

M6-001 Analisis Visualisasi Numerik

pada Peluruhan Vorteks Silinder Bulat

Benny D. Leonanda

Department of Mechanical Engineering
Andalas University

Kampus Kampus Unand Limau Manis Padang, 25163, Indonesia

Phone: +62-0751-72497, FAX: +62-0751-72566 E-mail: benny@ft.unand.ac.id

ABSTRACT

Characteristic of vortex shedding after circular cylinder is used to found out the its frequency on the state of Strouhal number. Numerical simulation had been conducted by using turbulent equation $k-\varepsilon$ RNG varian. The result of simulation get contour and vector of velocity of flow around circular cylinder. An analyzing of velocity countur could get Strouhal number fit with the result of numerical simulation itself and experiment in laboratorium. Fluctuation of drag, lift, base pressure, and stagnation point pressure on circular cylinder also are presented this paper.

Keywords: visualization, vortex shedding, numerical simulation

1. Pendahuluan

Wake dan peluruhan vorteks yang terbentuk dan terjadi di belakang silinder telah menjadi kajian yang menarik di bidang ilmu dinamika fluida. Penelitian terhadap hal ini masih terus dilakukan dan tidak pernah berhenti. Walaupun begitu sampai sekarang masih sedikit “tersingkap” tentang bagaimana proses terbentuknya vorteks di dalam aliran fluida, baik pada penampakan dua atau tiga dimensi. “*The nature of vortex shedding of circular cylinder*” sangat mudah dan jelas dilihat pada pengujian di *wind* dan *water tunnel*. Berbagai teknik dan usaha telah dikembangkan untuk mendapat gambar dan analisis bagaimana proses analisis terbentuknya *wake* dan peluruhan vorteks tersebut, dan mengkarakteristikkannya untuk berbagai kondisi aliran fluida.

Karakteristik yang menjadi “*signature*” dari setiap benda yang dikenai aliran fluida ini, diperkenalkan oleh Theodore von Karman pada tahun 1912. Awalnya dia menganalisis *wake* yang terbentuk di belakang sebuah benda yang dialiri fluida dan menghubungkannya dengan *drag*. Belakangan, dia mendapatkan sebuah fenomena yang berbeda, dan melihat vorteks yang terkonsentrasi pada *wake* lepas/luruh dan hanyut ke hilir aliran dari sisi berlawanan, membentuk barisan vorteks positif dan

negatif. Sehingga penelitian tersebut beralih kepada stabilitas antara pusat-pusat vorteks yang hanyut di belakang silinder. Sebenarnya formasi vorteks di belakang sebuah silinder telah mulai diidentifikasi oleh Strouhal (1878) pada waktu dia mengukur frekuensi bunyi yang timbul pada senar harpa yang dihembus udara. Lord Rayleigh menghubungkan antara frekuensi yang terbentuk dengan kecepatan aliran dan diameter senar (*bluff body*), menormalisasi bilangan Strouhal, $S=fD/U$, di mana D merupakan

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

karakteristik panjang, dan U merupakan kecepatan aliran, terhadap bilangan Reynolds.

Wake yang terbentuk di belakang *bluff body* mempunyai keterkaitan langsung pada bidang engineering. Pergantian vorteks yang luruh di belakang silinder, dalam bentuk konfigurasi peluruhan vorteks klasik, menyebabkan fluktuasi gaya pada arah melintang aliran dan dapat mengakibatkan getaran pada struktur, *acoustic noise*, resonansi, pada beberapa kasus dapat memicu kehancuran.

Teknik visualisasi aliran dipercaya banyak orang dapat membantu di dalam analisis aliran fluida yang melewati/bergerak pada permukaan benda padat. Sepanjang sejarah aerodinamik dan hidrodinamika usaha-usaha ini telah menjadi perhatian yang serius untuk membuat bagaimana pola aliran dapat dilihat dan dianalisis dengan jelas dan tepat, terutama pada aliran yang sangat kompleks dan rumit. Di samping itu, dijadikan inspirasi untuk mencari model atau teori baru tentang aliran fluida, dan untuk menverifikasi keberadaan asas-asas fisik.

Salah satu pertimbangan yang penting dalam setiap metoda visualisasi aliran fluida adalah “*bagaimana cara untuk mendapatkan gerakan aliran fluida, dan bagaimana pola aliran fluida tersebut dapat diinterpretasikan*”. Jika sebuah partikel dapat diikuti pada selang waktu tertentu, maka *trajectory* partikel itu dapat dicatat atau direkam. Pada teknik visualisasi dengan menggunakan asap, jalur-jalur asap yang diperoleh merupakan sebuah garis gores (*streak-line*). Kalau waktu garis-garis asap tersebut dapat dihentikan sesaat, maka waktu garis gores dapat dihasilkan, akan tetapi hasil ini tidak dapat menentukan arah aliran fluida bergerak, hanya menghasilkan rentetan-posisi sesaat dari partikel fluida. Sehingga tidak banyak yang dapat diinterpretasikan lebih jauh. Di samping itu kenyataan dari hasil-hasil eksperimen partikel-partikel fluida hanya mengelompok dalam bentuk garis hanya sesaat, di mana gradien kecepatan/tekanan cukup besar untuk mempertahankan garis alir, tidak lama sesudah ini partikel-partikel tersebut menyebar, ber-difusi ke segala arah.

Visualisasi dari hasil eksperimen numerik mempunyai kemampuan yang berbeda dibandingkan dengan hasil visualisasi eksperimen murni di dalam *wing* dan *water tunnel*, karena di dalam simulasi numerik posisi-posisi partikel fluida ditentukan oleh lebih dahulu oleh persamaan-persamaan yang membentuk aliran fluida, maka posisi-posisi, besar, dan arah gerakan fluida dapat ditentukan dari hasil proses iterasi simulasi numerik, sehingga karakteristik-karakteristik aliran seperti garis alir (*stream line*), garis gores (*streak line*), dan garis lintas (*path line*) dapat dengan mudah ditampilkan. Hal ini tidak terlepas dari ditemukan berbagai model turbulen beberapa tahun belakangan ini untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes. Kemampuan model, metoda iterasi, dan kecepatan komputer dalam komputasi serta simulasi telah memberikan kemudahan dalam memahami perilaku dan pola aliran.

Seperti halnya hasil pemotretan, di dalam hasil visualisasi numerik antara ruang dan waktu juga dibekukan menjadi satu, setiap iterasi yang dilakukan dilaksanakan pada selang waktu tertentu. Selang waktu (*time step*) tersebut diatur sedemikian rupa sehingga *time scale* tidak terlalu sempit dan tidak terlalu besar. Hasil gambar dari pemotretan maupun hasil analisis numerik memberikan lebih banyak data, dan lebih presisi. Masalah akurasi sangat ditentukan oleh hasil pemilihan model turbulen yang tepat, untuk aplikasi tertentu dan sesuai dengan yang dibutuhkan. Kesalahan dalam memilih model turbulen akan memberikan analisis yang menyimpang dari hal sebenarnya. Oleh sebab itu, setiap hasil analisis numerik biasanya didampingi dari hasil verifikasi dan atau validasi eksperimen.

Eksperimen numerik berikut ini ditujukan menganalisis visualisasi numerik untuk mendapatkan

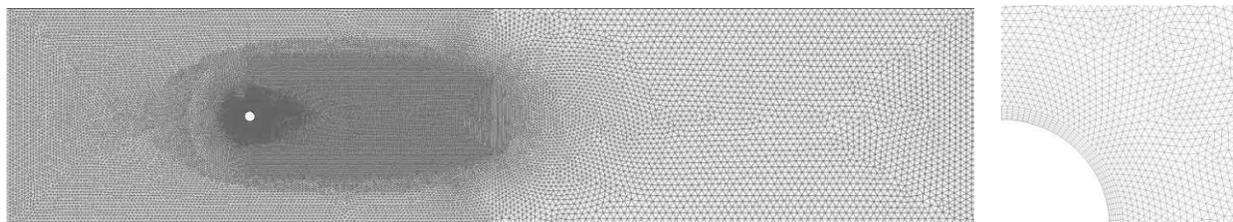
frekuensi peluruhan vorteks (direpresentasikan dengan bilangan Strouhal) dari sebuah silinder bulat pada Reynolds 6000 (Pemilihan bilangan Reynolds ini hanya sekedar untuk proses validasi dengan hasil eksperimen). Pada bilangan Reynolds ini telah dimulai terjadinya instabilitas separasi lapisan geser dari dinding silinder, disebut juga sebagai regim Schiller-Linker di mana dimulai kenaikan *coefficient drag* pada silinder [1]. Analisis hasil eksperimen numerik dilakukan dengan mengukur terhadap spasi vorteks yang terbentuk di dalam lintasan peluruhan vorteks. Jika perioda peluruhan vorteks adalah T , dan udara akan bergerak sejauh UT dalam waktu T . Jika αU adalah rata-rata kecepatan aliran *wake*, maka panjang spasi dari *loop* vorteks adalah $\lambda \equiv UT - \alpha UT = (1 - \alpha)UT$ and bilangan Strouhal dapat dinyatakan, $S = fD/U = (1 - \alpha)D/\lambda$, di mana U adalah kecepatan rata-rata aliran fluida, D adalah diameter silinder bulat, f adalah frekuensi peluruhan vorteks, dan T adalah perioda satu gelombang peluruhan vorteks.

2. MODEL NUMERIK

Persamaan *Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stoke (URANS)* yang terdapat di dalam *code* salah satu program numerik komersial dipakai di dalam analisis ini dengan menggunakan varian *k-ε Renormalization-Group (RNG)*. Varian ini cocok untuk *shear flow* yang kompleks dan melibatkan *rapid strain, moderate swirl, vortices*, dan *transitional flows* lokal (mis.: separasi lapisan batas, *massive separation* dan *vortex-shedding* di belakang *bluff bodies, stall* pada *wide-angle diffusers*, serta sistem ventilasi ruangan).

Diameter silinder yang diuji sebesar 22 mm, dengan *interval count* sebanyak 128 titik atau dengan *interval size* sebesar 0.54 mm. Ketebalan lapisan batas di-*set* sedemikian rupa sebesar 1.36 mm. Pengaturan ini didasarkan prediksi ketebalan lapisan batas berdasarkan persamaan Blasius untuk ketebalan lapisan batas, dan jauh lebih kecil dari batas minimum $y^+ = yu_t/\nu$ yang harganya sebesar 0.01%D untuk bilangan Reynolds antara 10^3 s/d $1.4 \cdot 10^5$. dengan jarak terkecil pada permukaan silinder 0.2 mm.

Pengujian numerik diatur sedemikian rupa, menyerupai pengujian di *force draft wind tunnel*, di mana bagian hulu di-*set* sebagai *velocity inlet*, dan bagian hilir di-*set* sebagai *pressure outlet*. *Boundary condition* pada kondisi *outlet* diposisikan pada kondisi *atmospheric*.



Gambar 1. Pengaturan domain komputasi

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

Penempatan silinder yang berukuran 22 mm ditempatkan pada posisi 22.72 kali diameter silinder hulu silinder, serta panjang setelah benda uji 68.18 kali diameter. Pengaruh *wall effect* pada bagian atas dan bawah silinder dianggap tidak terjadi, karena jaraknya telah melebihi 5 kali diameter benda uji.

Rincian dari pemilihan *grid* dan strategi susunan *grid* seperti terlihat pada Tabel 1. Independensi hasil simulasi terhadap *meshing/grid* sangat menentukan, dan merupakan prasyarat sebelum sebuah simulasi dilakukan [2]. Setelah stabilitas untuk persamaan *continuity*, kecepatan arah x , dan y , serta harga residual k , ε tidak berubah terhadap proses iterasi dengan konvergen di bawah 10^{-4} untuk persamaan *continuity* menghasilkan besar *coefficient drag* seperti terlihat pada Tabel 2. Berdasarkan tabel tersebut maka eksperimen dilakukan pada strategi *meshing* pertama.

Tabel 1 Strategi susunan *grid*

| <i>Edge</i> | <i>Internal count</i> | | |
|--------------------------------------|-----------------------|--------------|---------------|
| | <i>Mesh 1</i> | <i>Mesh2</i> | <i>Mesh 3</i> |
| Silinder | 128 | 85 | 64 |
| Median Setengah lingk. luar silinder | 64 | 43 | 32 |
| Median bagian tengah | 46 | 31 | 23 |
| Median bagian atas | 21 | 14 | 11 |
| Median bagian hilir | 21 | 14 | 11 |
| Median horizontal bagian atas | 135 | 90 | 68 |
| Median horizontal bagian bawah | 135 | 90 | 68 |
| <i>Inlet</i> | 65 | 43 | 33 |
| Dinding hulu bagian atas | 135 | 90 | 68 |
| Dinding hulu bagian bawah | 135 | 90 | 68 |
| Dinding hilir bagian atas | 65 | 43 | 33 |
| Dinding hilir bagian bawah | 65 | 43 | 33 |
| <i>Outlet</i> | 35 | 23 | 18 |

Tabel 2. *Grid impendence* dari strategi susunan *grid*

| | <i>Coef. Drag</i> | Kesalahan (%) |
|----------------------------------|-------------------|---------------|
| Weiselsberger[3], &ESDU 80025[4] | 1.1 | - |
| Young[5],2D | 1.59 | |

| | | |
|--|------------|------------|
| URANS,k- ω Re=3900) | | |
| Young[5],2D URANS, - ω Re=3900) | 1.32 | |
| Young[5], ES, (Re=3900) | 1.04 | |
| Mesh 1 | 0.98877267 | 0.2704207 |
| Mesh 2 | 0.92018163 | -6.6853267 |
| Mesh 3 | 1.04936381 | 6.4149061 |
| Rata-rata | 0.98610604 | |

Tabel 3 Persamaan-persamaan yang dipakai di dalam simulasi

$$I = \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16(\text{Re}_{DH})^{-1/8}$$

Intensitas Turbulen (1)

$$l = 0.07D_{wt}$$

Turbulen length scale (l) (2)

$$u_{avg} = \frac{\text{Re} \mu}{\rho D}$$

u_{avg} (3)

$$k = \frac{3}{2}(u_{avg})^2$$

Turbulen energi kinetik (4)

$$\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}, C_{\mu} = 0.09$$

Dissipation rate (5)

Solusi di-instigasi dengan cara memulai iterasi dengan *steady state* dan dilanjutkan dengan *unsteady state* dengan tU/D sebesar 0.393915 s, hal itu berarti untuk satu detik membutuhkan *time step* sebanyak 436.73 kali. Satu kali *time-step* dilakukan iterasi sebanyak 50 kali, sampai di mana konvergen persamaan *continuity* di bawah 10^{-3} . Inialisasi dari solusi di-*set* sesuai dengan kondisi *velocity inlet* di mana untuk bilangan Reynolds 6000 fluida udara mempunyai kecepatan 3.78 m/s, intensitas turbulen yang mungkin terjadi sesuai dengan kondisi *wind tunnel* adalah 0.05393, *length scale* turbulensi sebesar 0.0325, *turbulent kinetic energy* sebesar 0.06249, serta *dissipation rate* sebesar 0.08150. Semuanya didasarkan persamaan-persamaan pada Table 3.

Untuk mendapatkan data yang dibutuhkan proses iterasi harus dilakukan sampai stabilitas iterasi tercapai. Kondisi tersebut tercapai sampai diperkirakan waktu nyata (*real time*) dari udara mengalir di dalam terowong angin berlansung setelah 20 detik. Kalau satu kali iterasi membutuhkan waktu ± 2 detik, hal tersebut proses perhitungan mencapai 242.6278 jam atau sepuluh hari lebih

3. HASIL DAN DISKUSI

Visualisasi aliran merupakan alat yang berguna di dalam riset dinamika fluida, walaupun kadang-kadang agak menyesatkan. Walaupun sedikit membingungkan, untuk kasus *unsteady streamline* jauh berbeda dengan *steak-line*. Di dalam laboratorium, lebih mudah didapatkan visualisasi *streak-lines* dengan cara menyuntikan *dye* atau asap ke dalam aliran pada lokasi tertentu di dalam aliran..



(a)

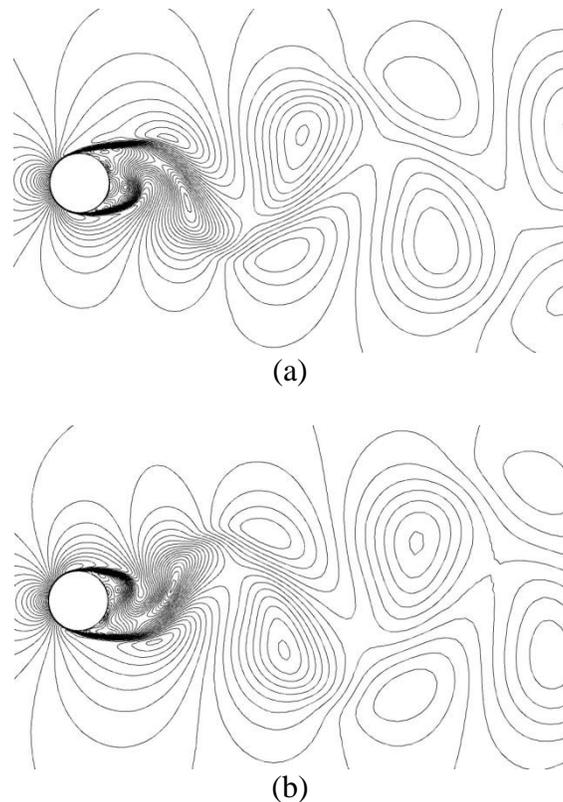


(b)

Gambar 2. Peluruhan vorteks pada silinder bulat pada bilangan Reynolds 6000, (a) baris atas dan (b) baris bawah[6].

Sehingga, ketika meneliti sebuah *streak-line*, seseorang tidak akan tahu apakah telah mengalami distorsi oleh pembentuk pola, atau *steak-line* yang terbentuk merupakan sisa/jejak yang telah ditinggalkan oleh udara yang mengalir. Walaupun begitu, untuk dapat mengetahui apa yang sebenarnya terjadi, sudah seharusnya penjejak aliran (asap atau *dye*) diinjeksikan di dekat lokasi yang diamati. Teknik penjejak asap, *smoke wire* merupakan metoda yang tepat untuk hal ini. Pada Gambar 2 diperlihatkan hasil penjejak asap dengan menggunakan teknik *smoke wire* untuk bilangan Reynolds 6000

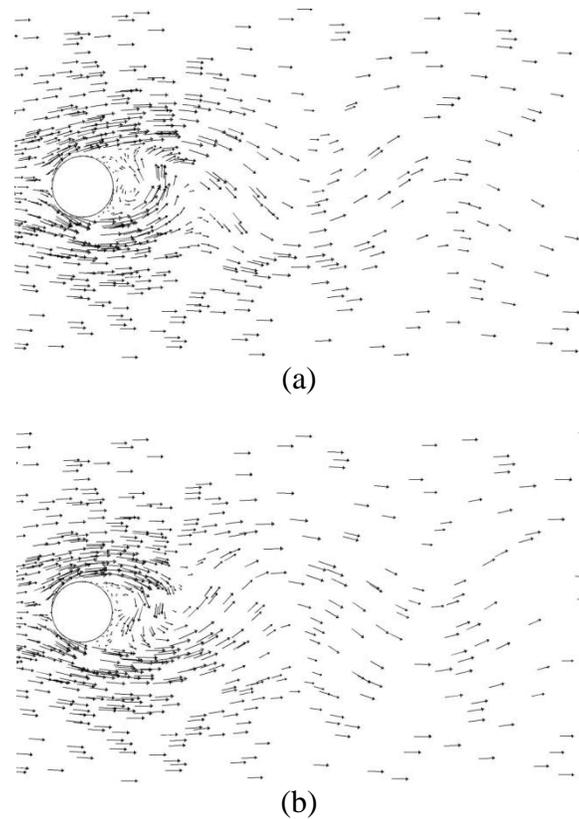
Kedua potret tersebut mempunyai struktur peluruhan vorteks yang sama, akan tetapi berbeda arah. *Wake* yang terbentuk dari *bubbles* pertama dan kedua, pada daerah bertekanan rendah di belakang silinder. *Bubbles* tersebut memanjang dan luruh ke hilir aliran. Vorteks yang terbentuk di dalam daerah bertekanan rendah hanyut, dan menjadi lebih besar. Ketika sepasang vorteks hanyut, *wake* akan memanjang, sehingga menghasilkan setengah panjang gelombang. Gelombang penuh akan tercapai apabila dibentuk oleh dua buah vorteks.



Gambar 3. Kontur kecepatan peluruhan vorteks pada silinder

Gambar 3 diperlihatkan hasil simulasi numerik untuk bilangan pada bilangan Reynolds yang sama. Terlihat keserupaan antara *streaklines* yang dibentuk oleh asap dengan kontur kecepatan aliran udara/fluida. Garis-garis pada gambar tersebut menunjukkan daerah-daerah yang mempunyai kecepatan yang sama. Berbeda dengan hasil visualisasi asap, visualisasi kontur kecepatan ini memberikan definisi daerah-daerah yang mempunyai kecepatan yang sama, dan besaran skalarnya, akan tetapi tidak dapat menentukan ke mana arah fluida tersebut bergerak. Walaupun Begitu untuk daerah-daerah yang mempunyai strain rate yang cukup besar antara *streak line* dan *stream lines* cenderung berimpit.

Untuk dapat melihat ke mana arah fluida tersebut bergerak harus dilihat dari diagram vektor kecepatan seperti Gambar 4. Vektor-vektor ini merupakan representasi dari garis-garis alir (*streamline*), yang menunjukkan kecepatan sesaat setiap partikel fluida pada posisi tersebut. Akan tetapi arah dan besar kecepatan akan berubah seketika posisi dan waktu alir fluida berubah, jadi representasi sesaat tidak dapat menunjukkan kondisi keseluruhan pengujian. Besar dan arah kecepatan aliran udara dapat dilihat secara langsung dari panjang dan besar dari garis-garis vektor tersebut



Gambar 4. Vektor kecepatan peluruhan vorteks silinder

Tabel. 3 Perbandingan bilangan Strouhal hasil pengukuran visualisasi numerik dengan para peneliti lain.

| | Re | Strouhal number, (St) |
|--|-------|-----------------------|
| Analisa visualisasi numerik, <i>sekarang</i> | 6000 | 0.2115521 |
| Young[5], 2D | 3900 | 0.235 |
| URANS, k- ω | | 0.223 |
| Young[5], 3D | | 0.212 |
| URANS, k- ω | | |
| Young[5], LES | | |
| Leonanda[6] | 6000 | 0,232 |
| Gerald[7] | 5500 | 0,2085 |
| | 6000 | 0,2085 |
| | 6500 | 0,21 |
| Roskho [8] | 5900 | 0,2021 |
| Jamie and son[9] | 5000 | 0,214 |
| | 10.00 | 0,2084 |
| | 0 | |

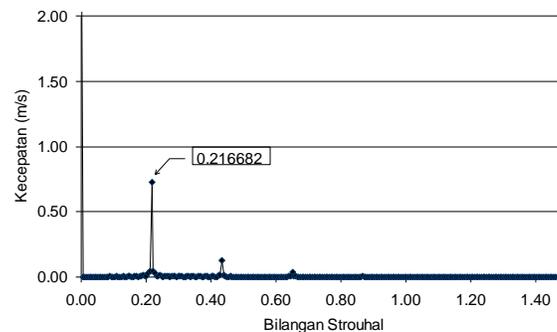
Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

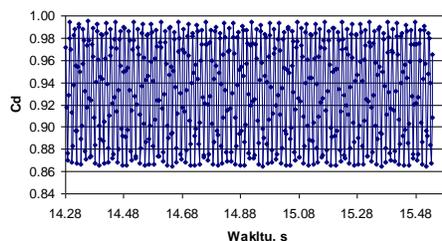
| | | |
|----------------|---------|------|
| Fluent, Manual | laminar | 0.24 |
|----------------|---------|------|

Struktur peluruhan vorteks dari pengukuran inti vorteks dari hasil visualisasi numerik menghasilkan hasil yang sama dengan para peneliti lain, baik secara eksperimental maupun numerik (Tabel 3). Hasil pengukuran ini diperoleh dengan cara mendeteksi kecepatan peluruhan *wake* pada posisi 3D di belakang silinder, dan membandingkan dengan kecepatan *free stream*, serta mengukur panjang/rentang yang terukur antara dua inti vorteks di dalam gambar kontur kecepatan, atau puncak gelombang pada vektor kecepatan, dengan demikian bilangan Strouhal, $St=(1-\alpha)D/\lambda$ dapat ditentukan. Keistimewaan dalam hasil visualisasi numerik pada posisi, dan kondisi yang sama selalu menghasilkan data yang sama, hal ini disebabkan oleh bangun model persamaan turbulen itu sendiri, karena setiap hasil yang diperoleh dari perhitungan numerik merupakan hasil perata-rataan ruang dan waktu.

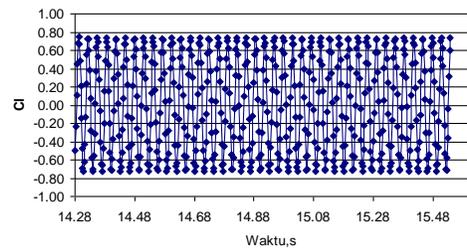
Hasil monitor terhadap peluruhan vorteks pada jarak 3D di belakang silinder dapat dilihat pada Gambar 5, di mana peluruhan vorteks yang dinyatakan dengan bilangan Strouhal. Hasil pengukuran mempunyai hasil yang cocok dengan hasil eksperimen di dalam laboratorium, dan hasil analisis numerik yang dilakukan di dalam penelitian ini. Fluktuasi *drag*, *lift*, dan tekanan pada titik *stagnasi*, serta *base pressure* terlihat seperti Gambar 6 *a,b,c*, dan *d*. Sesuai dengan fenomena fisik peluruhan vorteks pada silinder, terlihat eksperimen numerik ini bisa memperlihatkan terjadinya getaran pada silinder (*vortex induced vibration*) sebagai akibat Fluktuasi dari *drag* dan *lift*. Instabilitas aliran di sekitar silinder juga terlihat dari instabilitas tekanan pada titik stagnasi serta *wake* di belakang silinder.



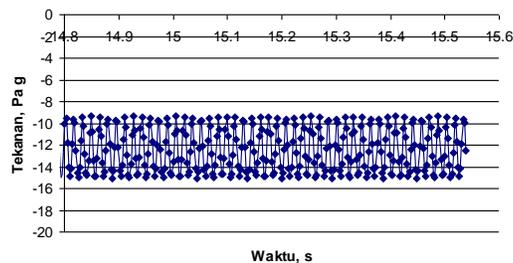
Gambar 5. Bilangan Strouhal peluruhan vorteks di belakang silinder.



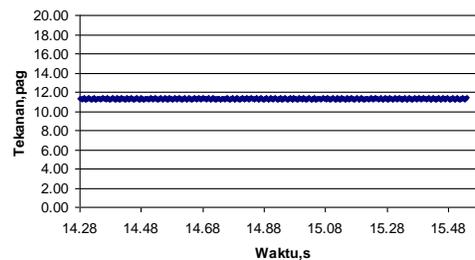
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 6. Fluktuasi koefisien *drag*(a), *lift*(b), dan *base pressure*(c) serta tekanan stagnasi(c) yang dialami silinder bulat pada Re 6000.

4. KESIMPULAN

Hasil visualisasi numerik terhadap peluruhan vorteks di belakang silinder memberikan harga yang sama dengan hasil eksperimen di dalam laboratorium, dan hasil pengukuran peluruhan vorteks di belakang silinder. Teknik-teknik ini dapat digunakan secara tepat dan cepat untuk menentukan berapa frekuensi peluruhan vorteks yang terbentuk di belakang silinder, sehingga tidak membutuhkan perhitungan yang rumit, dan peralatan yang sensitif di dalam laboratorium. Simulasi numerik dapat mendeteksi penyebab getaran yang terjadi di silinder bulat yang berada di dalam aliran fluida.

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Williamson, C.K.G., 1996, *Vortex dynamics in the cylinder wake*, Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 28: 477-539.
- [2] Freitas, C.J., 1999, *The Issue of Numerical Uncertainty*, Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, Melbourne, Australia.
- [3] Wieselsberger, C., 1922, *New Data on The Laws of Fluid Resistance*, NACA TN 84.
- [4] Engineering Sciences Data Unit (ESDU) 80025
- [5] Young, M.E., and Ooi, A., 2007, *Comparative Assessment of LES and URANS for Flow Over a Cylinder at a Reynolds Number of 3900*, 16th Australian Fluid Mechanics Conference, Gold Coast, Australia.
- [6] Leonanda, B.D., Rafika, D., and Iqromi, I. 2005, *Double Vortices on Circular Cylinder at Reynolds Number 6000*, J. Ilmiah POROS, J. Teknik Mesin Tarumanagara, Vol. 8, No.4.
- [7] Gerrads, J.H., 1965, *A Disturbance-sensitive Reynolds Number Range of The Flow Past a Circular Cylinder*, J. Fluid Mech.:1:187-196.
- [8] Roshko, A., 1961, *Experiments on the flow past a circular at very high Reynolds number*, J. Fluid Mech. J. Fluid Mech. Vol. 10.
- [9] Jaime S. Son, and Thomas J. Harantty, 1969, *Velocity gradients at the wall for flow around a cylinder at Reynolds numbers from 5×10^3 to 10^5* , J. Fluid Mech., Vol. 35, Part 2, :353-368.