

Vortex Shedding Passing Through Four Cylinders

Benny Dwika Leonanda

Jurusan Teknik Mesin Universitas Andalas-Padang

*Corresponding author: bdleonanda@gmail.com

Abstract. The phenomena of vortex shedding pass through a collection of structure found in many application of engineering in the world. In addition to affect of drag, also affects turbulence, structural stability, and create a nuisance disorder around of the structure. This becomes the base of a study that directly relates to the flow through the arrangement of cylindrical body. The study was conducted numerically by varying the distance between the cylinders by using the aspect ratio between cylinder flow from 0D to 2D with intervals of 0,25D for four cylinders arranged square. The 23 mm cylindrical body, as well as the Reynolds rested at 7000. The sflow of air is modeled by k-epsilon RNG and the initial guess is based on calculations using Reynolds and cylinder diameter as reference. Iterations in the simulation are performed until convergence or stability of the residual has been achieved. The results of simulation obtained that visually, the flow through the cylindrical arrangement is divided into three different pattern with the aspect ratio range of 0D to 0.5D up to 1.5D, and 1.75D up to 2D. Differences in patterns are also evidenced by the division of the three regimes of vortex by shedding frequencies. The vortex shedding interval decreased with increasing aspect ratio. Meanwhile, the wake generated behind the cylindrical arrangement has two different tendencies which on the front wire cylinder the wake width formed tends to be stable against change of the aspect ratio. While on the back columns cylinder the aspect ratio decrease width of wake. By varying the distance between the cylinders subjected to airflow, the flow characteristics, pressure changes, vortex shedding frequency, wake region, and the position of the flow separation point and the different flow patterns are obtained.

Abstrak. Fenomena peluruhan vorteks melewati kumpulan struktur banyak ditemukan di dalam aplikasi keinsinyuran di dunia. Selain mempengaruhi *drag*, juga mempengaruhi percampuran turbulensi, kestabilan struktur, serta membuat gangguan kebisingan di sekitar struktur. Salah satu penyebab hal tersebut adalah jarak antar silinder, selain komposisi susunan silinder. Dengan bervariasi jarak antar silinder yang dikenai aliran udara diharapkan didapatkan karakteristik aliran, perubahan tekanan, frekuensi peluruhan vorteks, daerah *wake*, dan posisi titik separasi aliran serta perbedaan pola aliran. Penelitian dilakukan secara numerik dengan bervariasi jarak antar silinder dengan menggunakan acuan jarak antar silinder dari 0D s/d 2D dengan interval 0,25D untuk empat buah silinder yang tersusun secara bujur sangkar. Ukuran silinder 23 mm, serta bilangan Reynold yang diuji pada 7000. Aliran dimodelkan dengan menggunakan *k-ε RNG* dan tebakan awal didasarkan kepada perhitungan menggunakan Reynold dan diameter silinder sebagai acuan. Iterasi pada simulasi dilakukan hingga konvergensi terjadi atau kestabilan residual iterasi tercapai. Hasil simulasi diperoleh bahwa secara visual, aliran melewati kumpulan silinder terbagi menjadi 3 pola berbeda dengan rentang jarak antar silinder 0D hingga 0,55D, 0,75D, hingga 1,5D dan 1,75D, hingga 2D. Perbedaan pola juga dibuktikan oleh terbaginya tiga rezim frekuensi peluruhan vortek tersebut di atas. Interval peluruhan vorteks mengalami penurunan seiring dengan peningkatan jarak antar silinder. Sementara itu, wake yang ditimbulkan di belakang susunan silinder memiliki dua kecenderungan yang berbeda dimana pada silinder kolom depan lebar wake yang terbentuk cenderung lebih stabil terhadap perubahan jarak antar silinder. Sementara pada silinder kolom belakang peningkatan jarak antar silindier menyebabkan pengurangan lebar *wake*.

Keywords: Peluruhan vorteks, silinder, kumpulan silinder

© 2018. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Sebuah benda yang dilalui aliran dari luar permukaan dapat dikelompokkan atas dua yaitu sebagai *bluff body*, dan *streamlines (aerodynamic)*

body. Kedua jenis benda tersebut dibedakan atas perubahan tekanan, *wake* dan *drag* yang dihasilkan di sekitar dan di belakang kedua benda tersebut saat dilewati oleh aliran fluida. Berdasarkan pada pemahaman tersebut, maka *bluff body* dapat

didefinisikan sebagai sebuah benda yang ditandai perubahan tekanan mendadak di permukaan benda, dan terbentuknya *wake* yang besar di belakang benda serta terbentuk daerah imajinir adanya pemisahan (*separated*) aliran, sehingga *drag* yang dihasilkannya pun relatif besar ^[1]. Sebagai contoh : benda benda bersegi, gedung, jembatan, dan sistem perpipaan.

Kajian aliran fluida mengenai *bluff body* telah dipelajari para ilmuwan beberapa dekade terakhir, hal ini disebabkan sangat banyak bersentuhan dengan langsung dengan berbagai bidang *engineering*. Salah satu kajian yang sangat penting mengenai *bluff body* adalah kajian tentang struktur berkelompok seperti bangunan-bangunan tinggi di kota-kota besar, sistem perpipaan, dan struktur-struktur *engineering* lainnya. Kajian ini tentu terkait dengan dengan ketahanan serta kemampuan struktur menghadapi aliran fluida, dan dengan peningkatan pengurangan *drag*, efisiensi, kebisingan, serta kenyamanan.

Pada perkembangannya, salah satu bentuk dari *bluff body* yang menarik minat banyak peneliti untuk mengamatinya adalah benda silinder. Hal ini dikarenakan aplikasinya yang sangat luas digunakan dalam berbagai bidang-bidang *engineering*.

Terdapat sederetan nama ilmuwan yang telah melakukan penelitian mengenai peristiwa peluruhan vorteks di belakang silinder ini, salah seorang yang penting diketahui adalah Benard (1908) dan Theodore Von Karman (1911). Keduanya melakukan pengamatan yang relatif sama terhadap silinder yang dikenai aliran fluida dengan bilangan Reynolds yang relatif rendah di bawah nilai bilangan Reynolds 300. Mereka menemukan suatu skema peluruhan vorteks yang berupa vorteks di belakang silinder yang kemudian dikenal sebagai Karman-Benard *eddy street* ^[1].

Belakangan ini bermunculan peneliti lain dengan berbagai fokus pengamatan yang berbeda, baik pengamatan secara eksperimen maupun numerik. T.A Johnson dan V.C Patel (1998), M.C Thompson et.al (2000), Tomboulides dan Orszag (2000) melakukan penelitian secara numerik untuk mendapatkan gambaran aliran fluida berupa terjadinya separasi dan *wake* aliran yang melewati sebuah *bluffbody* dengan penampang bulat pada rentang bilangan Reynolds kurang dari 1000. Ketiganya mengemukakan pernyataan yang hampir sama yaitu terjadinya separasi pada bilangan Reynolds rendah sekitar 20 dengan aliran *axisymmetric* terjadi pada rentang sekitar 210 ^[2-3]. Shade Rahmawati (2012) melakukan studi secara numerik tentang *vorteks induced vibration* pada 4

buah silinder yang disusun secara *in-line* dengan variasi *spacing ratio* pada bilangan Reynolds 100, 200, dan 300 ^[5]. Kapil Varshney (2012), melakukan eksperimen dengan bilangan Reynolds 100, 400, 500, 700 dan 1000, dengan berbagai variasi sudut serangan. Berdasarkan pengamatannya, diterangkan bahwa kestabilan vorteks tergantung pada sudut serang dan bilangan Reynolds ^[6]. Puneeshwar dan Govardhan melakukan penelitian numerik berkaitan dengan susunan 2 buah silinder yang tersusun secara *side-by-side* (2011) pada bilangan Reynolds 200 dengan variasi rasio jarak antar silinder 1.5, 2.0, 3.0 dan 4.0 D. Mereka mengemukakan bahwa semakin tinggi rasio jarak, maka gaya *repulsive* antar silinder semakin berkurang, selain itu dalam kesimpulannya dinyatakan bahwa bilangan Strouhal pada rasio jarak tersebut relatif stabil pada 0.21 ^[18].

Penelitian lainnya dilakukan oleh Benny D.L ^[7]. Ia melakukan penelitian secara numerik berkaitan dengan pengamatan peluruhan vorteks di belakang sebuah silinder tunggal. Selain penelitian numerik, dilakukan penelitian secara eksperimen untuk mengamati struktur peluruhan vorteks berupa frekuensi vorteks di belakang susunan silinder dengan rentang bilangan Reynolds 20000, 30000, dan 40000 dengan variasi sudut serang 0, 45, dan 22.5. Dalam kesimpulannya dinyatakan bahwa karakteristik susunan silinder dalam beberapa kondisi memiliki kesamaan dengan satu silinder dalam kaitannya dengan frekuensi peluruhan *vorteks* di belakang silinder tersebut, namun penelitian tersebut tidak secara tegas menerangkan kriteria kondisi yang sama tersebut dikarenakan keterbatasan dalam peralatan visualisasi eksperimen ^[8].

Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, dapat dipahami bahwa pengamatan terkait hubungan karakteristik struktur peluruhan *vorteks* dengan jarak antar silinder dari susunan silinder belum sepenuhnya mengungkapkan keadaan aliran *vorteks* pada rentang rasio jarak dan bilangan Reynolds tertentu. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan *aspect ratio* mulai dari rasio 0 hingga 2D pada susunan empat buah silinder yang dilakukan secara simulasi dengan menggunakan komputer. Penelitian simulasi dipilih karena kepraktisan dan kemampuan pengolahan dan menampilkan datanya yang lebih baik dari penelitian secara eksperimen. Dengan mengambil satu data eksperimen sebagai acuan, maka dapat diperoleh berbagai variasi keadaan yang didasarkan pada data eksperimen tersebut.

Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan mengidentifikasi permasalahan yang akan diteliti dengan memanfaatkan bantuan komputer dan software komersial yaang terkait dengan komputasi dinamika fluida, untuk mengamati pola aliran yang terkait dengan distribusi kecepatan, titik stagnasi, separasi aliran, dan tekanan, serta perbandingan karakteristik perlakuan vorteks yang berhubungan dengan frekuensi peluruhan vorteks bilangan Strouhal dan panjang interval wake. Parameter pengujian numerik digunakan di dalam uji numerik seperti sebagai berikut:

Tabel 1. Parameter pengujian numerik

Parameter		
Panjang daerah pengamatan	1 m	
Lebar	0.45 m	
Diameter silinder	0.023 m	
Tekanan	97000 Pa	
Temperatur	27° C	
Massa jenis udara	1.19 kg/m ³	
Viskositas dinamik udara	0.000018 kg/m.s	
Fluida	udara	

Panjang seksi hulu dan hilir aliran berbeda berdasarkan penempatan jarak antar silinder. Parameter aliran pada simulasi dirancang sedemikian rupa dengan menggunakan nilai tetapan massa jenis udara $\rho = 1.19 \text{ kg/m}^3$, viskositas dinamik udara $\mu = 0.000018 \text{ m}^2/\text{s}^2$, dan D_1 , D_2 secara berturut-turut menyatakan diameter hidrolis dengan acuan keempat silinder (0.065 m) dan acuan RE satu silinder (0.023 m) maka konversi bilangan Reynolds struktur gabungan silinder ditentukan dengan cara dapat dihitung sebagai berikut ini.

$$Re_1 = \frac{\rho U D_1}{\mu} \quad (1)$$

Dimana Re_1 merupakan bilangan Reynolds mula-mula = 20000 (sebagai referensi), U menyatakan kecepatan aliran (m/s).

$$20000 = Re_1 = \frac{\rho U D_1}{\mu};$$

$$Re_2 = \frac{\rho \times U \times D_2}{\mu} = 7076,933 \approx 7000$$

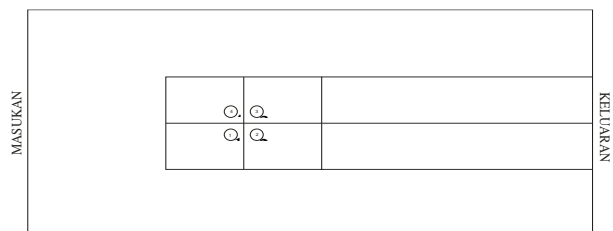
Setelah konversi bilangan Reynolds dilakukan, maka diperoleh nilai bilangan Reynolds yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu 7076.923. Kemudian berdasarkan bilangan Reynolds ini, ditentukan data-data kondisi batas sebagai data awal yang dimasukkan. Dengan massa jenis udara $\rho = 1.19 \text{ kg/m}^3$, μ menyatakan viskositas dinamik udara = 0.000018 kg/m.s, dan $D = D_h$ adalah

diameter silinder = 0.023 m maka data awal kondisi batas pada simulasi ini ditentukan dengan tabel berikut:

Tabel 2. Parameter aliran yang dipakai dalam eksperimen numerik.

Besaran	Rumus	Nilai
Kecepatan rata-rata (U_{avg})	$\frac{Re \times \mu}{\rho \times D_1}$	4.6541 m/s
Intensitas Turbulensi (I)	$0.16 \times (Re)^{-1/8}$	0.0528
Panjang Turbulensi (l)	$0.07 \times D_2$	0.0016 m
Energi Kinetik Turbulen (k)	$\frac{3}{2} (U_{avg} \times I)^2$	0.0907 m ² /s ²
Laju Disipasi Turbulen (ε)	$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}; \varepsilon = 0.09 \text{ m}^2/\text{s}^3$	2.7873

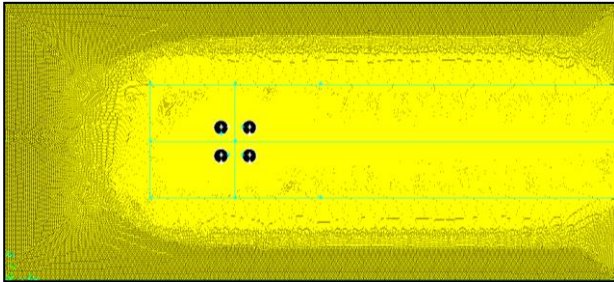
Model simulasi dibuat dengan ukuran bidang kerja 1000 mm x 450 mm. Pada bidang kerja ini, ditempatkan empat buah silinder yang tersusun secara bujur sangkar dengan variasi *aspect ratio* berbeda yaitu : 0 D, hingga 2 D dengan interval 0.25, dimana *aspect ratio* ini menyatakan perbandingan antara jarak dinding luar masing – masing silinder dengan diameternya. Keempat silinder tersebut disusun dengan jarak tertentu dari titik masuk aliran sehingga memungkinkan untuk mengamati peristiwa peluruhan *vorteks* di belakang susunan silinder tersebut secara lebih jelas.



Gambar 1. Konfigurasi Model Susunan Silinder pada Simulasi dengan jarak antar silinder 1D.

Meshing dilakukan dengan membagi *domain* menjadi bagian-bagian kecil sehingga memudahkan dan meningkatkan akurasi hasil perhitungan numerik. Jenis *mesh* yang dipilih adalah *mesh* segitiga (*triangle*), pemilihan ini didasarkan pada pertimbangan efisiensi waktu yang dibutuhkan dalam melakukan iterasi. Pengaturan pada *meshing* dilakukan sedemikian rupa sehingga bagian-bagian yang membutuhkan pengamatan lebih detail dapat diperoleh datanya dengan lebih akurat dengan *skewnes mesh* yang tidak lebih dari 98 % untuk

mengurangi *error* akibat *numerical diffusion*. Sementara untuk bidang tertentu (di dekat dan setelah silinder) ukuran *mesh* dibuat lebih kecil untuk memfokuskan pengamatan. Bentuk dari *meshing* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 *Meshing* Kumpulan Silinder pada jarak 1D

Smoothness (tingkat kehalusan *mesh*) di belakang silinder ketika saat vortek lepas diatur pada interval 4,3,2,1 hingga 0.5 pada permukaan silinder. Strategi *meshing* yang diterapkan di dalam iterasi ini diperhatikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Strategi *Meshing* Kumpulan Silinder

No	Edge	Panjang Edge (mm)	Ukuran Mesh	Titik yang terbentuk
1	Silinder	23	0.5	145
2	Dinding atas	1000	4	250
3	Dinding bawah	1000	4	250
4	Masukan (<i>inlet</i>)	450	4	56
5	Outlet ; A	133	3	44
6	Outlet ; B	184	2	92
7	Tengah ; C	763	1	763

Penentuan bidang batas dan kondisi batas ini didasarkan pada kondisi aliran serta geometri yang akan disimulasikan. Untuk memodelkan aliran melalui kumpulan silinder. Model numerik yang digunakan di dalam simulasi adalah k- ϵ RNG. Hal ini disebabkan aliran yang mengalir merupakan turbulen dan mempunyai vorteks yang mempunyai kemampuan untuk mensimulasi aliran yang mempunyai vorteks, serta daya komputasi yang dibutuhkan adalah medium.

Tahapan iterasi dilakukan dengan cara memasukan tebakan awal pada kondisi batas yang diolah sedemikian rupa oleh solver numerik dengan berbagai persamaan yang berhubungan dengan pemilihan model sehingga menghasilkan nilai realtif mendekati keadaan sebenarnya pada berbagai titik aliran. Angka-angka yang akan dihasilkan berupa data, angka, atau grafik/gambar yang dapat visualisasi yang dapat dianalisa. Parameter yang dipakai dalam iterasi ini ditentukan

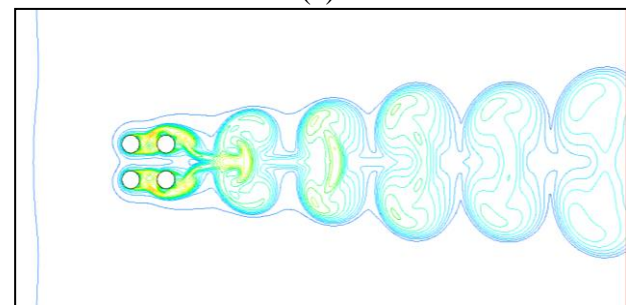
dengan menetapkan bilangan Courant sebesar 1. Dengan besar bilangan Courant tersebut didapat besar time step untuk kecepatan $U = 4.6531$ m/s, $\Delta x = 0.0005$ m, sehingga *time step* diperoleh sebesar 0.0001074 s ≈ 0.0001 s. Iterasi dilakukan setelah semua parameter iterasi diatur, dan sampai kriteria konvergensi dan stabilisasi tercapai pada angka 0.001.

Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi divalidasi dengan hasil eksperimen. Validasi dilakukan dengan membandingkan secara visual kontur aliran yang dihasilkan secara numerik dengan hasil fotografi eksperimen pada bilangan Reynolds yang sama. Perbandingan secara visual dapat diperhatikan dapat dilihat pada Gambar 3.



(a)

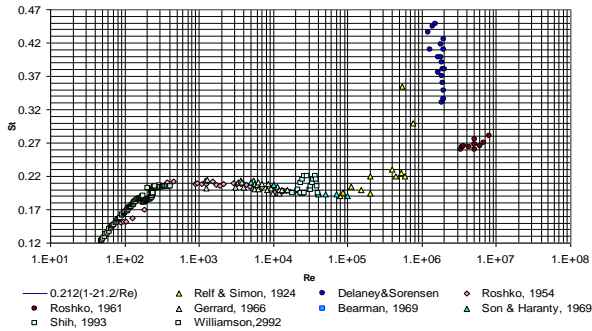


(b)

Gambar 3 Perbandingan Kontur Aliran pada Penelitian Eksperimen^[8] dengan Hasil Simulasi pada jarak antar silinder 1D

Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa secara garis besar, kontur aliran berupa yang diperoleh pada hasil eksperimen pada jarak 1 D menyerupai kontur aliran yang diperoleh dari hasil simulasi/ Pada penelitian eksperimen tersebut bilangan Reynolds yang digunakan adalah 30,000 sementara pada simulasi ini bilangan Reynoldnya adalah 7076.623. Perbedaan bilangan Reynolds ini tidak akan berpengaruh besar pada aliran peluruhan *vorteks* dikarenakan bilangan Reynolds 7076.623 dan 20,000 masih terletak dalam rentang kestabilan hubungan antara Reynolds dan Strouhal yang relatif

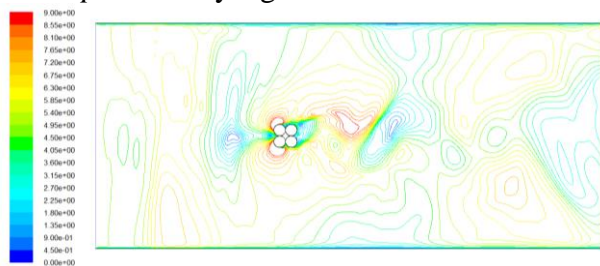
sama yaitu berkisar antara 0.19 s/d 0.21. Grafik kestabilan Strouhal dapat diperhatikan pada Gambar 4.



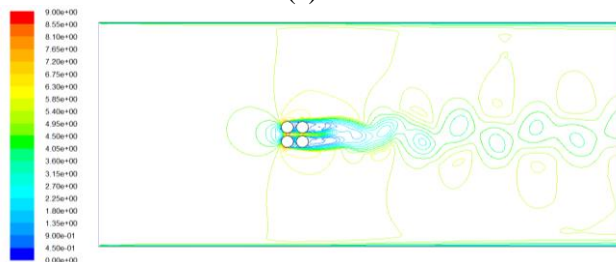
Gambar 4 Hubungan bilangan Reynolds dengan bilangan Strouhal hasil eksperimen para peneliti sebelumnya^[15]

Pada penelitian ini bilangan Strouhal yang diperoleh untuk jarak 1D dengan bilangan Reynolds 7076.923 adalah 0.19007, dimana nilai ini relatif mendekati nilai yang dinyatakan oleh Gerrard pada tahun 1966 sekitar 0.19500 pada satu silinder. Sementara untuk penelitian referensi dengan metode perhitungan Strouhal yang sama yang dilakukan Benny D Leonanda^[8] pada jarak 1D 1.00 dan bilangan Reynolds 30,000 diperoleh nilai bilangan Strouhal 0.219694. Hasil ini dapat diterima sebagai perbandingan karena rentang Reynolds yang digunakan masih berada pada rentang kestabilan 10^3 hingga 10^5 , yang harganya berdasarkan penelitian yang dirangkum pada Gambar 4 berkisar antara 0.18 hingga 0.22.

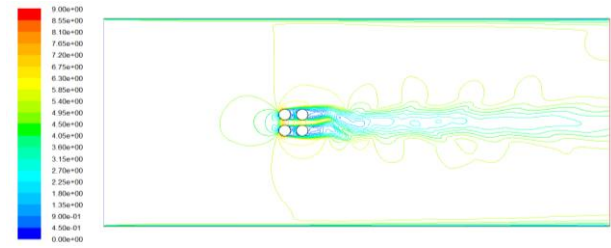
Kontur hasil simulasi menampilkan berbagai visualisasi kontur terkait dengan data dan *aspect ratio* yang diamati.



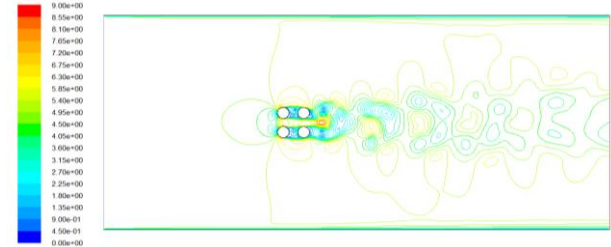
(a) 0D



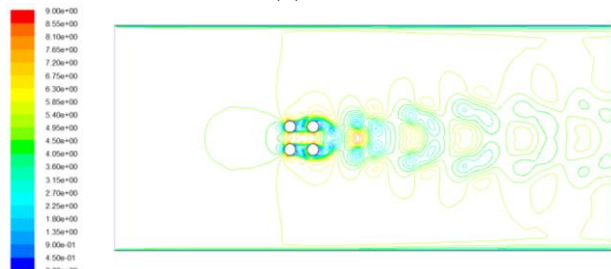
(b) 0.25D



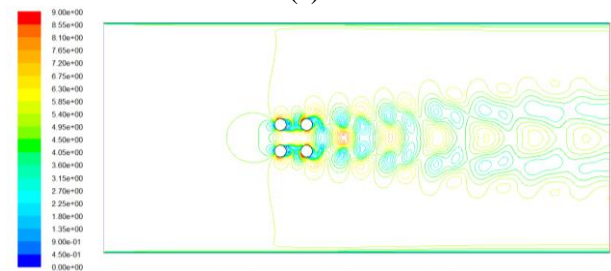
(c) 0.5D



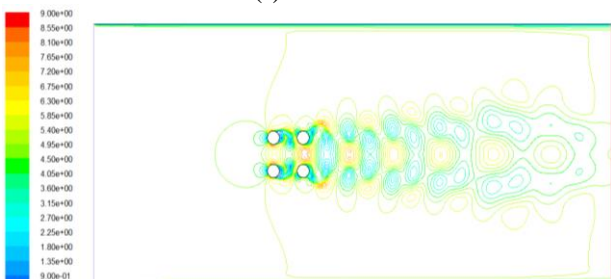
(d) 0.75D



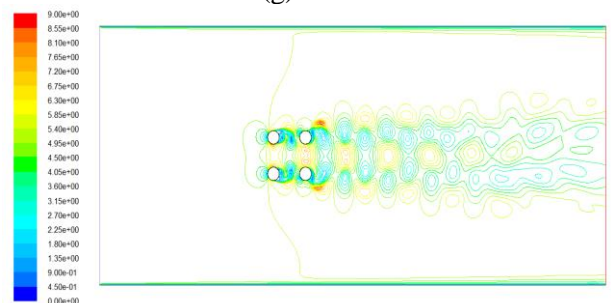
(e) 1D



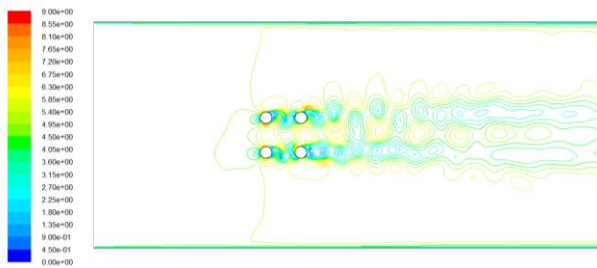
(f) 1.25D



(g) 1.5D



(h) 1.75D



(i) 2D

Gambar 5 Kontur kecepatan pada berbagai jarak dari 0D s/d 2D dengan selang 0.25.

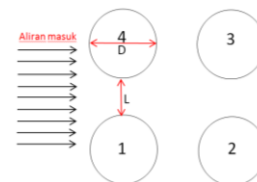
Visualisasi kontur kecepatan pada berbagai jarak antar silinder yang diperoleh dalam simulasi ini dapat diperhatikan pada Gambar 5. Pada Gambar 5 dapat dilihat perkembangan kontur kecepatan pada rentang jarak antar diameter yang berbeda.

Pada jarak antar silinder 0D, 0.25 D, dan 0.50 D secara visual dapat diperhatikan bahwa terjadi kecenderungan peluruhan vorteks mendekati bentuk 1 silinder. Hal ini terlihat dengan lepasnya sepasang vorteks secara teratur bergantian di belakang kumpulan silinder tersebut. Ketika jarak antar silinder menjadi 0.5D, keadaan vorteks yang menyerupai peluruhan satu silinder menjadi tidak stabil, namun secara garis besar masih dapat digolongkan sebagai keadaan menyerupai satu silinder. Vorteks yang luruh di belakang kumpulan silinder tersebut masih berupa pasangan vorteks yang lepas secara bergantian. Sama halnya jarak antar 0.25D, pada jarak 0.5D vorteks yang luruh dari silinder kolom pertama tidak memiliki cukup ruang untuk berkembang sehingga ketika terjadi separasi aliran di permukaan silinder, vektor kecepatan yang luruh langsung menabrak bagian depan dari silinder kolom belakang. Akibatnya peluruhan vorteks yang terjadi cenderung menyatu pada jarak sekitar 2D dari silinder pada kolom kedua. Keadaan transisi dari peluruhan vorteks menyerupai satu silinder menjadi silinder terpisah dapat diamati pada jarak antar silinder pada 0.75D, 1D, 1.25D, dan 1.50D. Pada keempat jarak ini dapat diamati dengan jelas bahwa vorteks yang luruh di belakang kumpulan silinder mulai berbeda keadaannya dengan peluruhan vorteks pada jarak 0D, 0.25D dan 0.50D. Keempat jarak ini, vorteks yang luruh di belakang kumpulan silinder memiliki kecenderungan pola yang sama berupa beberapa buah vorteks yang mulai terpisah. Keadaan peluruhan vorteks dibelakang silinder kolom kedua tidak lagi luruh secara serentak, akan tetapi vorteks luruh secara bergantian dari kedua sisi silinder. Namun dikarenakan jarak antar silinder yang masih relatif dekat akibatnya vorteks yang luruh tidak punya ruang untuk berkembang lebih

jelas sehingga pola yang terbentuk lebih cenderung sebagai pola keadaan berkembang, bukan sebagai silinder tunggal dan bukan pula sebagai silinder terpisah, akan tetapi terlihat pola peralihan yang sangat dipengaruhi oleh jarak tersebut.

Pada kontur turbulensi pada Gambar 5 bahkan terlihat keidentikan pola turbulensi yang timbul dari keempat jarak antar silinder 0.75D, 1D, 1.25D, dan 1.50D berupa pola menyerupai pelana kuda sebagai akibat dari menyatunya turbulensi pada bagian tengah antar silinder. Pada jarak 1.75D, dan 2.00D terlihat memiliki pola peluruhan vorteks yang telah mulai beralih dari pola pelana kuda menjadi pola yang cenderung terpisah. Meskipun vorteks - vorteks tersebut luruh dengan fasa yang berlawanan antara barisan atas dan bawah silinder seperti halnya pada jarak antar silinder pada 1D, 1.25D dan 1.50D namun dikarenakan jarak yang lebih jauh satu sama lain menyebabkan pola pelana kuda mulai menghilang. Pada visualisasi kontur kecepatan bahkan dapat diamati bahwa spasi jarak antar vorteks yang luruh pada 1.75D dan 2.00D lebih kecil dari pada rezim kedua. Hal ini disebabkan karena silinder pada kolom pertama memiliki cukup ruang untuk berkembang menjadi vorteks terpisah sebelum menabrak silinder pada kolom kedua sehingga menyebabkan frekuensi peluruhan vorteks yang muncul pada rentang jarak 1.75D sampai 2.00D menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan yang lainnya.

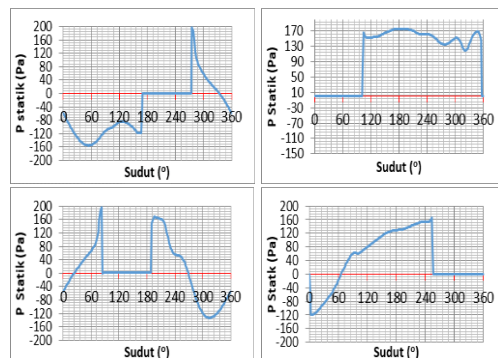
Distribusi tekanan memberikan gambaran mengenai fenomena peluruhan vorteks seperti pergeseran titik stagnasi, separasi aliran, wake, serta fluktuasi gaya yang timbul akibat tekanan pada masing masing silinder dalam susunan empat buah silinder. Distribusi tekanan pada berbagai jarak antar silinder, posisi penempatan grafik masing-masing silinder diletakkan sesuai dengan sketsa pada Gambar 6.



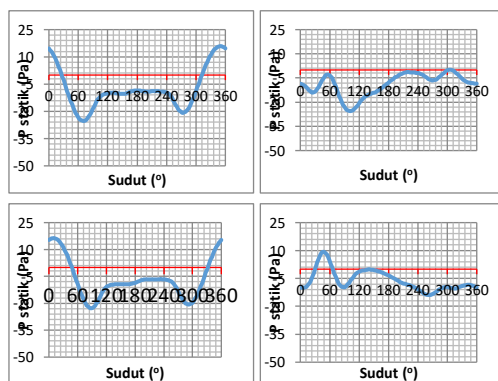
Gambar 6 Sketsa posisi silinder terhadap aliran masuk.

Secara umum distribusi tekanan di sekeliling silinder seperti yang tergambar pada Gambar 6 dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada jarak 0D, terdapat bagian dinding silinder yang tidak bertekanan. Hal ini disebabkan pada bagian tersebut tidak dikenai aliran udara. Namun dengan bertambahnya jarak antar silinder, terdapat tekanan

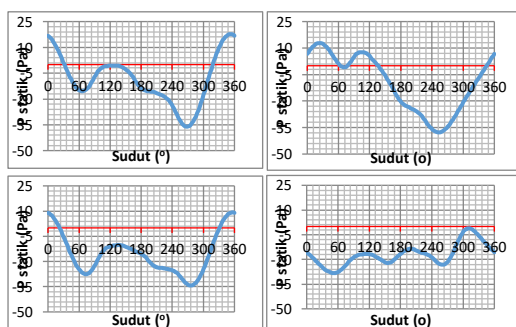
terdistribusi disekeliling silinder. Terdapat daerah betekan tinggi maupun daerah bertekan rendah di sekeliling silinder. Pada umumnya daerah bertekan tinggi berada pada bagian permukaan silinder yang berhadapan langsung dengan aliran udara. Tekanan tersebut berubah menjadi tekanan rendah ketika titik separasi terlewati. Tekanan maksimum terjadi pada bagian stagnasi pada dua silinder yang terdepan, dan tekanan terendah terjadi pada silinder yang berada pada bagian belakang.



(a) 0D



(b) 1D



(c) 2D

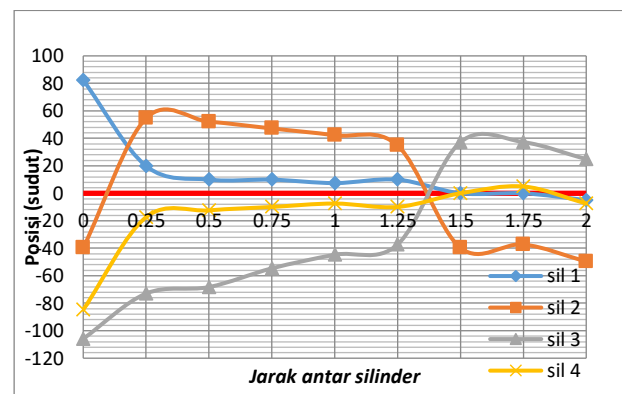
Gambar 6. Grafik Perbandingan Distribusi Tekanan pada berbagai pada jarak antar silinder 0D, 1D, dan 2D.

Terdapat kemiripan distribusi tekanan antara silinder bagian atas dengan bagian bawah, namun dalam arah berlawanan. Hal tersebut terjadi pada susunan silinder yang berada pada kolom bagian depan. Akan tetapi hal tersebut tidak terjadi pada

silinder pada kolom bagian belakang. Pada silinder yang berada pada bagian belakang terdapat salah satu baris silinder yang bertekan lebih rendah dibandingkan silinder yang berada di sisi sebelahnya. Hal ini disebabkan pada silinder tersebut menjadi pusat peluruhan vorteks pada saat ini. Peluruhan vorteks dibelakang silinder terjadi secara bergantian antar satu sisi ke sisi lain sesuai dengan frekuensi peluruhan vorteks yang terjadi pada susunan silinder.

Instabilitas peluruhan vorteks pada masing-masing silinder mulai terjadi pada jarak 0.25D (ketika terbentuknya jarak antar silinder). Instabilitas ini bertambah besar dengan bertambahnya jarak antar silinder. Namun pada jarak yang dekat belum terbentuk vorteks yang sempurna dibelakang silinder pada baris pertama sampai jarak 1.25D. Hal tersebut dapat diamati dengan gambar kontur kecepatan, dan distribusi tekanan disekeliling silinder.

Terdapat perbedaan titik stagnasi untuk masing-masing silinder untuk jarak yang sama. Posisi titik stagnasi ini sebenarnya berubah-ubah tergantung kepada frekuensi peluruhan vorteks. Pada simulasi numerik yang dilakukan di dalam penelitian ini merupakan posisi sesaat titik stagnasi yang terdapat pada susunan silinder.



Gambar 7 Titik stagnasi berbagai posisi.

Titik stagnasi merupakan titik yang mengalami tekanan maksimum pada permukaan silinder. Sebagai akibat kecepatan aliran pada titik tersebut sama dengan nol atau diam. Total energi aliran pada saat tersebut diubah menjadi energi tekanan, sementara energi kinetik sama dengan nol.

Penyebaran titik stagnasi pada masing-masing silinder dengan jarak antar silinder yang berbeda dapat diperhatikan pada Gambar 7. Pada gambar tersebut dapat diperhatikan pergeseran titik stagnasi pada berbagai jarak antar silinder, dimana terlihat

perbedaan pola yang mencolok antara silinder kolom depan dengan silinder kolom belakang.

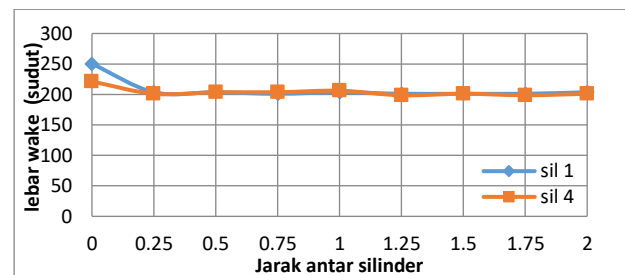
Titik stagnasi pada silinder kolom depan, yaitu silinder 1 dan 4 terletak pada sudut lebih kecil dari silinder kolom belakang, silinder 2 dan 3, terhadap acuan titik 0° . Hal ini disebabkan karena silinder kolom depan dikenai oleh aliran bebas dari *inlet* dalam arah yang relatif seragam sehingga titik stagnasi mendekati titik ideal 0° . Sementara itu, silinder kolom belakang dikenai oleh aliran bergolak berupa vorteks akibat telah terlebih dahulu melewati silinder kolom depan. Besar dan arah aliran vorteks tersebut menyebabkan pergeseran posisi dan besar tekanan pada titik stagnasi silinder di kolom belakang.

Pergeseran titik stagnasi terhadap perbedaan jarak antar silinder juga dapat terlihat pada Gambar 7. Pada silinder kolom depan, peningkatan jarak antar silinder menyebabkan posisi titik separasi semakin bergeser hingga mendekati sudut 0° . Sementara itu pada silinder kolom belakang (silinder 2 dan 3), dapat dikatakan bahwa peningkatan jarak antar silinder tetap menyebabkan pergeseran titik stagnasi mendekati sudut 0° , namun dengan pola yang tidak linear. Aliran vorteks pada jarak antar silinder 0.25 hingga 1.25 di belakang silinder 1 cenderung hanyut menuju arah atas silinder 2 sehingga titik stagnasinya berada pada sudut positif, sementara pada jarak antar silinder 1.5D hingga 2D jarak antar silinder menuju bagian bawah silinder 2 akibatnya titik stagnasi berada pada sudut negatif. Kebalikan dari keadaan silinder 2 terjadi pada silinder 3, dimana titik stagnasi untuk jarak antar silinder 0.25D hingga 1.25D terdapat pada sudut negatif. Sementara untuk jarak antar silinder 0D titik stagnasi terdapat pada bagian bawah (sudut negatif) untuk kedua silinder kolom belakang, hal ini karena bagian depan silinder menyatu dengan silinder lainnya sehingga tidak ada aliran yang melewati bagian tersebut.

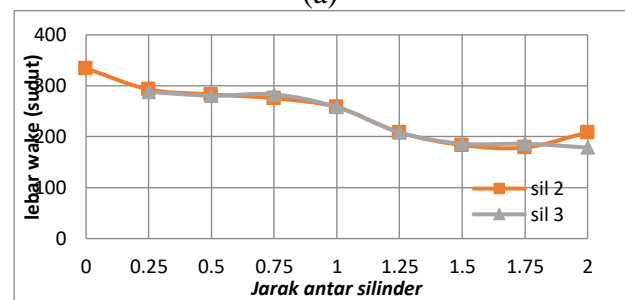
Separasi aliran dapat diamati pada daerah wake yang terbentuk selama simulasi dua sisi silinder yang dilewati aliran udara. Daerah tersebut tersebar mulai dari belakang titik separasi pertama hingga titik separasi kedua. Dengan menginterpretasikan data visual dan grafik tekanan pada Gambar 6 dan 7, maka diperoleh titik separasi aliran masing – masing pada berbagai jarak antar silinder seperti terlihat pada Tabel 5 yang terlihat pada bagian akhir tulisan ini.

Sementara pada Gambar 8 dan Tabel 5 daerah wake untuk kumpulan silinder dalam berbagai jarak antar silinder. Jarak antar silinder memiliki pengaruh berbeda terhadap silinder kolom depan dan kolom belakang. Pada silinder kolom depan seperti

terlihat pada Gambar 8 (a) jarak antar silinder tidak menyebabkan perubahan berarti pada besar wake yang terbentuk di belakang silinder, dimana diamati bahwa lebar *wake* yang terbentuk cenderung stabil pada rentang sekitar 200° . Hal ini karena silinder depan langsung dikenai oleh aliran udara bebas yang relatif stabil dengan arah yang teratur. Sehingga ketika mengenai dinding depan silinder pola tekanan maupun kecepatan yang terbentuk antara silinder 1 dan 4 cenderung sama, faktor jarak antar silinder hanya terlihat pada silinder depan dan dipengaruhi oleh jarak secara sumbu vertikal yang tidak berpengaruh banyak dalam mengubah orientasi aliran.



(a)



(b)

Gambar 8. Lebar wake berbagai jarak antar silinder

Pengaruh jarak antar silinder jelas terlihat pada silinder kolom belakang, hal ini dapat diperhatikan pada Gambar 8 (b). Pada silinder tersebut, semakin besar jarak antar silinder maka wake yang dihasilkan di belakang silinder tersebut cenderung menjadi semakin kecil. Hal ini disebabkan karena pada jarak antar silinder lebih kecil, vorteks yang luruh di belakang silinder kolom depan dengan arah yang cenderung acak akan langsung menabrak silinder belakang sehingga mengakibatkan ketidakaturan aliran bahkan penurunan drastis kecepatan aliran, hal ini mengakibatkan kecepatan akan cepat terhenti pada titik tertentu di lapisan batas sehingga menimbulkan separasi aliran lebih cepat. Akan tetapi ketika jarak silinder kolom depan dan belakang menjadi semakin jauh, maka vorteks dapat berkembang sempurna dan mempunyai jarak tertentu untuk mengubah orientasi arah serta kecepatan aliran menjadi lebih teratur sebelum menabrak silinder belakang.

Kondisi ini menyebabkan lapisan batas pada silinder kolom belakang menjadi lebih tahan terhadap terhadap gradient tekanan balik yang menjadi permulaan separasi aliran, dimana kondisi ini sangat jelas terlihat pada jarak antar silinder 1.25D hingga 2D.

Besar bilangan Strouhal dapat ditentukan dengan hubungan frekuensi, diameter dan berbanding terbalik dengan kecepatan aliran.. Data bilangan Strouhal yang dihasilkan dari pengukuran frekuensi peluruhan vorteks dapat disarikan di dalam Tabel 6.

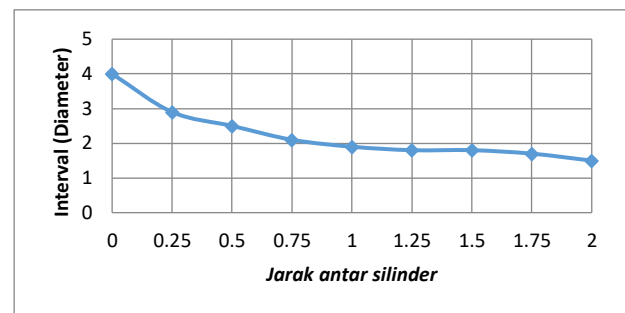
Tabel 6 Bilangan Strouhal berbagai jarak antar silinder.

No	Jarak antar silinder (Diameter)	Bilangan Strouhal
1	0	-
2	0.25	0.09051
3	0.5	0.14255
4	0.75	0.18431
5	1	0.19
6	1.25	0.20056
7	1.5	0.20365
8	1.75	0.45118
9	2	0.46839

Bilangan Strouhal tersebut merupakan puncak nilai maksimum dari frekuensi peluruhan vorteks di belakang silinder. Pada Tabel 6 dapat diamati bahwa bilangan Strouhal yang diperoleh pada simulasi ini semakin tinggi seiring dengan pertambahan jarak antar silinder. Bilangan Strouhal untuk sebuah silinder berkisar pada nilai 0.19 hingga 0.22 pada Reynolds 5000 hingga sekitar 10^5 [16]. Sementara itu, bilangan Strouhal pada penelitian acuan sebelumnya^[8] dengan prosedur penentuan diameter yang sama pada jarak antar silinder 1D dengan bilangan Reynolds 30.000 adalah 0.219694, jika dibandingkan dengan simulasi ini bilangan Strouhal yang diperoleh sekitar 0.19007 pada bilangan Reynolds 7076.923. Idealnya, nilai bilangan Strouhal yang diperoleh ini konstan pada jarak antar silinder berapapun selama bilangan Reynoldnya dipertahankan tetap. Akan tetapi pada penelitian ini bilangan Strouhal yang diperoleh cenderung meningkat seiring dengan peningkatan jarak antar silinder. Peningkatan nilai ini di pahami sebagai akibat dari perbedaan acuan pemilihan diameter hidrolik dalam menghitung nilai bilangan Reynolds yang digunakan sebagai acuan awal simulasi. Pada simulasi ini, diameter hidrolik yang dipilih adalah diameter silinder sebesar 0.023 mm dengan tujuan menghasilkan

nilai bilangan Reynolds dan kecepatan yang sama untuk semua jarak antar silinder. Karena bilangan Strouhal merupakan fungsi dari kecepatan, frekuensi, dan diameter hidrolik sesuai persamaan $St = (f \times D)/U$ maka dengan diameter hidrolik dan kecepatan aliran yang konstan, maka bilangan Strouhal akan mengikuti pola nilai frekuensi, semakin besar jarak antar silinder maka semakin besar bilangan Strouhal yang diperoleh.

Panjang interval vorteks pada berbagai jarak antar silinder dari 0D hingga 2D dapat diperhatikan pada grafik dalam Gambar 9.



Gambar 9 Interval wake terhadap jarak antar silinder.

Berdasarkan Gambar 9 dapat diamati bahwa semakin besar jarak antar silinder maka panjang gelombang yang terbentuk menjadi semakin kecil. Hal ini dapat disebabkan karena semakin jauh jarak antar silinder, maka masing - masing silinder tersebut dapat mengembangkan pola peluruhan *vorteks* yang semakin terpisah satu sama lain, akibatnya akan luruh beberapa vorteks yang rapat di belakang susunan silinder dengan interval gelombang vorteks yang semakin pendek.

Kesimpulan

Berdasarkan analisa terhadap berbagai hasil simulasi berupa visualisasi, grafik, serta data kuantitatif lainnya pada tugas akhir ini, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan :

1. Pola aliran yang melewati 4 buah silinder yang tersusun secara inline pada berbagai jarak antar silinder secara visual membentuk tiga buah kecenderungan pola berbeda, yaitu kecenderungan menyerupai satu silinder pada jarak antar silinder 0 hingga 0.50, pola transisi pada jarak antar silinder 0.75 hingga 1.50 dan kecenderungan berpisah menjadi vorteks - vorteks berbeda pada jarak antar silinder 1.75 hingga 2.00.
2. Peningkatan jarak antar silinder menyebabkan peningkatan frekuensi peluruhan vorteks, di mana frekuensi ini terbagi menjadi 3 rentang berbeda yaitu frekuensi rendah sekitar 10 hingga 30 Hz pada jarak antar silinder 0 hingga

0.50, frekuensi sedang dengan rentang 30 hingga 45 Hz pada jarak antar silinder 0.75 hingga 1.50 dan frekuensi tinggi yang melebihi 90 Hz pada jarak antar silinder 0.75 dan 2.00.

3. Interval peluruhan vorteks yang luruh di belakang susunan silinder semakin kecil seiring dengan peningkatan jarak antar silinder, dengan interval tertinggi berjarak 4 D pada jarak antar silinder 0 dan terkecil pada jarak 1.5 D pada jarak antar silinder 2.00.
4. Wake yang timbul di belakang susunan silinder memiliki dua kecenderungan yang berbeda berkaitan dengan jarak antar silinder dan posisi penempatan silinder, dimana pada silinder kolom depan lebar wake yang terbentuk cenderung stabil dengan rentang lebar sudut 201° hingga 203° , sementara pada silinder kolom belakang peningkatan jarak antar silinder menyebabkan penurunan lebar wake dengan lebar sudut minimum 178.759° terbentuk pada panjang antar silinder 2 dan lebar sudut maksimum sebesar 288° diperoleh pada jarak antar silinder 0.
5. Peningkatan jarak antar silinder menimbulkan dua pola distribusi tekanan total berbeda pada silinder yaitu, pada jarak antar silinder 0.00 hingga 1.00 tekanan statik total silinder kolom depan lebih rendah dari silinder kolom belakang, sementara pada jarak antar silinder 1.25 hingga 2.00 silinder kolom depan memiliki tekanan statik total lebih tinggi dari silinder kolom belakang.

Referensi

- [1] Zdravkovich, M.M., 1997, *Flow Around Circular Cylinders*, Oxford University Press
- [2] Johnson, T. A. and Patel, V. C., 1999, *Flow Past a Sphere Up to a Reynolds Number of 300*, J. Fluid Mech, Vol 378, 19-70.
- [3] Thompson, M. C., Leweke, T., and Provansal, M., 2001, *Kinematics and Dynamics of Sphere Wake Transition*, Journal of Fluids and Structures, Vol.15, 575-585.
- [4] Tomboulides, Ananias G. and Orzag, Steven A., 2000, *Numerical Investigation of Transition and Weak Turbulence Flow Past a Sphere*, J. Fluid Mech, Vol 416, 45-73.
- [5] Rahmawati, Shade., Djatmiko, Eko B., dan Pristianto, and Rudi W., 2012, Studi Numerik Interaksi *Vorteks-Induced Vibration (VIV)* Antara Empat Silinder Tegak Fleksibel dengan Konfigurasi *In-Line Square* dalam Aliran Uniform, Jurnal teknik ITS, Vol 1, No 1.
- [6] Varshney, and Kapil., 2012, *Vorteks Structures In The Wake of Inclined Cylinder*, IJRRAS, Vol 11, issue 3.
- [7] Leonanda, Benny D., Indiyono, P., Wardana, W., dan Sasongko, H., 2009, Analisis Visualisasi Numerik pada Peluruhan *Vorteks* Silinder Bulat, Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VII.
- [8] Leonanda, Benny D. and Syufriadi, 2005, *Identification of Structure Vorteks Shedding Frequencies of Four Cylinders Lapped Over Squarely By 1D Spacing*.
- [9] White, Frank M., 1979, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill Book Company, United States of America.
- [10] McDonough, J. M., 1987, *Lecture In Elementary Fluid Dynamics : Physics, Mathematics and Applications*, University of Kentucky
- [11] Olson, Reuben. M. dan Wright, Steven. J., 1993, *Dasar-Dasar Mekanika Fluida Teknik*, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta
- [12] Gunawan Tista, dan Si Putu Gede., 2010, Pengaruh Penempatan Penghalang Berbentuk Silinder Pada Posisi Vertikal dengan variasi Jarak Horizontal di Depan Silinder Utama terhadap Koefisien Drag, Jurnal teknik Mesin, Vol 4, No 2.
- [13] Prastianto, and Rudi Walujo., *Vorteks Shedding*, <http://rudiwp.files.wordpress.com/2006/11/apa-itu-vorteks-shedding.pdf>, diakses tanggal 2 Oktober 2014
- [14] Mastenbroek, and Jan-Jaap., 2010, *Bluff Body Flow : Wake Behavior Behind a Heated Circular Cylinder*, University of Twente
- [15] Leonanda, Benny D., 2006, Sebuah Studi Daerah Olakan Di Belakang Silinder Bulat pada Bilangan Reynolds Moderat, Jurnal Teknik Mesin, Vol 6, No 3.
- [16] Techet, A. H., 2004, *Lecture : Vorteks Induced Vibration*, Massachusetts Institute Of Technology
- [17] Lienhard, Jhon H., 1966, *Synopsis of Lift, Drag, and Vorteks frequency Data For Rigid Circular Cylinders*, Technical Extension Service, Washington
- [18] Lal Verma, Puneeshwar., Govardhan, 2011, *Flow Behind Bluff Bodies In Side-by-Side Arrangement*, Journal of Engineering Science and Technology, Vol 6, No 6.

Tabel 5 Separasi aliran berbagai jarak antar silinder

Tabel 5. Posisi titik separasi aliran di sekitar silinder pada jarak 0D s/d 2D

Jarak	Silinder 1		Silinder 2		Silinder 3		Silinder 4	
	Separasi 1	separasi 2	separasi 1	separasi 2	separasi 1	separasi 2	separasi 1	separasi 2
0.00	-	109.66	-	25.882	-	-	138.82	-
0.25	69.517	86.897	37.241	29.793	37.241	34.759	86.897	72.000
0.50	76.966	79.448	37.241	39.724	39.724	39.724	81.931	74.483
0.75	79.448	79.448	42.207	42.207	44.690	32.276	79.448	76.966
1.00	74.483	81.931	49.655	52.138	52.138	49.655	79.448	74.483
1.25	69.517	89.379	67.034	84.414	84.414	67.034	89.379	72.000
1.50	86.897	72.000	119.17	57.103	57.103	116.69	72.000	86.897
1.75	86.897	72.000	129.10	52.138	52.138	121.65	72.000	89.379
2.00	76.966	79.448	101.79	49.655	49.655	131.58	74.483	84.414