

Studi Numerik Interaksi *Vortex-Induced Vibrations (VIV)* Antara Empat Silinder Tegak Fleksibel dengan Konfigurasi *In-Line Square* dalam Aliran Uniform

Shade Rahmawati, Eko B. Djatmiko, dan Rudi W. Prastianto

Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: ebdjtmiko@oe.its.ac.id

Abstrak—*Vortex-induced Vibration (VIV)* di sekitar sekelompok silinder adalah suatu fenomena yang umum ditemui pada aplikasi teknik saat ini, seperti aliran fluida yang melewati kabel, struktur lepas pantai, dan lain sebagainya. *VIV* dapat menyebabkan berkurangnya umur operasi suatu equipment dan dapat berakibat pada kecelakaan atau kegagalan operasi. Oleh karena itu, sangat penting untuk memahami mekanisme terjadinya *VIV* dan rangkaian interaksi fluida-struktur dalam rangka meningkatkan kualitas desain equipment. Makalah ini menyajikan studi numeris tiga dimensi (3-D) aliran laminar di sekitar empat silinder tegak fleksibel dalam konfigurasi *in-line square*. Penelitian difokuskan pada pengaruh spacing ratio (S^*x dan S^*y), aspect ratio (L/D), dan Reynold Number (Re) terhadap karakteristik aliran tiga dimensi di sekitar silinder. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa pada small spacing ratio, nilai koefisien gaya lift (C_L) dan koefisien gaya drag (C_D) cenderung mengecil karena mendapat pengaruh redaman dari silinder lain, namun kemudian kembali normal pada konfigurasi di atas critical spacing ratio 3.5D. Perpindahan silinder yang terjadi sangat kecil dengan A/D maksimum searah aliran sebesar 0.00053, dan A/D maksimum tegak lurus aliran sebesar 0.0003. Variasi aspect ratio memberikan efek penurunan nilai C_L pada downstream cylinder pada spacing ratio 3.5-5. Sedangkan pengaruh variasi Reynold Number yang semakin besar memberikan nilai C_D dan C_L yang semakin menurun, dan sebaliknya besarnya displacement silinder yang terjadi semakin meningkat. Pada $Re=100$ dan $Re=200$, *VIV* yang terjadi pada upstream cylinder adalah *in-line vibrations*, sedangkan downstream cylinder mengalami *cross-flow vibrations*. Pada $Re=300$, baik upstream maupun downstream cylinder mengalami *in-line vibrations*.

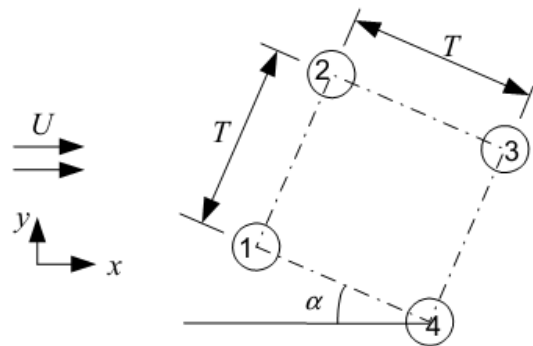
Kata Kunci— *VIV*, *Three-dimensional*, *Simulations*, *Four cylinders*, *Aspect ratio*, *Spacing ratio*, *Reynold Number*

I. PENDAHULUAN

SELAMA lebih dari 30 tahun, penelitian difokuskan pada aliran di sekeliling struktur silindris, terutama untuk silinder tunggal atau ganda. Meskipun demikian, penelitian untuk aliran yang melewati silinder berjumlah lebih dari dua masih jarang ditemui karena parameternya yang sangat banyak seperti parameter geometri terhadap konfigurasi silinder, *Reynolds number* (Re), dan *boundary conditions* yang dapat mempengaruhi pola aliran.

Sebagai contoh, Moulinec [1] secara numerik menyelidiki aliran yang melewati jajaran silinder kaku dengan dua rasio jarak yang berbeda pada bilangan *Reynold* 50-6000. Kevlahan [2] menyelidiki stabilitas jajaran silinder setelah diputar dalam kondisi aliran *laminar*. Secara umum, pola aliran yang kompleks karena kondisi aliran yang berbeda, seperti variasi rasio jarak silinder, aspek rasio L/D (L adalah tinggi *spanwise* dari silinder), kondisi batas pada ujung silinder, *blockage ratio*, bilangan *Reynold*, dan lain-lain.

Selama beberapa tahun terakhir, banyak penelitian tentang aliran di sekitar empat silinder *array* telah dilakukan dengan menggunakan studi eksperimental dan teknik numerik. Sayers



Gambar. 1. *A general configuration of the four-cylinder model* [6].

melakukan percobaan pada empat silinder dalam konfigurasi persegi dengan bilangan *Reynold* 30000 [3]-[4]. Lam dan Lo [5] dan Lam [6] melakukan studi visualisasi untuk memahami pengaruh rasio jarak antar silinder (berdasarkan kelipatan diameter silinder) pada pola aliran dan frekuensi *vortex shedding* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Lam dan Fang [7] mengukur distribusi tekanan dan koefisien lift/drag pada empat silinder dengan rasio jarak bervariasi 1,26-5,8.

Lam dan Zou [8] meneliti lebih lanjut efek dari rasio jarak dan bilangan *Reynold* pada distribusi kecepatan dan pola aliran di sekitar empat silinder *in-line* pada bilangan *Reynold* subkritis menggunakan anemometer laser Doppler (LDA) dan teknik *digital particle image velocimetry* (DPIV). Farrant dkk. [9] menangkap karakteristik aliran dua dimensi (2-D) dan gaya interaktif terkait dengan aliran di sekitar empat silinder

berjarak sama untuk dua orientasi untuk rasio jarak 3 dan 5 kali diameter silinder pada $Re = 200$ menggunakan metode *cell boundary element*. Dengan kasus tertentu dimana empat silinder yang diatur dengan sudut keselarasan dari 45 derajat dan kasus pengaturan *in-line* pada jarak 5 kali diameter silinder, hasil perhitungan menunjukkan kesesuaian dengan hasil visualisasi yang diperoleh Lam dan Lo [5]. Namun, menarik untuk dicatat bahwa untuk pengaturan *in-line* dengan jarak antar silinder sebesar 3 kali diameter silinder, hasil perhitungan menunjukkan bahwa lapisan geser dari silinder bagian depan menggulung ke vortisitas yang telah terbentuk dan menimpa permukaan silinder yang berada di belakangnya. Hasil ini berbeda dengan yang diperoleh dengan menggunakan visualisasi aliran, yang menunjukkan pola aliran perisai di belakang silinder bagian depan.

Lam dan Lo [5] memperkirakan bahwa perbedaan *vortex shedding* silinder bagian depan mengecil di bawah rasio jarak 3,94 di pengaturan *in-line*. Selain itu, Lam dan Fang [7] melakukan simulasi 2-D pada empat silinder berjajar dengan rasio jarak yang berbeda pada angka Reynold yang rendah 100 dan 200 dengan menggunakan metode volume hingga. Mereka gagal untuk mensimulasikan pola *shielding flow* untuk pengaturan yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa ada perbedaan besar antara pengukuran eksperimental dan hasil perhitungan pada rasio jarak kritis. Ini harus dicatat bahwa semua simulasi numerik di atas dilakukan dengan asumsi aliran 2-D di sekitar empat silinder, terlepas dari aliran 3-D yang sebenarnya di sekitar silinder. Untuk representasi yang memadai dari aliran di sekitar empat silinder, simulasi 3-D yang relatif memakan waktu harus dilakukan.

Lam dan Zou [10] menggunakan simulasi eddy 3-D besar pada aliran turbulen di sekitar empat silinder *in-line* dengan rasio jarak yang berbeda di sejumlah bilangan Reynold subkritis. Hasil numerik tersebut memprediksi secara akurat beberapa karakteristik aliran yang terbentuk di sekitar empat silinder dan sesuai dengan pengukuran eksperimental. Namun, penyelidikan lebih luas untuk struktur *vortex* 3-D, *azpect ratio*, dan *spacing ratio* pada jajaran silinder belum dilaksanakan. Dalam penelitian ini, dikaji konfigurasi *in-line square* karena formasi ini merupakan bentuk yang paling umum digunakan di bangunan lepas pantai, dan simulasi numerik yang dilakukan akan mempertimbangkan *aspect ratio* dan *spacing ratio* sehingga diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih baik terkait *vortex induced vibration* pada jajaran silinder terutama dalam konfigurasi *inline square*.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Pengumpulan Data Struktur

Tahapan pertama dari penelitian ini adalah melakukan studi literatur penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, yaitu dari jurnal internasional, buku acuan *offshore engineering*, dan standar yang berkaitan. Struktur silinder dimisalkan adalah satu *section* dari *conductor* dari *fixed structure* dengan diameter $D_a=30$ inch dan $D_b=20$ inch sebagai ukuran yang umum digunakan [11]. Sedangkan *width-thickness rasio*-nya

mengacu pada aturan AISC *Specification for Structural Steel Buildings* [12] untuk *hollow structural sections* (HSS).

$$0,11 \frac{E}{F_y} < D/t < 0,45 \frac{E}{F_y} \tag{1}$$

dimana D adalah diameter silinder, t adalah tebal silinder, E adalah *Modulus Young*, dan F_y adalah *Yield Strength*.

Rasio tersebut harus memenuhi ketentuan API RP2A WSD berikut [13].

$$D/t \leq 1900/F_y \text{ untuk } F_y \text{ dalam satuan ksi} \tag{2}$$

$$D/t \leq 13100/F_y \text{ untuk } F_y \text{ dalam satuan Mpa} \tag{3}$$

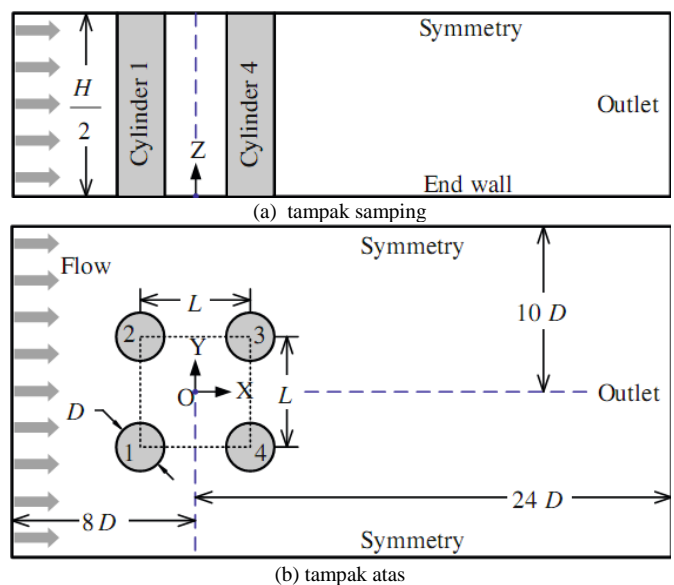
Dengan menggunakan material ASTM A36 didapatkan $D/t=1900/36$ ksi=52,78. Sehingga untuk pipa API dengan diameter diatas, dipilih t_a (*wall thickness*)= 0,625 inch untuk D_a , dan $t_b= 0,406$ inch untuk D_b atau dengan kata lain $D_a/t_a= 48$ dan $D_b/t_b= 49,26$. Kekakuan masing-masing silinder ditentukan 2000 N.s/m.

B. Konfigurasi Model

Dari penelitian Lam dan Zou [10] yang digunakan sebagai acuan, didapatkan konfigurasi empat silinder berbentuk *in-line square*. Panjang silinder (L) dihitung berdasarkan rasio D/t dan L/D yang diberikan. *computational domain* yang ditunjukkan pada Gambar.2. Berikut diberikan persamaan untuk *spacing ratio* yaitu rasio jarak antar pusat silinder terhadap diameter silinder searah sumbu x (S^*_x) dan sumbu y (S^*_y).

$$S^*_x = S_x/D \tag{4}$$

$$S^*_y = S_y/D \tag{5}$$



Gambar. 2. Skema *computational domain* model numeris

Konfigurasi silinder dibedakan dalam dua tipe. Pada konfigurasi tipe pertama, sesuai jurnal acuan, keempat silinder memiliki diameter yang sama yaitu 30 inch dengan $L/D=16$. Pada konfigurasi tipe kedua, silinder 1 dan 2 memiliki

diameter sebesar 30 inch dengan L/D=16, sedangkan silinder 3 dan 4 memiliki diameter sebesar 20 inch dengan L/D=24.

Untuk validasi model, keempat silinder dimodelkan dengan konfigurasi tipe pertama dan *spacing ratio* (S*x;S*y) = (1,6;1,6), (2,5;2,5), (3,5;3,5), (4;4), dan (5;5). Model tersebut kemudian dikenai aliran *uniform* dengan *Reynold Number* sebesar 200.

Dari hasil pemodelan akan didapatkan *drag coefficient* dan *lifting coefficient* yang kemudian divalidasikan dengan hasil di jurnal. Jika sesuai maka penelitian dapat dilanjutkan dengan pemodelan silinder dengan variasi *aspect ratio* dan *spacing ratio*, serta variasi *Reynold Number*.

Variasi *aspect ratio* dilakukan dengan memperbesar rasio L/D menjadi 24 untuk silinder 3 dan 4 (konfigurasi tipe dua). Sedangkan variasi *spacing ratio* dilakukan dengan menambahkan rasio (S*x;S*y) yang diujikan yaitu (1,6;2,5), (2,5;3,5), (3,5;4), dan (4;5). Hasil analisa pola interaksi aliran, amplitudo getaran, *drag coefficient*, dan *lifting coefficient* dari masing-masing variasi tersebut kemudian dibandingkan dan disimpulkan konfigurasi dengan respon terkecil serta pengaruh ketiga variabel di atas (*aspect ratio*, *spacing ratio*, dan *Reynold Number*).

C. Pemodelan pada Software CFD

Setelah didapatkan data geometri dan variasi yang dibutuhkan, dilakukan pemodelan struktur yang meliputi

masing-masing silinder. Koefisien *drag* dan *lift* kemudian dihitung dengan persamaan (6) dan (7) untuk kemudian dianalisis hasilnya dan diambil keputusan.

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho U^2} \tag{6}$$

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho U^2} \tag{7}$$

III. ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Validasi Model

Sebelum melakukan validasi model, langkah pertama yang harus dilaksanakan adalah *meshing sensitivity*. *Meshing sensitivity* sendiri bertujuan untuk mengetahui jumlah *meshing* yang akan dipakai untuk *running* model. Jumlah pemakaian *meshing* yang ideal dimana gaya yang menjadi *output* adalah

Tabel 2. Nilai C_D dan C_L untuk masing-masing *meshing*

Meshing	silinder 1		silinder 4	
	C_D	C_L	C_D	C_L
6251	1.206331	0.113187	0.782626	0.084518
9613	1.021095	0.075316	0.747959	0.082833
64241	1.126669	0.121249	0.649715	0.075399
108069	1.132164	0.143325	0.658854	0.079554
221169	1.122186	0.139423	0.648547	0.067823

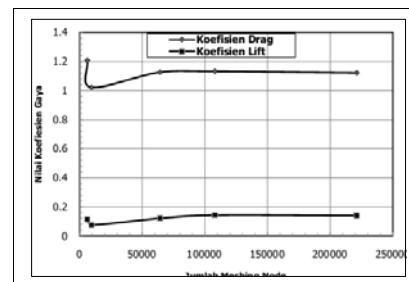
Tabel 1.

Boundary Condition yang Digunakan pada Model

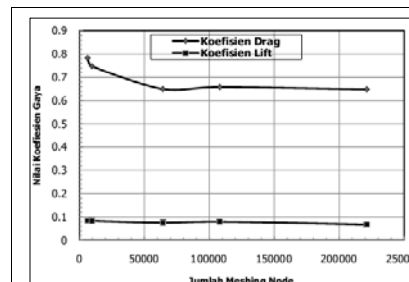
Boundary type	Location	Boundary detail
Inlet	Inlet	a uniform normal velocity
Outlet	Outlet	uniform relative pressure of 0[Pa]
Wall	Wall	No slip
Wall	OS1	No slip
Wall	OS2	No slip
Wall	OS3	No slip
Wall	OS4	No slip
The surfaces of the cylinders	The surfaces of the cylinders	No slip

empat silinder dan domain fluida. Bentuk geometri model 3D dilakukan pada *software* CAD. Setelah itu dilakukanlah proses *meshing* dan *set up* dengan menggunakan *software* CFD berbasis *finite volume method*. Pada *software* CFD ditentukanlah *boundary condition* sebagaimana dijelaskan pada Tabel 1. dan parameter yang akan digunakan. *Boundary condition* atau kondisi batas merupakan parameter inputan yang menggambarkan kondisi dari objek.

Pemberian *boundary condition* tersebut dimaksudkan agar simulasi atau pemodelan yang dilakukan dapat menggambarkan kondisi yang riil atau sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. Oleh karena itu pada tahap awal simulasi atau pemodelan diperlukan *boundary condition* yang ideal, dalam hal ini sesuai dengan jurnal acuan. Setelah *boundary conditions* dan parameter lain diinputkan, model dapat di-*running* untuk dilihat hasilnya Untuk penelitian kali ini nilai *output* yang diambil adalah besar dan frekuensi gaya *drag* dan *lift*, *displacement*, dan visualisasi pola aliran yang melewati



Gambar. 3. Grafik *meshing sensitivity* untuk silinder 1



Gambar. 4. Grafik *meshing sensitivity* untuk silinder 4.

konstan dan juga tidak memberatkan memori komputer yang akan digunakan.

Meshing sensitivity analysis dilakukan pada konfigurasi silinder dengan panjang *spanwise* L=480 in. dan Sx/Sy (rasio jarak antar silinder dalam sumbu x atau y) sebesar 3,5 kali diameter silinder karena akan digunakan pula sebagai validasi terhadap jurnal. Tabel 2. menunjukkan jumlah *meshing* dan stabilitas koefisien dari gaya yang ditimbulkan. Data tersebut

kemudian di-plot pada grafik sebagaimana digambarkan pada Gambar 3. dan Gambar 4.

Dari Gambar 3. dan Gambar 4. dapat dilihat bahwa nilai koefisien drag dan lift stabil pada nilai $1,02 \leq C_D \leq 1,21$ dan $0,07 \leq C_L \leq 1,43$ untuk silinder 1, serta $0,64 \leq C_D \leq 0,78$ dan $0,067 \leq C_L \leq 0,084$ untuk silinder 2. Dari gambar di atas juga didapatkan bahwa koefisien drag dan lift yang stabil didapat pada rentang jumlah tetra meshing node 6.000 hingga 221.000. Jumlah meshing yang akan digunakan haruslah terletak pada rentang tersebut. Dipilihlah tetra meshing dengan rentang jumlah node ≥ 64000 . Jumlah tersebut dipilih karena memberikan model dengan respon yang stabil.

Validasi model dilakukan dengan membandingkan besarnya C_D dan C_L pada silinder sepanjang $L=480$ in. dengan konfigurasi $S^*x=S^*y=3,5$ dan $L/D=16$ antara percobaan numerik pada jurnal dan pada penelitian ini. Ukuran parameter valid atau tidaknya ditunjukkan dengan persen selisih tidak melebihi 10 %. Perhitungan persen selisih tersebut menggunakan persamaan berikut.

$$\% \text{ selisih} = \frac{\text{hasil numerik} - \text{hasil percobaan/jt}}{\text{hasil percobaan/jt}} \times 100 \quad (8)$$

Dalam Tabel 3. disajikan hasil running yang memiliki nilai C_D dan C_L paling mendekati hasil uji numeris dari jurnal acuan [10]. Nilai koefisien drag dan lift didapat dari persamaan (6) dan (7) dengan ketentuan $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$, $U=3.46E-07 \text{ m/s}$, $A=2.26E+04 \text{ m}^2$. Hasil dalam Tabel 3. divalidasi dengan hasil dari jurnal acuan.

Tabel 3.
Hasil running model silinder $L/D=8$, $Sx/Sy=3,5$ dan $Re=200$

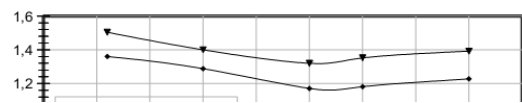
	C_L	cek (%)	C_D	cek (%)
silinder1	0.07130676	9.718	1.17109540	-9.287
silinder4	0.4126294	-8.462	0.52795982	8.410

Hasil pemodelan numeris telah memiliki kecenderungan yang sama dengan model numeris dari jurnal, dan faktor koreksinya kurang dari 10% sehingga validasi ini sudah sesuai.

B. Efek Variasi Spacing Ratio Silinder terhadap Karakteristik Gaya, Displacement, dan Pola Aliran Fluida yang Melewati Silinder

Efek variasi konfigurasi ditinjau untuk Reynold Number 200 dan aspect ratio 16. Perhitungan Koefisien Drag dan Lift dengan menggunakan persamaan (6) dan (7), sehingga didapatkan hasil yang kemudian dibandingkan dengan hasil uji numeris pada penelitian [12] dan disajikan dalam bentuk grafik scatter pada Gambar 5. dan 6.

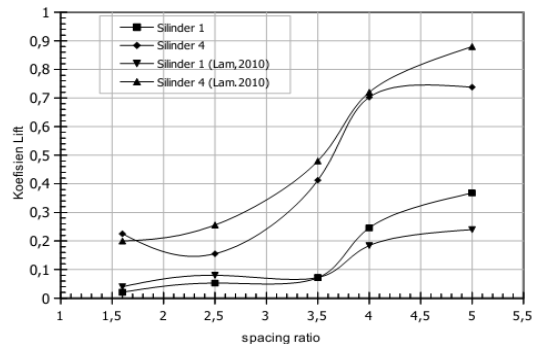
Nilai C_D untuk silinder 1 menurun sedikit demi sedikit hingga spacing ratio 3.5D dan kemudian meningkat lagi, bersamaan dengan itu, nilai C_D untuk silinder 4 meningkat seiring meningkatnya spacing ratio. Nilai C_L untuk kedua silinder meningkat secara gradual seiring meningkatnya spacing ratio. Sehingga dapat dinyatakan bahwa critical



Tabel 4.
Hasil running model silinder $L/D=8$, $Sx/Sy=3,5$ dan $Re=200$

Case	Grid	C_{L1}	C_{L4}	C_{D1}	C_{D4}
Case 1	13200	0.059	0.431	1.291	0.473
Case 2	18700	0.064	0.446	1.314	0.481
Case 3	18700	0.062	0.440	1.321	0.487
Case 4	25300	0.065	0.451	1.319	0.484

Gambar 5. Koefisien gaya drag dengan variasi spacing ratio pada silinder 1 dan 4.

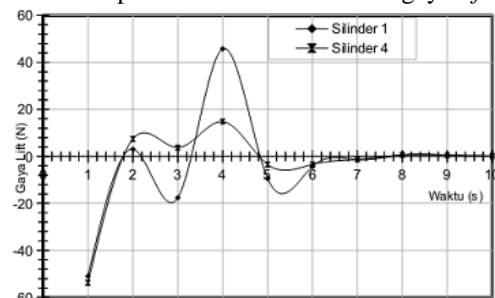


Gambar 6. Koefisien gaya lift dengan variasi spacing ratio pada silinder 1 dan 4.

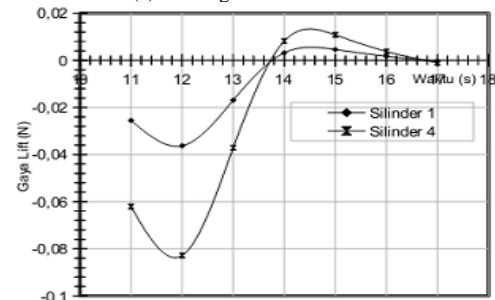
spacing ratio berada pada jarak 3.5D. Tren ini bersesuaian dengan uji numeris yang dilakukan oleh Lam et al. [10] pada bilangan Reynold yang sama.

Lebih lanjut, karakteristik gaya ditinjau pula dari time history masing-masing dan dari data tersebut didapatkan frekuensi gaya dengan metode FFT sebagaimana disajikan dalam grafik pada Gambar 7. hingga Gambar 10. Dalam hal ini, tinjauan dilakukan pada critical spacing ratio yang dapat mewakili kecenderungan gaya dari konfigurasi lainnya.

Gambar 7. memperlihatkan bahwa osilasi gaya lift memiliki

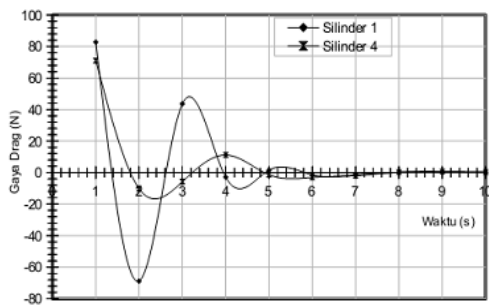


(a) rentang waktu 0-10 detik

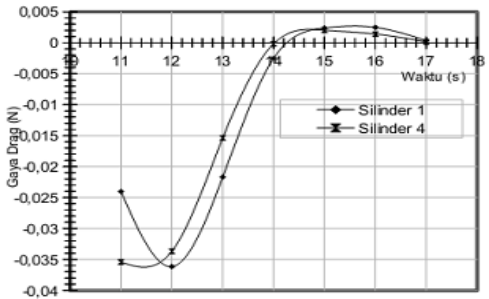


(b) rentang waktu 11-17 detik.

Gambar 7. Grafik gaya lift pada silinder 1 dan 4 ditinjau per satuan waktu.

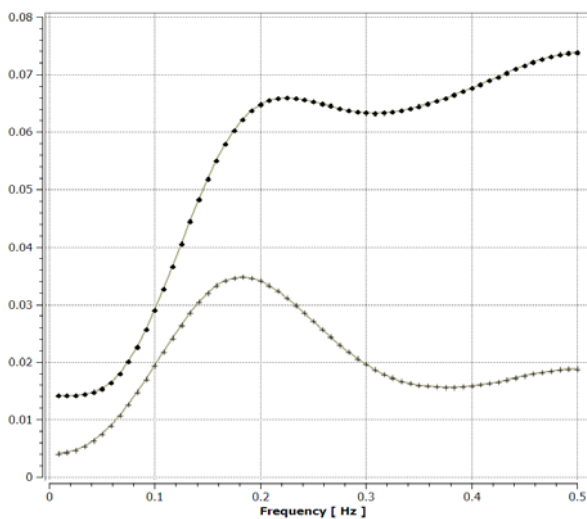


(a) rentang waktu 0-10 detik

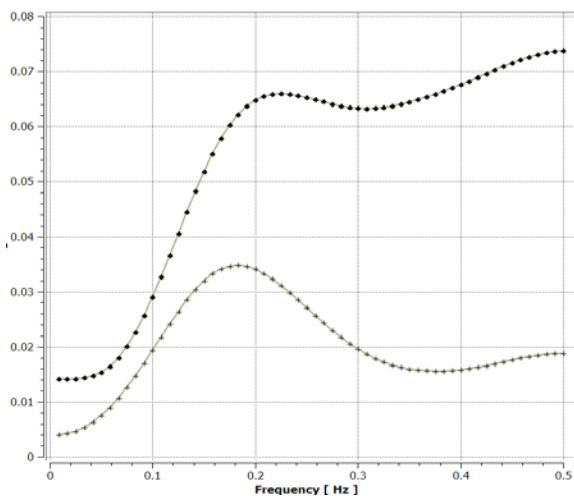


(b) rentang waktu 11-17 detik

Gambar.8. Grafik gaya drag pada silinder 1 dan 4 ditinjau per satuan waktu.



Gambar. 9. Grafik frekuensi gaya lift pada silinder 1 dan 4.

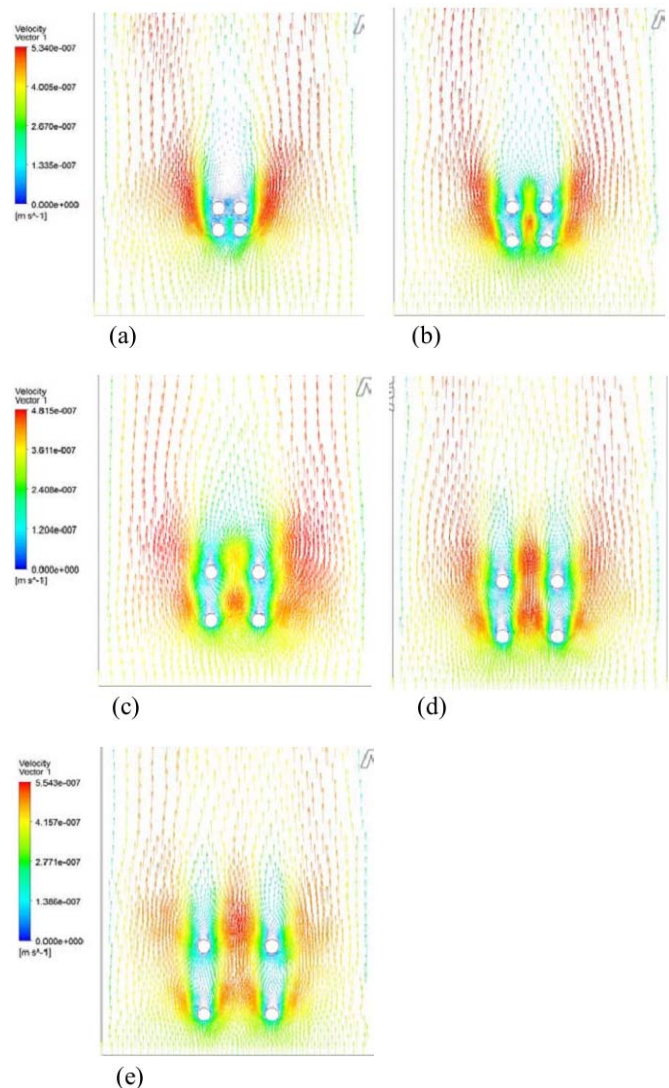


Gambar. 10. Grafik frekuensi gaya drag pada silinder 1 dan 4. amplitudo yang besar pada empat detik pertama dan menurun

drastis pada detik ke lima, dimana amplitudo gaya silinder 1 dua kali lebih besar daripada silinder 4 namun masih dalam satu fase.

Selanjutnya, gaya berosilasi dengan amplitudo yang relative sangat kecil sehingga nampak sebagai garis lurus. Berdasarkan Gambar 9., frekuensi gaya lift pada silinder 1 untuk peak pertama adalah 0.22 Hz, dan frekuensi gaya lift pada silinder 4 untuk peak pertama adalah 0.19 Hz. Pada silinder 1, gaya lift terus meningkat pada rentang frekuensi 0-0.22 Hz, menurun hingga frekuensi 0.32 Hz dan naik kembali hingga 0.75×10^{-3} N pada frekuensi 0.5 Hz. Sedangkan pada silinder 4, gaya lift meningkat pada rentang frekuensi 0 - 0.19 Hz, turun hingga frekuensi 0.37 dan naik kembali hingga frekuensi 0.5. Peningkatan yang terjadi tidak se-signifikan pada silinder 1 dan tidak melebihi peak yang pertama.

Berdasarkan Gambar 8., sebagaimana pada gaya lift, gaya drag juga mengalami amplitudo terbesar pada empat detik pertama dan selanjutnya konstan dengan amplitudo sangat kecil namun masih di atas nol. Antara gaya drag pada silinder



Gambar. 11. Visualisasi pola dan kecepatan aliran di sekitar silinder (a) $S^*x/S^*y=1.6$; (b) $S^*x/S^*y=2.5$; (c) $S^*x/S^*y=3.5$; (d) $S^*x/S^*y=4$; (e) $S^*x/S^*y=5$.

1 dan 4 terdapat beda fase amplitudo kurang lebih ¼ siklus. Frekuensi gaya drag pada silinder 1 untuk peak pertama adalah 0.17 Hz, dan frekuensi gaya drag pada silinder 4 untuk peak pertama adalah 0.19 Hz. Pada silinder 1, gaya drag terus meningkat pada rentang frekuensi 0-0.17 Hz, menurun hingga frekuensi 0.26 Hz dan naik kembali hingga 1.037×10^{-3} N pada frekuensi 0.44 Hz. Sedangkan pada silinder 4, gaya drag meningkat pada rentang frekuensi 0 - 0.19 Hz, turun hingga frekuensi 0.38 Hz dan naik kembali hingga frekuensi 0.5.

Variasi spacing ratio ini juga dapat dilihat pengaruhnya pada pola aliran di sekitar silinder sebagaimana digambarkan pada Gambar 11. Pada spacing ratio 1.6 - 3.5, aliran di belakang silinder 1 dan 2 menyatu dan mempengaruhi silinder di belakangnya.

Hal ini menimbulkan reduksi pada respon gaya yang lebih kecil pada silinder 1 dan 2. Sedangkan pada spacing ratio 4 dan 5, aliran di belakang silinder 1 dan 2 hampir seluruhnya sudah memisah dari aliran di sekitar silinder 3 dan 4. Dengan kata lain, untuk spacing ratio lebih dari 3.5, menunjukkan motions yang tidak tersinkronisasi satu sama lain dan gaya yang terjadi bersifat independen.

Pada konfigurasi yang membedakan jarak pada sumbu x dan y, dimana spacing ratio pada sumbu y lebih lebar, nilai C_D relatif tidak berubah terhadap spacing ratio yang simetris, namun nilai C_L mengalami penurunan nilai hingga 50% terhadap spacing ratio simetris yang lebih kecil. Misalnya pada silinder dengan spacing ratio 1.6 pada $Re=200$, C_L pada silinder 1 adalah 0.0207, dan nilai C_L pada silinder 1 untuk $S^*x=1.6 / S^*y=2.5$ adalah 0.01038.

Analisis selanjutnya dilakukan pada displacement atau amplitudo perpindahan silinder akibat adanya getaran oleh fenomena VIV. Waktu tinjau diambil 360 detik karena mewakili perpindahan silinder dan dalam batas toleransi kemampuan memori computer. Tinjauan dilakukan pada silinder dengan critical spacing ratio 3.5D. Perpindahan silinder akibat adanya cross flow vibration dan in-line vibration dipisahkan per-silinder dan per-arrah perpindahannya. Karena alirannya yang lambat ($Re=200$), hingga $t=360$ perpindahan yang terjadi kurang dari dua siklus.

Perpindahan akibat in-line vibrations pada silinder 4 lebih besar daripada silinder 1 dan masih dalam satu fase, dengan A/D maksimum ± 0.00053 . Perpindahan yang terjadi pada 200 detik pertama ke arah sumbu x positif kemudian kembali ke garis kesetimbangan.

Selanjutnya silinder bergerak ke arah sumbu x negatif. Di sisi lain, terjadi perpindahan akibat cross flow vibrations yang berkebalikan dengan perpindahan akibat in-line vibrations. Jarak perpindahan silinder 1 secara umum sama dengan silinder 4 dengan A/D maksimum ± 0.0003 . Frekuensi amplitudo perpindahan silinder hampir sama untuk semua silinder pada masing-masing arah perpindahan yaitu sebesar 0.009 siklus/detik.

C. Efek Variasi Aspect Ratio Silinder terhadap Karakteristik Gaya dan Pola Aliran Fluida yang Melewati Silinder

Variasi aspect ratio (L/D), sebagaimana dipaparkan di awal, menggunakan silinder dengan diameter 20.in untuk

silinder 3 dan 4. Perhitungan komponen gaya yang timbul menunjukkan bahwa variasi ini tidak banyak memberikan pengaruh pada upstream cylinder, akan tetapi terjadi perubahan gaya pada downstream cylinder. Berdasarkan hasil pada Tabel 5 dan Tabel 6, gaya drag yang timbul pada silinder 4 relatif sama terhadap L/D=16 dengan selisih berkisar 0.01-0.2. Sedangkan untuk koefisien lift pada silinder 4 memiliki nilai yang relatif sama pada spacing ratio 1.6 da 2.5, namun kemudian mengalami penurunan yang drastis pada spacing ratio 3.5-5.

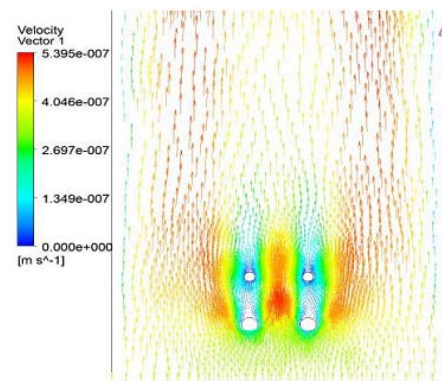
Atas dasar data tersebut, analisis variasi aspect ratio akan difokuskan pada spacing ratio 3.5D. Sebagai perbandingan, pola aliran di sekitar silinder 4 dengan aspect ratio 24 dapat dilihat pada Gambar 12. Dengan diameter yang lebih kecil,

Tabel 5. Perbandingan koefisien gaya antar aspect ratio yang berbeda untuk $Re=200, L/D=16-16$

$Re = 200$	$L/D=16-16$			
	CD		CL	
S^*x-S^*y	Cy1	Cy4	Cy1	Cy4
0				
1.6	1.360235	0.182957	0.020767	0.225247
2.5	1.288293	0.268042	0.052748	0.15553
3.5	1.171034	0.527952	0.071307	0.412629
4	1.181273	0.563702	0.245792	0.702813
5	1.227475	0.768377	0.367946	0.737968

Tabel 6. Perbandingan koefisien gaya antar aspect ratio yang berbeda untuk $Re=200, L/D=16-24$

$Re = 200$	$L/D=16-24$			
	CD		CL	
S^*x-S^*y	Cy1	Cy4	Cy1	Cy4
0				
1.6	1.490753	0.136798	0.018607	0.160015
2.5	1.342075	0.252089	0.209375	0.11088
3.5	1.208192	0.657197	0.127123	0.049696
4	1.883357	0.730288	0.09928	0.026126
5	1.2386	0.810202	0.054135	0.016881



Gambar. 12. Visualisasi pola dan kecepatan aliran di sekitar silinder pada $S^*x/S^*y=3.5$ dengan aspect ratio pada silinder 3 dan 4 = 24.

silinder 4 lebih dahulu memisah (dibandingkan dengan silinder 4 berdiameter 30.in) dari pengaruh *vortex* silinder di depannya sehingga koefisien gayanya menurun drastis.

D.Efek Variasi Reynold Number Silinder terhadap Karakteristik Gaya

Variasi *Reynold number* pada penelitian ini meliputi $Re=100$ dan 300 , dimana variasi ini diharapkan dapat menggambarkan interaksi VIV untuk *Reynold Number* yang lebih rendah dan lebih tinggi dari 200 . Perlu dicatat, Re antara 200 dan 300 merupakan transisi dari aliran laminar menjadi *turbulent*. Nilai koefisien *drag* dan *lift* untuk $Re=100$ dan 300 ditunjukkan pada Tabel 7 dan Tabel 8.

Secara umum, komparasi koefisien gaya *drag* maupun *lift* pada masing-masing *spacing ratio* menunjukkan kecenderungan yang sama dengan penelitian Schlichting dan Schewe yang menyatakan bahwa nilai koefisien *drag* dan *lift* menurun secara monoton seiring meningkatnya *Reynold*

Tabel 7.

Perbandingan koefisien gaya *drag* antar *Reynold Number* 100 dan 300 untuk *spacing ratio* yang berbeda dengan $L/D=16$

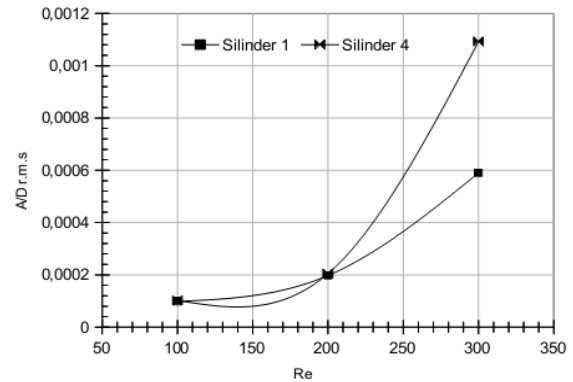
S*x/S*y	C _D			
	Re=100		Re=300	
	Cyl-1	Cyl-4	Cyl-1	Cyl-4
1.6	1.48454	0.438562	0.932205	0.178487
2.5	1.757774	0.913637	0.982969	0.364793
3.5	1.824228	1.207569	0.979343	0.457024
4	0.870135	2.762766	0.980991	0.502474
5	1.881486	1.457273	1.001758	0.587044
1.6-2.5	1.647116	0.746441	0.961543	0.229773
2.5-3-5	1.749467	1.003711	0.949017	0.339813
3.5-4	1.802275	1.214691	0.966158	0.450199
4-5	1.758664	1.181343	0.936491	0.48687

Tabel 8.

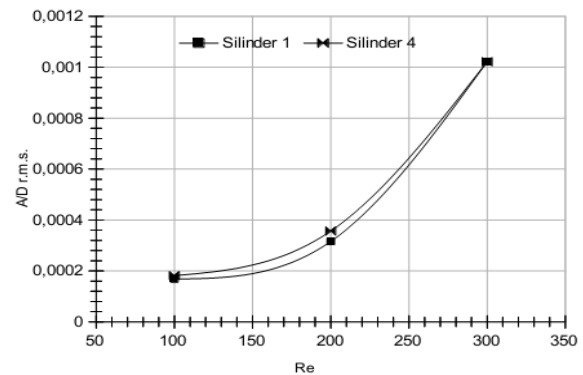
Perbandingan koefisien gaya *lift* antar *Reynold Number* 100 dan 300 untuk *spacing ratio* yang berbeda dengan $L/D=16$

S*x/S*y	C _L			
	Re=100		Re=300	
	Cyl-1	Cyl-4	Cyl-1	Cyl-4
1.6	0.833348	0.145193	0.418306	0.138378
2.5	0.47319	0.22921	0.153049	0.067117
3.5	0.227339	0.12276	0.097934	0.033828
4	0.053134	0.263858	0.075618	0.026682
5	0.088764	0.030699	0.041864	0.014753
1.6-2.5	0.588595	0.259185	0.172893	0.05732
2.5-3-5	0.236387	0.135757	0.088144	0.03684
3.5-4	0.175392	0.082389	0.07275	0.028521
4-5	0.105733	0.049989	0.049643	0.028365

Number hingga $Re=300$ [14]. Hal ini juga berlaku untuk silinder dengan *aspect ratio* 24 . Sedangkan analisis visual dari pola aliran memberikan kesimpulan bahwa dengan semakin meningkatnya *Reynold Number*, semakin besar pula kecepatan aliran di antara dua pasang silinder tandem dalam posisi *side-by-side*. Akibatnya, kedua pasang silinder tersebut semakin



Gambar. 13. Grafik A/D r.m.s. terhadap Re untuk *cross flow motions*.



Gambar. 14. Grafik A/D r.m.s. terhadap Re untuk *in-line motions*.

terkurangi pengaruhnya satu sama lain.

Pengaruh variasi *Reynold Number* terhadap *displacement* atau *amplitudo* perpindahan silinder akibat adanya getaran oleh fenomena VIV dapat dinyatakan dengan grafik A/D r.m.s. (*root-mean square* dari rasio amplitudo getaran terhadap diameter silinder) terhadap *Reynold Number*.

Dari grafik di atas dapat disimpulkan bahwa *displacement* setiap silinder untuk masing-masing arah gerakan, *cross flow motions* maupun *in-line motions*, semakin membesar seiring meningkatnya *Reynold Number*.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menyajikan investigasi numeris tiga dimensi untuk menganalisa pengaruh dan interaksi VIV dengan adanya variasi *spacing ratio*, *aspect ratio*, dan *Reynold Number* pada aliran laminar di sekitar empat silinder tegak fleksibel dengan konfigurasi *n-line square*. Hasil penelitian terdahulu juga turut diangkat sebagai bahan validasi hasil studi numeris.

Berdasarkan hasil studi numeris yang disajikan dalam penelitian ini, beberapa kesimpulan dapat disampaikan di bawah ini.

- Tipe VIV yang terjadi pada setiap *spacing ratio* untuk

silinder 1 adalah *in-line vibrations* dan untuk silinder 4 adalah *cross-flow vibrations*. Pengaruh variasi *spacing ratio* terhadap interaksi VIV ditunjukkan dengan adanya efek redaman pada silinder yang berdekatan, $S^*x/S^*y \leq 3.5$ sehingga gaya *drag* dan *lift* menjadi lebih kecil.

- Variasi *aspect ratio* membuat *downstream cylinder* lebih cepat terlepas dari pengaruh aliran dari silinder di depannya karena jarak antar diameter terluar silinder menjadi lebih besar. Hal ini berpengaruh pada C_L silinder 4 pada $S^*x/S^*y \geq 3.5$ yang menurun drastis, tidak mengikuti tren dari *spacing ratio* sebelumnya. Penurunan C_L ini menyebabkan perubahan tipe VIV pada silinder 4 yang sebelumnya cenderung pada *cross-flow vibrations* menjadi *in-line vibrations*.
- Seiring dengan meningkatnya *Reynold Number*, C_D dan C_L semakin kecil, untuk besar gaya yang sama dan sebaliknya, *displacement* setiap silinder untuk masing-masing arah gerakan, *cross flow motions* maupun *in-line motions* semakin meningkat. Pada $Re=100$, silinder 1 cenderung mengalami *in-line vibrations* dan silinder 4 cenderung mengalami *cross-flow vibrations*. Sedangkan pada saat $Re=300$, baik silinder 1 maupun silinder 4 cenderung mengalami *in-line vibrations* karena C_D memang jauh lebih besar daripada C_L .

Hasil penelitian ini disarankan untuk dibuktikan secara eksperimental dan dilakukan pada aliran *turbulent* dengan cara meningkatkan *Reynold Number* untuk lebih menguatkan kevalidannya. Dan untuk aplikasinya, hasil penelitian ini dapat digunakan dalam proses desain perpipaan yang kompleks, agar dapat memanfaatkan karakteristik interaksi aliran, *vortex* dan gaya yang timbul untuk meminimalisir getaran yang timbul tanpa harus memasang struktur tambahan *passive suppression devices*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Moulinec, J. C. R. Hunt, dan F. T. M. Nieuwstadt, "Disappearing wakes and dispersion in numerically simulated flows through tube bundles," *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 73 (2004) 95–116.
- [2] N.K.-R. Kevlahan, "Three-dimensional Floquet stability analysis of the wake in cylinder arrays," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 592 (2007) 79–88.
- [3] A. T. Sayers, "Flow Interference Between Four Equispaced Cylinders When Subjected to A Cross Flow," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 31, No. 1 (1988, Okt.) 9–28.
- [4] A. T. Sayers, "Vortex Shedding from Groups of Three and Four Equispaced Cylinders Situated in Cross-Flow," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 34, No. 2 (1990, Juli) 213–221.
- [5] K. Lam dan S. C. Lo, "A Visualization Study of Cross-flow Around Four Cylinders in A Square Configuration," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 6, No. 1 (1992, Jan.) 109–131.
- [6] K. Lam, J. Y. Li, K. T. Chan, dan R. M. C. So, "Flow Pattern and Velocity Field Distribution of Cross-Flow Around Four Cylinders in A Square Configuration at Low Reynolds Number," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 17, No. 5 (2003, Apr.) 579–665.

- [7] K. Lam, "The effect of interference of four equispaced cylinders in cross flow on pressure and force coefficients," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 9, No. 2 (1995) 195–214.
- [8] K. Lam dan L. Zou, "Experimental and Numerical Study for The Cross-Flow Around Four Cylinders in An In-Line Square Configuration," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No.9 (2007) 1338–1343.
- [9] T. Farrant, M. Tan, dan W. G. Price, "A Cell Boundary Element Method Applied to Laminar Vortex-Shedding from Arrays of Cylinders in Various Arrangements," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 14, No.3 (2000, Apr.) 375–402.
- [10] K. Lam dan L. Zou, "Three-dimensional Numerical Simulations of Cross-flow Around Four Cylinders in An In-line Square Configuration," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 26, No. 3 (2010) 482–502.
- [11] Subrata K. Chakrabarti, *Handbook of Offshore Engineering*, USA: Offshore Structure Analysis, Inc. (2005).
- [12] *Specification for Structural Steel Buildings*. American Institute Of Steel Construction, Inc. Chicago, Illinois (2005).
- [13] *Recommended Practice for Planing, designing, and constructing Fixed Offshore Platform-Working Stress Design*. American Petroleum Institute, Washington D.C (2000).
- [14] B. Mutlu Sumer dan Jorgen Fredsoe. 2006. "Hydrodynamics Around Cylindrical Structure," in *Advanced Series of Ocean Engineering*-Vol. 26, USA: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. (2006)