

STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN SILANG PADA SILINDER BUNDAR TUNGGAL

Berkah Fajar

Jurusan Teknik Mesin, Universitas Diponegoro, Semarang.

Abstrak

Studi ini mempelajari sifat hidrodinamika fluida yang mengalir pada silinder bundar tunggal (*single circular cylinder*) dalam aliran silang. Aliran diasumsikan inkompresibel dengan pemodelan laminar untuk variasi bilangan Reynold yang meliputi : 0.0001, 2, 20, 40, 100, 200, 400, 1000, 4000, dan 20000. Simulasi yang pertama adalah simulasi grid untuk mendapatkan independent mesh untuk geometri daerah awal. Dengan independent mesh ini, simulasi dilanjutkan untuk menganalisa karakteristik aliran silang pada suatu silinder lingkaran. Variabel simulasi meliputi skema interpolasi tekanan (*standar, linear, second-order*), diskretisasi momentum (*first-order upwind, second-order upwind, Power-law*), dan *pressure-velocity coupling* (*SIMPLE, SIMPLEC, dan PISO*). Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan data pustaka maupun hasil eksperimen. Parameter pembandingan yang dipilih diantaranya pola aliran, bilangan strouhal, koefisien drag, dan posisi separasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa karakteristik aliran untuk bilangan Reynold lebih dari 40 ($Re > 40$) adalah bergantung terhadap waktu (*unsteady*). Hal ini karena pengaruh vortex yang dilepaskan (*vortex shedding*) di daerah belakang silinder. Hasil simulasi mengenai gaya bodi (*lift dan drag*) pada silinder berubah secara periodik dan besarnya mendekati hasil eksperimen

Abstrak

This study deals with numerical investigation of hydrodynamic properties of fluids flow across a single circular cylinder. The flow is assumed incompressible, laminar with Reynolds number 0,0001, 2, 20, 40, 100, 200, 400, 1000, 4000 and 20000. The work started with generating geometrical mesh, and then continue with the numerical simulation. The simulations were done by varying the pressure with standard, linier or second order interpolation, momentum discretisation (firs-order upwind, second-order upwind, Power-law), and pressure velocity coupling (SIMPLE, SIMPLEC, and PISO). The simulation results agree with the experimental results done by other. The comparison parameter used were flow patern, Strouhal Number, drag coefficient, and separation position. The simulation results also show that the flow characteristic with Reynolds Number larger than 40 is depend on time (unsteady). This is couased by vortex shedding at the rear of the cylinder. The body force (lift and drag) on the cylinder change periodically and the value agree with the experimental results.

Keyword: *circular cylinder, vortex shedding, CFD*

1 PENDAHULUAN

Aliran yang melalui silinder dua-dimensi merupakan kajian yang paling banyak dipelajari dalam aerodinamik dan relevan dengan beberapa aplikasi kerekayasaan. Penelitian sering dilakukan pada model benda tumpul (*bluff body*), yaitu benda yang tidak memiliki sisi-sisi yang tajam (*sharp edges*). Contohnya, adalah kerjangu udara (*airfoil*), bola, silinder bundar, silinder elips, dan sebagainya. Untuk penyederhanaan pemodelan maka dipilllah model silinder bundar (*circular cylinder*) 2 dimensi yang mewakili model benda tumpul. Penelitian yang paling sering dilakukan secara eksperimental mengenai aliran yang melalui silinder dua-dimensi adalah adanya fenomena *vortex shedding* (pelepasan vortex) yang hanya dapat diamati pada kondisi aliran yang *unsteady* (bergantung kepada waktu). Fenomena yang paling menghebohkan dunia kerekayasaan adalah kegagalan pada jembatan Tacoma, Washington pada 7 November 1940.

Hipoteis awal mengenai kegagalan pada jembatan Tacoma adalah vortex yang dilepaskan pilar-pilar jembatan mempunyai frekuensi yang sama/sebanding dengan frekuensi pribadi jembatan sehingga terjadilah resonansi yang mengakibatkan kegagalan konstruksi jembatan tersebut [4,7].

Eksperimen untuk mengetahui fenomena *vortex shedding* pada silinder bundar telah banyak dilakukan, namun terbatas pada geometri yang kecil (tidak mewakili kenyataan). Selain itu, pada analisa eksperimental ditemui kendala terhadap banyak parameter yang terlibat di dalamnya, seperti geometri sistem, kecepatan aliran fluida, tekanan, massa jenis fluida, viskositas fluida, dan parameter-parameter yang lainnya. Untuk mendapatkan hasil eksperimen yang baik, proses pengujian tidak cukup hanya dilakukan satu kali. Akibatnya eksperimental membutuhkan waktu yang lama, dan biaya yang cukup mahal.

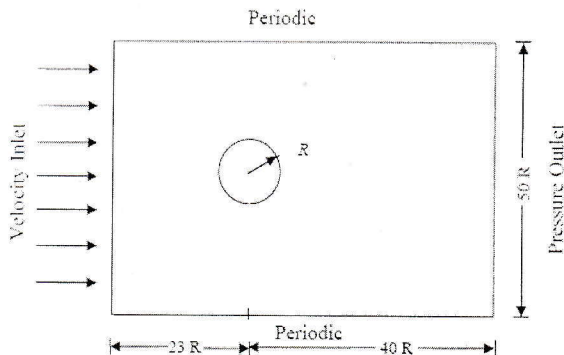
Kekurangan lainnya dari eksperimental adalah untuk geometri yang kecil agak sulit mendapatkan hasil. Untuk mengatasi kendala tersebut, maka metoda numerik merupakan salah satu solusi alternative yang digunakan dalam analisa dinamika aliran (*Computational Fluid Dynamic*, CFD).

Metoda numerik dapat memprediksi sesuatu dengan lebih cepat dan mudah serta biaya yang relatif lebih kecil dari eksperimental. Di samping itu, metoda numerik juga dapat mengatasi kendala geometri yang rumit dan syarat-syarat batas yang merupakan penghambat metoda analitis.

Metoda numerik yang dikembangkan cukup banyak saat ini. Sedikitnya terdapat tiga macam pola pemecahan secara numerik. Ketiga macam pola pemecahan itu adalah metoda beda hingga (*finite difference methods*), metoda elemen hingga (*finite element methods*), dan metoda spektral (*spectral methods*). FLUENT 6.2.16 merupakan salah satu perangkat lunak CFD yang cara kerjanya berdasarkan metoda volume hingga (*finite volume method*) yang merupakan pengembangan dari metoda beda hingga.

2 MODEL 2 DIMENSI

Silinder bundar tunggal halus yang sangat panjang dengan diameter, $D = 1$ m ($L \gg D$) ditempatkan dalam aliran secara menyilang (*crossflow*) dalam suatu aliran luar (*external flow*) dengan kecepatan aliran bebas yang uniform, U_∞ dengan besar tertentu dan diasumsikan dalam keadaan tanpa gangguan (*undisturbed*). Adapun batas-batas daerah asalnya (*domain*) dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1 Daerah asal (domain) untuk silinder dalam aliran silang dua dimensi

Adapun sifat fluida (*fluid properties*) yang digunakan adalah konstan, dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Jenis fluida = udara
- Kerapatan fluida, $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$
- Viskositas absolut fluida, $\mu = 1,7894e - 05 \text{ kg/m-s}$

3 MODEL MATEMATIS

Persamaan dasar untuk menganalisa aliran pada suatu silinder lingkaran adalah persamaan kontinuitas dan Navier Stokes.

$$\text{div}(\vec{u}) = 0$$

$$\frac{\partial(u)}{\partial t} + \text{div}(u\vec{u}) = \frac{1}{\rho} \text{div}(\Gamma \nabla u) \quad (1)$$

(Γ = diffusion coefficient)

Persamaan (1) adalah persamaan awal yang digunakan untuk komputasi menggunakan *finite volume method*. Kemudian persamaan (1) diintegrasikan menggunakan suatu control volume.

$$\int_{CV} \frac{\partial(u)}{\partial t} dv + \int_{CV} \text{div}(u\vec{u}) dv = \frac{1}{\rho} \int_{CV} \text{div}(\Gamma \nabla u) dv \quad (2)$$

Dengan aturan *Gauss-divergence*, persamaan [2] menjadi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{CV} \frac{\partial(u)}{\partial t} dv \right) + \int_A n \cdot (u\vec{u}) dA = \frac{1}{\rho} \int_A n \cdot (\Gamma \nabla u) dA \quad (3)$$

Untuk kasus *steady state*, persamaan [3] menjadi:

$$\int_A n \cdot (u\vec{u}) dA = \frac{1}{\rho} \int_A n \cdot (\Gamma \nabla u) dA \quad (4)$$

Sedangkan untuk kasus *unsteady*, persamaan [3] menjadi:

$$\int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{CV} \frac{\partial(u)}{\partial t} dv \right) dt + \int_{\Delta A} n \cdot (u\vec{u}) dA dt = \frac{1}{\rho} \int_{\Delta A} n \cdot (\Gamma \nabla u) dA dt$$

(Δt = time step) (5)

Bilangan Reynolds, Re dihitung berdasarkan diameter silinder, D dan kecepatan aliran bebas, U_∞ . Dalam simulasi ini, bilangan Reynolds ditetapkan terlebih dahulu sehingga dapat diketahui berapakah kecepatan aliran masuk (*inlet velocity*) yang diperlukan untuk mendapatkan model daerah aliran yang diinginkan.

$$Re = \frac{\rho U_\infty D}{\mu} \quad (6)$$

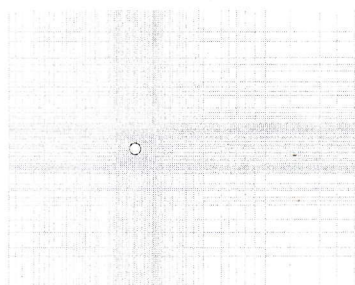
Ada beberapa variasi bilangan Reynolds yang dipilih, yaitu $Re_\infty = 0,0001, 2, 20, 40$ untuk aliran *steady*, dan $Re_\infty = 100, 200, 400, 1000, 4000, 20000$ untuk aliran *unsteady*. Karena bilangan Reynoldnya kurang dari bilangan Reynolds transisi ($Re_{trans} = 2 \times 10^5$) maka model daerah aliran yang digunakan adalah **laminar**. Untuk masing-masing Re_∞ diperoleh U_∞ yang dicantumkan pada tabel di bawah ini

Tabel 1 Kecepatan U_∞ sebagai fungsi dari Re_∞

Re_∞	U_∞
0,0001	1,4607e - 05
2	2,9214e - 05
20	2,9214e - 04
40	5,8428e - 04
100	1,4607e - 03
200	2,9214e - 03
400	5,8428e - 03
1000	1,4607e - 02
4000	5,8428e - 02
20000	0,29214

4 PROSES SIMULASI

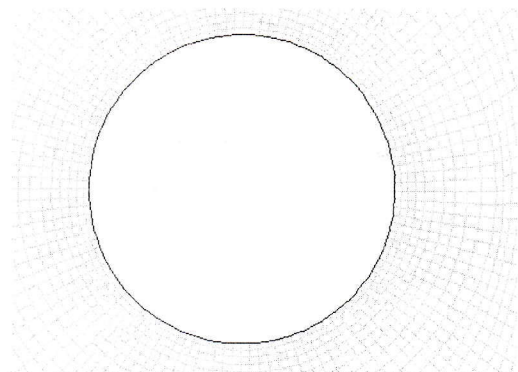
Domain yang digunakan termasuk geometri yang sederhana, sehingga grid yang dipakai adalah jenis persegi (*quadrilateral*). Jenis grid ini dapat mengurangi waktu komputasi dibanding jenis segitiga (*triangular*) serta menambah keakuratan hasil simulasi [2,3,8].



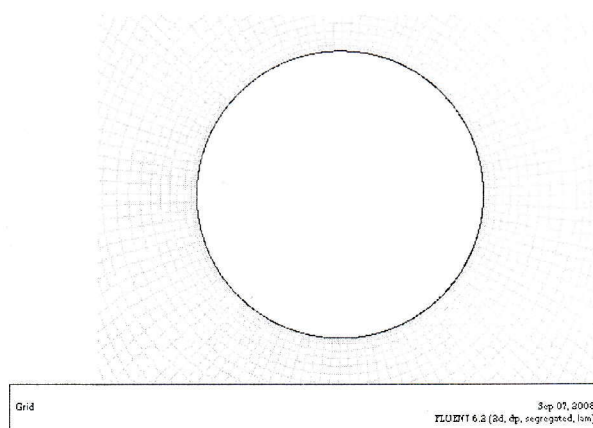
Grid Sep 05, 2008
FLUENT 6.2 (2d, dp, segregated, lam)

Gambar 2 Grid persegi terstruktur untuk *meshing* domain

Untuk mendapatkan struktur grid yang baik, dilakukanlah simulasi grid. Percobaan dilakukan secara terus menerus dengan mengadaptasi grid terutama di daerah dekat dinding (*near-wall*) sampai diperoleh model yang tidak lagi tergantung pada grid (*independent grid*).



Grid Sep 01, 2008
FLUENT 6.2 (2d, dp, segregated, lam)



Gambar 3 Grid sebelum dan sesudah proses adaptasi

Untuk simulasi memperoleh *independent grid* digunakan bilangan Reynolds 20000. Data literatur yang digunakan sebagai pembanding adalah : Koefisien drag (C_d). Besarnya koefisien drag berdasarkan hasil eksperimen pada bilangan Reynolds 20.000 adalah $C_d = 1,2$.

Independent grid diperoleh pada adaptasi ke empat dengan perincian grid sebagai berikut :

- Jumlah sel : 18.980
- Jumlah sisi : 38.964
- Jumlah nodal : 20.099

Harga C_d yang diperoleh adalah 1,20 dan hasil ini sama dengan data literatur.

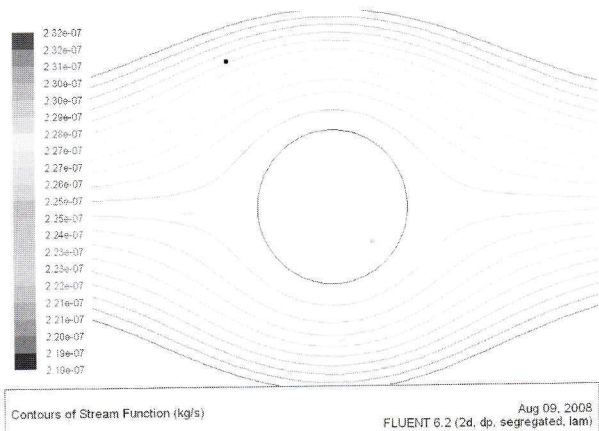
$$\text{Relative error} = \left| \frac{1,20 - 1,20}{1,20} \right| = \left| \frac{0}{1,20} \right| \times 100\% = 0\%$$

5 HASIL DAN PEMBAHASAN

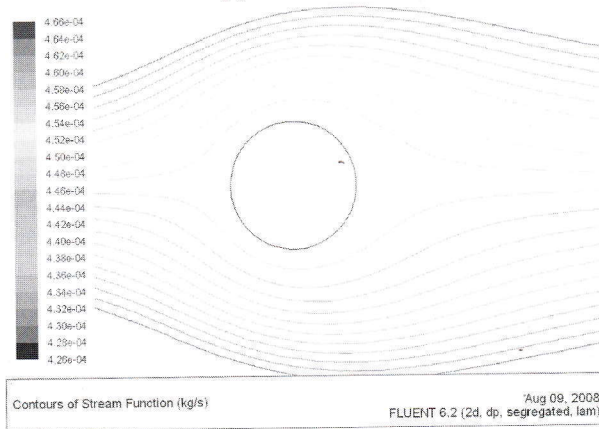
a. Garis Arus

Hasil simulasi garis arus disekitar silinder untuk $Re = 0,00001$, $Re = 2$, $Re = 20$ dan $Re = 100$ dapat dilihat di gambar 4. Untuk Bilangan Reynolds yang rendah, aliran fluida dapat dianggap aliran inviscid. Semakin kecepatan ditingkatkan, kontribusi gaya gesek semakin besar. Kontribusi gaya gesek semakin besar dapat dilihat terjadinya vortex di belakang silinder. Pada gambar 4. vortex terjadi pada $Re = 20$. Ketika $Re = 20$ vortex yang terbentuk simetris di setengah lingkaran atas dan di setengah lingkaran bawah. Vortex yang terbentuk belum dilepas dari permukaan silinder.

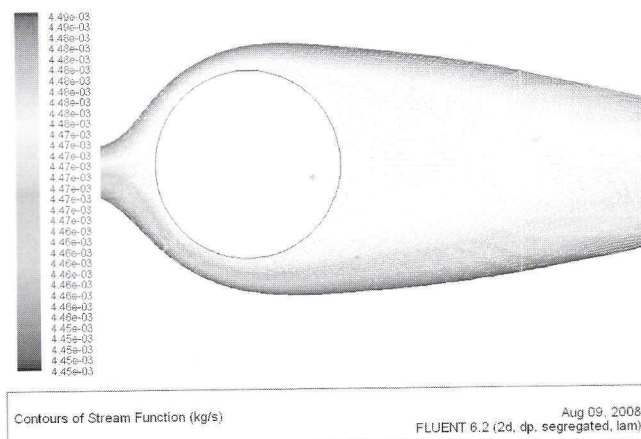
Vortex mulai terlepas dari permukaan silinder ketika $Re = 40$. Vortex yang terlepas membentuk "Karman's vortex streets". Hasil simulasi sesuai dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Homan dan Von Karman [4,6]



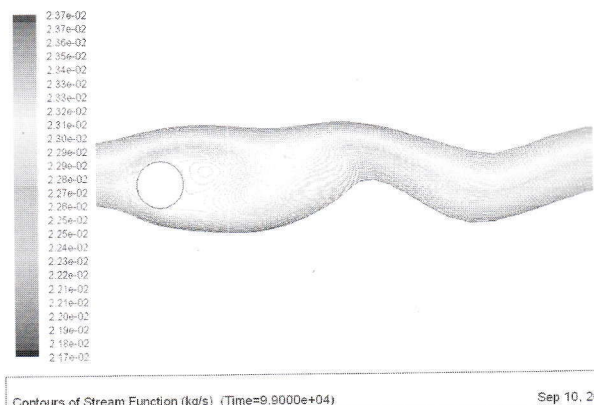
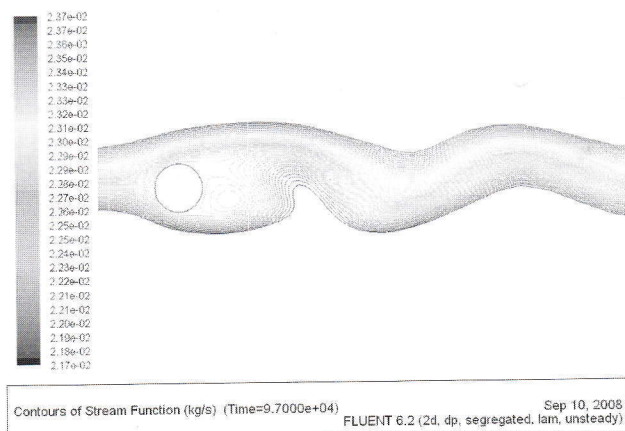
(a) Re = 0.0001



(b) Re = 2



(c) Re = 20



(d) Re = 100 (unsteady case)

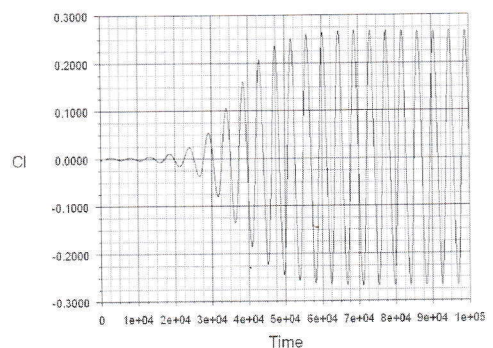
Gambar 4 Streamline (hasil simulasi)

b. Strouhal Number

Frekuensi *vortex shedding* sering dinyatakan dengan bilangan Strouhal dan didefinisikan sebagai berikut :

$$St = \frac{D}{\tau_p U} = \frac{f \square D}{U} \quad (7)$$

Untuk menentukan bilangan strouhal, maka perlu dicari periode aliran. Penentuan periode aliran dilakukan dengan cara memonitor konvergensi koefisien lift (Cl) dari silinder selama proses simulasi. Apabila telah terbentuk grafik sinusoid, maka aliran yang semula bersifat *unsteady* telah berada dalam kondisi *quasi steady* dan frekuensi/periodanya dapat dicari.



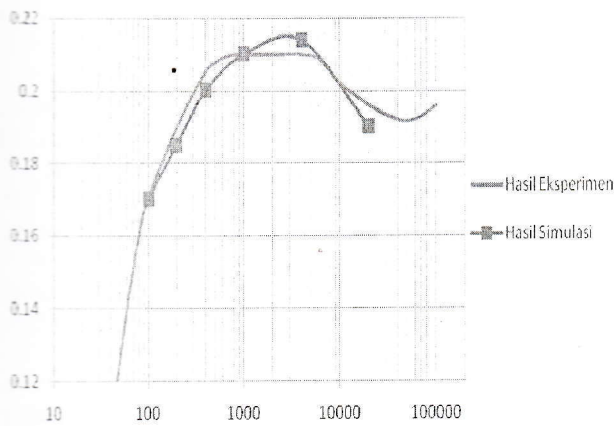
Lift Convergence History (Time=1.0000e+05) Aug 10, 2008
FLUENT 6.2 (2d, dp, segregated, lam, unsteady)

Gambar 5 Konvergensi Cl untuk Re = 100

Gambar diatas menunjukkan periode aliran sebesar 4000 detik ($\tau_p = 4000$ s). Besarnya bilangan strouhal dapat dihitung :

$$St = \frac{D}{\tau_p U} = \frac{1}{4000 \times 0,0014607} \frac{m}{m/det} = 0,17$$

Simulasi dilanjutkan untuk mencari bilangan strouhal pada Re = 200, 400, 1000, 4000, 20000.



Gambar 6 Grafik perbandingan hasil eksperimen dan hasil simulasi fungsi St-Re

Gambar 6. memperlihatkan bilangan Strouhal hasil simulasi berbeda 5% dari hasil eksperimen yang dilakukan oleh Frimberger Dreacher dan Jones [6].

c. Koefisien Drag (C_D)

Harga C_D dapat dinyatakan sebagai berikut:

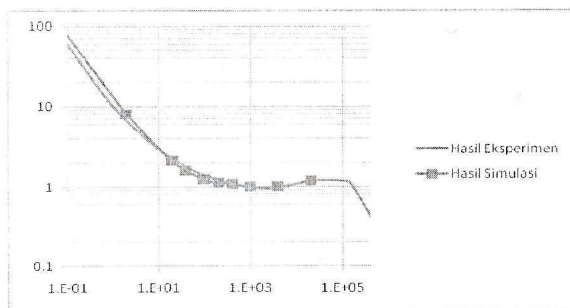
$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (8)$$

Harga C_D untuk berbagai variasi bilangan Reynolds, baik itu pada simulasi *steady* maupun *unsteady* diberikan pada tabel di bawah ini.

Tabel 2 Harga C_D untuk berbagai variasi bilangan Reynolds

Re	C_D
0.0001	80,000
2	8,120
20	2,130
40	1,590
100	1,250
200	1,120
400	1,080
1000	0,995
4000	0,997
20000	1,200

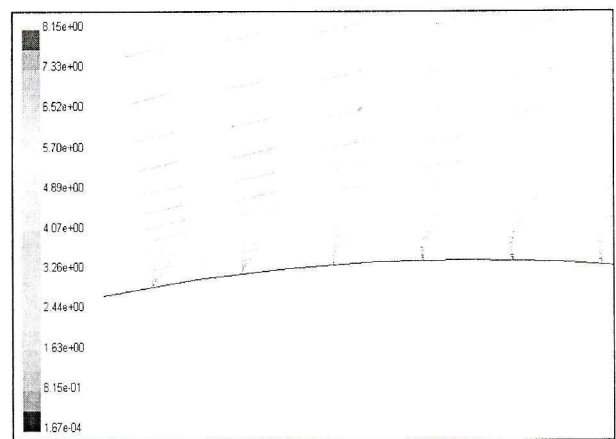
Dari tabel di atas, dapat dibuat grafik hubungan harga C_D terhadap variasi bilangan Reynolds



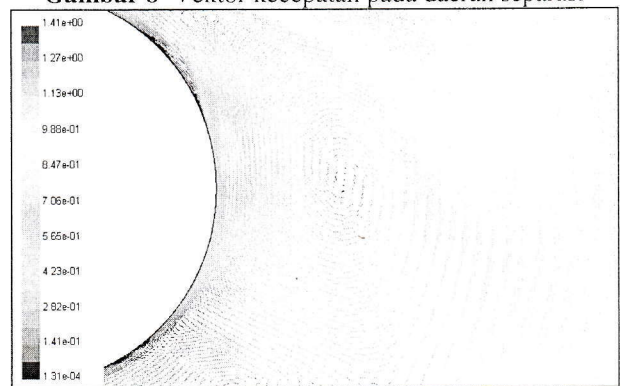
Gambar 7. Hasil simulasi harga C_D untuk silinder lingkaran

d. Vektor Kecepatan

Vektor kecepatan merupakan segmen garis terarah untuk kecepatan. Gambar 8. di bawah ini merupakan vektor kecepatan untuk melihat distribusi *velocity magnitude* hasil simulasi yang ada dalam lapisan batas (dekadinding silinder). Gambar ini juga menjelaskan bagaimanakah bentuk garis kecepatan saat terjadi separasi aliran, dimana gradien kecepatan pada titik tersebut sama dengan nol. Arus balik (*reverse flow*) setelah terjadinya separasi juga terlihat. Sedangkan gambar 9. merupakan vektor kecepatan untuk menjelaskan adanya fenomena pusaran pada daerah belakang silinder. Dengan mesimulasi titik separasi untuk berbagai Re, maka diperoleh titik separasi untuk Re = 40 sampai Re = 2000 terjadi pada 82° .



Gambar 8 Vektor kecepatan pada daerah separasi



Gambar 9 Vektor kecepatan pada daerah belakang silinder

6 KESIMPULAN

1. Hasil simulasi dalam FLUENT dipengaruhi oleh berbagai faktor diantaranya :
 - a. Opsi yang digunakan, yaitu parameter simulasi yang meliputi bentuk persamaan diskretisasi momentum, skema interpolasi tekanan (*pressure*), serta pilihan *pressure-velocity coupling*.
 - b. Pemodelan aliran yang digunakan untuk memprediksi properti aliran.

- c. Struktur grid, yang meliputi kerapatan dan pengelompokan nodal serta kehalusan sel.
2. Parameter untuk mem-verifikasi hasil simulasi dengan data literatur (hasil eksperimen maupun studi pustaka) meliputi : pola aliran, bilangan strouhal, koefisien drag. Hasil simulasi mendekati data literatur.
3. Hasil simulasi menunjukkan bahwa karakteristik aliran untuk bilangan Reynold lebih dari 40 ($Re > 40$) bergantung pada waktu (*unsteady*). Hal ini karena pengaruh vortex yang dilepaskan (*vortex shedding*) di daerah belakang silinder.
4. Simulasi unsteady memberikan harga koefisien drag (C_D) yang berbeda-beda pada tiap saat tertentu. Hal ini dikarenakan adanya pengaruh *wake* di belakang silinder yang berubah secara periodik setiap saat.
5. Pelepasan vortex di belakang silinder mempunyai nilai periode dan frekuensi tertentu berdasarkan bilangan Reynoldnya.

NOMENCLATURE

A	Luas [m^2]
D	Diameter silinder [m]
F	Frekuensi pelepasan vortex [Hz]
t	Waktu [s]
Re	Bilangan Reynolds
St	Bilangan Strouhal
U	Kecepatan fluida untuk arah x [m/s]
V	Kecepatan fluida untuk arah y [m/s]
ρ	Massa jenis fluida [kg/m^3]
μ	Viskositas [kg/m.s]
τ	Periode [s]

REFERENSI

1. W. Robert Fox dan Alan T. Mc Donald, *Introduction to Fluid Mechanics, fourth edition, SI Version*, John Wiley & Sons, Inc, Canada, 1994.
2. H. K. Versteeg dan W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamic*, Longman Scientific & Technical, England, 1995.
3. Schlichting, Herman. Dr., *Boundary Layer Theory*, 7th ed., McGraw-Hill Book Companies, Inc, USA, 1979.
4. M. Philip Gerhart dan Richard J. Gross, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., USA, 1985.
5. M. Frank White, *Mekanika Fluida Edisi Kedua Jilid 1*, Erlangga, Jakarta, 1988.
6. M. Frank White, *Mekanika Fluida Edisi Kedua Jilid 2*, Erlangga, Jakarta, 1988.
7. J. P. Holman, *Perpindahan Kalor Edisi Keenam*, Erlangga, Jakarta, 1988.
8. L. Victor Streeter dan E. Benyamin Wyle, *Mekanika Fluida Edisi Delapan Jilid 1*, Erlangga, Jakarta, 1999.
9. Mahbubar Rahman dan Mashud Karim, Numerical Investigation Of Unsteady Flow Past a Circular Cylinder Using 2-D Finite Volume Method, *Journal of Naval Architecture And Marine Engineering*, Dhaka, Bangladesh, 2007.
10. Lionel Espeyrac dan Stéphane Pascaud, *Strouhal Instability*, New York, 2006.
11. FLUENT, Inc, *Manual FLUENT Documentation*, FLUENT, Inc, 1999.
12. FLUENT, Inc, *Manual GAMBIT Documentation*, FLUENT, Inc, 1999.