



TESIS - MO 142528

Studi Numerik Pengaruh Variasi *Pitch* dan Sudut Datang Aliran terhadap Gaya Fluida pada Silinder *Rigid* dengan *Helical Rods Ber-Gap*

ARIEF SYARIFUDDIN
NRP. 4113. 201. 002

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. Rudi Walujo Prastianto, ST., MT.
Silvianita, ST., M.Sc., Ph.D

**PROGRAM MAGISTER
JURUSAN TEKNIK PERANCANGAN BANGUNAN LAUT
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015**



TESIS - MO 142528

Numerical Study on the Fluid Forces of A Rigid Cylinder Covered by Helical Rods with Gap Due to the Variations of Incoming Flow Direction and Pitch

ARIEF SYARIFUDDIN
NRP. 4113. 201. 002

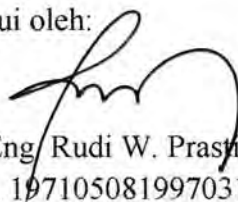


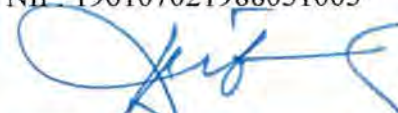
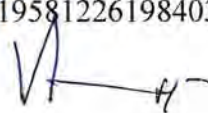
Supervisor
Dr.Eng. Rudi Walujo Prastianto, ST., MT.
Silvianita, ST., M.Sc., Ph.D

**MASTER PROGRAM
GRADUATE PROGRAM IN MARINE ENGINEERING
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2015**

**Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister
Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
oleh:
Arief Syarifuddin
NRP. 4113. 201. 002**

Tanggal Ujian : 16 Januari 2015
Periode Wisuda : Maret 2015

Disetujui oleh:

- 
1 Dr.Eng/ Rudi W. Prashanto, ST., MT. (Pembimbing I)
NIP. 197105081997031001
- 
2 Silvanita, ST., M.Sc., Ph.D (Pembimbing II)
NIP. 198308062006042001
- 
3 Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D. (Penguji)
NIP. 196107021988031003
- 
4 Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. (Penguji)
NIP. 195812261984031002
- 
5 Yoyok Setyo Hadiwidodo, ST., MT., Ph.D. (Penguji)
NIP. 197111051995121001


Direktur Program Pascasarjana,
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
NIP. 196404051990021001

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Segala puja dan puji syukur kehadiran Allah SWT karena berkat limpahan rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan sebaik-baiknya. Tesis yang berjudul “Studi Numerik Pengaruh Variasi *Pitch* dan Sudut Datang Aliran terhadap Gaya Fluida pada Silinder *Rigid* dengan *Helical Rods Ber-Gap*” merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan Studi Pasca sarjana (S-2) di Teknik Perancangan Bangunan Laut, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Tesis ini secara khusus akan membahas pengaruh pemasangan *helical rods ber-gap* terhadap pengurangan gaya fluida (*gaya drag* dan *lift*) yang dialami oleh silinder akibat *vortex shedding*, serta pola distribusi kecepatan partikel fluida yang terbentuk akibat adanya pemasangan *helical rods ber-gap*. Pemodelan untuk pengerjaan tesis ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamic (CFD)*.

Penulis sadar bahwa laporan tesis yang dibuat masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, untuk membuat kemampuan menyusun laporan yang lebih baik lagi ke depannya, penulis meminta para pembaca untuk bersedia memberikan kritik dan sarannya. Penulis juga berharap semoga tesis ini bisa bermanfaat bagi perkembangan teknologi di bidang rekayasa kelautan.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Surabaya, 27 Januari 2015

Arief Syarifuddin

halaman ini sengaja dikosongkan

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih yang sebesar-besarnya penulis ucapkan kepada semua pihak yang telah berperan secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan tesis ini. Secara khusus penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ayah dan Ibu yang selalu memberi dukungan moril dan materiil, serta dukungan do'a yang tak pernah terputus. Terima kasih juga terucap untuk kedua adikku yang selalu memberikan canda tawanya, sehingga penulis selalu bersemangat dalam mengerjakan tesis ini.
2. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, ST., MT. dan Silvianita, ST., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing tesis. Terima kasih atas semua ilmu dan bimbingan yang diberikan selama pengerjaan tesis ini.
3. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, ST., MT. selaku Ketua PPsTK-FTK serta seluruh dosen PPsTK-FTK. Terima kasih atas bimbingan selama masa perkuliahan.
4. Seluruh karyawan PPsTK-FTK (Ibu Sri Rejeki, Pak Hasan, Mbak Dian, Mas Zaenur) yang banyak membantu perihal administrasi perkuliahan.
5. Beasiswa Fresh Graduate DIKTI yang telah memberikan dukungan berupa materiil.
6. Rekan-rekan seperjuangan pengerjaan tesis, secara khusus kepada Erdina Arianti, Mahasin M. A, Fardiansyah C. P. P., I Dewa Gede A. S. Y. dan semua kawan-kawan Leviathan. Terima kasih telah bersedia berbagi ilmu, pengalaman, informasi, dan canda tawa.
7. Pihak-pihak lainnya yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Tidak akan selesai dengan baik pengerjaan tesis ini jika tidak terdapat campur tangan dari pihak-pihak yang telah disebutkan di atas. Terima kasih sekali lagi atas segala bantuan yang diberikan, Semoga segala yang diberikan kepada penulis terhitung sebagai amal jariyah oleh Allah SWT. Amin.

-Penulis-

Studi Numerik Pengaruh Variasi *Pitch* dan Sudut Datang Aliran terhadap Gaya Fluida pada Silinder Rigid dengan *Helical Rods Ber-Gap*

Nama mahasiswa : Arief Syarifuddin
NRP : 4113. 201. 002
Pembimbing : Dr.Eng. Rudi W. Prastianto, ST., MT.
Ko-pembimbing : Silvianita, ST., M.Sc., Ph.D

ABSTRAK

Vortex Induced Vibration (VIV) merupakan salah satu penyebab terjadinya kelelahan pada struktur silindris bangunan lepas pantai yang berada pada medan aliran fluida (misalnya: *riser*, *tendon*, *mooring lines*, dll.). VIV menyebabkan struktur tersebut bergetar atau berosilasi dengan frekuensi tertentu. Osilasi ini akan menyebabkan kelelahan yang selanjutnya dapat mengakibatkan kegagalan struktur. Pada tesis ini silinder terpasang *fixed*, sehingga tinjauan penelitian hanya untuk gaya fluida dan pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder yang disebabkan *vortex shedding*. Banyak peneliti berupaya untuk mengurangi dampak yang dihasilkan oleh adanya VIV, salah satunya adalah dengan memasang *passive suppression device* pada silinder. Salah satu *passive suppression device* yang efektif mengurangi VIV adalah *helical rods ber-gap*. Pada tesis ini akan membahas pengaruh dari dilakukannya beberapa variasi sudut datang aliran, Reynolds number (Re), panjang *pitch* dan *gap* pada silinder dengan *helical rods ber-gap* terhadap gaya fluida dan pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder. Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa konfigurasi *helical rods ber-gap* yang terbaik dalam mereduksi gaya fluida adalah konfigurasi dengan rasio $g/D = 0.154$ dan panjang *pitch* $30D$. Untuk sudut datang aliran 0° mampu mereduksi C_D sebesar 37.59% pada $Re = 10^6$ dan mereduksi C_L sebesar 88.32% untuk $Re = 10^3$. Sedangkan untuk sudut datang aliran 60° mampu mereduksi C_D sebesar 35.91% dan C_L sebesar 99.83% pada $Re = 10^6$. Adanya pemasangan *helical rods ber-gap* untuk semua variasi Re akan menyebabkan pengurangan kecepatan partikel fluida di sekitar silinder yang dapat dilihat dari pola distribusi kecepatan partikel fluida yang terjadi. Berkurangnya kecepatan partikel fluida di sekitar silinder dengan adanya *helical rods ber-gap* menunjukkan bahwa secara tidak langsung *helical rods ber-gap* juga akan mengurangi gaya fluida yang bekerja pada silinder.

Kata kunci: *vortex shedding*, *helical rods ber-gap*, Reynolds number, sudut datang aliran, *pitch*, *gap*, gaya fluida, pola distribusi kecepatan partikel

Numerical Study on the Fluid Forces of A Rigid Cylinder Covered by Helical Rods with Gap Due to the Variations of Incoming Flow Direction and Pitch

Name : Arief Syarifuddin
Reg. Number : 4113. 201. 002
Supervisors : Dr.Eng. Rudi W. Prastianto, ST., MT.
Co-Supervisors : Silvianita, ST., M.Sc., Ph.D

ABSTRACT

Vortex Induced Vibration (VIV) is one cause of damage due to fatigue on a cylindrical structure of offshore structure that are in the field of fluid flow (for example: riser, tendons, mooring lines, etc.). VIV will lead the structure to vibrate or oscillate at a certain frequency. This oscillation will cause fatigue and then can lead to failure. Support on the cylinder is defined as fixed, so the discussion of this thesis only the fluid forces and the distribution patterns of particle velocity around cylinder caused by vortex shedding. Impact of VIV encouraged an increment of research amount to reduce its impact, one of them is to install passive suppression devices on the cylinder. One of passive suppression device which effectively reduces the effect of VIV is helical rods with gap. This thesis specially discusses the influence of variation of incoming flow direction, Reynolds number (Re), pitch and gap in the cylinder due to addition of helical rods with gap on the fluid forces and the distribution patterns of particle velocity around the cylinder. The results of CFD simulation shows that configuration of helical rods with gap which produce best reduction on fluid forces is configuration with the ratio $g/D = 0.154$ and the length of pitch $30D$. For incoming flow direction of 0° can reduce the drag coefficient by 37.59% at $Re = 10^6$ and the lift coefficient by 88.32% at $Re = 10^3$. While incoming flow direction of 60° can reduce the drag coefficient by 35.91% and the lift coefficient by 99.83% at $Re = 10^6$. By installing helical rods with gap for all Re can reduce particle velocity of fluid around the cylinder which can be seen from that the distribution patterns of particle velocity around cylinder. It indirectly showed that installing helical rods with gap also reduces the fluid forces on the cylinder.

Keywords: vortex shedding, helical rods with gap, Reynolds number, incoming flow direction, pitch, gap, fluid forces, the distribution patterns of particle velocity

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
UCAPAN TERIMA KASIH.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Kajian Pustaka.....	7
2.2 Dasar Teori	9
2.2.1 <i>Vortex Induced Vibration (VIV)</i>	9
2.2.2 Mekanisme terjadinya pelepasan <i>vortex (vortex shedding)</i>	12
2.2.3 Gaya <i>drag</i> dan <i>lift</i>	13
2.3 <i>Computational Fluid Dynamic (CFD)</i>	14
2.3.1 Definisi CFD.....	14
2.3.2 Metodologi CFD.....	16
2.3.3 Model Turbulen	20
2.3.4 Validasi untuk Simulasi CFD	21
BAB 3 METODA PENELITIAN	23
3.1 Diagram Alir untuk Metoda Penelitian	23
3.2 Prosedur Penelitian.....	24

BAB 4 ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1 Validasi Analisis CFD	29
4.1.1 Analisis Sensitivitas Meshing	29
4.1.2 Validasi C_D dengan Jurnal Acuan	40
4.1.3 Validasi C_L dengan Buku Literatur	45
4.2 Analisis Pengaruh Pemasangan <i>Helical Rods</i> Ber-gap	47
4.2.1 Analisis Pengaruh Variasi Sudut Datang Aliran terhadap Gaya Fluida	48
4.2.2 Analisis Pengaruh Panjang <i>Pitch</i> pada Silinder dengan <i>Helical Rods</i> Ber-gap	50
4.2.3 Analisis Pengaruh Variasi <i>Gap</i> pada Silinder dengan <i>Helical Rods</i> Ber-gap	54
4.3 Analisis Pengaruh Pemasangan <i>Helical Rods</i> Ber-gap terhadap Pola Distribusi Kecepatan Partikel di Sekitar Silinder	59
4.3.1 Pola Distribusi Kecepatan Partikel di Sekitar Silinder pada $Re = 10^3$	59
4.3.2 Pola Distribusi Kecepatan Partikel di Sekitar Silinder pada $Re = 10^4$	62
4.3.3 Pola Distribusi Kecepatan Partikel di Sekitar Silinder pada $Re = 10^6$	65
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	69
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran	70
DAFTAR PUSTAKA.....	71

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Hasil sensitivitas <i>meshing</i> 1	30
Tabel 4.2	Ukuran <i>meshing</i> yang digunakan untuk sensitivitas <i>meshing</i> 1	31
Tabel 4.3	Pengaruh perubahan parameter terhadap bentuk <i>meshing</i> dan jumlah elemen	32
Tabel 4.4	Hasil sensitivitas <i>meshing</i> 2	36
Tabel 4.5	Ukuran <i>meshing</i> yang digunakan untuk simulasi 5	37
Tabel 4.6	Hasil sensitivitas <i>meshing</i> 3	38
Tabel 4.7	Ukuran <i>meshing</i> yang digunakan simulasi 5	39
Tabel 4.8	Koefisien <i>drag</i> yang dihasilkan antara simulasi perangkat lunak CFD dan eksperimen	40
Tabel 4.9	Perbandingan C_D simulasi dan referensi	41
Tabel 4.10	Perbandingan C_D antara simulasi dan eksperimen	42
Tabel 4.11	Koefisien <i>drag</i> terskala untuk berbagai variasi Re	44
Tabel 4.12	Data C_L dari literatur dan simulasi	45
Tabel 4.13	Koefisien <i>lift</i> terskala untuk berbagai variasi Re	47
Tabel 4.14	Koefisien <i>drag</i> dan <i>lift</i> yang dihasilkan antara <i>bare cylinder</i> dan silinder dengan <i>helical rods</i> ber- <i>gap</i> untuk sudut datang aliran 0° dan 60°	48
Tabel 4.15	Koefisien <i>drag</i> yang dihasilkan antara <i>bare cylinder</i> dan silinder dengan <i>helical rods</i> ber- <i>gap</i> untuk sudut datang aliran 0° dan 60° dengan variasi panjang <i>pitch</i>	51
Tabel 4.16	Koefisien <i>lift</i> yang dihasilkan antara <i>bare cylinder</i> dan silinder dengan <i>helical rods</i> ber- <i>gap</i> untuk sudut datang aliran 0° dan 60° dengan variasi panjang <i>pitch</i>	51
Tabel 4.17	Koefisien <i>drag</i> dan <i>lift</i> untuk sudut datang aliran 0° dan <i>gap</i> 0.05 m	54
Tabel 4.18	Koefisien <i>drag</i> dan <i>lift</i> untuk sudut datang aliran 60° dan <i>gap</i> 0.05 m	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Model silinder dengan <i>helical rods</i> ber-gap (a) Variasi sudut datang aliran; (b) Variasi <i>pitch</i> ; (c) Variasi <i>gap</i>	3
Gambar 2.1	Pola distribusi kecepatan aliran fluida di sekitar silinder.....	11
Gambar 2.2	Grafik hubungan Reynolds <i>number</i> dan Strouhal <i>number</i>	12
Gambar 2.3	Skema mekanisme terjadinya pelepasan <i>vortex</i> (<i>vortex shedding</i>) pada sebuah silinder dalam aliran <i>steady</i>	13
Gambar 2.4	Gaya <i>drag</i> dan gaya <i>lift</i> pada silinder.....	13
Gambar 2.5	Konsep dasar dari metodologi simulasi CFD.....	16
Gambar 2.6	Solusi <i>domain</i> berbentuk persegi panjang.....	17
Gambar 2.7	<i>Structured grid</i>	18
Gambar 2.8	<i>Block structured grid</i>	18
Gambar 2.9	<i>Unstructured grid</i>	19
Gambar 2.10	Hasil dari analisis sensitivitas <i>meshing</i>	22
Gambar 3.1	Diagram alir metoda penelitian.....	23
Gambar 3.2	<i>Domain</i> fluida yang digunakan oleh model simulasi.....	25
Gambar 3.3	Model CAD 3-D (a) <i>Bare cylinder</i> ; (b) Silinder dengan <i>helical rods</i> ber-gap.....	25
Gambar 3.4	Prediksi koefisien <i>drag</i> untuk <i>fixed bare cylinder</i> oleh CFD dan perbandingan dengan nilai data eksperimen.....	26
Gambar 3.5	Koefisien <i>lift</i> untuk silinder mulus dalam aliran <i>steady</i>	27
Gambar 3.6	Model CFD (a) <i>Bare cylinder</i> ; (b) Silinder dengan <i>helical rods</i> ber-gap.....	27
Gambar 4.1	Grafik untuk analisis sensitivitas <i>meshing</i> 1.....	30
Gambar 4.2	Bentuk <i>meshing</i> untuk sensitivitas <i>meshing</i> 1.....	31
Gambar 4.3	Pengaruh dari pengurangan ukuran <i>maximum face size</i> (a) <i>Maximum face size</i> 0.15 m; (b) <i>Maximum face size</i> 0.1 m.....	33
Gambar 4.4	Pengaruh dari pengurangan ukuran <i>curvature</i> (a) <i>Curvature</i> 18°; (b) <i>Curvature</i> 15°.....	34

Gambar 4.5	Pengaruh dari pengurangan ukuran <i>growth rate</i> (a) <i>Growth rate</i> 1.2; (b) <i>Growth rate</i> 1.1	35
Gambar 4.6	Grafik untuk hasil analisis sensitivitas <i>meshing</i> 2	36
Gambar 4.7	Bentuk <i>meshing</i> untuk sensitivitas <i>meshing</i> 2	37
Gambar 4.8	Grafik untuk hasil analisis sensitivitas <i>meshing</i> 3	38
Gambar 4.9	Bentuk <i>meshing</i> untuk sensitivitas <i>meshing</i> 3	39
Gambar 4.10	Grafik untuk C_D pada simulasi CFD dan eksperimen	41
Gambar 4.11	<i>Trendline</i> untuk C_D eksperimen dan simulasi.....	43
Gambar 4.12	<i>Trendline</i> untuk fungsi skala.....	43
Gambar 4.13	Perbandingan C_D terskala dengan C_D eksperimen di beberapa Re . 44	
Gambar 4.14	<i>Trendline</i> untuk C_L literatur dan simulasi.....	45
Gambar 4.15	<i>Trendline</i> untuk fungsi skala.....	46
Gambar 4.16	Perbandingan C_L terskala dengan C_L eksperimen di beberapa Re	47
Gambar 4.17	Grafik koefisien gaya fluida untuk variasi sudut datang aliran (a) Koefisien <i>drag</i> ; (b) Koefisien <i>lift</i>	49
Gambar 4.18	Grafik C_D untuk setiap variasi panjang <i>pitch</i> (a) Sudut datang aliran 0° ; (b) Sudut datang aliran 60°	52
Gambar 4.19	Grafik C_L untuk setiap variasi panjang <i>pitch</i> (a) Sudut datang aliran 0° ; (b) Sudut datang aliran 60°	53
Gambar 4.20	Grafik koefisien gaya fluida untuk semua variasi <i>gap</i> pada sudut datang aliran 0° (a) Koefisien <i>drag</i> ; (b) Koefisien <i>lift</i>	55
Gambar 4.21	Grafik koefisien gaya fluida untuk semua variasi <i>gap</i> pada sudut datang aliran 60° (a) Koefisien <i>drag</i> ; (b) Koefisien <i>lift</i>	57
Gambar 4.22	Grafik koefisien gaya fluida dengan rasio $g/D = 0.154$ pada sudut datang aliran 60° (a) Koefisien <i>drag</i> ; (b) Koefisien <i>lift</i>	58
Gambar 4.23	Pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder untuk $Re = 10^3$ pada tiga elevasi silinder (a) <i>Bare cylinder</i> ; (b) Silinder dengan <i>helical rods</i> ber- <i>gap</i> konfigurasi sudut datang aliran 0°	60
Gambar 4.24	Pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder untuk $Re = 10^3$ pada tiga elevasi silinder (a) <i>Bare cylinder</i> ; (b) Silinder dengan <i>helical rods</i> ber- <i>gap</i> konfigurasi sudut datang aliran 60°	61

- Gambar 4.25 Pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder untuk $Re = 10^4$ pada tiga elevasi silinder (a) *Bare cylinder*; (b) Silinder dengan *helical rods* ber-gap konfigurasi sudut datang aliran 0° 63
- Gambar 4.26 Pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder untuk $Re = 10^4$ pada tiga elevasi silinder (a) *Bare cylinder*; (b) Silinder dengan *helical rods* ber-gap konfigurasi sudut datang aliran 60° 64
- Gambar 4.27 Pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder untuk $Re = 10^6$ pada tiga elevasi silinder (a) *Bare cylinder*; (b) Silinder dengan *helical rods* ber-gap konfigurasi sudut datang aliran 0° 66
- Gambar 4.28 Pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder untuk $Re = 10^6$ pada tiga elevasi silinder (a) *Bare cylinder*; (b) Silinder dengan *helical rods* ber-gap konfigurasi sudut datang aliran 60° 67

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Struktur anjungan lepas pantai merupakan struktur yang memiliki banyak komponen silindris di dalamnya. Beberapa contoh komponen silindris yang digunakan pada struktur anjungan lepas pantai adalah *riser*, tendon, dan juga *pile jacket*. Penting untuk diketahui bahwasanya setiap komponen silindris yang dikenai fluida baik itu berupa gas maupun cair akan mengalami fenomena *Vortex Induced Vibration* (VIV). *Vortex* adalah suatu aliran dimana partikel fluida berotasi terhadap titik pusatnya. Pelepasan *vortex* disebut dengan *vortex shedding*, yang mempunyai kecepatan transversal dan tangensial bervariasi terhadap radiusnya (Indiyono, 1994). Fluida yang bergerak mengenai struktur silindris akan berakibat pada timbulnya ulekan di sisi belakang silinder. Penambahan kecepatan fluida berdampak kepada perubahan sifat simetris fluida saat pertama kali mengenai silinder menjadi tidak simetris dan jika terus menerus terjadi akan menyebabkan terjadinya getaran. Gaya yang ditimbulkan akibat adanya getaran tersebut akan mengakibatkan kerusakan jika frekuensinya sama atau mendekati frekuensi natural struktur atau biasa disebut resonansi atau *lock-in*. Resonansi tersebut akan menyebabkan getaran dan kelelahan sehingga struktur akan patah (Yamamoto dkk., 2004).

Beberapa metode telah banyak disajikan oleh banyak peneliti untuk dapat mengurangi efek yang ditimbulkan oleh VIV, seperti yang telah diutarakan oleh Blevins (2001), untuk mengurangi efek yang ditimbulkan VIV terhadap silinder, maka dapat digunakan empat cara sebagai berikut: meningkatkan *reduced damping*, menghindari terjadinya resonansi, menggunakan *streamlined cross section*, dan menambahkan alat peredam *vortex* (*vortex suppression device*). Sedangkan menurut Jones dan Lamb pada tahun 1993 alat peredam *vortex* terbagi dalam tiga kategori yaitu: *topographic devices*, *shrouds*, dan *wake stabilizers* (Lubbad dkk., 2007). Mereka beranggapan bahwasanya *helical strakes* adalah salah satu *topographic devices* yang paling banyak digunakan sekaligus dapat

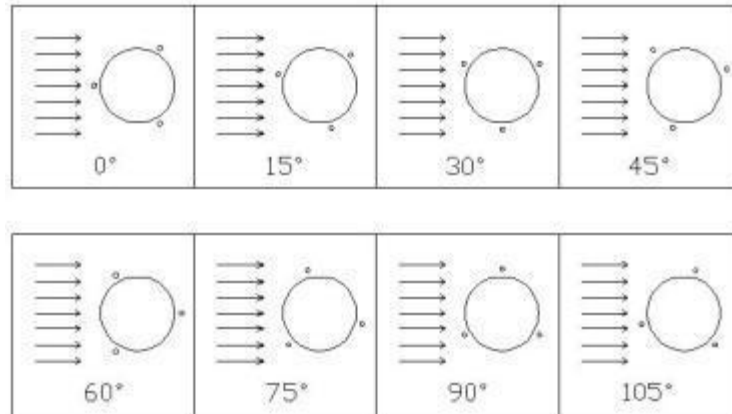
meredam *vortex*. Kelebihan yang dimiliki oleh *helical strakes* seperti yang diungkapkan oleh Trim, dkk. (2005) dalam penelitiannya adalah dengan pemasangan *triple start helical strakes* sepanjang *riser* akan cukup efektif dalam mengurangi kerusakan akibat kelelahan yang dialami oleh *riser*. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Haqiqi, dkk. (2010) menyatakan bahwa selain memiliki kelebihan pemasangan *helical strakes* pada silinder juga memiliki kekurangan yaitu pemasangannya yang relatif lebih susah dan terjadinya penambahan gaya *drag* pada silinder.

Penelitian pada tesis ini akan membahas perihal pengaruh yang diberikan oleh *suppression device* dengan jenis *helical rods* ber-*gap* yang terpasang pada silinder *rigid*. Penggunaan *helical rods* ber-*gap* pada penelitian ini didasarkan kepada perpaduan kelebihan yang dimiliki antara *helical strake* dan *tripping rods*. Sebagaimana penelitian yang telah dilakukan oleh Alam, dkk. (2003) yang menyatakan bahwasanya dengan dipasangkan *tripping rods*, akan dapat mereduksi gaya *drag*, yang mana hal tersebut tidak bisa dilakukan oleh *helical strakes*. Pada penelitian tersebut juga dijelaskan bahwa pemasangan *tripping rods* sangat bergantung kepada empat aspek, yaitu: diameter silinder, diameter *rods*, *gap* antara *rods* dan silinder, dan sudut antara *rods* satu dan lainnya.

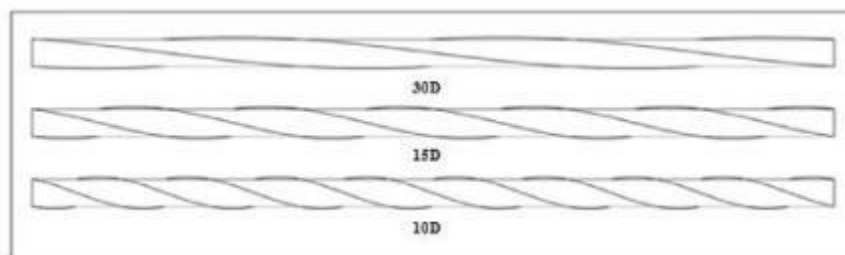
Efektifitas pemasangan *helical rods* ber-*gap* dalam mereduksi gaya fluida (gaya *drag* dan *lift*) yang dialami oleh silinder juga diperkuat dengan penelitian yang telah ada. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Sugiwanto, dkk. (2013), Beu (2013), dan Arianti (2014) menunjukkan bahwa dengan adanya pemasangan *helical rods*, baik itu pada silinder *rigid* dan *long flexible riser* adalah cukup efektif dalam meredam gaya fluida dengan efektifitas berkisar antara 45% - 60%.

Penelitian pada tesis ini akan mencoba untuk melakukan analisis terhadap beberapa aspek yang berpengaruh terhadap efektifitas *helical rods* ber-*gap* dalam meredam efek yang ditimbulkan oleh *vortex shedding*, dimana aspek tersebut adalah dengan melakukan beberapa variasi sudut datang aliran, *pitch*, dan *gap*. Adanya variasi sudut datang aliran, *pitch*, dan *gap* pada silinder dengan *helical rods* ber-*gap* dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh dari ketiga aspek tersebut dalam mereduksi gaya fluida yang dialami oleh silinder, selain itu juga

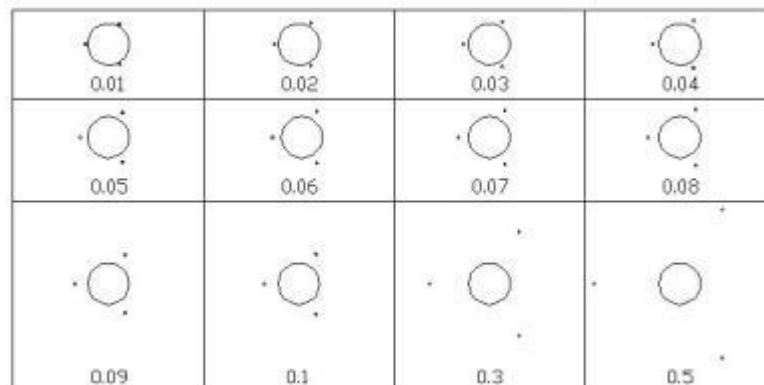
untuk mengetahui pola distribusi kecepatan partikel yang terjadi di sekitar silinder dengan *helical rods* ber-gap. Representasi dari model silinder dengan *helical rods* ber-gap dengan variasi sudut datang aliran, *pitch*, dan *gap* dapat diperoleh pada Gambar 1.1. Penyelesaian untuk permasalahan pada tesis ini adalah dengan melakukan studi numerik menggunakan bantuan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamic* (CFD).



(a)



(b)



(c)

Gambar 1.1 Model silinder dengan *helical rods* ber-gap (a) Variasi sudut datang aliran; (b) Variasi *pitch*; (c) Variasi *gap*

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang diangkat untuk diselesaikan dalam penelitian tesis ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh dari variasi sudut datang aliran, Reynolds *number* (Re), *pitch*, dan *gap* terhadap gaya fluida yang bekerja pada silinder dengan *helical rods* ber-*gap*?
2. Bagaimana pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder dengan *helical rods* ber-*gap* pada konfigurasi *rods* yang menghasilkan pengurangan gaya fluida terbesar?

1.3 Tujuan Penelitian

Didasarkan kepada perumusan masalah yang diangkat di atas, maka tujuan dari penelitian tesis ini yang sekaligus menjawab perumusan masalah di atas adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh yang diberikan dari dilakukannya variasi sudut datang aliran, Reynolds *number* (Re), *pitch*, dan *gap* terhadap gaya fluida yang bekerja pada silinder dengan *helical rods* ber-*gap*.
2. Mengetahui pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder dengan *helical rods* ber-*gap* pada konfigurasi *rods* yang menghasilkan pengurangan gaya fluida terbesar.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah dapat diketahuinya pengaruh dari sudut datang aliran, panjang *pitch*, serta *gap* pada variasi Re tertentu terhadap gaya fluida yang bekerja pada silinder dengan *helical rods* ber-*gap*. Sehingga dengan penelitian ini akan dapat diperoleh konfigurasi yang dapat mereduksi gaya fluida paling efektif.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diterapkan agar penelitian yang dilakukan tidak melebar dari tujuan yang dikehendaki adalah sebagai berikut:

1. Beban lingkungan yang digunakan adalah beban arus *uniform* dan *steady*.

2. Dimensi, konfigurasi silinder dan model *helical rods* didasarkan kepada Sugiwanto, dkk. (2013).
3. Silinder dianggap memiliki permukaan yang halus (*smooth*) dengan tambahan *helical rods*.
4. Silinder dimodelkan dengan tumpuan *fixed*.
5. Jenis *helical rods* yang digunakan adalah *triple start helical rods*.
6. Variasi *pitch* yang digunakan adalah 30D, 15D, dan 10D.
7. Variasi sudut datang aliran adalah 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, dan 120°.
8. Variasi *gap* yang digunakan adalah 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.3, dan 0.5 m.
9. Rentang Re yang ditinjau adalah 2 Re *subcritical* (10^3 dan 10^4) dan 1 Re *supercritical* (10^6).

halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Beberapa penelitian sebelumnya telah banyak sekali membahas perihal *Vortex Induced Vibration* (VIV). Hal tersebut terkait dengan efek yang ditimbulkan oleh VIV itu sendiri, hampir disetiap pendahuluan jurnal internasional menyatakan bahwasanya getaran yang ditimbulkan oleh *vortex* jika mengenai struktur silindris, seperti *riser* akan mempercepat terjadinya kerusakan struktur akibat kelelahan. Beberapa jurnal internasional yang membahas perihal pengaruh pemasangan *passive control* terhadap efek yang ditimbulkan oleh VIV adalah sebagai berikut:

1. Alam, dkk. (2003), menjelaskan perihal pengaruh pemasangan *tripping rods* terhadap reduksi VIV pada silinder tunggal, silinder *tandem*, dan silinder *side by side*. Pembahasan akan diberikan untuk hasil yang diperoleh pada silinder tunggal. Silinder tunggal berdiameter 49 mm dengan Reynolds number sebesar 5.5×10^4 , variasi rasio *gap* (δ/D) dari 0.008 – 0.22 ($\delta=0.4 - 12$ mm), variasi sudut pemasangan *tripping rods* dari $20^\circ - 60^\circ$, dan variasi diameter *tripping rods* 4, 5, dan 6 mm. Hasil terbaik yang diperoleh dari penelitian ini untuk silinder tunggal adalah pada posisi pemasangan *tripping rods* 30° dan diameter *tripping rods* sebesar 5 mm diperoleh pengurangan gaya fluida paling maksimum yaitu 67%.
2. Constantinides, dkk (2006), melakukan penelitian secara numerik untuk selanjutnya dibandingkan dengan hasil eksperimental dengan objek studi adalah *bare cylinder* dan silinder dengan *helical strake*. Hasil yang diperoleh dari pengaruh pemasangan *helical strake* pada rentang $Re = 3.9 \times 10^5 - 8.2 \times 10^5$ dan *reduced velocity* (V_{rn}) dari 3.7 – 22 adalah koefisien gaya *drag* yang diperoleh bernilai konstan dalam rentang 1.65 – 1.8. Sedangkan untuk respon struktur (A/D) mengalami penurunan yang signifikan ketika silinder dipasang *helical strake* dan

tanpa *helical strake*. Untuk hasil respon struktur (A/D) yang diperoleh antara CFD dan eksperimental pada silinder dengan *helical strake* adalah hampir mendekati.

3. Wu, dkk. (2012), menjelaskan pengaruh *multiple control rods* sebagai alat pereduksi VIV. Penelitian ini dilakukan terhadap *slender flexible riser* dengan $L/D = 1750$. Beberapa variasi yang diterapkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut: variasi rasio *gap* (δ/D) = 0.187, 0.375, dan 0.562, variasi lainnya adalah variasi $L_c/L = 100\%$, 80%, 60%, 40%, dan 20%. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah dengan penggunaan $\delta/D \leq 0.375$ dan $L_c/L = 60\%$ merupakan konfigurasi pemasangan *multiple control rods* yang terbaik untuk mengurangi efek yang ditimbulkan oleh VIV.

Penelitian yang telah dijelaskan di atas menunjukkan bahwasanya *suppression device* baik itu berupa *helical strake* maupun *multiple control rods* dapat mengurangi efek yang ditimbulkan oleh VIV. Akan tetapi, seiring berkembangnya waktu telah dilakukan beberapa penelitian yang melakukan modifikasi terhadap *multiple control rods* yaitu pemasangan *helical rods* ber-*gap* terhadap struktur silindris. Berikut ini adalah beberapa penelitian yang membahas pengaruh pemasangan *helical rods* ber-*gap* pada struktur silinder:

1. Sugiwanto, dkk. (2013), dimana dalam penelitiannya dijelaskan bahwa dengan variasi diameter *rods* yaitu 0.0625D, 0.125D, dan 0.1875D, rentang Re dari $10^2 - 10^6$, serta dua variasi *pitch* 15D dan 30D, diperoleh hasil terbaik yaitu pada $Re = 10^5$ dengan konfigurasi model sebagai berikut diameter *rods* 0.0625D, *pitch* 15D, dan *gap* 0.0625 m. Konfigurasi model tersebut mampu mereduksi gaya *drag* sebesar 50%.
2. Beu (2013), dijelaskan dalam penelitiannya bahwasanya *helical rods* ber-*gap* yang terpasang sepanjang 60% dari panjang model, dengan *gap* sebesar 6 mm mampu mereduksi efek yang ditimbulkan VIV yaitu sebesar 80% - 90%. Panjang model yang digunakan pada penelitian ini adalah 28.04 m dengan diameter 0.016 m.
3. Arianti (2014), penelitian yang dilakukan dengan melakukan studi eksperimental dan numerik pada beberapa variasi Re yaitu 2.2×10^4 ,

2.5×10^4 dan 3.5×10^4 menunjukkan penurunan *displacement* arah sumbu-y secara berurutan sebesar 48.48%, 29.68% dan 49.28%. Sedangkan untuk gaya fluida memperoleh hasil sebagai berikut: penurunan gaya *drag* pada silinder sebesar 47.1% pada $Re = 2.8 \times 10^4$, sedangkan untuk gaya *lift* sebesar 43.8% pada $Re = 2.5 \times 10^4$. Hasil yang didapat dari uji numerik sama dengan hasil yang didapat dari uji eksperimental yaitu dengan adanya pemasangan *helical rods* ber-gap dapat mengurangi gaya fluida baik gaya *drag* maupun *lift* dan *displacement* arah sumbu-y pada silinder.

Beberapa penelitian yang membahas perihal pengaruh pemasangan *helical rods* ber-gap pada struktur silindris menunjukkan bahwasanya akan terjadi pengurangan yang cukup signifikan baik itu respon struktur (A/D) ataupun gaya fluida (gaya *drag* dan *lift*). Berdasarkan kepada beberapa penelitian di atas, maka dilakukanlah penelitian pada tesis ini dengan mengkaji pengaruh yang ditimbulkan dari beberapa variasi sudut datang aliran, Reynolds number, panjang *pitch* dan *gap* terhadap gaya fluida yang bekerja pada silinder dengan *helical rods* ber-gap.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Vortex Induced Vibration (VIV)

Vortex adalah suatu aliran dimana partikel fluida berotasi terhadap titik pusatnya. Pelepasan *vortex* disebut dengan *vortex shedding*, yang mempunyai kecepatan transversal dan tangensial bervariasi terhadap radiusnya (Indiyono, 1994). Akibat adanya *vortex shedding* ini, pipa yang dilalui aliran fluida terkena distribusi tekanan lokal. Akibatnya pipa akan bergetar atau beresonansi dengan frekuensi tertentu. Osilasi ini akan menyebabkan kelelahan dan dapat mengakibatkan kegagalan. Gambar 2.1 menunjukkan bentuk-bentuk *vortex* yang terjadi pada aliran air sebagai fungsi Reynolds number (Re).

Re merupakan parameter *non dimensional* yang sangat dikenal dalam ilmu mekanika fluida. Nama ini diberikan sebagai penghargaan bagi Osborne Reynolds (1842-1916). Insinyur dari Inggris yang pertama kali mendemonstrasikan bahwa kombinasi dari variabel-variabel dapat digunakan sebagai suatu patokan

untuk membedakan aliran laminar dan turbulen. Re didefinisikan sebagai ukuran dari rasio gaya inersia terhadap gaya viskositas (Munson dkk., 2002).

$$Re = \frac{UD}{\nu} \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan,

Re = Reynolds *number*

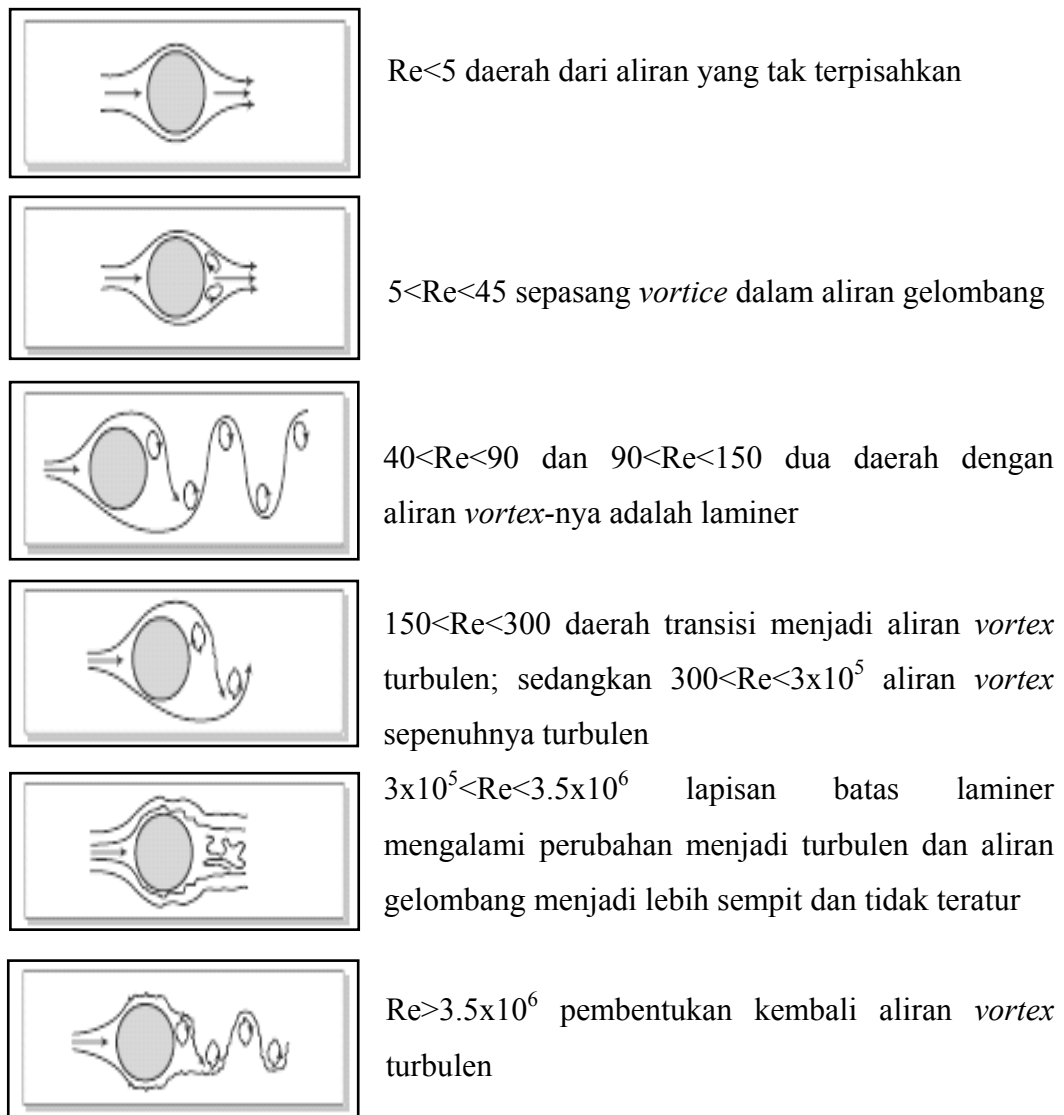
U = kecepatan partikel (m/s)

D = diameter struktur (m)

ν = viskositas kinematis fluida (m^2/s)

Berdasarkan Gambar 2.1 dapat diketahui fenomena terbentuknya *vortex* di belakang silinder dalam buku yang ditulis oleh Blevins (2001) yaitu:

1. Untuk harga $Re < 5$ aliran fluida mengikuti kontur dari silinder. Aliran yang melewati silinder bulat belum mengalami pemisahan artinya pada harga tersebut sama sekali belum terbentuk *vortex* di belakang silinder.
2. Semakin besarnya harga Re maka sifat aliran yang melewati silinder bulat akan semakin tidak teratur (Huerre dan Monkewitz, 1990), sehingga pada harga $5 < Re < 45$ akan terbentuk sepasang *vortices* yang bersifat simetris di bagian belakang aliran dari silinder.
3. Panjang *streamwise* pada *vortice* meningkat secara linier terhadap Re dan akan mencapai panjang tiga kali diameter silinder pada $Re = 45$ (Nishioka dan Sato, 1978). Semakin besar harga Re akan menyebabkan salah satu *vortice* mulai terlepas menjauhi silinder (Friehe, 1980).
4. Semakin besarnya harga Re yaitu pada harga $40 < Re < 90$ dan $90 < Re < 150$ maka akan timbul 2 daerah pembentuk *vortex* yaitu pada bagian sisi kanan dan kiri dari silinder dimana sifat dari *vortex* yang terbentuk adalah laminar.
5. Pada harga $Re 150 < Re < 300$, *vortex shedding* menjadi kurang teratur. Pada rentang harga tersebut *vortex* yang terbentuk mulai bersifat turbulen, walaupun *boundary layer* pada silinder tetap laminar. Harga $Re 300 < Re < 3 \times 10^5$ dinamakan *subcritical*. Pada harga tersebut aliran *vortex* sepenuhnya bersifat turbulen, *boundary layer* pada silinder tetap laminar.



$Re < 5$ daerah dari aliran yang tak terpisahkan

$5 < Re < 45$ sepasang *vortice* dalam aliran gelombang

$40 < Re < 90$ dan $90 < Re < 150$ dua daerah dengan aliran *vortex*-nya adalah laminier

$150 < Re < 300$ daerah transisi menjadi aliran *vortex* turbulen; sedangkan $300 < Re < 3 \times 10^5$ aliran *vortex* sepenuhnya turbulen

$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$ lapisan batas laminier mengalami perubahan menjadi turbulen dan aliran gelombang menjadi lebih sempit dan tidak teratur

$Re > 3.5 \times 10^6$ pembentukan kembali aliran *vortex* turbulen

Gambar 2.1 Pola aliran fluida di sekitar silinder (Lienhard, 1966)

6. Pada harga Re $3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$ *boundary layer* silinder menjadi turbulen. Keadaan transisi dari laminier menjadi turbulen akan menciptakan aliran semakin tidak teratur sehingga pada daerah ini akan terbentuk *bubble*.
7. Untuk harga Re yaitu $Re > 3.5 \times 10^6$, *vortex shedding* kembali menjadi seperti semula dengan *boundary layer* silinder turbulen.

Parameter *non dimensional* lainnya adalah Strouhal number (St) (Sumer dan Fredsoe, 2006). Bilangan ini menunjukkan ukuran dari rasio gaya inersia akibat ketidak-tunakan aliran (percepatan lokal) terhadap gaya inersia akibat perubahan kecepatan dari satu titik ke titik lain dalam suatu aliran fluida. Harga

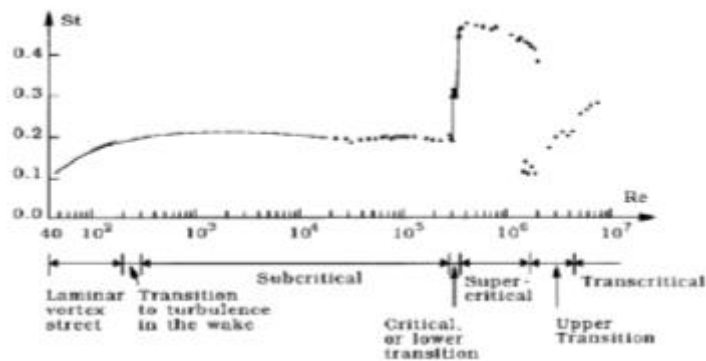
Strouhal *number* berubah seiring dengan perubahan harga Reynolds *number* seperti tampak pada Gambar 2.2.

$$St = \frac{f_s D}{U} \dots\dots\dots (2.2)$$

dengan,

f_s = frekuensi *vortex shedding* (Hz)

St = Strouhal *number*

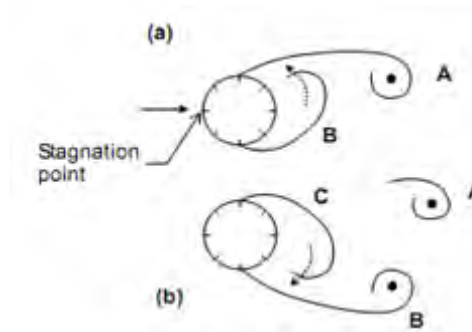


Gambar 2.2 Grafik hubungan Reynolds *number* dan Strouhal *number*
(Sumer dan Fredsoe, 2006)

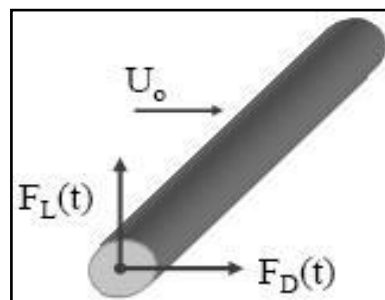
2.2.2 Mekanisme terjadinya pelepasan *vortex* (*vortex shedding*)

Penyebab terjadinya pelepasan *vortex* yaitu karena adanya 2 titik yang tidak stabil pada $Re > 40$. Akibatnya, pasangan *vortices* yang terbentuk menjadi tidak stabil sehingga salah satu *vortex* akan tumbuh lebih besar dari yang lainnya. *Vorticity* dalam *vortex* A berputar searah jarum jam, sedangkan *vorticity* dalam *vortex* B berputar berlawanan arah jarum jam. Selanjutnya, gerakan aliran *vorticity* yang berlawanan arah jarum jam akan memotong aliran *vorticity* yang men-suplay *vortex* A, sehingga *vortex* A terlepas lalu menjadi *vortex* bebas dan terseret aliran ke arah belakang/menjauhi silinder (Beu, 2013).

Setelah *vortex* A terlepas, terbentuklah *vortex* baru menggantikan *vortex* A yaitu *vortex* C. Maka selanjutnya, *vortex* B akan mengalami hal yang sama dengan *vortex* A sebelumnya, yaitu pertama, ukuran dan kekuatannya makin membesar lalu terpotong oleh *vortex* C dan akhirnya terlepas menjadi *vortex* bebas. Proses seperti ini akan terus berlanjut setiap terjadi pelepasan *vortex* baru pada setiap sisi silinder. Proses ini dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skema mekanisme terjadinya pelepasan *vortex* (*vortex shedding*) pada sebuah silinder dalam aliran *steady* (Indiyono, 1994)



Gambar 2.4 Gaya *drag* dan gaya *lift* pada silinder (Purwanti, 2008)

Ketika terbentuk fenomena *vortex shedding* pada aliran akan terbentuk pula suatu getaran yang diakibatkan pelepasan *vortex*, ada dua penyebab getaran pada silinder yaitu akibat gaya fluida dan *vortex shedding*. Dengan adanya pelepasan *vortex* dapat menimbulkan gaya *lift* dan gaya *drag* pada silinder. Gaya *lift* mempunyai arah tegak lurus terhadap silinder sedangkan gaya *drag* mempunyai arah sejajar dengan silinder, seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.4.

2.2.3 Gaya *drag* dan *lift*

Sebagai hasil dari perubahan periode dari *vortex shedding*, distribusi tekanan pada silinder dikarenakan aliran akan berubah pula secara periodik, selanjutnya ini akan menciptakan variasi periodik dalam komponen gaya pada silinder. Komponen gaya tersebut terbagi menjadi arah *cross flow* dan *in line*. Komponen gaya arah *cross flow* biasa dinamakan gaya *lift*, sedangkan arah *in line* disebut gaya *drag*. Berikut ini adalah persamaan untuk gaya *drag* dan *lift* (Cengel dan Cimbala, 2010):

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A V^2 \dots\dots\dots(2.3)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A V^2 \dots\dots\dots(2.4)$$

dengan,

F_L = gaya *lift* (N)

F_D = gaya *drag* (N)

C_L = koefisien *lift*

C_D = koefisien *drag*

ρ = berat jenis fluida(kg/m³)

A = luas frontal struktur (m²)

V = kecepatan fluida (m/s)

Sedangkan persamaan yang digunakan untuk mendapatkan koefisien *drag* dan *lift* adalah sebagai berikut:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho A V^2} \dots\dots\dots(2.5)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A V^2} \dots\dots\dots(2.6)$$

2.3 *Computational Fluid Dynamic (CFD)*

2.3.1 Definisi CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah komputer yang didasarkan kepada simulasi atau model numerik dari mekanika fluida untuk menyelesaikan dan menganalisis permasalahan yang berhubungan dengan aliran fluida, transfer panas, dan fenomena lainnya yang terkait seperti reaksi kimia. Pada dasarnya permasalahan CFD diselesaikan dalam persamaan matematis dan secara numerik. Persamaan matematis yang biasa digunakan berdasarkan kepada hukum konservasi dari pergerakan fluida. Berikut ini adalah persamaan konservasi pergerakan fluida yang digunakan pada CFD yang diambil dari tesis Asyikin (2012):

1. Hukum Konservasi Massa

Hukum konservasi massa dapat diekspresikan dengan persamaan kontinuitas dalam bentuk umum berikut ini:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots(2.7)$$

dengan,

$i, j = 1, 2, 3.$

x_1 dan $x_2 =$ arah *stream wise* dan *stream normal* untuk bidang 2D, jika dalam bidang 3D, maka ditambahkan x_3 .

$u_1, u_2, u_3 =$ komponen kecepatan (m/s)

$t =$ waktu (s)

$\rho =$ berat jenis fluida (kg/m^3)

2. Hukum Konservasi Momentum

Hukum konservasi momentum dapat diekspresikan dengan persamaan Navier Stokes dalam bentuk umum berikut ini:

$$\rho \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \lambda \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + f_i \dots\dots\dots(2.8)$$

dengan,

$p =$ tekanan (Pa)

$\nu =$ viskositas dinamis fluida

$\delta_{ij} =$ kronecker delta

$\lambda =$ koefisien *bulk viscosity*

$f_i =$ gaya eksternal (N)

3. Hukum Konservasi Energi

Persamaan untuk konservasi energi adalah sebagai berikut:

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(c \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \dots\dots\dots(2.9)$$

dengan,

$h =$ entalpi

$c =$ *thermal conductivity*

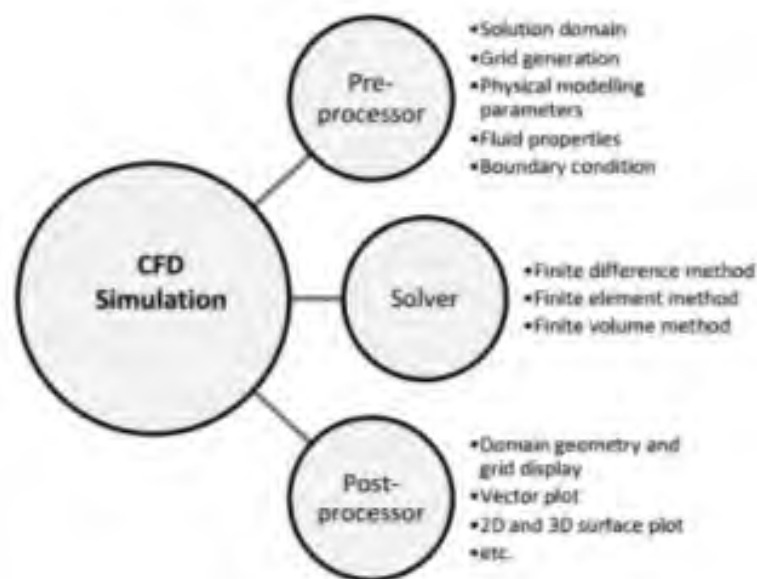
$T =$ temperature ($^{\circ}\text{C}$)

Beberapa keuntungan yang diperoleh dengan menggunakan perangkat lunak CFD diantaranya adalah sebagai berikut:

- Meminimumkan waktu dan biaya dalam mendesain suatu produk, bila proses desain tersebut dilakukan dengan uji eksperimen yang membutuhkan akurasi tinggi.

- Memiliki kemampuan sistem studi yang dapat mengendalikan percobaan yang sulit atau tidak mungkin dilakukan dalam eksperimen.
- Memiliki kemampuan untuk studi di bawah kondisi berbahaya pada saat atau sesudah melewati titik kritis (termasuk studi keselamatan dan skenario kecelakaan).
- Keakuratannya akan selalu dikontrol dalam proses desain. Dalam desain kerjanya, problem yang ada perlu dideskripsikan ke dalam *software* CFD dengan menggambarkan model yang dianalisa, sifat-sifat fluida yang ada di sekitar model dan juga penentuan kondisi batasnya. Selanjutnya dalam *solver problem* yang ada akan dihitung dengan pendekatan persamaan yang tersedia. Dari hasil perhitungan kemudian didapatkan hasil *output* dari *running* program CFD.

2.3.2 Metodologi CFD



Gambar 2.5 Konsep dasar dari metodologi simulasi CFD (Asyikin, 2012)

Computational Fluid Dynamic (CFD) merupakan analisa sistem yang mencakup aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena yang terkait, seperti reaksi kimia dengan menggunakan simulasi berbasis komputer (numerik). Teknik ini sangat berguna dan dapat diaplikasikan pada bidang industri dan non industri.

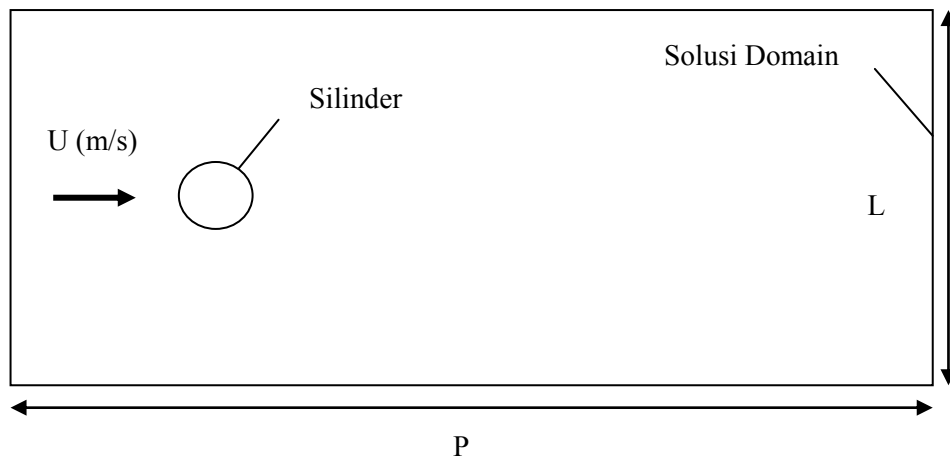
Code CFD terstruktur atas logaritma numerik, sehingga dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada suatu aliran fluida. *Code Computational Fluid Dynamic* di sini terdiri atas tiga elemen utama yaitu:

- a. *Pre Processor (CFX Build)*
- b. *Solver manager*
- c. *Post Proceesor (visualize)*

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, pada tahap *pre-processing*, dilakukan definisi permasalahan aliran fluida berdasarkan *input* yang ada untuk mendapatkan solusi terbaik dalam permasalahan penelitian ini Tingkat akurasi solusi CFD dipengaruhi banyak faktor, dan beberapa diantaranya dalam tahap ini.

- Pemilihan bentuk dan ukuran *domain*

Solusi *domain* merupakan representasi dari kondisi lingkungan yang ditinjau. Bentuk dari *domain* bisa persegi, persegi panjang, atau lingkaran. Hanya saja, secara umum banyak peneliti yang memilih menggunakan *domain* persegi panjang. Visualisasi untuk *domain* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Solusi *domain* berbentuk persegi panjang (Asyikin, 2012)

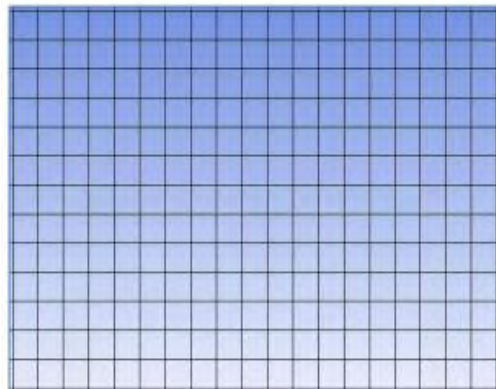
Pemilihan bentuk dan ukuran *domain* sangat mempengaruhi hasil dari permasalahan yang ditinjau. Semakin kecil *domain*, maka waktu yang dibutuhkan untuk simulasi akan semakin singkat, sebaliknya, jika *domain* yang yang dipilih besar akan memerlukan waktu simulasi yang lebih lama.

- *Mesh generation*

Pada tahapan ini *domain* yang ditentukan akan dibagi menjadi bagian yang lebih kecil (*sub domain*). Menurut Feziger dan Peric (1997), *grid* terbagi menjadi 3 tipe, yaitu:

1. *Structured (regular) grid*

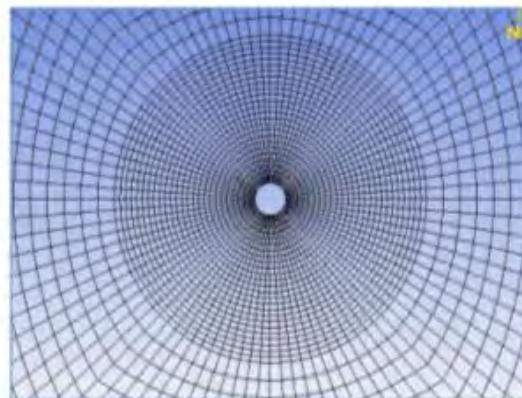
Grid yang berbentuk teratur dan tidak berpotongan antara satu dengan lainnya. Tipe *grid* jenis ini sangat sesuai untuk *simple solution domain*



Gambar 2.7 *Structured grid* (Asyikin, 2012)

2. *Block-structured grid*

Tipe ini akan membagi *domain* menjadi dua atau lebih subdivision. Setiap subdivision terdiri dari struktur *grid* yang berbeda ukuran.

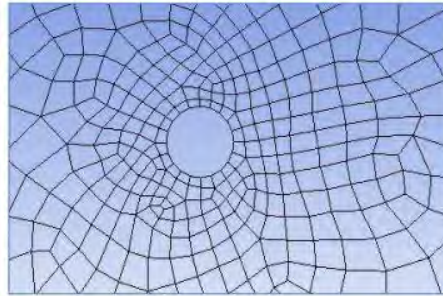


Gambar 2.8 *Block structured grid* (Asyikin, 2012)

3. *Unstructured grid*

Grid ini dapat digunakan untuk struktur yang kompleks. Metode

diskrit seperti *finite element* dan *finite volume* mampu diakomodir dengan baik. Jenis *grid* ini adalah sangat fleksible karena *irregularity*, serta sangat lambat dalam menjalankan perintah *solver*.



Gambar 2.9 *Unstructured grid* (Asyikin, 2012)

- *Boundary Condition*

Ada beberapa zona dalam penentuan *boundary condition*, diantaranya adalah sebagai berikut:

1. *Inlet boundary condition*

Boundary condition ini menandakan adanya aliran yang masuk *solution domain*. Jenisnya bisa menggunakan *velocity inlet*, *pressure inlet* atau *mass flow inlet*.

2. *Outlet boundary condition*

Boundary condition ini menandakan adanya aliran yang keluar *solution domain*. Jenisnya bisa menggunakan *velocity inlet*, *pressure inlet* atau *mass flow inlet*.

3. *Wall boundary condition*

Zona *boundary condition* yang paling sering digunakan dalam permasalahan aliran fluida. *Wall boundary condition* dapat digunakan pada aliran laminar dan turbulen

4. *Prescribed pressure boundary condition*

Prescribed pressure boundary condition digunakan untuk aliran luar di sekitar objek, *free surface flow* atau *internal flow* dengan *multiple outlet*.

5. *Symetry boundary condition*

Kondisi yang menandakan tidak ada aliran yang melewati

boundary condition.

6. *Periodic* atau *cyclic boundary condition*

Digunakan ketika *physical geometry* dan *pattern* aliran berulang-ulang secara alami.

2.3.3 Model Turbulen

Model turbulen adalah penggunaan model untuk memprediksi efek turbulensi, sering digunakan untuk menyederhanakan solusi dan persamaan yang mengatur turbulensi. Ada banyak metode yang dapat digunakan untuk memprediksi aliran turbulen. Beberapa diantaranya adalah sebagai berikut:

- K-Epsilon

Menurut Wilcox (1998), K-Epsilon merupakan salah satu jenis permodelan turbulensi yang sering digunakan. Model ini tidak akan menunjukkan kinerja yang baik apabila nilai gradasi yang digunakan tekanan terlalu besar. Model ini menambahkan dua buah persamaan transport untuk memodelkan suatu turbulensi, variabel pertama adalah energi kinetik turbulen (k) dan variabel kedua adalah disipasi turbulensi (ϵ). Nilai k menunjukkan jumlah energi dalam turbulensi sedangkan nilai ϵ menunjukkan ukuran dari turbulensi. Terdapat setidaknya tiga buah jenis model K-Epsilon yang berbeda, yaitu:

- Model Standard K-Epsilon
- Realisable K-Epsilon, dan
- RNG K-Epsilon

- K-Omega

Model turbulensi K-omega ($k-\omega$) adalah model turbulensi dengan dua persamaan umum dalam komputasi dinamika fluida yang digunakan sebagai persamaan penutupan persamaan Reynolds-averaged Navier–Stokes. Model ini mencoba untuk memprediksi turbulensi oleh dua persamaan diferensial parsial dengan variabel pertama adalah turbulensi energi kinetik (k), sedangkan yang kedua menjadi tingkat tertentu disipasi (ω). Salah satu keuntungan dari formulasi $k-\omega$ adalah perlakuan

di dekat dinding untuk perhitungan Re rendah. Model tidak melibatkan fungsi redaman kompleks nonlinear yang diperlukan untuk model $k-\epsilon$ dan karena itu model $k-\omega$ lebih baik.

- SST (*Shear Stress Transport*)

SST (Menter, 1993) adalah dua model persamaan *eddy-viscosity* yang sangat populer. Formulasi SST menggabungkan dua model terbaik di dunia yaitu $k-\omega$ dan $k-\epsilon$. Penggunaan formulasi $k-\omega$ di bagian dalam dari *boundary layer* membuat model dapat langsung digunakan sepanjang dinding melalui *viscous sub layer*. Dengan demikian, model SST $k-\omega$ dapat digunakan sebagai model turbulensi *low-Re* tanpa fungsi redaman tambahan. Formulasi SST juga menggantikan perilaku $k-\epsilon$ dalam *free stream*. Sehingga akan menghindari masalah umum dari model $k-\omega$ yaitu terlalu sensitif terhadap turbulensi *free stream inlet*. Model SST memiliki perilaku yang cukup baik dalam gradient tekanan negatif dan pemisahan aliran. SST juga tidak menghasilkan tingkat turbulensi yang terlalu besar di daerah dengan *normal strain* yang besar, seperti daerah stagnasi dan daerah dengan akselerasi yang kuat.

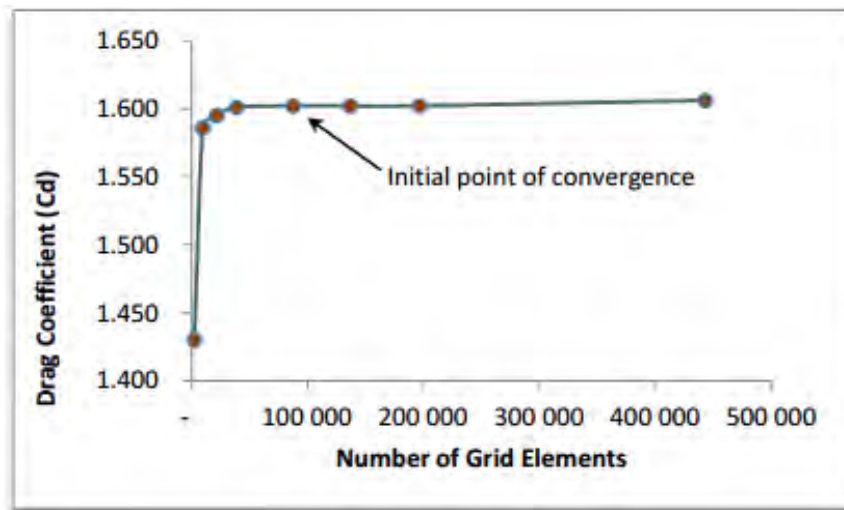
2.3.4 Validasi untuk Simulasi CFD

Tahapan yang sangat penting dalam melakukan analisis CFD adalah melakukan validasi ketika simulasi dilakukan. Beberapa metode validasi yang cukup umum digunakan dalam analisis CFD adalah:

1. Sensitivitas *Meshing*

Sensitivitas *meshing* merupakan validasi yang umum dilakukan ketika melakukan simulasi CFD. Analisis sensitivitas *meshing* dilakukan untuk mengetahui bahwa model yang digunakan telah benar didasarkan kepada beberapa simulasi dengan jumlah *meshing* yang berbeda. Representasi dari analisis sensitivitas *meshing* dapat dilihat pada Gambar 2.10.

Dari grafik pada Gambar 2.6 dapat diketahui bahwasanya koefisien *drag* pada titik 5-9 sudah mulai konvergen. Dengan demikian, jumlah *meshing* pada titik 5 dapat digunakan sebagai acuan untuk analisis berikutnya.



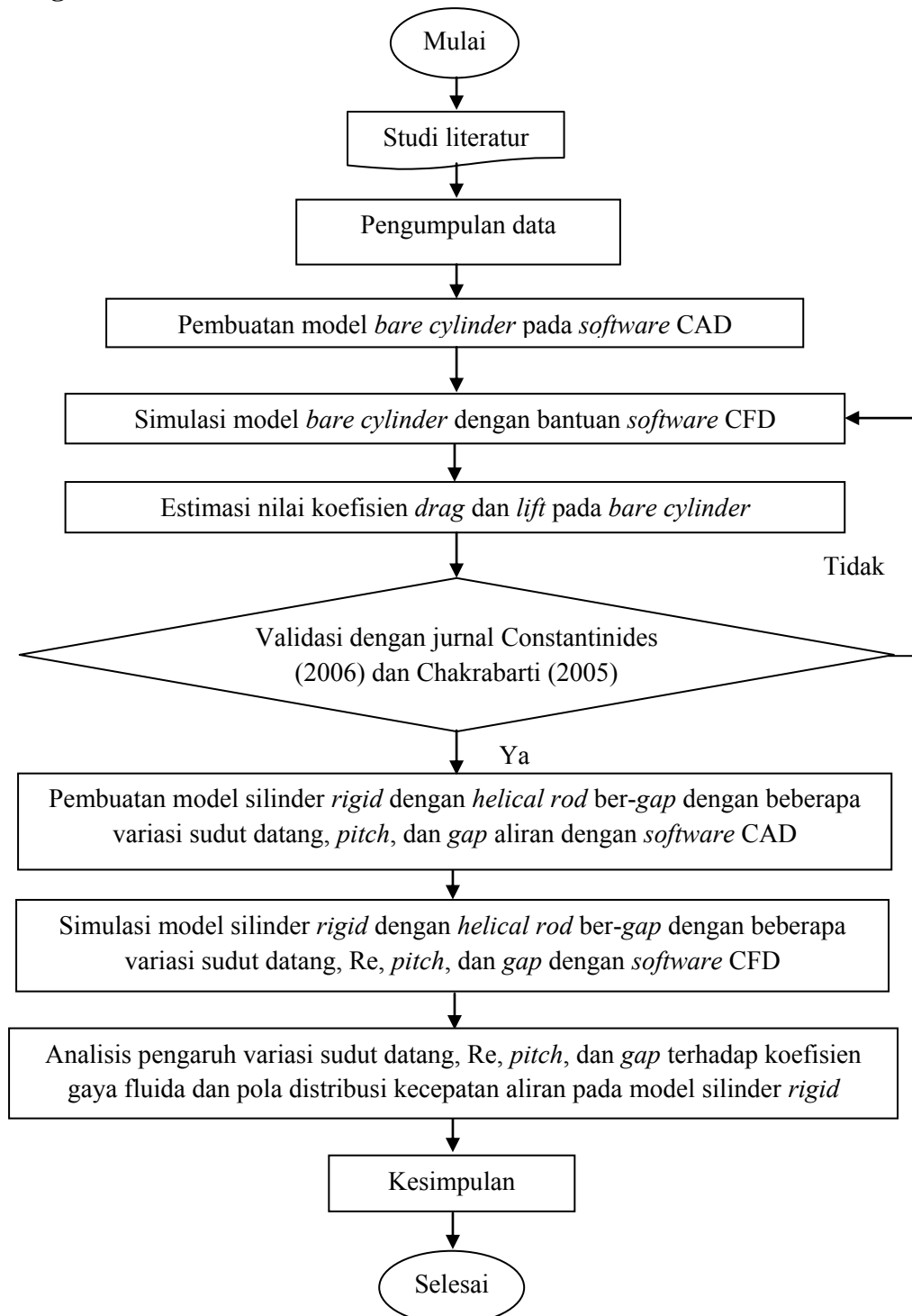
Gambar 2.10 Hasil dari analisis sensitivitas *meshing* (Asyikin, 2012)

2. Berdasarkan Jurnal Acuan

Validasi dengan didasarkan jurnal acuan merupakan tahapan yang cukup sering digunakan ketika simulasi CFD. Pada pengerjaan tesis ini untuk validasi koefisien *drag* (C_D) didasarkan kepada jurnal yang telah ditulis oleh Constantinides, dkk. (2006), sedangkan untuk validasi koefisien *lift* (C_L) didasarkan kepada buku yang ditulis oleh Chakrabarti (2005). Penjelasan selengkapnya dapat diperoleh pada bab Metodologi Penelitian untuk *point* yang ke-4.

BAB 3 METODA PENELITIAN

3.1 Diagram Alir untuk Metoda Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir metoda penelitian

3.2 Prosedur Penelitian

Langkah pengerjaan untuk laporan tesis dengan judul “Studi Numerik Pengaruh Variasi *Pitch* dan Sudut Datang Aliran terhadap Gaya Fluida pada Silinder *Rigid* dengan *Helical Rods Ber-Gap*” adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur yang digunakan untuk bisa menyelesaikan penelitian ini adalah berupa jurnal internasional yang kompeten dan sesuai dengan topik yang diangkat, rentang waktu penerbitan jurnal adalah dari tahun 2000-2014. Selain itu juga digunakan buku yang berkaitan dengan *Vortex Induced Vibration (VIV)*, digunakan pula materi dari *website* resmi yang kompeten dan berkaitan erat dengan VIV.

2. Pengumpulan Data

Data yang digunakan sebagai acuan dalam pemodelan silinder *rigid*, (baik panjang dan diameternya) dan diameter *rods* diperoleh dari Sugiwanto, dkk. (2013). yaitu:

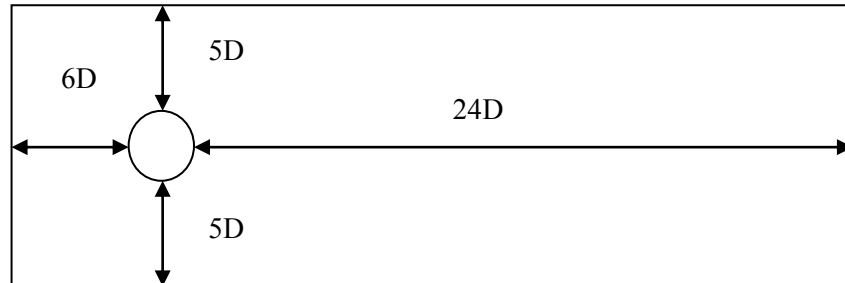
- Panjang silinder : 9.75 m
- Diameter silinder : 0.325 m
- Diameter *rods* : 0.02 m

Selain data diatas, untuk analisis penelitian ini digunakan beberapa variasi berikut:

- *Gap* : 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.3, dan 0.5 m
- Panjang *pitch* : 30D, 15D, dan 10D
- Sudut datang aliran : 0°, 15°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, dan 105°
- Re : 10^3 , 10^4 , dan 10^6

Penentuan *domain* fluida yang digunakan pada penelitian merujuk kepada Beu (2013). Secara lebih jelas penentuan *domain* fluida dapat dilihat pada Gambar 3.2. Dari gambar tersebut dapat diketahui ukuran *domain* yang digunakan pada penelitian tesis ini. Penentuan tinggi dari domain

bergantung kepada tinggi dari silinder yang diuji. Pada tesis tinggi dari *domain* adalah 9.75 m.



Gambar 3.2 *Domain* fluida yang digunakan oleh model simulasi

Fluida yang digunakan untuk simulasi memiliki data sebagai berikut:

- ρ = 997 kg/m³
- Suhu = 25°C
- Viskositas Dinamis = 8.899x10⁻⁴ kg/ms
- Viskositas Kinematis = 8.926x10⁻⁷ m²/det

3. Pemodelan *bare cylinder*



(a)



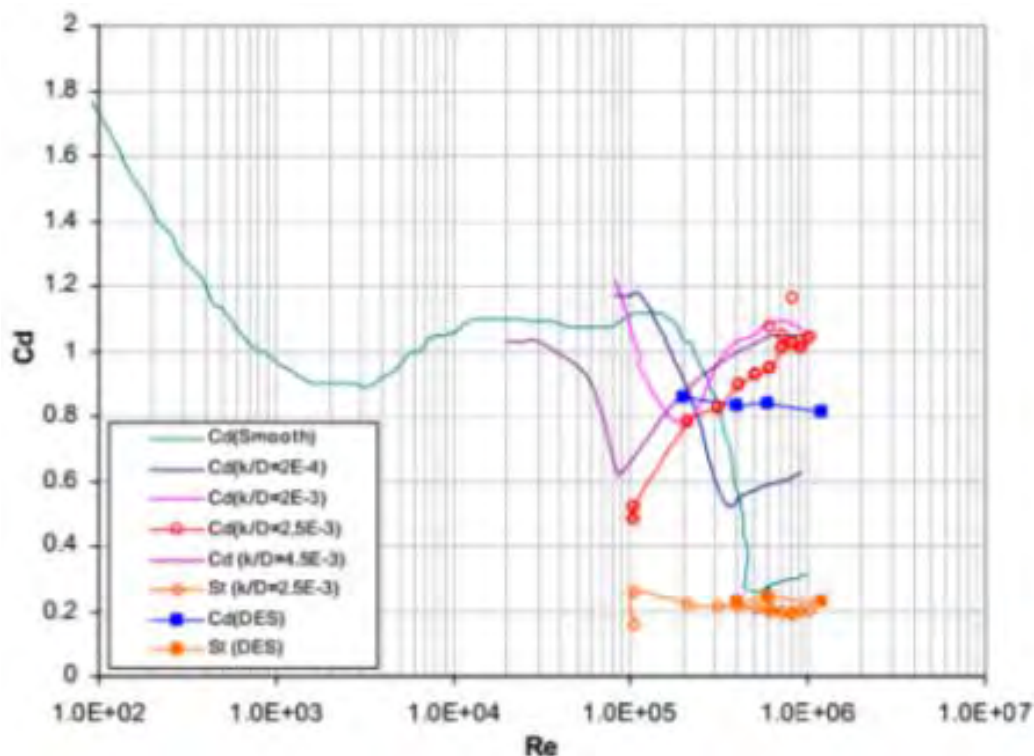
(b)

Gambar 3.3 Model CAD 3-D (a) *Bare cylinder*; (b) Silinder dengan *helical rods* ber-gap

Pemodelan awal untuk *bare cylinder* adalah dengan menggunakan CAD 3-D, selanjutnya adalah melakukan konversi dari pemodelan CAD 3-D untuk *bare cylinder* ke dalam perangkat lunak *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Dengan demikian, tidak diperlukan lagi pemodelan di perangkat lunak CFD, karena perangkat lunak CFD yang digunakan dapat menerima model 3-D yang telah dibuat CAD. Setelah pemodelan selesai dilakukan analisis model *bare cylinder* dengan perangkat lunak CFD, dari analisis ini diperoleh C_D dan C_L . Model CAD 3-D untuk *bare cylinder* dan silinder dengan *helical rods* ber-gap dapat dilihat pada Gambar 3.3.

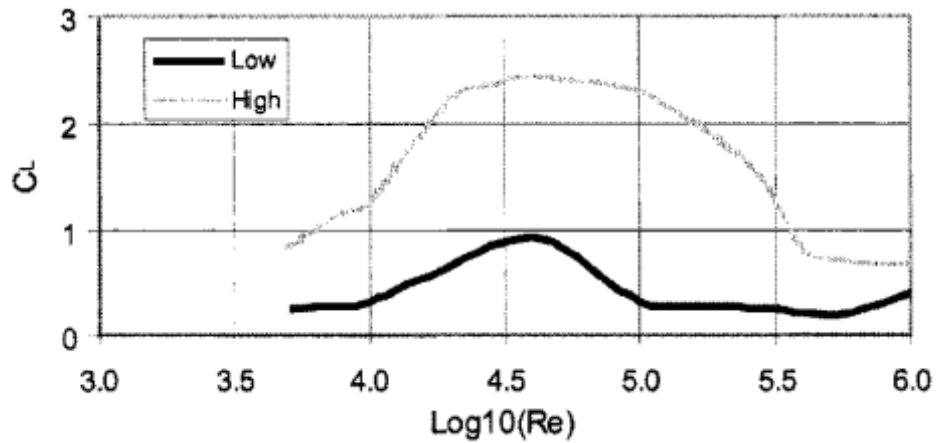
4. Validasi model *bare cylinder*

Setelah diperoleh koefisien *drag* (C_D) pada pemodelan untuk *bare cylinder*, maka langkah berikutnya adalah melakukan validasi C_D yang berdasarkan kepada Constatinides, dkk. (2006), seperti yang tampak pada Gambar 3.4.



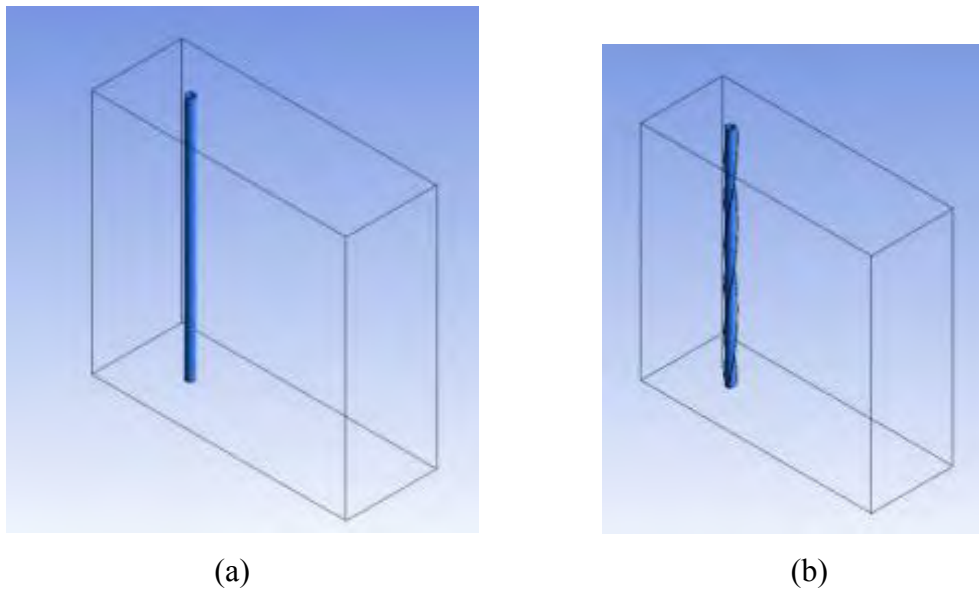
Gambar 3.4 Prediksi koefisien *drag* untuk *fixed bare cylinder* oleh CFD dan perbandingan dengan nilai data eksperimen (Constatinides dkk., 2006)

Selain validasi koefisien *drag* (C_D), berikutnya dilakukan pula validasi untuk koefisien *lift* (C_L). Untuk koefisien *lift* validasi didasarkan kepada grafik koefisien *lift* yang terdapat pada Chakrabarti (2005) yang terdapat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Koefisien *lift* untuk silinder mulus dalam aliran *steady* (Chakrabarti, 2005)

5. Pemodelan dengan beberapa variasi sudut datang aliran, *pitch*, dan *gap* pada silinder *rigid* dengan *helical rods* ber-*gap*



Gambar 3.6 Model CFD (a) *Bare cylinder*; (b) Silinder dengan *helical rods* ber-*gap*

Setelah model *bare cylinder* dinyatakan valid, maka langkah selanjutnya adalah melakukan pemodelan dengan beberapa variasi sudut datang aliran, *pitch*, dan *gap* pada silinder *rigid* dengan *helical rods* ber-*gap*. Pemodelan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak CAD untuk selanjutnya dikonversi ke dalam perangkat lunak *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Dari simulasi dengan bantuan perangkat lunak CFD akan diperoleh koefisien gaya fluida dan pola distribusi kecepatan aliran untuk masing – masing pemodelan. Model *bare cylinder* dan juga silinder dengan *helical rods* ber-*gap* dapat direpresentasikan oleh Gambar 3.6.

6. Analisis pengaruh variasi sudut datang aliran, Re , *pitch*, dan *gap* terhadap silinder *rigid* dengan *helical rods* ber-*gap*

Langkah berikutnya adalah melakukan analisis terhadap koefisien gaya fluida dan pola distribusi kecepatan aliran yang diperoleh untuk masing–masing pemodelan pada tahapan simulasi dengan bantuan perangkat lunak CFD. Koefisien gaya fluida dan pola distribusi kecepatan aliran yang diperoleh dari simulasi CFD dijadikan sebagai indikator penilaian terhadap pengaruh yang diberikan oleh beberapa variasi sudut datang aliran, Re , *pitch*, dan *gap*.

7. Kesimpulan

Semua hasil yang diperoleh dari analisis dan pembahasan ditarik sebuah kesimpulan yang mewakili seluruh perumusan masalah yang telah dibuat sebelumnya.

BAB IV

ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab analisis hasil dan pembahasan akan dipaparkan secara lebih detail setiap langkah yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Bab ini juga akan menjawab setiap permasalahan yang diajukan pada penelitian tesis ini.

4.1 Validasi Analisis CFD

Sebelum dilakukan analisis CFD (*Computational Fluid Dynamics*) untuk memperoleh *output* yang diinginkan, dimana pada penelitian ini adalah koefisien *drag* (C_D) dan *lift* (C_L), maka perlu terlebih dahulu dilakukan beberapa validasi. Tujuan dari dilakukannya validasi ini adalah untuk memperoleh pendekatan model terbaik yang akan digunakan untuk analisis.

4.1.1 Analisis Sensitivitas *Meshing*

Sensitivitas *meshing* atau bisa juga disebut *grid independent* merupakan tahapan awal dalam melakukan analisis dengan menggunakan perangkat lunak CFD. Tujuan dari dilakukannya sensitivitas *meshing* adalah untuk memperoleh konfigurasi *meshing* yang paling sesuai pada suatu model penelitian yang menggunakan perangkat lunak CFD. Untuk mendapatkan konfigurasi *meshing* yang sesuai, peneliti perlu melakukan beberapa simulasi sampai diperoleh titik dimana *output* yang diinginkan mencapai nilai konvergen.

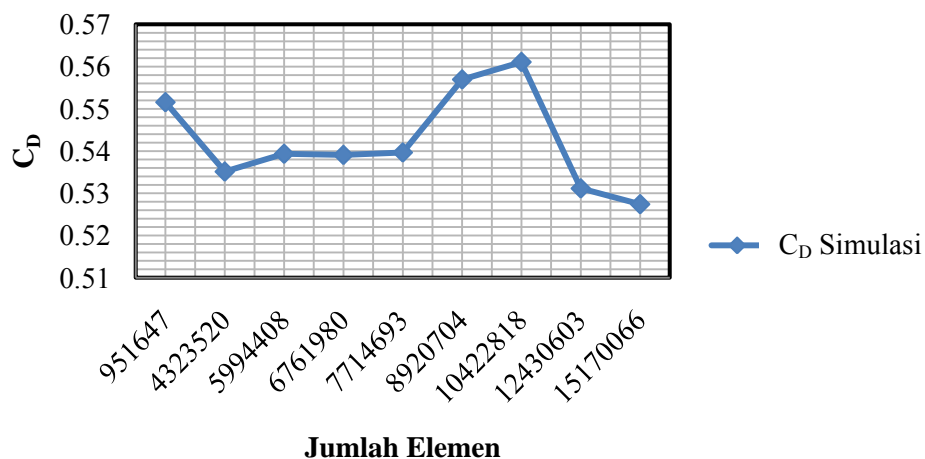
Penelitian pada tesis ini memerlukan beberapa kali analisis sensitivitas *meshing*. Hal tersebut terkait dengan banyaknya variasi yang digunakan pada penelitian tesis ini. Beberapa variasi yang digunakan diantaranya adalah variasi Reynolds number (Re), sudut datang aliran, panjang *pitch*, dan *gap*. Konfigurasi *meshing* yang sesuai untuk variasi perubahan sudut datang aliran belum tentu sesuai ketika diterapkan untuk variasi panjang *pitch*. Sehingga, diperlukan beberapa kali sensitivitas *meshing* untuk mendapatkan konfigurasi *meshing* yang sesuai untuk semua variasi yang digunakan. Berikut adalah beberapa sensitivitas *meshing* yang dilakukan pada penelitian untuk tesis ini:

- Sensitivitas *meshing* 1

Sensitivitas *meshing* 1 merupakan sensitivitas *meshing* yang digunakan oleh peneliti pada tahapan awal dilakukannya penelitian. Pada sensitivitas *meshing* 1, pengetahuan tentang perangkat lunak CFD yang dimiliki peneliti terkait sensitivitas *meshing* adalah sangat terbatas, sehingga untuk mencapai koefisien *drag* (C_D) yang konvergen masih sangat susah. Simulasi yang dilakukan untuk sensitivitas *meshing* 1 dapat diperoleh pada Tabel 4.1. Representasi dari Tabel 4.1 secara grafik dapat dilihat pada Gambar 4.1.

Tabel 4.1 Hasil sensitivitas *meshing* 1

Simulasi	Jumlah Elemen	F_D (N)	C_D
1	951647	0.0074389	0.55155236
2	4323520	0.00721734	0.535124939
3	5843036	0.00727607	0.539479436
4	5994408	0.00727419	0.539340045
5	6761980	0.00727057	0.539071643
6	7714693	0.00727841	0.539652934
7	8920704	0.00751147	0.556933015
8	10422818	0.00756716	0.561062113
9	12430603	0.00716367	0.531145612
10	15170066	0.00711328	0.527409479



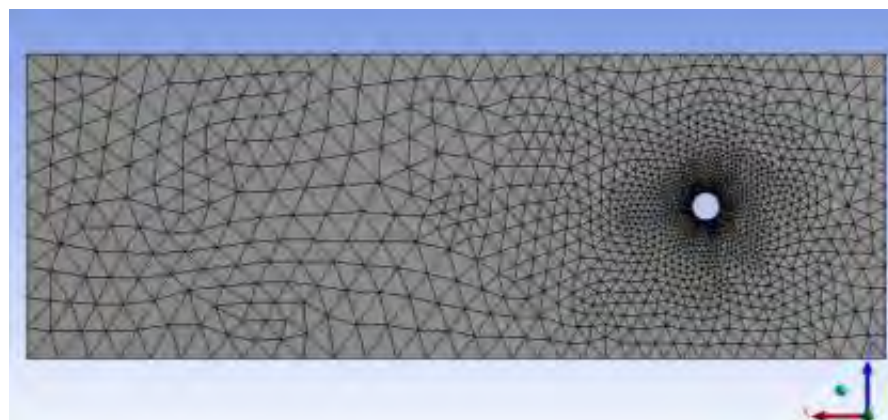
Gambar 4.1 Grafik untuk analisis sensitivitas *meshing* 1

Gambar 4.1 menunjukkan bahwasanya dengan konfigurasi *meshing* yang digunakan pada sensitivitas *meshing* 1, sampai dengan 15 juta elemen masih belum dapat dicapai nilai yang konvergen. Hal tersebut terkait dengan masih terbatasnya pengetahuan peneliti terkait dengan sensitivitas *meshing*. Konfigurasi *meshing* yang digunakan pada sensitivitas *meshing* 1 tersaji pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Ukuran *meshing* yang digunakan untuk sensitivitas *meshing* 1

Keterangan	Ukuran
<i>Minimum Size</i>	<i>Default</i>
<i>Maximum Face Size</i>	0.05-1 m
<i>Max Size</i>	<i>Default</i>
Fluida	<i>Tetrahedron</i>
Jumlah elemen	900.000-15.000.000

Dari Tabel 4.2 dapat diketahui bahwa parameter yang diubah dalam sensitivitas *meshing* 1 adalah *maximum face size* yaitu dari rentang 0.05-1, akan tetapi hasil yang diperoleh dengan hanya mengubah *maximum face size* masih belum cukup baik untuk menentukan konfigurasi *meshing* yang digunakan. Representasi dari sensitivitas *meshing* 1 dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Bentuk *meshing* untuk sensitivitas *meshing* 1

Setelah mengalami kesulitan dalam menemukan konvergensi *meshing* pada analisis sensitivitas *meshing* 1, maka dilakukan uji parameter untuk setiap *input meshing* pada perangkat lunak CFD yang

digunakan. Beberapa parameter yang memberikan pengaruh terhadap analisis *meshing* adalah *minimum size*, *maximum face size*, *maximum size*, *curvature*, *growth rate*, dan *inflation*. Hasil yang diperoleh dari uji parameter untuk tiap *input meshing* tersaji pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Pengaruh perubahan parameter terhadap bentuk *meshing* dan jumlah elemen

Perubahan Parameter	Curvature (°)	Min Size (m)	Max Face Size (m)	Max Size (m)	Growth Rate	Inflation	Element
<i>Min Size</i>	18	0.03	0.1	0.8225	1.2	0.005	1128043
	18	0.011125	0.1	0.8225	1.2	0.005	1128101
	18	0.008	0.1	0.8225	1.2	0.005	1128949
<i>Max Face Size</i>	18	0.011125	0.15	0.8225	1.2	0.005	549887
	18	0.011125	0.1	0.8225	1.2	0.005	1128101
	18	0.011125	0.095	0.8225	1.2	0.005	1254136
<i>Max Size</i>	18	0.011125	0.1	0.9	1.2	0.005	1128101
	18	0.011125	0.1	0.8225	1.2	0.005	1128101
	18	0.011125	0.1	0.7	1.2	0.005	1128569
<i>Curvature</i>	20	0.011125	0.1	0.8225	1.2	0.005	1091934
	18	0.011125	0.1	0.8225	1.2	0.005	1128101
	15	0.011125	0.1	0.8225	1.2	0.005	1209995
<i>Growth Rate</i>	18	0.011125	0.1	0.8225	1.3	0.005	920542
	18	0.011125	0.1	0.8225	1.2	0.005	1128101
	18	0.011125	0.1	0.8225	1.1	0.005	1726563
<i>Inflation</i>	18	0.011125	0.1	0.8225	1.2	0.01	1127054
	18	0.011125	0.1	0.8225	1.2	0.005	1128101
	18	0.011125	0.1	0.8225	1.2	0.004	1129684

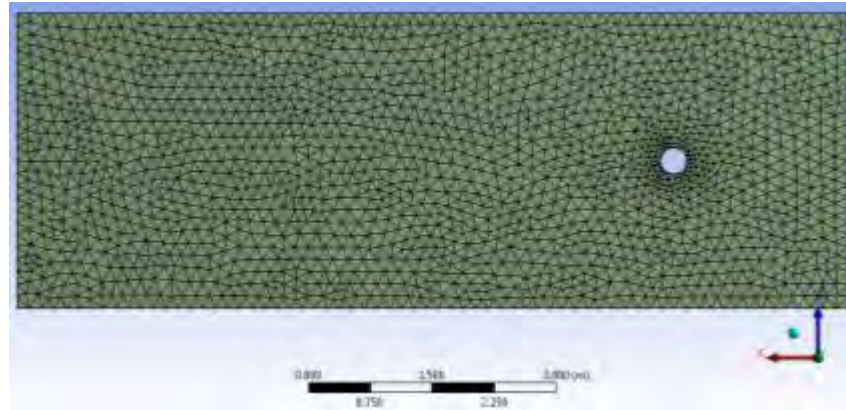
Keterangan:

 Kondisi awal *meshing*

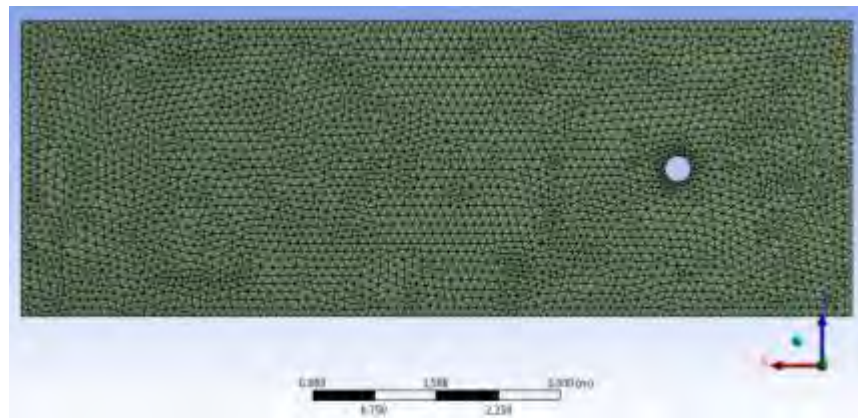
Apabila dilihat sekilas dari Tabel 4.3 dapat diketahui untuk beberapa parameter seperti *minimum size*, *maximum size*, dan *inflation* tidak mengalami penambahan ataupun pengurangan elemen yang cukup signifikan. Hal tersebut menunjukkan bahwasanya parameter tersebut tidak terlalu sensitif pada perubahan *meshing*. Sedangkan untuk *maximum face size*, *curvature*, dan *growth rate* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap jumlah dari elemen *meshing*.

Pembahasan terkait pengaruh yang diberikan oleh *maximum face size*, *curvature*, dan *growth rate* akan diberikan dengan membandingkan

kondisi awal *meshing* dan kondisi setelah salah satu parameter diubah. Secara lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 4.3 - Gambar 4.5.



(a)

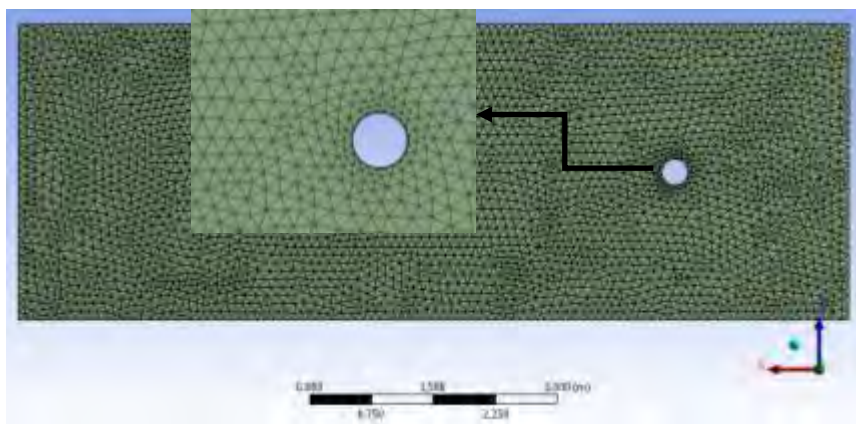


(b)

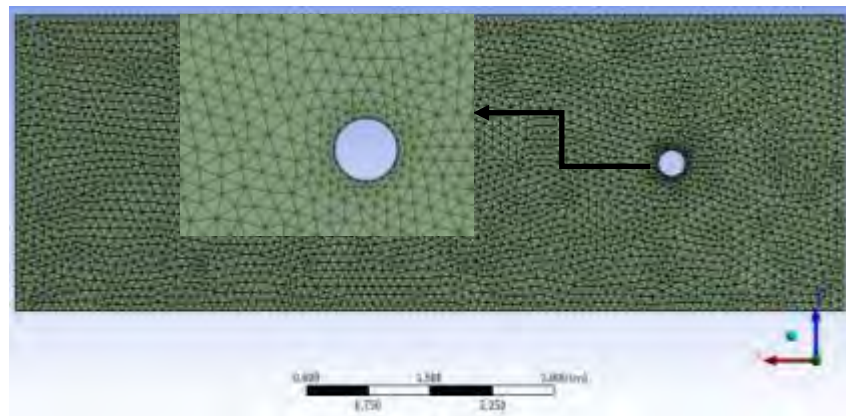
Gambar 4.3 Pengaruh dari pengurangan ukuran *maximum face size* (a) *Maximum face size* 0.15 m; (b) *Maximum face size* 0.1 m

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa ketika ukuran *maximum face size* dikurangi akan memberi pengaruh terhadap keseluruhan ukuran domain. Ketika diterapkan *maximum face size* 0.15 m, secara visualisasi akan tampak kerapatan *meshing* yang lebih renggang jika dibandingkan dengan *maximum face size* 0.1 m. Dari segi jumlah elemen yang dihasilkan untuk ukuran 0.15 m juga jauh lebih sedikit, hampir setengah dari jumlah elemen dari ukuran 0.1 m. Secara umum perubahan parameter *maximum face size* akan mengubah secara keseluruhan *meshing* yang diterapkan pada model uji dan domainnya

Untuk pengaruh yang diberikan oleh parameter *curvature* adalah dengan berkurangnya nilai *curvature*, maka akan semakin rapat *meshing* yang terdapat di sekitar silinder. Semakin rapatnya *meshing* di sekitar silinder akan berdampak kepada penambahan jumlah elemen ketika nilai *curvature* dikurangi. Efek yang diberikan oleh parameter *curvature* hanya di sekitar silinder dengan rentang jarak tertentu, tidak untuk keseluruhan domain. Secara lebih jelas perbedaan dari perubahan nilai *curvature* divisualisasikan pada Gambar 4.4.



(a)

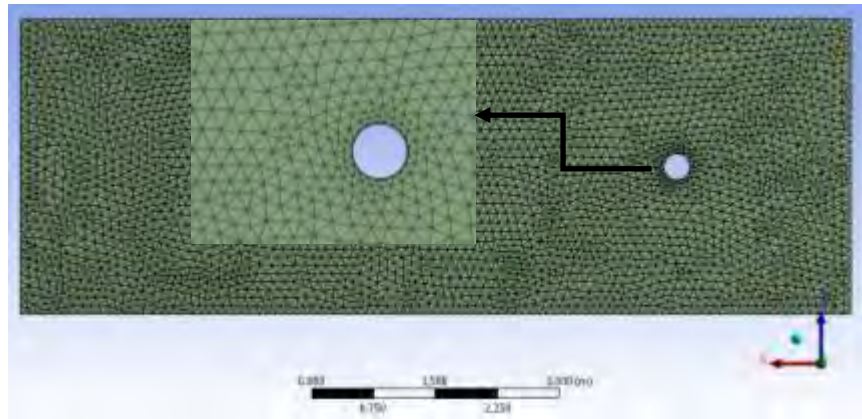


(b)

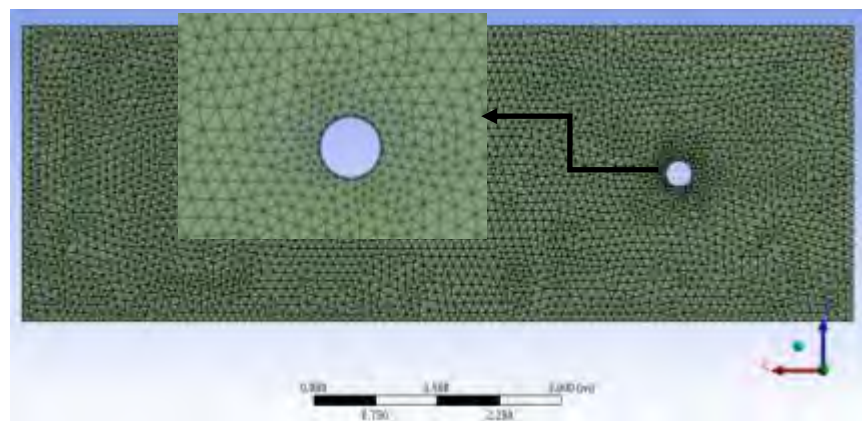
Gambar 4.4 Pengaruh dari pengurangan ukuran *curvature*
(a) *Curvature* 18°; (b) *Curvature* 15°

Pengaruh yang diberikan oleh parameter *growth rate* adalah dengan semakin kecilnya nilai *growth rate*, maka transisi antara *meshing*

pada domain dan silinder akan semakin baik. Semakin baiknya transisi *meshing* antara domain dan silinder akan berdampak pula pada penambahan jumlah elemen, ketika nilai *growth rate* diperkecil. Secara lebih jelas pengaruh dari *growth rate* dapat dilihat pada Gambar 4.5.



(a)



(b)

Gambar 4.5 Pengaruh dari pengurangan ukuran *growth rate* (a) *Growth rate* 1.2; (b) *Growth rate* 1.1

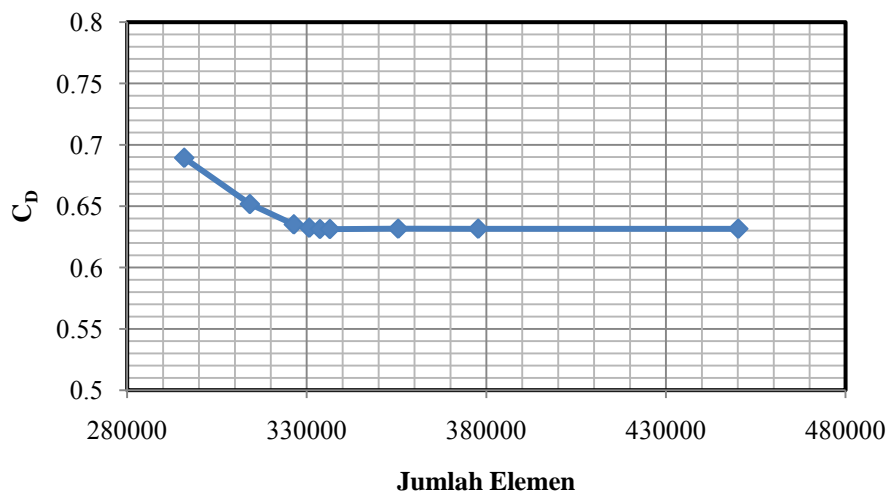
- Sensitivitas *Meshing* 2

Sensitivitas *meshing* 2 merupakan perbaikan dari sensitivitas *meshing* 1, dimana pada sensitivitas *meshing* 2 ditambahkan satu parameter lagi untuk mendapatkan konfigurasi *meshing* yang menghasilkan C_D yang konvergen pada tahapan sensitivitas *meshing*. Parameter yang ditambahkan adalah *inflation*. Parameter *inflation* akan

memberikan tambahan berupa *layer* di sekitar model yang ditinjau, dimana pada tesis ini model yang ditinjau adalah *bare cylinder*. Fungsi dari penambahan *layer* di sekitar silinder adalah untuk menjaga perubahan *meshing* di sekitar silinder, sehingga diharapkan akibat adanya *layer*, *meshing* di sekitar silinder tidak akan terpengaruh dengan *meshing* pada *domain*. Hal tersebut akan berdampak kepada *output* yang lebih mudah untuk mencapai konvergen. Hasil yang diperoleh untuk sensitivitas *meshing 2* tersaji pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil sensitivitas *meshing 2*

Simulasi	Jumlah Elemen	F_D (N)	C_D
1	295894	0.0092973	0.689342209
2	314177	0.00878962	0.651700608
3	326425	0.00856547	0.635081153
4	330693	0.00852919	0.632391197
5	333676	0.0085155	0.631376161
6	336448	0.00851431	0.631287929
7	355486	0.00851915	0.631646787
8	377733	0.00851804	0.631564487
9	450143	0.00851794	0.631557073



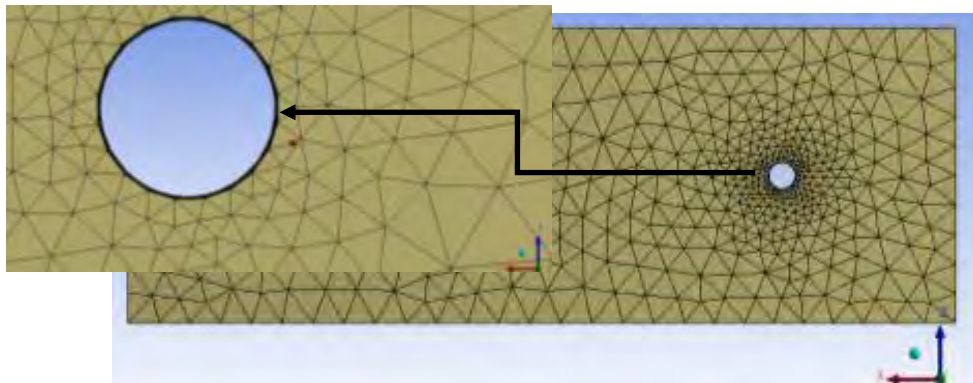
Gambar 4.6 Grafik untuk hasil analisis sensitivitas *meshing 2*

Gambar 4.6 menunjukkan bahwasanya sensitivitas *meshing 2* mencapai C_D yang mulai konvergen pada simulasi 5 dengan jumlah

elemen 333.676. C_D dapat dikatakan konvergen apabila ketika terjadi perubahan jumlah elemen, perubahan C_D yang dihasilkan tidak terlalu signifikan dan bahkan sangat kecil. Konfigurasi *meshing* yang digunakan pada simulasi 5 tersaji pada Tabel 4.5. Representasi dari konfigurasi *meshing* pada tabel tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.7.

Tabel 4.5 Ukuran *meshing* yang digunakan untuk simulasi 5

Keterangan	Ukuran
<i>Minimum size</i>	0.011125 m
<i>Maximum face size</i>	0.375 m
<i>Max size</i>	0.8225 m
<i>Number of layers</i>	5
<i>Growth Rate</i>	1.2
<i>Maximum thickness</i>	0.005 m
Fluida	<i>Tetrahedron</i>
Jumlah elemen	333.676



Gambar 4.7 Bentuk *meshing* untuk sensitivitas *meshing* 2

Dari Gambar 4.7 dapat diketahui bahwa di sekitar silinder apabila gambar diperbesar akan terdapat bulatan hitam dengan garis tebal. Hal tersebut adalah akibat adanya beberapa *layer* yang digunakan sebagai salah satu *input* untuk parameter *inflation*. Selain itu, konfigurasi *meshing* untuk simulasi 5 memiliki jumlah elemen yang tidak terlalu banyak yaitu 333.676 elemen. Hal tersebut akan berdampak kepada kinerja komputer yang jauh lebih ringan. Akan tetapi, konfigurasi ini ketika diterapkan untuk beberapa variasi pada silinder dengan *helical rods* ber-gap akan terjadi *error*, khususnya ketika diterapkan kepada variasi panjang *pitch*.

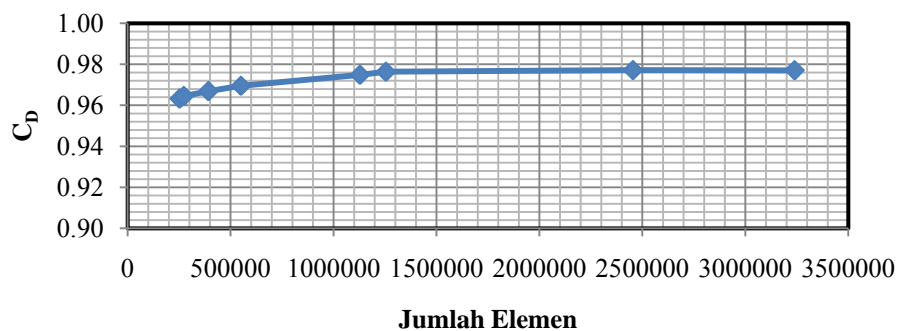
Penerapan konfigurasi *meshing* yang terdapat pada simulasi 5 terhadap silinder dengan *helical rods* ber-gap pada *pitch* 10D memiliki kualitas *meshing* yang tidak cukup baik, sehingga terjadi *error*. Dengan demikian, perlu dilakukan sensitivitas *meshing* ulang, dimana sensitivitas *meshing* tersebut dapat menghasilkan konfigurasi *meshing* yang bisa diaplikasikan untuk semua variasi yang diajukan pada penelitian ini.

- Sensitivitas *Meshing* 3

Sensitivitas *meshing* 3 merupakan perbaikan dari sensitivitas *meshing* 2. Parameter yang digunakan antara sensitivitas *meshing* 3 dan 2 hampir semuanya sama, hanya saja pada sensitivitas *meshing* 3 untuk nilai *maximum face size* divariasikan sampai diperoleh kualitas *meshing* yang sesuai untuk semua variasi yang diajukan pada analisis silinder dengan *helical rods* ber-gap. Hasil yang diperoleh untuk sensitivitas *meshing* 3 tersaji pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil sensitivitas *meshing* 3

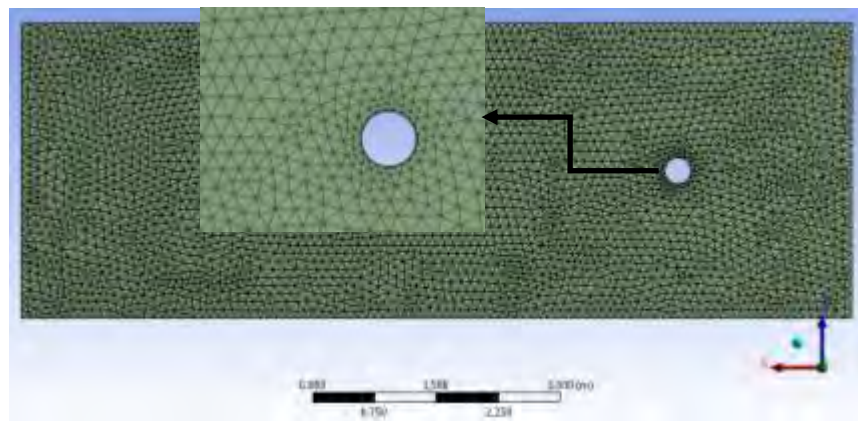
Simulasi	Jumlah Elemen	F_D (N)	C_D
1	252779	0.0129916	0.9632537
2	272642	0.013008	0.9644696
3	392329	0.0130407	0.9668941
4	549887	0.0130762	0.9695263
5	1128101	0.0131481	0.9748572
6	1254136	0.0131689	0.9763995
7	2454758	0.0131795	0.9771854
8	3239169	0.0131779	0.9770667



Gambar 4.8 Grafik untuk hasil analisis sensitivitas *meshing* 3

Tabel 4.7 Ukuran *meshing* yang digunakan simulasi 5

Keterangan	Ukuran
<i>Minimum size</i>	0.011125 m
<i>Maximum face size</i>	0.1 m
<i>Max size</i>	0.8225 m
<i>Number of layers</i>	5
<i>Growth Rate</i>	1.2
<i>Maximum thickness</i>	0.005 m
Fluida	<i>Tetrahedron</i>
Jumlah elemen	1.128.101



Gambar 4.9 Bentuk *meshing* untuk sensitivitas *meshing* 3

Penerapan konfigurasi *meshing* untuk simulasi 5 dari analisis sensitivitas *meshing* 3 sesuai apabila digunakan pada penelitian ini. Penggunaan konfigurasi *meshing* ini dikatakan sesuai dikarenakan ketika diterapkan untuk semua variasi yang digunakan pada analisis silinder dengan *helical rods* ber-gap tidak mengalami *error*. Sehingga, dapat dikatakan bahwasanya dari segi kualitas *meshing* konfigurasi ini sudah sangat baik. Representasi dari konfigurasi *meshing* simulasi 5 dapat diperoleh pada Gambar 4.9.

Dari Gambar 4.9 dapat diketahui bahwa sensitivitas *meshing* 3 dengan simulasi 5 memiliki kerapatan *meshing* yang jauh lebih padat jika dibandingkan dengan sensitivitas *meshing* 2. Hal ini bertujuan untuk memperbaiki *error* sebelumnya yang terjadi pada sensitivitas *meshing* 2, dimana pada sensitivitas *meshing* 2 penyebab terjadinya *error* adalah kualitas *meshing* yang tidak baik ketika diterapkan untuk silinder dengan

helical rods ber-gap dengan panjang *pitch* 10D. Dengan demikian, konfigurasi sensitivitas *meshing* 3 simulasi 5 yang akan digunakan untuk seluruh analisis model CFD dalam penelitian ini.

Beberapa sensitivitas *meshing* yang dilakukan mulai dari sensitivitas *meshing* 1-3 kesemuanya menggunakan jenis *meshing tetrahedron*. Penggunaan jenis *meshing tetrahedron* didasarkan kepada rujukan yang diperoleh dari ANSYS (2012) dimana dalam rujukan tersebut dijelaskan bahwasanya jenis *meshing tetrahedron* memiliki keunggulan untuk analisis benda 3D, serta memiliki ketelitian yang sangat baik.

4.1.2 Validasi C_D dengan Jurnal Acuan

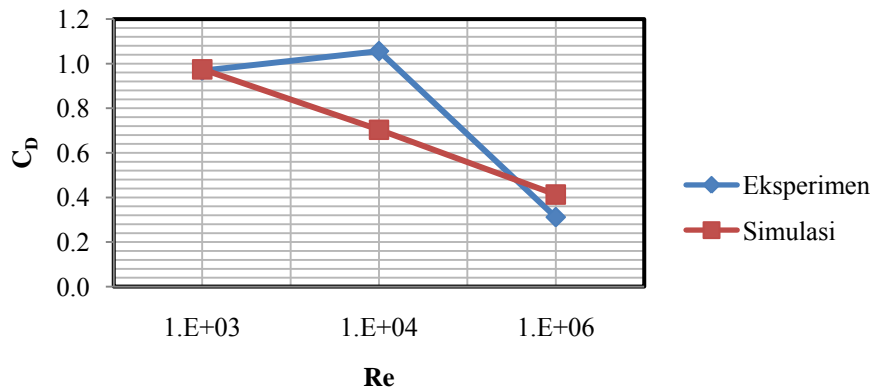
Setelah diperoleh konfigurasi *meshing* yang sesuai untuk setiap variasi yang diajukan pada penelitian, khususnya ketika silinder dengan *helical rods* ber-gap dengan variasi Reynolds number (Re), sudut datang aliran, panjang *pitch*, dan *gap*. Langkah berikutnya adalah melakukan validasi C_D berdasarkan kepada Constantinides, dkk. (2006). Hasil yang diperoleh untuk validasi dengan jurnal acuan pada $Re = 10^3, 10^4, \text{ dan } 10^6$ dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Koefisien *drag* yang dihasilkan antara simulasi perangkat lunak CFD dan eksperimen

Re	C_D Eksperimen	Simulasi			
		F_D (N)	C_D	F_L (N)	C_L
10^3	0.968487	0.01314810	0.97486	-2.07E-05	0.00153
10^4	1.056178	0.948955	0.70360	0.0139206	0.01032
10^6	0.311391	5566.84	0.41275	-253.954	0.01883

Keterangan: (+) Vektor gaya *lift* ke arah kanan
 (-) Vektor gaya *lift* ke arah kiri

Hasil simulasi yang terdapat pada Tabel 4.8 telah dikenai turbulensi SST (*Shear Stress Transport*). Visualisasi dari Tabel 4.8 dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Grafik untuk C_D pada simulasi CFD dan eksperimen

Dari Gambar 4.10 dapat diketahui untuk $Re = 10^3$ dan 10^6 menghasilkan C_D yang hampir sama antara simulasi CFD dan eksperimen yang terdapat pada jurnal. Hanya saja untuk $Re = 10^4$, C_D yang dihasilkan antara simulasi CFD dan eksperimen memiliki rentang nilai yang cukup jauh. Sehingga untuk $Re = 10^4$ perlu dikaji secara lebih lanjut. Untuk mengkaji lebih lanjut tentang C_D yang diperoleh dari simulasi, maka peneliti mencoba membandingkan C_D simulasi dengan penelitian yang dilakukan oleh Patel (2010) dalam tesisnya yang berjudul “*Numerical Investigation of Flow Past a Circular Cylinder and in a Staggered Tube Bundle using Various Turbulence Models*”, dalam penelitian tersebut dijelaskan bahwa proses simulasi juga menggunakan CFD dan model turbulen SST. Hasil perbandingan yang diperoleh tersaji pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Perbandingan C_D simulasi dan referensi

Re	Referensi (Patel, 2010)		Tesis (Simulasi)		Turbulensi
	C_D Simulasi	C_D Eksperimen	C_D Simulasi	C_D Eksperimen (Constatinides dkk., 2006)	
1000	0.9891	0.98 ± 0.005	0.975	0.968	SST
3900	0.6208	0.93 ± 0.005	0.754	0.913	SST

Informasi yang dapat diperoleh dari Tabel 4.9 adalah dengan diterapkannya jenis turbulensi SST dari dua penelitian yang berbeda, *error* yang dihasilkan antara keduanya tidak jauh berbeda untuk $Re = 3.9 \times 10^3$. Presentase *error* pada penelitian yang dilakukan oleh Patel (2010) adalah 33%, sedangkan untuk simulasi pada penelitian ini sebesar 17%.

Salah satu upaya untuk mengatasi *error* dan untuk mencapai C_D simulasi mendekati C_D eksperimen yang dilakukan oleh Constantinides, dkk. (2006) adalah dengan mencari suatu fungsi skala, dimana nantinya semua C_D simulasi akan dikalikan dengan fungsi skala tersebut, sehingga akan diperoleh C_D simulasi yang mendekati C_D eksperimen. Metode untuk mencari fungsi skala dilakukan dengan cara regresi. Dalam proses regresi, peneliti menggunakan bantuan perangkat lunak Ms. Excel. Tahapan awal dalam melakukan regresi adalah dengan menambah variasi Re , seperti yang tersaji pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Perbandingan C_D antara simulasi dan eksperimen

Re	F_D (N) Simulasi	C_D Simulasi	C_D Eksperimen	Error (%)
1000	0.0131481	0.974857248	0.968486917	0.66
3900	0.154669	0.75396657	0.913720552	17.48
5000	0.247312	0.733471439	0.956755405	23.34
10000	0.948955	0.703596459	1.056178395	33.38
50000	19.6884	0.5839134	1.072775221	45.57
100000	65.1818	0.48328618	1.099487053	56.04
250000	366.182	0.434405186	0.94451314	54.01
500000	1418.73	0.42076322	0.2605523	61.49
750000	3155.43	0.415924066	0.296462907	40.30
1000000	5566.84	0.412749699	0.311390572	32.55

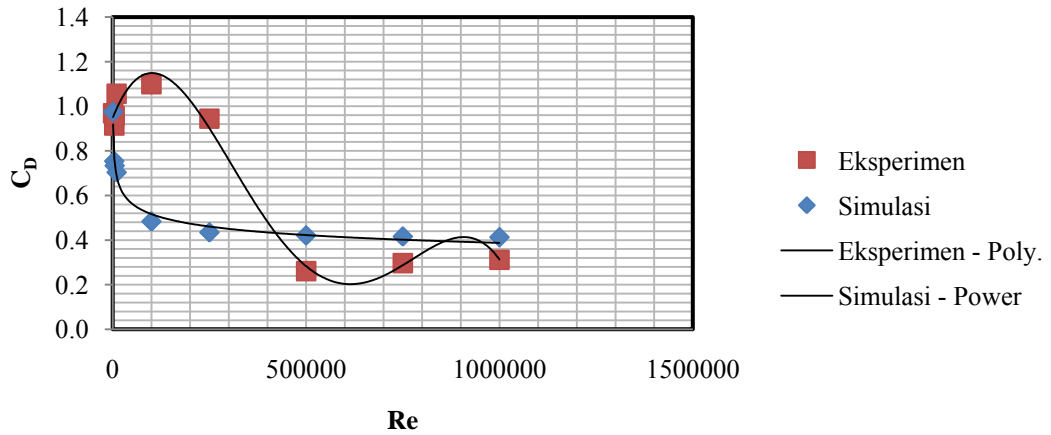
Dari Tabel 4.10 dapat diketahui untuk semua Re yang divariasikan menghasilkan C_D yang cukup jauh berbeda antara simulasi dan eksperimen. Data pencar untuk C_D simulasi dan eksperimen didekati dengan *trendline* yang dapat mewakili keseluruhan data. Selanjutnya dari *trendline* keduanya diperoleh suatu fungsi untuk C_D simulasi dan eksperimen.

Trendline yang digunakan untuk melakukan pendekatan terhadap data pencar C_D hasil eksperimen adalah *polynomial*, sedangkan untuk C_D simulasi adalah *power*. Fungsi yang dihasilkan oleh C_D eksperimen dan simulasi yang diperoleh dari Gambar 4.11 berturut-turut adalah sebagai berikut:

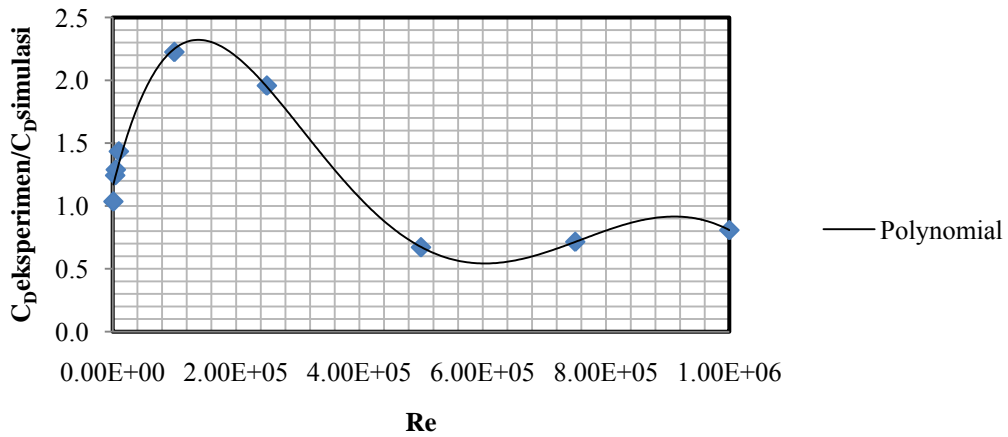
$$Y = -1.91 \times 10^{-23} X^4 + 4.14 \times 10^{-17} X^3 - 2.73 \times 10^{-11} X^2 + 4.35 \times 10^{-6} X + 0.9476 \dots \dots \dots (4.1)$$

$$Y = 2.181 X^{-0.125} \dots \dots \dots (4.2)$$

dengan, $X=Re$ dan $Y=C_D$



Gambar 4.11 *Trendline* untuk C_D eksperimen dan simulasi



Gambar 4.12 *Trendline* untuk fungsi skala

Dari kedua fungsi di atas selanjutnya dilakukan perbandingan untuk semua variasi Re . Sehingga, didapatkan sebuah fungsi skala yang dapat merepresentasikan semua Re seperti yang tampak pada Gambar 4.12, dengan cara melakukan regresi terhadap data perbandingan tiap variasi Re tersebut, maka akan diperoleh persamaan fungsi skala sebagai berikut:

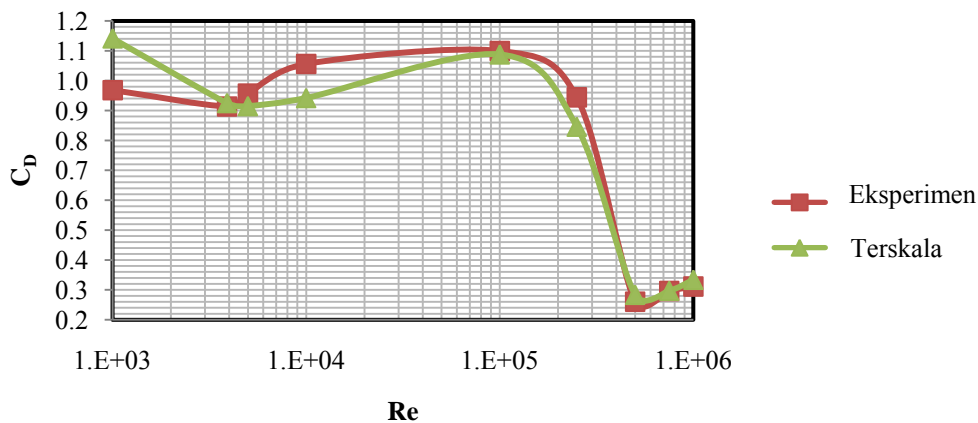
$$Y = -2.21 \times 10^{-29} X^5 - 2.05 \times 10^{-24} X^4 + 7.81 \times 10^{-17} X^3 - 7.06 \times 10^{-11} X^2 + 1.63 \times 10^{-5} X + 1.1713 \dots\dots\dots(4.3)$$

Fungsi skala yang dihasilkan dari *trendline* pada Gambar 4.12 akan digunakan sebagai faktor pengali untuk setiap hasil C_D simulasi. Hasil yang diperoleh untuk semua persamaan fungsi yang telah dijelaskan sebelumnya

disajikan secara lebih detail pada Tabel 4.11. Dijelaskan pula pada Tabel 4.11, C_D hasil simulasi yang dikalikan dengan fungsi skala, dimana untuk penjelasan selanjutnya dinamakan dengan C_D terskala, serta *error* yang dihasilkan C_D tersebut dengan C_D eksperimen. Perbandingan antara C_D terskala dengan C_D eksperimen divisualisasikan pada Gambar 4.13.

Tabel 4.11 Koefisien *drag* terskala untuk berbagai variasi Re

Re	Polynomial					
	Regresi		Fungsi Skala		C_D Terskala	Error (%)
	Eksperimen	Simulasi	Perbandingan	Regresi		
1000	0.95192	0.91888	1.03595	1.1712	1.14176	17.89
3900	0.96414	0.77501	1.24403	1.2271	0.92518	1.25
5000	0.96866	0.75129	1.28932	1.2478	0.91524	4.34
10000	0.98838	0.68888	1.43476	1.3390	0.94210	10.80
100000	1.14898	0.51645	2.22475	2.2517	1.08822	1.02
250000	0.90172	0.46051	1.95807	1.9480	0.84621	10.41
500000	0.28351	0.42226	0.67142	0.6742	0.28368	8.88
750000	0.28719	0.40137	0.71551	0.7148	0.29728	0.28
1000000	0.31305	0.38718	0.80854	0.8086	0.33377	7.19



Gambar 4.13 Perbandingan C_D terskala dengan C_D eksperimen
dibeberapa Re

Gambar 4.13 menunjukkan bahwasanya untuk Re yang ditinjau dalam penelitian ini yaitu 10^3 , 10^4 , dan 10^6 memiliki *error* sebesar 17.89%, 10.8%, dan 7.19%. Apabila dibandingkan dengan hasil sebelumnya, dimana *error* untuk $Re = 10^3$, 10^4 , dan 10^6 adalah 0.66%, 33.38%, dan 32.55%, hasil dari C_D terskala masih lebih baik, khususnya untuk $Re = 10^4$ dan 10^6 .

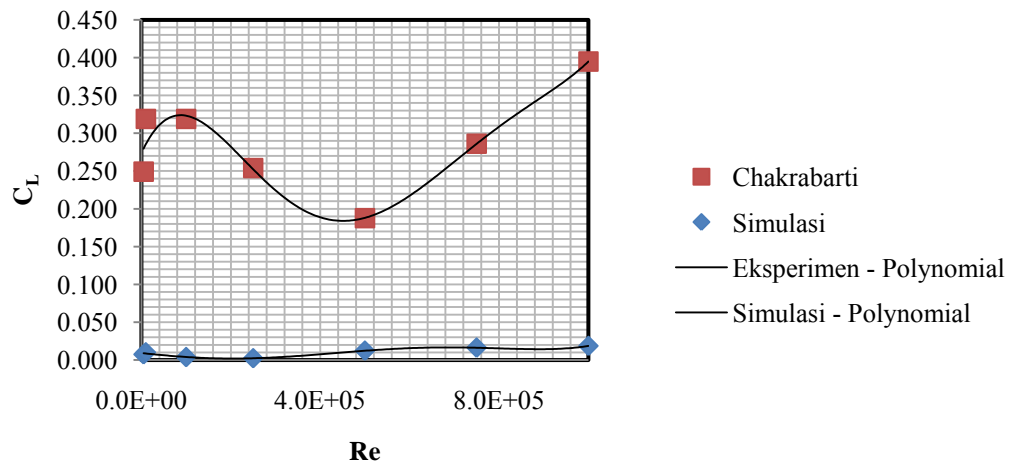
4.1.3 Validasi C_L dengan Buku Literatur

Setelah diperoleh C_D terskala, maka langkah yang sama juga diterapkan untuk memperoleh C_L terskala, dimana sebagai acuan untuk validasi C_L digunakan grafik C_L dari buku “*Handbook of Offshore Engineering*” Volume 1 karya Chakrabarti (2005) seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Langkah awal untuk mencari C_L terskala adalah dengan mencari *trendline* untuk masing-masing data C_L literatur dan simulasi yang tersaji pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Data C_L dari literatur dan simulasi

Re	F_L	C_L	
		Simulasi	Chakrabarti
5000	0.00256663	0.00761	0.24930
10000	0.0139206	0.01032	0.31904
100000	-0.525628	0.00390	0.31904
250000	-2.09639	0.00249	0.25406
500000	-41.5978	0.01234	0.18778
750000	-124.116	0.01636	0.28626
1000000	-253.954	0.01883	0.39505

Keterangan: (+) Vektor gaya *lift* ke arah kanan
 (-) Vektor gaya *lift* ke arah kiri



Gambar 4.14 *Trendline* untuk C_L literatur dan simulasi

Grafik *trendline* untuk C_L literatur dan simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.14. Dari gambar tersebut diperoleh persamaan fungsi untuk C_L literatur dan simulasi berturut-turut sebagai berikut:

$$Y = 7.15 \times 10^{-30} X^5 - 2.17 \times 10^{-23} X^4 + 2.35 \times 10^{-17} X^3 - 1.02 \times 10^{-11} X^2 + 1.3 \times 10^{-6} X + 0.2735 \dots \dots \dots (4.4)$$

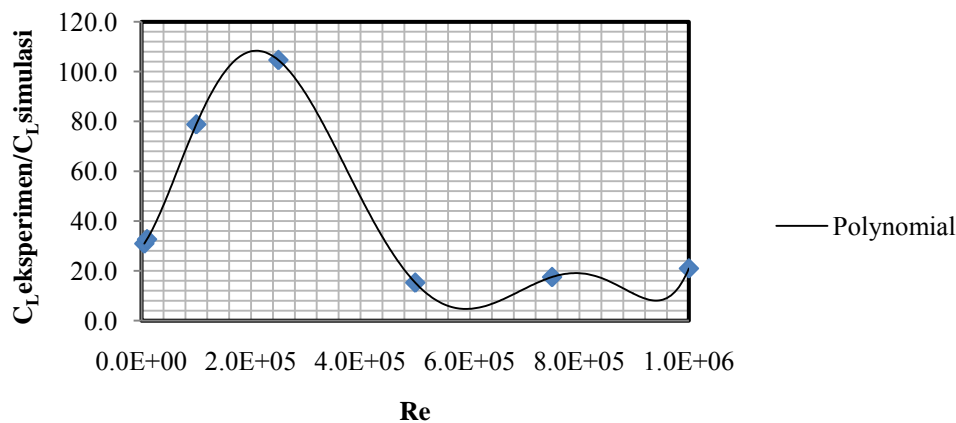
$$Y = 6.11 \times 10^{-31} X^5 - 1.24 \times 10^{-24} X^4 + 6.57 \times 10^{-19} X^3 + 4.03 \times 10^{-14} X^2 - 6.2 \times 10^{-8} X + 0.0094 \dots \dots \dots (4.5)$$

dengan $X=Re$

Persamaan fungsi untuk C_L literatur dan simulasi diatas dilakukan perbandingan untuk memperoleh fungsi skala, dengan cara melakukan regresi terhadap data perbandingan tiap variasi Re tersebut, maka akan diperoleh persamaan fungsi skala sebagai berikut:

$$Y = 2.14 \times 10^{-32} X^6 - 6.47 \times 10^{-26} X^5 + 7.08 \times 10^{-20} X^4 - 3.26 \times 10^{-14} X^3 + 4.73 \times 10^{-9} X^2 + 2.83 \times 10^{-4} X + 29.3889 \dots \dots \dots (4.6)$$

dengan, $X=Re$

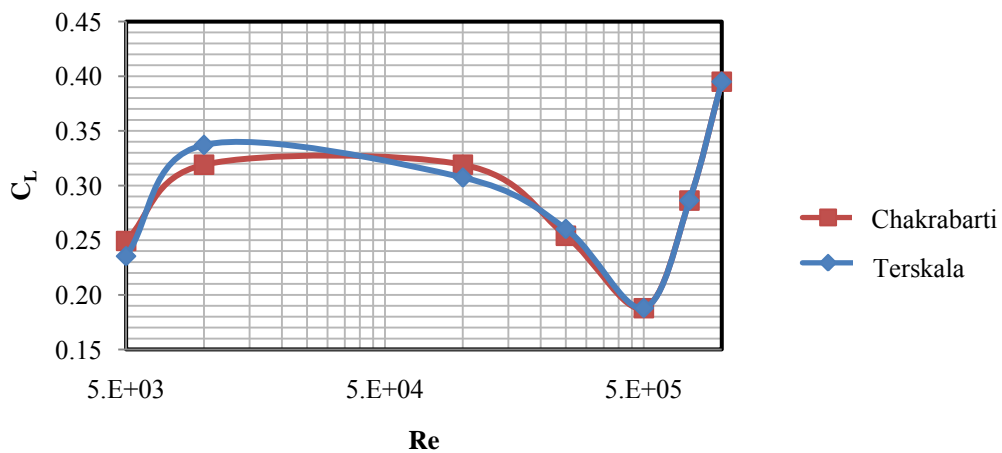


Gambar 4.15 Trendline untuk fungsi skala

Fungsi skala yang dihasilkan dari *trendline* pada Gambar 4.15 akan digunakan sebagai faktor pengali untuk setiap hasil C_L simulasi. Hasil yang diperoleh untuk semua persamaan fungsi yang telah dijelaskan sebelumnya disajikan secara lebih detail pada Tabel 4.13. Dalam tabel tersebut dijelaskan pula C_L hasil simulasi yang telah dikalikan dengan fungsi skala, dimana untuk penjelasan selanjutnya dinamakan dengan C_L terskala, serta *error* yang dihasilkan C_L tersebut dengan C_L eksperimen. Perbandingan antara C_L terskala dengan C_L eksperimen divisualisasikan pada Gambar 4.16.

Tabel 4.13 Koefisien *lift* terskala untuk berbagai variasi Re

Re	Polynomial					
	Regresi		Fungsi Skala		C _L Terskala	Error (%)
	Chakrabarti	Simulasi	Perbandingan	Regresi		
5000	0.27974	0.00905	30.92044	30.92044	0.23537	5.59
10000	0.28551	0.00874	32.66454	32.66454	0.33714	5.67
100000	0.32337	0.00410	78.84295	78.84295	0.30727	3.69
250000	0.25249	0.00241	104.64151	104.64151	0.26024	2.43
500000	0.18820	0.01236	15.23033	15.23033	0.18790	0.06
750000	0.28615	0.01635	17.49650	17.49650	0.28624	0.01
1000000	0.39506	0.01883	20.98040	20.98040	0.39505	0.00



Gambar 4.16 Perbandingan C_L terskala dengan C_L eksperimen di beberapa Re

Perbandingan C_L yang tersaji pada Gambar 4.16 memiliki *error* yang tidak terlalu besar yaitu antara 0 - 5%. Untuk Re yang ditinjau pada penelitian ini yaitu Re = 10⁴ dan 10⁶, *error* yang dimiliki berturut-turut adalah 5.67% dan 0%. Keseluruhan fungsi skala yang diperoleh baik itu untuk C_D terskala dan C_L terskala, selanjutnya akan dikalikan terhadap C_D dan C_L yang diperoleh dari simulasi CFD.

4.2 Analisis Pengaruh Pemasangan *Helical Rods Ber-gap*

Pemasangan *helical rods ber-gap* pada *bare cylinder* diharapkan bisa mengurangi efek yang ditimbulkan akibat adanya *vortex shedding*. Salah satu yang diharapkan bisa mengalami penurunan nilai adalah efek yang ditimbulkan

vortex shedding terhadap gaya fluida yang bekerja pada silinder. Gaya fluida yang menjadi fokus adalah gaya *drag* dan *lift*. Dengan menggunakan beberapa variasi untuk simulasi pada silinder dengan *helical rods* ber-gap diharapkan dapat menemukan konfigurasi yang menghasilkan pengurangan gaya fluida yang paling besar.

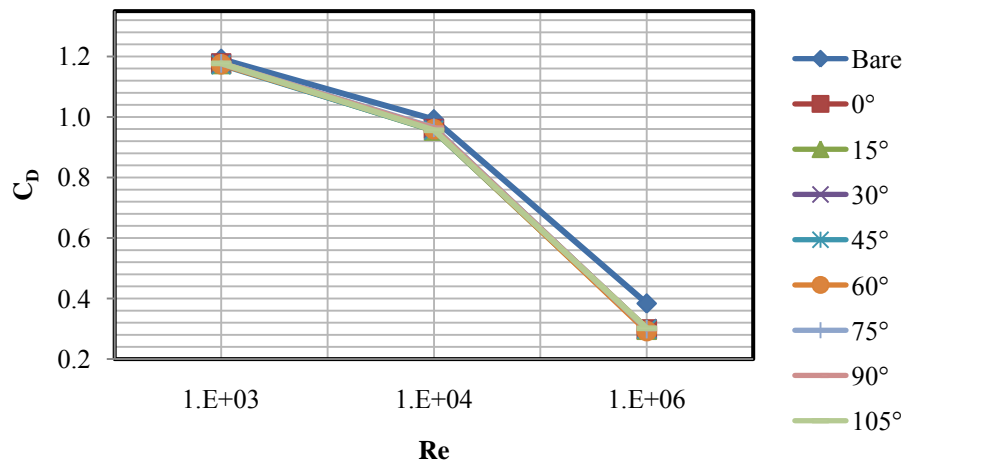
4.2.1 Analisis Pengaruh Variasi Sudut Datang Aliran terhadap Gaya Fluida

Penelitian ini dimulai dengan melakukan variasi terhadap sudut datang aliran yang mengenai silinder dengan *helical rods* ber-gap. Tujuan dari dilakukannya variasi terhadap sudut datang aliran yang mengenai silinder dengan *helical rods* ber-gap adalah untuk mengetahui konfigurasi *rods* dari sudut datang aliran yang paling efektif dalam mereduksi gaya fluida. Variasi sudut datang aliran yang dilakukan pada penelitian ini adalah sudut 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° , dan 105° . Untuk lebih jelasnya bentuk dari variasi sudut datang aliran dapat dilihat pada Gambar 1.1(a).

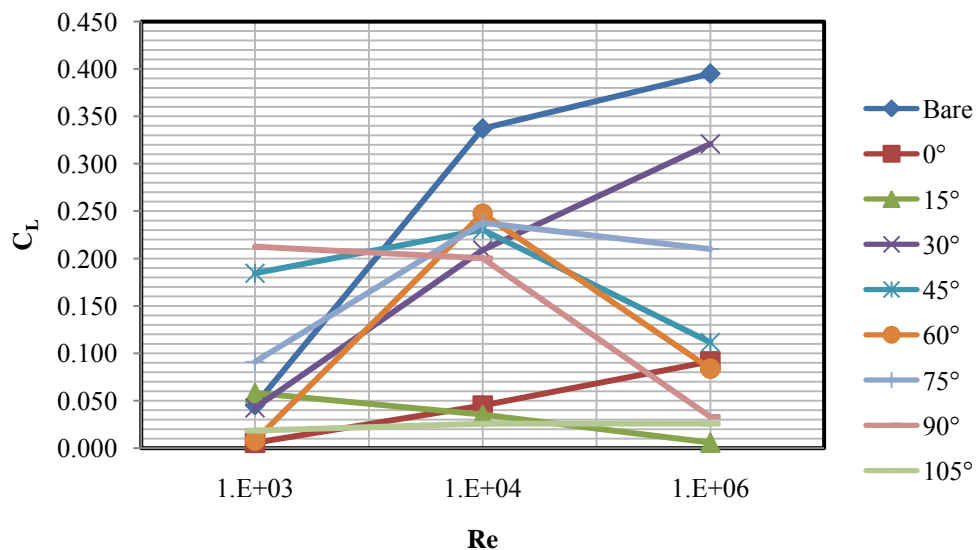
Tabel 4.14 Koefisien *drag* dan *lift* yang dihasilkan antara *bare cylinder* dan silinder dengan *helical rods* ber-gap untuk sudut datang aliran 0° dan 60°

0°						
Re	C_D <i>Bare Cylinder</i>	C_L <i>Bare Cylinder</i>	Silinder dengan <i>Helical Rods</i> Ber-gap			
			C_D (N)	%	C_L (N)	%
10^3	1.14176	0.04545	1.12725	1.27	0.00572	87.41
10^4	0.94210	0.33714	0.91045	3.36	0.04502	86.65
10^6	0.33377	0.39505	0.24804	25.68	0.09155	76.83
60°						
Re	C_D <i>Bare Cylinder</i>	C_L <i>Bare Cylinder</i>	Silinder dengan <i>Helical Rods</i> Ber-gap			
			C_D (N)	%	C_L (N)	%
10^3	1.14176	0.04545	1.12435	1.52	0.0081	82.17
10^4	0.94210	0.33714	0.90955	3.46	0.24746	26.60
10^6	0.33377	0.39505	0.24252	27.34	0.08394	78.75

Dari Gambar 1.1(a) dapat terlihat secara jelas bahwasanya untuk setiap sudut datang aliran akan memberikan konfigurasi *helical rods* yang berbeda. Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwasanya konfigurasi *rods* yang memberikan pengurangan gaya fluida paling besar terjadi pada sudut 0° dan 60° dengan pengurangan C_D dan C_L seperti yang tersaji pada Tabel 4.14.



(a)



(b)

Gambar 4.17 Grafik koefisien gaya fluida untuk setiap variasi sudut datang

(a) Koefisien *drag*; (b) Koefisien *lift*

Hasil yang diperoleh untuk semua variasi sudut datang aliran direpresentasikan secara lebih jelas pada Gambar 4.17. Gambar 4.17(a) menunjukkan bahwasanya untuk C_D dengan berbagai variasi sudut datang aliran dalam tiga variasi Reynolds number tidak mengalami perubahan yang signifikan. Dari Gambar 4.17(a) juga dapat diketahui bahwa dengan semakin bertambahnya kecepatan, dimana dalam grafik diwakilkan sebagai penambahan Reynolds number (Re), maka akan menghasilkan pengurangan C_D yang semakin besar pula.

Hanya saja seperti yang telah dijelaskan pada Tabel 4.14 dapat diketahui bahwa C_D mengalami reduksi paling besar ketika *rods* dikenai aliran dari sudut datang aliran 0° dan 60° . Akan tetapi, untuk reduksi C_D terbesar diperoleh dari sudut datang aliran 60° . Secara keseluruhan tabel yang menjelaskan hasil C_D untuk variasi sudut datang aliran lainnya dapat diperoleh pada Lampiran B.

Sama halnya dengan C_D , reduksi paling besar untuk C_L dialami oleh sudut datang aliran 0° dan 60° . Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.17(b), dimana pada gambar tersebut selain sudut datang aliran 0° , 30° , 60° , dan 105° , C_L akibat pemasangan *helical rods* ber-gap mengalami penambahan yang cukup signifikan, untuk lebih detailnya bisa dilihat pada Lampiran B. Jika dibandingkan antara C_L dari sudut datang aliran 0° dan 60° , maka reduksi terbesar dialami oleh konfigurasi *rods* dari sudut datang aliran 0° .

Sudut datang aliran 0° dan 60° memberikan dampak terhadap reduksi C_D dan C_L yang paling besar jika dibandingkan dengan sudut lainnya. Hal tersebut terkait dengan konfigurasi *rods* yang dimiliki oleh sudut datang aliran 0° dan 60° . Jika diperhatikan secara seksama seperti yang tampak pada Gambar 1.1(a), jelas sekali terlihat bahwasanya untuk sudut datang aliran 0° dan 60° memiliki konfigurasi *rods* yang simetris terhadap arah datang aliran. Untuk sudut datang aliran 0° memiliki dua *rods* yang berdiri simetris dibelakang dan satu *rod* yang ada didepannya. Sedangkan untuk sudut datang aliran 60° memiliki konfigurasi *rods*, dimana dua *rods* di depan terpasang secara simetris, sedangkan dibelakangnya berdiri satu *rod* yang terletak di antara kedua *rod* depannya. Konfigurasi *rods* yang dimiliki oleh sudut datang aliran 0° dan 60° , akan berdampak pada pengurangan gaya fluida yang paling besar pada ketiga variasi Re jika dibandingkan dengan arah datang aliran lainnya. Dengan demikian untuk variasi berikutnya, yaitu variasi panjang *pitch* dan *gap* digunakan konfigurasi *helical rods* ber-gap akibat sudut datang aliran 0° dan 60° .

4.2.2 Analisis Pengaruh Panjang *Pitch* pada Silinder dengan *Helical Rods* Ber-gap

Setelah diperoleh arah datang aliran yang paling efektif dalam mereduksi gaya fluida yaitu arah datang aliran 0° dan 60° , maka variasi berikutnya yang

dilakukan adalah variasi panjang *pitch* yang diterapkan hanya untuk arah datang aliran 0° dan 60° , serta dalam tiga variasi Re. Variasi panjang *pitch* yang digunakan adalah 30D, 15D, dan 10D seperti yang tampak pada Gambar 1.1(b). Hasil analisis yang diperoleh dari dilakukannya variasi panjang *pitch* tersaji pada Tabel 4.15 dan Tabel 4.16.

Tabel 4.15 Koefisien *drag* yang dihasilkan antara *bare cylinder* dan silinder dengan *helical rods* ber-gap untuk sudut datang aliran 0° dan 60° dengan variasi panjang *pitch*

Sudut Datang	Re	Bare	C_D					
			Panjang Pitch					
			30D	%	15D	%	10D	%
0°	10^3	1.14176	1.12725	1.27	1.12994	1.04	1.17522	-2.93
	10^4	0.94210	0.91045	3.36	0.9405	0.17	0.9345	0.81
	10^6	0.33377	0.24804	25.68	0.3704	-10.98	0.386	-15.66
60°	10^3	1.14176	1.12435	1.52	1.12994	1.04	1.17522	-2.93
	10^4	0.94210	0.90955	3.46	0.90821	3.60	0.93610	0.64
	10^6	0.33377	0.24252	27.34	0.24113	27.75	0.38351	-14.90

Keterangan: (+) C_D mengalami pengurangan
 (-) C_D mengalami penambahan

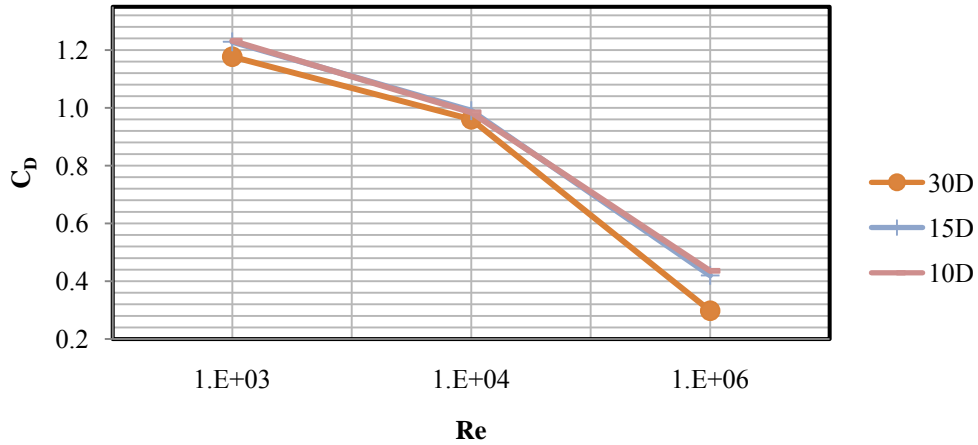
Tabel 4.16 Koefisien *lift* yang dihasilkan antara *bare cylinder* dan silinder dengan *helical rods* ber-gap untuk sudut datang aliran 0° dan 60° dengan variasi panjang *pitch*

Sudut Datang	Re	Bare	C_L					
			Panjang Pitch					
			30D	%	15D	%	10D	%
0°	10^3	0.04545	0.00572	87.41	0.0254056	44.11	0.0703439	-54.76
	10^4	0.33714	0.04502	86.65	0.03763	88.84	0.1165	65.44
	10^6	0.39505	0.09155	76.83	0.0601827	84.77	0.0847208	78.55
60°	10^3	0.04545	0.00811	82.17	0.21612	-375.5	0.30815	-577.9
	10^4	0.33714	0.24746	26.60	0.31359	6.98	0.03125	90.73
	10^6	0.39505	0.08394	78.75	0.19386	50.93	0.08315	78.95

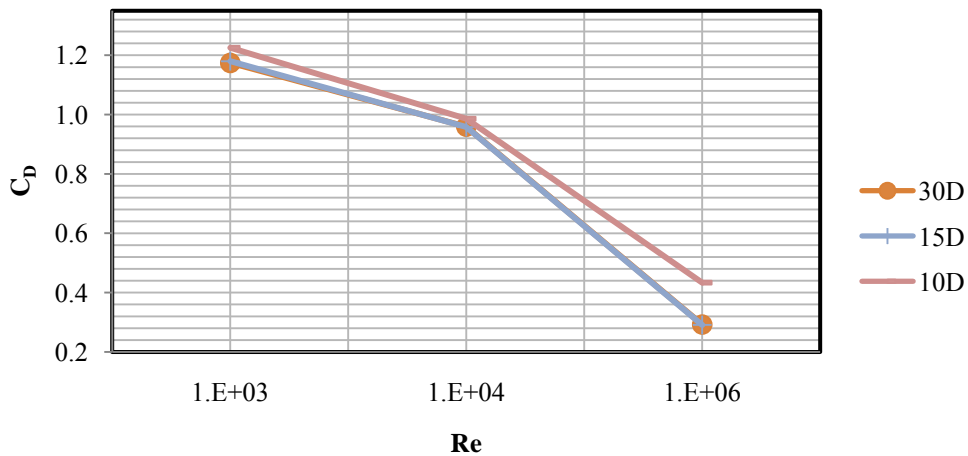
Keterangan: (+) C_L mengalami pengurangan
 (-) C_L mengalami penambahan

Grafik untuk C_D dari sudut datang aliran 0° dan 60° dengan variasi panjang *pitch* dapat diperoleh dari Gambar 4.18. Dari Gambar 4.18(a) dapat diketahui bahwasanya untuk panjang *pitch* 30D dengan sudut datang aliran 0° , C_D mengalami penurunan yang paling besar jika dibandingkan dengan 15D dan 10D.

Hasil serupa juga terjadi pada sudut datang aliran 60° , dimana C_D dengan panjang *pitch* 30D memberikan hasil reduksi terbesar jika dibandingkan dengan panjang *pitch* lainnya. Hal tersebut dapat diketahui dari Gambar 4.18(b).



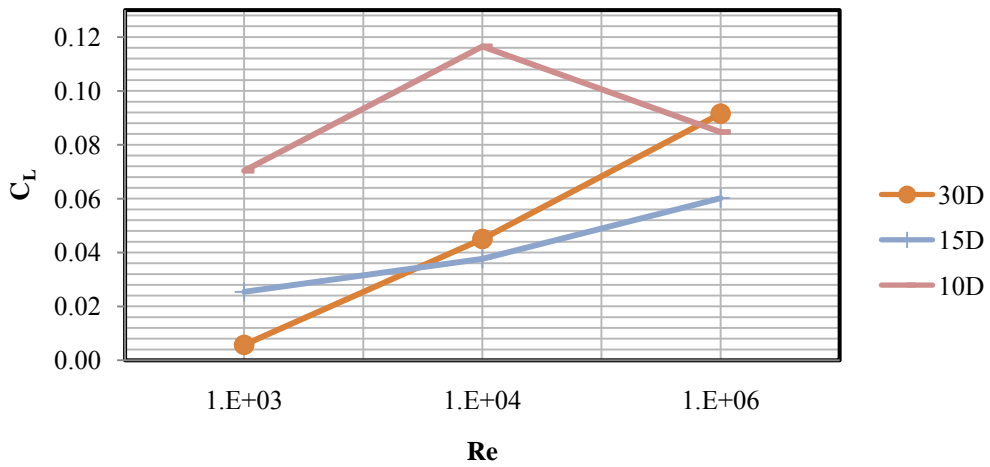
(a)



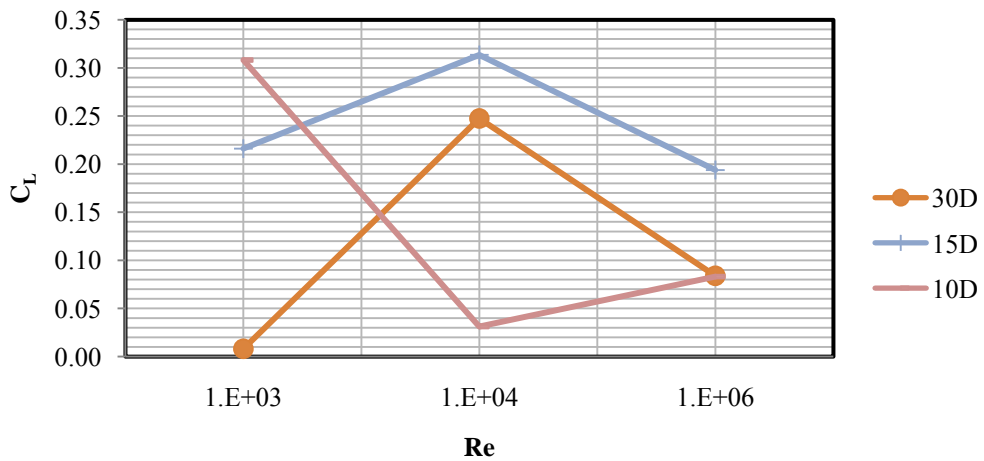
(b)

Gambar 4.18 Grafik C_D untuk setiap variasi panjang *pitch* (a) Sudut datang aliran 0° ; (b) Sudut datang aliran 60°

Hasil analisis C_L dengan variasi panjang *pitch* untuk sudut datang aliran 0° dan 60° tersaji secara lengkap Tabel 4.16. Grafik C_L untuk sudut datang aliran 0° dan 60° dengan variasi panjang *pitch* divisualisasikan oleh Gambar 4.19.



(a)



(b)

Gambar 4.19 Grafik C_L untuk setiap variasi panjang *pitch* (a) Sudut datang aliran 0° ; (b) Sudut datang aliran 60°

Dari Gambar 4.19(a) dapat diketahui pada $Re = 10^3$ panjang *pitch* 30D jauh lebih efektif jika dibandingkan dengan panjang *pitch* lainnya. Sedangkan pada $Re = 10^4$ dan 10^6 , C_L tereduksi dengan baik pada panjang *pitch* 15D, akan tetapi selisih C_L pada $Re = 10^4$ dan 10^6 antara panjang *pitch* 30D dan 15D tidak terlampaui jauh. Gambar 4.19(b) dapat diketahui bahwa C_L yang mengalami reduksi paling besar pada $Re = 10^3$ dan 10^6 adalah penggunaan panjang *pitch* 30D. Sedangkan pada $Re = 10^4$ panjang *pitch* 15D mampu mereduksi C_L yang lebih

baik jika dibandingkan dengan variasi lainnya, akan tetapi selisih C_L yang diberikan pada $Re = 10^4$ antara panjang *pitch* 30D dan 15D tidak terlalu besar.

Panjang *pitch* 30D mampu meminimalisir baik itu C_D ataupun C_L dikarenakan pada panjang *pitch* 30D, *helical rods* yang terpasang tidak memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap penambahan diameter silinder akibat benda asing (*helical rods*). Seperti yang tampak pada Gambar 1.1(b), semakin pendek *pitch*, maka akan semakin banyak area dari silinder yang tertutupi oleh *helical rods*. Hal tersebut secara tidak langsung akan berdampak pada semakin besarnya pengaruh penambahan diameter akibat benda asing. Dari analisis pengaruh variasi panjang *pitch*, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa untuk analisis pada penelitian ini penggunaan panjang *pitch* 30D dengan konfigurasi *rods* akibat sudut datang aliran 0° dan 60° merupakan konfigurasi terbaik dalam mereduksi gaya fluida.

4.2.3 Analisis Pengaruh Variasi *Gap* pada Silinder dengan *Helical Rods* Ber-gap

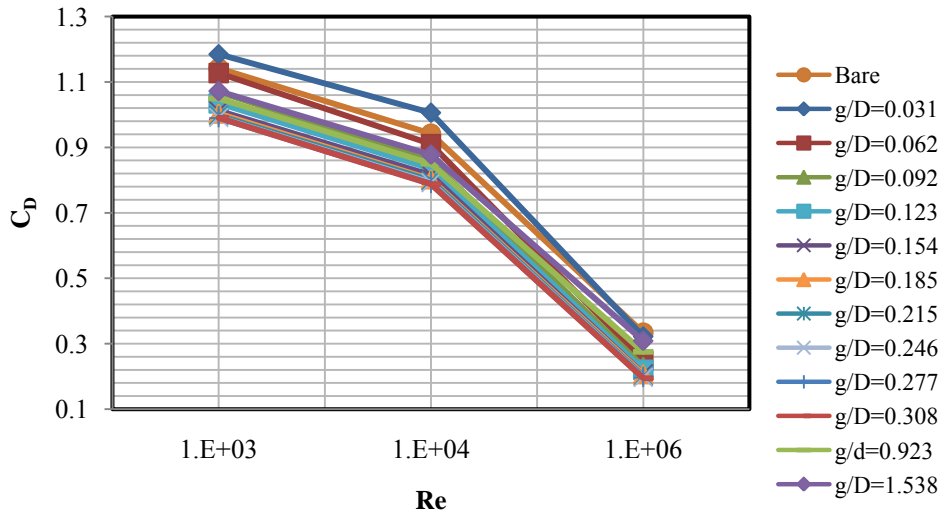
Konfigurasi *rods* dengan sudut datang aliran 0° dan 60° yang merupakan sudut datang aliran yang paling efektif dalam mereduksi C_D dan C_L akan digunakan sebagai analisis lebih lanjut untuk variasi *gap*. Selain itu dalam analisis variasi *gap* digunakan konfigurasi panjang *pitch* 30D yang terbukti paling efektif jika dibandingkan dengan konfigurasi panjang *pitch* 15D dan 10D. Hasil analisis untuk *gap* yang paling besar dalam mereduksi C_D dan C_L tersaji pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Koefisien *drag* dan *lift* untuk sudut datang aliran 0° dan *gap* 0.05 m

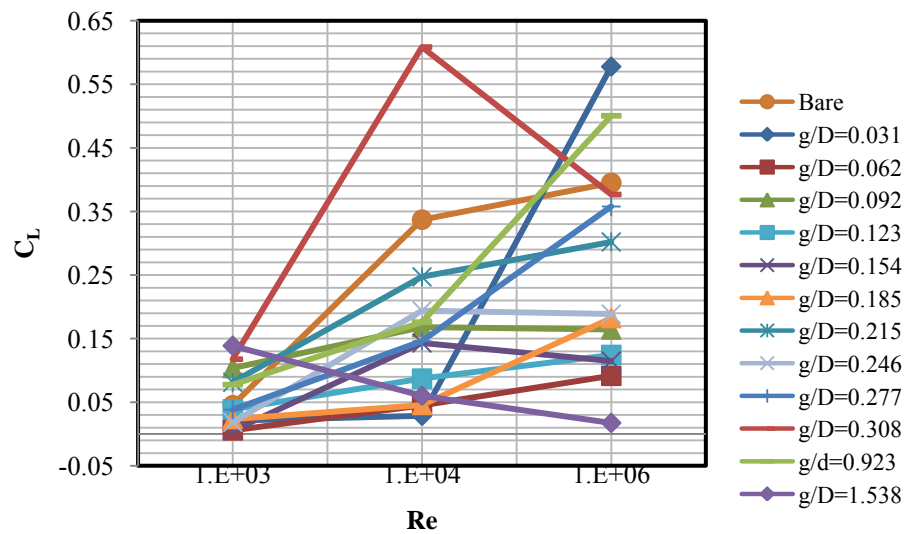
Sudut Datang	Re	Bare	Gap (m)	Rasio g/D	Koefisien			
					C_D	%	C_L	%
0°	10^3	0.04545	0.05	0.154	1.01228	11.34	0.00531	88.32
	10^4	0.33714	0.05	0.154	0.81578	13.41	0.14322	57.52
	10^6	0.39505	0.05	0.154	0.20830	37.59	0.11482	70.94

Konfigurasi *rods* yang mampu mereduksi gaya fluida terbaik adalah konfigurasi yang memiliki *gap* sebesar 0.05 m baik itu dari sudut datang aliran 0° maupun 60° . Konfigurasi tersebut mampu mereduksi C_D hingga 37.59 % dan C_L sebesar 88.32% pada sudut datang aliran 0° . Hasil analisis untuk variasi *gap* pada

sudut datang aliran 0° dapat diperoleh secara detail pada Lampiran B. Gambar 4.20 merupakan visualisasi untuk keseluruhan hasil analisis C_D dan C_L pada sudut datang aliran 0° .



(a)



(b)

Gambar 4.20 Grafik koefisien gaya fluida untuk semua variasi gap pada sudut datang aliran 0° (a) Koefisien *drag*; (b) Koefisien *lift*

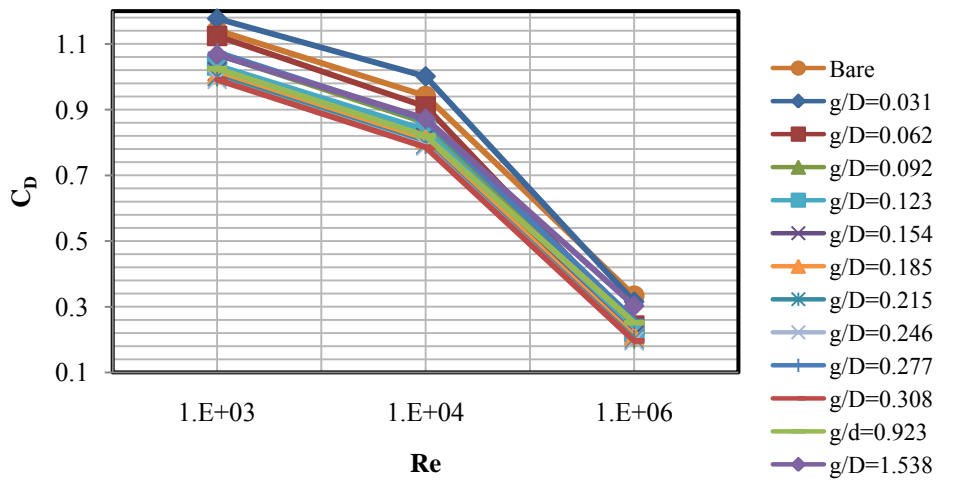
Gambar 4.20(a) menyajikan hasil C_D dalam berbagai variasi gap , hanya saja dalam *index* grafik, variasi gap disajikan dalam bentuk variasi rasio

gap-diameter silinder (rasio g/D). Dari grafik yang terdapat pada Gambar 4.20(a) dapat diketahui bahwasanya untuk rasio $g/D > 0.031$ menghasilkan C_D lebih besar dari C_D yang dihasilkan oleh *bare cylinder*. Secara sekilas dari Gambar 4.20(a) C_D berkurang dengan sangat signifikan pada rasio $g/D = 0.308$. Meski demikian, untuk menentukan rasio g/D yang paling baik tidak cukup hanya mempertimbangkan segi C_D saja, tetapi perlu juga untuk diketahui C_L yang dihasilkan. Gambar 4.20(b) menunjukkan untuk rasio $g/D = 0.308$, C_L yang dihasilkan melebihi nilai yang dihasilkan oleh *bare cylinder* pada $Re = 10^3$ dan 10^4 . Sedangkan untuk rasio $g/D > 0.154$ semua C_L yang dihasilkan bernilai di bawah *bare cylinder*. Untuk rasio g/D terbesar, yaitu 1.538, menghasilkan penambahan C_L paling besar pada $Re = 10^3$ jika dibandingkan rasio g/D lainnya.

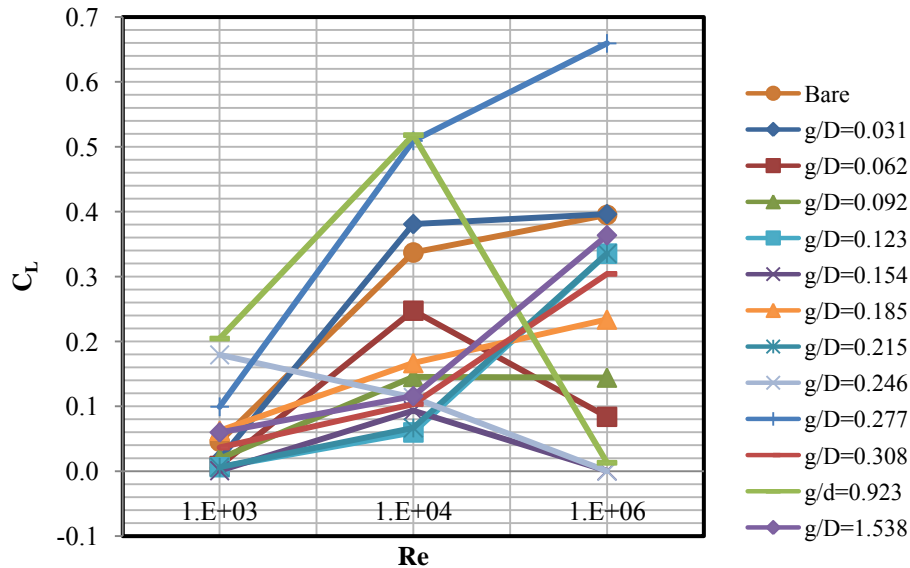
Tabel 4.18 Koefisien *drag* dan *lift* untuk sudut datang aliran 60° dan *gap* 0.05 m

Sudut Datang	Re	Bare	Gap (m)	Rasio g/D	Koefisien			
					C_D	%	C_L	%
60°	10^3	0.04545	0.05	0.154	1.01633	10.99	0.00094	97.94
	10^4	0.33714	0.05	0.154	0.81595	13.39	0.09336	72.31
	10^6	0.39505	0.05	0.154	0.21392	35.91	0.00069	99.83

Sudut datang aliran 60° dengan rasio $g/D = 0.154$ menghasilkan pengurangan C_D dan C_L terbesar pada $Re = 10^6$ berturut-turut adalah 35.91% dan 99.83% yang dapat dilihat pada Tabel 4.18. Untuk keseluruhan hasil variasi *gap* pada sudut datang aliran 60° dapat dilihat pada Gambar 4.21. Dari Gambar 4.21(a) dapat diketahui bahwa untuk rasio $g/D = 0.031$ menghasilkan C_D yang lebih besar dari C_D *bare cylinder* pada $Re = 10^3$ dan 10^4 . C_L yang terlihat pada Gambar 4.21(b) pada $Re = 10^3$ beberapa rasio g/D yang mengalami penambahan C_L yaitu rasio $g/D = 0.185, 0.246, 0.277, 0.923, \text{ dan } 1.538$. Pada $Re = 10^4$, C_L mengalami penambahan pada rasio $g/D = 0.031, 0.277, 0.923$. Rasio $g/D = 0.031$ dan 0.277 mengalami penambahan C_L pada $Re = 10^6$. Secara lebih detail untuk keseluruhan hasil yang diperoleh dari variasi *gap* pada sudut datang aliran 60° dapat dilihat di Lampiran B.



(a)

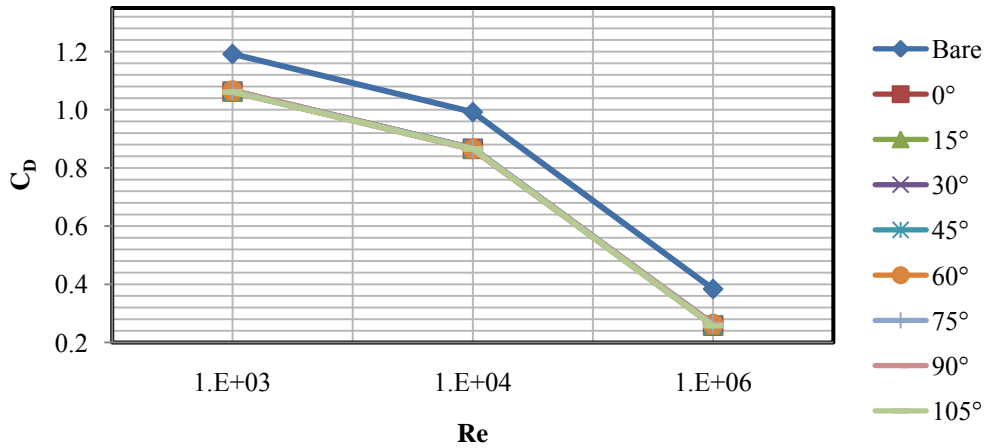


(b)

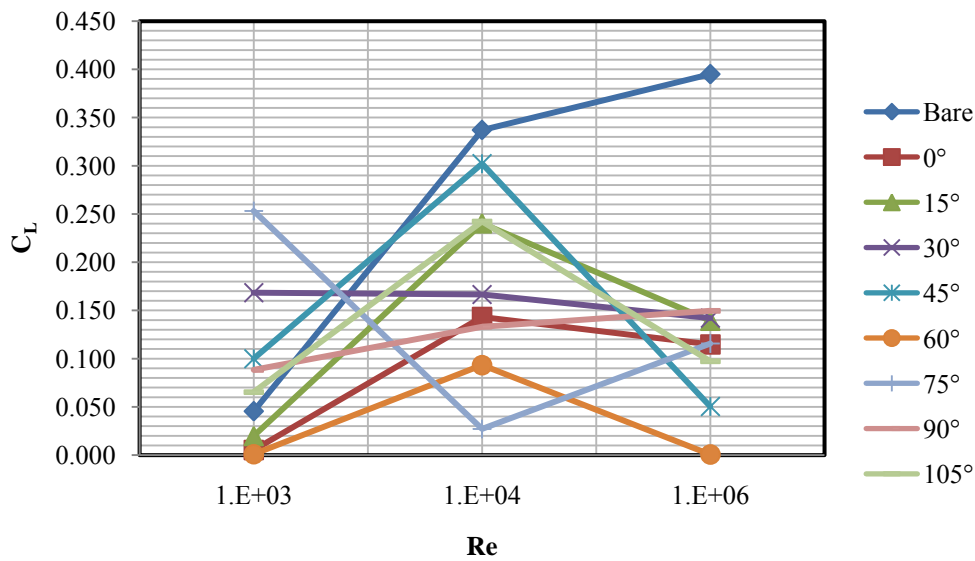
Gambar 4.21 Grafik koefisien gaya fluida untuk semua variasi *gap* pada sudut datang aliran 60° (a) Koefisien *drag*; (b) Koefisien *lift*

Sebagai pembuktian bahwa konfigurasi panjang *pitch* $30D$, rasio $g/D = 0.154$, dan sudut datang aliran 0° dan 60° merupakan hasil yang terbaik dalam mereduksi C_D dan C_L pada semua variasi Re , maka untuk konfigurasi tersebut dilakukan simulasi ulang untuk semua sudut datang aliran, hanya saja pada simulasi ini menggunakan rasio $g/D = 0.154$ dan panjang *pitch* $30D$ dengan variasi yang digunakan adalah sudut datang aliran dan Re , dimana

hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.22. Hal ini berbeda dengan simulasi yang telah dilakukan sebelumnya yang hasilnya telah disajikan pada Gambar 4.17. Perbedaannya terletak pada penggunaan rasio g/D , yang mana rasio g/D yang digunakan pada awal BAB 4.2 adalah 0.062.



(a)



(b)

Gambar 4.22 Grafik koefisien gaya fluida untuk semua variasi sudut datang aliran dengan rasio $g/D = 0.154$ (a) Koefisien *drag*; (b) Koefisien *lift*

Pada Gambar 4.22(a), C_D yang dihasilkan pada penggunaan rasio $g/D = 0.154$ dari semua sudut datang aliran adalah hampir sama. Perbedaan

akan jelas terlihat ketika melihat grafik pada Gambar 4.22(b), dimana pada grafik tersebut sudut datang aliran 0° dan 60° untuk silinder dengan *helical rods* ber-gap menghasilkan C_L yang jauh dibawah *bare cylinder*. Hasil dari semua variasi sudut datang aliran pada penggunaan rasio $g/D = 0.154$ dapat dilihat pada Lampiran B. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwasanya silinder dengan *helical rods* ber-gap akan mengalami reduksi C_D dan C_L terbesar pada konfigurasi panjang *pitch* $30D$, rasio $g/D = 0.154$, dan sudut datang aliran 0° dan 60° .

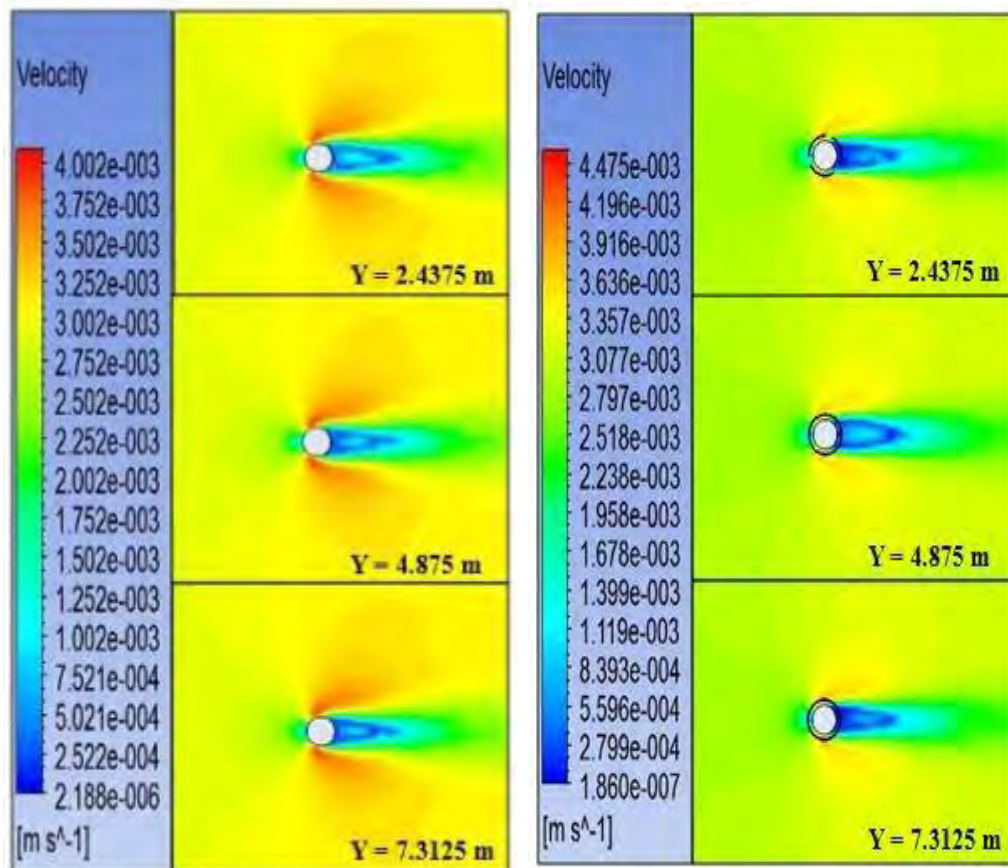
4.3 Analisis Pengaruh Pemasangan *Helical Rods* Ber-gap terhadap Pola Distribusi Kecepatan Partikel di Sekitar Silinder

Pada sub-bab ini akan dijelaskan perihal pengaruh pemasangan *helical rods* ber-gap terhadap pola distribusi kecepatan partikel yang terjadi di sekitar silinder. Tujuan dari analisis pola distribusi kecepatan partikel akibat pemasangan *helical rods* ber-gap adalah untuk mengetahui pengaruh yang ditimbulkan *helical rods* ber-gap terhadap bentuk dari aliran setelah melewati silinder dan juga untuk mengetahui kecepatan aliran sebelum dipasang *helical rods* ber-gap dan sesudahnya. Pola distribusi kecepatan partikel yang ditinjau pada penelitian ini adalah untuk silinder dengan *helical rods* ber-gap dengan konfigurasi terbaik dalam mereduksi C_D dan C_L yaitu konfigurasi *rods* akibat sudut datang aliran 0° dan 60° , panjang *pitch* $30D$, dan rasio $g/D = 0.154$. Pola distribusi kecepatan partikel akan divisualisasikan terbagi ke dalam tiga potongan tinggi silinder yang berbeda yaitu pada $Y = 2.4375$ m (atas), 4.875 m (tengah), dan 7.3125 m (bawah).

4.3.1 Pola Distribusi Kecepatan Partikel di Sekitar Silinder pada $Re = 10^3$

Kontur pola distribusi kecepatan partikel untuk $Re = 10^3$ pada *bare cylinder* dan juga silinder dengan *helical rods* ber-gap pada sudut datang aliran 0° tersaji pada Gambar 4.23. Pada gambar tersebut dijelaskan kontur pola distribusi kecepatan partikel pada tiga ketinggian silinder, dimana masing-masing ketinggian memiliki kontur pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder yang hampir sama. Penjelasan terkait Gambar 4.23 akan dimulai untuk $Y = 2.4375$ m yang merupakan bagian bawah dari model silinder. Pada ketinggian tersebut kecepatan partikel disamping atas dan bawah silinder cenderung lebih

tinggi yaitu berkisar antara 0.003 - 0.004 m/s. Hal tersebut dapat diketahui dari perbedaan kontur warna antara bagian atas, bawah, kanan dan kiri model silinder. Partikel fluida yang mengenai sisi muka atau kiri silinder memiliki kecepatan yang lebih kecil, dengan rentang 0.0017 - 0.0025 m/s. Sedangkan partikel fluida yang melewati silinder atau bagian kanan dari silinder memiliki kecepatan yang jauh lebih kecil berkisar antara 2.18×10^{-6} - 1×10^{-3} m/s. Jika dibandingkan dengan setelah dipasangkan *helical rods* ber-gap, nampak sekali penurunan kecepatan yang terjadi di sekitar silinder baik itu sisi muka, atas, bawah, dan belakang silinder. Hal tersebut dapat diketahui dari perbedaan kontur warna untuk silinder dengan *helical rods* ber-gap yang didominasi warna hijau muda.

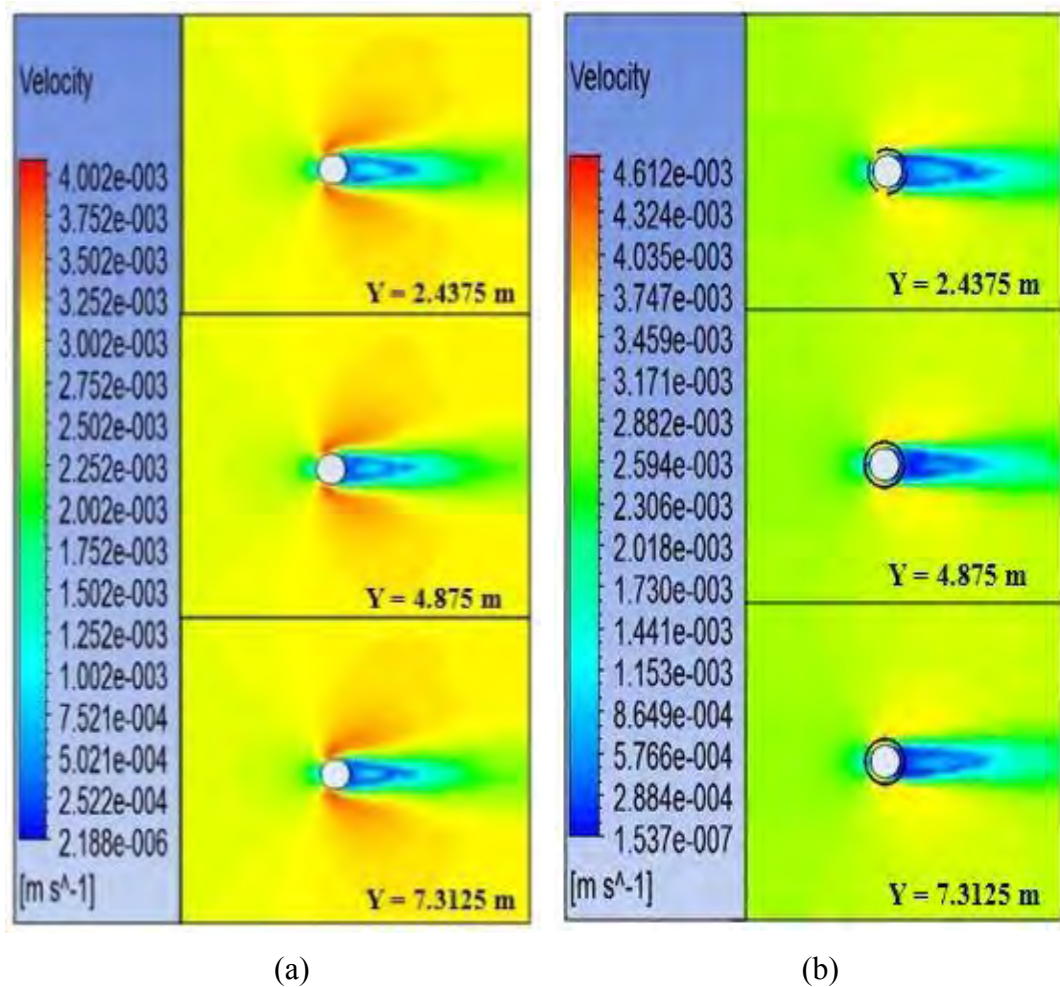


(a)

(b)

Gambar 4.23 Pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder untuk $Re = 10^3$ pada tiga elevasi silinder (a) *Bare cylinder*; (b) Silinder dengan *helical rods* ber-gap konfigurasi sudut datang aliran 0°

Perbedaan kecepatan dapat dilihat secara jelas ketika partikel fluida melewati silinder dengan *helical rods* ber-gap, dimana kecepatan partikel menurun cukup signifikan yaitu hanya sebesar 1.86×10^{-7} m/s. Dengan demikian, dapat diketahui bahwa dengan pemasangan *helical rods* ber-gap untuk konfigurasi sudut datang aliran 0° , rasio $g/D = 0.154$, dan panjang *pitch* $30D$ mampu mereduksi kecepatan partikel fluida yang mengenai silinder. Penurunan kecepatan partikel fluida akan berdampak pula kepada penurunan gaya fluida.



Gambar 4.24 Pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder untuk $Re = 10^3$ pada tiga elevasi silinder (a) *Bare cylinder*; (b) Silinder dengan *helical rods* ber-gap konfigurasi sudut datang aliran 60°

Selain konfigurasi *rods* akibat sudut datang aliran 0° dibandingkan pula pola distribusi kecepatan partikel di sekitar *bare cylinder* dan juga silinder dengan

helical rods ber-gap akibat sudut datang aliran 60° . Lebih jelasnya perbandingan antara *bare cylinder* dengan silinder dengan *helical rods* ber-gap dari sudut datang aliran 60° dapat dilihat pada Gambar 4.24.

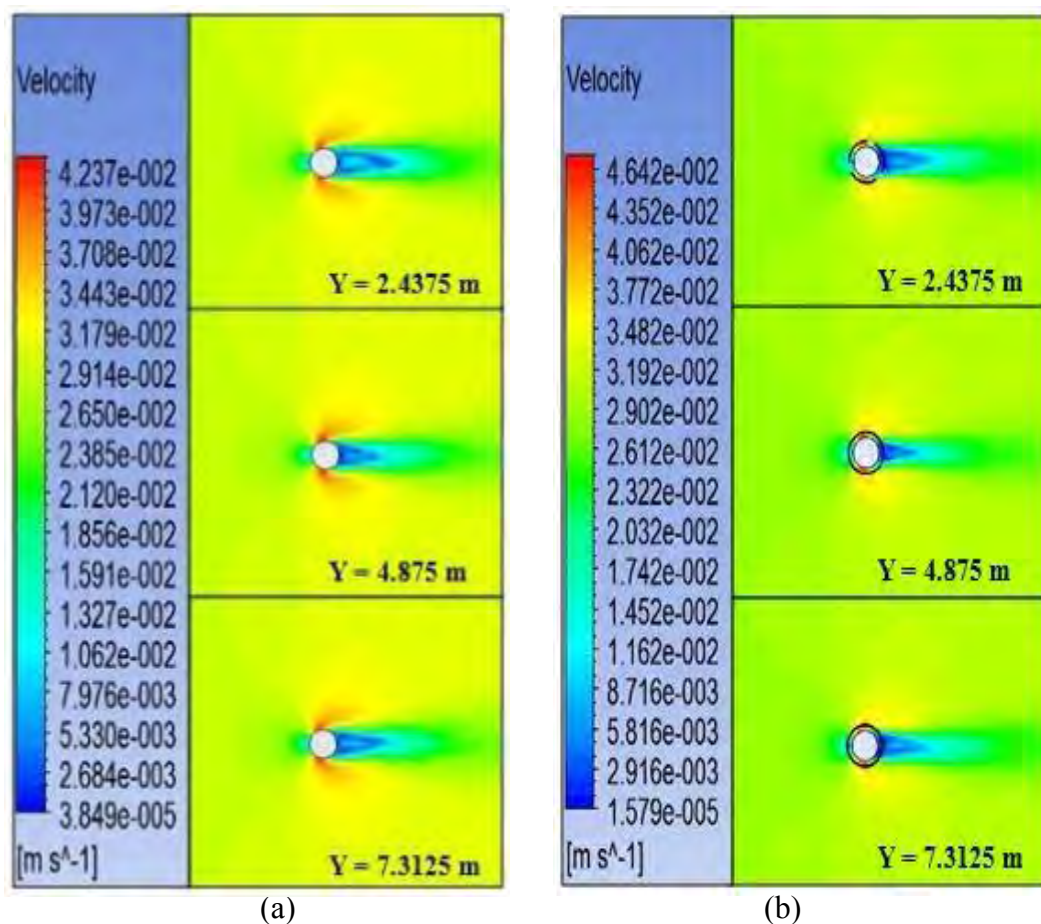
Perbedaan warna untuk kontur kecepatan pada silinder dengan *helical rods* ber-gap untuk konfigurasi sudut datang aliran 0° dan 60° tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Perbedaan antara konfigurasi sudut datang aliran antara 0° dan 60° adalah untuk sudut datang aliran 60° memiliki kecepatan partikel fluida yang melewati silinder dengan *helical rods* ber-gap bernilai lebih besar jika dibandingkan dengan sudut datang aliran 0° . Kecepatan partikel fluida yang melewati silinder dengan *helical rods* ber-gap dibagian belakang silinder berkisar antara $1.53 \times 10^{-7} - 2.31 \times 10^{-3}$ m/s. Kecepatan partikel fluida di tiga elevasi yang disajikan untuk sudut datang aliran 60° memiliki kontur warna yang hampir sama, hanya saja untuk kontur aliran warna biru/kecepatan rendah tampak lebih panjang jika dibandingkan dengan *bare cylinder*.

4.3.2 Pola Distribusi Kecepatan Partikel di Sekitar Silinder pada $Re = 10^4$

Pola distribusi kecepatan partikel untuk $Re = 10^4$ pada *bare cylinder* dan juga silinder dengan *helical rods* ber-gap dengan sudut datang aliran 0° dan 60° dapat dilihat pada Gambar 4.25 dan 4.26. Sama halnya dengan kecepatan partikel fluida di sekitar *bare cylinder* dengan $Re = 10^3$, untuk $Re = 10^4$ juga memiliki kontur warna kecepatan yang hampir sama. Perbedaan terjadi pada nilai kecepatan di sekitar silinder, partikel fluida yang menghantam sisi depan silinder memiliki nilai yang lebih kecil jika dibandingkan dengan partikel disisi atas dan bawah silinder. Kecepatan partikel fluida yang mengenai sisi depan silinder bernilai antara 0.021–0.0291 m/s, untuk sisi atas dan bawah bernilai 0.0318–0.0424 m/s, sedangkan untuk kecepatan partikel yang melewati silinder/bagian belakang silinder bernilai antara $3.85 \times 10^{-5} - 1.86 \times 10^{-2}$ m/s. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.25.

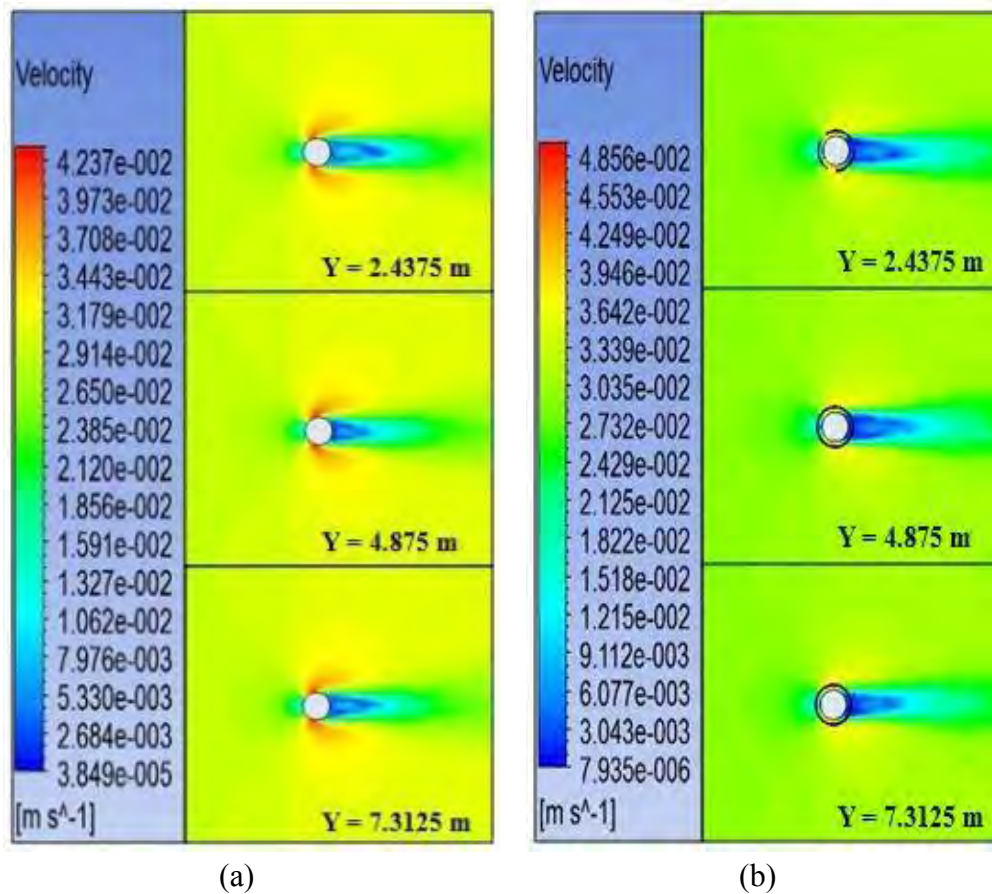
Perbandingan pola distribusi kecepatan partikel fluida antara *bare cylinder* dan silinder dengan *helical rods* ber-gap untuk konfigurasi *rods* akibat sudut datang aliran 0° memiliki perbedaan yang cukup mencolok apalagi terkait dengan nilai kecepatan partikel di sekitar silinder. Pemasangan *helical rods* berdampak

kepada pengurangan kecepatan di sekitar silinder, hal ini dapat diketahui dari kontur warna dari partikel fluida di sekitar silinder. Kecepatan partikel fluida di sekitar silinder dengan *helical rods* ber-*gap* di sisi muka, atas dan bawah silinder bernilai sekitar 0.02-0.032 m/s, sedangkan untuk partikel fluida yang melewati silinder dengan *helical rods* ber-*gap* kecepatan partikel fluida di belakang silinder bernilai antara $1.56 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-2}$ m/s. Penurunan kecepatan partikel fluida ketika silinder dipasang *helical rods* ber-*gap* mengindikasikan bahwasanya dengan adanya *helical rods* ber-*gap* akan mampu mereduksi efek yang dihasilkan oleh gaya fluida.



Gambar 4.25 Pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder untuk $Re = 10^4$ pada tiga elevasi silinder (a) *Bare cylinder*; (b) Silinder dengan *helical rods* ber-*gap* konfigurasi sudut datang aliran 0°

Pola distribusi kecepatan partikel yang dihasilkan dari silinder dengan *helical rods* ber-gap akibat sudut datang aliran 0° baik pada $Re = 10^3$ dan 10^4 memiliki nilai kecepatan rendah atau kontur berwarna biru yang lebih pendek jika dibandingkan dengan *helical rods* dari sudut datang aliran 60° . Hal tersebut kemungkinan besar diakibatkan karena perbedaan konfigurasi antara sudut datang aliran 0° dan 60° . Semakin pendek kontur warna kecepatan rendah, maka akan semakin besar gaya *drag* yang direduksi, namun apabila semakin panjang kontur warna kecepatan rendah maka akan semakin baik dalam mereduksi gaya *lift*. Hal tersebut dapat dibuktikan pada Lampiran B.



Gambar 4.26 Pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder untuk $Re = 10^4$ pada tiga elevasi silinder (a) *Bare cylinder*; (b) Silinder dengan *helical rods* ber-gap konfigurasi sudut datang aliran 60°

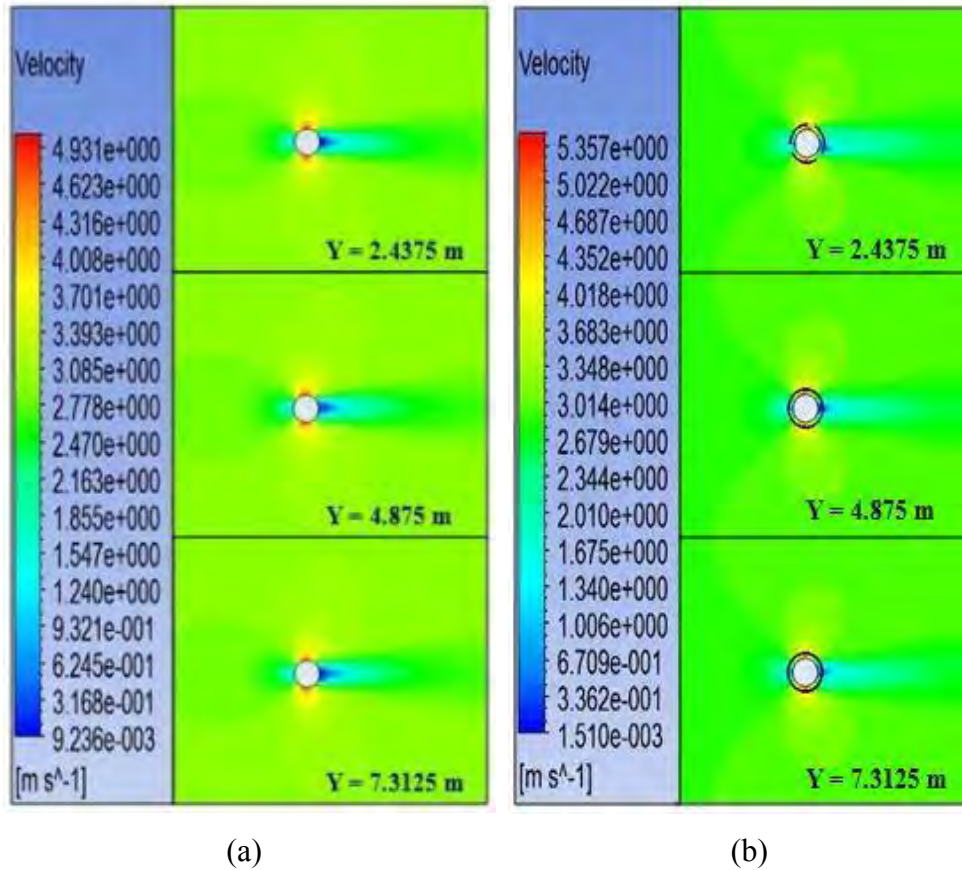
Perbandingan pola distribusi kecepatan partikel pada *bare cylinder* dan silinder dengan *helical rods* ber-gap akibat sudut datang aliran 60° dapat dilihat

pada Gambar 4.26. Penjelasan untuk pola distribusi kecepatan partikel fluida pada *bare cylinder* pada $Re = 10^4$ telah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya. Selanjutnya, pembahasan akan lebih difokuskan kepada pengaruh pemasangan *helical rods* ber-gap akibat sudut datang aliran 60° . Apabila diperhatikan dengan seksama Gambar 4.26(b) nilai kecepatan yang mengenai silinder dengan *helical rods* ber-gap untuk sudut datang aliran 60° mengalami penurunan jika dibandingkan dengan *rods* akibat sudut datang aliran 0° , khususnya untuk partikel fluida yang melewati silinder atau partikel fluida yang dibelakang silinder. Kecepatan partikel fluida di belakang silinder memiliki kisaran kecepatan antara $7.935 \times 10^{-6} - 2.125 \times 10^{-2}$ m/s. Untuk partikel fluida yang menabrak muka silinder, serta partikel fluida yang melawati sisi atas dan bawah silinder memiliki kecepatan antara 0.0243-0.0364 m/s. Kontur kecepatan partikel fluida berwarna biru yang terdapat di belakang silinder memiliki bentuk yang lebih panjang untuk *rods* akibat sudut datang aliran 60° jika dibandingkan dengan *rods* akibat sudut datang aliran 0° . Dengan demikian, untuk *helical rods* akibat sudut datang aliran 60° akan lebih baik dalam mereduksi gaya *lift*.

4.3.3 Pola Distribusi Kecepatan Partikel di Sekitar Silinder pada $Re = 10^6$

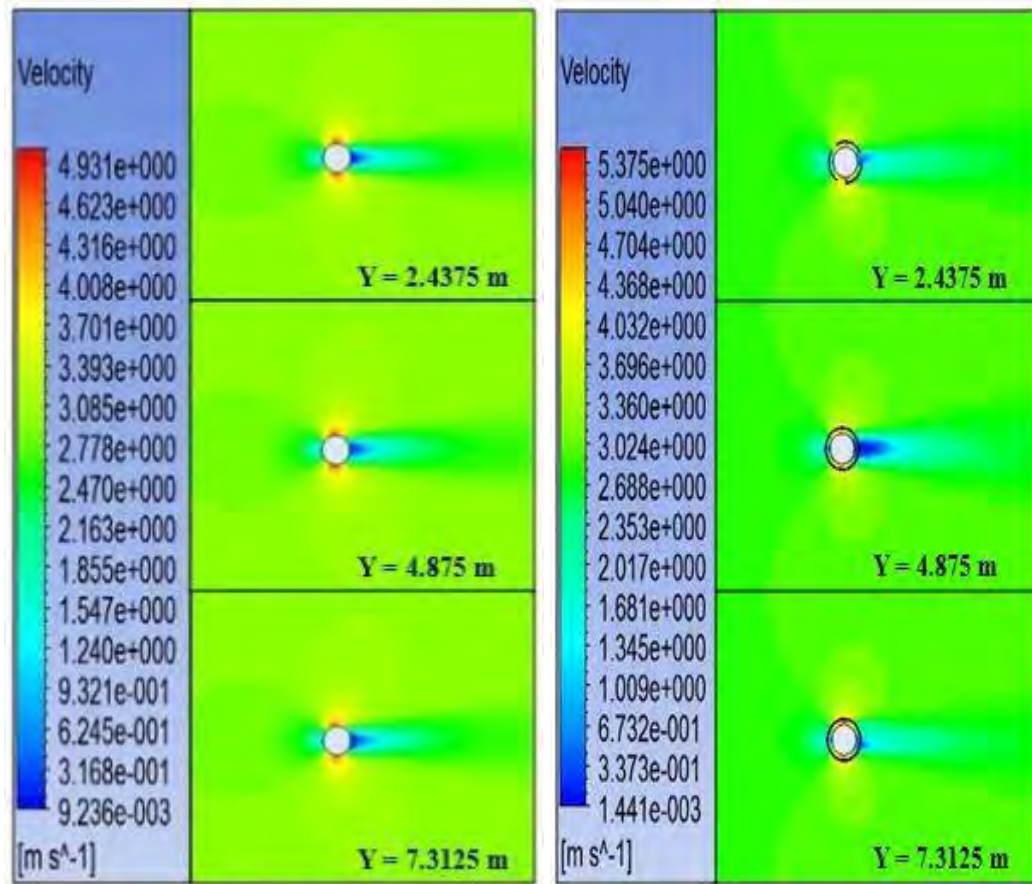
Pola distribusi kecepatan partikel untuk $Re = 10^6$ pada *bare cylinder* dan juga silinder dengan *helical rods* ber-gap untuk sudut datang aliran 0° tersaji pada Gambar 4.27. Jika diperhatikan secara seksama pada $Re = 10^6$ menghasilkan kecepatan partikel di sekitar silinder yang relatif lebih besar jika dibandingkan dengan $Re = 10^3$ dan 10^4 . Seperti yang tampak pada kontur warna pada Gambar 4.25, untuk kecepatan partikel fluida yang mengenai muka *bare cylinder* bernilai sekitar 2.16 – 3 m/s, untuk sisi atas dan bawah silinder kecepatan partikel fluida bernilai sekitar 3.7 – 4.3 m/s, kecepatan partikel fluida yang di belakang silinder bernilai sekitar 0.00924 – 2.47 m/s. Kecepatan partikel fluida di sekitar *bare cylinder* akan tereduksi ketika adanya penambahan *helical rods*. Seperti yang tampak pada Gambar 4.27(b), untuk kecepatan partikel fluida yang menabrak muka silinder dengan *helical rods* ber-gap akibat sudut datang aliran 0° bernilai hampir sama dengan *bare cylinder* yaitu sekitar 2.67 – 3 m/s, sedangkan untuk partikel fluida di sisi atas dan bawah silinder bernilai sekitar 4 - 4.3 m/s,

pengurangan cukup signifikan ketika melewati silinder dengan *helical rods* ber-*gap*, kecepatan di sisi belakang silinder berkisar antara 0.0015 – 1.675 m/s.



Gambar 4.27 Pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder untuk $Re = 10^6$ pada tiga elevasi silinder (a) *Bare cylinder*; (b) Silinder dengan *helical rods* ber-*gap* konfigurasi sudut datang aliran 0°

Kontur warna untuk kecepatan rendah yang melewati silinder dengan *helical rods* ber-*gap* yang diwakilkan dengan warna biru, terlihat lebih pendek jika dibandingkan dengan kondisi $Re = 10^3$ dan 10^4 . Hal tersebut berakibat pada silinder dengan *helical rods* ber-*gap* untuk $Re = 10^6$ dapat mengurangi gaya fluida yang paling besar jika dibandingkan dengan kedua Re sebelumnya, khususnya untuk gaya *drag*. Secara lebih detail untuk memastikan analisis peneliti terkait pengurangan gaya *drag* yang terjadi pada silinder dengan *helical rods* ber-*gap* dapat dilihat pada Tabel 4.17.



(a)

(b)

Gambar 4.28 Pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder untuk $Re = 10^6$ pada tiga elevasi silinder (a) *Bare cylinder*; (b) Silinder dengan *helical rods* ber-gap konfigurasi sudut datang aliran 60°

Pola distribusi kecepatan partikel yang melewati silinder dengan *helical rods* ber-gap untuk sudut datang aliran 60° dapat dilihat pada Gambar 4.28. Apabila diperhatikan sekilas untuk partikel fluida di sekitar silinder, khususnya yang mengenai sisi muka, sisi atas, dan bawah silinder tidak mengalami perbedaan yang signifikan jika dibandingkan dengan kecepatan partikel fluida yang terjadi di sekitar silinder dengan *helical rods* ber-gap akibat sudut datang aliran 0° . Perbedaan terjadi untuk kecepatan partikel fluida di belakang silinder dengan *helical rods* ber-gap, konfigurasi *rods* akibat sudut datang aliran 60° menghasilkan pola distribusi kecepatan yang berbeda di setiap elevasinya. Seperti yang tampak pada Gambar 4.28(b), untuk elevasi 4.875 m atau di tengah silinder menghasilkan kontur kecepatan rendah berwarna biru yang lebih panjang jika

dibandingkan dengan elevasi 2.4375 m atau 7.3125 m. Menurut peneliti hal tersebut terjadi karena pada Re tinggi, kecepatan partikel fluida otomatis juga akan lebih tinggi, kecepatan yang lebih tinggi pada elevasi atas dan bawah silinder tidak memberi pengaruh cukup signifikan terhadap pengurangan kecepatan aliran. Apabila dianalisis model silinder dengan *helical rods* ber-gap untuk bagian atas dan bawah tidak terpengaruh secara signifikan dengan *rods* lainnya, hal ini berbeda dengan *rods* bagian tengah yang masih mendapat pengaruh dari bagian atas dan bawah secara signifikan.

Seperti yang dijelaskan pada paragraf sebelumnya, kontur warna biru di belakang silinder dengan *helical rods* ber-gap memiliki bentuk yang lebih panjang untuk elevasi di tengah silinder, sedangkan untuk bagian atas dan bawah silinder memiliki panjang kontur warna biru yang lebih pendek. Apabila dibandingkan dengan silinder dengan *helical rods* ber-gap akibat sudut datang aliran 0° kontur warna biru untuk sudut datang aliran 60° masih lebih panjang dan apabila dikaitkan dengan hasil yang diperoleh pada Tabel 4.17 dan 4.18, maka akan tampak bahwa dengan semakin panjangnya pola distribusi kecepatan partikel fluida berkecepatan rendah atau kontur berwarna biru, maka akan mengurangi gaya *drag* lebih kecil, sedangkan pengurangan gaya *lift* akan cukup besar.

Dengan demikian, dapat diketahui bahwa dengan adanya pemasangan *helical rods* ber-gap untuk semua variasi Re akan menyebabkan pengurangan kecepatan partikel fluida di sekitar silinder. Berkurangnya kecepatan partikel fluida di sekitar silinder dengan *helical rods* ber-gap menunjukkan bahwa secara tidak langsung *helical rods* ber-gap juga akan mengurangi gaya fluida yang bekerja pada silinder. Perbedaan antara pengurangan gaya fluida untuk semua variasi Re pada silinder dengan *helical rods* ber-gap terletak kepada panjangnya kontur warna biru atau pola distribusi kecepatan rendah khususnya di bagian tengah, dimana jika kontur partikel fluida warna biru berukuran panjang, maka gaya *lift* yang tereduksi relatif besar. Hal tersebut terjadi pada silinder dengan *helical rods* ber-gap dengan sudut datang aliran 60° . Jika aliran dengan kontur warna biru berukuran pendek, maka gaya *drag* yang tereduksi relatif besar. Hal tersebut terjadi kepada silinder dengan *helical rods* ber-gap dengan sudut datang aliran 0° .

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Pada bab ini akan disajikan perihal rangkuman hasil simulasi numerik terkait dengan pengaruh pemasangan *helical rods* ber-gap pada silinder *rigid* terhadap pengurangan gaya fluida dan pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder. Berikut ini adalah kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini:

1. Hasil simulasi CFD untuk silinder *rigid* dengan diameter 0.325 m dan diameter *rods* 0.02 m menunjukkan bahwa konfigurasi *helical rods* ber-gap yang menghasilkan reduksi gaya *drag* dan *lift* terbaik adalah konfigurasi dengan sudut datang aliran 0° dan 60° yang memiliki panjang *pitch* 30D dan rasio $g/D = 0.154$ ($g = 0.05$ m). Untuk sudut datang aliran 0° mampu mereduksi C_D sebesar 37.59% pada $Re = 10^6$ dan mereduksi C_L sebesar 88.32% pada $Re = 10^3$. Sedangkan untuk sudut datang aliran 60° , konfigurasi tersebut mampu mereduksi C_D sebesar 35.91% dan C_L sebesar 99.83% pada $Re = 10^6$.
2. Konfigurasi silinder dengan *helical rods* ber-gap yang memiliki panjang *pitch* 30D, rasio $g/D = 0.154$ dan sudut datang aliran 0° dan 60° merupakan konfigurasi yang mampu mereduksi gaya fluida terbesar. Konfigurasi pemasangan *helical rods* tersebut digunakan dalam analisis pola distribusi kecepatan partikel di sekitar silinder. Apabila dilihat dari hasil simulasi kontur pola distribusi kecepatan partikel yang terjadi, adanya pemasangan *helical rods* ber-gap pada semua variasi Re akan menyebabkan pengurangan kecepatan partikel di sekitar silinder. Berkurangnya kecepatan partikel tersebut menunjukkan bahwa secara tidak langsung *helical rods* ber-gap juga akan mengurangi gaya fluida yang bekerja pada silinder.

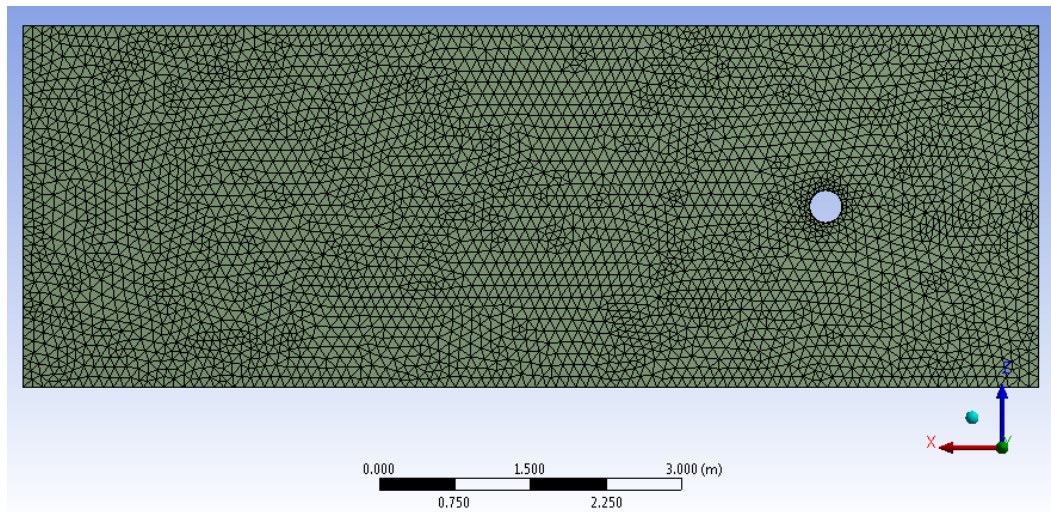
5.2 Saran

Saran yang bisa disampaikan penulis untuk penelitian berikutnya adalah sebagai berikut:

1. Meskipun dari hasil penelitian dengan *single bare cylinder* keberadaan *helical rods* ber-gap cukup baik dalam mereduksi gaya fluida, namun hasil tersebut masih perlu dibuktikan lagi dengan pemasangan *helical rods* ber-gap dalam konfigurasi silinder tandem atau *side by side*.
2. Untuk memperkuat analisis simulasi pada penelitian *helical rods* ber-gap. Para peneliti harus lebih cermat dalam mempelajari setiap *input* yang terdapat pada perangkat lunak CFD, khususnya untuk proses *meshing* dan pemilihan turbulensi.

VISUALISASI MESHING

1. Meshing bare silinder beserta ukurannya

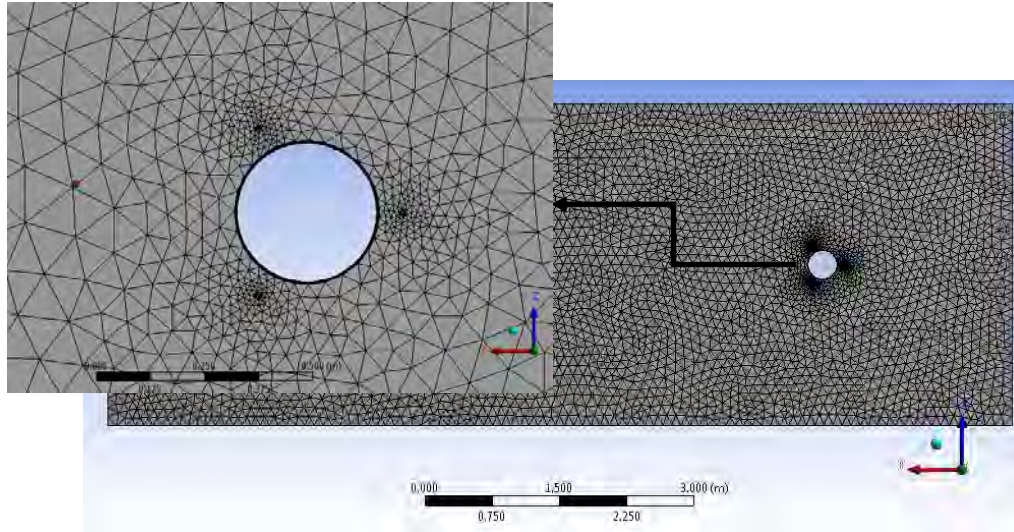


Gambar Lampiran 1. Meshing *bare* silinder

Tabel Lampiran 1. Ukuran *meshing bare* silinder

Keterangan	Ukuran
<i>Minimum size</i>	0.011125 m
<i>Maximum face size</i>	0.1 m
<i>Max size</i>	0.8225 m
<i>Number of layers</i>	5
<i>Growth Rate</i>	1.2
<i>Maximum thickness</i>	0.005 m
<i>Fluida</i>	<i>Tetrahedron</i>
Jumlah elemen	1.128.101

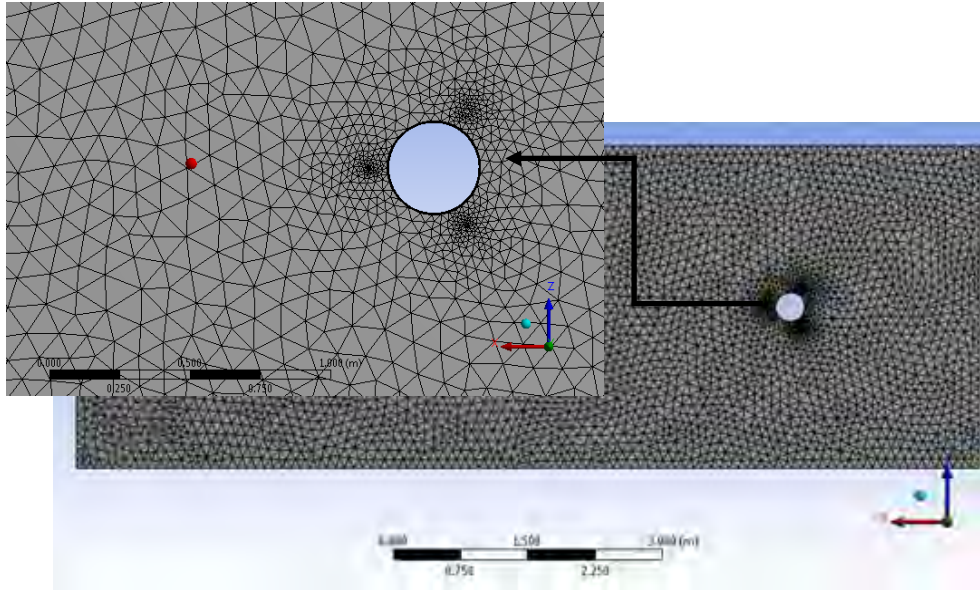
2. Meshing silinder dengan *helical rods* ber-gap



Gambar Lampiran 2. Meshing silinder dengan *helical rods* ber-gap akibat sudut datang aliran 0°

Tabel Lampiran 2. Ukuran *meshing* silinder dengan *helical rods* ber-gap akibat sudut datang aliran 0°

Keterangan	Ukuran
<i>Minimum size</i>	0.011125 m
<i>Maximum face size</i>	0.1 m
<i>Max size</i>	0.8225 m
<i>Number of layers</i>	5
<i>Growth Rate</i>	1.2
<i>Maximum thickness</i>	0.005 m
<i>Fluida</i>	<i>Tetrahedron</i>
Jumlah elemen	2.527.338



Gambar Lampiran 3. Meshing silinder dengan *helical rods* ber-gap akibat sudut datang aliran 60°

Tabel Lampiran 3. Ukuran *meshing* silinder dengan *helical rods* ber-gap akibat sudut datang aliran 60°

Keterangan	Ukuran
<i>Minimum size</i>	0.011125 m
<i>Maximum face size</i>	0.1 m
<i>Max size</i>	0.8225 m
<i>Number of layers</i>	5
<i>Growth Rate</i>	1.2
<i>Maximum thickness</i>	0.005 m
<i>Fluida</i>	<i>Tetrahedron</i>
Jumlah elemen	2.570.991

halaman ini sengaja dikosongkan

VARIASI SUDUT DATANG ALIRAN

Tabel Lampiran 4. Koefisien *drag* yang dihasilkan antara *bare cylinder* dan silinder dengan *helical rods* ber-gap untuk variasi sudut datang aliran

Sudut Datang	Panjang Pitch	Gap (m)	C _D								
			Re = 10 ³			Re = 10 ⁴			Re = 10 ⁶		
			Bare	Helix	%	Bare	Helix	%	Bare	Helix	%
0°	30D	0.02	1.14176	1.12725	1.27	0.94210	0.91045	3.36	0.33377	0.24804	25.68
15°	30D	0.02		1.12511	1.46		0.90473	3.97		0.24669	26.09
30°	30D	0.02		1.12656	1.33		0.91147	3.25		0.25107	24.78
45°	30D	0.02		1.12263	1.68		0.90640	3.79		0.24916	25.35
60°	30D	0.02		1.12435	1.52		0.90955	3.46		0.24252	27.34
75°	30D	0.02		1.12741	1.26		0.91460	2.92		0.24919	25.34
90°	30D	0.02		1.12652	1.33		0.91283	3.11		0.25077	24.87
105°	30D	0.02		1.12729	1.27		0.90611	3.82		0.25164	24.60

Keterangan: (+) C_D mengalami pengurangan
 (-) C_D mengalami penambahan

Tabel Lampiran 5. Koefisien *lift* yang dihasilkan antara *bare cylinder* dan silinder dengan *helical rods* ber-gap untuk variasi sudut datang aliran

Sudut Datang	Panjang Pitch	Gap (m)	C_L								
			$Re = 10^3$			$Re = 10^4$			$Re = 10^6$		
			<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%	<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%	<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%
0°	30D	0.02	0.04545	0.00572	87.41	0.33714	0.04502	86.65	0.39505	0.09155	76.83
15°	30D	0.02		0.05832	-28.30		0.03542	89.49		0.00590	98.51
30°	30D	0.02		0.04255	6.39		0.20908	37.98		0.32093	18.76
45°	30D	0.02		0.18452	-305.95		0.23042	31.66		0.11161	71.75
60°	30D	0.02		0.00811	82.17		0.24746	26.60		0.08394	78.75
75°	30D	0.02		0.09118	-100.60		0.23780	29.47		0.21009	46.82
90°	30D	0.02		0.21258	-367.67		0.20038	40.57		0.03304	91.64
105°	30D	0.02		0.01850	59.29		0.02573	92.37		0.02591	93.44

Keterangan: (+) C_L mengalami pengurangan
 (-) C_L mengalami penambahan

VARIASI PANJANG *PITCH*

Tabel Lampiran 6. Koefisien *drag* yang dihasilkan antara *bare cylinder* dan silinder dengan *helical rods* ber-gap pada sudut datang aliran 0° untuk variasi panjang *pitch*

Sudut Datang	Jumlah Pitch	Gap (m)	C_D								
			$Re = 10^3$			$Re = 10^4$			$Re = 10^6$		
			<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%	<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%	<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%
0°	30D	0.02	1.14176	1.12725	1.27	0.94210	0.91045	3.36	0.33377	0.24804	25.68
0°	15D	0.02		1.1788	-3.24		0.9405	0.17		0.3704	-10.98
0°	10D	0.02		1.1826	-3.58		0.9345	0.81		0.386	-15.66

Keterangan: (+) C_D mengalami pengurangan
 (-) C_D mengalami penambahan

Tabel Lampiran 7. Koefisien *lift* yang dihasilkan antara *bare cylinder* dan silinder dengan *helical rods* ber-gap pada sudut datang aliran 0° untuk variasi panjang *pitch*

Sudut Datang	Jumlah Pitch	Gap (m)	C_L								
			$Re = 10^3$			$Re = 10^4$			$Re = 10^6$		
			<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%	<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%	<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%
0°	30D	0.02	0.04545	0.00572	87.41	0.33714	0.04502	86.65	0.39505	0.09155	76.83
0°	15D	0.02		0.0254056	44.11		0.03763	88.84		0.0601827	84.77
0°	10D	0.02		0.0703439	-54.76		0.1165	65.44		0.0847208	78.55

Keterangan: (+) C_L mengalami pengurangan
 (-) C_L mengalami penambahan

Tabel Lampiran 8. Koefisien *drag* yang dihasilkan antara *bare cylinder* dan silinder dengan *helical rods* ber-gap pada sudut datang aliran 60° untuk variasi panjang *pitch*

Sudut Datang	Jumlah Pitch	Gap (m)	C_D								
			$Re = 10^3$			$Re = 10^4$			$Re = 10^6$		
			<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%	<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%	<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%
60°	30D	0.02	1.14176	1.12435	1.52	0.94210	0.90955	3.46	0.33377	0.24252	27.34
60°	15D	0.02		1.12994	1.04		0.90821	3.60		0.24113	27.75
60°	10D	0.02		1.17522	-2.93		0.93610	0.64		0.38351	-14.90

Keterangan: (+) C_D mengalami pengurangan
 (-) C_D mengalami penambahan

Tabel Lampiran 9. Koefisien *lift* yang dihasilkan antara *bare cylinder* dan silinder dengan *helical rods* ber-gap pada sudut datang aliran 60° untuk variasi panjang *pitch*

Sudut Datang	Jumlah Pitch	Gap (m)	C_L								
			$Re = 10^3$			$Re = 10^4$			$Re = 10^6$		
			<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%	<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%	<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%
60°	30D	0.02	0.04545	0.00811	82.17	0.33714	0.24746	26.60	0.39505	0.08394	78.75
60°	15D	0.02		0.21612	-375.47		0.31359	6.98		0.19386	50.93
60°	10D	0.02		0.30815	-577.92		0.03125	90.73		0.08315	78.95

Keterangan: (+) C_L mengalami pengurangan
 (-) C_L mengalami penambahan

VARIASI GAP

Tabel Lampiran 10. Koefisien *drag* yang dihasilkan antara *bare cylinder* dan silinder dengan *helical rods* ber-gap pada sudut datang aliran 0° untuk variasi *gap*

Sudut Datang	Panjang Pitch	Gap (m)	Rasio g/D	C _D								
				Re = 10 ³			Re = 10 ⁴			Re = 10 ⁶		
				Bare	Helix	%	Bare	Helix	%	Bare	Helix	%
0°	30D	0.01	0.031	1.14176	1.18495	-3.78	0.94210	1.00605	-6.79	0.33377	0.32231	3.43
0°	30D	0.02	0.062		1.12725	1.27		0.91045	3.36		0.24804	25.68
0°	30D	0.03	0.092		1.06943	6.33		0.85981	8.74		0.22985	31.13
0°	30D	0.04	0.123		1.0348	9.36		0.8353	11.34		0.22039	33.97
0°	30D	0.05	0.154		1.01228	11.34		0.81578	13.41		0.20830	37.59
0°	30D	0.06	0.185		1.0035	12.11		0.8027	14.79		0.20705	37.97
0°	30D	0.07	0.215		0.99769	12.62		0.79871	15.22		0.20173	39.56
0°	30D	0.08	0.246		0.9921	13.11		0.7925	15.88		0.19794	40.70
0°	30D	0.09	0.277		0.99021	13.27		0.78929	16.22		0.19642	41.15
0°	30D	0.1	0.308		0.99048	13.25		0.78764	16.40		0.19464	41.68
0°	30D	0.3	0.923		1.04965	8.07		0.85010	9.77		0.27518	17.55
0°	30D	0.5	1.538		1.07199	6.11		0.87775	6.83		0.30872	7.50

Keterangan: (+) C_D mengalami pengurangan
 (-) C_D mengalami penambahan

Tabel Lampiran 11. Koefisien *lift* yang dihasilkan antara *bare cylinder* dan silinder dengan *helical rods* ber-gap pada sudut datang aliran 0° untuk variasi *gap*

Sudut Datang	Panjang Pitch	Gap (m)	Rasio g/D	C _L								
				Re = 10 ³			Re = 10 ⁴			Re = 10 ⁶		
				Bare	Helix	%	Bare	Helix	%	Bare	Helix	%
0°	30D	0.01	0.031	0.04545	0.02124	53.27	0.33714	0.02860	91.52	0.39505	0.57789	-46.28
0°	30D	0.02	0.062		0.00572	87.41		0.04502	86.65		0.09155	76.83
0°	30D	0.03	0.092		0.10369	-128.12		0.16808	50.14		0.16433	58.40
0°	30D	0.04	0.123		0.03878	14.69		0.08721	74.13		0.12445	68.50
0°	30D	0.05	0.154		0.00531	88.32		0.14322	57.52		0.11482	70.94
0°	30D	0.06	0.185		0.02348	48.34		0.04564	86.46		0.18226	53.86
0°	30D	0.07	0.215		0.08145	-79.18		0.24734	26.64		0.30210	23.53
0°	30D	0.08	0.246		0.01844	59.44		0.19396	42.47		0.188679	52.24
0°	30D	0.09	0.277		0.03834	15.65		0.14617	56.64		0.35782	9.42
0°	30D	0.1	0.308		0.11771	-158.97		0.60865	-80.53		0.37659	4.67
0°	30D	0.3	0.923		0.07754	-70.58		0.17593	47.82		0.50056	-26.71
0°	30D	0.5	1.538		0.13871	-205.16		0.06012	82.17		0.01735	95.61

Keterangan: (+) C_L mengalami pengurangan
 (-) C_L mengalami penambahan

Tabel Lampiran 12. Koefisien *drag* yang dihasilkan antara *bare cylinder* dan silinder dengan *helical rods* ber-gap pada sudut datang aliran 60° untuk variasi *gap*

Sudut Datang	Panjang Pitch	Gap (m)	Rasio g/D	C _D								
				Re = 10 ³			Re = 10 ⁴			Re = 10 ⁶		
				Bare	Helix	%	Bare	Helix	%	Bare	Helix	%
60°	30D	0.01	0.031	1.14176	1.17738	-3.12	0.94210	1.00112	-6.26	0.33377	0.31544	5.49
60°	30D	0.02	0.062		1.1243	1.52		0.9096	3.46		0.24252	27.34
60°	30D	0.03	0.092		1.06939	6.34		0.86100	8.61		0.23437	29.78
60°	30D	0.04	0.123		1.0343	9.41		0.8377	11.08		0.22228	33.40
60°	30D	0.05	0.154		1.01633	10.99		0.81595	13.39		0.21392	35.91
60°	30D	0.06	0.185		1.0079	11.72		0.8104	13.98		0.21019	37.02
60°	30D	0.07	0.215		0.99965	12.45		0.79410	15.71		0.20085	39.82
60°	30D	0.08	0.246		0.9917	13.14		0.7888	16.27		0.19638	41.16
60°	30D	0.09	0.277		1.07454	5.89		0.86856	7.81		0.26072	21.89
60°	30D	0.1	0.308		0.99131	13.18		0.78572	16.60		0.19595	41.29
60°	30D	0.3	0.923		1.02487	10.24		0.82012	12.95		0.25149	24.65
60°	30D	0.5	1.538		1.06751	6.50		0.87296	7.34		0.30262	9.33

Keterangan: (+) C_D mengalami pengurangan
 (-) C_D mengalami penambahan

Tabel Lampiran 13. Koefisien *lift* yang dihasilkan antara *bare cylinder* dan silinder dengan *helical rods* ber-gap pada sudut datang aliran 60° untuk variasi *gap*

Sudut Datang	Panjang Pitch	Gap (m)	Rasio g/D	C _L								
				Re = 10 ³			Re = 10 ⁴			Re = 10 ⁶		
				<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%	<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%	<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%
60°	30D	0.01	0.031	0.04545	0.01823	59.89	0.33714	0.38092	-12.99	0.39505	0.39615	-0.28
60°	30D	0.02	0.062		0.00811	82.17		0.24746	26.60		0.08394	78.75
60°	30D	0.03	0.092		0.01935	57.42		0.14530	56.90		0.14437	63.45
60°	30D	0.04	0.123		0.00621	86.34		0.05983	82.25		0.33545	15.09
60°	30D	0.05	0.154		0.00094	97.94		0.09336	72.31		0.00069	99.83
60°	30D	0.06	0.185		0.06247	-37.44		0.16674	50.54		0.233852	40.80
60°	30D	0.07	0.215		0.00613	86.52		0.06675	80.20		0.33554	15.06
60°	30D	0.08	0.246		0.17935	-294.57		0.11366	66.29		0.0000107	100.00
60°	30D	0.09	0.277		0.09929	-118.45		0.50923	-51.04		0.65949	-66.94
60°	30D	0.1	0.308		0.03655	19.60		0.10352	69.30		0.30412	23.02
60°	30D	0.3	0.923		0.20455	-350.00		0.51812	-53.68		0.01315	96.67
60°	30D	0.5	1.538		0.05979	-31.53		0.11571	65.68		0.36350	7.99

Keterangan: (+) C_L mengalami pengurangan
 (-) C_L mengalami penambahan

KONFIGURASI YANG MAMPU MEREDUKSI GAYA FLUIDA TERBESAR

Dari keseluruhan hasil simulasi disimpulkan bahwasanya silinder dengan *helical rods* ber-gap akan mengalami reduksi C_D dan C_L terbesar pada konfigurasi panjang *pitch* 30D, rasio $g/D = 0.154$, yang tampak pada Tabel Lampiran 14 dan Tabel Lampiran 15.

Tabel Lampiran 14. Hasil simulasi yang mampu mereduksi C_D terbesar dengan adanya pemasangan *helical rods* ber-gap pada silinder untuk variasi sudut datang aliran

Sudut Datang	Panjang Pitch	Rasio (g/D)	C_D								
			$Re = 10^3$			$Re = 10^4$			$Re = 10^6$		
			<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%	<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%	<i>Bare</i>	<i>Helix</i>	%
0°	30D	0.154	1.14176	1.01228	11.34	0.94210	0.81578	13.41	0.33377	0.20830	37.59
15°	30D	0.154		1.01345	11.24		0.81788	13.19		0.21194	36.50
30°	30D	0.154		1.01485	11.12		0.81809	13.16		0.21131	36.69
45°	30D	0.154		1.01334	11.25		0.81652	13.33		0.21214	36.44
60°	30D	0.154		1.01633	10.99		0.81595	13.39		0.21392	35.91
75°	30D	0.154		1.01472	11.13		0.81630	13.35		0.21411	35.85
90°	30D	0.154		1.01260	11.31		0.81349	13.65		0.21212	36.45
105°	30D	0.154		1.01097	11.45		0.81569	13.42		0.20780	37.74

Keterangan: (+) C_D mengalami pengurangan
 (-) C_D mengalami penambahan

Tabel Lampiran 15. Hasil simulasi yang mampu mereduksi C_L terbesar dengan adanya pemasangan *helical rods* ber-gap pada silinder untuk variasi sudut datang aliran

Sudut Datang	Panjang Pitch	Rasio (g/D)	C_L								
			$Re = 10^3$			$Re = 10^4$			$Re = 10^6$		
			Bare	Helix	%	Bare	Helix	%	Bare	Helix	%
0°	30D	0.154	0.04545	0.0053079	88.32	0.33714	0.14322	57.52	0.39505	0.1148180	70.94
15°	30D	0.154		0.0198565	56.32		0.24034	28.71		0.1393594	64.72
30°	30D	0.154		0.1684661	-270.62		0.16658	50.59		0.1420890	64.03
45°	30D	0.154		0.1000471	-120.10		0.30231	10.33		0.0504598	87.23
60°	30D	0.154		0.0009352	97.94		0.09336	72.31		0.0006851	99.83
75°	30D	0.154		0.2532204	-457.08		0.02717	91.94		0.1157278	70.71
90°	30D	0.154		0.0884308	-94.55		0.13311	60.52		0.1496203	62.13
105°	30D	0.154		0.0653160	-43.69		0.24226	28.14		0.0973250	75.36

Keterangan: (+) C_L mengalami pengurangan
 (-) C_L mengalami penambahan

DAFTAR PUSTAKA

- Alam, M. M., Sakamoto, H. Dan Moriya, M., 2003, Suppression of Fluid Forces Acting on Two Square Prisms in Tandem Arrangement by Passive Control of Flow, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 16, No. 8: 1073-1092.
- ANSYS, 2012, *ANSYS CFX Theory Guide*, ANSYS, Inc. Canonsburg, USA.
- Arianti, E., 2014, *Studi Eksperimental dan Numerik Pengaruh Penambahan Helical Rod Ber-Gap terhadap Gaya Fluida pada Silinder Rigid Tertumpu Fleksibel*, Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Asyikin, M. T., 2012, *CFD Simulation of Vortex Induced Vibration of a Cylindrical Structure*, Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- Beu, M. M. Z., 2013, *Studi Numerik Pengaruh Bentuk Passive Control Device berupa Rods Bergap Berpola Helix terhadap Vortex Induced Vibration (VIV) pada Long Flexible Riser*, Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Blevins, R. D., 2001, *Flow-Induced Vibration*, Krieger Publishing Company, Florida.
- Chakrabarti, S. K., 2005, *Handbook of Offshore Engineering*, Elsevier, UK.
- Constantinides, Y., Oakley O. H. Jr., 2006, Numerical Prediction of Bare and Straked Cylinder VIV, *Proceedings of OMAE 2006*, 92334, Hamburg, Germany, 4-9 June.
- Cengel, Y. A. dan Cimbala, J. M., 2010, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, The McGraw Hil, New York.
- Ferziger, J. H. dan Peric, M., 1997, *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, Berlin-Germany.
- Haqiqi, I. A., Indiyono, P. dan Prastianto, R. W., 2010, Analisa Penambahan Batang Kawat pada Sisi Luar Pipa Riser sebagai Pereduksi Gaya Fluida dan Vortex-Induced Vibration (VIV), *Journal Proceeding SENTA*: 559-566.

- Indiyono, P., 1994, *Hidrodinamika Bangunan Lepas Pantai*, SIC, Surabaya.
- Lienhard, J. H., 1966, *Synopsis of Lift, Drag and Vortex Frequency Data for Rigid Circular Cylinders*, Washington State University, College of Engineering, Research Division Bulletin 300.
- Lubbad, R. K., Loset, S., Gudmestad, O. T., Torum, A. dan Moe, G., 2007, Vortex Induced Vibrations of Slender Marine Risers – Effects of Round-Sectioned Helical Strakes, *Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*.
- Menter, F. R., 1993, Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows, *AIAA Paper 93-2906*.
- Munson, B.R., Young, D.F., dan Okiishi, T.H., 2002, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, ISBN 0-471-44250-X.
- Patel, Y. 2010. “*Numerical Investigation of Flow Past a Circular Cylinder and in a Staggered Tube Bundle using Various Turbulence Models*”. Thesis. Lappeenranta: Departement of Mathematics and Physics; Lappeenranta University of Technology.
- Purwanti, L, 2008, *Analisa Vortex Induced Vibration Pada Riser Tension Leg Platform*, Tugas Akhir, Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan ITS.
- Sugiwanto, A., Prastianto, R. W., Murdjito dan Djatmiko, E. B., 2013, A Numerical Study on Cylinders with Passive Control Device of Helical Rods with Gap for Reducing Vortex-induced Vibration, *The Second International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment*.
- Sumer, B. M. dan Fredsoe, J., 2006, *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.
- Trim, A. D., Braaten, H., Lie, H. dan Tognarelli, M. A., 2005, Experimental Investigation of Vortex-Induced Vibration of Long Marine Riser, *Journal of Fluids and Structures* 21: 335–361.
- Wilcox, David C., 1998, *Turbulence Modeling for CFD*, Second edition, Anaheim: DCW Industries, pp. 174.
- Wu, H., Sun, D. P., Lu, L., Teng, B., Tang, G. Q. dan Song, J. N., 2012, Experimental Investigation on Suppression of Vortex-Induced Vibration

of Long Flexible Riser by Multiple Control Rods, *Journal of Fluids and Structure* 30: 115-132.

Yamamoto, C. T., Meneghini, J. R. dan Saltara, F., 2004, Numerical Simulations of Vortex-Induced Vibration on Flexible Cylinders, *Journal of Fluids and Structures* 19: 467- 489.

halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Arief Syarifuddin dilahirkan di Sidoarjo pada tanggal 27 Mei 1991. Penulis menyelesaikan pendidikan di SD Hang Tuah XI, selanjutnya di SMPN 1 Sidoarjo, dan melanjutkan pendidikan di SMAN 1 Gedangan. Ditahun 2013 penulis berhasil menyelesaikan pendidikan sarjana di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan topik tugas akhir yang berkaitan dengan analisis sistem tambat *semi-submersible*. Setelah lulus dari Teknik Kelautan, penulis berhasil memperoleh beasiswa Fresh Graduate DIKTI, sehingga dapat melanjutkan program pendidikan pasca sarjana di jurusan Teknik Perancangan Bangunan Laut, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis berhasil lulus dari program pasca sarjana setelah menempuh pendidikan selama 3 semester, dengan tesis yang berjudul “Studi Numerik Pengaruh Variasi *Pitch* dan Sudut Datang Aliran terhadap Gaya Fluida pada Silinder *Rigid* dengan *Helical Rods Ber-gap*”. Selama rentang perkuliahan penulis sempat mengikuti beberapa pelatihan ISO diantaranya adalah ISO 27001, 9001, 14001, dan OHSAS 18001.