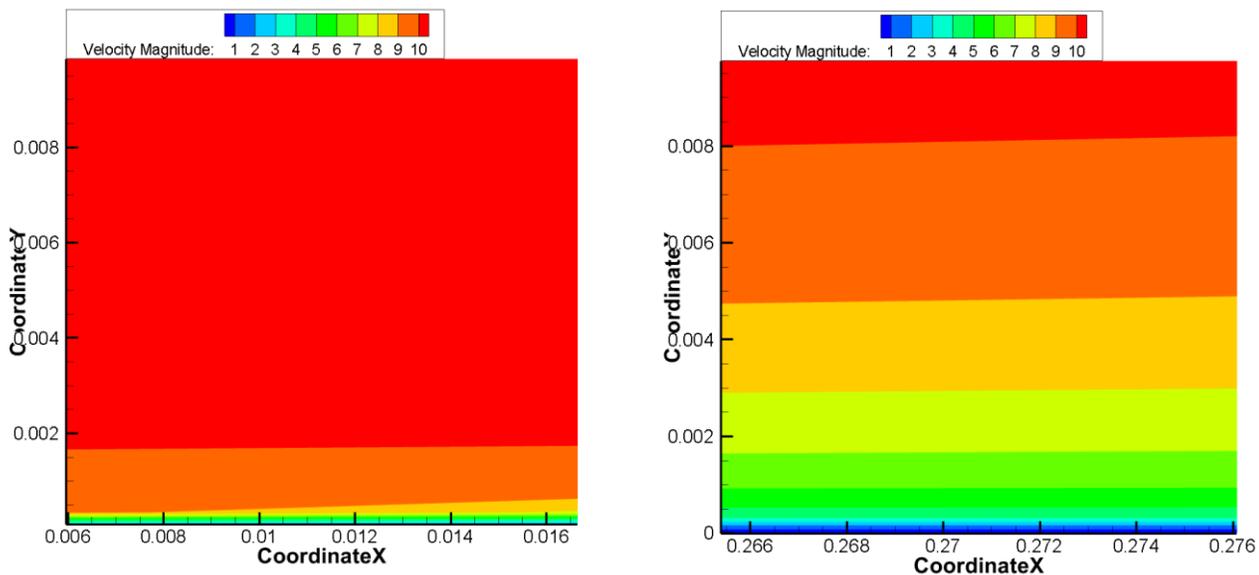
Aliran yang datang melewati sebuah plat datar akan selalu diawali dengan terbentuknya aliran *laminar*. Sejalan dengan pertumbuhan *boundary layer* maka aliran tersebut menuju transisi aliran, hal ini dinyatakan dengan bilangan *Reynolds* untuk aliran eksternal. Apabila nilai *Reynolds* tersebut melebihi 5×10^5 maka aliran dinyatakan sebagai aliran *turbulent*.

Gambar 6 menunjukkan kontur *velocity magnitude* dari *inlet* sampai dengan $x = 100$ cm sedangkan gambar 7 menunjukkan perbesaran gambar kontur *velocity magnitude* pada sisi inlet dan $x = 0,276$. Perbedaan warna menunjukkan perbedaan nilai dari *velocity*. Kontur *velocity magnitude* menunjukkan bahwa *boundary layer thickness* berkembang terus menerus ketika melintasi permukaan *plate* dari sisi *inlet* sampai dengan *outlet*. Hal ini sesuai dengan perkembangan aliran dari *laminar*, *transisi* dan *turbulen* sebagaimana ditunjukkan pada gambar 6. Hal ini penting untuk ditunjukkan karena masing-masing *boundary layer thickness*-nya berbeda. Dimungkinkan aliran yang sudah mendekati $x = 0,27$ mengalami transisi dari laminar ke turbulen karena perubahan *boundary layer thickness*-nya sudah tidak begitu signifikan.

Pada gambar 6 dan 7 tampak bahwa di luar *boundary layer region* tidak terpengaruh efek *viscous*.

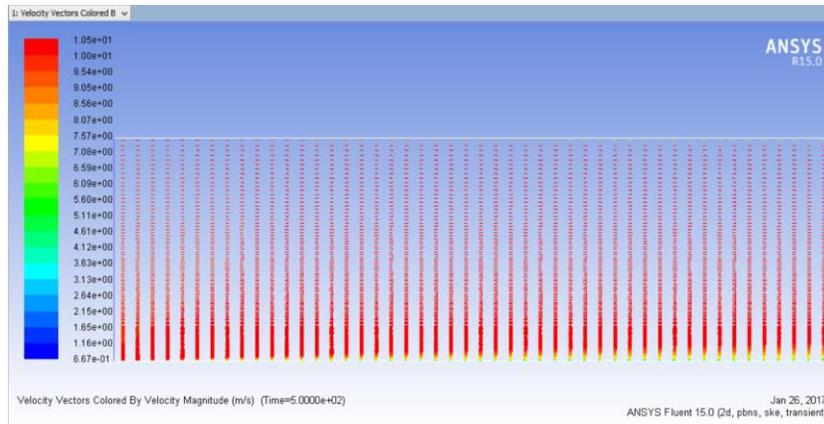


Gambar 6. Kontur Velocity Magnitude (Hasil *Ansyes Fluent 15*)

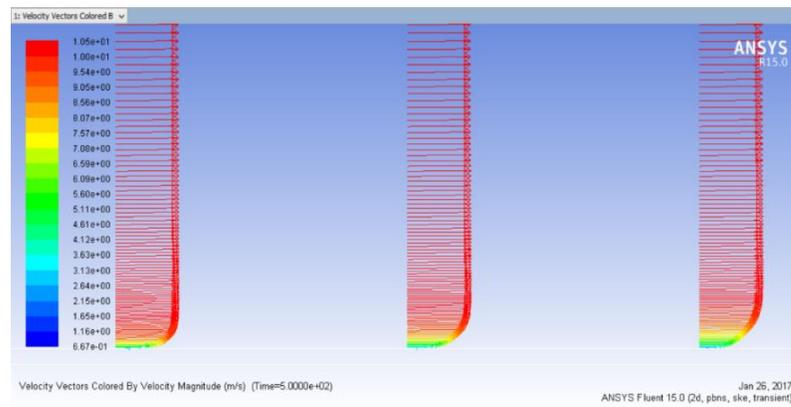


Gambar 7. Kontur *Velocity Magnitude* (Diperbesar) di depan sisi *Inlet* dan *Outlet* (Hasil *Techplot 360*)

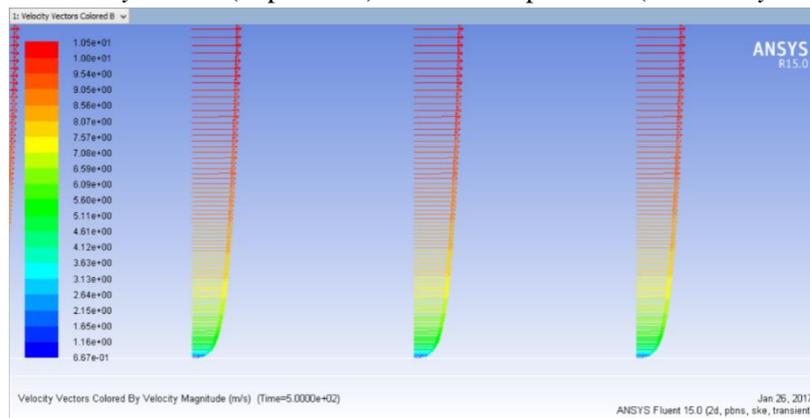
Gambar 8. menunjukkan profil kecepatan dari simulasi numerik yang diplot sepanjang pelat datar. Gambar 9 merupakan *velocity profile* di sisi *inlet* dan gambar 10 merupakan *velocity profile* pada sisi *outlet*. *Velocity profile* yang terbentuk menunjukkan momentum dari aliran masih dapat mengatasi gaya gesek sepanjang permukaan *plate*. Di sekitar $x = 100$ cm ditunjukkan bahwa aliran belum mengalami separasi. Dari *velocity profile* yang terbentuk juga menunjukkan bahwa *boundary layer* terbentuk dengan lambat sampai dengan $x = 100$ cm. Pada sisi *outlet* sebagaimana terlihat pada gambar 11 belum tercapai *fully developed* karena profil kecepatan masih mengalami perubahan meskipun sangat sedikit dan terus menerus sampai dengan sisi outlet.



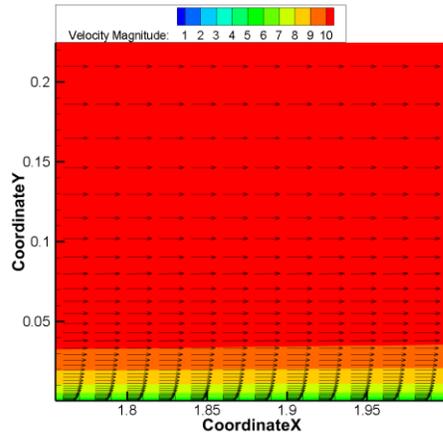
Gambar 8. *Velocity Vector* (Hasil *Ansyes Fluent 15*)



Gambar 9. *Velocity Vector* (Diperbesar) sedikit di depan *Inlet* (Hasil *Ansyes Fluent 15*)



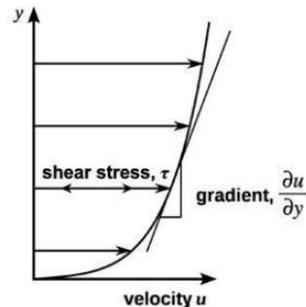
Gambar 10. *Velocity Vector* (Diperbesar) sekitar $x = 100$ cm (Hasil *Ansyes Fluent 15*)



Gambar 11. *Velocity Vector* (Diperbesar) di sekitar *outlet* (Hasil *Techplot 360*)

Shear Stress

Hubungan antara tegangan geser dan viskositas dan perubahan kecepatan dapat dipahami pada kasus aliran diantara dua plat datar. Misalkan jarak antar plat adalah y dan diantara plat tersebut terdapat fluida dengan isi yang homogen. Asumsikan bahwa plat sangat luas. Dengan luas A yang besar, pengaruh sisi dapat dianggap tidak ada. Pada plat bagian bawah dianggap tetap lalu diberikan gaya sebesar F pada plat atas. Bila ternyata gaya ini menyebabkan material diantara dua plat bergerak dengan perubahan kecepatan u , gaya yang diberikan proporsional dengan luas dan perubahan kecepatan.



Gambar 12. Perubahan bentuk akibat dari penerapan tegangan geser

Gaya yang diberikan sebanding dengan luas dan gradien kecepatan dalam fluida:

$$F = \mu A \frac{\partial u}{\partial y}$$

Persamaan ini dapat dinyatakan dalam tegangan geser $\tau = \frac{F}{A}$ sehingga :

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

dimana;

τ = tegangan geser (N/m^2)

μ = viskositas dinamik (N.s/m^2)

A = luas penampang lempeng (m^2)

$\delta u/\delta y$ = gradien kecepatan (s^{-1})

Namun untuk aliran turbulen berlaku :

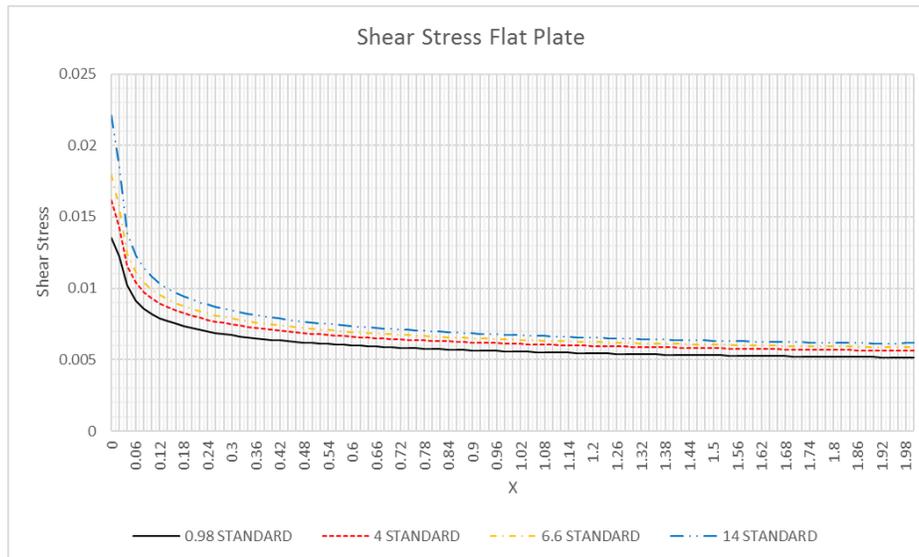
$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} = \tau_{lam} + \tau_{turb}$$

Dimana $\overline{\rho u'v'}$ adalah tegangan *Reynolds* (*Reynolds Stress*). Pada aliran laminar u' dan v' adalah 0. Sehingga $\overline{u'v'} = 0$. Untuk aliran turbulen didapati bahwa $\overline{\rho u'v'}$ adalah positif sehingga tegangan geser lebih besar terjadi pada aliran turbulen dibandingkan pada aliran laminar. Terlihat pada persamaan di atas bahwa tegangan geser di dalam aliran turbulen tidak semata-mata sebanding dengan gradien kecepatan rata-rata menurut waktu namun tegangan geser tersebut juga mengandung kontribusi fluktuasi acak komponen-komponen x dan y dari kecepatan. (Munson, 2009).

Meskipun besaran relatif dari τ_{lam} dibandingkan τ_{turb} merupakan fungsi kompleks yang tergantung pada aliran tertentu yang terlibat hasil simulasi menunjukkan sebagaimana gambar 13. Di daerah daerah yang sangat sempit di dekat dinding (*viscous sublayer*), tegangan geser laminar mendominasi. Menjauh dari dinding, porsi turbulen dari tegangan geser mendominasi. Transisi antara kedua daerah ini terjadi pada *overlap layer*.

Pada gambar 14, gambar 15, dan gambar 16 ditampilkan perbandingan hasil simulasi tegangan geser sepanjang plat datar beberapa turbulence model dengan y^+ yang berbeda. Didapatkan bahwa semakin baik nilai y^+ maka akan mendapatkan hasil yang lebih baik. Semakin rapat meshing di sekitar wall akan meningkatkan sensitivitas simulasi ketika iterasi dilakukan. Dengan nilai $y^+ \leq 1$ akan mendapatkan hasil yang terbaik meskipun menggunakan turbulence model yang berbeda baik $k - \epsilon$ Standard, $k - \epsilon$ RNG maupun $k - \epsilon$ Realizable.

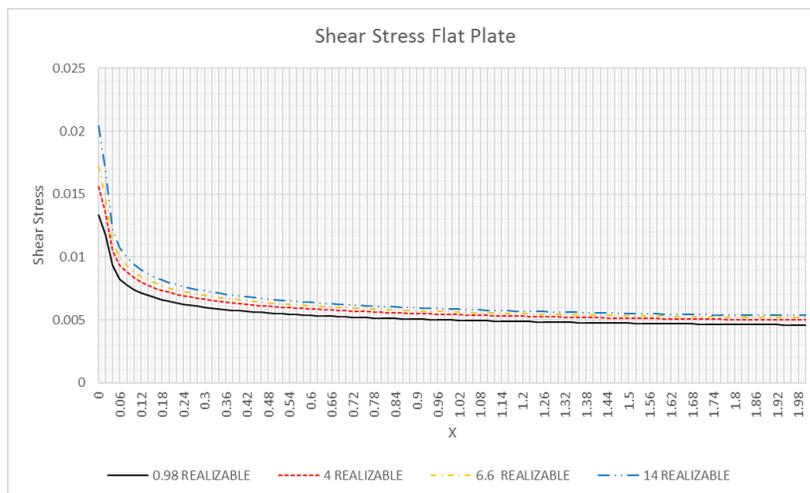
Pada gambar 17, gambar 18, gambar 18, dan gambar 19 ditampilkan perbandingan hasil simulasi tegangan geser sepanjang plat datar dengan y^+ yang sama pada *turbulence model* yang berbeda. Didapatkan bahwa $k - \epsilon$ Realizable mendapatkan hasil yang lebih baik disusul $k - \epsilon$ RNG dan $k - \epsilon$ Standard. $k - \epsilon$ Realizable mampu mengukur tegangan geser yang lebih sensitif dibandingkan $k - \epsilon$ RNG dan $k - \epsilon$ Standard. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Mulvany (2004) bahwa $k - \epsilon$ Realizable mendapatkan hasil yang lebih baik dibandingkan $k - \epsilon$ RNG dan $k - \epsilon$ Standard



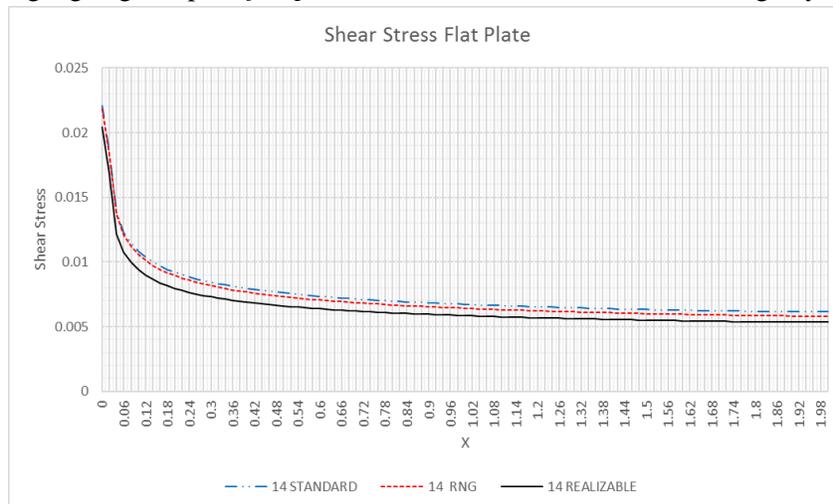
Gambar 14. Tegangan geser pada flat plate hasil simulasi $k - \epsilon$ Standard dengan y^+ yang berbeda



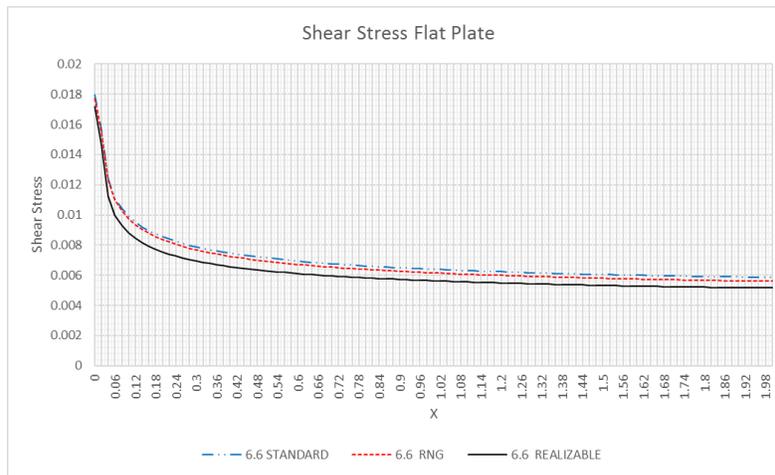
Gambar 15. Tegangan geser pada *flat plate* hasil simulasi $k - \epsilon RNG$ dengan y^+ yang berbeda



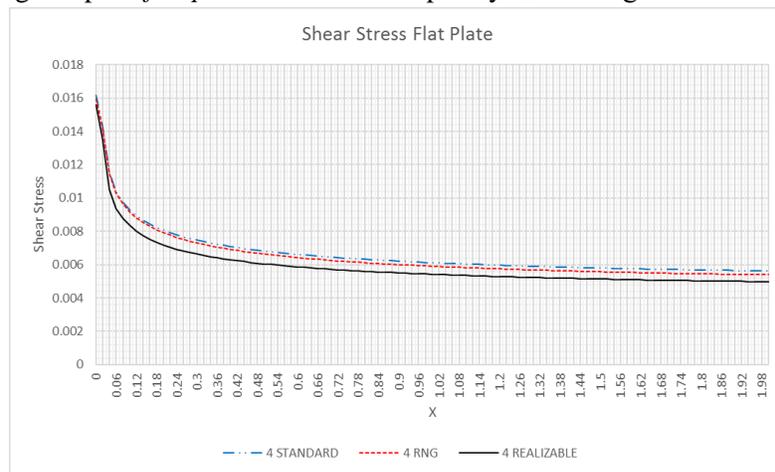
Gambar 16. Tegangan geser pada *flat plate* hasil simulasi $k - \epsilon Realizable$ dengan y^+ yang berbeda



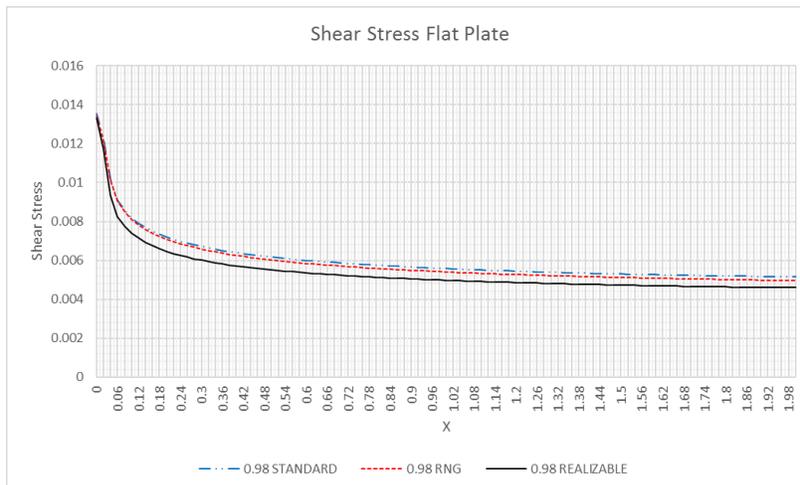
Gambar 17. Tegangan geser pada *flat plate* hasil simulasi pada $y^+ \leq 30$ dengan *turbulence model* yang berbeda



Gambar 18. Tegangan geser pada *flat plate* hasil simulasi pada $y^+ \leq 10$ dengan *turbulence model* yang berbeda



Gambar 19. Tegangan geser pada *flat plate* hasil simulasi pada $y^+ \leq 5$ dengan *turbulence model* yang berbeda



Gambar 20. Tegangan geser pada *flat plate* hasil simulasi pada $y^+ \leq 1$ dengan *turbulence model* yang berbeda

4. Kesimpulan

Penggunaan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) telah dilaksanakan pada penelitian ini. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa $k - \epsilon$ Realizable mendapatkan hasil yang lebih baik disusul $k - \epsilon$ RNG dan $k - \epsilon$ Standard. $k - \epsilon$ Realizable mampu mengukur tegangan geser yang lebih sensitif dibandingkan $k - \epsilon$ RNG dan $k - \epsilon$

Standard. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian **Mulvany (2004)** bahwa $k - \varepsilon$ Realizable mendapatkan hasil yang lebih baik dibandingkan $k - \varepsilon$ RNG dan $k - \varepsilon$ Standard. Dari *velocity profile* yang terbentuk juga menunjukkan bahwa *boundary layer* terbentuk dengan lambat sampai dengan $x = 100$ cm. Pada sisi *outlet* belum tercapai *fully developed* karena profil kecepatan masih mengalami perubahan meskipun sangat sedikit dan terus menerus sampai dengan sisi outlet.

Referensi

- [1]. **Fluent Inch (2005)**, *Flow Over Cylinder*, Flow Lab 1.2.
- [2]. **Fox, Robert W., Mc Donald, Alan T., and Pritchard, Philip J. (2004)**, *Introduction to Fluid Mechanics*, 6th edition, John Wiley and Sons, New York.
- [3]. **Khatri, Rajesh, Pankaj Agrawal, Mohan Gupta, Jitendra Verma(2012)**, *Laminar Flow Analysis Over A Flat Plate By Computational Fluid Dynamics*, International Journal of Advances in Engineering & Technology.
- [4]. **Mulvany, Nicholas J., Li Chen, Jiyuan Y. Tu, Brendon Anderson (2004)**, *Steady State Evaluation of Two Equation RANS Turbulence Models for High Reynolds Number Hydrodynamic Flow Simulations*, Final Report, Defence Science and Technology Organisation, Departement of Defence, Australian Government