TUGAS AKHIR – MO184804

ANALISIS KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA PADA PIPA BAWAH LAUT DENGAN VARIASI *SUPPRESSION DEVICE* PADA *FREE SPAN*

DAFFA AUSHAF RIYADI
NRP 04311840000132

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.
NIP 197105081997031001
Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D
NIP 197111051995121001

Program Studi Teknik Kelautan
Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

TUGAS AKHIR – MO184804

ANALISIS KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA PADA PIPA BAWAH LAUT DENGAN VARIASI *SUPPRESSION DEVICE* PADA *FREE SPAN*

DAFFA AUSHAF RIYADI
NRP 04311840000132

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.
NIP 197105081997031001
Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D
NIP 197111051995121001

Program Studi Teknik Kelautan
Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

FINAL PROJECT – MO184804

ANALYSIS OF FLUID FLOW CHARACTERISTICS OF SUBSEA PIPELINE WITH VARIETY OF SUPPRESSION DEVICE ON FREE SPAN

DAFFA AUSHAF RIYADI
NRP 04311840000132

Advisor
Dr.Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.
NIP 197105081997031001
Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D
NIP 197111051995121001

Study Program Ocean Engineering
Departement of Ocean Engineering
Faculty of Marine Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA PADA PIPA BAWAH LAUT DENGAN VARIASI *SUPPRESSION DEVICE* PADA *FREE SPAN*

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik di
Program Studi Teknik Kelautan
Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **DAFFA AUSHAF RIYADI**
NRP. 04311840000132

Disetujui oleh Tim Penguji Proposal Tugas Akhir:

1. Dr.Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. .... (Pembimbing I)
2. Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D .... (Pembimbing II)
3. Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D. .... (Penguji I)
4. Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc. .... (Penguji II)

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

SURABAYA
JULI, 2022

APPROVAL SHEET

ANALYSIS OF FLUID FLOW CHARACTERISTICS OF SUBSEA PIPELINE WITH VARIETY OF SUPPRESSION DEVICE ON FREE SPAN

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree in Ocean Engineering at
Undergraduate Study Program of Ocean Engineering
Department of Ocean Engineering
Faculty of Marine Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By: **DAFFA AUSHAF RIYADI**
NRP. 04311840000132

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Dr.Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. .... (Advisor)
2. Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D .... (Co-Advisor)
3. Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D. .... (Examiner I)
4. Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc. .... (Examiner II)

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

SURABAYA
JULI, 2022

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP	: Daffa Aushaf Riyadi / 04311840000132
Department	: Ocean Engineering
Advisor / NIP	: Dr.Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T., / 19710508 1997031001

Hereby declare that the Final Project with the title of "Analysis of Fluid Flow Characteristics of Subsea Pipeline with Variety of Suppression Device on Free Span" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 18 Juli 2022

Acknowledged

Advisor

(Dr.Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.)

NIP. 197105081997031001

Student,

(Daffa Aushaf Riyadi)

NRP. 04311840000132

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP	: Daffa Aushaf Riyadi / 04311840000132
Department	: Ocean Engineering
Advisor / NIP	: Dr.Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T., / 19710508 1997031001

Hereby declare that the Final Project with the title of "Analysis of Fluid Flow Characteristics of Subsea Pipeline with Variety of Suppression Device on Free Span" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 18 Juli 2022

Acknowledged

Advisor

Student,

(Dr.Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.)

NIP. 197105081997031001

(Daffa Aushaf Riyadi)

NRP. 04311840000132

ANALISIS KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA PADA PIPA BAWAH LAUT DENGAN VARIASI *SUPPRESSION DEVICE* PADA *FREE SPAN*

Nama / NRP : **Daffa Aushaf Riyadi / 04311840000132**

Departemen : **Teknik Kelautan FTK - ITS**

Dosen Pembimbing : **Dr.Eng Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.,**
Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D

Abstrak

Pipa bawah laut merupakan cara yang paling efektif dan ekonomis untuk mendistribusikan minyak dan/atau gas dibanding menggunakan kapal tanker dalam hal kontinuitasnya dalam mengangkut sepanjang waktu dengan umur operasional yang panjang sehingga 35 tahun. Selama masa operasinya, kondisi ekstrim seperti arus dan gelombang dapat mempengaruhi kondisi pipa bawah laut. Penggerusan dapat terjadi di bawah pipa dan rentang bebas terbentuk untuk panjang pipa tertentu. Keadaan ini dapat menghasilkan *vortex induced vibration* (VIV) sebagai beban bolak-balik pada pipa yang pada gilirannya menyebabkan kerusakan *fatigue*. Oleh karena itu, perlu dipasang alat peredam seperti *Helical Strakes* dan/atau *Triple Helical Rods* untuk meredam getaran pipa akibat fenomena *vortex shedding*. Penelitian dilakukan pada pipa gas berdiameter 18” di Lapangan Terang Sirasun Batur dan didapatkan *freespan* pada KP 0,603-0,647 dan KP 13,810-13,853 dengan panjang sebesar 44 dan 43 meter yang mengalami kritis melalui dua kali tahap *screening* menggunakan DNV-RP-F105. Dengan menggunakan bantuan CFD (*Computational Fluid Dynamics*) didapatkan *coefficient of drag* dan rata-rata kecepatan yang diletakkan pada enam garis dibelakang pipa polos, pipa yang menggunakan *helical strakes,* dan pipa yang menggunakan *triple helical rods*. Dapat dilihat bahwa *coefficient of drag* pada pipa yang menggunakan *suppression device* bertambah sebesar 56% *(helical strakes)* dan berkurang sebesar 26% *(triple helical rods),* sedangkan untuk kecepatan didaerah vorteks berkurang sebesar 22,11% *(helical strakes)* dan 8,8% *(triple helical rods).*

Kata Kunci: ***Subsea Pipeline, Free Span, Suppression Device***

ANALYSIS OF FLUID FLOW CHARACTERISTICS OF SUBSEA PIPELINE WITH VARIETY OF SUPPRESSION DEVICE ON FREE SPAN

Name / NRP	**:**	**Daffa Aushaf Riyadi / 04311840000132**
Department	**:**	**Ocean Engineering**
Advisor	**:**	**Dr.Eng Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.,**
		Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D

Abstract

Subsea pipelines are the most effective and economical way to distribute oil and/or gas rather than using tankers in term of their continuity in transporting all the time with a long operational life that can reach up to 35 years. During the period of its operational life, extreme conditions such as currents and waves may influence the condition of the subsea pipeline. Scouring may occur below the pipeline and free span formed for a certain length of the pipe. This situation could produce vortex induced vibration (VIV) as an alternating load on the pipe that in turn cause fatigue damage. Therefore, suppression device such as Helical Strakes and/or Triple Helical Rods is needed to be installed for suppressing the pipe vibration due to the vortex shedding phenomenon. The study was conducted on an 18" diameter gas pipe at Terang Sirasun Batur Field and obtained free span at KP 0.603-0.647 and KP 13,810-13,853 with a length of 44 and 43 meters which were critical through two stages of screening using DNV-RP-F105. With CFD (Computational Fluid Dynamics), the obtained coefficient of drag and average velocity are placed at six vortex lines behind plain pipes, pipes using helical strakes, and pipes using triple helical rods. The coefficient of drag on the pipe using the suppression device is increased by 56% (helical strakes) and decreased by 26% (triple helical rods), meanwhile the average velocity on vortex street is reduced by 22.11% (helical strakes) and 8.8% (triple helical rods).

Keywords: Subsea Pipeline, Free Span, Suppression Device

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Segala puji dan syukur kami panjatkan kepada Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan kegiatan penelitian dan penulisan Tugas Akhir dengan baik dan lancar. Tugas Akhir ini berjudul "Analisis Karakteristik Aliran Fluida pada Pipa Bawah Laut dengan Variasi *Suppression Device* pada *Free Span*".

Tugas akhir ini disusun guna memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Program Sarjana (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tugas Akhir ini membahas mengenai perbedaan analisis karakteristik aliran fluida yang mengalir melalui pipa polos dan pipa yang menggunakan *suppression device.*

Susunan Tugas Akhir ini dibuat dengan sebaik-baiknya namun penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangannya. Maka dari itu, kritik dan saran dari pembaca sangat diharapkan untuk menjadi evaluasi penulis kedepannya. Semoga penelitian Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang memiliki sangkutan dalam perkembangan teknologi terutama pada pipa bawah laut.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Surabaya, Juli 2022

Daffa Aushaf Riyadi

DAFTAR ISI

ABSTRAK vii
ABSTRACT viii
DAFTAR ISI x
DAFTAR GAMBAR xii
DAFTAR TABEL xiv
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Tujuan 2
1.4 Manfaat Penelitian 3
1.5 Batasan Masalah 3
BAB II DASAR TEORI 5
2.1 Tinjauan Pustaka 5
2.2 Dasar Teori 5
2.2.1 Bentangan Bebas (*Free Span*) 5
2.2.2 Dimensi Pipa 6
2.2.3 Massa Efektif Pipa 7
2.2.4 *Vortex Induced Vibration* (VIV) 8
2.2.4.1 *Bilangan Reynolds* 9
2.2.4.2 *Frekuensi Natural Pipa* 11
2.2.4.3 *Parameter Stabilitas* 12
2.2.4.4 *Reduced Velocity* 12
2.2.4.5 *Frekuensi Vortex Shedding* 12
2.2.4.6 *Separation dan Wakes* 13
2.2.4.7 *In-line Response Model* 14
2.2.4.8 Cross-flow Response Model 14
2.2.5 *Safety Factor* 15
2.2.6 Panjang Bentangan Bebas yang Diizinkan 15
2.2.7 *Suppression Device* 16
2.2.7.1 *Helical Strakes* 17
2.2.7.2 *Triple Helical Rods* 18
2.2.8 Pemodelan *Suppression Device* 19
2.2.9 *Computational Fluid Dynamic* (CFD) 19

BAB III METODE PENELITIAN 23
3.1 Diagram Alir Pengerjaan Skripsi *(flowchart)* 23
3.2 Penjelasan Diagram Alir 26
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN 29
4.1 Studi Kasus 29
4.2 Data Pipa Bawah Laut 30
4.3 Perhitungan Dimensi Pipa 32
4.3.1 Diameter Total Pipa (D_{tot}) 32
4.3.2 Diameter Dalam Pipa (D_i) 32
4.4 *Screening* Tahap Pertama 32
4.5 Perhitungan Massa Efektif Pipa 33
4.6 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa 36
4.7 Perhitungan *Reduced Velocity* 37
4.8 Perhitungan *Allowable Freespan Length* (*cross flow* dan *in-line motion*) 37
4.8.1 Pada Kondisi *Cross-Flow* 37
4.8.2 Pada Kondisi *In-Line* 38
4.9 *Screening* Tahap Kedua 39
4.10 Pemodelan Pipa dengan Autodesk AutoCad 40
4.11 Simulasi CFD dengan ANSYS Fluent 42
4.12 Validasi Hasil Simulasi 44
4.13 Analisis Karakteristik Aliran Fluida 45
4.14 Hasil *Drag Coefficient* (Cd) 52
4.15 Kecepatan pada *Vortex Region* 52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 57
5.1 Kesimpulan 57
5.2 Saran 57
DAFTAR PUSTAKA 59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Aplikasi Pipa Bawah Laut (Bai & Bai, 2005) 1
Gambar 1.2 Getaran Pipa Bawah Laut Pada *Free Span* (Zhang, 2020) 2
Gambar 2.1 Bentangan Bebas Dasar Laut (Journal of University of Babylon, Engineering Sciences, Vol.(26), No.(5): 2018) 6
Gambar 2.2 Visualisasi VIV (Lee, 2008) 9
Gambar 2.3 Regime Aliran Fluida Melewati Silinder (Sumer, 2016) 10
Gambar 2.4 *Vortex Shedding* Pada Pipa (Bai & Bai, 2010) 13
Gambar 2.5 Ilustrasi Respons Amplitudo VIV *in-line* dengan Ur dan Ks 14
Gambar 2.6 Respons Model *Cross-flow* (DNV RP-F-105) 15
Gambar 2.7 Alat Tambahan Sebagai Peredam VIV Pada Silinder (Dalton, 2013) 17
Gambar 2.8 Silinder Melingkar Dengan *Helical Strakes* (Ranjith, 2016) 18
Gambar 2.9 Ilustrasi Dimensi Silinder Dengan *Triple Helical Rods* (Prastianto, 2018) 18
Gambar 2.10 Ilustrasi Simulasi CFD Pada Silinder Dengan *Helical Strakes* 19
Gambar 3. 1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir *(flowchart)* 23
Gambar 4.1 Peta Lapangan Terang Sirasun Batur (TSB) Milik Kangean Energy Indonesia Ltd. (Kangean Energy Indonesia Ltd, 2011) 29
Gambar 4.2 Pemodelan *Triple Helical Rods* dengan AutoCad 3D 40
Gambar 4.3 Model Pipa Polos 40
Gambar 4.4 Model Pipa dengan *Helical Strakes* 41
Gambar 4.5 Model Pipa dengan *Triple Helical Rods* 41
Gambar 4.6 Pembuatan Geometri Pipa dan Bentangan Bebas 42
Gambar 4.7 Pembuatan *Meshing* pada ANSYS 43
Gambar 4.8 Menentukan *Boundary Conditions* 43
Gambar 4.9 Simulasi Pipa Polos pada Re=40 44
Gambar 4.10 Relasi Pola *Shedding* dengan Bilangan Reynolds 45
Gambar 4.11 Simulasi Pipa Polos pada Re=2,46x10^5: Tampak 2d(a) dan Tampak 3d(b) 46
Gambar 4.12 Simulasi Pipa Polos pada Re=2,46x10^5 Tampak Atas: Tampak 2d(a) dan Tampak 3d(b) 47
Gambar 4.13 Simulasi Pipa *Helical Strakes* pada Re=2,46x10^5: Tampak 2d (a) dan Tampak 3d (b) 48

Gambar 4.14 Simulasi Pipa *Helical Strakes* pada Re=2,46x10^5 Tampak Atas: Tampak 2d(a) dan Tampak 3d(b) ... 49
Gambar 4.15 Simulasi Pipa *Triple Helical Rods* pada Re=2,46x10^5: Tampak Samping (a) dan Tampak Atas (b) ... 50
Gambar 4.16 Simulasi Pipa *Triple Helical Rods* pada Re=2,46x10^5 Tampak Atas: Tampak 2d(a) dan Tampak 3d(b) ... 51
Gambar 4.17 Plot Garis Pengambilan Data Kecepatan ... 53
Gambar 4.18 Perbandingan Velocity di Area Vorteks untuk Tiga Model Pipa pada Kecepatan Arus 0,51 m/s (Re=2,46x10^5) ... 54

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Faktor Keamanan Sebagai Parameter VIV (DNV-RP-F105) 15

Tabel 4.1 Data Properti Pipa (Kangean Energy Indonesia Ltd, 2011) 30

Tabel 4.2 Data *Coating* Pipa (Kangean Energy Indonesia Ltd, 2011) 31

Tabel 4.3 Data *Extreme Current* di Lapangan Terang Sirasun Batur (Kangean Energy Indonesia Ltd, 2011) 31

Tabel 4.4 Perilaku dari Respons Bentangan Bebas (DNV RP F-105) 33

Tabel 4.5 Hasil *Screening* Dinamis 39

Tabel 4.6 Validasi Pipa Polos pada Re= 40 44

Tabel 4.7 Nilai *Drag Coefficient* pada Tiga Model Pipa dengan Re=2,46x10^5 52

Tabel 4.8 Plot Garis Pengambilan Data Kecepatan.. 52

Tabel 4.9 Data Rata-Rata Kecepatan pada Garis 1-6 (Pipa Polos) 53

Tabel 4.10 Data Rata-Rata Kecepatan pada Garis 1-6 (*Helical Strakes*)................................ 53

Tabel 4.11 Data Rata-Rata Kecepatan pada Garis 1-6 (*Triple Helical Rods*).......................... 54

Tabel 4.12 Perbandingan Data Rata-Rata Kecepatan pada Tiga Model Pipa 54

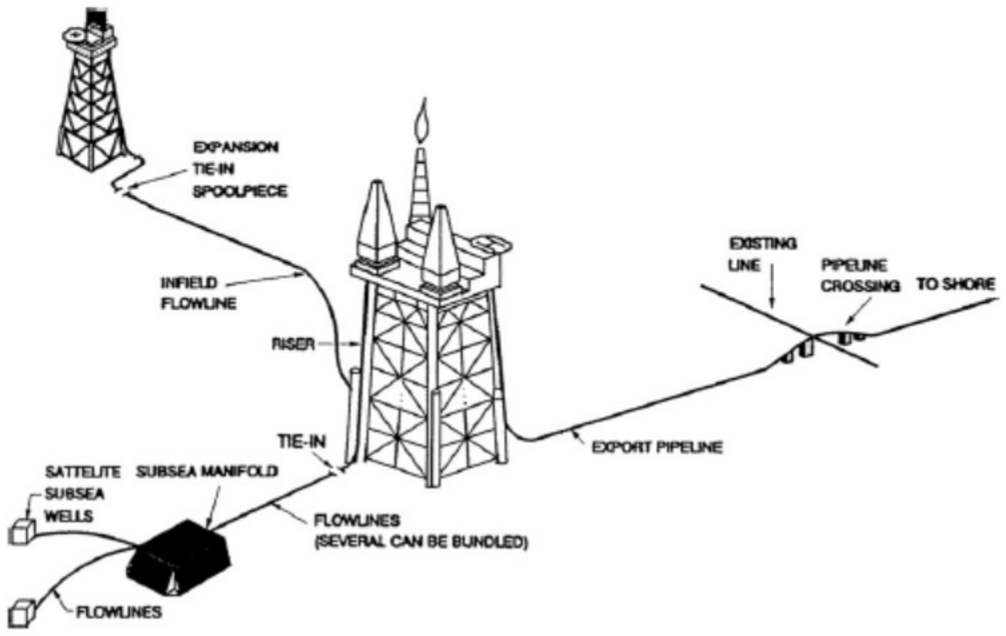
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Minyak dan gas bumi merupakan energi yang sampai saat ini masih menjadi sumber utama yang digunakan baik dari penggunaan rumahan maupun pabrik. Selain itu, minyak dan gas bumi juga merupakan komoditas vital yang sangat memengaruhi hidup orang banyak dan memiliki peranan penting dalam perekonomian nasional (UU NO. 22, LN 2001). Dengan banyaknya manfaat dari migas tersebut, besarnya konsumsi migas di Indonesia harus bisa diseimbangi dengan besar produksi dan distribusinya.

Salah satu caranya adalah dengan memaksimalkan proses distribusi dan transportasi minyak dan gas dengan pipa bawah laut. Menurut Kementrian Kelautan dan Perikanan (2016), pipa bawah laut adalah tabung berongga dengan diameter dan panjang bervariasi yang terletak di atau tertanam di bagian bawah laut. Fungsi dari pipa bawah laut itu sendiri adalah untuk mentransportasikan fluida seperti minyak, gas, dan air dari lepas pantai menuju tempat penyimpanan maupun kilang yang berada di daratan.

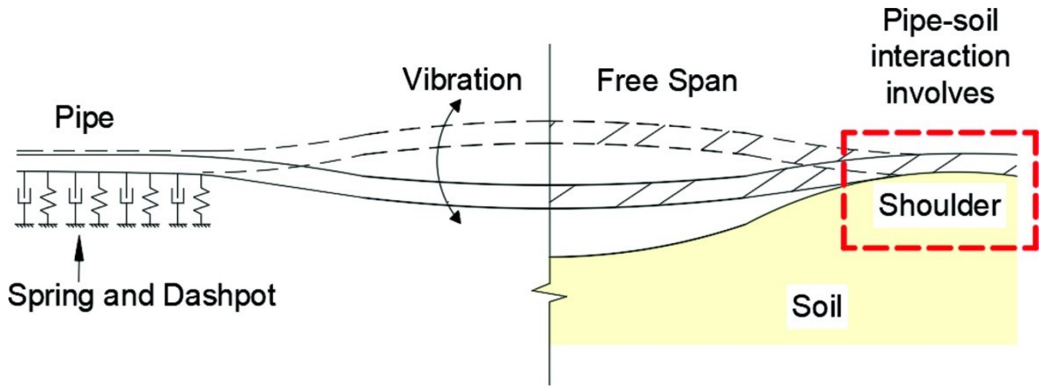


Gambar 1.1 Aplikasi Pipa Bawah Laut (Bai & Bai, 2005)

Menurut Gong dkk. (2012), pipa merupakan cara yang paling efisien dan ekonomis untuk mengumpulkan dan mengangkut minyak dan gas alam dari sumur bawah laut ke fasilitas penyimpanan lepas pantai atau pesisir. Pipa bawah laut juga memikili kelebihan pengoperasian yang lebih lama dan efisien daripada kapal *tanker* pada umumnya. Pengoperasian pipa juga bisa sebanyak 24 jam sehari dan 365 hari dalam setahun selama umur pipa yang bisa mencapai lebih dari 30 tahun.

Meskipun pipa bawah laut telah membuktikan kelebihan dan keefektifitasannya, banyak hal yang harus diperhatikan selama masa penggunaannya. Apabila tidak diperhatikan, pipa bisa mengalami kegagalan yang dapat merugikan ekonomi dan lingkungan (Sibuea, dkk., 2016). Lingkungan laut dalam yang sangat beragam dan kadang ekstrim dapat memberikan pengaruh yang besar terhadap kondisi pipa. Terutama arus dan gelombang yang bisa memberikan pengaruh langsung maupun tidak langsung pada kondisi pipa bawah laut.

Contoh pengaruh tersebut adalah *free span* yang terjadi secara normal pada pipa di dasar laut yang tidak rata, dasar laut yang dinamis dan penyeberangan pipa. *Free-spanning* dalam pipa menyebabkan *Vortex Induced Vibration* (VIV) *fatigue*, keretakan, dan kebocoran (Taheri dkk, 2018).



Gambar 1.2 Getaran Pipa Bawah Laut Pada *Free Span* (Zhang, 2020)

Aliran gelombang dan arus di sekitar *span* pipa maupun bentuk silinder lainnya akan menghasilkan generasi vortisitas lembaran di bagian belakangnya (berupa aliran turbulen). Vortisitas ini diberikan secara bergantian dari bagian atas dan bawah pipa, menghasilkan gaya osilasi yang diberikan pada *span.*. *Vortex shedding* berarti bahwa arus silang akan menghasilkan beban bolak-balik pada pipa, menghasilkan getaran pipa (Bai, 2005). Dengan adanya *free span* dimungkinkan akan terjadinya defleksi yang akan mengakibatkan gerak osilasi jika nilai frekuensi *vortex shedding* melebihi frekuensi natural pipa.

Salah satu upaya untuk mengurangi masalah tersebut adalah dengan memberikan *suppression device* pada pipa yang difungsikan untuk memecah arus yang melewati struktur pipa dan meredam *vortex induced vibration (VIV).* Bentuk dari *suppression device* sangatlah beragam, beberapa diantaranya adalah *helical strakes dan triple helical rods*

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah:

1. Berapakah *freespan* pada Lapangan Terang Sirasun Batur (TSB) yang mengalami *over span* menurut DNV-RP-F105.
2. Bagaimana perbandingan *drag coefficient* pipa yang menggunakan *suppression device* dengan tidak.
3. Bagaimana perbandingan karakteristik fluida pipa yang menggunakan *suppression device* dengan tidak.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini adalah:

1. Menganalisis dan mencari *freespan* mana saja pada Lapangan Terang Sirasun Batur (TSB) yang mengalami *over span* menurut DNV-RP-F105.
2. Melakukan perbandingan *drag coefficient* pipa yang menggunakan *suppression device* dengan tidak.

3. Melakukan perbandingan karakteristik fluida pipa yang menggunakan *suppression device* dengan tidak.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang bisa diambil dari penelitian tugas akhir ini adalah dengan ini kita bisa mengetahui jenis *suppression device* apa yang memiliki kegunaan paling baik dan efektif guna memecah arus pada *free span* pipa bawah laut untuk mencegah terjadinya *vortex shedding*. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu pertimbangan untuk pemilihan *suppression device* apabila dibutuhkan sebagai alat peredam pipa dari *vortex-induced vibration (VIV).*

1.5 Batasan Masalah

Pembatasan masalah dilakukan untuk menghindari pembahasan yang melebar sehingga diberikan asumsi sebagai berikut :

1. Studi kasus dilakukan pada *pipeline* milik perusahaan Kangean Energy Indonesia Ltd.
2. Pipa yang dianalisis merupakan *Pipeline* di Terang Sirasun Batur Field.
3. Jenis *suppression device* yang digunakan dalam penelitian ialah *helical strakes* dan *triple helical rods.*
4. Besar kecepatan arus yang digunakan dalam penelitian ini adalah 0,51 m/s.
5. Tumpuan pada *free span* pipa adalah tumpuan *pinned-pinned.*

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II
DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Selama pengoperasian pipa, penting diadakannya inspeksi untuk melihat kondisi pipa pada waktu tersebut dan seringkali terlihat pipa yang memiliki bentangan bebas. Menurut Bai & Bai (2005), bentangan bebas *(free span)* dapat mengakibatkan kegagalan pipa karena *yielding* yang berlebihan dan *fatigue*. Ketika fluida mengalir melintasi pipa, aliran akan terpisah, terjadi *shedding* vortisitas, dan bangun periodik terbentuk. Di bawah kondisi resonansi, osilasi akan berkelanjutan dan dapat tereksitasi sehingga pipa akan berosilasi dalam suatu frekuensi. Osilasi ini akan melelahkan pipa dan akhirnya dapat menyebabkan kegagalan. Osilasi biasanya sejalan dengan arah aliran (*in-line*) tetapi dapat juga mengalami kondisi transversal (*cross flow*) tergantung pada kecepatan arus dan panjang bentang.

Putra (2014) dan Wicaksono (2018), telah melakukan penelitian mengenai analisis panjang bentangan bebas yang diizinkan sehingga dapat diketahui *free span* mana yang aman dari kemungkinan adanya kegagalan kelelahan akibat dari *vortex induced vibration* (VIV). Pada tugas akhir ini, panjang bentangan bebas yang diizinkan akan digunakan untuk *screening* data *free span* sehingga didapatkan bentangan bebas pipa yang memungkinkan terjadinya VIV yang dapat membahayakan pipa menggunakan bantuan DNV-RP-F105 (*free spanning pipelines)*.

Untuk mencegah hal tersebut, dibutuhkan *suppression device* untuk mengurangi osilasi dan VIV pada bentangan bebas pipa. Setelah pemodelan *suppression device* disimulasikan, akan didapatkan *coefficient drag* dan juga kecepatan pada area vorteks yang keduanya akan dibandingkan untuk dilihat jenis *suppression device* apa yang lebih efektif untuk digunakan dalam kasus bentangan bebas ini.

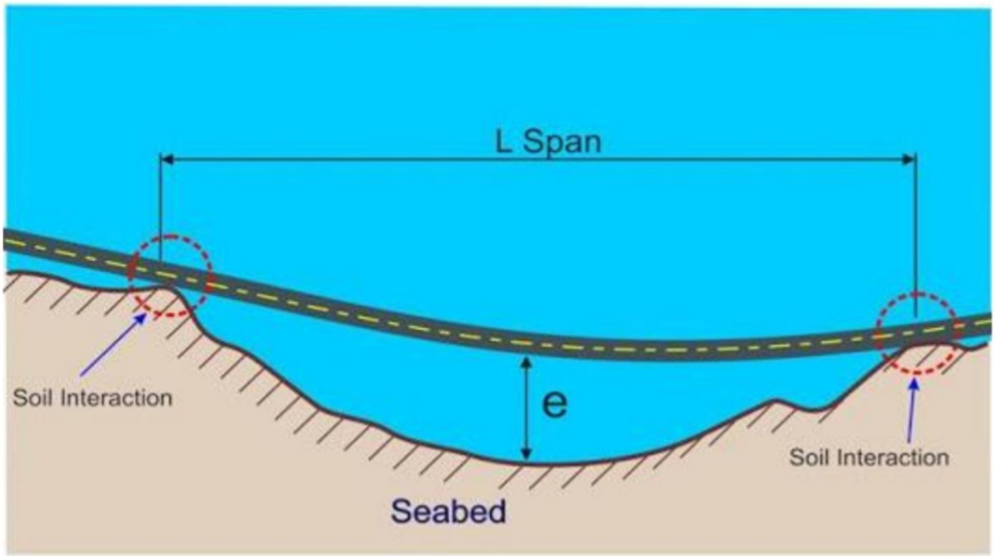
Dalam tugas akhir ini, jenis *suppression device* yang diapakai adalah jenis *helical strakes* dan *triple helical rods.* Abdullah (2016) juga telah meneliti mengenai pengaruh dan perbedaan *suppression device* terhadap *fatigue damage* dan *expectancy life* dari pipa yang ditinjau dengan metode elemen hingga. Jenis *suppression device* yang diteliti adalah model *helical strakes* dan *fairing.*

Prastianto (2018), sebelumnya pernah meneliti mengenai experimen silinder yang menggunakan *suppression device* jenis *triple helical rods* di lorong angin berkecepatan rendah (LSWT) dan telah membuktikan bahwa alat tambahan tersebut mampu mengurangi koefisien gesek sampai 93,4%. Ranjith (2016), sebelumnya meneliti *helical strakes* pada struktur silinder yang disimulasikan menggunakan CFD dan dimensinya akan digunakan pada penelitian ini.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Bentangan Bebas (*Free Span*)

Bentangan bebas (*free span)* dapat terjadi ketika kontak antara pipa dan dasar laut hilang pada jarak yang cukup jauh di dasar laut yang tidak rata. Evaluasi panjang bentang bebas yang diijinkan diperlukan dalam desain pipa. Jika panjang bentang aktual melebihi panjang yang diizinkan, koreksi kemudian diperlukan untuk mengurangi bentang untuk menghindari kerusakan pipa (Guo et al., 2005).



Gambar 2.1 Bentangan Bebas Dasar Laut (Journal of University of Babylon, Engineering Sciences, Vol.(26), No.(5): 2018)

Bentangan bebas terjadi di hampir setiap *pipeline*, kecuali pada kondisi khusus misalnya penguburan pipa. *Scouring* dasar laut merupakan salah satu alasan utama terjadinya bentangan bebas. Bentangan bebas dapat mengalami getaran *in-line* atau *cross-flow*, yang pada akhirnya dapat menyebabkan kegagalan *fatigue*. (Bai & Bai, 2010)

Menurut DNV-RP-F105 (2006), bentangan bebas dapat disebabkan oleh:

- permukaan *seabed* yang tidak rata,
- perubahan pada topologi *free span* (contoh: *Scouring* dan ombak pasir),
- penyangga buatan, dan
- *strudel scours*

Ketika bentang pipa terkena aliran arus di dasar laut, bentang pipa dapat bergetar karena efek dari *vortex-shedding*. Efek ini akan menjadi parah apabila Frekuensi Strouhal mendekati frekuensi natural dari bentangan pipa (Mousselli, 1981). Pipa bawah laut dengan bentang bebas yang terkena beban lingkungan bisa berosilasi dan dapat mengalami *fatigue* pada sambungan las. Oleh karena itu, bentangan harus dinilai secara hati-hati sehubungan dengan *fatigue* akibat getaran yang diinduksi oleh *vortex* dan osilasi yang diinduksi gelombang dan arus (Bai & Bai, 2005).

2.2.2 Dimensi Pipa

Dimensi pipa yang dibutuhkan dalam pengerjaan di tugas akhir ini adalah diameter total pipa. Diameter total tersebut meliputi diameter luar pipa, tebal *concrete,* tebal *coating* dan juga tebal *marine growth* yang melapisi pipa secara keseluruhan. Namun dalam tugas akhir ini, *marine growth* tidak dipertimbangkan karena akan memengaruhi pemodelan dan simulasi pada akhirnya. Maka dari itu, diameter total pipa dapat dirumuskan menjadi persamaan berikut:

$$D_t = D_0 + 2t_{concrete} + 2t_{coating} \text{...(1)}$$

Dimana:

D_t = Diameter total pipa

D_0 = Diameter luar pipa

$t_{concrete}$ = Tebal lapisan *concrete*

$t_{coating}$ = Tebal lapisan anti korosi

2.2.3 Massa Efektif Pipa

Massa efektif pipa adalah jumlah dari massa seluruh struktur pipa yang ditambah dengan massa dari kandungan/fluida yang dialirkan, serta massa tambah. Persamaan massa efektif pipa adalah sebagai berikut:

$$m_e = m_{str} + m_c + m_a \text{ ....(2)}$$

Dimana :

m_{str} = Massa struktural pipa (termasuk coating) (kg/m)

m_c = Massa konten pipa (kg/m)

m_a = Massa tambah (kg/m)

(Bai & Bai, 2005)

Untuk massa struktur pipa, massa konten pipa, dan massa tambah pipa akan dijelaskan lebih lanjut:

a. Massa Struktur Pipa

Massa struktural pipa terdiri dari penjumlahan massa pipa yang ditambahkan dengan massa lapisan anti korosi dan juga selimut beton (concrete). Dibawah ini adalah persamaan untuk mencari massa struktur pipa:

$$m_{str} = m_{st} + m_{cc} + m_{conc} \text{ ....(3)}$$

$$m_{st} = A_{st} + \rho_{st} \text{ ....(4)}$$

$$m_{cc} = \pi \frac{(Dcc2 - D0\ 2)}{4} \rho_{cc} \text{ ....(5)}$$

$$m_{conc} = \pi \frac{(Dwc2 - D0\ 2)}{4} \rho_{conc} \text{ ....(6)}$$

Dimana :

m_{str} = Massa struktur pipa (kg/m)

m_{st} = Massa pipa baja (kg/m)

m_{cc} = Massa lapisan anti korosi (kg/m)

m_{conc} = Massa selimut beton (kg/m)

ρ_{st} = Massa jenis baja (kg/m^3)

ρ_{cc} = Massa jenis lapisan anti korosi (kg/m^3)

ρ_{conc} = Massa jenis selimut beton (kg/m^3)

b. Massa Konten Pipa

Massa konten pipa terdiri dari penjumlahan luas penampang internal pipa dengan massa jenis konten pipa. Dapat dibuat menjadi seperti persamaan berikut:

$$m_c = A_i + \rho_c \quad \text{...(7)}$$

Dimana :

ρ_c = Massa jenis konten pipa (kg/m^3)

c. Massa Tambah Pipa

$$m_a = \frac{\pi}{4} D_t^2 \cdot \rho_w \quad \text{...(8)}$$

Dimana :

ρ_w = Massa jenis air laut (kg/m^3)

Dengan persamaan dibawah ini bisa dijelaskan cara menentukan koefisien massa tambah dengan persamaan berikut:

$$C_a = \begin{cases} 0{,}68 + \frac{1{,}6}{1+5\left(\frac{e}{D}\right)} & untuk \left(\frac{e}{D}\right) < 0{,}8 \\ 1 & untuk \left(\frac{e}{D}\right) \geq 0{,}8 \end{cases} \quad \text{...........................(9)}$$

Dimana :

e/Dt = Rasio celah bentangan

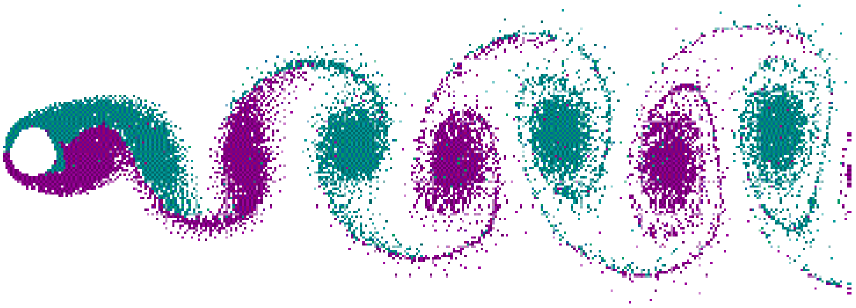
e = Jarak antara *seabed* dengan pipa

(DNV-RP-F105)

2.2.4 *Vortex Induced Vibration* (VIV)

Vortex merupakan suatu aliran yang partikel fluidanya berotasi pada aliran rotasinya terhadap titik pusatnya. Pelepasan *vortex* disebut dengan *vortex shedding*; memiliki kecepatan transversal dan tangensial yang konstan dan bervariasi terhadap radiusnya (Indiyono, 1994).

Menurut Mouselli (1981), ketika arus air mengalir melintasi pipa, *vortices* [pusaran] akan terjadi di sekitar pipa. Vortisitas ini disebabkan oleh turbulensi dan ketidakstabilan aliran di belakang pipa. *Vortex shedding* menyebabkan perubahan periodik pada tekanan hidrodinamis bersih pada pipa sehingga dapat menyebabkan bentang pipa bergetar.



Gambar 2.2 Visualisasi VIV (Lee, 2008)

Biasanya, VIV bentang bebas tidak diperbolehkan terjadi selama umur desain *pipeline*. Dalam beberapa tahun terakhir, pendekatan yang kurang ketat menjadi lazim dan VIV telah diizinkan asalkan saat demonstrasinya ditunjukkan bahwa VIV yang terjadi tidak melampaui *fatigue damage* yang diperbolehkan (Bai, 2001). Berdasarkan hal tersebut di atas, dapat diusulkan bahwa kriteria dari VIV adalah sebagai berikut:

- Onset VIV *in-line* diperbolehkan selama fase apapun dari *design life* asalkan: menunjukkan bahwa tegangan yang diijinkan dan *fatigue damage* yang diijinkan tidak terlampaui.
- Onset VIV *cross-flow* diperbolehkan selama fase apapun dari *design life* asalkan: menunjukkan bahwa tegangan yang diijinkan dan kelelahan yang diijinkan tidak terlampaui.

2.2.4.1 *Bilangan Reynolds*

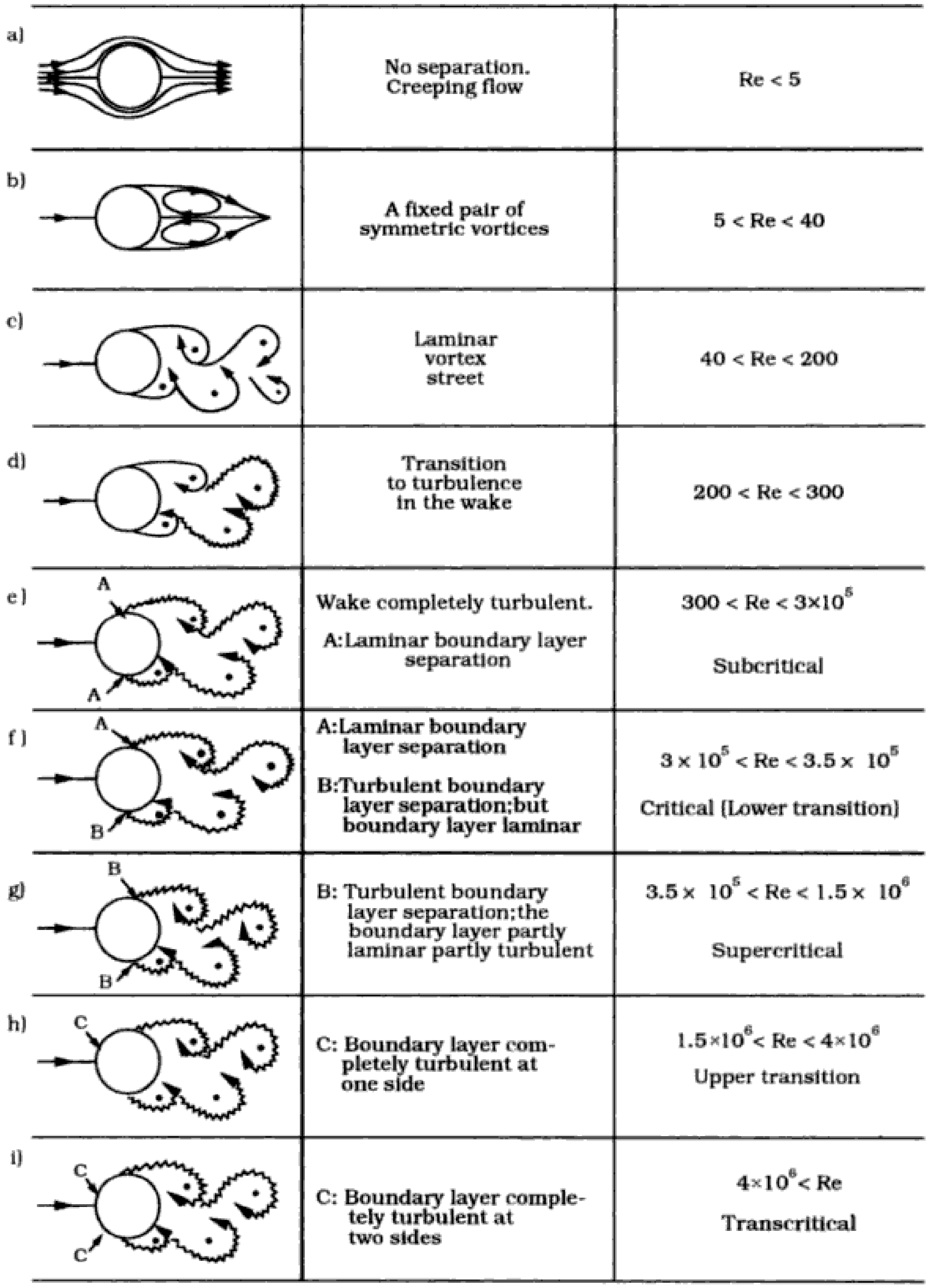
Bilangan Reynolds dan bilangan Keulegan-Carpenter menentukan pentingnya gaya hambat pada struktur. Kekasaran permukaan mempengaruhi gaya pada struktur kecil. Permukaan kasar suatu struktur terutama yang disebabkan oleh *marine-growth* pada bagian terendam dari suatu struktur. Secara khusus, nilai-nilai hambatan hidrodinamik dan koefisien inersia berbeda secara signifikan dengan kekasaran permukaan struktur (Chakrabarti, 2005). Bilangan Reynolds dapat didefinisikan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$Re = \frac{\rho . u . D}{\mu} \quad \text{...(10)}$$

Dimana :

ρ	= densitas air laut	(kg/m^3)
u	= kecepatan arus	(m/s)
D	= diameter pipa	(m)
μ	= viskositas dinamis	(kg/m.s)

Untuk lebih jelasnya mengenai pentingnya pengaruh Bilangan Reynolds terhadap gaya hambat suatu silinder dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.3 Regime Aliran Fluida Melewati Silinder (Sumer, 2016)

Kesimpulan dari Gambar 2.3 diatas adalah semakin tinggi Bilangan Reynolds maka aliran yang melewati pipa dibelakangnya akan semakin membentuk aliran *vortex* yang

turbulent dan tidak teratur. Pada Bilangan Reynolds yang sangat rendah, separasi aliran tidak terjadi saat melewati struktur pipa, separasi pertama kali terjadi saat bilangan Reynolds menjadi 5 (Gambar 2.3(a)). Pada jangkauan 5 < *Re* < 40, pasangan vortisitas yang simetris terbentuk pada *wake* dari silinder (Gambar 2.3(b)). Panjang dari vortisitas tersebut menjadi semakin besar mengikuti peningkatan bilangan Reynoldsnya.

Ketika bilangan Reynolds semakin meningkat, *wake* yang terbentuk menjadi tidak stabil dan akan menghasilkan fenomena yang dinamakan dengan *vortex shedding* dimana vortisitas terlihat melakukan dorongan secara bergantian pada kedua sisi silinder pada kondisi tertentu, mengakibatkan *wake* yang terlihat menjadi *vortex street* (Gambar 2.3(d-f)).

Pada jangkauan bilangan Reynolds sebesar 40 < *Re* < 200, *vortex street* yang tebentuk bersifat laminar (Gambar 2.3(c)) dan *shedding*-nya bersifat dua dimensi karena *vortex* tidak bervariasi sepanjang arah bentang pipa.

Dengan peningkatan bilangan Reynolds lebih lanjut, transisi aliran laminar menjadi turbulen akan terjadi pada wilayah *wake* (Gambar 2.3(d)). Daerah transisi ke turbulensi bergerak menuju silinder, karena Re meningkat dalam kisaran 200 < *Re* < 300. Pada *Re* = 400, vortisitas yang terbentuk bersifat turbulen. Pengamatan menunjukkan bahwa fitur dua dimensi dari pelepasan pusaran yang diamati pada kisaran 40 < *Re* <200 menjadi tiga dimensi; vortisitas ditumpahkan sepanjang arah bentang pipa.

Untuk *Re* > 300, *wake* yang terbentuk turbulen sepenuhnya. *Boundary layer* di atas permukaan silinder tetap laminar, sedangkan setiap peningkatan *Re* dalam rentang yang sangat luas seperti 300 < *Re* < 3 x 10^5, tipe aliran dianggap *subcritical.*

Dengan peningkatan *Re* lebih lanjut, transisi ke turbulensi terjadi di *boundary layer* itu sendiri. Transisi pertama terjadi pada titik di mana lapisan batas memisahkan, dan kemudian daerah transisi ke turbulensi bergerak ke hulu di atas permukaan silinder menuju titik stagnasi ketika *Re* meningkat.

Pada jangkauan 3 x 10^5 < *Re* < 3,5 x 10^5 (Gambar 2.3(f)) *boundary layer* berubah menjadi turbulen pada titik *separation,* tetapi ini hanya terjadi pada satu sisi silinder sedangkan untuk sisi lainnya masih laminar, tipe aliran ini dianggap *critical.*

Rezim bilangan Reynolds berikutnya adalah yang disebut rezim aliran superkritis dimana 3,5 x 10^5 < *Re* < 1,5 x 10^6 (Gambar 2.3(g)). Dalam rezim ini, pemisahan *boundary layer* bergolak di kedua sisi silinder. Namun, transisi ke turbulensi di lapisan batas belum selesai; wilayah transisi ke turbulensi terletak di suatu tempat antara titik stagnasi dan titik pemisahan.

Boundary layer di satu sisi menjadi turbulen penuh ketika *Re* mencapai nilai sekitar 1,5 x 10^6. Jadi, dalam rezim aliran ini, lapisan batas turbulen sepenuhnya di satu sisi silinder dan sebagian laminar dan sebagian turbulen di sisi lain. Jenis rezim aliran ini, yang disebut rezim aliran transisi atas, berlaku di atas kisaran 1,5 x 10^6 < *Re* < 4,5 x 10^6 (Gambar 2.3(h)).

Pada akhirnya, ketika *Re* meningkat menjadi *Re* > 4,5 x 10^6, *boundary layer* yang melewati permukaan silinder sudah turbulen di seluruh tempat. Rezim aliran ini disebut dengan rezim aliran *transcritical*.

2.2.4.2 ***Frekuensi Natural Pipa***

Frekuensi alami pipa tergantung pada kekakuan dan massanya; semakin kaku pipa semakin tinggi frekuensinya, semakin besar massa pipa (termasuk isinya), semakin rendah frekuensi alaminya.

Menurut Guo (2005), Persamaan untuk mencari frekuensi natural dari pipa adalah:

$$f_n = \frac{C_e}{2\pi}\sqrt{\frac{EI}{M_e L_s^4}} \quad \text{.. (11)}$$

Dimana:

f_n	= Frekuensi natural pipa
C_e	= Konstanta tumpuan
M_e	= Massa efektif pipa
L_s	= Panjang bentangan
E	= Modulus elastisitas pipa
I	= Momen Inersia

2.2.4.3 ***Parameter Stabilitas***

Parameter stabilitas (Ks) adalah arti penting untuk mendefinisikan gerakan yang diinduksi oleh *vortex*. Persamaan yang digunakan untuk menghitung parameter stabilitas menurut DNV-RP-F105 adalah:

$$K_s = \frac{4\pi m_e \zeta_T}{\rho D^2} \quad \text{.. (12)}$$

Dimana:

K_s	= Parameter stabilitas pipa
M_e	= Massa efektif pipa
ζ_T	= Rasio damping total
ρ	= Densitas/massa jenis air laut
D	= Diameter pipa

2.2.4.4 ***Reduced Velocity***

Reduced Velocity (U_r) adalah kecepatan dimana *vortex induced oscillations* terjadi. *Reduced Velocity* bersifat non-dimensional, maka dari itu didefinisikan dengan persamaan yang dapat digunakan untuk mencari *reduced velocity* sebagai berikut:

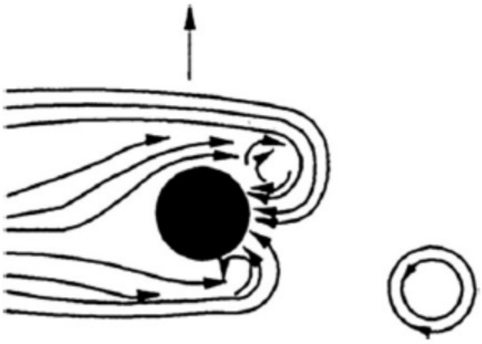
$$U_r = \frac{U_c}{f_n D} \quad \text{.. (13)}$$

Dimana:

U_r	= Reduced velocity
U_c	= Kecepatan arus
f_n	= Frekuensi natural pipa
D	= Diameter luar pipa

2.2.4.5 ***Frekuensi Vortex Shedding***

Menurut McCormick (2010), *vortex shedding* adalah area utama yang menjadi perhatian para insinyur kelautan karena fenomena tersebut dapat menyebabkan gaya transversal dan streamwise periodik yang pada gilirannya dapat menyebabkan *body motion* yang tidak diinginkan. *Vortex shedding* berarti bahwa arus silang akan menghasilkan beban bolak-balik pada pipa, sehingga menghasilkan getaran pada pipa (Bai & Bai, 2010).



Gambar 2.4 *Vortex Shedding* Pada Pipa (Bai & Bai, 2010)

Persamaan yang dapat digunakan untuk mencari frekuensi *vortex shedding* menurut DNV-RP-F105 adalah:

$$f_s = S_t \frac{U}{D} \qquad (14)$$

Dimana:

f_s = Frekuensi *vortex shedding*

S_t = Bilangan Strouhal

U = Kecepatan partikel air

D = Diameter luar pipa

2.2.4.6 ***Separation dan Wakes***

Fluida memiliki sifat *irreversible* karena fluida memiliki viskositas, dan apabila gradien kecepatan muncul dalam sebuah aliran maka akan terjadi gesekan dan disipasi energi karena adanya tekanan *viscous.* Aliran dapat menjadi *reversible* apabila tidak ada gradien kecepatan di dalamnya sehingga tidak munculnya gesekan.

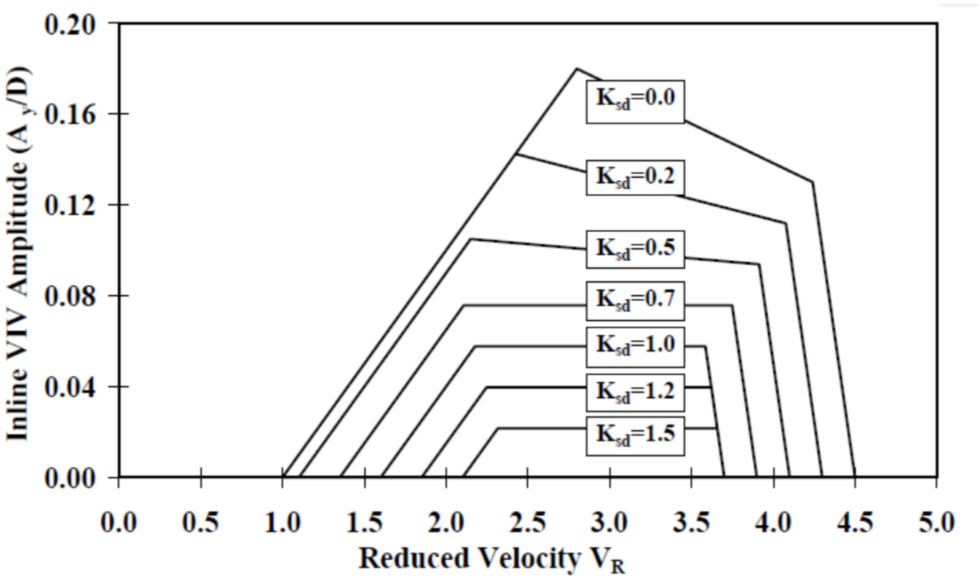
Apabila fluida yang memiliki gradien kecepatan melewati struktur yang memiliki arah tegak lurus dengan aliran tersebut akan menimbulkan tegangan gesek dan aliran akan mengalami *separation* meskipun *boundary layer* tersebut kecil. Pertimbangan efek gesekan harus sangat diperhatikan meskipun pada beberapa kasus dapat diabaikan. Bagaimanapun, efek gesekan pada *separation* sangatlah penting. Pada kecepatan yang cukup tinggi, aliran fluida akan melepaskan diri dari permukaan tubuh yang disebut sebagai pemisahan aliran (Cengel, 2006).

Meskipun sudut tajam biasanya menghasilkan aliran terpisah, tetapi bukanlah satu-satunya penyebab *separation*. Contohnya, aliran yang melewati silinder dapat menghasilkan area besar aliran terpisah di belakang silinder yang dimakan dengan *wake*. Pola aliran yang berada di depan dan belakang silinder sangatlah berbeda. Pada bagian depan aliran melewati silinder dengan mulus. Sebaliknya, pada bagian silinder terjadi aliran yang tidak stabil sehingga menimbulkan vortisitas di belakangnya. *Wakes* hampir selalu mengandung gerakan pusaran besar yang ditimbulkan pada hilir.

2.2.4.7 ***In-line Response Model***

Respons in-line dari rentang pipa dalam arus yang didominasi kondisi dikaitkan dengan *vortex shedding* baik bolak-balik atau simetris. Kontribusi dari kedua wilayah *in-line*, wilayah ketidakstabilan pertama dan wilayah ketidakstabilan kedua disertakan dalam modelnya. Respons model in-line berlaku pada semua mode getaran *in-line*. Respons amplitudo bergantung terutama pada *reduced velocity* (U_r), parameter stabilitas (K_s), intensitas turbulen (I_c), dan sudut arah aliran (θ_{rel}) yang bersifat relatif pada pipa.

(A_Y/D) didefinisikan dengan amplitudo respons *in-line* VIV yang maksimum sebagai fungsi dari U_r dan K_s. Grafik dari model respons VIV in-line dapat dilihat dari gambar dibawah berikut:

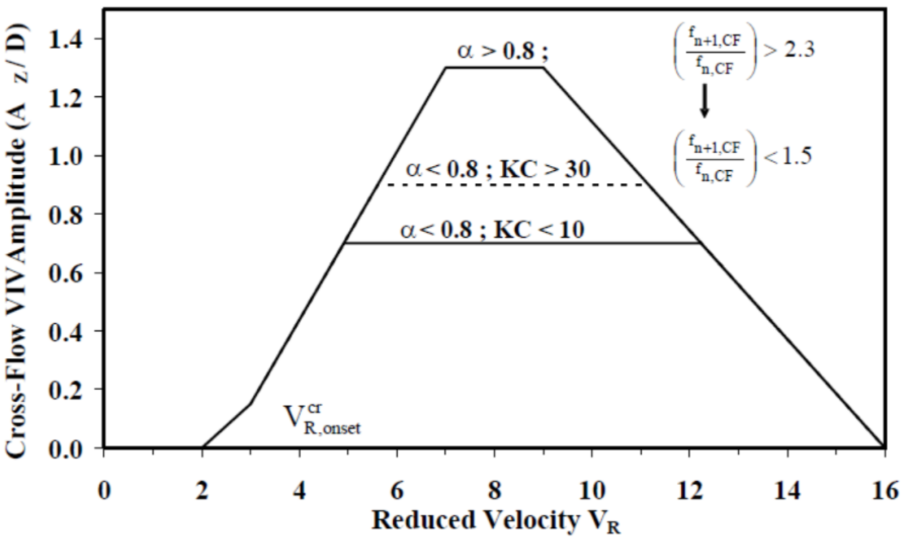


Gambar 2.5 Ilustrasi Respons Amplitudo VIV *in-line* dengan Ur dan Ks (DNV-RP-F105)

2.2.4.8 **Cross-flow Response Model**

Cross-flow VIV terpengaruh oleh beberapa parameter, seperti *reduced velocity* (Ur), bilangan Keulegan-Carpenter (KC), rasio kecepatan aliran arus (α), parameter stabilitas (Ks), rasio celah dasar laut (e/D), bilangan Strouhal (St), dan kekasaran pipa (k/D). Untuk situasi aliran yang didominasi arus stabil, timbulnya aliran *cross-flow* VIV dengan amplitudo yang signifikan biasanya terjadi pada nilai Ur antara 3,0 sampai 4,0, sedangkan tingkat getaran maksimum terjadi pada nilai Ur yang lebih besar. Untuk pipa dengan massa spesifik rendah, situasi aliran yang didominasi gelombang atau skenario bentang dengan rasio celah rendah, getaran aliran silang dapat dimulai untuk Ur antara 2 dan 3.

Amplitudo VIV *cross-flow* (A_Z/D) pada kombinasi antara kondisi arus dan kondisi gelombang pada nilai karakteristik maksimum dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.6 Respons Model *Cross-flow* (DNV-RP-F105)

2.2.5 *Safety Factor*

Faktor keamanan atau *safety factor* merupakan suatu hal yang sangat penting dalam analisis dan perencanaan struktur secara keseluruhan, khususnya di bidang rekayasa struktur. Faktor keamanan untuk parameter VIV pada pipa sudah ditentukan oleh DNV-RP-F105 sebagai berikut:

Tabel 2.1 Faktor Keamanan Sebagai Parameter VIV (DNV-RP-F105)

Safety Factor	*Safety Class*		
	Low	*Normal*	*High*
η	1,0	0,5	0,25
γ_k	1,0	1,15	1,30
γ_s	1,3		
$\gamma_{on,IL}$	1,1		
$\gamma_{on,CF}$	1,2		

2.2.6 Panjang Bentangan Bebas yang Diizinkan

Guo (2005) menyatakan bahwa panjang bentangan bebas kritikal atau pipa yang tidak memiliki penyokong dibawahnya dimana osilasi pipa terjadi untuk arus tertentu didasarkan oleh hubungan antara frekuensi natural dari bentangan bebas pipa dan *reduced velocity* (U_r). Panjang bentangan bebas kritikal pipa ditinjau berdasarkan dua macam kondisi, yaitu: *cross-flow motion* dan *in-line motion.*

Persamaan untuk mencari panjang bentangan bebas kritikal pada kondisi *cross-flow* adalah:

$$L_c = \sqrt{\frac{C_l U_r D}{2\pi U_c}\sqrt{\frac{EI}{M_e}}} \qquad (15)$$

Dimana:

L_c	= Panjang maksimum bentangan bebas pipa
C_l	= Konstanta bentangan bebas pipa
U_r	= *Reduced velocity*
D	= Diameter total pipa
U_c	= Kecepatan arus
E	= Modulus young
I	= Momen inersia
M_e	= Massa efektif pipa

Persamaan untuk mencari panjang bentangan bebas kritikal pada kondisi *in-line* adalah:

$$L_c = \sqrt{\frac{C_l f_n}{2\pi}\sqrt{\frac{EI}{M_e}}} \qquad (16)$$

Dimana:

L_c	= Panjang maksimum bentangan bebas pipa
C_l	= Konstanta bentangan bebas pipa
U_c	= Kecepatan arus
f_n	= Frekuensi natural pipa
E	= Modulus young
I	= Momen inersia
M_e	= Massa efektif pipa

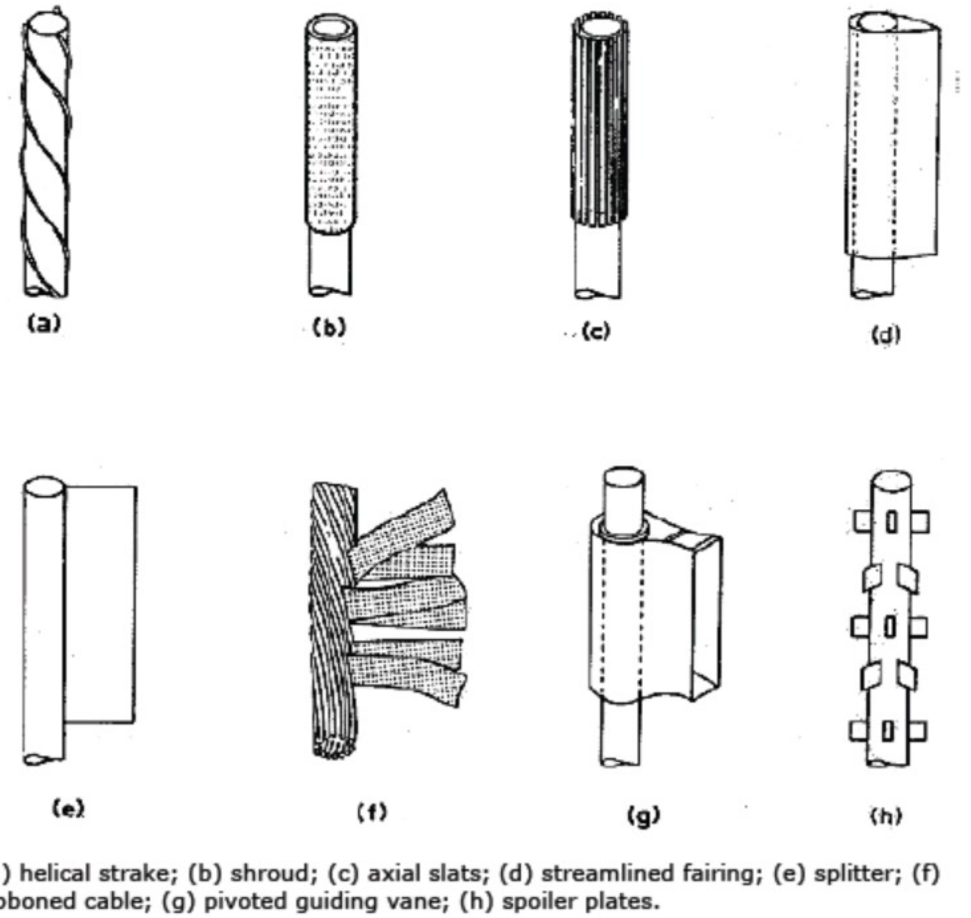
2.2.7 *Suppression Device*

Menurut Howells & Lim (1999), biasanya *riser* dan *pipeline* gagal untuk memenuhi kriteria desain karena adanya VIV. Dalam kondisi seperti ini, desainer memilih:

- Mendesain ulang dengan merubah massanya untuk mengurangi buoyancy, meningkatkan ketegangan, atau mendesain ulang total.
- Menambahkan VIV *suppression device* untuk mengurangi getaran.

Frekuensi natural untuk *risers* dan *pipeline* biasanya didominasi oleh tegangan dan bukan dari kekakuan *bending* struktural struktur itu sendiri.

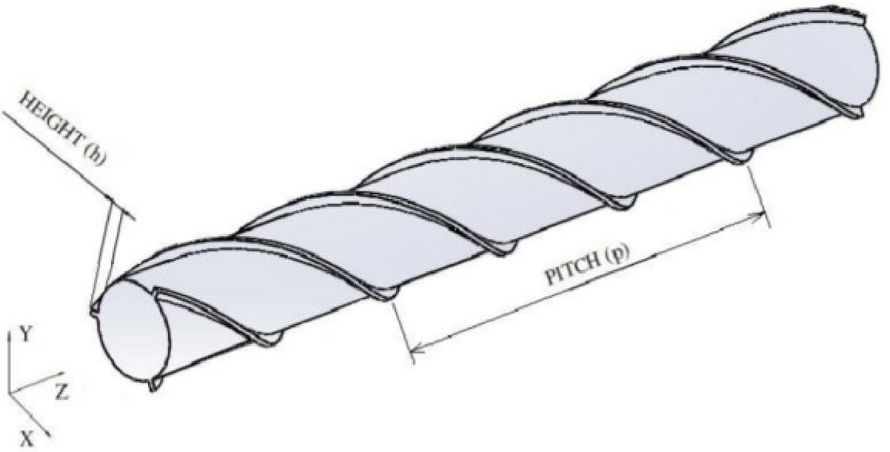
Alat peredam *(suppression device)* difungsikan untuk memecah aliran arus yang membentuk *vortex shedding* di belakang pipa sehingga mengurangi getaran yang ditimbulkan. Ada banyak jenis *suppression device* yang biasa digunakan seperti Gambar 2.6 dibawah, namun pada tugas akhir ini jenis *suppression device* yang diteliti adalah jenis *helical strakes* dan *triple helical rods.*



Gambar 2.7 Alat Tambahan Sebagai Peredam VIV Pada Silinder (Dalton, 2013)

2.2.7.1 ***Helical Strakes***

Penggunaan *VIV suppression device* seperti *helical strakes* dan *fairing* dapat mengurangi getaran dari VIV ke tingkat yang lebih wajar. *Helical strakes* dapat mengganggu pola aliran sekitar silinder yang menyebabkan pusaran menjadi memendek dan melemah (Bai & Bai, 2005).



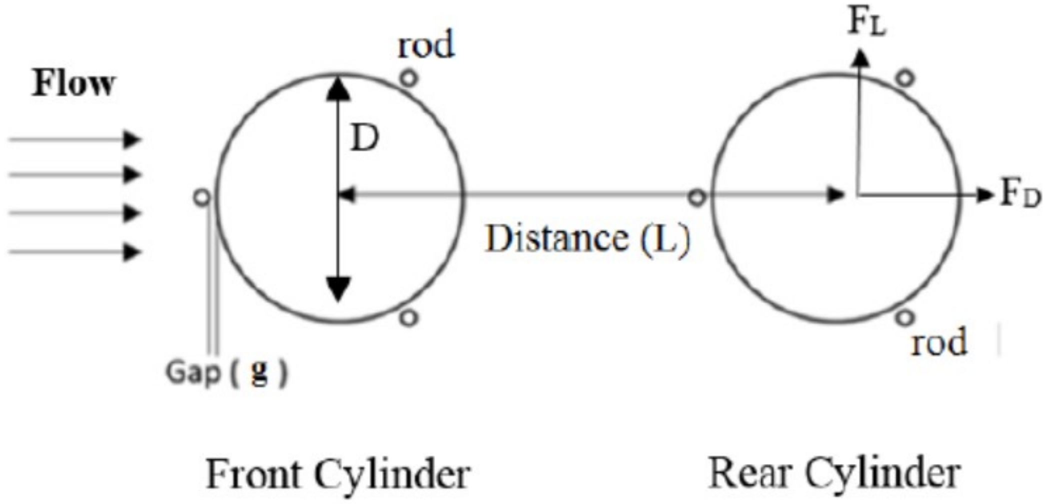
Gambar 2.8 Silinder Melingkar Dengan *Helical Strakes* (Ranjith, 2016)

Perangkat supresi yang paling umum digunakan adalah *helical strakes*. Fungsinya untuk memicu pemisahan aliran untuk mengurangi korelasi *vortex shedding* di sepanjang silinder. Mereka meningkatkan biaya pipa, dan mereka akan mempersulit penanganan selama instalasi. Koefisien drag *in-line* meningkat dengan adanya *strakes* (DNV-RP-F105).

Dimensi *helical strakes* yang akan digunakan sebagai alat peredam adalah: pitch(p) = 10D dan height(h) = 0.15D (Ranjith, 2016).

2.2.7.2 ***Triple Helical Rods***

Menurut Prastianto et al. (2018) dalam penelitiannya, membuktikan bahwa dua silinder yang diberikan *triple helical rods* bersebelahan memberikan efek perisai oleh silinder depan terhadap silinder yang belakang dan aliran fluida gangguan diantaranya menyebabkan pengurangan koefisien gesek pada silinder belakang.



Gambar 2.9 Ilustrasi Dimensi Silinder Dengan *Triple Helical Rods* (Prastianto, 2018)

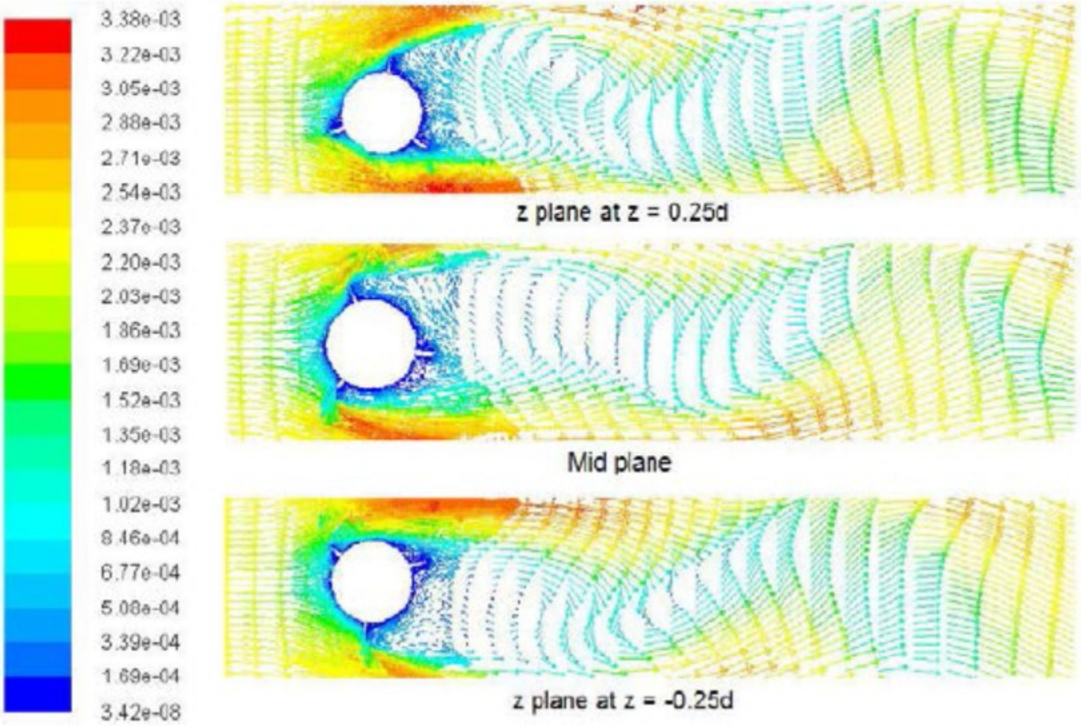
Dimensi *triple helical rods* pada Gambar 2.8 diatas yang akan digunakan sebagai alat peredam adalah: *rods* berdiameter (d) = 0,059D yang secara memutar mengelilingi pipa dengan konfigurasi *triple* beserta celah (g) antara *rods* dan pipa sebesar 0,0625D.

2.2.8 Pemodelan *Suppression Device*

Sebelum dilakukannya simulasi VIV menggunakan *computational fluid dynamic* (CFD) harus terlebih dahulu dibuat model 3D agar memudahkan proses-proses saat dilakukan simulasi dan analisis numerik. Dengan *software* ANSYS fluent, pemodelan dengan *software* lain dapat digunakan sebelumnya. Contohnya untuk tugas akhir ini akan digunakan *software* AutoCAD 3D untuk pemodelan *suppression device.* Setelah pemodelan dengan dimensi yang ditentukan selesai, model 3D dapat di *import* ke *software* ANSYS untuk melakukan simulasi fluida.

2.2.9 *Computational Fluid Dynamic* (CFD)

Computational fluid dynamic (CFD) adalah komputasi yang digunakan untuk melakukan simulasi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena aliran lainnya menggunakan analisis numerik. Dengan bantuan komputer, perhitungan kompleks yang dibutuhkan untuk menyimulasi hubungan antara permukaan benda padat dengan fluida dapat diketahui.



Gambar 2.10 Ilustrasi Simulasi CFD Pada Silinder Dengan *Helical Strakes*

(Ranjith, 2016)

Malalasekera (2007) menyebutkan beberapa kelebihan dari CFD dibandingkan dengan pendekatan eksperimen terhadap sistem fluida sebagai berikut:

- Waktu dan biaya yang jauh lebih sedikit dibandingkan dengan membuat model fisik
- Kemampuan untuk mempelajari sistem lebih mudah dibandingkan dengan eksperimen terkontrol yang sulit.

- Kemampuan untuk mempelajari sistem dalam kondisi berbahaya pada dan di luar batas kinerja normalnya.
- Hasil dan detail yang lebih memungkinkan.

Dalam pengerjaan *computational fluid dynamic* (CFD) sendiri memiliki beberapa tahap yang dijelaskan oleh Malalasekera (2007), diantaranya adalah:

1. *Pre-Processor*

   Pre-Processing terdiri dari menginputkan masalah aliran ke program CFD melalui *interface* yang ramah-operator dan transformasi selanjutnya dari input ini menjadi bentuk yang sesuai untuk digunakan oleh pemecah. Aktivitas pengguna pada tahap *pre-processing* meliputi:
   - Mendefinisikan geometri dari daerah yang dituju (domain komputasi)
   - Menggenerasikan *grid,* membagikan bagian domain menjadi angka yang lebih kecil atau yang disebut dengan *mesh.*
   - Pemilihan dari fenomena apa yang dibutuhkan untuk pemodelan.
   - Mendefinisikan properti-properti fluida.
   - Menspesifikasikan batasan kondisi sel yang bertepatan dan menyentuh batas domain.
2. *Solver*

   Ada tiga aliran yang berbeda dari teknik solusi numerik: perbedaan hingga, elemen hingga dan metode spektral. Secara garis besar, algoritma numeric terdiri dari langkah-langkah berikut:
   - Integrasi persamaan yang mengatur aliran fluida sepanjang volune kontrol pada domain.
   - *Discretisation*: konversi persamaan integral yang dihasilkan menjadi sistem persamaan aljabar.
   - Solusi dari perhitungan aljabar menggunakan metode iteratif.
3. *Post-processor*

   Post-processing adalah proses dimana *software* menampilkan hasil dari *solving* sebelumnya. Hasil yang bisa dilihat dari pengerjaan adalah: Geometri domain, plot vector, plot 2D & 3D, *tracking* partikel, dan animasi hasil dinamis.

   Dalam pengerjaan tugas akhir ini, *software* CFD yang digunakan untuk melakukan simulasi dari model *suppression device* yang dibuat adalah menggunakan ANSYS Fluent.

2.2.10 Koefisien Hambatan *(Drag Coefficient)*

Ketika fluida bergerak melewati benda padat, aliran tersebut akan memberikan gaya tekanan normal ke permukaan dan gaya geser sejajar dengan permukaan di sepanjang permukaan luar benda. Komponen resultan tekanan dan gaya geser yang bekerja dalam arah aliran disebut gaya hambat (atau *drag force*). Gaya hambat dapat diukur secara langsung hanya dengan menempelkan benda yang terkena aliran fluida ke pegas yang dikalibrasi dan mengukur perpindahan dalam arah aliran (seperti mengukur berat dengan skala pegas). Perangkat pengukur gaya hambat yang lebih canggih, yang disebut keseimbangan gaya hambat, menggunakan balok fleksibel yang dilengkapi dengan pengukur regangan untuk mengukur gaya hambat secara elektronik.

Drag biasanya merupakan efek yang tidak diinginkan, seperti gesekan, dan dilakukan cara yang terbaik untuk meminimalkannya. Gaya hambatan bergantung pada densitas fluida (ρ), kecepatan datang (V), ukuran, bentuk, dan orientasi benda. Namun dinyatakan tidak praktis

untuk membuat daftar gaya-gaya ini untuk berbagai situasi. Maka dari itu dibuatlah nilai non-dimensional yang mempresentasikan karakteristik hambatan dari sebuah benda yang dinamakan dengan *drag coefficient* (Cd) dengan rumus:

$$Cd = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho\, V^2 A} \quad (17)$$

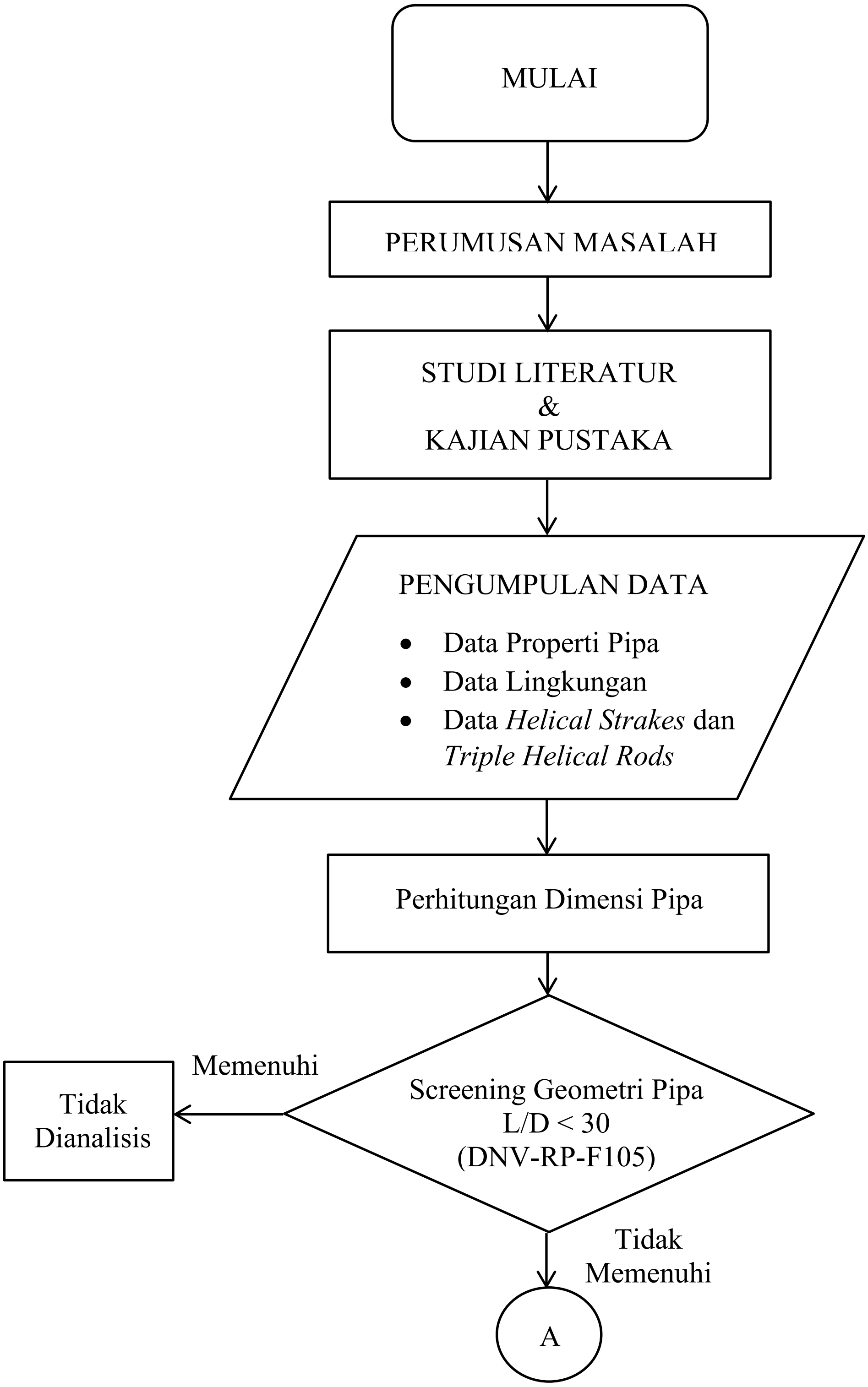
Dimana A biasanya adalah area frontal (area yang diproyeksikan pada bidang yang tegak lurus) terhadap benda. Dan $\frac{1}{2}\rho\, V^2$ adalah tekanan dinamis.

(Cengel, 2016)

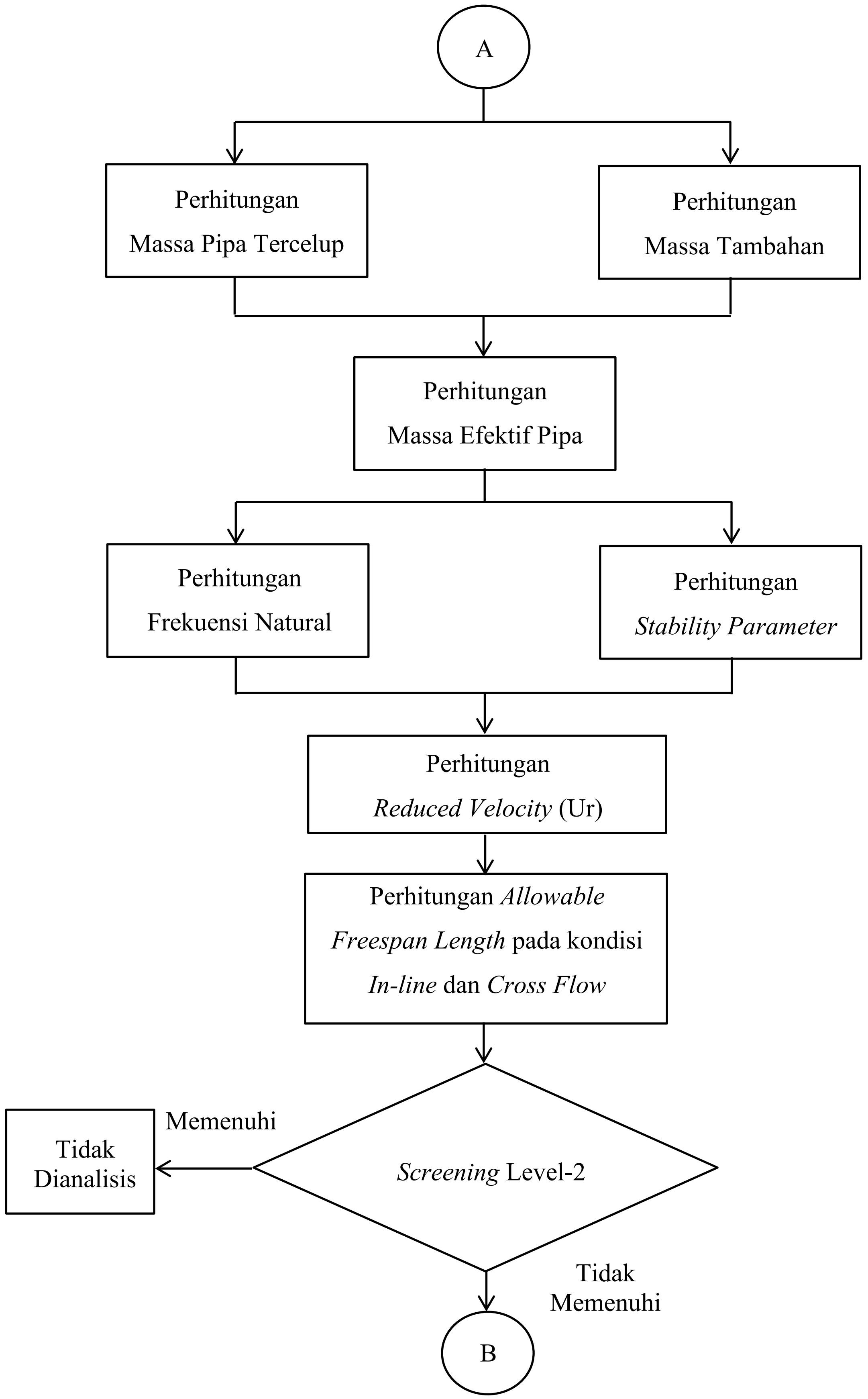
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III
METODE PENELITIAN

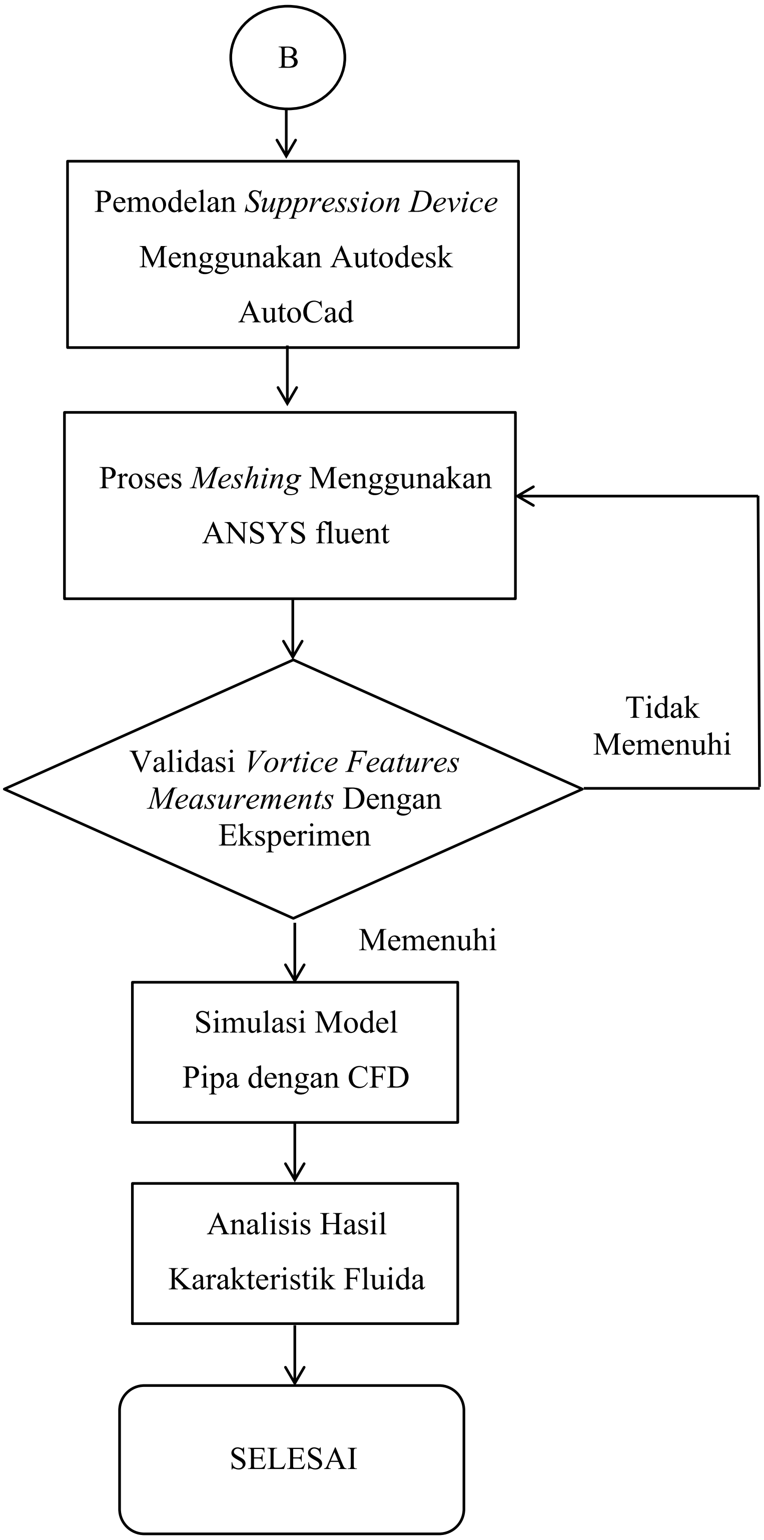
3.1 Diagram Alir Pengerjaan Skripsi *(flowchart)*



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir *(flowchart)*



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir *(flowchart)*



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir *(flowchart)*

3.2 Penjelasan Diagram Alir

Flow chart diatas (Gambar 3.1) digunakan untuk menggambarkan aliran pengerjaan guna menyelesaikan permasalahan pada tugas akhir ini. Selanjutnya dibawah ini akan dijelaskan beberapa tahapan pengerjaan tersebut yaitu sebagai berikut:

1. **Perumusan Masalah**

   Pengerjaan pertama dari tugas akhir ini adalah dengan merumuskan masalah-masalah yang sekiranya relevan dengan topik yang ingin diteliti dalam tugas akhir. Dengan dilakukannya perumusan tersebut, maka dapat diketahui masalah apa yang akan dipecahkan sehingga bisa dicari solusi dari masalah tersebut. Setelah perumusan masalah selesai, tujuan dan manfaat dari tugas akhir ini pun bisa dengan mudah ditemukan.

2. **Studi Literatur & Kajian Pustaka**

   Tahapan selanjutnya adalah mengumpulkan bahan dan materi yang digunakan untuk bahan studi. Literatur yang dipakai adalah buku, jurnal penelitian, kumpulan tugas akhir, dan *codes* yang berhubungan dengan topik tugas akhir ini. *Codes* yang digunakan adalah DNV-RP-F105 (*Free Spanning Pipelines*).

3. **Pengumpulan Data**

   Tahap berikutnya dalam tugas akhir ini adalah pengumpulan data property pipa, data lingkungan, dan juga data hasil penginspeksian *18" Export Pipeline* di Terang Sirasun Batur Field. Data-data tersebut didapatkan dari pengumpulan bahan penulis saat melakukan kerja praktek di Kangean Energy Indonesia Ltd.

4. **Perhitungan Dimensi Pipa**

   Setelah data properti pipa berhasil dikumpulkan, tahap selanjutnya adalah menganalisis. Perhitungan pertama yang dilakukan adalah perhitungan diameter total pipa yang merupakan penambahan diameter luar pipa, *concrete,* dan *coating* pipa yang digunakan untuk perhitungan tahap selanjutnya.

5. ***Screening* Geometri Pipa**

   Setelah diameter total ditemukan, tahap selanjutnya adalah *screening* geometri pipa yang dilakukan untuk menentukan lolos atau tidaknya *free span* menurut kriteria L/D<30 dari DNV-RP-F105. *Free span* yang lolos disimpulkan bahwa bentangan tersebut masih dibatas wajar sehingga tidak dianalisis lebih lanjut untuk diberikan penambahan *suppression device.* Sebaliknya, *free span* yang tidak lolos akan dilakukan perhitungan lebih lanjut sampai diketahui panjang maksimum *free span* yang diperbolehkan.

6. **Perhitungan Massa Efektif Pipa**

   Massa efektif pipa merupakan penambahan massa pipa tercelup dengan massa tambahan. Dengan didapatkannya massa efektif pipa, perhitungan frekuensi natural dan parameter stabilitas dapat dilakukan.

7. **Perhitungan Frekuensi Natural dan Parameter Stabilitas**

   Setelah ditemukan massa efektif pipa, dapat dilanjutkan dengan mencari frekuensi natural (Fn) pipa dengan memasukkan koefisien kondisi *free span* sebesar 9,87 karena tumpuan pipa pada *free span* dianggap pin-pin. Parameter stabilitas (K_s)

juga dapat dicari menggunakan massa efektif pipa yang telah didapatkan sebelumnya.

8. Perhitungan Panjang Maksimum *Free Span*

Untuk analisis selanjutnya akan dicari panjang *free span* maksimum yang diperbolehkan untuk pipa bawah laut. Analisis tersebut ditinjau dalam dua kondisi, yaitu: kondisi *cross flow* dan kondisi *in line.* Analisis ini akan digunakan untuk *screening* bentangan bebas, bentangan bebas yang tidak lolos *screening* akan ditinjau lebih lanjut untuk dianalisis *fatigue damage* dan estimasi sisa umur pipa.

9. Pemodelan dan Simulasi *Suppression Device*

Pemodelan 3d dari dua jenis *suppression device* dibuat dengan bantuan software AutoCAD 3D. Setelah pemodelan dilakukan, model pipa polos, pipa *helical strakes,* dan pipa *triple helical rods akan* disimulasikan dengan bantuan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) menggunakan *software* ANSYS fluent. Setelah simulasi fluida dilakukan, dapat dilihat pergerakan arus *vortex* yang terjadi di bagian belakang pipa, selain itu kita juga bisa melihat koefisien hambatan dari tiap model pipa yang disimulasikan.

10. Validasi Hasil Simulasi dengan Eksperimen

Validasi dilakukan dengan melihat beberapa eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya oleh para peneliti. Simulasi pipa polos dilakukan dengan kecepatan aliran pada Re=40 dan dilihat koefisien hambatan (Cd), letak pusat vorteks (a/D,b/D), dan juga sudut separasi (θ) sebagai pengukuran bandingan untuk validasi model. Setelah pipa polos tervalidasi, dilakukan simulasi pada model pipa lain yang menggunaan *suppression device.*

11. Analisis Karakteristik Fluida

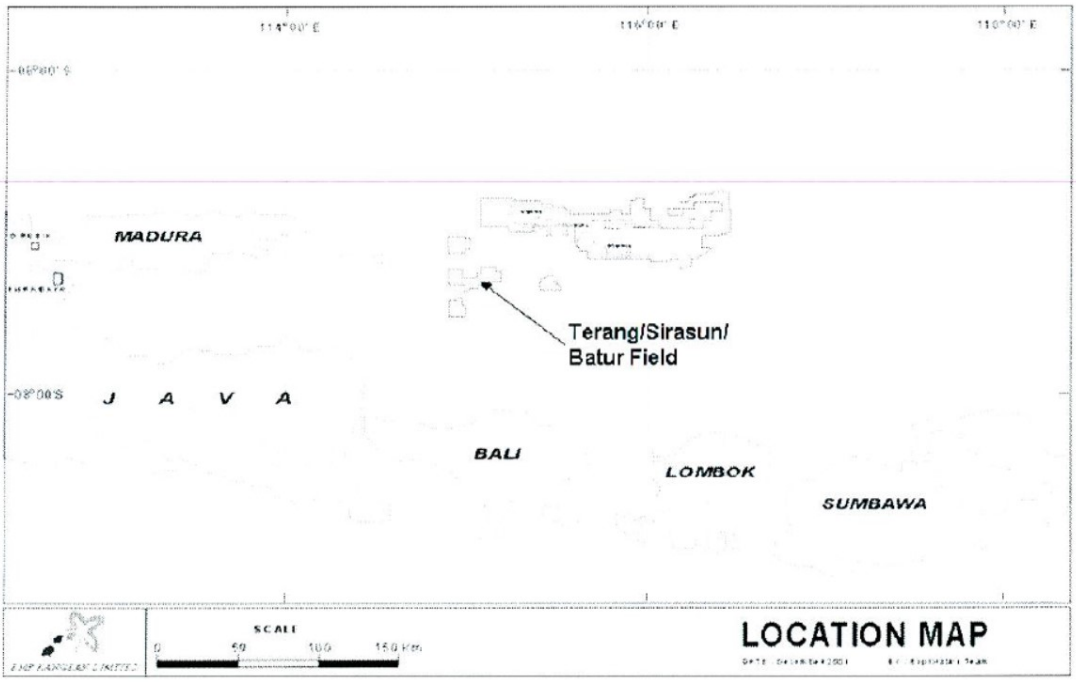
Setelah didapatkan koefisien hambatan dan kecepatan di area vorteks maka akan dianalisis pergerakan alirannya dan juga dibandingkan untuk membuktikan bahwa *suppression device* merupakan alternatif yang baik untuk pencegahan *vortex induced vibration* (VIV) pada pipa bawah laut.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV
ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Studi Kasus

Pada tugas akhir ini, penulis mengambil studi kasus dan data-data dari *Export Pipeline* berdiameter 18 inch yang terletak di Lapangan Terang Sirasun Batur milik Kangean Energy Indonesia ltd.



Gambar 4.1 Peta Lapangan Terang Sirasun Batur (TSB) Milik Kangean Energy Indonesia Ltd. (Kangean Energy Indonesia Ltd, 2011)

Terang Sirasun Batur (TSB) terdiri dari empat pengembangan lapangan gas lepas pantai yang berada di area yang aktif secara seismik yaitu: Terang, Sirasun Timur, Sirasun Barat, dan Batur di Laut Bali Utara. Lapangan tersebut terletak 120 km dari Pulau Pagerungan, Indonesia. Dari *Fugro Geophysical Survey Final Report No. S2014-02 Rev.1* menyebutkan bahwa kedalaman laut di tempat tersebut adalah sekitar 95 m. Di lapangan ini terdapat sembilan pengembangan sumur bawah laut yang memproduksi gas dan akan disalurkan ke *floating production unit* (FPU). Gas yang diolah kemudian diukur secara fiskal dan akan disalurkan melalui *export pipeline* berdiameter 18 inch ke *East Java Gas Pipeline* (EJGP) sehingga bisa dikirimkan ke pengguna.

Dari data yang didapatkan melalui *Export Pipeline Spanning Analysis Report* tahun 2011, terdapat banyak segmen pipa mengalami bentangan bebas yang panjangnya berkisar antara 1 m sampai 44 m dengan berbagai kedalaman. Dari laporan juga dapat diketahui data dari pipa bawah laut seperti data properti pipa, data *concrete coating,* dan data *corrosion coating*. Dengan meninjau data-data tersebut, panjang kritis bentangan bebas dapat dihitung sehingga bisa diketahui pipa segmen mana yang membutuhkan *suppression device* sebagai peredam *vortex induced vibration* (VIV).

4.2 Data Pipa Bawah Laut

a. Data Properti Pipa

Dari laporan *Export Pipeline Spanning Analysis Report,* didapatkan data properti *18" Diameter Export Pipeline* milik Kangean Energy Indonesia Ltd. sebagai berikut:

Tabel 4.1 Data Properti Pipa (Kangean Energy Indonesia Ltd, 2011)

Pipeline Properties			
Parameter		Nilai	Unit
Nominal Outer Diameter (OD)		457.2	mm
		0.4572	m
Wall Thickness	(WT)	12.7	mm
		0.0127	m
Material Type		API X-65	
Density		7800	Kg/m^3
SMYS		448	Mpa
Design Pressure		13.79	Mpag
		2000	psig
Hydrotest Pressure		15.51	Mpag
		2250	psig
Max. Operating Pressure		12.41	Mpag
		1800	psig
Max. Operating Temperature		120	℉
Min. Operating Temperature		75	℉
Max. Design Temperature		124	℃
Modulus Young		207	Gpa
Rasio Poisson		0.3	
Massa Jenis Pipa		7850	kg/m3

b. Data *Coating* Pipa

Coating (pelapis) yang digunakan pada *18" Diameter Export Pipeline* di Lapangan Terang Sirasun Batur (TSB) adalah:

Tabel 4.2 Data *Coating* Pipa (Kangean Energy Indonesia Ltd, 2011)

Item	Unit	Description
Material	-	
Corrosion coating thickness	mm	6
Corrosion coating density	kg/m3	1300
Concrete coating thickness	mm	40
Concrete coating density	kg/m3	3043

c. Data Arus Bawah Laut

Karena pembatasan beban lingkungan yang sudah ditentukan sebelumnya, maka yang diperlukan dari data *metocean* Kangean Energy Indonesia Ltd. adalah data arus yang dicantumkan di Tabel 4.3

Tabel 4.3 Data *Extreme Current* di Lapangan Terang Sirasun Batur (Kangean Energy Indonesia Ltd, 2011)

Arah Arus	Probabilitas	Periode Ulang		
		1 Tahun	10 Tahun	100 Tahun
		Unit (m/s)		
Omni	1	0.6	0.8	0.9
0	0.126	0.48	0.55	0.62
30	0.066	0.38	0.43	0.49
60	0.06	0.42	0.48	0.54
90	0.044	0.51	0.58	0.65
120	0.045	0.7	0.8	0.9
150	0.045	0.57	0.65	0.73
180	0.035	0.5	0.57	0.64
210	0.044	0.43	0.5	0.56
240	0.053	0.43	0.49	0.55
270	0.071	0.36	0.41	0.46
300	0.201	0.49	0.56	0.63
330	0.21	0.51	0.59	0.66

54 persen arus tahunan dan 32 persen gelombang terkonsentrasi pada busur 30 derajat dengan arah rata-rata 330 derajat relatif terhadap utara geografis. Jadi secara konservatif dalam input desain, diasumsikan bahwa orientasi *export pipeline* tegak lurus terhadap 330 derajat, membuat jumlah gelombang dan arus yang dominan normal ke pipa. Pengambilan data arus ini diambil pada kedalaman kurang lebih 95 meter dibawah permukaan laut.

d. Data Bentangan Bebas

Data bentangan bebas atau *freespan* didapatkan dari laporan perusahaan yang berjudul *Final Report – Pipeline, Riser, and Flowline* yang diambil saat melakukan inspeksi pada tanggal 29 sampai 31 Mei 2018 menggunakan *Remotely Operated Underwater Vehicle* (ROV). Terdapat sebanyak 603 total *freespans* yang terlihat saat penginspeksian tersebut. Karena terdapat banyaknya bentangan bebas, data akan diperlihatkan pada **Lampiran I** : Hasil Screening ke-1.

4.3 Perhitungan Dimensi Pipa

4.3.1 Diameter Total Pipa (D_{tot})

Pada perhitungan pertama di tugas akhir ini, dilakukan pencarian diameter total pipa yang merupakan diameter luar pipa dengan penambahan tebal *concrete coating* dan *corrossion coating.* Dengan menggunakan data yang didapatkan dari data properti jalur pipa export berdiameter 18 inch, didapatkan:

$$D_{tot} = D_0 + 2t_{concrete} + 2t_{coating}$$

$$= 457{,}2\,mm + (2 \times 40\,mm) + (2 \times 6\,mm)$$

$$= 457{,}2\,mm + 80\,mm + 12\,mm$$

$$= 457{,}2\,mm + 80\,mm + 12\,mm$$

$$= 549{,}2\,mm$$

Dengan ditemukannya $\boldsymbol{D_{tot}}$**= 549,2** mm maka bentangan bebas dapat dilakukan *screening* tahap pertama.

4.3.2 Diameter Dalam Pipa (D_i)

Perhitungan kedua yang dibutuhkan untuk analisis dalam tugas ahir ini adalah mencari diameter dalam pipa (D_i). Dibawah ini adalah persamaan dan perhitungannya:

$$D_i = D_0 - (2 \times WT)$$

$$= 457{,}2\,mm - (2 \times 12{,}7\,mm)$$

$$= 457{,}2\,mm - 25{,}4\,mm$$

$$= 432\,mm$$

Maka diameter dalam (D_i) dari *18" export diameter* adalah $\boldsymbol{D_i}$**= 432 mm.**

4.4 *Screening* Tahap Pertama

Screening level-1 ini dilakukan untuk mengetahui panjang bentangan bebas pipa yang diizinkan. Dengan adanya *screening level-1,* diasumsikan bahwa pipa tidak mengalami kegagalan statis. Pada DNV-RP-F105 juga dijelaskan bahwa respons pipa L/D<30 memperlihatkan amplifikasi dinamis yang kecil dan biasanya tidak diperlukan untuk melakukan pemeriksaan desain kelelahan yang komprehensif. Selain itu, respon dinamis yang tidak signifikan dari beban lingkungan dapat terjadi namun pipa tersebut tidak akan mengalami *vortex induce vibration* (VIV).

Tabel 4.4 Perilaku dari Respons Bentangan Bebas (DNV-RP-F105)

L/D	*Response description*
L/D < 30 [1)]	**Very little dynamic amplification.** Normally not required to perform comprehensive fatigue design check. Insignificant dynamic response from environmental loads expected and unlikely to experience VIV.
30 < L/D < 100	**Response dominated by beam behaviour.** Typical span length for operating conditions. Natural frequencies sensitive to boundary conditions (and effective axial force).
100 < L/D < 200	**Response dominated by combined beam and cable behaviour.** Relevant for free spans at uneven seabed in temporary conditions. Natural frequencies sensitive to boundary conditions, effective axial force (including initial deflection, geometric stiffness) and pipe "feed in". Refer to 1.7 for free span response classification, which provides practical guidance for engineering applications, with respect to single and multi-mode response.
L/D > 200	**Response dominated by cable behaviour.** Relevant for small diameter pipes in temporary conditions. Natural frequencies governed by deflected shape and effective axial force.
1) For hot pipelines (response dominated by the effective axial force) or under extreme current conditions ($U_c > 1.0 - 2.0$ m/s) this L/D limit may be misleading.	

Dengan *screening* data tersebut dapat dilihat *freespan* yang melebihi 30 adalah sebanyak 322 bentangan bebas sehingga dapat diketahui bahwa *freespan* tersebut mengalami gagal statis dan VIV sehingga akan dilanjutkan ke *screening* dinamis atau *screening level-2.* Melihat banyaknya data *freespan 18" export pipeline* milik Kangean Energy Indonesia Ltd. yang tidak memenuhi L/D<30 hasil dari *screening level-1,* hasil dari *screening* tersebut akan dilampirkan pada Lampiran 1.

4.5 Perhitungan Massa Efektif Pipa

Massa efektif pipa secara teoritis merupakan penjumlahan dari 3 massa, yakni: massa struktural pipa, massa konten pipa, dan massa tambah. Berikut dibawah ini adalah proses perhitungan dari massa efektif pipa:

a. Massa Struktural Pipa

Massa struktural pipa merupakan penjumlahan dari massa pipa baja itu sendiri ditambahkan dengan massa *coating,* pada *18" export pipeline* ini menggunakan dua jenis *coating,* yakni *concrete coating* dan *corrossion coating.* Berikut dibawah ini adalah perhitungan dari massa struktural pipa:

- Massa pipa baja (m_{st})
  Dimulai dengan mencari luas penampang baja (A_{st}) kemudian ditambahkan dengan massa jenis dari baja jenis API X-65 maka akan didapatkan massa pipa baja.

$$A_{st} = \pi \frac{(D0^2 - Di^2)}{4}$$
$$= \pi \frac{(0{,}457^2 - 0{,}432^2)}{4}$$
$$= \pi \frac{(0{,}208 - 0{,}186)}{4}$$
$$= 0{,}0177419 \text{ m}^2$$

$$m_{st} = A_{st} \times \rho_{st}$$
$$= 0{,}0177419 \text{ m}^2 \times 7800 \text{ kg/m}^3$$
$$= 138.38682 \text{ kg/m}$$

Dari perhitungan diatas didapatkan bahwa massa pipa baja adalah 138.38682 kg/m.

- Massa *concrete coating* (m_{conc})
  Perhitungan massa *concrete coating* dilakukan dengan mencari diameter *concrete coating* terlebih dahulu:

$$D_{wc} = D_0 + 2(t_{cc} + t_{conc})$$
$$= 457{,}2\ mm + 2(6\ mm + 40\ mm)$$
$$= 457{,}2\ mm + 92\ mm$$
$$= 0{,}549 \text{ m}$$

Setelah diameter *concrete* didapatkan, perhitungan massa *concrete coating* bisa dilakukan:

$$m_{conc} = \pi \frac{(Dwc^2 - D0^2)}{4} \rho_{conc}$$
$$= \pi \frac{(0{,}549^2 - 0{,}457^2)}{4} 3043$$
$$= \pi \frac{(0.301 - 0{,}208)}{4} 3043$$
$$= \pi \frac{0{,}0925}{4} 3043$$
$$= 221{,}3732073 \text{ kg/m}$$

Hasil perhitungan tersebut memperlihatkan bahwa massa *concrete coating* adalah 221,3732073 kg/m.

- Massa *corrossion coating* (m_{cc})
  Untuk mencari massa *corrossion coating,* diperlukan diameter lapisan anti korosi (D_{cc}) yang dapat dicari dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$D_{cc} = D_0 + 2.t_{cc}$$
$$= 457{,}2\ mm + 2 \times 6\ mm$$
$$= 457{,}2\ mm + 12\ mm$$
$$= 0{,}469\ m$$

Setelah diameter lapisan anti korosi ditemukan, perhitungan massa lapisan anti korosi dapat dicari.

$$m_{cc} = \pi \frac{(Dcc^2 - D0^2)}{4} \rho_{cc}$$
$$= \pi \frac{(0{,}469^2 - 0{,}457^2)}{4} 1300$$

$= \pi \frac{(0.2199 - 0,2088)}{4} 1300$
$= \pi \frac{0,011}{4} 1300$
$= 11,35501714$ kg/m

Dengan rumus diatas dapat diketahui massa dari lapisan anti korosi, yakni 11,35501714 kg/m.

Setelah diketahui massa pipa baja, pelapis anti korosi, dan pelapis beton ditemukan, massa struktural pipa dapat dicari dengan menjumlahkan ketiga massa tersebut:

$m_{str} = m_{st} + m_{cc} + m_{conc}$
$= 138.38682$ kg/m + 11,35501714 kg/m + 221,3732073 kg/m
$= 371,1150445$ kg/m

Maka dari itu, massa dari struktural pipa tersebut adalah **371,1150445 kg/m.**

b. Massa Konten Pipa

Massa konten pipa adalah massa dari fluida yang berada di dalam pipa dengan mendasarkan diameter dalam pipa tersebut. Dalam tugas akhir ini, *18" export pipeline* digunakan oleh Kangean Energy Indonesia Ltd. untuk menyalurkan gas alam yang diambil oleh FPU Jokotole, maka dari itu digunakan 0,717 kg/m^3 sebagai massa jenisnya.

$A_i = \pi (\frac{Di^2}{4})$
$= \pi (\frac{0,432^2}{4})$
$= \pi \left(\frac{0,186624}{4}\right)$
$= 0,1464974029$ m^2

Setelah luas penampang internal pipa ditemukan, perhitungan massa konten pipa dapat dilakukan dengan memasukan luas penampang internal pipa tersebut ke persamaan dibawah ini:

$m_c = A_i \times \rho_c$
$= 0,1464974029$ m^2 × 0,717 kg/m^3
$= 0,1050386378$ kg/m

Maka dari itu, massa konten dari pipa ini adalah **0,1050386378 kg/m.**

c. Massa Tambah Pipa

Massa tambah pipa dilakukan dengan mempertimbangkan diameter total pipa dan juga massa jenis air laut menggunakan persamaan dibawah ini:

$$m_a = \frac{\pi}{4} D_{tot}^2 \cdot \rho_w$$
$$= \frac{\pi}{4} 0,5492^2 \ .1025 \ kg/m^3$$
$$= \frac{\pi}{4} 0,3016 \ .1025 \ kg/m^3$$
$= 242,9123369$ kg/m

Setelah melakukan perhitungan diatas, didapatkan massa tambah pipa sebesar **242,9123369 kg/m.**

Setelah massa struktural, massa konten, dan massa tambah pipa ditemukan, maka massa efektif pipa dapat dicari dengan menjumlahkan semua massa tersebut:

$m_e = m_{str} + m_c + m_a$

$= 371{,}1150445 \text{ kg/m} + 0{,}1050386378 \text{ kg/m} + 242{,}9123369 \text{ kg/m}$

$= 614{,}13242 \text{ kg/m}$

Dari perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa massa efektif (m_e) dari pipa export berdiameter 18 inch di Lapangan Terang Sirasun Batur adalah **614,13242 kg/m.** Massa efektif dari pipa tersebut kemudian dapat digunakan untuk mencari frekuensi natural dan juga *allowable freespan length.*

4.6 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa

Frekuensi alami bentang pipa tergantung pada kekakuan pipa, kondisi ujung bentang pipa, panjang bentang, dan massa efektif pipa. Frekuensi natural untuk getaran rentang pipa dapat dicari dengan persamaan dibawah. Karena panjang dari *freespan* beragam, maka dari itu diberikan contoh perhitungan dengan panjang bentangan bebas sepanjang 44 meter.

$$f_n = \frac{C_e}{2\pi}\sqrt{\frac{EI}{M_e L_s^4}}$$

$$= \frac{9{,}87}{2\pi}\sqrt{\frac{20{,}7 \times 10^{10} \cdot 38{,}52 \times 10^{-4}}{614{,}13242 \ \cdot 44^4}}$$

$$= \frac{9{,}87}{2\pi}\sqrt{\frac{797543392{,}6}{2.301.827.266{,}87232}}$$

$$= \frac{9{,}87}{2\pi}\sqrt{\frac{797543392{,}6}{2.301.827.266{,}87232}}$$

$$= \frac{9{,}87}{2\pi}\sqrt{\frac{797543392{,}6}{2.301.827.266{,}87232}}$$

$$= \frac{9{,}87}{2\pi}\sqrt{0{,}34648}$$

$$= \frac{9{,}87}{2\pi}0{,}5886$$

$$= \frac{5,8097}{2\pi}$$

$$= 0,92\ Hz$$

Maka dari itu, dapat dilihat bahwa frekuensi natural (fn) untuk bentangan bebas sepanjang 44 meter adalah $\boldsymbol{f_n}$ **=0,92 Hz**. Frekuensi natural tersebut dapat dilanjutkan untuk pencarian *Reduced Velocity* (Ur) dan juga *allowable freespan length* kondisi *in-line.* Karena hasil dari frekuensi natural bergantung dengan panjang bentangan bebas, frekuensi natural per bentangan bebas akan beragam sehingga seluruh frekuensi natural akan ditampilkan pada **Lampiran A.**

4.7 Perhitungan *Reduced Velocity*

Perhitungan *reduced velocity (Ur)* dilakukan untuk melihat kecepatan arus yang telah menabrak pipa (bagian belakang pipa). Dalam perhitungan ini digunakan kecepatan arus ekstrim yang didapatkan dari dokumen Kangean Energy Indonesia Ltd. dengan arah 330^{o} sebesar 0,51 m/s, frekuensi natural, dan diameter total pipa. Berikut dibawah ini adalah contoh perhitungan reduced velocity untuk bentangan bebas sepanjang 44 meter dengan frekuensi natural 0,92 Hz:

$$U_r = \frac{U_c}{f_n D}$$

$$= \frac{0,51\ m/s}{0,92 \cdot 0,5492}$$

$$= \frac{0,51\ m/s}{0,505264}$$

$$= 1,0047\ m/s$$

Dari perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa reduced velocity (Ur) dari *freespan* KP 0,603-0,647 adalah $\boldsymbol{U_r}$ **=1,0047 m/s**. Hasil perhitungan reduced velocity pada bentangan bebas lain dapat dilihat pada Lampiran A.

4.8 Perhitungan *Allowable Freespan Length* (*cross flow* dan *in-line motion*)

4.8.1 Pada Kondisi *Cross-Flow*

Adapun perhitungan untuk mencari *allowable freespan length* pada kondisi *cross flow motion* pada bentangan bebas KP 0,603-0,647 adalah:

$$L_c = \sqrt{\frac{C_l U_r D}{2\pi U_c}\sqrt{\frac{EI}{M_e}}}$$

$$L_c = \sqrt{\frac{9,87 \cdot 3,94 \cdot 0,5492}{2\pi \cdot 2}\sqrt{\frac{20,7 \times 10^{10} \cdot 38,52 \times 10^{-4}}{614,13242}}}$$

$$L_c = \sqrt{\frac{9{,}87 \cdot 3.94 \cdot 0{,}5492}{2\pi \cdot 2}\sqrt{1.298.650{,}52979942}}$$

$$= \sqrt{\frac{21{,}3571798}{2\pi \cdot 2}\sqrt{1.298.650{,}52979942}}$$

$$= \sqrt{\frac{21{,}3571798 \cdot 1.139{,}58}{2\pi \cdot 2}}$$

$$= \sqrt{\frac{6.206{,}172}{12.57142}}$$

$$= \sqrt{1.935{,}99}$$

$$= 44\, m$$

Dapat dilihat bahwa *allowable freespan length* pada kondisi *cross flow motion* di bentangan bebas KP 0,603-0,647 adalah sepanjang 44 meter. Maka dari itu, bentangan bebas KP 0,603-0,647 yang memiliki panjang 44 meter dinyatakan tidak kritis karena tidak melebihi dari panjang bentangan bebas yang diizinkan.

4.8.2 Pada Kondisi *In-Line*

Adapun perhitungan untuk mencari *allowable freespan length* pada kondisi *in-line motion* pada bentangan bebas KP 0,603-0,647 adalah:

$$L_c = \sqrt{\frac{C_l f_n}{2\pi}\sqrt{\frac{EI}{M_e}}}$$

$$= \sqrt{\frac{9{,}87 \cdot 0{,}92}{2\pi}\sqrt{\frac{20{,}7 \times 10^{10} \cdot 38{,}52 \times 10^{-4}}{614{,}13242}}}$$

$$= \sqrt{\frac{9{,}87 \cdot 0{,}92}{2\pi}\sqrt{1.298.650{,}52979942}}$$

$$= \sqrt{\frac{9{,}0804 \cdot 1.139{,}58}{2\pi}}$$

$$= \sqrt{\frac{10.347{,}8422}{2\pi}}$$

$$= \sqrt{1.646{,}910}$$

$$= 40{,}58\ m$$

Dari perhitungan diatas ditemukan bahwa *allowable freespan length* pada kondisi *in-line motion* di bentangan bebas KP 0,603-0,647 adalah sepanjang 40,58 meter. Dengan pernyataan tersebut dapat disimpulkan bahwa bentangan bebas tersebut melebihi panjang *freespan* yang diperbolehkan sehingga bentangan bebas tersebut mengalami kondisi kritis.

4.9 *Screening* Tahap Kedua

Pada *screening level-2* ini dilihat bentangan bebas mana yang memiliki panjang melebihi *allowable freespan length* atau bisa dikatakan bahwa pipa pada bentangan bebas tersebut kritis. Setelah menemukan seluruh *allowable freespan length* pada setiap bentangan bebas, ditemukan dua *free span* yang mengalami krits atau tidak lolos *dinamic screening.* Dua bentangan bebas tersebut adalah *free span* pada KP 0,603-0,647 dan KP 13,810-13,853 yang memiliki panjang sebesar 44 dan 43 meter. Berikut dibawah ini adalah data bentangan bebas yang tidak lolos *screening*:

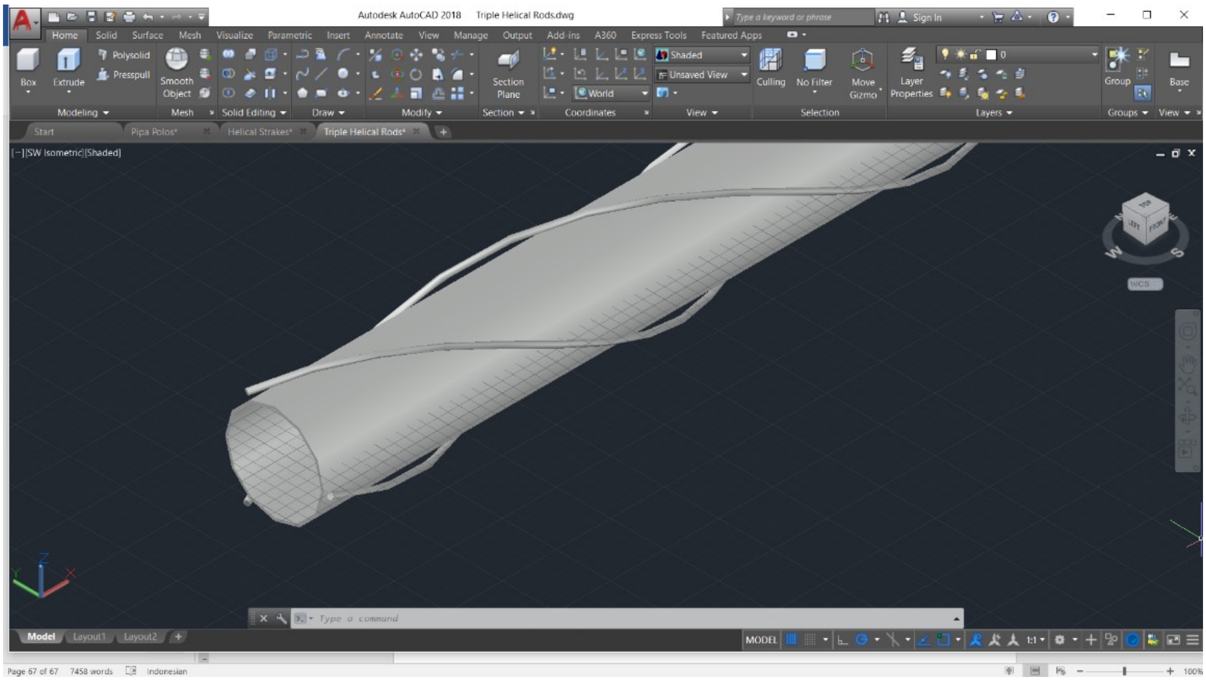
Tabel 4.5 Hasil *Screening* Dinamis

***Freespan* (KP)**	**Panjang (m)**	**Fn (Hz)**	**Ur (m/s)**	**Lcf (m)**	**Kritis?**	**Lil (m)**	**Kritis?**
0,603-0,647	44	0,92	1.005	44	NO	40,66	YES
13,810-13,853	43	0,97	0.96	43	NO	41,61	YES

Sesuai dengan kesepakatan awal, dipilih bentangan bebas yang terpanjang sehingga dipilih bentangan bebas pada KP 0,603-0,647 dengan panjang 44 meter sebagai bentangan bebas yang akan ditinjau untuk penelitian selanjutnya dengan menambahkan *suppression device* untuk dilihat perbedaan analisis karakteristik fluidanya. Seluruh data dan hasil *screening level-2* lainnya dapat dilihat pada Lampiran A.

4.10 Pemodelan Pipa dengan Autodesk AutoCad

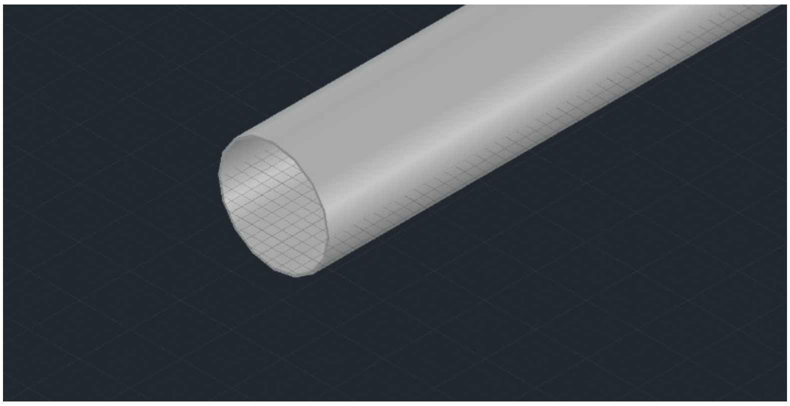
Pemodelan tiga model pipa dilakukan menggunakan AutoCad 3D. Dimensi *helical strakes* yang akan digunakan sebagai alat peredam adalah: pitch(p) = 10D dan height(h) = 0,15D. Sedangkan dimensi triple helical rods yang akan digunakan sebagai alat peredam adalah: rods berdiameter (d) = 0,059D yang secara memutar mengelilingi pipa dengan konfigurasi triple beserta celah (g) antara rods dan pipa sebesar 0,0625D.



Gambar 4.2 Pemodelan *Triple Helical Rods* dengan AutoCad 3D

Berikut dibawah ini adalah rincian dimensi dari masing-masing model pipa yang akan disimulasikan menggunakan ANSYS fluent:

1. Dimensi Pipa Polos

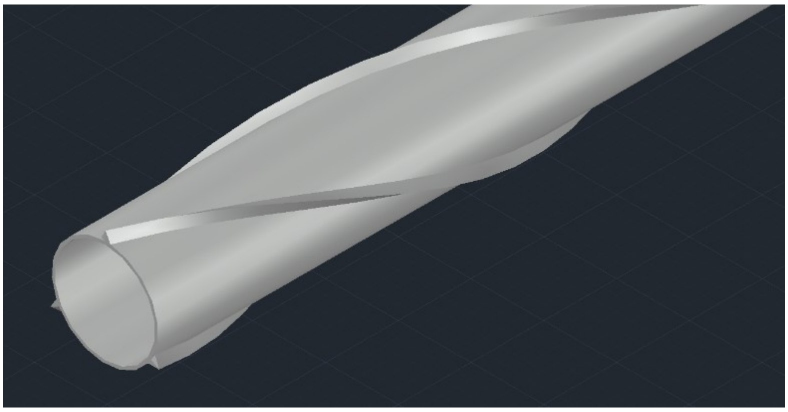


Gambar 4.3 Model Pipa Polos

Dimensi:

Panjang	: 44.000 mm
Diameter	: 457,2 mm
Wall Thickness	: 12,7 mm

2. Dimensi Pipa dengan *Helical Strakes*

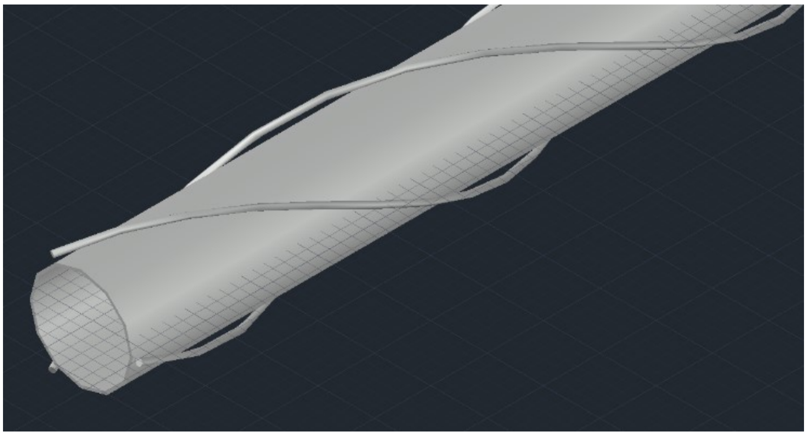


Gambar 4.4 Model Pipa dengan *Helical Strakes*

Dimensi:

Panjang	: 44.000 mm
Diameter	: 457,2 mm
Wall Thickness	: 12,7 mm
Pitch (P)	: 4572 mm
Tinggi device (h)	: 68,58 mm

3. Dimensi Pipa dengan *Triple Helical Rods*



Gambar 4.5 Model Pipa dengan *Triple Helical Rods*

Dimensi:

Panjang	: 44.000 mm
Diameter	: 457,2 mm
Wall Thickness	: 12,7 mm
Pitch (P)	: 4320 mm
Diameter Rods (d)	: 27 mm

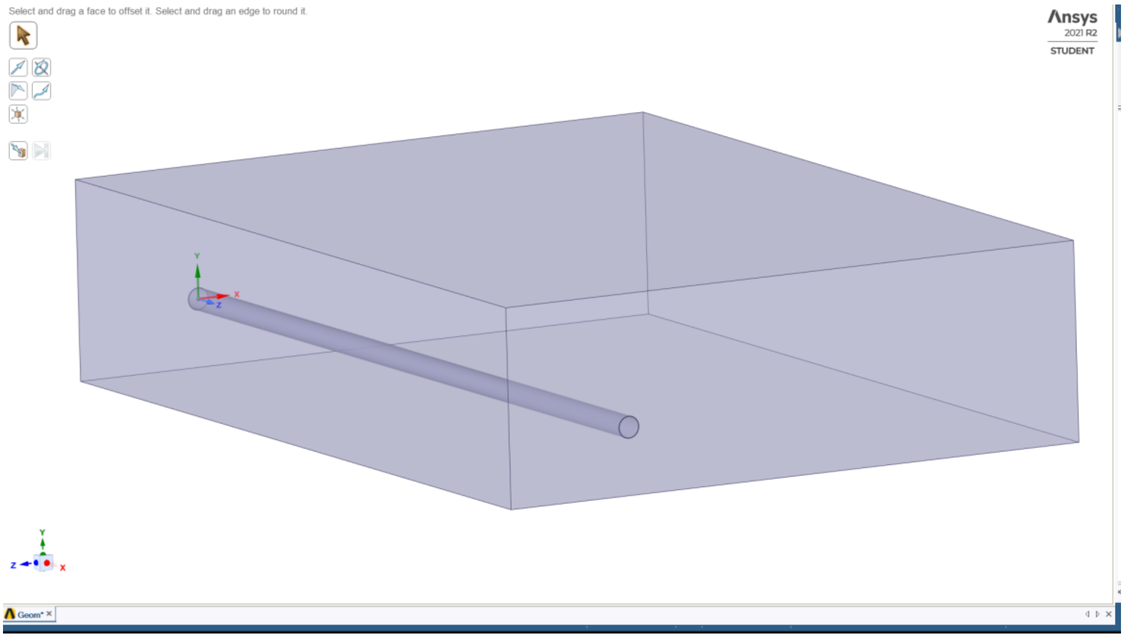
Jarak antara permukaan pipa dengan Rods : 28,575 mm

4.11 Simulasi CFD dengan ANSYS Fluent

Setelah proses pemodelan menggunakan Autodesk AutoCad diselesaikan, proses selanjutnya yang diambil adalah dengan merubah bentuk file dari AutoCad menjadi .sat agar model dari tiga variasi pipa tersebut dapat disimulasikan melalui *software* ANSYS Fluent. Ada beberapa tahapan dalam melakukan simulasi pada *software* tersebut, beberapa diantaranya adalah:

1) Membuat Geometri

Tahap pertama dalam proses *running* ANSYS adalah dengan membuat geometri di sekitar pipa yang ditinjau. Dimensi yang digunakan untuk panjangnya disesuaikan dengan panjang dari *freespan* sedangkan untuk bagian dibawah pipa disesuaikan dengan kedalaman (d) dari *freespan* tersebut.

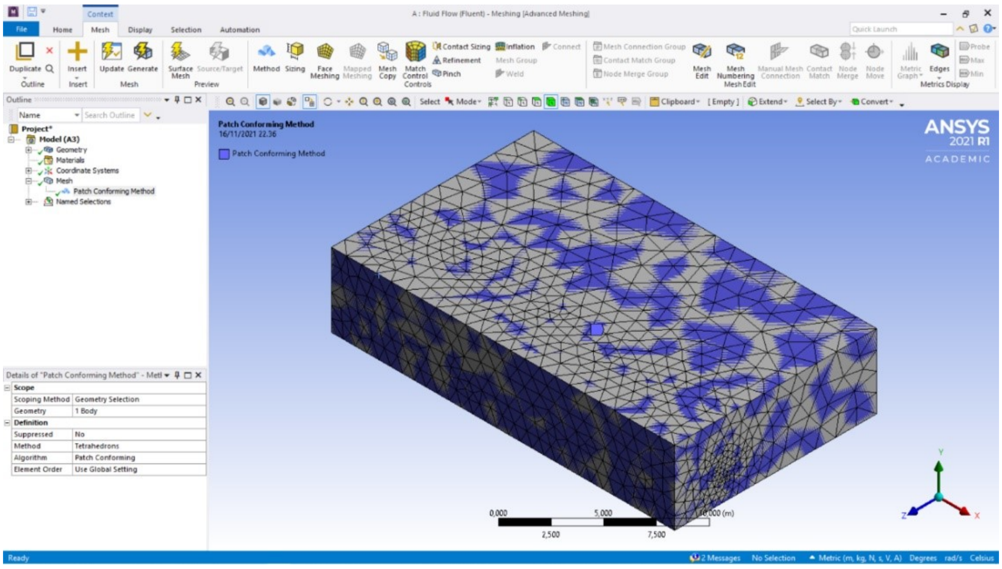


Gambar 4.6 Pembuatan Geometri Pipa dan Bentangan Bebas

Setelah balok tersebut dibuat, bagian tengah dari geometri tersebut dipotong menjadi dua dan menjadikan bagian yang dipotong tersebut dijadikan simetri agar memudahkan penampilan hasil *running* nantinya. Tahap terakhir adalah dengan memberikan nama pada tiap sisi agar menjelaskan fungsional dari setiap sisi tersebut dan membuat *boundary conditions* menjadi mudah pada akhirnya.

2) Membuat *Meshing*

Meshing adalah proses di mana ruang geometris yang ditinjau dari suatu objek dipecah menjadi elemen geometri kompleks yang berjumlah ribuan atau lebih bentuk yang dapat digunakan untuk mendiskritkan domain yang berguna untuk mendefinisikan bentuk fisik objek dengan benar. Semakin detail *mesh* tersebut, semakin akurat pula hasil yang akan diberikan oleh *software* tersebut.

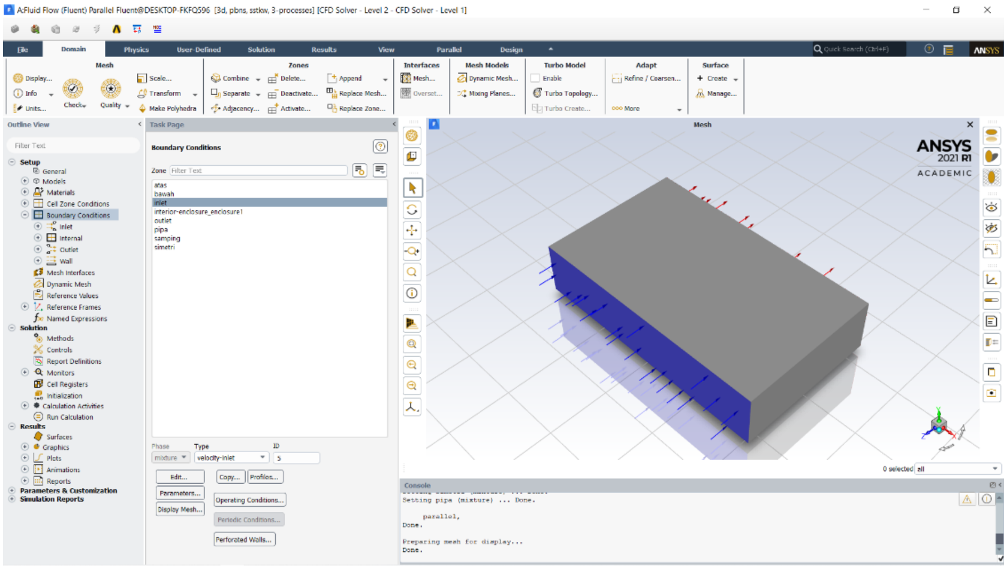


Gambar 4.7 Pembuatan *Meshing* pada ANSYS

Meshing memiliki peran penting dalam proses simulasi rekayasa. Membuat mesh berkualitas tinggi adalah salah satu faktor terpenting yang harus dipertimbangkan untuk memastikan akurasi simulasi. Membuat *mesh* yang paling tepat adalah dasar dari simulasi teknik karena *mesh* mempengaruhi akurasi, konvergensi, dan kecepatan simulasi.

3) Menetapkan *Boundary Conditions*

Langkah ketiga dari proses *running* ANSYS adalah dengan menentukan *boundary conditions.* Dengan menetapkan *boundary conditions,* setiap sisi dari geometri yang telah dibuat akan diberikan batasan dan penetapan sifat dari objek tersebut.

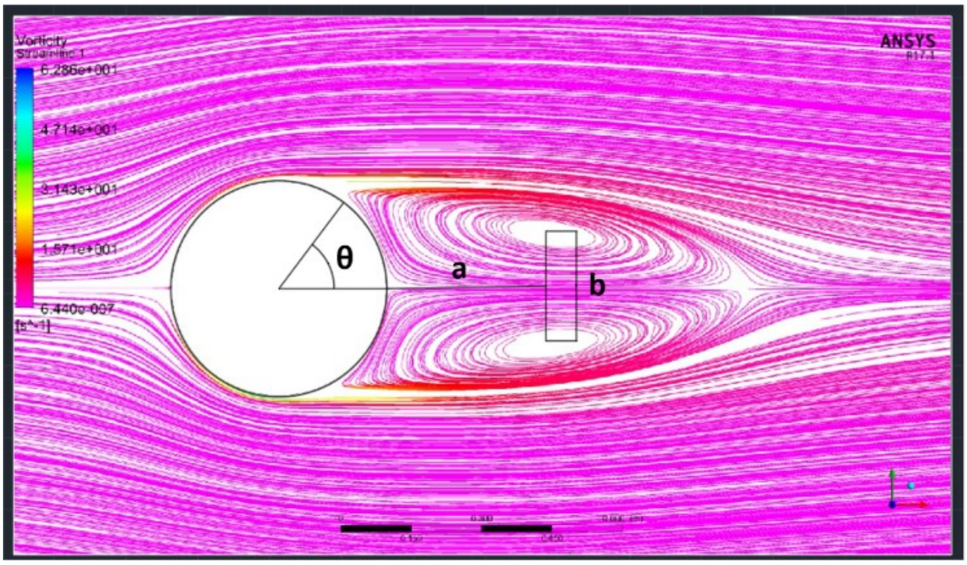


Gambar 4.8 Menentukan *Boundary Conditions*

Seperti contohnya adalah dengan menetapkan bagian sisi yang menjadi *inlet* dan *outlet* sebagai jalur keluar masuknya fluida yang akan lewat didalam geometri tersebut. Selain itu, pada bagian *inlet* juga ditentukan kecepatan fluidanya yang akan memasuki ruang (pada kasus di Tugas Akhir ini adalah kecepatan arus sebesar 0,51 m/s). Dan untuk kondisi batasan dari sisi lainnya akan ditetapkan sebagai *walls* atau dinding.

4.12 Validasi Hasil Simulasi

Pipa polos disimulasikan menggunakan ANSYS fluent dan dibandingkan hasilnya dengan eksperimen lain. Validasi dilakukan pada pipa polos dengan arus laminar pada Re=40. Linnick dan Fasel (2005), Herjford (1996), Berthelsen dan Faltinsen (2007), Russel dan Wang (2003), Xu dan Wang (2006), dan Calhoun (2002) melakukan eksperimen sebelumnya dengan melihat letak pusat vorteks (a/D,b/D), sudut separasi (θ), dan nilai Cd sebagai pengukuran bandingan untuk validasi.



Gambar 4.9 Simulasi Pipa Polos pada Re=40

Berikut dibawah ini adalah tabel dari rincian nilai-nilai yang didapat dan dibandingkan dengan penelitian sebelumnya:

Tabel 4.6 Validasi Pipa Polos pada Re= 40

Eksperimen oleh	a/D	b/D	deg	Cd
Linnick and Fasel (2005)	0,72	0,6	53,6	1,54
Herfjord (1996)	0,71	0,6	51,2	1,6
Berthelsen and Faltinsen (2007)	0,72	0,6	53,9	1,59
Russel and Wang (2003)	-	-	53,1	1,6
Xu and Wang (2006)	-	-	53,5	1,66
Calhoun (2002)	-	-	54,2	1,62
Nilai yang didapat	**0,74**	**0,53**	**53**	**1,6**

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada Tabel IV-6, dapat disimpulkan bahwa nilai pada hasil simulasi pipa polos untuk Re = 40 dapat diterima sesuai dengan pengukuran oleh eksperimen lainnya.

4.13 Analisis Karakteristik Aliran Fluida

Untuk melakukan analisis karakteristik aliran fluida, diperlukan analisis bilangan Reynolds untuk melihat apakah simulasi pada bilangan Reynolds tersebut sama dengan pola *shedding* pada eksperimen sebelumnya.

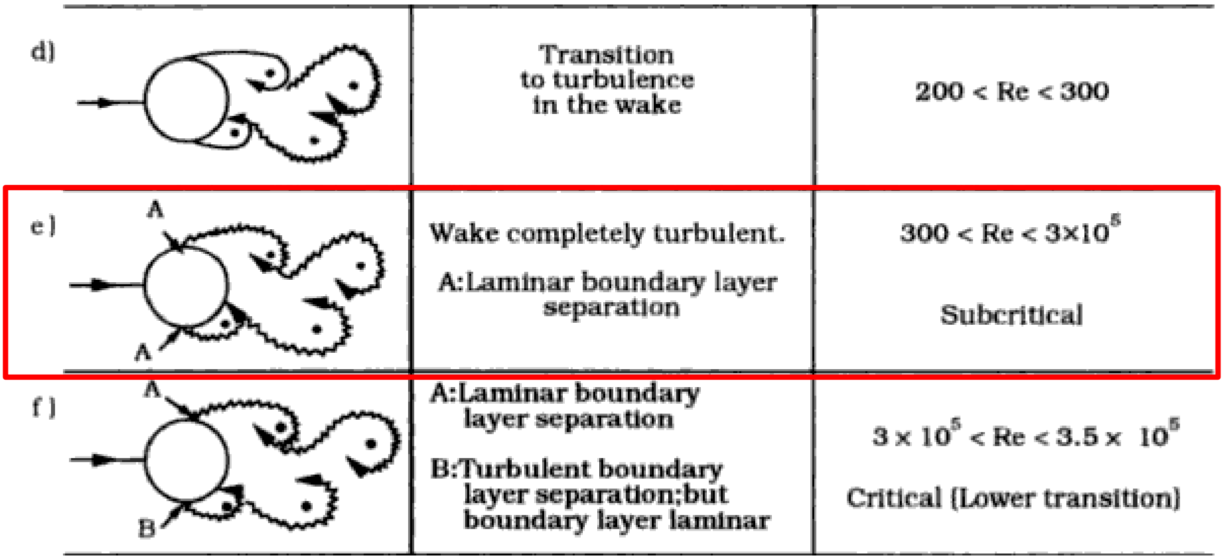
$$Re = \frac{\rho . u . D}{\mu}$$

$$= \frac{1025 \times 0{,}51 \times 0{,}4572}{0{,}00097}$$

$$= \frac{239{,}0013}{0{,}00097}$$

$$Re = 246.393{,}093 \approx 2{,}46 \times 10^5$$

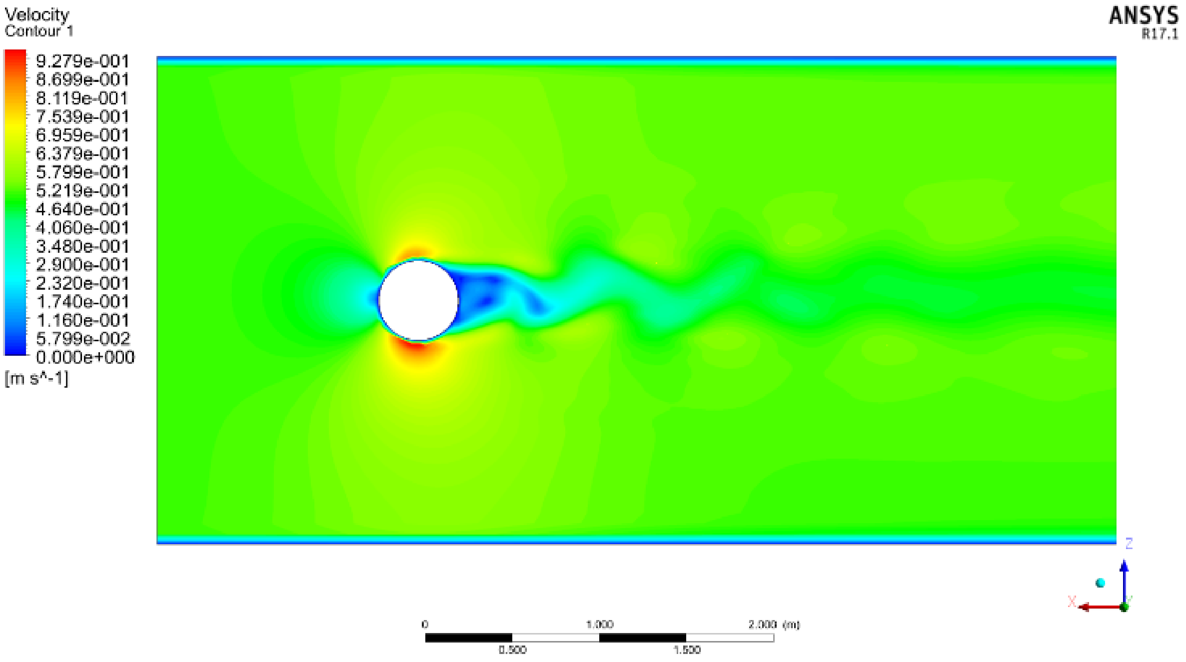
Bilangan Reynold dihitung dengan data berikut: densitas air laut (ρ) = 1025 kg/m^3, kecepatan arus (u) = 0,51 m/s, diameter pipa (D) = 0,4572 m, dan viskositas dinamis (μ) = 0,00097 kg/m.s, sehingga didapatkan bilangan Reynolds sebesar ***Re* = 2,46x10^5**.



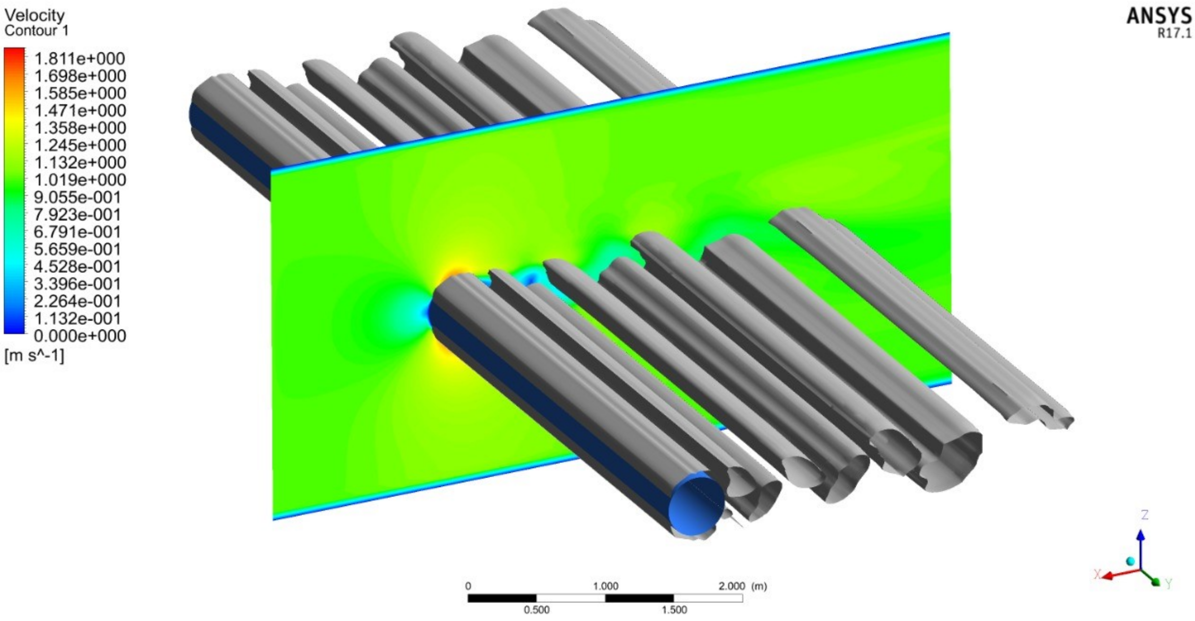
Gambar 4.10 Relasi Pola *Shedding* dengan Bilangan Reynolds

Setelah validasi pipa polos terpenuhi, dilakukan simulasi pada pipa polos, pipa dengan *helical strakes,* dan pipa dengan *triple helical rods* dengan kecepatan aliran arus datang sebesar 0,51 m/s (Re=2,46x10^5). Berikut dibawah ini adalah tampilan dari ketiga simulasi model pipa:

1) Pipa Polos

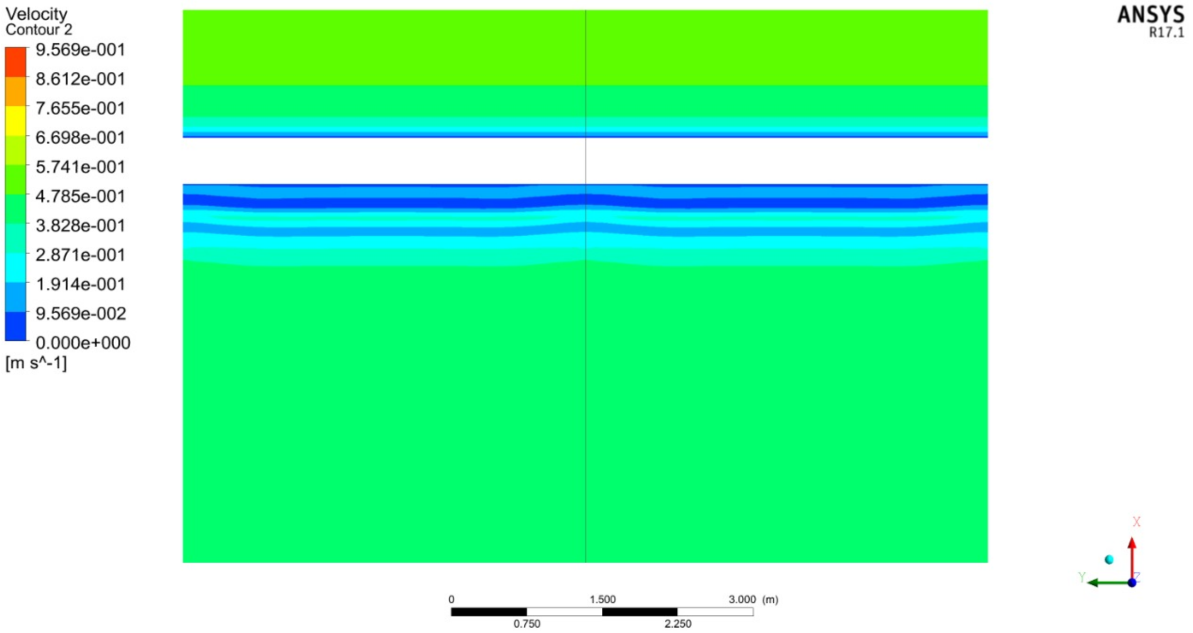


(a)

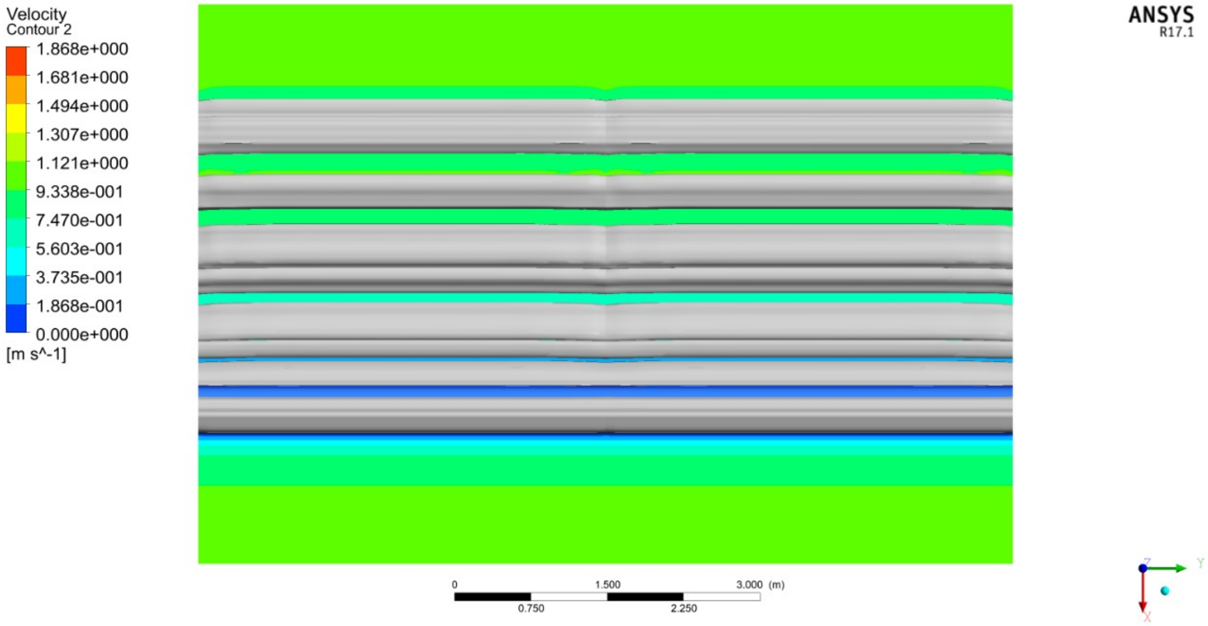


(b)

Gambar 4.11 Simulasi Pipa Polos pada Re=2,46x10^5: Tampak 2d(a) dan Tampak 3d(b)



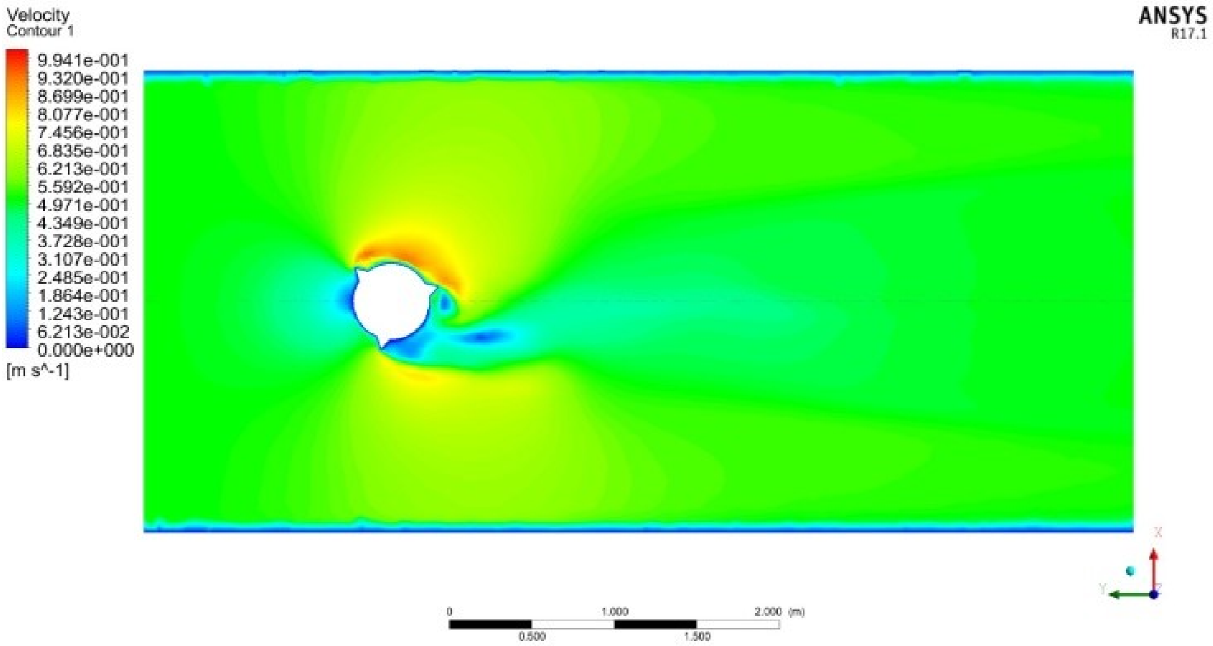
(a)



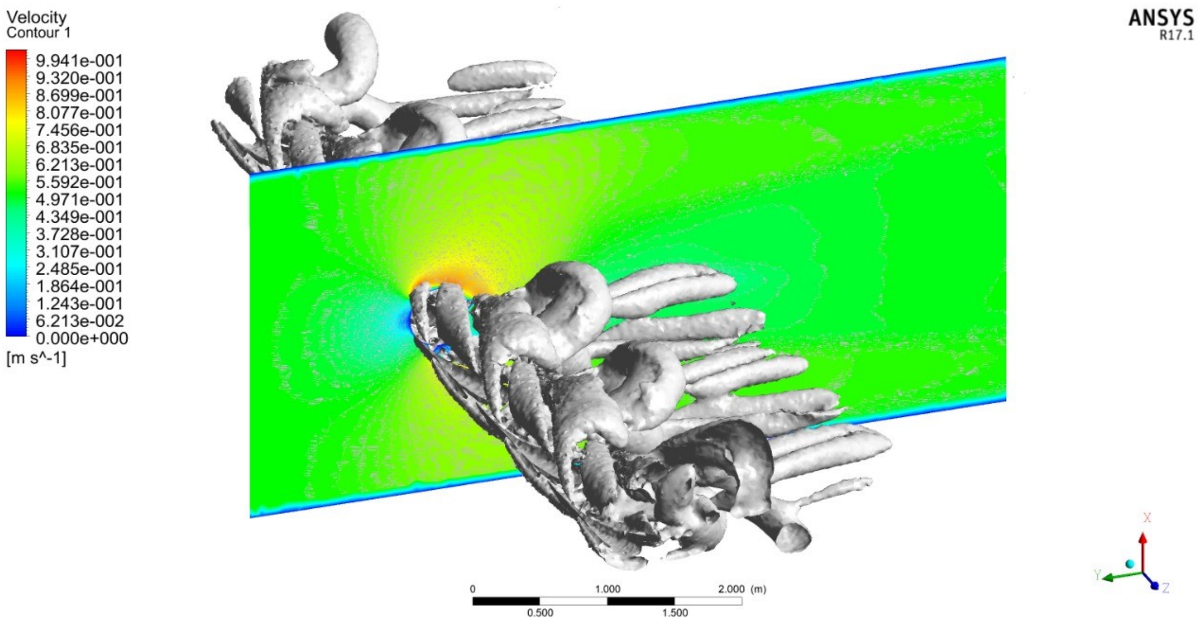
(b)

Gambar 4.12 Simulasi Pipa Polos pada Re=2,46x10^5 Tampak Atas: Tampak 2d(a) dan Tampak 3d(b)

2) Pipa dengan *Helical Strakes*

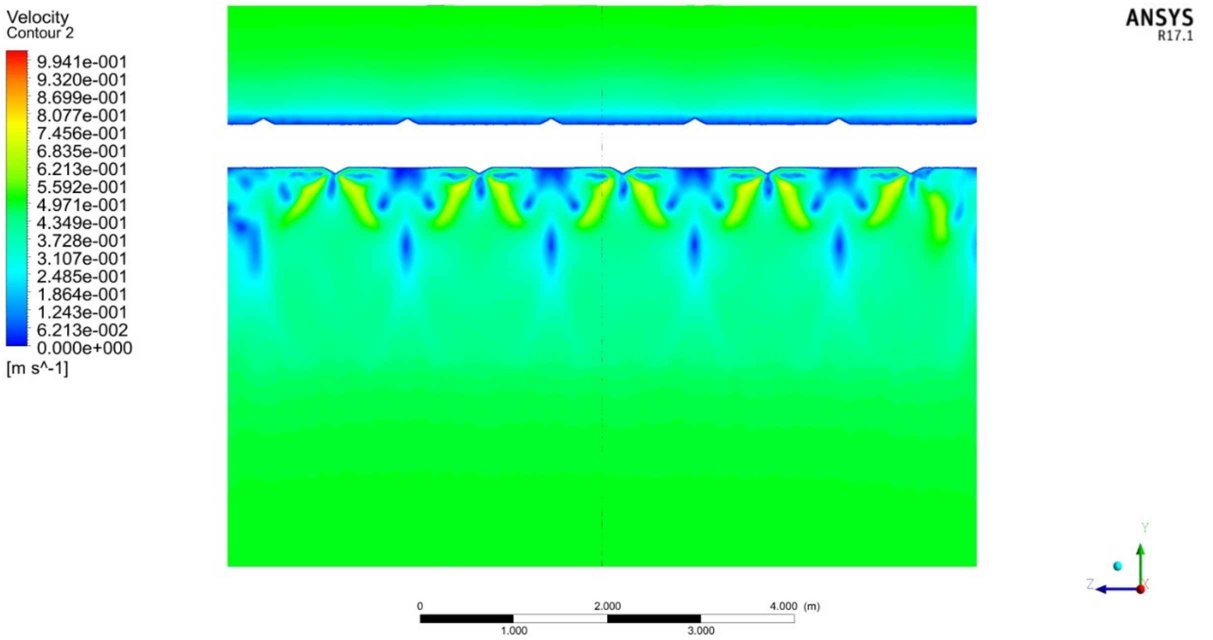


(a)

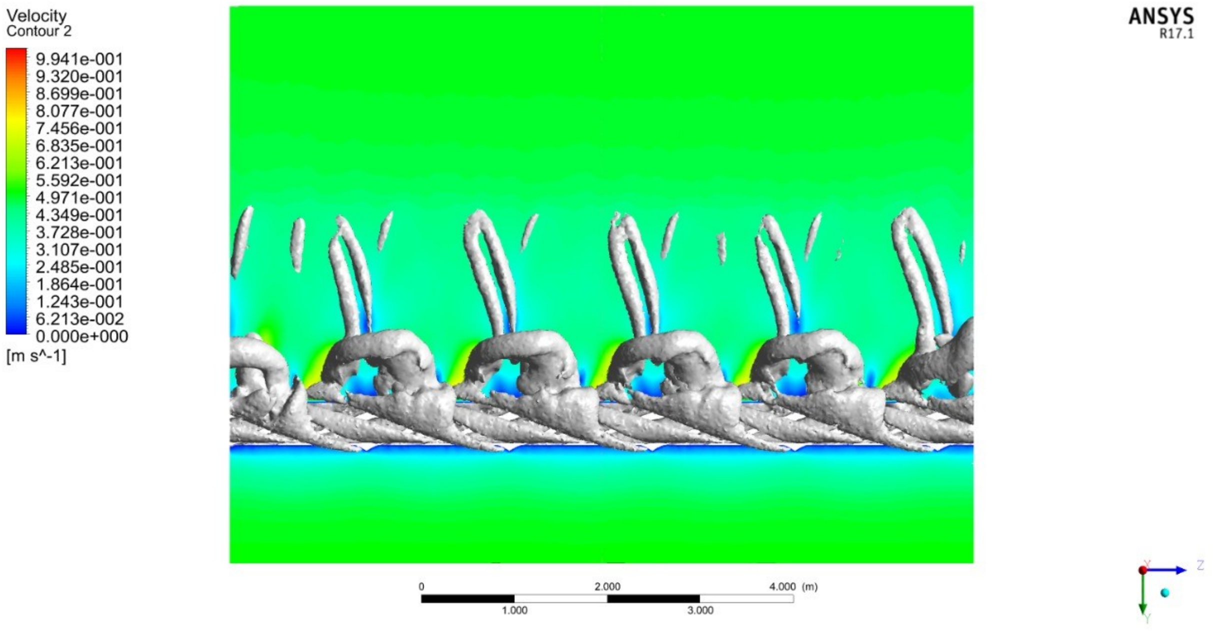


(b)

Gambar 4.13 Simulasi Pipa *Helical Strakes* pada Re=2,46x10^5: Tampak 2d (a) dan Tampak 3d (b)



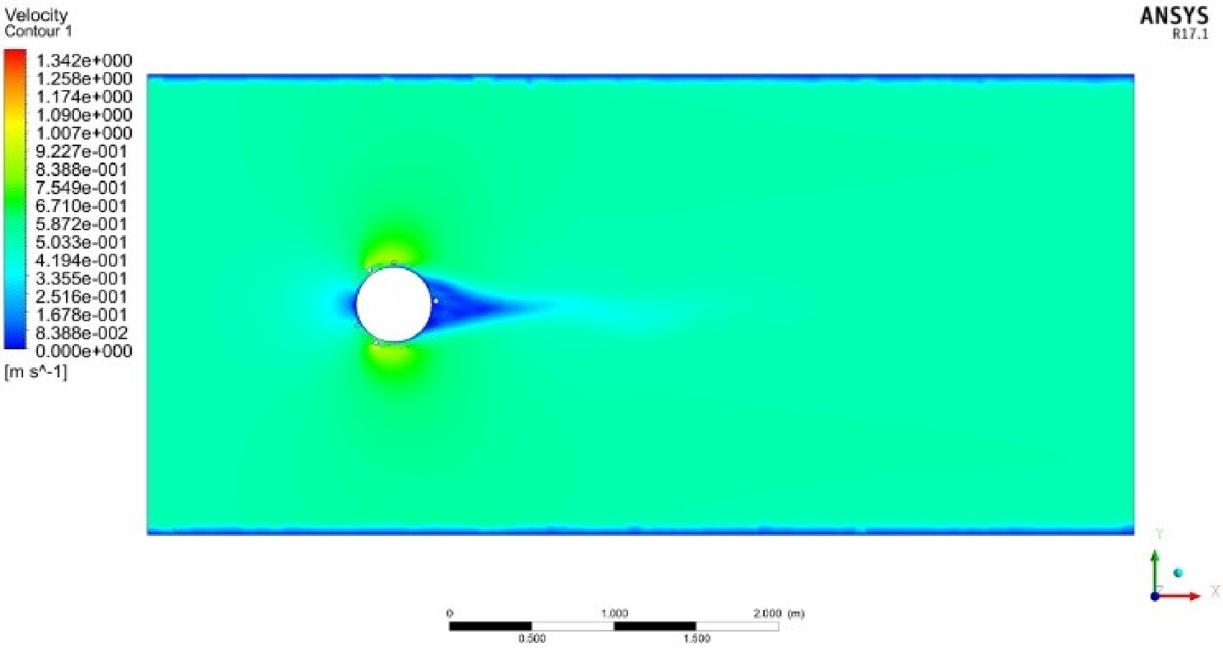
(a)



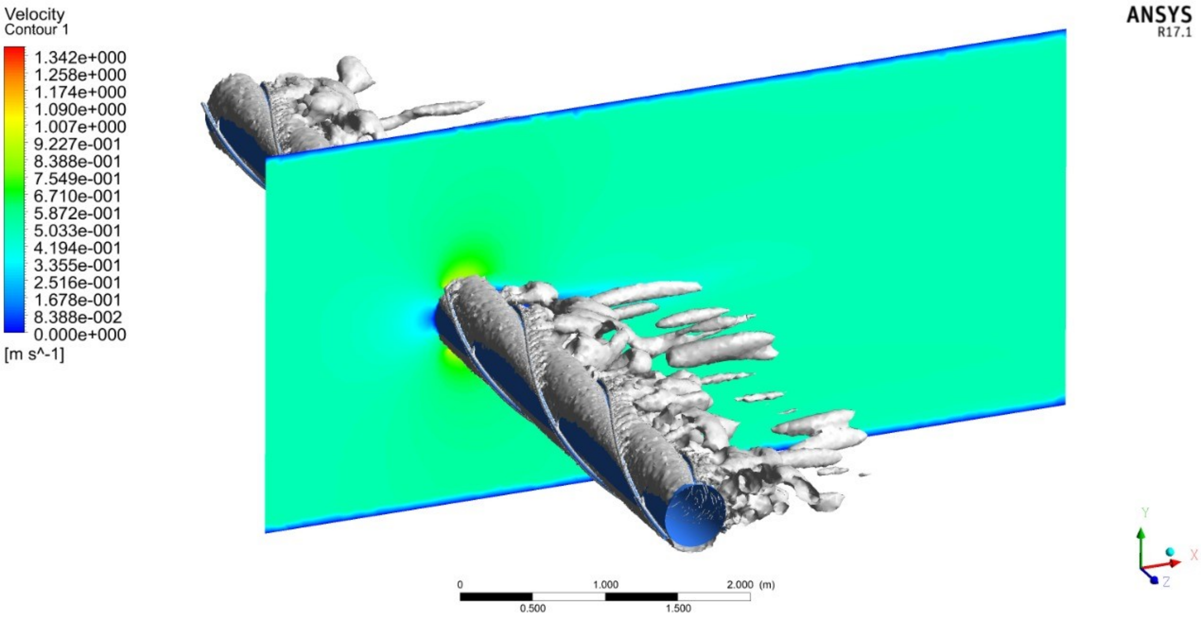
(b)

Gambar 4.14 Simulasi Pipa *Helical Strakes* pada Re=2,46x10^5 Tampak Atas: Tampak 2d(a) dan Tampak 3d(b)

3) Pipa dengan *Triple Helical Rods*

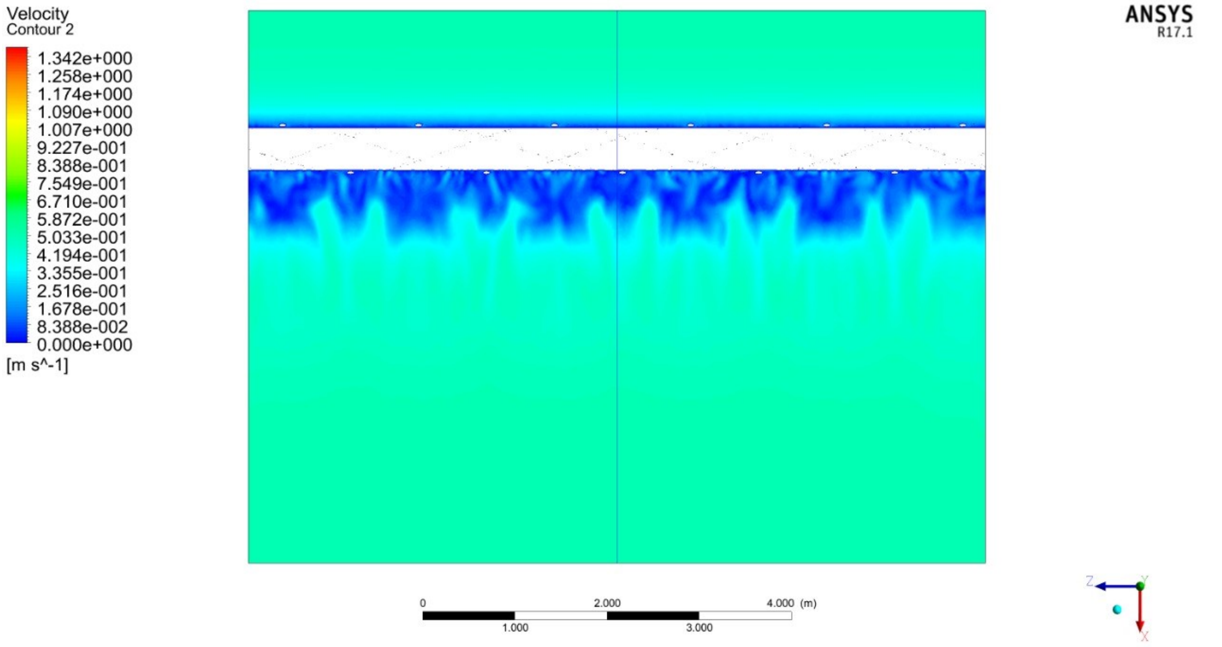


(a)

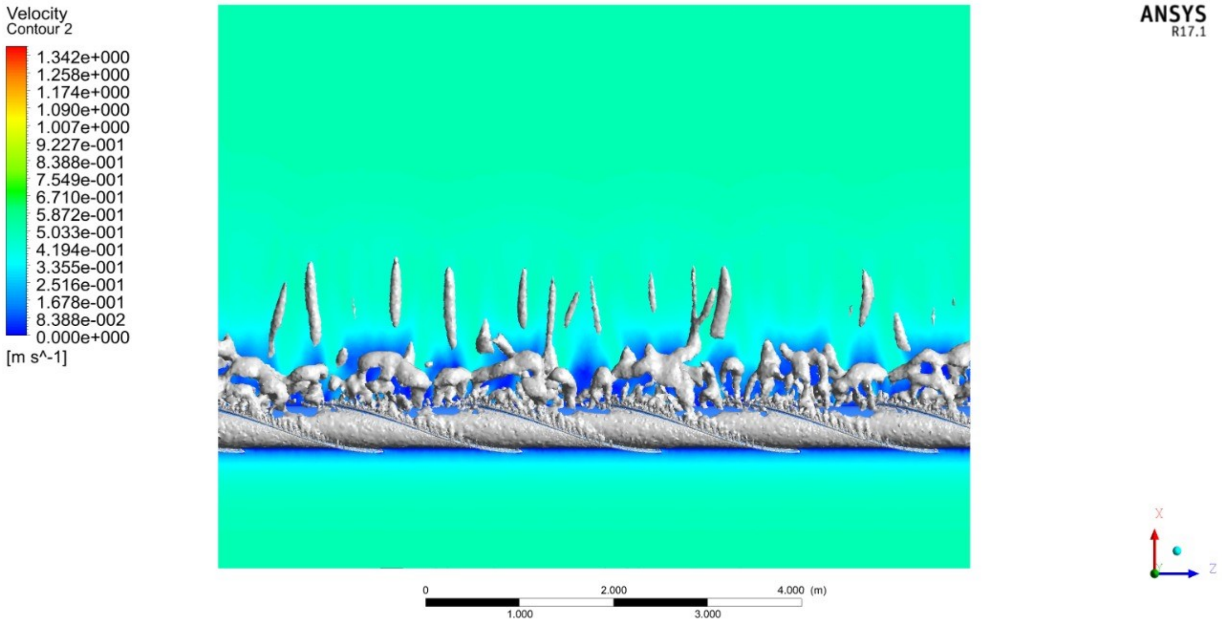


(b)

Gambar 4.15 Simulasi Pipa *Triple Helical Rods* pada Re=2,46x10^5: Tampak Samping (a) dan Tampak Atas (b)



(a)



(b)

Gambar 4.16 Simulasi Pipa *Triple Helical Rods* pada Re=2,46x10^5 Tampak Atas: Tampak 2d(a) dan Tampak 3d(b)

Dapat dilihat pada Gambar 4.11, arus yang menabrak pipa polos terbagi menjadi dua arah, yaitu keatas dan kebawah struktur pipa. Kedua aliran yang melewati pipa polos tersebut menghasilkan area besar aliran terpisah di belakang silinder yang dimakan dengan *wake*. Dari situ terjadilah interaksi yang erat antara dua lapisan *shear* dari pipa polos yang menghasilkan *oscillating wake* di belakangnya dan menimbulkan vorteks.

Dengan penambahan *helical strakes*, aliran arus yang melewati *strakes* terjadi pemisahan lapisan *boundary shear layer* yang signifikan sehingga menghasilkan *wake* yang lebih besar karena aliran yang melewati pipa tertabrak sudut tajam dari *device* tersebut. Sebaliknya pada pipa yang diberikan penambahan *helical rods*, aliran arus yang melewati *rods* tersebut melemahkan *vortex wake* karena bentuknya yang lebih aerodinamis dari *strakes*. Kedua fenomena tersebut mengontrol dan menunda interaksi antara dua lapisan *shear* sehingga *oscillating wake* tidak terjadi di belakang struktur pipa.

4.14 Hasil *Drag Coefficient* (Cd)

Gaya yang diberikan oleh fluida yang mengalir pada benda dalam arah aliran disebut gaya hambat. *Drag coefficient* dari ketiga model pipa yang diteliti tersebut dapat dilihat pada tabel dibawah:

Tabel 4.7 Nilai *Drag Coefficient* pada Tiga Model Pipa dengan Re=$2{,}46 \times 10^5$

Pipa Polos	*Helical Strakes*	*Triple Helical Rods*
0,713	1,634	0,525

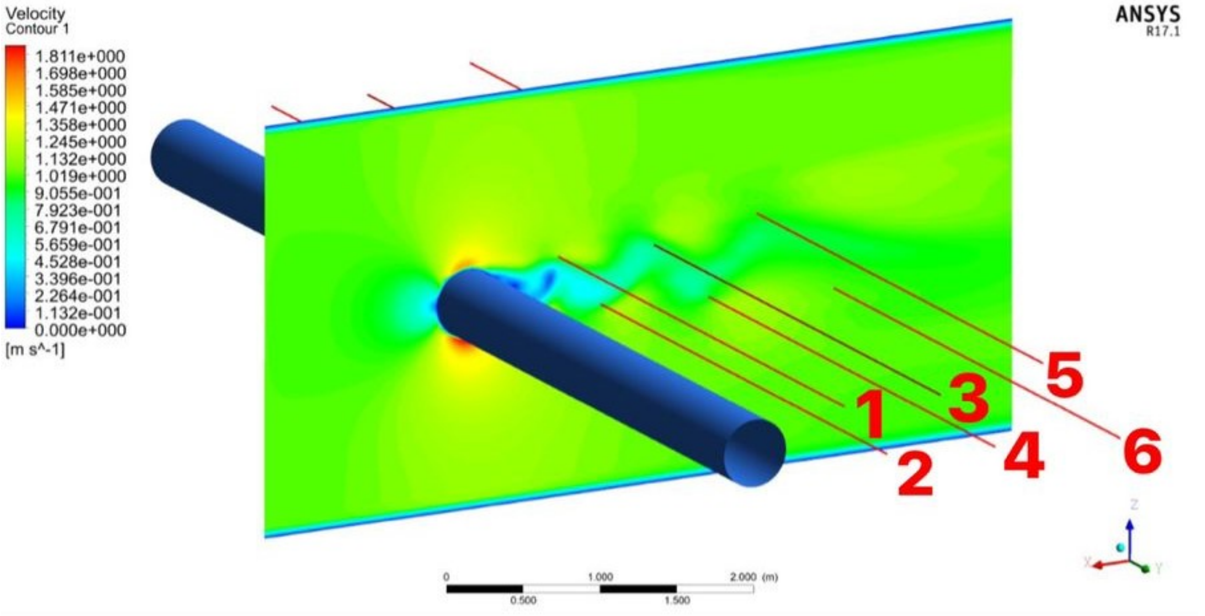
Dapat dilihat dari Tabel 4.7 bahwa *Coefficient of Drag* (Cd) pada pipa yang menggunakan *helical strakes* bertambah sebanyak 56% dan pipa yang menggunakan *triple helical rods* berkurang sebanyak 26% dibandingkan dengan pipa polos.

4.15 Kecepatan pada *Vortex Region*

Kecepatan diambil pada enam garis sepanjang sumbu Y yang dilokasikan pada sumbu (x,z) yang berbeda dengan pusat silinder sebagai titik (0,0). Penempatan garis ini disesuaikan pada pusat vorteks yang terbentuk di belakang pipa polos. Berikut dibawah ini adalah letak penempatan garis pengambilan data kecepatan:

Tabel 4.8 Plot Garis Pengambilan Data Kecepatan

	Garis 1	Garis 2	Garis 3	Garis 4	Garis 5	Garis 6
x (m)	-0,66	-0,97	-1,37	-1,77	-2,12	-2.69
z (m)	0,23	-0,13	0,21	-0,19	0,33	-0,25



Gambar 4.17 Plot Garis Pengambilan Data Kecepatan

Sesuai dengan Gambar 4.17, didapatkan rata-rata kecepatan pada setiap garis tersebut sebagai berikut:

Tabel 4.9 Data Rata-Rata Kecepatan pada Garis 1-6 (Pipa Polos)

Kecepatan Rata-Rata (m/s)					
Garis 1	Garis 2	Garis 3	Garis 4	Garis 5	Garis 6
0,6062	0,53473	0,538	0,5604	0,54107	0,5352

Maka dari itu, rata-rata kecepatan arus di daerah *vortex* pipa polos adalah 0,5526 m/s. Selanjutnya pada pipa yang menggunakan *suppression device* juga akan dilihat kecepatannya sebagai perbandingan pada letak enam garis yang sama dengan pipa polos. Berikut dibawah ini adalah kecepatan rata-rata dari seluruh garis pada model pipa yang menggunakan *suppression device*:

Tabel 4.10 Data Rata-Rata Kecepatan pada Garis 1-6 (*Helical Strakes*)

Kecepatan Rata-Rata (m/s)					
Garis 1	Garis 2	Garis 3	Garis 4	Garis 5	Garis 6
0,4461	0,3521	0,4056	0,4458	0,4744	0,4798

Tabel 4.11 Data Rata-Rata Kecepatan pada Garis 1-6 (*Triple Helical Rods*)

Kecepatan Rata-Rata (m/s)					
Garis 1	Garis 2	Garis 3	Garis 4	Garis 5	Garis 6
0,5482	0,4573	0,4994	0,5028	0,5089	0,5066

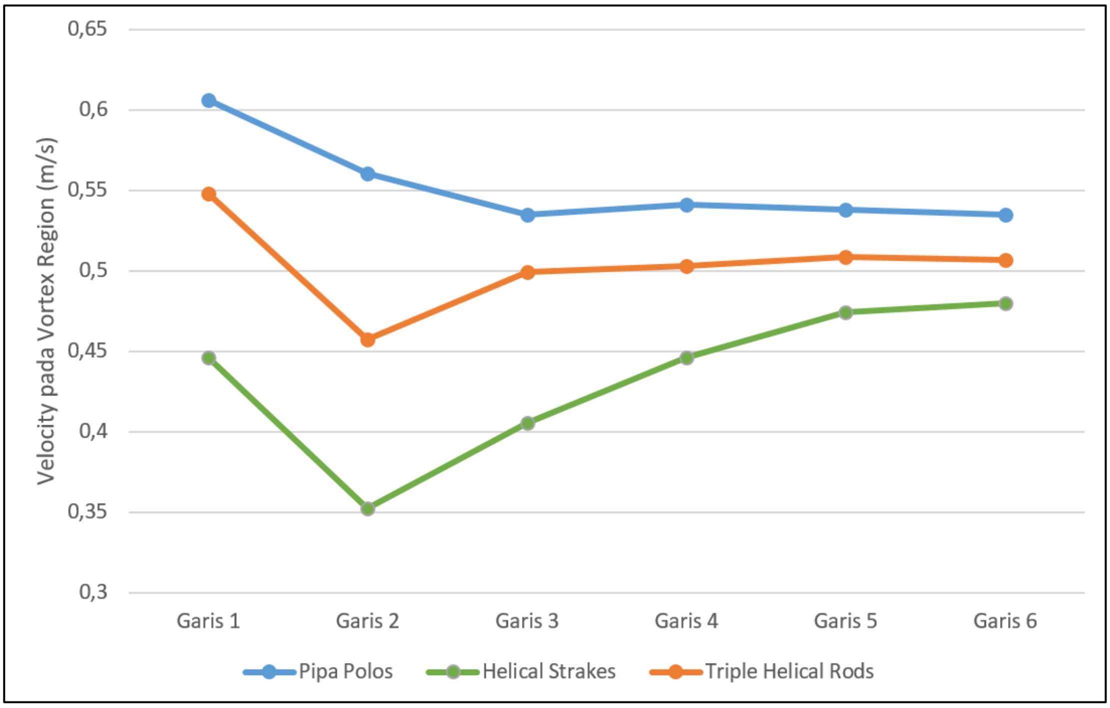
Didapatkan keseluruhan data *velocity* di *vortex region* pada setiap model pipa seperti yang diperlihatkan pada Tabel 4.9, Tabel 4.10, dan Tabel 4.11. Setelah itu keseluruhan data tersebut dapat dirata-ratakan pada setiap model dan diapatkan perbandingan data keseluruhan yang dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 4.12 Perbandingan Data Rata-Rata Kecepatan pada Tiga Model Pipa

Kecepatan Rata-Rata (m/s)		
Pipa Polos	*Helical Strakes*	*Triple Helical Rods*
0,5526	0,4304	0,5039

Dapat dilihat pada Tabel 4.12 bahwa rata-rata kecepatan di area *vortex* pada pipa yang menggunakan *helical strakes* berkurang sebanyak 22,11% dan pipa yang menggunakan *triple helical rods* berkurang sebanyak 8,8% dibandingkan dengan pipa polos.

Berikut dibawah ini adalah grafik perbandingan velocity yang diletakkan pada enam garis di area *vortex* untuk tiga model pipa:



Gambar 4.18 Perbandingan Velocity di Area Vorteks untuk Tiga Model Pipa pada Kecepatan Arus 0,51 m/s (Re=2,46x10^5)

Dari grafik di Gambar 4.18 diatas dapat dilihat bahwa pada pipa polos, kecepatan mengalami penurunan mendekati stabil dengan Garis 1 sebagai daerah vorteks yang mengalami kecepatan tertinggi karena terjadinya dua lapisan *shear* yang berinteraksi langsung setelah arus melewati struktur pipa dan vorteks yang terbentuk mengalami pelemahan yang berkala pada saat aliran arus mulai menjauhi struktur pipa. Sebaliknya pada pipa yang menggunakan *suppression device,* kecepatan pada Garis 1 sampai Garis 3 terjadi penurunan yang cukup jauh membuktikan bahwa *suppression device* tersebut berhasil memecah dan menunda interaksi antara dua lapisan *shear* yang melewati struktur pipa.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan dari tugas akhir ini:

1. Dari 603 total *free spans* yang didatakan saat penginspeksian *18" Export Pipeline* di Lapangan Terang Sirasun Batur dengan ROV, 322 bentangan bebas mengalami gagal statis dan VIV (*screening level-1*). Setelah *screening level-2* dilakukan, didapatkan kesimpulan bahwa *freespan* pada KP 0,603-0,647 dan KP 13,810-13,853 yang memiliki panjang sebesar 44 dan 43 meter mengalami krits atau tidak lolos *dinamic screening.*

2. Pada *free span* KP 0,603-0,647 dilakukan penelitian dengan menggunakan *helical strakes* dan *triple helical rods* yang berfungsi untuk memecah arus agar menghindari terjadinya vorteks di belakang pipa yang dapat menimbulkan *vortex induced vibration* dengan kecepatan arus sebesar 0,51 m/s (Re=$2{,}46 \times 10^5$). Dengan bantuan CFD, didapatkan *coefficient of drag* dan rata-rata kecepatan pada area vorteks yang diletakkan pada enam garis dibelakang pipa polos dan pipa yang menggunakan *suppression device.* Dapat dilihat bahwa pada pipa yang menggunakan *helical strakes,* terjadi peningkatan *drag coefficient* sebesar 56% yang disebabkan oleh pemisahan lapisan *shear* yang signifikan sehingga menimbulkan *wake* yang lebih besar. Sebaliknya pada pipa yang menggunakan *triple helical rods* terjadi pengurangan *drag coefficient* sebesar 26% karena bentuk *rods* yang lebih aerodinamis daripada *strakes* sekaligus melemahkan *vortex wake.* Selain itu, rata-rata kecepatan di area vorteks berkurang sebesar 22,11% *(helical strakes)* dan 8,8% *(triple helical rods)* dengan kecepatan pada Garis 1 sampai Garis 3 terjadi penurunan yang cukup jauh membuktikan bahwa *suppression device* tersebut berhasil memecah dan menunda interaksi antara dua lapisan *shear* yang melewati struktur pipa sehingga *oscillating wake* tidak terjadi.

5.2 Saran

Pada tugas akhir ini masih ada beberapa kekurangan di dalamnya sehingga dapat menjadi penelitian lanjutan kedepannya mengenai analisis *suppression device* pada *free span.* Berikut dibawah ini adalah beberapa hal yang dapat dijadikan saran pada penelitian selanjutnya:

1. Perlunya *screening* selanjutnya untuk mengetahui *fatigue damage* dan sisa umur operasional pada pipa yang terdampak bentangan bebas yang memiliki panjang melebihi *allowable free span length.*
2. Dilakukan eksperimen selanjutnya dengan menggunakan jenis *suppression device* yang lain sehingga dapat dibandingkan efektifitasannya.
3. Dilakukan rektifikasi pada pipa-pipa yang mengalami kritis sehingga tidak membahayakan operasional pipa.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

Abdullah, A. (2016). *Analisa Suppression Device Sebagai Peredam Vortex Indiced Vibration (VIV) Pada Free Span Menggunakan Metode Elemen Hingga*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Asyikin, M. T. (2012). CFD Simulation of Vortex Induced Vibration of a Cylindrical Structure. *Norwegian University of Science and Technology*.

Bai, Yong & Bai, Q. (2005) *Subsea Pipelines And Risers*, *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*. Oxford: Elsevier Inc.

Bai, Yong & Bai, Q. (2010) *Subsea Engineering Handbook*, *Textbook (Important)*. Oxford: Elsevier Inc.

Berthelsen, P.A. and Faltinsen, O.M. (2007) A local directional ghost cell approach for incompressible viscous flow problems with irregular boundaries. Journal of Computational Physic

Calhoun, D. A (2002) Cartesian grid method for solving the two-dimensional streamfunction-vorticity equations in irregular regions. Journal of Computational Physic

Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *FLUID MECHANICS (Fundamentals and Applications).* New York: McGraw-Hill.

Chakrabarti, S. (2005) *Handbook of Offshore Engineering*, *Elsevier*. Oxford: Elsevier.

Choi, H. S. (2001) 'Free spanning analysis of offshore pipelines', *Ocean Engineering*

DNV RP F105 (2006) 'DNV-RP-F105: Free Spanning Pipelines', *Dnv Rp F105*,

Gong, S., Sun, B., Bao, S., & Bai, Y. (2012). Buckle propagation of offshore pipelines under external pressure. *Marine Structures*, *29*(1), 115–130.

Guo, B. *et al.* (2005) *Offshore Pipelines*, *Offshore Pipelines*. Oxford: Elsevier Inc. Huera-Huarte, F. J. (2014) 'On splitter plate coverage for suppression of vortex-induced vibrations of flexible cylinders', *Applied Ocean Research*. Elsevier B.V.

Herjford, K. (1996) A study of two-dimensional separated flow by a combination of the finite element method and Navier-Stokes equations. Dr. Ing-Thesis, Norwegian Institute of Technology, Department of Marine Hydrodynamics. Trondheim, Norway

Huera-Huarte, F. J., (2014) 'On splitter plate coverage for suppression of vortex-induced

vibrations of flexible cylinders', Applied Ocean Research. Elsevier B.V.

Linnick, M. N and Fasel, H.F. (2005) A high-order immersed interface method for simulating unsteady compressible flows onirregular domain. J. Comput. Phys.

Malalasekera and Versteeg (2007) *An Introduction to Parallel Computational Fluid Dynamics*, *IEEE Concurrency*. Edinburgh: Pearson Education Limited

Mousselli, A. H. (1981) *Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods*. Oklahoma: PennWell Books.

Prastianto, R. W. *et al.* (2018) 'Experimental Study on Interference Effects of Two Tandem Cylinders Wrapped Around by Triple Helical Rods with Gap on Induced Drag', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*

Ranjith, E. R., Sunil, A. S. and Pauly, L. (2016) 'Analysis of Flow Over a Circular Cylinder Fitted with Helical Strakes', *Procedia Technology*. Elsevier B.V

Sibuea, C., Mulyadi, Y., & Rochani, I. (2017). Analisis On-Bottom Stability dan Local Buckling: Studi Kasus Pipa Bawah Laut dari Platform Ula Menuju Platform Uw. *Jurnal Teknik ITS*, *5*(2),

Sumer, B. Mutlu, & Fredsøe, Jørgen, (2006). Hydrodinamics Around Cylindrical Structures, Worlds Scientific Publishing,

Taheri, A., shabani, mahdi, & Daghigh, M. (2018). Investigation of the Effect of Local Buckling and VIV Fatigue on Failure Probability of Subsea Pipelines in Iranian South Pars Gas Field. *International Journal of Maritime Technology*,

Wicaksono, P. I. (2018) *Analisis Panjang Bentangan Bebas Pipa Gas Bawah Laut (Studi Kasus KLA-KLB Infield Flow-Line Milik Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java)*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Xu, S. And Wang, Z.J. (2006) An imersed interface method for simulating the interaction of a fluid with moving boundaries. Journal of Computational Physic

LAMPIRAN A

HASIL SCREENING STATIS DAN SCREENING DINAMIS

LAMPIRAN A

Event ID	Date	Time	Description	KP	Length (m)	L/D	L/D<30	Frekuensi Natural	Reduced Velocity (Ur)	Lcf	Kritis	Lil	Kritis
83	29/05/18	0.06434027778	Freespan - Start	-0.048	30	54.62	Tidak Memenuhi	1.988	0.47	30.000	no	59.647	no
92	29/05/18	0.07802083333	Freespan - Start	-0.007	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
101	29/05/18	0.08533564815	Freespan - Start	0.027	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
104	29/05/18	0.08650462963	Freespan - Start	0.05	30	54.62	Tidak Memenuhi	1.988	0.47	30.000	no	59.647	no
107	29/05/18	0.08895833333	Freespan - Start	0.088	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
115	29/05/18	0.0909375	Freespan - Start	0.124	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
117	29/05/18	0.09231481481	Freespan - Start	0.154	32	58.27	Tidak Memenuhi	1.747	0.53	32.000	no	55.919	no
61	29/05/18	0.09459490741	Freespan - Start	0.199	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
63	29/05/18	0.09873842593	Freespan - Start	0.275	32	58.27	Tidak Memenuhi	1.747	0.53	32.000	no	55.919	no
137	29/05/18	0.1104398148	Freespan - Start	0.357	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
144	29/05/18	0.1139351852	Freespan - Start	0.431	31	56.45	Tidak Memenuhi	1.862	0.50	31.000	no	57.723	no
146	29/05/18	0.1159027778	Freespan - Start	0.472	27	49.16	Tidak Memenuhi	2.455	0.38	27.000	no	66.274	no
155	29/05/18	0.1203356481	Freespan - Start	0.56	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
161	29/05/18	0.128900463	Freespan - Start	0.603	44	80.12	Tidak Memenuhi	0.924	1.00	44.000	no	40.668	yes
173	29/05/18	0.1330902778	Freespan - Start	0.687	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
182	29/05/18	0.1378935185	Freespan - Start	0.787	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
189	29/05/18	0.3145717593	Freespan - Start	0.869	30	54.62	Tidak Memenuhi	1.988	0.47	30.000	no	59.647	no
200	29/05/18	0.3240509259	Freespan - Start	1.009	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
213	29/05/18	0.3525347222	Freespan - Start	1.126	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
224	29/05/18	0.3593981481	Freespan - Start	1.243	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
244	29/05/18	0.3663310185	Freespan - Start	1.36	29	52.80	Tidak Memenuhi	2.128	0.44	29.000	no	61.704	no
247	29/05/18	0.3679398148	Freespan - Start	1.398	30	54.62	Tidak Memenuhi	1.988	0.47	30.000	no	59.647	no
249	29/05/18	0.3692592593	Freespan - Start	1.431	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
251	29/05/18	0.3706828704	Freespan - Start	1.462	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
254	29/05/18	0.3719675926	Freespan - Start	1.491	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
256	29/05/18	0.3734722222	Freespan - Start	1.524	27	49.16	Tidak Memenuhi	2.455	0.38	27.000	no	66.274	no
3	29/05/18	0.3763310185	Freespan - Start	1.586	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
7	29/05/18	0.3785069444	Freespan - Start	1.632	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
9	29/05/18	0.380462963	Freespan - Start	1.664	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
12	29/05/18	0.3818981481	Freespan - Start	1.696	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
15	29/05/18	0.3835416667	Freespan - Start	1.737	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
26	29/05/18	0.394212963	Freespan - Start	1.867	35	63.73	Tidak Memenuhi	1.461	0.64	35.000	no	51.126	no
30	29/05/18	0.3967939815	Freespan - Start	1.911	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
35	29/05/18	0.4011689815	Freespan - Start	1.979	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
37	29/05/18	0.4032986111	Freespan - Start	2.016	27	49.16	Tidak Memenuhi	2.455	0.38	27.000	no	66.274	no
39	29/05/18	0.4063310185	Freespan - Start	2.076	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
42	29/05/18	0.4080902778	Freespan - Start	2.106	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
52	29/05/18	0.4123263889	Freespan - Start	2.193	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
55	29/05/18	0.4138310185	Freespan - Start	2.224	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
57	29/05/18	0.4154398148	Freespan - Start	2.259	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
66	29/05/18	0.4181365741	Freespan - Start	2.312	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
68	29/05/18	0.4192939815	Freespan - Start	2.337	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
74	29/05/18	0.4204398148	Freespan - Start	2.36	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
77	29/05/18	0.4235185185	Freespan - Start	2.429	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
81	29/05/18	0.4270949074	Freespan - Start	2.514	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
83	29/05/18	0.4288078704	Freespan - Start	2.548	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
95	29/05/18	0.4423263889	Freespan - Start	2.801	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
97	29/05/18	0.4473958333	Freespan - Start	2.921	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
101	29/05/18	0.4538657407	Freespan - Start	2.98	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no

106	29/05/18	0.4565509259	Freespan - Start	3.036	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
108	29/05/18	0.4591666667	Freespan - Start	3.092	32	58.27	Tidak Memenuhi	1.747	0.53	32.000	no	55.919	no
113	29/05/18	0.462974537	Freespan - Start	3.178	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
128	29/05/18	0.4696180556	Freespan - Start	3.323	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
140	29/05/18	0.4936805556	Freespan - Start	3.63	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
142	29/05/18	0.4951736111	Freespan - Start	3.664	35	63.73	Tidak Memenuhi	1.461	0.64	35.000	no	51.126	no
151	29/05/18	0.5038078704	Freespan - Start	3.85	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
167	29/05/18	0.5144444444	Freespan - Start	4.068	39	71.01	Tidak Memenuhi	1.176	0.79	39.000	no	45.882	no
198	29/05/18	0.5414930556	Freespan - Start	4.584	27	49.16	Tidak Memenuhi	2.455	0.38	27.000	no	66.274	no
201	29/05/18	0.5430902778	Freespan - Start	4.623	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
213	29/05/18	0.5481365741	Freespan - Start	4.742	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
233	29/05/18	0.5598148148	Freespan - Start	5.005	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
244	29/05/18	0.5668402778	Freespan - Start	5.151	26	47.34	Tidak Memenuhi	2.647	0.35	26.000	no	68.823	no
246	29/05/18	0.5687384259	Freespan - Start	5.195	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
252	29/05/18	0.5713194444	Freespan - Start	5.251	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
279	29/05/18	0.5827546296	Freespan - Start	5.505	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
293	29/05/18	0.5900925926	Freespan - Start	5.608	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
303	29/05/18	0.5949305556	Freespan - Start	5.709	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
311	29/05/18	0.5997106481	Freespan - Start	5.826	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
314	29/05/18	0.6011921296	Freespan - Start	5.858	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
322	29/05/18	0.6064351852	Freespan - Start	5.923	31	56.45	Tidak Memenuhi	1.862	0.50	31.000	no	57.723	no
332	29/05/18	0.6114930556	Freespan - Start	6.037	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
335	29/05/18	0.6133796296	Freespan - Start	6.076	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
344	29/05/18	0.6201851852	Freespan - Start	6.235	32	58.27	Tidak Memenuhi	1.747	0.53	32.000	no	55.919	no
346	29/05/18	0.6222569444	Freespan - Start	6.283	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
349	29/05/18	0.6237152778	Freespan - Start	6.315	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
352	29/05/18	0.6246527778	Freespan - Start	6.336	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
370	29/05/18	0.637337963	Freespan - Start	6.516	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
373	29/05/18	0.6409606481	Freespan - Start	6.59	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
377	29/05/18	0.6451388889	Freespan - Start	6.66	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
380	29/05/18	0.6463425926	Freespan - Start	6.683	30	54.62	Tidak Memenuhi	1.988	0.47	30.000	no	59.647	no
385	29/05/18	0.6497916667	Freespan - Start	6.752	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
390	29/05/18	0.6521875	Freespan - Start	6.811	32	58.27	Tidak Memenuhi	1.747	0.53	32.000	no	55.919	no
405	29/05/18	0.661087963	Freespan - Start	7.005	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
409	29/05/18	0.6636805556	Freespan - Start	7.057	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
419	29/05/18	0.6663773148	Freespan - Start	7.118	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
425	29/05/18	0.6692361111	Freespan - Start	7.188	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
432	29/05/18	0.6729976852	Freespan - Start	7.28	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
437	29/05/18	0.6740046296	Freespan - Start	7.304	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
441	29/05/18	0.676412037	Freespan - Start	7.352	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
446	29/05/18	0.677650463	Freespan - Start	7.376	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
450	29/05/18	0.6796527778	Freespan - Start	7.414	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
468	29/05/18	0.6855324074	Freespan - Start	7.57	35	63.73	Tidak Memenuhi	1.461	0.64	35.000	no	51.126	no
470	29/05/18	0.6881018519	Freespan - Start	7.613	27	49.16	Tidak Memenuhi	2.455	0.38	27.000	no	66.274	no
487	29/05/18	0.6998611111	Freespan - Start	7.797	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
495	29/05/18	0.7028587963	Freespan - Start	7.854	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
498	29/05/18	0.7040740741	Freespan - Start	7.879	40	72.83	Tidak Memenuhi	1.118	0.83	40.000	no	44.735	no
500	29/05/18	0.706087963	Freespan - Start	7.921	26	47.34	Tidak Memenuhi	2.647	0.35	26.000	no	68.823	no
502	29/05/18	0.7076967593	Freespan - Start	7.96	35	63.73	Tidak Memenuhi	1.461	0.64	35.000	no	51.126	no
504	29/05/18	0.7094444444	Freespan - Start	7.997	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no

514	29/05/18	0.7118171296	Freespan - Start	8.049	33	60.09	Tidak Memenuhi	1.643	0.57	33.000	no	54.224	no
526	29/05/18	0.7155902778	Freespan - Start	8.144	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
536	29/05/18	0.7184953704	Freespan - Start	8.209	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
546	29/05/18	0.7211689815	Freespan - Start	8.266	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
554	29/05/18	0.723125	Freespan - Start	8.312	30	54.62	Tidak Memenuhi	1.988	0.47	30.000	no	59.647	no
558	29/05/18	0.7249189815	Freespan - Start	8.357	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
560	29/05/18	0.7264930556	Freespan - Start	8.387	29	52.80	Tidak Memenuhi	2.128	0.44	29.000	no	61.704	no
564	29/05/18	0.7283796296	Freespan - Start	8.43	27	49.16	Tidak Memenuhi	2.455	0.38	27.000	no	66.274	no
575	29/05/18	0.7327314815	Freespan - Start	8.51	26	47.34	Tidak Memenuhi	2.647	0.35	26.000	no	68.823	no
587	29/05/18	0.7397337963	Freespan - Start	8.61	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
589	29/05/18	0.7419328704	Freespan - Start	8.648	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
593	29/05/18	0.7434490741	Freespan - Start	8.682	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
595	29/05/18	0.7446180556	Freespan - Start	8.713	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
598	29/05/18	0.7456481481	Freespan - Start	8.738	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
601	29/05/18	0.747025463	Freespan - Start	8.768	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
603	29/05/18	0.7483101852	Freespan - Start	8.794	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
609	29/05/18	0.7511689815	Freespan - Start	8.862	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
614	29/05/18	0.7536689815	Freespan - Start	8.92	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
623	29/05/18	0.757025463	Freespan - Start	8.987	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
629	29/05/18	0.7595023148	Freespan - Start	9.037	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
634	29/05/18	0.7619444444	Freespan - Start	9.09	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
638	29/05/18	0.7637731481	Freespan - Start	9.122	32	58.27	Tidak Memenuhi	1.747	0.53	32.000	no	55.919	no
641	29/05/18	0.7664814815	Freespan - Start	9.175	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
645	29/05/18	0.7680902778	Freespan - Start	9.211	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
647	29/05/18	0.7691550926	Freespan - Start	9.236	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
652	29/05/18	0.7707060185	Freespan - Start	9.274	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
675	29/05/18	0.7849652778	Freespan - Start	9.45	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
91	30/05/18	0.005960648148	Freespan - Start	9.483	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
695	30/05/18	0.08277777778	Freespan - Start	9.541	26	47.34	Tidak Memenuhi	2.647	0.35	26.000	no	68.823	no
722	30/05/18	0.09065972222	Freespan - Start	9.672	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
724	30/05/18	0.09943287037	Freespan - Start	9.717	42	76.47	Tidak Memenuhi	1.014	0.92	42.000	no	42.605	no
726	30/05/18	0.1023958333	Freespan - Start	9.766	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
729	30/05/18	0.1035416667	Freespan - Start	9.791	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
731	30/05/18	0.104849537	Freespan - Start	9.818	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
734	30/05/18	0.1060185185	Freespan - Start	9.844	32	58.27	Tidak Memenuhi	1.747	0.53	32.000	no	55.919	no
738	30/05/18	0.1078587963	Freespan - Start	9.884	33	60.09	Tidak Memenuhi	1.643	0.57	33.000	no	54.224	no
740	30/05/18	0.1094791667	Freespan - Start	9.921	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
750	30/05/18	0.1121643519	Freespan - Start	9.983	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
761	30/05/18	0.1210532407	Freespan - Start	10.042	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
764	30/05/18	0.1225810185	Freespan - Start	10.07	27	49.16	Tidak Memenuhi	2.455	0.38	27.000	no	66.274	no
774	30/05/18	0.1263194444	Freespan - Start	10.15	29	52.80	Tidak Memenuhi	2.128	0.44	29.000	no	61.704	no
780	30/05/18	0.1281828704	Freespan - Start	10.189	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
782	30/05/18	0.13	Freespan - Start	10.22	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
785	30/05/18	0.1311226852	Freespan - Start	10.241	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
787	30/05/18	0.1329861111	Freespan - Start	10.277	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
791	30/05/18	0.1349652778	Freespan - Start	10.313	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
801	30/05/18	0.1385763889	Freespan - Start	10.382	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
804	30/05/18	0.1396412037	Freespan - Start	10.405	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
814	30/05/18	0.1426967593	Freespan - Start	10.472	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
816	30/05/18	0.1436689815	Freespan - Start	10.494	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no

827	30/05/18	0.1746759259	Freespan - Start	10.556	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
849	30/05/18	0.180462963	Freespan - Start	10.704	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
851	30/05/18	0.181712963	Freespan - Start	10.732	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
854	30/05/18	0.1826273148	Freespan - Start	10.753	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
857	30/05/18	0.1842939815	Freespan - Start	10.791	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
873	30/05/18	0.1894328704	Freespan - Start	10.904	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
876	30/05/18	0.1905439815	Freespan - Start	10.934	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
881	30/05/18	0.1930092593	Freespan - Start	10.989	32	58.27	Tidak Memenuhi	1.747	0.53	32.000	no	55.919	no
883	30/05/18	0.1947569444	Freespan - Start	11.023	36	65.55	Tidak Memenuhi	1.381	0.67	36.000	no	49.706	no
895	30/05/18	0.2007175926	Freespan - Start	11.161	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
899	30/05/18	0.2044328704	Freespan - Start	11.184	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
902	30/05/18	0.2059027778	Freespan - Start	11.21	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
905	30/05/18	0.207662037	Freespan - Start	11.236	26	47.34	Tidak Memenuhi	2.647	0.35	26.000	no	68.823	no
907	30/05/18	0.2093518519	Freespan - Start	11.266	31	56.45	Tidak Memenuhi	1.862	0.50	31.000	no	57.723	no
909	30/05/18	0.2116550926	Freespan - Start	11.311	35	63.73	Tidak Memenuhi	1.461	0.64	35.000	no	51.126	no
913	30/05/18	0.21375	Freespan - Start	11.35	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
915	30/05/18	0.2158101852	Freespan - Start	11.391	26	47.34	Tidak Memenuhi	2.647	0.35	26.000	no	68.823	no
918	30/05/18	0.2176967593	Freespan - Start	11.422	29	52.80	Tidak Memenuhi	2.128	0.44	29.000	no	61.704	no
920	30/05/18	0.2195833333	Freespan - Start	11.454	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
931	30/05/18	0.2230092593	Freespan - Start	11.519	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
933	30/05/18	0.2243402778	Freespan - Start	11.544	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
943	30/05/18	0.2300694444	Freespan - Start	11.65	30	54.62	Tidak Memenuhi	1.988	0.47	30.000	no	59.647	no
959	30/05/18	0.236412037	Freespan - Start	11.754	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
969	30/05/18	0.2399421296	Freespan - Start	11.817	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
983	30/05/18	0.2470486111	Freespan - Start	11.951	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
986	30/05/18	0.2481134259	Freespan - Start	11.97	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
988	30/05/18	0.2491666667	Freespan - Start	11.99	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
996	30/05/18	0.2524537037	Freespan - Start	12.049	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
1002	30/05/18	0.2550462963	Freespan - Start	12.089	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
1006	30/05/18	0.2560300926	Freespan - Start	12.111	27	49.16	Tidak Memenuhi	2.455	0.38	27.000	no	66.274	no
1008	30/05/18	0.2575	Freespan - Start	12.14	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
1011	30/05/18	0.2584722222	Freespan - Start	12.163	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
1025	30/05/18	0.2625231481	Freespan - Start	12.26	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
1027	30/05/18	0.2635648148	Freespan - Start	12.286	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
1031	30/05/18	0.2646759259	Freespan - Start	12.314	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
1035	30/05/18	0.2656712963	Freespan - Start	12.338	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
1039	30/05/18	0.2796990741	Freespan - Start	12.359	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
1044	30/05/18	0.2816435185	Freespan - Start	12.404	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
1052	30/05/18	0.2848726852	Freespan - Start	12.47	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
1060	30/05/18	0.2868865741	Freespan - Start	12.532	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
1062	30/05/18	0.2876967593	Freespan - Start	12.558	27	49.16	Tidak Memenuhi	2.455	0.38	27.000	no	66.274	no
1070	30/05/18	0.2905208333	Freespan - Start	12.62	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
1075	30/05/18	0.2921412037	Freespan - Start	12.655	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
97	30/05/18	0.2938078704	Freespan - Start	12.691	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
1077	30/05/18	0.2987152778	Freespan - Start	12.777	26	47.34	Tidak Memenuhi	2.647	0.35	26.000	no	68.823	no
1079	30/05/18	0.3002083333	Freespan - Start	12.806	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
1085	30/05/18	0.3023148148	Freespan - Start	12.854	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
1090	30/05/18	0.3042824074	Freespan - Start	12.899	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
1093	30/05/18	0.3052083333	Freespan - Start	12.92	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
1095	30/05/18	0.3083449074	Freespan - Start	12.978	34	61.91	Tidak Memenuhi	1.548	0.60	34.000	no	52.630	no

1097	30/05/18	0.3110416667	Freespan - Start	13.034	35	63.73	Tidak Memenuhi	1.461	0.64	35.000	no	51.126	no
1099	30/05/18	0.3156481481	Freespan - Start	13.137	36	65.55	Tidak Memenuhi	1.381	0.67	36.000	no	49.706	no
1101	30/05/18	0.3176273148	Freespan - Start	13.177	37	67.37	Tidak Memenuhi	1.307	0.71	37.000	no	48.362	no
1103	30/05/18	0.3199421296	Freespan - Start	13.22	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
1107	30/05/18	0.3252546296	Freespan - Start	13.252	38	69.19	Tidak Memenuhi	1.239	0.75	38.000	no	47.090	no
1109	30/05/18	0.3287152778	Freespan - Start	13.312	31	56.45	Tidak Memenuhi	1.862	0.50	31.000	no	57.723	no
1111	30/05/18	0.3313310185	Freespan - Start	13.367	29	52.80	Tidak Memenuhi	2.128	0.44	29.000	no	61.704	no
1113	30/05/18	0.3329861111	Freespan - Start	13.4	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
1115	30/05/18	0.3341782407	Freespan - Start	13.427	39	71.01	Tidak Memenuhi	1.176	0.79	39.000	no	45.882	no
1118	30/05/18	0.3367708333	Freespan - Start	13.483	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
1120	30/05/18	0.3387384259	Freespan - Start	13.523	37	67.37	Tidak Memenuhi	1.307	0.71	37.000	no	48.362	no
1122	30/05/18	0.3415625	Freespan - Start	13.582	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
1125	30/05/18	0.3428819444	Freespan - Start	13.608	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
1127	30/05/18	0.3470138889	Freespan - Start	13.707	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
1132	30/05/18	0.349212963	Freespan - Start	13.758	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
1135	30/05/18	0.3501273148	Freespan - Start	13.777	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
1137	30/05/18	0.3516666667	Freespan - Start	13.81	43	78.30	Tidak Memenuhi	0.968	0.96	43.000	no	41.614	yes
1141	30/05/18	0.3576388889	Freespan - Start	13.949	42	76.47	Tidak Memenuhi	1.014	0.92	42.000	no	42.605	no
1144	30/05/18	0.3596875	Freespan - Start	13.996	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
1149	30/05/18	0.3608680556	Freespan - Start	14.024	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
1155	30/05/18	0.3624884259	Freespan - Start	14.059	27	49.16	Tidak Memenuhi	2.455	0.38	27.000	no	66.274	no
1162	30/05/18	0.4587847222	Freespan - Start	14.091	39	71.01	Tidak Memenuhi	1.176	0.79	39.000	no	45.882	no
1164	30/05/18	0.4630555556	Freespan - Start	14.144	35	63.73	Tidak Memenuhi	1.461	0.64	35.000	no	51.126	no
1166	30/05/18	0.466712963	Freespan - Start	14.181	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
1168	30/05/18	0.4689467593	Freespan - Start	14.211	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
1170	30/05/18	0.470162037	Freespan - Start	14.232	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
1172	30/05/18	0.4722106481	Freespan - Start	14.256	35	63.73	Tidak Memenuhi	1.461	0.64	35.000	no	51.126	no
1174	30/05/18	0.4743055556	Freespan - Start	14.295	40	72.83	Tidak Memenuhi	1.118	0.83	40.000	no	44.735	no
1176	30/05/18	0.4780902778	Freespan - Start	14.355	30	54.62	Tidak Memenuhi	1.988	0.47	30.000	no	59.647	no
1179	30/05/18	0.4812152778	Freespan - Start	14.408	36	65.55	Tidak Memenuhi	1.381	0.67	36.000	no	49.706	no
1181	30/05/18	0.4834837963	Freespan - Start	14.457	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
1184	30/05/18	0.4845833333	Freespan - Start	14.481	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
1186	30/05/18	0.4859953704	Freespan - Start	14.512	38	69.19	Tidak Memenuhi	1.239	0.75	38.000	no	47.090	no
1188	30/05/18	0.4882175926	Freespan - Start	14.554	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
1190	30/05/18	0.4898842593	Freespan - Start	14.585	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
1193	30/05/18	0.4914467593	Freespan - Start	14.611	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
1195	30/05/18	0.4932986111	Freespan - Start	14.645	35	63.73	Tidak Memenuhi	1.461	0.64	35.000	no	51.126	no
1198	30/05/18	0.4955324074	Freespan - Start	14.685	37	67.37	Tidak Memenuhi	1.307	0.71	37.000	no	48.362	no
1202	30/05/18	0.4976736111	Freespan - Start	14.731	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
1205	30/05/18	0.4987731481	Freespan - Start	14.756	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
1207	30/05/18	0.5006365741	Freespan - Start	14.788	31	56.45	Tidak Memenuhi	1.862	0.50	31.000	no	57.723	no
1209	30/05/18	0.5025578704	Freespan - Start	14.822	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
1212	30/05/18	0.5044444444	Freespan - Start	14.853	33	60.09	Tidak Memenuhi	1.643	0.57	33.000	no	54.224	no
1215	30/05/18	0.5062731481	Freespan - Start	14.889	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
1218	30/05/18	0.507337963	Freespan - Start	14.909	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
1221	30/05/18	0.5095949074	Freespan - Start	14.951	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
1224	30/05/18	0.5107407407	Freespan - Start	14.976	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
1226	30/05/18	0.5118055556	Freespan - Start	14.999	36	65.55	Tidak Memenuhi	1.381	0.67	36.000	no	49.706	no
1230	30/05/18	0.5137037037	Freespan - Start	15.038	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
1232	30/05/18	0.5156944444	Freespan - Start	15.08	30	54.62	Tidak Memenuhi	1.988	0.47	30.000	no	59.647	no

1234	30/05/18	0.5174537037	Freespan - Start	15.112	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
1238	30/05/18	0.5213541667	Freespan - Start	15.196	26	47.34	Tidak Memenuhi	2.647	0.35	26.000	no	68.823	no
1242	30/05/18	0.5341203704	Freespan - Start	15.353	33	60.09	Tidak Memenuhi	1.643	0.57	33.000	no	54.224	no
1244	30/05/18	0.5368865741	Freespan - Start	15.415	29	52.80	Tidak Memenuhi	2.128	0.44	29.000	no	61.704	no
1250	30/05/18	0.5434606481	Freespan - Start	15.567	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
1253	30/05/18	0.5450462963	Freespan - Start	15.587	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
1262	30/05/18	0.5576273148	Freespan - Start	15.759	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
1264	30/05/18	0.5597916667	Freespan - Start	15.804	31	56.45	Tidak Memenuhi	1.862	0.50	31.000	no	57.723	no
1266	30/05/18	0.5628703704	Freespan - Start	15.872	27	49.16	Tidak Memenuhi	2.455	0.38	27.000	no	66.274	no
1268	30/05/18	0.5643634259	Freespan - Start	15.904	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
1271	30/05/18	0.5656018519	Freespan - Start	15.93	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
1273	30/05/18	0.5674189815	Freespan - Start	15.965	26	47.34	Tidak Memenuhi	2.647	0.35	26.000	no	68.823	no
1276	30/05/18	0.5691435185	Freespan - Start	15.994	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
1281	30/05/18	0.5731597222	Freespan - Start	16.081	31	56.45	Tidak Memenuhi	1.862	0.50	31.000	no	57.723	no
1286	30/05/18	0.5805092593	Freespan - Start	16.241	34	61.91	Tidak Memenuhi	1.548	0.60	34.000	no	52.630	no
1288	30/05/18	0.5822222222	Freespan - Start	16.28	36	65.55	Tidak Memenuhi	1.381	0.67	36.000	no	49.706	no
1293	30/05/18	0.5863310185	Freespan - Start	16.371	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
1296	30/05/18	0.5876967593	Freespan - Start	16.397	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
1298	30/05/18	0.5894560185	Freespan - Start	16.433	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
1301	30/05/18	0.5904861111	Freespan - Start	16.456	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
1308	30/05/18	0.6023032407	Freespan - Start	16.61	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
1310	30/05/18	0.6033217593	Freespan - Start	16.634	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
1312	30/05/18	0.6044791667	Freespan - Start	16.662	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
1315	30/05/18	0.6057523148	Freespan - Start	16.688	21	38.24	Tidak Memenuhi	4.058	0.23	21.000	no	85.210	no
1317	30/05/18	0.607349537	Freespan - Start	16.716	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
1319	30/05/18	0.6084837963	Freespan - Start	16.743	26	47.34	Tidak Memenuhi	2.647	0.35	26.000	no	68.823	no
1321	30/05/18	0.6124768519	Freespan - Start	16.841	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
1323	30/05/18	0.6156365741	Freespan - Start	16.911	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
1326	30/05/18	0.6168865741	Freespan - Start	16.936	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
1328	30/05/18	0.6195949074	Freespan - Start	16.991	26	47.34	Tidak Memenuhi	2.647	0.35	26.000	no	68.823	no
1331	30/05/18	0.620775463	Freespan - Start	17.018	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
1341	30/05/18	0.6315509259	Freespan - Start	17.252	36	65.55	Tidak Memenuhi	1.381	0.67	36.000	no	49.706	no
1343	30/05/18	0.6334606481	Freespan - Start	17.295	31	56.45	Tidak Memenuhi	1.862	0.50	31.000	no	57.723	no
1345	30/05/18	0.635	Freespan - Start	17.331	39	71.01	Tidak Memenuhi	1.176	0.79	39.000	no	45.882	no
1349	30/05/18	0.6454513889	Freespan - Start	17.454	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
1351	30/05/18	0.6496296296	Freespan - Start	17.556	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
1355	30/05/18	0.6529861111	Freespan - Start	17.632	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
1358	30/05/18	0.6603935185	Freespan - Start	17.779	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
1362	30/05/18	0.6723726852	Freespan - Start	18.063	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
1364	30/05/18	0.6751736111	Freespan - Start	18.118	37	67.37	Tidak Memenuhi	1.307	0.71	37.000	no	48.362	no
1375	30/05/18	0.6997222222	Freespan - Start	18.406	26	47.34	Tidak Memenuhi	2.647	0.35	26.000	no	68.823	no
1381	30/05/18	0.717025463	Freespan - Start	18.53	36	65.55	Tidak Memenuhi	1.381	0.67	36.000	no	49.706	no
1383	30/05/18	0.7195138889	Freespan - Start	18.572	22	40.06	Tidak Memenuhi	3.697	0.25	22.000	no	81.337	no
1387	30/05/18	0.7290740741	Freespan - Start	18.788	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
1389	30/05/18	0.7334490741	Freespan - Start	18.888	29	52.80	Tidak Memenuhi	2.128	0.44	29.000	no	61.704	no
1394	30/05/18	0.7368287037	Freespan - Start	18.972	20	36.42	Tidak Memenuhi	4.474	0.21	20.000	no	89.470	no
1397	30/05/18	0.7376851852	Freespan - Start	18.994	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
1401	30/05/18	0.7424421296	Freespan - Start	19.084	37	67.37	Tidak Memenuhi	1.307	0.71	37.000	no	48.362	no
1403	30/05/18	0.75	Freespan - Start	19.268	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
1407	30/05/18	0.7527083333	Freespan - Start	19.325	31	56.45	Tidak Memenuhi	1.862	0.50	31.000	no	57.723	no

1415	30/05/18	0.7613888889	Freespan - Start	19.513	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
1417	30/05/18	0.7624074074	Freespan - Start	19.535	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
1419	30/05/18	0.7669791667	Freespan - Start	19.634	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
1421	30/05/18	0.7691898148	Freespan - Start	19.682	32	58.27	Tidak Memenuhi	1.747	0.53	32.000	no	55.919	no
1428	30/05/18	0.7818171296	Freespan - Start	19.866	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
1431	30/05/18	0.7830555556	Freespan - Start	19.893	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
1434	30/05/18	0.784525463	Freespan - Start	19.924	32	58.27	Tidak Memenuhi	1.747	0.53	32.000	no	55.919	no
1443	30/05/18	0.7920023148	Freespan - Start	20.082	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
1446	30/05/18	0.793125	Freespan - Start	20.103	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
1448	30/05/18	0.8005439815	Freespan - Start	20.235	34	61.91	Tidak Memenuhi	1.548	0.60	34.000	no	52.630	no
1453	30/05/18	0.8096759259	Freespan - Start	20.42	29	52.80	Tidak Memenuhi	2.128	0.44	29.000	no	61.704	no
1455	30/05/18	0.8111226852	Freespan - Start	20.452	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
1457	30/05/18	0.8149652778	Freespan - Start	20.522	24	43.70	Tidak Memenuhi	3.107	0.30	24.000	no	74.559	no
1464	30/05/18	0.8254976852	Freespan - Start	20.746	34	61.91	Tidak Memenuhi	1.548	0.60	34.000	no	52.630	no
1468	30/05/18	0.838912037	Freespan - Start	20.927	23	41.88	Tidak Memenuhi	3.383	0.27	23.000	no	77.800	no
1471	30/05/18	0.8422453704	Freespan - Start	20.996	32	58.27	Tidak Memenuhi	1.747	0.53	32.000	no	55.919	no
1488	31/05/18	0.01957175926	Freespan - Start	21.563	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
1498	31/05/18	0.02987268519	Freespan - Start	21.758	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no
1508	31/05/18	0.05556712963	Freespan - Start	22.117	28	50.98	Tidak Memenuhi	2.282	0.41	28.000	no	63.907	no
124	31/05/18	0.07638888889	Freespan - Start	22.453	17	30.95	Tidak Memenuhi	6.192	0.15	17.000	no	105.259	no
1545	31/05/18	0.2071064815	Freespan - Start	24.007	19	34.60	Tidak Memenuhi	4.957	0.19	19.000	no	94.179	no
1549	31/05/18	0.2209375	Freespan - Start	24.282	25	45.52	Tidak Memenuhi	2.863	0.32	25.000	no	71.576	no
1605	31/05/18	0.3383217593	Freespan - Start	25.723	18	32.77	Tidak Memenuhi	5.523	0.17	18.000	no	99.411	no

Tabel diatas menunjukkan semua data *freespan* yang tidak lolos *screening level-1* (*screening statis*), baris yang disorot warna kuning menandakan data *freespan* yang tidak lolos *screening level-2* (*screening* dinamis), dan yang disorot hijau adalah data *freespan* yang ditinjau untuk penelitian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penyusun mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak bersangkutan yang membantu dan mendukung saya selama pengerjaan Tugas Akhir. Beberapa pihak tersebut diantaranya adalah:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan ridho-Nya dalam kelancaran penelitian Tugas Akhir.
2. Almh. Ibu, Ayah, dan Kakak tercinta saya yang selalu memberikan motivasi, dukungan, serta doa dan kasih sayang kepada penulis dari awal hingga selesai.
3. Bapak Dr.Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T., dan Bapak Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D selaku Pembimbing saya yang selalu bersedia untuk memberikan bimbingan serta pembelajaran kepada saya selama Tugas Akhir ini.
4. Bapak Sudjarwoko selaku mentor penulis pada saat Kerja Praktik, dari membimbing hingga memberikan data dari Kangean Energy Indonesia Ltd.
5. Andin dan Faza yang selalu memberikan dukungan dan bantuan selaku teman baik dari awal kuliah hingga selesainya Tugas Akhir.
6. “PERVERTO” selaku teman SMA yang selama ini selalu menemani saat suka dan duka selama Penulis berkuliah di Surabaya.
7. Nadya dan Cigo yang selalu memberikan dukungan selama Penulis mengerjakan Tugas Akhir dan magang.
8. Teman-teman Lab Konstruksi Bangunan Laut yang selalu saling memberi support dan memberikan informasi selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
9. Revastra (Angkatan 2018) yang selalu memberi dukungan dan semangat selama masa perkuliahan.
10. Senior dan Alumni yang memberikan ilmu tambahan kepada penulis.
11. Seluruh pihak terkait yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Semoga tulisan ini bermanfaat bagi pembaca dan dapat dikembangkan menjadi lebih baik lagi. Dan penulis memohon kepada Allah SWT untuk membalas semua budi baik mereka yang telah membantu selama proses perkuliahan dan penyelesaian Tugas Akhir ini.

BIODATA PENULIS

Daffa Aushaf Riyadi lahir di Jakarta pada 9 April 2000 dan merupakan anak terakhir dari 2 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan pertamanya di SDN Pegangsaan Dua 07 Pagi, Kelapa Gading dan lulus pada tahun 2012, kemudian melanjutkan pendidikan keduanya di SMP Labschool Rawamangun yang lulus pada tahun 2015, dan menyelesaikan pendidikan sekolah menengah atas di SMAN 68 Jakarta. Setelah lulus dari SMAN pada tahun 2018, Penulis melanjutkan pendidikannya di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 04311840000132. Selama kuliah, Penulis aktif dalam mengikuti beberapa kegiatan kepanitiaan dan organisasi seperti Paduan Suara Mahasiswa ITS (PSM ITS) sebagai Staff Publikasi dan Dekorasi (2018-2019), GERIGI ITS sebagai Mentor Sinergis (2020), NACE SC ITS sebagai Staff Pengembangan Keterampilan (2020-2021), dan TEDxITS sebagai Staff Tiket (2021). Selain itu Penulis juga aktif dalam mengikuti program magang di beberapa perusahaan seperti PT PLN (Persero) sebagai *Distribution Planning Intern*, TaniHub sebagai *Project Management Intern*, Tokopedia sebagai *Business Development Intern*, dan yang terakhir di Kangean Energy Indonesia Ltd. sebagai *Technical Support* sebagai persyaratan Kerja Praktik. Selama kegiatan Kerja Praktik, penulis belajar banyak mengenai instalasi dan inspeksi bangunan bawah laut sehingga membuat Penulis memiliki minat untuk meneliti dan menganalisis lebih lanjut mengenai pipa bawah laut yang kemudian dikembangkan menjadi penelitian Tugas Akhir yang berjudul "Analisis Karakteristik Aliran Fluida pada Pipa Bawah Laut dengan Variasi *Suppression Device* pada *Free Span*".