



**UNIVERSITAS INDONESIA**

***FREE SPAN ANALYSIS* PADA SISTEM PIPA BAWAH LAUT  
DENGAN METODE PERHITUNGAN *BOYUN GUO*, ASME  
B31.8 DAN SIMULASINYA DENGAN CFD**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**AHMAD SALADIN HARUN**

**0404080021**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK PERKAPALAN  
DEPOK  
JUNI 2009**

## **HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar**

**Nama : Ahmad Sladin Harun**

**NPM : 0404080021**

**Tanda tangan :**

**Tanggal : 26 Juni 2009**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Ahmad Saladin Harun  
NPM : 0404080021  
Program Studi : Teknik Perkapalan  
Judul Skripsi : Free Span Analysis Pada Sistem Pipa Bawah Laut  
Dengan Metode Perhitungan Boyun Guo, ASME  
B31.8 dan Simulasinya Dengan CFD

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia**

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Ahmad Indra Siswantara ( )

Penguji : Dr. Ir. Sunaryo ( )

Penguji : Prof. Dr. Ir. Budiarmo, MEng ( )

Penguji : Ir. Rusdy Malin, MME ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juli 2009



## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Perkapalan pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr Ir. Ahmad Indra Siswantara. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
- (2) Seluruh dosen di departemen Teknik Mesin, khususnya dosen jurusan Teknik Perkapalan yaitu Dr Ir Sunaryo; Ir Markus A. Talahatu, MT; Prof. Dr. Yanuar M.eng, M.Sc; Ir Hadi Tresna; Ir Mukti Wibowo, yang telah memberikan saya banyak ilmu selama saya studi di Universitas Indonesia ini.
- (3) PT. Rekayasa Industri, khususnya untuk bapak Erdi Sumardi, yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan data – data yang diperlukan untuk membuat skripsi ini.
- (4) Orang tua saya, Harun Pameng dan Rosdiana dan seluruh keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral.
- (5) Para sahabat dan teman seperjuangan, adam, suhendra, haris, berto, agung, jaki, andi, amru, kerri, birong, dwijo, dicky'05 dan teman – teman lainnya yang tidak bisa saya sebutkan semuanya, yang telah banyak membantu dalam perkuliahan dan juga dalam menyelesaikan skripsi ini.
- (6) Seluruh karyawan Departemen Teknik Mesin, mas Udiono, pak Marwih, mas Syarif, mba Tina, mba Indah dan yang lainnya yang telah membantu saya selama kuliah di Departemen Teknik Mesin ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 26 Juni 2009

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ahmad Saladin Harun

NPM : 040408021

Program Studi : Teknik Perkapalan

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

*Free Span Analysis Pada Sistem Pipa Bawah Laut Dengan Metode Perhitungan Boyun Guo, ASME B31.8 Dan Simulasinya Dengan CFD*

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 26 Juni 2009

Yang menyatakan

( ..... )

## ABSTRAK

Nama : Ahmad Saladin Harun  
Program Studi : Teknik Perkapalan  
Judul : *Free Span Analysis* Pada Sistem Pipa Bawah Laut Dengan Metode Perhitungan *Boyun Guo*, ASME B31.8 Dan Simulasinya Dengan CFD

Sistem pipa bawah laut merupakan sarana transportasi yang sangat penting terutama untuk menyalurkan minyak dan gas bumi dari sumbernya ke tempat pengolahan. Akibat dari kondisi topografi dasar laut yang tidak teratur, suatu offshore pipeline bisa saja terbentang bebas atau mengalami *free span*. Salah satu aspek penting dalam perancangan offshore pipeline adalah analisa rentangan bebas (*free span analysis*). Pada pengerjaan skripsi kali ini perhitungan *free span* dinamik pada pipa bawah laut yang dilakukan dengan menggunakan perhitungan berdasarkan *Boyun Guo* dan panjang *span* statik berdasarkan ASME B31.8 untuk pipa gas 14 inchi pada *Oyong Project* milik *Santos Pty Ltd* dan juga menggunakan program CFD yaitu program *EFD Lab*. Program tersebut akan digunakan untuk mensimulasikan kondisi aliran disekitar pipa bawah laut tersebut dan fenomena *vortex shedding* yang terjadi dan nantinya hasil dari program tersebut akan digunakan untuk dijadikan perbandingan perhitungan dari literatur yang telah dilakukan.

Kata kunci :

pipa bawah laut, *span*, *vortex*, , *CFD*



## ABSTRACT

Nama : Ahmad Saladin Harun  
Program Studi : Naval Architecture  
Judul : Free Span Analysis At Subsea Pipeline System Using Boyun Guo's Calculation Method, ASME B31.8 And Simulation Using CFD

Subsea pipeline system is a means of transportation which is very important especially for delivering oil and gas from the source to the processing. As a result of the condition of the seabed topography is not smooth, an offshore pipeline could go free or have free span. One important aspect in the design of offshore pipeline analysis is free span analysis. At the time this final project is processing calculations on the dynamic free span pipeline under the sea by using a calculation based on offshore pipeline Boyun Guo and static based on the length of span ASME B31.8 for 14 inches gas pipeline on the property of Santos Oyong Project Pty Ltd and also using the CFD program (EFD Lab). The program will be used to simulate flow conditions around the pipe under the sea and the vortex shedding phenomenon which occurs later and the results of the program will be used for the calculation of comparative literature that has been done.

Key words :

Subsea pipeline, span ,vortex, CFD,

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	vi
ABSTRAK .....	vii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR SIMBOL .....	xv
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Pembatasan Masalah.....	3
1.5 Metode Penelitian .....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
<b>2. DASAR TEORI.....</b>	<b>6</b>
2.1 <i>Offshore Pipeline</i> .....	6
2.1.1 Pengertian Umum .....	6
2.1.2 Bagian Penting Perencanaan <i>Pipeline</i> .....	6
2.2 <i>Span</i> .....	7
2.2.1 Pengertian .....	7
2.2.2 Sebab Terjadinya <i>Span</i> pada <i>Pipeline</i> Bawah Laut .....	7
2.2.3 Pengaruh <i>Span</i> Pada Ketahanan <i>Pipeline</i> .....	8
2.2.4 Jenis-Jenis <i>Span</i> .....	9
2.2.5 Kondisi Perhitungan Panjang <i>Span</i> .....	10
2.3 <i>Vortex Induced Vibration (VIV)</i> .....	10
2.3.1 Pengertian .....	10
2.3.2 Parameter <i>VIV</i> .....	11

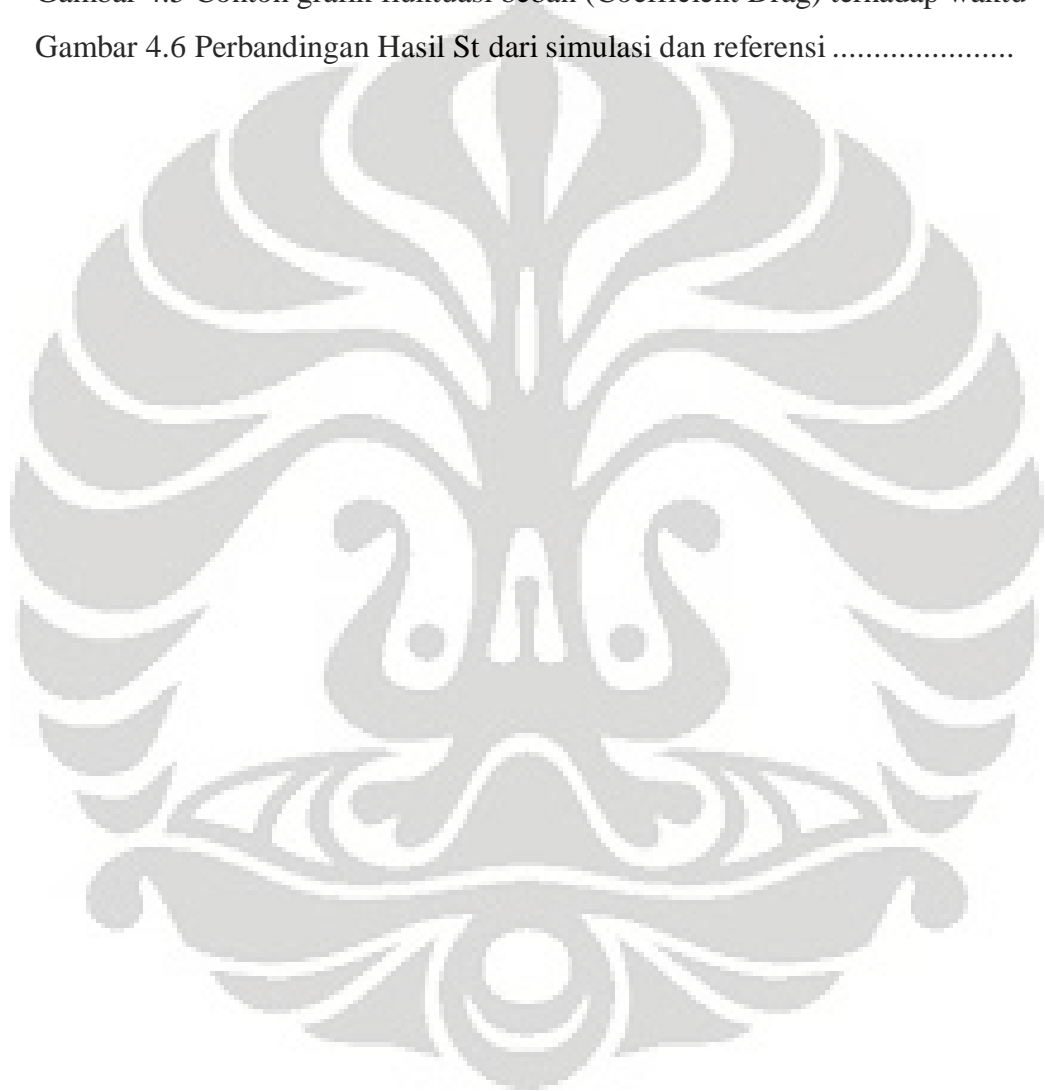
2.3.2.1 Koefisien Drag.....	11
2.3.2.2 Bilangan <i>Reynolds</i> .....	12
2.3.2.3 Bilangan <i>Strouhal</i> .....	13
2.3.2.4 Kecepatan Tereduksi ( <i>Reduced Velocity</i> ) .....	14
2.3.2.4 Parameter Kestabilan ( <i>Stability Parameter</i> ).....	14
2.3.3 Jenis-Jenis <i>VIV</i> .....	15
2.3.4 Fenomena <i>Lock-In</i> .....	15
2.4 <i>Computational Fluid Dynamic (CFD)</i> .....	16
2.4.1 <i>CFD</i> dan Aplikasinya.....	16
2.5 Meshing.....	18
2.6 Proses Simulasi <i>CFD</i> .....	20
2.6.1 Permodelan.....	20
2.6.2 Hasil Simulasi.....	21
<b>3. METODOLOGI PERHITUNGAN, DATA DAN SIMULASI.....</b>	<b>23</b>
3.1 Metodologi Perhitungan.....	23
3.1.1 Pendahuluan.....	23
3.1.2 Alur Kerangka Penelitian .....	24
3.2 Metodologi Perhitungan <i>Span</i> Dinamik Berdasrkan <i>Boyun Guo</i> .....	25
3.2.1 Kondisi Batas.....	25
3.2.2 Mass Efektif <i>Pipeline</i> .....	26
3.2.3 <i>Stability</i> Parameter.....	27
3.2.4 <i>Reynolds Number</i> .....	27
3.2.5 <i>Reduce Velocity</i> .....	28
3.2.6 Rasio Frekuensi.....	29
3.2.7 Panjang <i>Span Boyun Guo</i> .....	30
3.3 Metode <i>Freespanning</i> Statik .....	31
3.3.1 Momen Lentur .....	32
3.3.2 Beban Terdistribusi Merata .....	32
3.3.3 Tegangan Longitudinal Akibat Momen Lentur.....	33
3.3.4 Tegangan Longitudinal Akibat Beda Tekanan.....	33
3.3.5 Panjang <i>Span</i> Statik .....	33
3.4 Simulasi.....	34

3.4.1 Alur Permodelan .....	34
3.4.2 Proses Pembuatan Geometri.....	34
3.4.3 Prosedur Simulasi .....	36
3.4.4 Parameter Aliran .....	36
3.4.5 <i>Computational Domain &amp; Meshing</i> .....	37
3.4.6 Goals .....	38
3.5 Data Sistem Pipa <i>Oyong Field</i> .....	40
3.5.1 Lokasi.....	40
3.5.2 Jalur perpipaan.....	40
3.5.3 Data Pipa dan <i>Coating</i> .....	40
3.5.4 Data Lingkungan.....	43
<b>4. ANALISA PANJANG SPAN DAN PEMODELAN</b> .....	<b>45</b>
4.1 Span Dinamik Berdasarkan <i>Boyun Guo</i> .....	45
4.1.1 Data Input .....	45
4.1.2 Perhitungan Pada Tiap Kilometer Point (KP) .....	46
4.1.3 Panjang Maksimum <i>Span</i> Berdasarkan <i>Boyun Guo</i> .....	61
4.2 Span Statik Berdasarkan ASME B31.8.....	61
4.2.1 Data Input.....	61
4.2.2 Perhitungan Pada Tiap Kilometer Point (KP) .....	63
4.2.3 Panjang Maksimum <i>Span</i> Berdasarkan ASME B31.8.....	75
4.3 Hasil Simulasi.....	76
4.3.1 <i>Coefficient Drag</i> (Cd) .....	77
4.3.2 <i>Cut Plot</i> .....	77
4.3.3 Frekuensi Vorteks.....	78
4.3.4 Bilangan <i>Strouhal</i> .....	79
4.3.5 Panjang <i>Span</i> Hasil Simulasi.....	79
4.3.6 Screening <i>Span</i> .....	80
<b>5. KESIMPULAN</b> .....	<b>81</b>
<b>DAFTAR REFERENSI</b> .....	<b>82</b>
LAMPIRAN	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Ilustrasi freespan.....	1
Gambar 2.1 Ilustrasi Offshore Pipeline.....	6
Gambar 2.2 Pipeline Span.....	7
Gambar 2.3 Profil ketidak rataan dasar laut.....	8
Gambar 2.4 Erosi Pada Permukaan Laut.....	8
Gambar 2.5 Getaran arah cross-flow dan in-line dari sebuah pipeline dalam suatu aliran fluida.....	9
Gambar 2.6 Fenomena VIV pada sebuah pipa.....	11
Gambar 2.7 Karakteristik Aliran Berdasarkan Bilangan Reynolds.....	13
Gambar 2.8 Grafik Strouhal terhadap Reynolds.....	14
Gambar 2.9 Frekuensi respon sebagai fungsi dari parameter $V_r$ .....	16
Gambar 2.10 Contoh perbandingan eksperimen nyata dengan hasil CFD.....	17
Gambar 2.11 Contoh aplikasi CFD pada batang pipa dan mobil balap.....	18
Gambar 2.12 Uniform mesh (kiri) dan non-uniform mesh (kanan).....	19
Gambar 2.13 Klasifikasi mesh.....	19
Gambar 2.14 Contoh meshing pada bentuk geometri model mobil.....	20
Gambar 2.15 Contoh simetri dalam pemodelan.....	21
Gambar 2.16 Aliran tidak dapat dimodelkan secara simetris.....	21
Gambar 3.1 Alur kerangka penelitian.....	22
Gambar 3.2 Metode perhitungan Boyun Guo.....	23
Gambar 3.3 Grafik Hubungan antara stability parameter dan reduced velocity.....	27
Gambar 3.4 Hubungan antara Reynolds Number dan reduced velocity.....	28
Gambar 3.5 Grafik $U_c/fnD$ .....	28
Gambar 3.6 Metode freespan statik.....	29
Gambar 3.7 Span Statik.....	30
Gambar 3.8 Alur pemodelan.....	33
Gambar 3.9 Tampak isometri model yang disimulasikan.....	34
Gambar 3.10 Tampak Depan.....	34
Gambar 3.11 Tampak Samping.....	35
Gambar 3.12 Computational Domain pada pemodelan 3 dimensi.....	36

Gambar 3.13 Meshing Pada Permodelan EFD Lab.....	37
Gambar 3.14 Skema Jalur Pipeline di <i>Oyong Project</i> .....	39
Gambar 4.1 Contoh Visualisasi 3 Dimensi Batang Pipa .....	76
Gambar 4.2 Perbandingan Hasil Cd dari simulasi dan referensi.....	77
Gambar 4.3 Cut plot distribusi tekanan pada $v = 0.43$ gap 0.4 .....	77
Gambar 4.4 Cut plot distribusi kecepatan pada $v = 0.43$ gap 0.4.....	78
Gambar 4.5 Contoh grafik fluktuasi beban (Coefficient Drag) terhadap waktu	78
Gambar 4.6 Perbandingan Hasil St dari simulasi dan referensi .....	79



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Mesh Dependency Test Pada Model .....	22
Tabel 3.1 Data Pipa.....	41
Tabel 3.2 Data Coating .....	42
Tabel 3.3 Tegangan Izin.....	43
Tabel 3.4 Kedalaman Laut .....	43
Tabel 3.5 Gelombang Laut.....	44
Tabel 3.6 Arus Laut .....	44
Tabel 4.1 Calculation Sheet Panjang Span Guo pada KP 0.00-0.500 .....	49
Tabel 4.2 Calculation Sheet Panjang Span Guo pada KP 0.500-3.496 .....	52
Tabel 4.3 Calculation Sheet Panjang Span Guo pada KP 3.496-35.000 .....	56
Tabel 4.4 Calculation Sheet Panjang Span Guo pada KP 35.000-52.900 .....	60
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Panjang Span Guo .....	61
Tabel 4.6 Calculation Sheet Panjang Span Statik pada KP 0.00-0.500.....	65
Tabel 4.7 Calculation Sheet Panjang Span Statik pada KP 0.500-3.496.....	68
Tabel 4.8 Calculation Sheet Panjang Span Statik pada KP 3.496-35.000.....	71
Tabel 4.9 Calculation Sheet Panjang Span Statik pada KP 35.000-52.900.....	74
Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Panjang Span Statik .....	76
Tabel 4.11 Hasil Simulasi 3 Dimensi .....	79
Tabel 4.12 Panjang Span Masing – Masing Kriteria .....	80

## DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
$C_e$	Konstanta kondisi batas	
$C_d$	Koefisien drag	
$E$	Modulus Young	
$F_{IL}$	Beban hidrodinamik	N/m
$f_n$	frekuensi natural	Hz
$f_s$	frekuensi vorteks	Hz
$I$	Inersia	kg.m <sup>2</sup>
$K_s$	Stability parameter	
$L_c$	Panjang span kritis	m
$M$	Momen lentur	kg.m <sup>2</sup>
$M_e$	Massa efektif	kg/m
$Re$	Reynolds number	
$St$	Strouhal number	
$U_r$	Reduce velocity	m/s
$U_c$	Kecepatan arus	m/s
$W$	Beban terdistribusi merata	N/m
$W_{sub}$	Beban pipa terendam	N/m
$\sigma_b$	Tegangan Longitudinal Akibat Momen Lentur	N/m <sup>2</sup>
$\sigma_1$	Tegangan Longitudinal Akibat Beda Tekanan	N/m <sup>2</sup>
$\rho$	Densitas	kg/m <sup>3</sup>



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara penghasil minyak bumi dan gas alam yang terbesar di dunia. Banyak perusahaan yang mengeksplorasi minyak bumi dan gas alam di Indonesia. Untuk memenuhi kebutuhan akan sumber energi dalam negeri, maka dilaksanakan beberapa kegiatan eksplorasi minyak bumi dan gas alam di laut Indonesia. Pada kegiatan eksplorasi minyak bumi dan gas alam, dibutuhkan fasilitas jaringan pipa bawah laut (*Offshore Pipeline*). *Offshore Pipeline* merupakan pipa sangat panjang yang berfungsi untuk mendistribusikan fluida (cair atau gas) antar bangunan anjungan lepas pantai ataupun dari bangunan anjungan lepas pantai langsung ke darat.

Dalam perancangan *pipeline*, ada beberapa bagian penting yang perlu diperhatikan. Beberapa bagian tersebut antara lain tebal dinding (*wall thickness*) pipa, pemilihan material (*material selection*), peninjauan rute (*route survey*), pemilihan rute (*route selection*), data lingkungan (*environmental data*), perlindungan katodik (*cathodic protection*) terhadap korosi, kestabilan pada permukaan bawah laut (*onbottom stability*), analisis tekuk (*buckling analysis*), ekspansi termal (*thermal expansion*), analisis lelah (*fatigue analysis*), dan analisis terhadap bagian pipa yang tidak tertumpu (*span analysis*).



Gambar 1.1 Ilustrasi *freespan*

*Span* terjadi karena berbagai sebab yaitu erosi, *sand wave*, dan *rock beam*. Untuk sebuah operasi yang aman pada *pipeline* gas atau minyak selama atau setelah instalasi, panjang *span* bebas (*free span length*) sebaiknya harus

dijaga dalam batas panjang *span* yang diijinkan (*allowable span length*) yang ditentukan pada proses perancangan.

*Code* mensyaratkan untuk dilakukan analisis *spanning* untuk mendapatkan panjang *span* efektif yang mampu menahan beban statik dan dinamik. Beban statik dipengaruhi oleh tegangan yang terjadi karena berat pipa di bawah laut (*submerged weight*), tekanan, dan tumpuan, sedangkan beban dinamik dipengaruhi oleh arus dan gelombang laut yang dapat menyebabkan vibrasi atau getaran. Ada fenomena sekunder yang dapat menyebabkan getaran dengan frekuensi sangat signifikan. Fenomena sekunder tersebut disebut fenomena pelepasan vorteks (*vortex shedding*) dan getaran akibat peristiwa ini disebut getaran akibat vorteks (*vortex-induced vibration*). *Vortex-induced vibration (VIV)* ini merupakan faktor penting dalam menentukan panjang *span* efektif berdasarkan pengaruh beban dinamik.

Panjang *span* maksimum yang diijinkan merupakan panjang terpendek dari panjang *span* efektif statik dan dinamik. Umumnya panjang *span* efektif terpendek diperoleh dari pengaruh beban dinamik yang diakibatkan arus dan gelombang laut.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Saat ini kegiatan eksplorasi minyak bumi dan gas alam membutuhkan fasilitas jaringan pipa bawah laut (*Offshore Pipeline*). Dalam perancangan *offshore pipeline*, salah satu aspek yang terpenting ialah melakukan perhitungan panjang *span*. Analisa perhitungan panjang *span* dilakukan untuk mendapatkan panjang *span* efektif yang mampu menahan beban secara dinamik.

Perhitungan panjang *span* dilakukan berdasarkan 3 kriteria yaitu:

1. dinamik, berdasarkan *Offshore Pipeline (Boyun Guo)*.
2. Statik, berdasarkan ASME B31.8
3. Simulasi *CFD* dengan menggunakan software *EFD Lab*.

### 1.3 Tujuan Penelitian

- Mengetahui teori perhitungan panjang span dinamik berdasarkan *Offshore Pipeline (Buyon Guo)* dan panjang span statik berdasarkan ASME B31.8.
- Mendapatkan panjang maksimum *span* yang diijinkan (*maximum allowable span lengths*) secara dinamik berdasarkan dan *Offshore Pipeline (Boyun Guo)* dan statik berdasarkan ASME B31.8 untuk pipa gas 14 inci dari pada Oyong Project milik Santos Pty Ltd.
- Mengetahui fenomena vortex shedding yang terjadi pada pipa bawah laut dengan menggunakan software *EFD Lab*.

### 1.4 Pembatasan Masalah

Dalam perhitungan panjang span dinamik dan statik yang diizinkan, dilakukan di beberapa kondisi:

- *Installation Condition* : perhitungan berdasarkan pipa baru, kondisi kosong, periode 2 tahun, dan temperature air laut.
- *Water-filled Condition* : perhitungan berdasarkan pipa baru, terisi air tawar, periode 2 tahun, dan temperature air laut.
- *Hydrotest Condition* : perhitungan berdasarkan pipa baru, terisi air tawar, periode 2 tahun, tekanan dan temperature berdasarkan hydrotest.
- *Operating Condition* : perhitungan berdasarkan pipa yang telah korosi, terisi dengan produk, periode 100 tahun dan temperature pada saat pengoperasian. Berat pipa berdasarkan pipa baru.

Pada penulisan skripsi kali ini, penulis membatasi perhitungan panjang span dinamik dan statik hanya dilakukan pada *Operating Condition*. Hal ini dilakukan karena penulis hanya ingin mengetahui panjang span dinamik yang diizinkan hanya pada saat pengoperasian saja.

Selain itu penulis juga membatasi perhitungan span hanya dari *KP* 0,000 – *KP* 52,900. Hal ini dikarenakan pipa yang terentang bebas hanya sampai di *KP* 52,900. Untuk *KP* 52,900 – *KP* 55,544 pipa sudah dibuatkan parit (post trench) dan juga dikubur (burial).

## 1.5 Metodologi Penelitian

Penelitian dilakukan dengan tiga cara, yaitu:

1. Penelitian kepustakaan

Dalam penelitian kepustakaan ini, penulis mempelajari segala macam informasi yang berkaitan dengan permasalahan yang akan dibahas pada penulisan skripsi dengan membaca buku-buku, diktat, jurnal, dan literatur lainnya baik yang ada dipustaka maupun mencarinya melalui internet.

2. Mengumpulkan data survey mengenai *freespanning analysis* di *Oyong Project Field* milik *Santos Pty Ltd* yang dilakukan untuk melakukan penghitungan dan analisis panjang *span* secara teoritik berdasarkan *Offshore Pipeline (Boyun Guo)* dan *ASME 31.8*.

3. Simulasi Numerik

Simulasi dilakukan dengan menggunakan program *EFD Lab* sebagai perangkat lunak *CFD (Computational Fluids Dynamic)*.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini adalah berdasarkan isi dari setiap bab yang terdapat pada skripsi ini, yaitu :

**BAB I** : Pendahuluan

Bab ini memuat latar belakang permasalahan, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metode penelitian dan sistematika penulisan yang digunakan.

**BAB II** : Landasan Teori

Bab ini berisi penjelasan umum mengenai *offshore pipeline*, *span*, *Vortex-Induced Vibration (VIV)*, dan simulasi *CFD* beserta teori-teori yang berhubungan.

**BAB III : Metodologi Pehitungan,Data dan Simulasi**

Bab ini berisi penjelasan mengenai perhitungan *span* dinamik berdasarkan pengaruh *VIV*, data operasional, data lingkungan di area *Oyong Project, Sampang PSC*, Sekitar 8 km sebelah utara pulau Madura milik *Santos Pty Ltd*.

**BAB IV : Perhitungan Panjang Rentang *Span***

Bab ini berisi perhitungan panjang *span* efektif secara dinamik berdasarkan *Offshore Pipeline (Boyun Guo)* dan statik berdasarkan *ASME B31.8* dan juga Simulasi *span* dilakukan dengan meggunakan software *EFD Lab*.

**BAB V : Kesimpulan dan Saran**

Bab ini memuat kesimpulan yang diambil dari pembahasan sehingga pada akhirnya dapat dikemukakan saran-saran penulis.

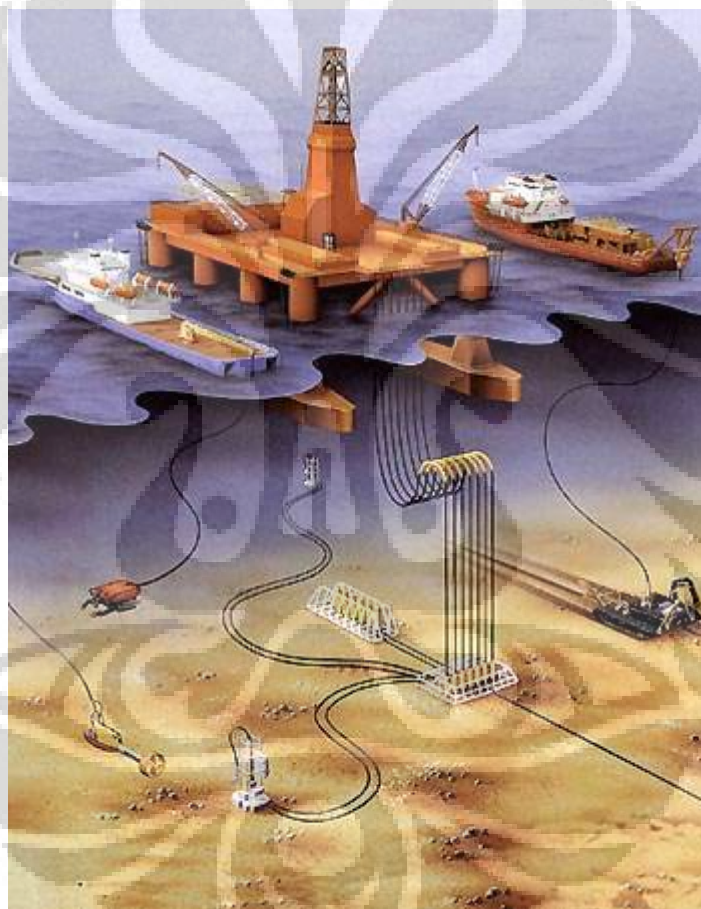
## BAB 2

### DASAR TEORI

#### 2.1 *Offshore Pipeline*

##### 2.1.1 Pengertian Umum

*Pipeline* lepas pantai adalah salah satu struktur bawah laut berupa jaringan pipa yang berfungsi sebagai saluran untuk mengalirkan minyak dan gas dari sumur pengeboran ke *terminal*, *buoy*, atau *platform* untuk melaksanakan proses lebih lanjut.



Gambar 2.1 Ilustrasi *Offshore Pipeline*

##### 2.1.2 Bagian Penting Perancangan *Pipeline*

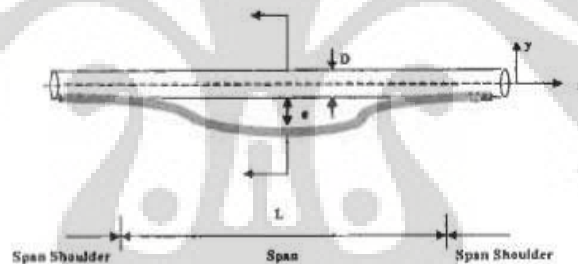
Dalam perancangan *pipeline*, ada beberapa bagian penting yang perlu diperhatikan. Beberapa bagian tersebut antara lain tebal dinding (*wall thickness*) pipa, pemilihan material (*material selection*), peninjauan rute (*route survey*),

pemilihan rute (*route selection*), data lingkungan (*environmental data*), perlindungan katodik (*cathodic protection*) terhadap korosi, kestabilan pada permukaan bawah laut (*onbottom stability*), analisis tekuk (*buckling analysis*), ekspansi termal (*thermal expansion*), analisis lelah (*fatigue analysis*), dan analisis terhadap bagian pipa yang tidak tertumpu (*span analysis*).

## 2.2 *Span*

### 2.2.1 Pengertian

*Span* secara bahasa adalah rentang. Dalam hubungannya dengan *pipeline*, *span* adalah rentang dimana terdapat bagian *pipeline* yang tidak tertumpu. *Pipeline span* dapat terjadi ketika kontak antara *pipeline* dan dasar laut (*seabed*) hilang. Jarak antara *pipeline* dan *span* tersebut disebut *gap*. Panjang *span* didefinisikan sebagai panjang dimana terdapat *gap* yang terus-menerus. Untuk memperjelas gambaran tentang *span* diberikan ilustrasi pada gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2.2 *Pipeline Span*

### 2.2.2 Sebab Terjadinya Span pada Pipeline Bawah Laut

Penyebab terjadinya *span* pada *pipeline* bawah laut antara lain :

- ketidakrataan dasar laut.
- perubahan topologi dasar laut, seperti erosi/*sand wave*
- balok-balok tumpuan buatan



**Gambar 2.3** Profil ketidak rataan dasar laut



**Gambar 2.4** Erosi Pada Permukaan Laut

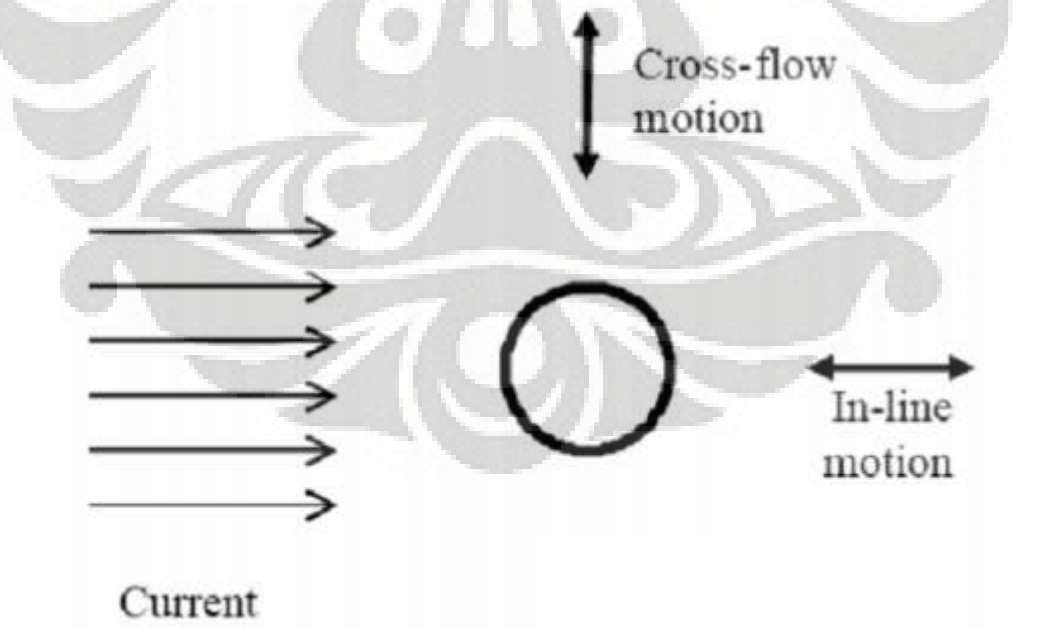
### **2.2.3 Pengaruh *Span* Pada Ketahanan *Pipeline***

Panjang *span* sebenarnya (*actual span length*) yang melebihi panjang *span* yang diijinkan (*allowable span length*) akan menyebabkan kegagalan. Saat frekuensi pelepasan vorteks mendekati frekuensi alami pipa maka akan terjadi resonansi yang bisa menyebabkan kegagalan lelah (*fatigue failure*) pada pipa dan menyebabkan retak (*crack*) pada lapisan beton yang melapisi pipa (*concrete coating*). *Crack* yang merambat dapat menyebabkan *concrete coating* terlepas.



#### 2.2.4 Jenis-Jenis *Span*

Panjang *span* yang diijinkan dibagi menjadi dua kriteria yaitu panjang *span* statik dan dinamik. Panjang *span* statik dipengaruhi oleh tegangan maksimum yang diijinkan. Tegangan maksimum yang diijinkan ini erat hubungannya dengan berat pipa di bawah laut (*submerged weight*), tekanan, dan tipe tumpuan (seperti prinsip balok pada dua tumpuan). Sedangkan panjang *span* dinamik dipengaruhi oleh permulaan *VIV* (*onset of VIV*). *VIV* tersebut berkaitan erat dengan kegagalan lelah pada pipa. Gelombang dan arus adalah dua hal yang sangat mempengaruhi *VIV*. Aliran dari gelombang dan arus pada sekitar pipa akan mengakibatkan pembentukan helaiian pusaran-pusaran pada suatu jalur. Pusaran-pusaran tersebut terlepas secara bolak-balik dari atas ke bawah pipeline menghasilkan gaya osilasi pada pipeline. Osilasi tersebut normalnya dalam arah sejajar dengan arah aliran (*in-line*) tetapi ada juga dalam arah memotong secara tegak lurus terhadap arah aliran (*cross-flow*). Jadi, panjang *span* dinamik pun terbagi dua pula yaitu berdasarkan kriteria *in-line* dan *cross-flow*. Untuk memperjelas, kedua jenis jenis *span* dinamik tersebut secara visual dapat dilihat dalam ilustrasi pada gambar 2.5 berikut ini



**Gambar 2.5** Getaran arah *cross-flow* dan *in-line* dari sebuah *pipeline* dalam suatu aliran fluida

### 2.2.5 Kondisi Perhitungan Panjang *Span*

Dalam perhitungan panjang *span* dinamik dan statik yang diizinkan, dilakukan di beberapa kondisi:

- *Installation Condition* : perhitungan berdasarkan pipa baru, kondisi kosong, periode 2 tahun, dan temperature air laut.
- *Water-filled Condition* : perhitungan berdasarkan pipa baru, terisi air tawar, periode 2 tahun, dan temperature air laut.
- *Hydrotest Condition* : perhitungan berdasarkan pipa baru, terisi air tawar, periode 2 tahun, tekanan dan temperature berdasarkan hydrotest.
- *Operating Condition* : perhitungan berdasarkan pipa yang telah korosi, terisi dengan produk, periode 100 tahun dan temperature pada saat pengoperasian. Berat pipa berdasarkan pipa baru.

## 2.3 *Vortex Induced Vibration (VIV)*

### 2.3.1 Pengertian

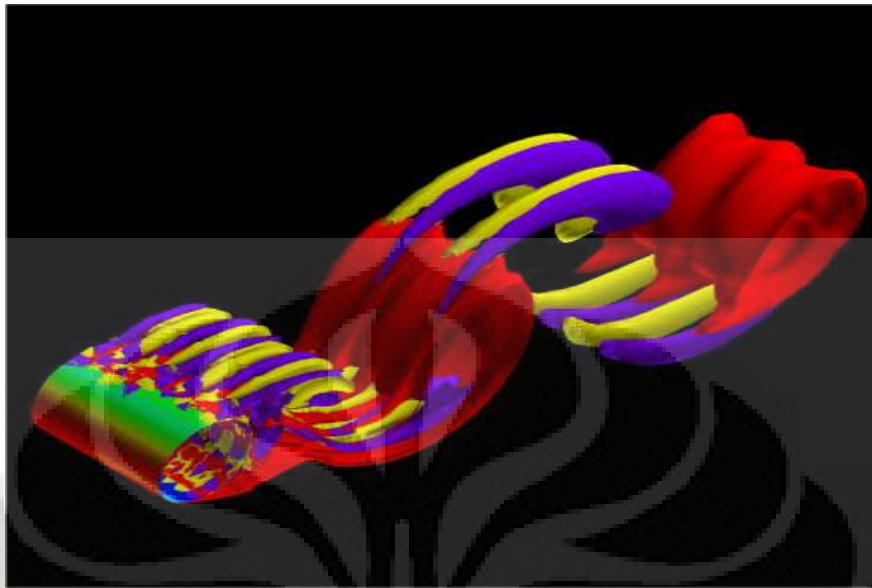
a) Menurut B. Stappenbelt, F. Lalji dan G. Tan dari University of Western Australia, VIV adalah fenomena interaksi antara struktur dan aliran dimana struktur tereksitasi oleh gaya yang diakibatkan oleh vortices (pusaran-pusaran) yang terlepas secara bergantian dari ujung benda bluff.

b) Menurut F.Fossati dan G.Fichera dari University of Catania Italia, VIV adalah mode utama (primary mode) dari interaksi antara fluida dan struktur untuk struktur benda bluff.

c) Menurut Andy Sworn dari British Petroleum, VIV adalah sebuah respon resonansi dari sebuah struktur karena beban pelepasan vorteks yang teratur

Jadi dapat disimpulkan bahwa *Vorteks-induced vibration (VIV)* merupakan getaran yang diakibatkan oleh fenomena sekunder dari interaksi antara fluida dan struktur pipa. Fenomena sekunder tersebut dinamakan fenomena pelepasan vorteks. VIV pada struktur bawah laut, khususnya *pipeline*, merupakan faktor penting yang mempengaruhi semua tahap pengembangan *offshore structure*, dalam hal ini *pipeline*, baik konseptual, perancangan, analisis, konstruksi, dan *monitoring*.

Untuk memperjelas pengertian *VIV* diberikan ilustrasi *VIV* pada gambar 2.6 di bawah ini.



Gambar 2.6 Fenomena *VIV* pada sebuah pipa

### 2.3.2 Parameter *VIV*

Parameter yang berhubungan dengan analisis *VIV* antara lain :

#### 2.3.2.1 Koefisien Drag

Koefisien drag adalah bilangan tak berdimensi yang merupakan karakteristik drag suatu bentuk tertentu pada suatu kecepatan aliran.

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} \quad (2.1)$$

Dimana,

$D$  = gaya drag (N)

$\rho$  = massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$v$  = kecepatan fluida (m/s)

$C_d$  = koefisien drag

$S$  = luas penampang ( $\text{m}^2$ )

### 2.3.2.2 Bilangan *Reynolds*

Bilangan *Reynolds* (*Reynolds number*) adalah bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk menghargai penemunya yaitu *Osborn Reynolds* (1842-1916). Bilangan *Reynolds* didefinisikan sebagai berikut:

$$R_e = \frac{UD}{\nu} \quad (2.2)$$

Dimana :

$R_e$  = bilangan Reynolds

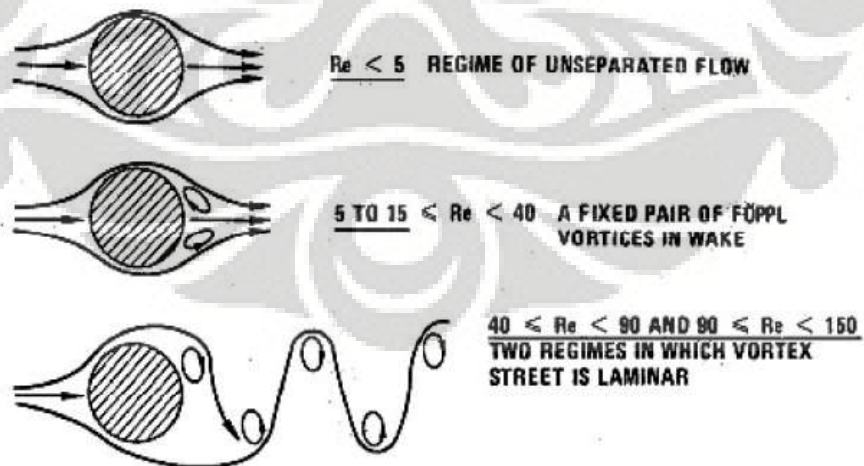
$U$  = kecepatan aliran pada arah normal terhadap sumbu pipa

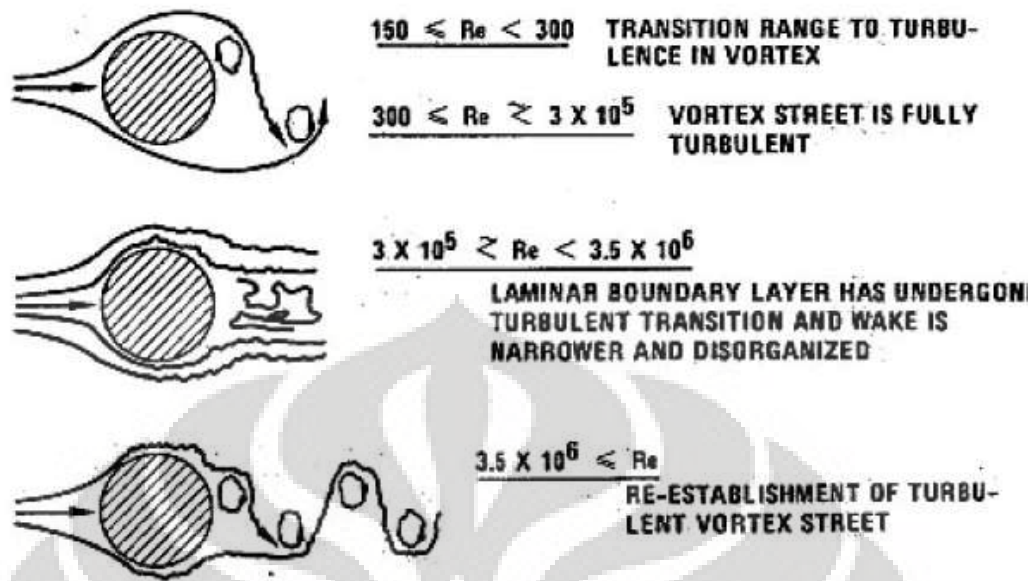
$D$  = diameter luar pipa

$\nu$  = viskositas kinematik fluida

Bilangan *Reynolds* ini merupakan perbandingan antara gaya inersia dan gaya viskos. Bilangan Reynolds menunjukkan aliran laminar atau turbulen dan juga digunakan untuk menentukan rentang *vortex shedding*.

*Vortex shedding* terorganisir secara baik pada rentang sub-critical ( $300 < Re < 3 \times 10^5$ ) dan trans-critical ( $Re > 3 \times 10^6$ ). Pada rentang critical ( $3 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$ ), *vortex shedding* tidak terorganisir atau kacau. Untuk memperjelas fenomena vortex shedding karena pengaruh bilangan Reynolds tersebut diberikan ilustrasi pada gambar 2.7 di bawah ini.





Gambar 2.7 Karakteristik Aliran Berdasarkan Bilangan Reynolds

### 2.3.2.3 Bilangan Strouhal

Karakteristik frekuensi dari suatu geometri dapat direpresentasikan dengan bilangan tak berdimensi *Strouhal number*,  $St$ , yang nilainya juga tergantung pada *Reynolds number*. Bilangan *Strouhal* (*Strouhal number*) adalah bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk menghargai penemunya, *Vincenz Strouhal* dari ceko (1850-1922). Bilangan *Strouhal* didefinisikan sebagai berikut:

$$S_t = \frac{f_s D}{U} \quad (2.3)$$

Dimana :

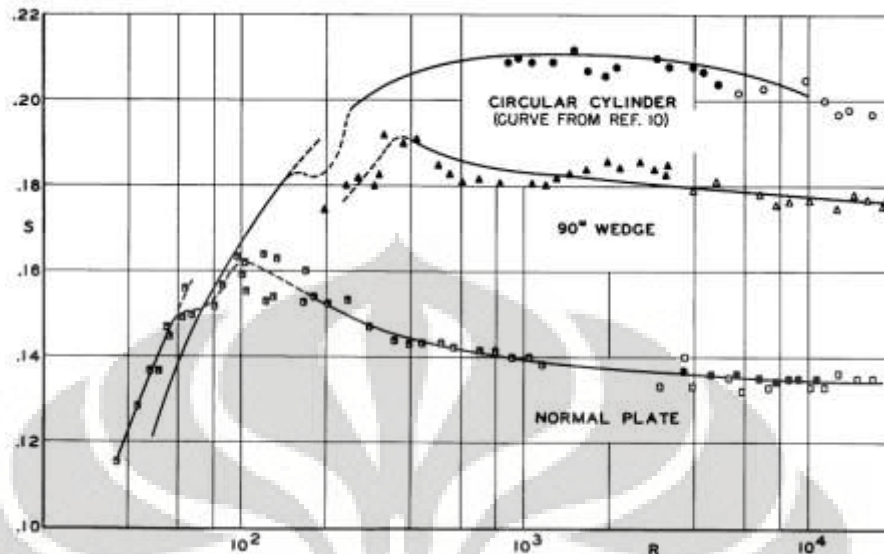
$S_t$  = bilangan *Strouhal*

$f_s$  = frekuensi pelepasan vorteks (*vortex shedding*), yaitu frekuensi dimana pasangan-pasangan pusaran (*pairs of vortices*) terlepas dari pipeline.

D = diameter luar pipa

U = kecepatan aliran pada arah normal terhadap sumbu pipa

Hubungan bilangan *Strouhal* dan bilangan *Reynolds* dapat dilihat pada gambar grafik dibawah ini.



Gambar 2.8 Grafik Strouhal terhadap Reynolds

#### 2.3.2.4 Kecepatan Tereduksi (*Reduced Velocity*)

*Reduced velocity* digunakan untuk menentukan rentang (*range*) kecepatan dari terjadinya VIV. *Reduced velocity* didefinisikan sebagai berikut:

$$V_r = \frac{U}{f_n D} \quad (2.4)$$

dimana:

$V_r$  = kecepatan tereduksi (*reduced velocity*)

$U$  = kecepatan aliran pada arah normal terhadap sumbu pipa

$f_n$  = frekuensi alami pipa

$D$  = diameter luar pipa

#### 2.3.2.5 Parameter Kestabilan (*Stability Parameter*)

Parameter kestabilan digunakan untuk menentukan amplitudo maksimum getaran. Parameter kestabilan didefinisikan sebagai berikut :

$$K_s = \frac{2m_e \delta}{\rho D^2} \quad (2.5)$$

dimana:

$K_s$  = parameter kestabilan

$m_e$  = massa efektif per satuan panjang

$\delta$  = *logarithmic decrement* dari peredaman

$\rho$  = kerapatan massa air laut

$D$  = diameter luar pipa

### 2.3.3 Jenis-Jenis VIV

Getaran yang merupakan jenis dari getaran akibat pelepasan vorteks atau biasa disebut VIV adalah antara lain :

- a) getaran sejajar arah aliran fluida (*in-line*)
- b) getaran tegak lurus arah aliran fluida (*cross-flow*)

Getaran *in-line* dipengaruhi oleh gaya *drag* (gaya tahan) sedangkan getaran *cross-flow* dipengaruhi gaya *lift* (gaya angkat). Karakteristik masing-masing getaran tersebut tergantung dari besaran  $V_r$ . Getaran *in-line* terjadi pada  $1 < V_r < 3,5$  dan getaran *cross-flow* terjadi pada  $2 < V_r < 16$ . Pada getaran *in-line*, pelepasan vorteks masih bersifat simetris pada  $1 < V_r < 2,2$  dan bersifat bolak-balik pada  $V_r > 2,2$ . Pada getaran *cross-flow*, permulaan dari getaran *cross-flow* terjadi pada  $2 < V_r < 3$ , amplitudo getaran mulai naik pada  $3 < V_r < 5$ , lalu amplitudo getaran akan mencapai maksimum pada  $5 < V_r < 7$ , dan amplitudo getaran akan menurun pada  $7 < V_r < 16$ .

### 2.3.4 Fenomena Lock-In

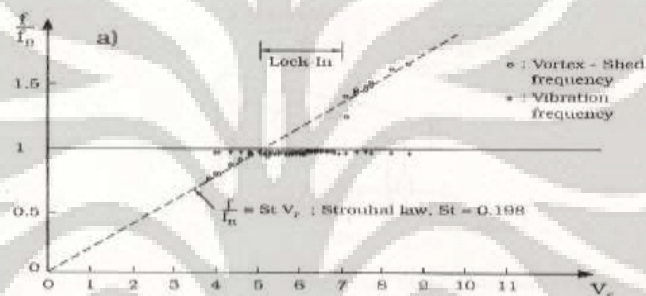
Jika kecepatan aliran terus dinaikkan sampai  $V_r = 5$ , frekuensi pelepasan vorteks ternyata tidak lagi mengikuti hubungan frekuensi *Strouhal* yaitu:

$$\frac{f_u}{f_n} = S_t \frac{U}{Df_n} = S_t V_r \text{ dengan } S_t = 0,198 (\approx 0,2), \text{ tapi mulai mengikuti atau seolah}$$

terkunci di sekitar frekuensi alami sistem-nya. Hal ini terjadi pada rentang sekitar  $5 < V_r < 7$ . Fenomena ini bermakna bahwa pada rentang nilai  $V_r$  tsb, mekanisme pelepasan vorteks tidak lagi dikontrol oleh hukum *Strouhal* seperti diatas, melainkan dipengaruhi oleh getaran silinder itu sendiri. Pemisahan vorteks paksa berinteraksi dengan getaran silinder sebelum vorteks terlepas, dan terjadi pada

frekuensi yang sama dengan frekuensi getaran silinder, bukan pada frekuensi Strouhal. Fenomena inilah yang dikenal sebagai *lock-in*. Pada beberapa literatur, sering juga disebut sebagai “*resonance*”, “*synchronization*”, atau “*wake capture*”. Dalam rentang *lock-in* ini, tiga frekuensi saling berdekatan yaitu berturut-turut frekuensi getaran silinder, frekuensi pelepasan vorteks (*vortex-shedding*) dan frekuensi alami sistem ( $f = f_v = f_n$ ). Pada kondisi *lock-in* ini juga, pelepasan vorteks, selanjutnya gaya *lift*, akan beresilasi serempak dengan gerakan silinder. Sehingga amplitudo getaran yang dihasilkan bisa sangat besar.

Fenomena *lock-in* ini dapat dijelaskan oleh eksperimen model fisik oleh Feng (1968) dan hasilnya diperlihatkan pada gambar 2.8 berikut ini.



Gambar 2.9 Frekuensi respon sebagai fungsi dari parameter  $V_r$

## 2.4 CFD

### 2.4.1 CFD dan Aplikasinya

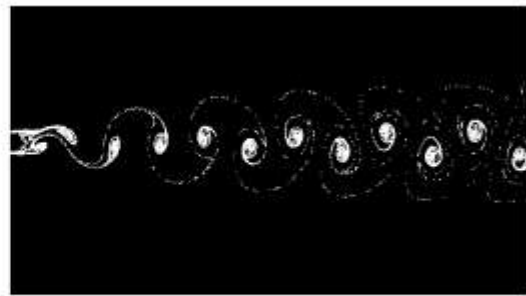
*CFD (Computational Fluid Dynamics)* adalah analisa sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan kalor, dan fenomena-fenomena lain yang berkaitan dengannya, misalnya reaksi kimia, dengan menggunakan simulasi yang berbasis computer.

*CFD* menyediakan prediksi kualitatif dan kuantitatif suatu aliran melalui pemodelan matematis, metode numerik, dengan menggunakan software.





real experiment



CFD simulation

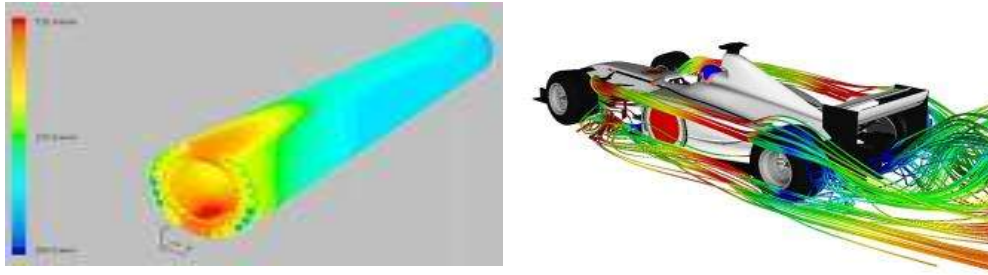
**Gambar 2.10** Contoh perbandingan eksperimen nyata dengan hasil *CFD*

Ada 3 hal yang dibutuhkan untuk dapat melakukan *CFD*:

1. Software : digunakan untuk melakukan operasi dan perhitungan
2. Hardware: harus mendukung agar dapat menjalankan *software CFD*
3. Brainware: keterampilan user dalam *CFD*

Aplikasi *CFD* antara lain:

- Sistem perpipaan : untuk mengetahui karakteristik aliran internal dan eksternal
- dari pesawat dan kendaraan: mengetahui lift & drag
- Lingkungan: distribusi polusi
- *Biomedical*: aliran darah dalam pembuluh darah
- Listrik dan elektronik: pendinginan rangkaian



**Gambar 2.11.** Contoh aplikasi *CFD* pada batang pipa dan mobil balap

Terdapat 3 elemen/modul dalam *CFD*:

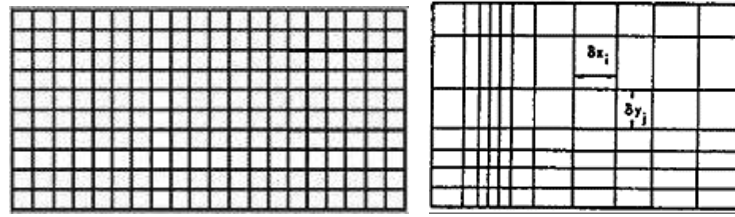
1. *Pre-processor* : membuat geometri/model, *mesh generation*, input *flow properties* dan *boundary condition*
2. *Solver* : melakukan perhitungan numerik
3. *Post-processor* : Visualisasi hasil perhitungan

Ketiga modul tersebut ada yang sudah terintegrasi dalam satu paket program dan ada juga yang terpisah-pisah dalam software yang berbeda. Contohnya pada *EFD Lab*, ketiga modul tersebut berada pada 1 program, hal ini akan memberikan kemudahan misalnya ketika akan melakukan re-design model maka dapat dilakukan pada environment yang sama tanpa perlu melakukan import data dari program lain. Untuk modul yang terpisah contohnya pada *Fluent*: model *CAD* dan *mesh generation* dilakukan pada *Gambit*, kemudian baru hasilnya di-import ke *Fluent*.

*CFD* merupakan *tool*, hasil dari analisis dan simulasi dengan *CFD* masih tergantung pada penggunaannya. Apabila terjadi kesalahan pada *input* data, maka hasilnya juga tentu akan salah. Oleh karena itu, keahlian, pengetahuan dan pemahaman *user* tentang konsep-konsep aliran yang akan disimulasikan adalah sangat penting.

## 2.5. *Meshing*

Dalam melakukan perhitungan numerik, dilakukan diskritisasi pada model, yaitu model dengan geometri volume yang kontinyu dibagi-bagi menjadi elemen-elemen volume hingga. Oleh karena itu, dilakukan *meshing* pada model.

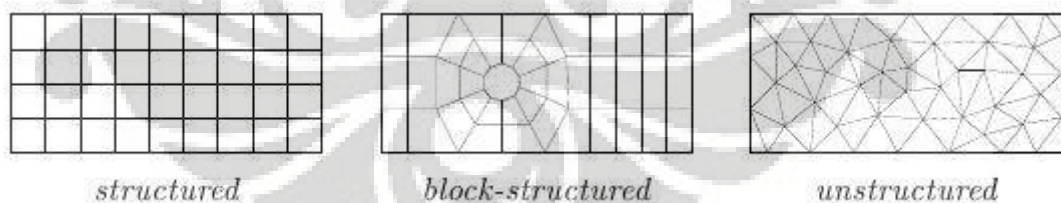


**Gambar 2.12** *Uniform mesh* (kiri) dan *non-uniform mesh* (kanan)

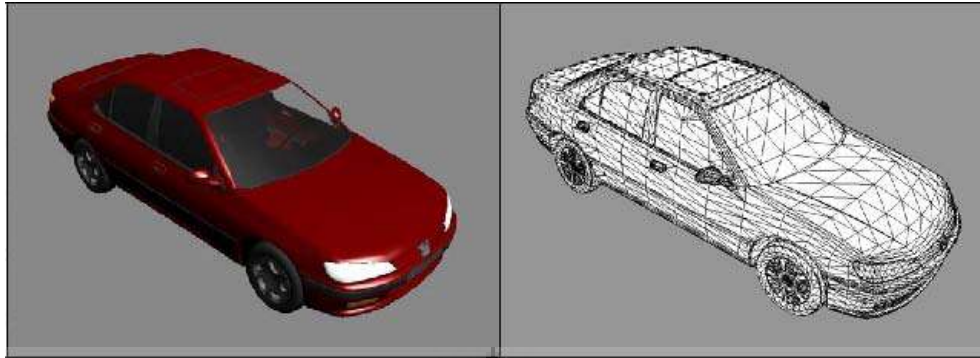
Mesh yang ideal antara lain memiliki kriteria:

1. *Conform* dengan geometri model
2. Resolusi grid lebih banyak pada daerah dimana fenomena yang intensif mungkin terjadi, misalnya terdapat gradien kecepatan dan temperatur yang besar
3. Fluida masuk ke dalam elemen baiknya secara ortogonal/tegak lurus.

Semakin banyak mesh/grid maka hasil perhitungan akan semakin akurat, namun demikian hal tersebut menuntut kemampuan hardware dan waktu perhitungan yang lebih. Mesh/grid yang optimal seringkali adalah yang non-uniform, yaitu *fine grid* (grid lebih banyak/rapat) di daerah yang terdapat variasi yang besar antara titik satu dan yang lainnya, dan *coarse grid* (grid lebih jarang) di daerah dimana variasinya relatif kecil (sebagaimana disebutkan pada kriteria *mesh* yang ideal).



**Gambar 2.13.** Klasifikasi *mesh*



**Gambar 2.14** Contoh *meshing* pada bentuk geometri model mobil

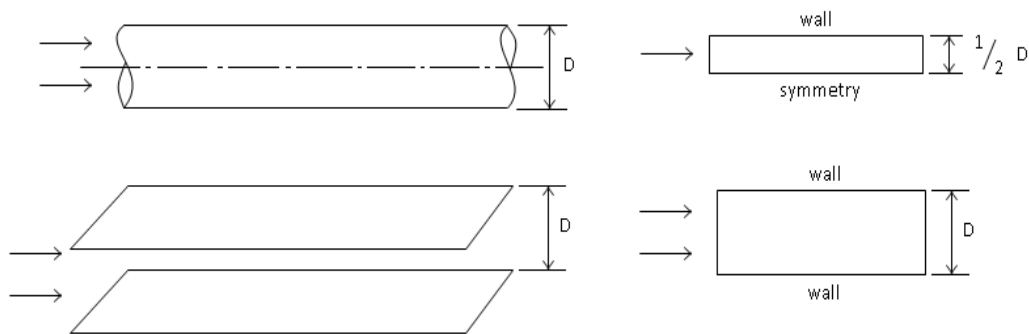
Software *CFD* ada yang menggunakan *adaptive mesh*, dimana *software* akan membentuk *mesh* secara otomatis sedemikian sehingga distribusi mesh sesuai dengan suatu aliran yang akan dianalisis. Dengan adanya teknologi ini, maka pengaturan distribusi *mesh* tidak perlu dilakukan lagi secara manual oleh *user*.

## **2.6** **Prosedur Simulasi *CFD***

### **2.6.1** **Pemodelan**

Pemodelan adalah langkah awal dalam melakukan simulasi, dimana dalam tahap ini dilakukan pembuatan dari geometri aliran. Untuk suatu kasus yang rumit, adalah lebih baik untuk membuat terlebih dahulu model yang sederhana, yang melalui simulasi pada model sederhana ini nantinya bisa menggambarkan fenomena-fenomena utama pada aliran dan kemudian akan sangat membantu dalam menginterpretasikan hasil pada model yang sesungguhnya.

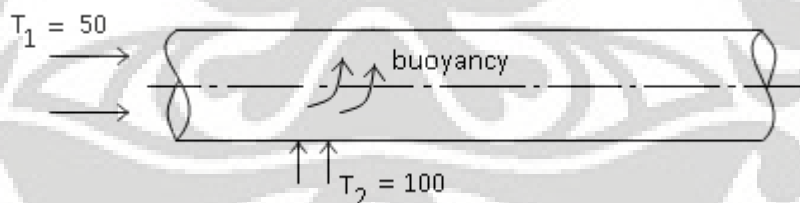
Pemodelan dengan 2 dimensi atau 3 dimensi ditentukan oleh simetri aliran. Untuk aliran yang simetri maka dapat digunakan pemodelan 2 dimensi sehingga tidak membuang waktu perhitungan dan tidak memerlukan banyak resources computer. Penggunaan simetri dalam pendefinisian computational domain misalnya sebagaimana gambar dibawah ini.



**Gambar 2.15** Contoh simetri dalam pemodelan

Gambar 2.15 bagian atas merupakan pipa yang mana aliran dalamnya bisa disimulasikan secara 2-D *axissymmetry*, yaitu simetri terhadap sumbunya sehingga dapat diambil setengah dari diameternya kemudian pada bagian sumbu di-*set symmetry*. Pada gambar bagian bawah, aliran diantara 2 buah plat, dapat dianggap sama fenomenanya dalam arah tegak lurus bidang gambar, sehingga dapat juga disimulasikan dengan 2 dimensi.

Namun demikian, bentuk geometri yang simetris belum tentu dapat dimodelkan dengan simetri, misalnya pada aliran dalam pipa yang dipanaskan bagian bawahnya, ini akan menghasilkan efek *buoyancy* sehingga aliran menjadi tidak simetris.



**Gambar 2.16** Aliran tidak dapat dimodelkan secara simetris

## 2.6.2 Hasil Simulasi

Hasil yang diperoleh dari simulasi tergantung dari jumlah dan distribusi mesh. Dalam rangka memperoleh hasil simulasi yang paling akurat dan juga efisien, maka harus dilakukan *mesh dependency test*. Ini dilakukan dengan mencoba berbagai distribusi mesh, kemudian memilih salah satu yang paling tepat untuk digunakan. Untuk meyakinkan bahwa hasil yang diperoleh sudah baik dan

tidak terpengaruh oleh *meshing*, maka dilakukan *mesh dependency test*. Ini dilakukan pada suatu kondisi model, dan hasil dari percobaan pada 8 jenis mesh ditunjukkan pada Tabel 2.1

**Tabel 2.1** *Mesh dependency test* pada model

mesh	Coefficient
	Drag
1	1.134459037
2	0.92084745
3	0.796775881
4	0.611814398
5	0.583772394

Dari hasil *mesh dependency test*, penulis menggunakan mesh level 5 untuk menjalankan simulasi-simulasi dengan pertimbangan hasil yang telah mengerucut dan efisiensi dalam waktu perhitungan. Seperti dapat dilihat pada Tabel 2.1, hasil dari mesh level 4 dan 5 tidak berbeda jauh.

## BAB 3

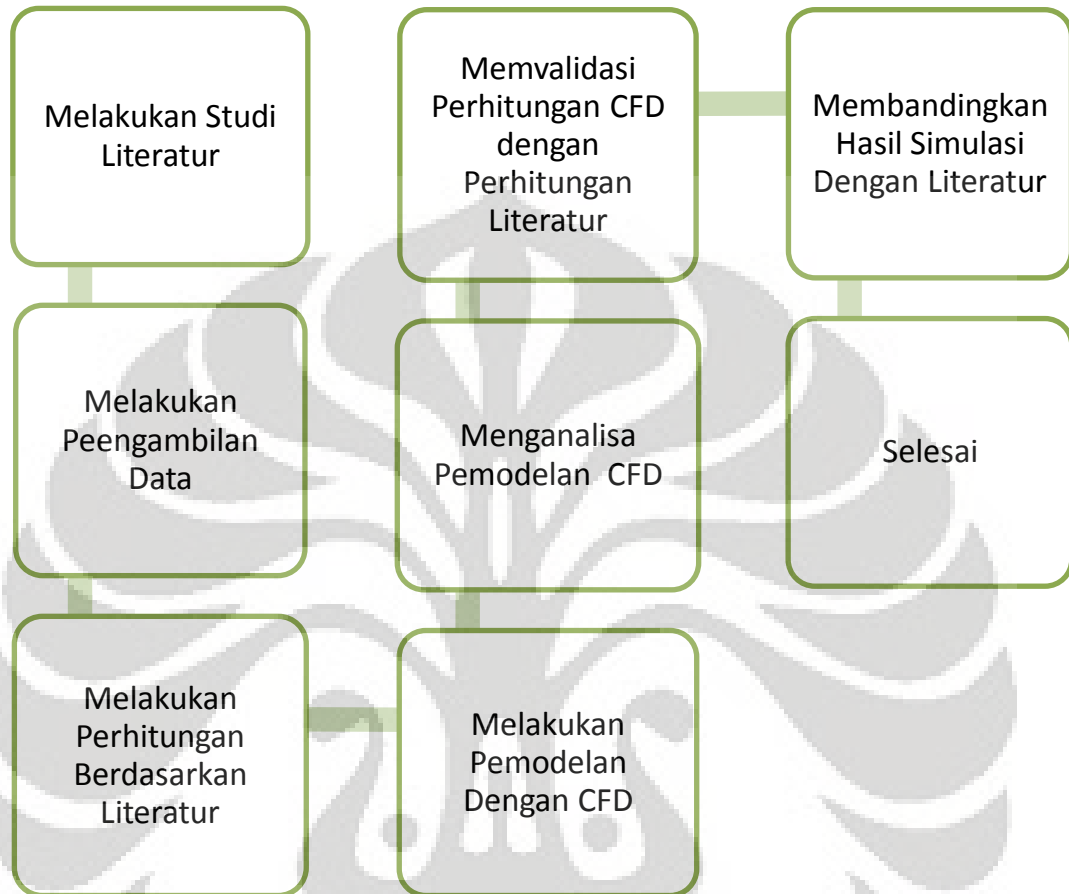
### METODOLOGI PERHITUNGAN, DATA DAN SIMULASI

#### 3.1 Metodologi Perhitungan

##### 3.1.1 Pendahuluan

Perhitungan ini dilakukan pada sistem perpipaan milik Santos Pty Ltd. yang berada 8 kilometer selatan Pulau Madura tepatnya di area Oyong field dengan batasan masalah yaitu: perhitungan panjang span dinamik dan statik hanya dilakukan pada *Operating Condition*. Tujuan dari perhitungan dan pensimulasian ini adalah untuk mendapatkan panjang maksimum *span* yang diijinkan (*maximum allowable span lengths*). Metodologi yang digunakan adalah pengambilan data di PT Rekayasa Industri yang dalam hal ini sebagai kontraktor pembangunan sistem perpipaan bawah laut tersebut. Data yang diambil berupa data properti pipa 14 inchi, data lingkungan yang berupa kedalaman laut, arus disekitar sistem perpipaan dan tekanan. yang nantinya data tersebut akan dijadikan input dalam perhitungan panjang span berdasarkan literatur dan juga pada tahap lebih lanjut yaitu pensimulasian aliran eksternal yang terjadi pada sistem pipa tersebut dengan menggunakan program *EFD Lab*. Tujuan dari simulasi tersebut ialah untuk mengetahui bagaimana *vortex shedding* terjadi dan juga mendapatkan nilai *Drag Coefficient (Cd)* yang nantinya akan didapatkan frekuensi *vortex shedding* pada pipa tersebut sehingga kita dapat menentukan panjang *span* agar frekuensi vorteks tidak mendekati frekuensi natural dari pipa tersebut.

### 3.1.2 Alur Kerangka Penelitian

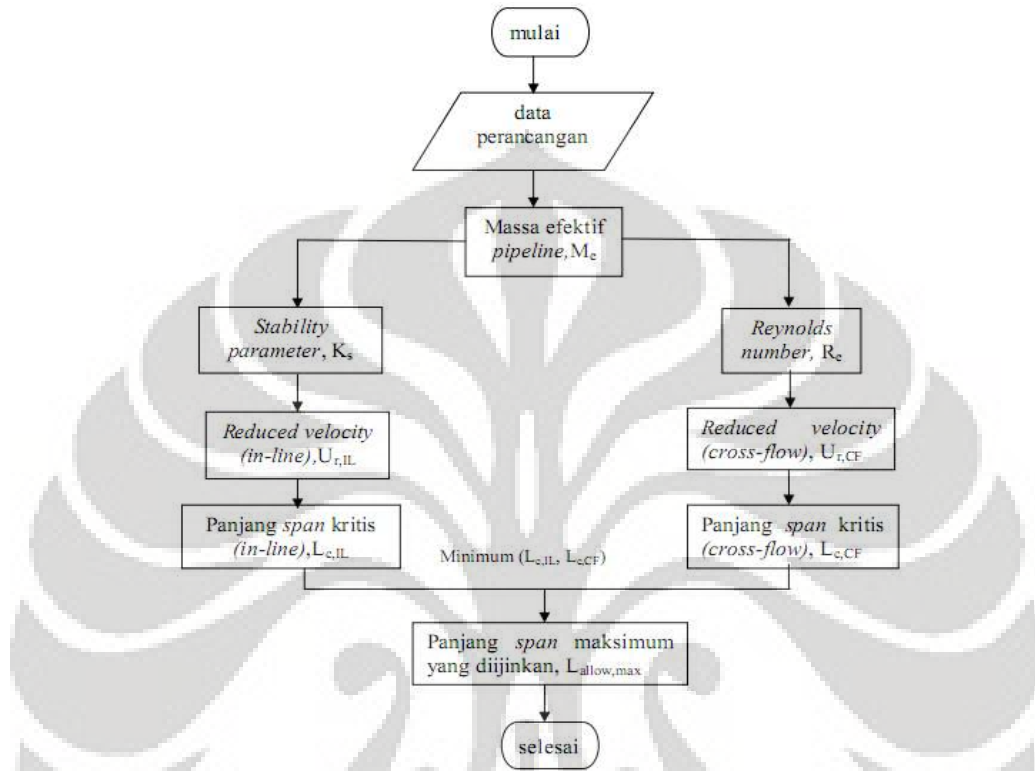


**Gambar 3.1** Alur kerangka Penelitian



### 3.2 Metodologi Panjang *Span* Dinamik Berdasarkan *Boyun Guo*

Metodologi *panjang span* yang dipengaruhi oleh *VIV* berdasarkan *Boyun Guo* secara umum tergambar dalam diagram alir berikut.



Gambar 3.2 Metodologi Perhitungan *Boyun Guo*

#### 3.2.1 Kondisi Batas

Kondisi batas mempunyai nilai yang berbeda tergantung jenis kondisi batasnya. Nilai tersebut dinamakan konstanta kondisi batas, yaitu antara lain:

$$C_e = 9,87 \text{ (pinned-pinned)}$$

$$C_e = 15,5 \text{ (pinned-fixed)}$$

$$C_e = 22,2 \text{ (fixed-fixed)} \tag{3.1}$$

keterangan;

*pinned-pinned* : digunakan untuk span dimana masing-masing ujungnya tidak diperbolehkan dalam arah *in-line* dan *cross-flow* terhadap arah aliran arus tapi masih diperbolehkan berotasi terhadap sumbu pipa tersebut.

*fixed-fixed* : masing-masing ujung span tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-line* dan *cross-flow* terhadap arah aliran arus serta rotasi terhadap sumbu pipanya.

*Pinned-fixed* : salah satu ujung span tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-line* dan *cross-flow* terhadap arah aliran arus serta rotasi terhadap sumbu pipanya sedangkan ujung yang satu masih diperbolehkan berotasi terhadap sumbu pipanya.

### 3.2.2 Massa Efektif Pipeline

Massa efektif *pipeline* ( $M_e$ ) adalah jumlah dari massa per satuan panjang dari pipa, isi di dalam pipa, dan air yang dipindahkan.

$$M_e = M_p + M_c + M_a \quad (3.2)$$

dimana:

$M_p$  = massa per satuan panjang pipa termasuk *coating* (kg/m)

$M_c$  = massa per satuan panjang fluida dalam pipa (kg/m)

$M_a$  = massa per satuan panjang yang ditambahkan (kg/m)

Massa persatuan pipa termasuk *coating* ( $M_p$ ) adalah massa persatuan panjang dari lapisan baja, anti-korosi, dan beton (*concrete*) dari pipa tersebut.

$$M_p = M_s + M_{cc} + M_{crt} \quad (3.3)$$

$$M_s = \frac{\pi}{4} [D_s^2 - (D_s - 2t)^2] \rho_{\text{pipa}} \quad (3.4)$$

$$M_{cc} = \frac{\pi}{4} [(D_s + 2t_{cc})^2 - D_s^2] \rho_{cc} \quad (3.5)$$

$$M = \frac{\pi}{4} [(D_s + 2t_{cc} + 2t_{crt})^2 - (D_s + 2t_{cc})^2] \rho_{crt} \quad (3.6)$$

Massa persatuan panjang fluida dalam pipa didefinisikan sebagai berikut:

$$M_c = \frac{\pi}{4} (D_s - 2t)^2 \rho_f \quad (3.7)$$

Massa yang ditambahkan (*added mass*) adalah massa air yang dipindahkan oleh *pipeline*.

$$M_c = \frac{\pi D^2 \rho}{4} \quad (3.8)$$

dimana :

$D$  = diameter terluar *pipeline* =  $D_s + 2t_{cc} + 2t_{crt}$

### 3.2.3 Stability Parameter

*Stability parameter* ( $K_s$ ) didefinisikan sebagai berikut:

$$K_s = \frac{2M_e \delta_s}{\rho D^2} \quad (3.9)$$

dimana:

$\delta_s$  = *logarithmic decrement* dari peredaman struktur (= 0,125)

### 3.2.4 Reynolds Number

*Reynolds number* ( $Re$ ) adalah parameter tak berdimensi yang menunjukkan perbandingan antara gaya inersia dan gaya viskos dan didefinisikan sebagai berikut:

$$Re = \frac{U_c D}{\nu_k} \quad (3.10)$$

### 3.2.5 Reduced Velocity

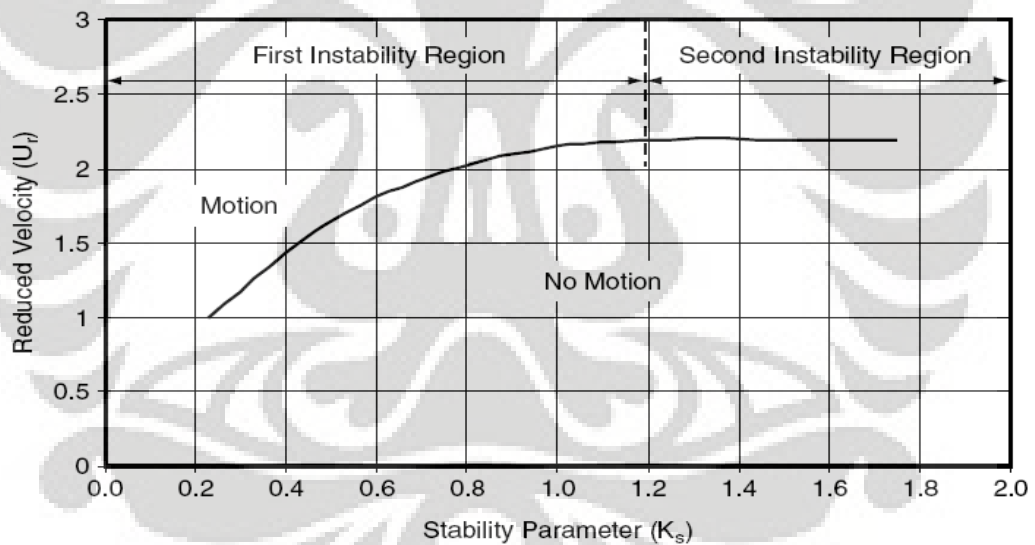
Reduced velocity ( $U_r$ ) adalah kecepatan dimana osilasi karena pelepasan vorteks dapat terjadi. Persamaan untuk reduced velocity adalah sebagai berikut:

$$U_r = \frac{U_c}{f_n D} \quad (3.11)$$

dimana:

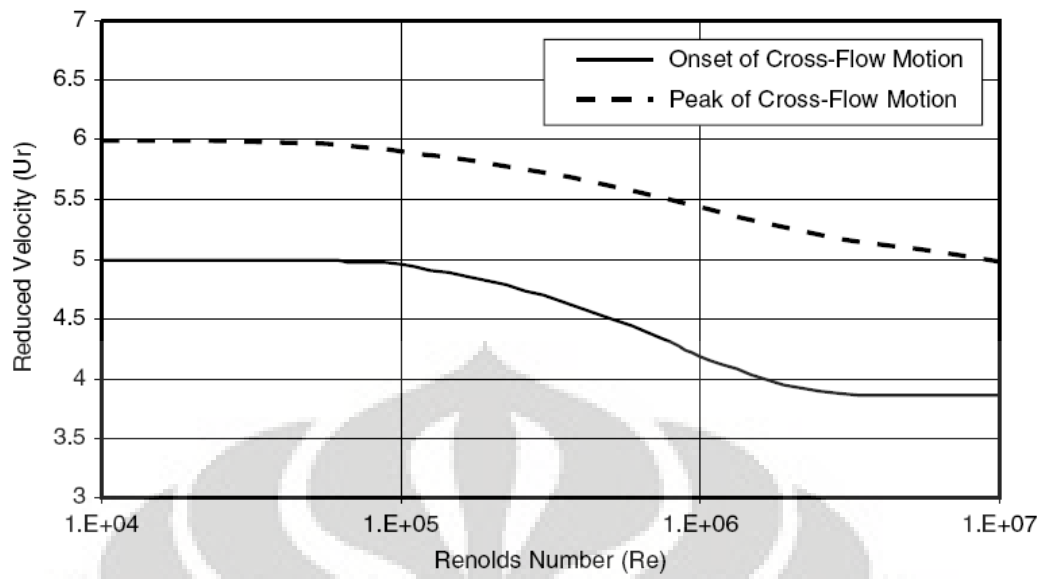
$f_n$  = frekuensi alami pipa, lihat persamaan (3.12)

Reduced velocity didapat dari grafik hubungan reduced velocity dan stability parameter atau reynolds number. Reduced velocity untuk osilasi secara *in-line* didapat dari grafiknya dengan stability parameter seperti pada gambar 3.1



Gambar 3.3 Grafik Hubungan antara stability parameter dan reduced velocity

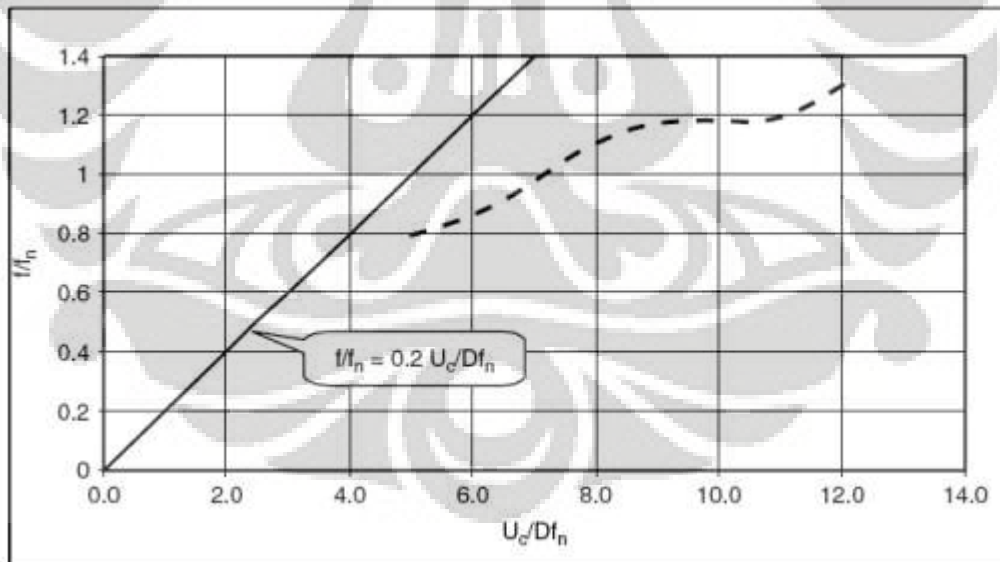
Reduced velocity untuk osilasi secara *cross-flow* didapat dari grafiknya dengan Reynolds Number seperti pada gambar 3.2.



Gambar 3.4 Hubungan antara *Reynolds Number* dan *reduced velocity*

### 3.2.6 Rasio Frekuensi

Rasio frekuensi diperoleh dari grafik  $U_c/f_n D$  terhadap  $f_s/f_n$  pada gambar dibawah ini



Gambar 3.5 grafik  $U_c/f_n D$  terhadap  $f_s/f_n$

### 3.2.7 Panjang *Span* Boyun Guo

Panjang *span* kritis diperoleh dari hubungan antara frekuensi alami pipa dan *reduced velocity*. Frekuensi alami pipa dipengaruhi oleh kekakuan pipa, kondisi batas, panjang *span*, dan massa efektif pipa. Frekuensi alami tersebut didefinisikan sebagai berikut:

$$f_n = \frac{C_e}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{M_e L_s^4}} \quad (3.12)$$

dimana:

$L_s$  = panjang *span*

Panjang *span* kritis didapat dengan mensubstitusikan persamaan (3.12) pada persamaan (3.11) dan pada akhirnya didapat persamaan panjang *span* kritis adalah sebagai berikut:

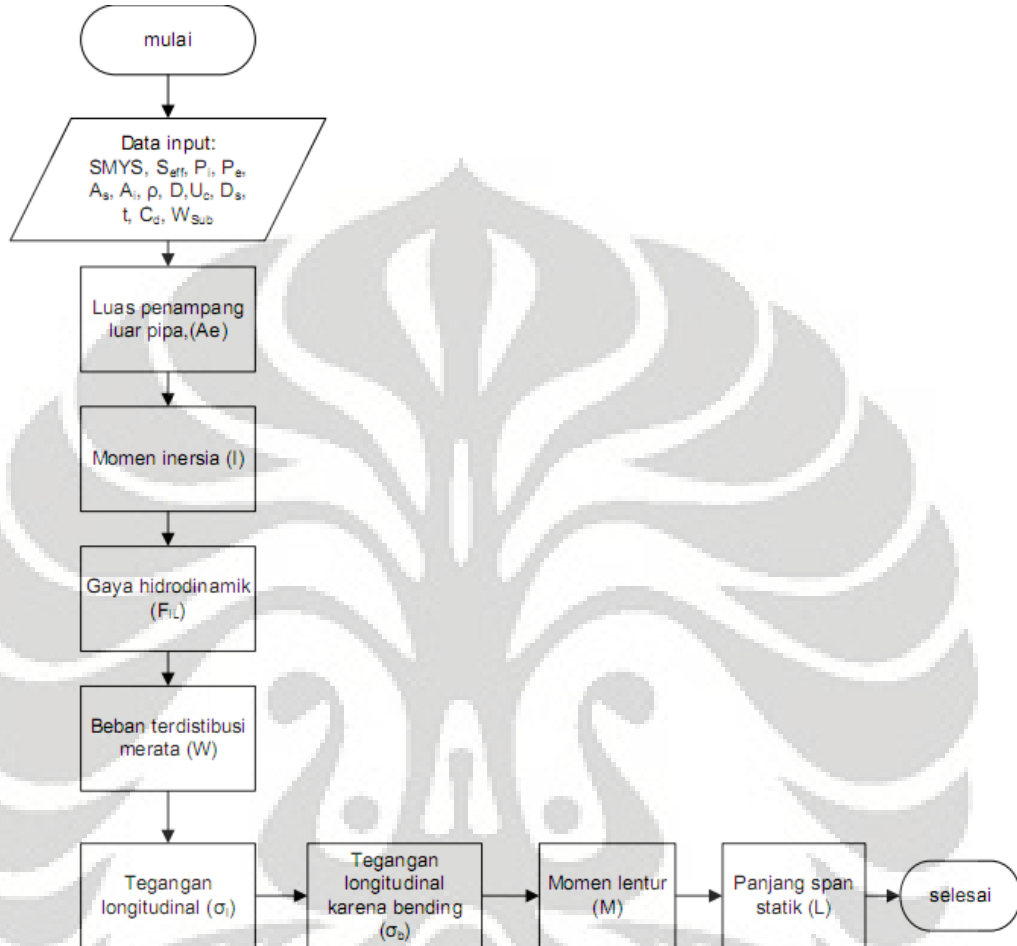
$$L_s = \left( \frac{C_e U_r D}{2\pi U_c} \right)^{0.5} \left( \frac{EI}{M_e} \right)^{0.25} \quad (3.13)$$

Perbedaan panjang *span* kritis untuk gerakan *in-line* dan *cross-flow* terletak pada penggunaan *reduced velocity*. Untuk gerakan *in-line*, *reduced velocity* yang digunakan adalah berdasarkan hubungan dengan *stability parameter* seperti ditunjukkan pada gambar 3.2, sedangkan untuk gerakan *cross-flow*, *reduced velocity* yang digunakan adalah berdasarkan hubungan dengan *Reynolds Number* seperti ditunjukkan pada gambar 3.3. Penentuan panjang *span* maksimum yang diijinkan adalah berdasarkan panjang *span* minimum antara dua panjang *span* kritis tersebut.

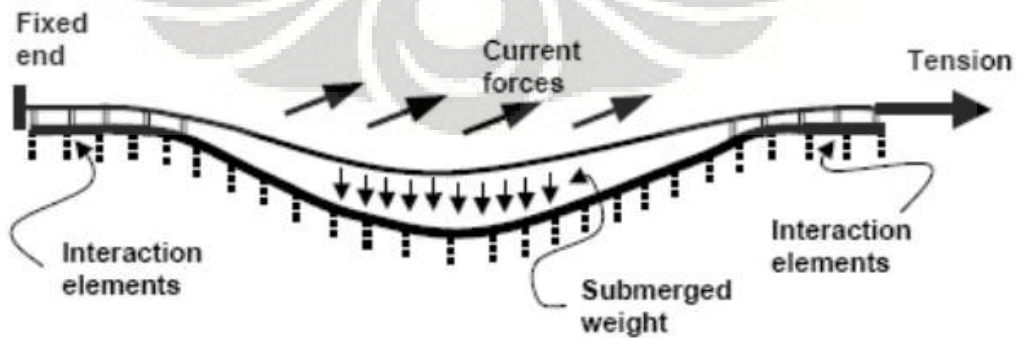
Perhitungan panjang *span* berdasarkan *Guo* dipengaruhi kecepatan arus. Kecepatan arus yang semakin tinggi akan menyebabkan panjang *span* kritis harus lebih pendek. Berdasarkan persamaan (3.13) kecepatan arus berbanding kuadrat terbalik dengan panjang *span* kritis yang didapat.

### 3.3 Metode *Freerspanning* Statik

Metodologi perhitungan panjang span statik dapat dilihat pada diagram alir dibawah ini



Gambar 3.6 Metode *Freerspan* Statik



Gambar 3.7 Span Statik

Perhitungan panjang span statik berhubungan dengan tegangan yang diizinkan (*Allowable Stresses*). Tegangan yang terjadi, baik longitudinal maupun kombinasi dibatasi oleh faktor *Specified Minimum Yield Strength* (SMYS). Seperti pada table dibawah ini.

Model yang digunakan untuk perhitungan span statik adalah batang sederhana yang ditumpu pada kedua ujungnya berupa tumpuan *fixed-pinned*. Parameter yang digunakan pada perhitungan span statik adalah sebagai berikut:

### 3.3.1 Momen Lentur

Persamaan untuk momen lentur untuk batang sederhana yang mempunyai beban terdistribusi merata dengan tumpuan *fixed-pinned* adalah sebagai berikut:

$$M = \frac{W.L^2}{8} \quad (3.14)$$

Dimana:

$W$  = Beban terdistribusi merata

$L$  = Panjang *span*

### 3.3.2 Beban Terdistribusi Merata

Beban terdistribusi merata ( $W$ ) yang bekerja pada pipa merupakan resultan dari beban pipa terendam (*submerged*) dan beban hidrodinamik yang bekerja secara tegak lurus satu sama lain. Beban terdistribusi merata dinyatakan secara matematik dalam persamaan berikut:

$$W = \sqrt{F_{IL}^2 + W_{sub}^2} \quad (3.15)$$

Dimana :

$F_{IL}$  = beban hidrodinamik

$W_{sub}$  = beban pipa terendam



### 3.3.3 Tegangan Longitudinal Akibat Momen Lentur

Tegangan Longitudinal ( $\sigma_b$ ) pada pipa akibat momen lentur dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\sigma_b = \frac{M.D}{2.I} \quad (3.16)$$

Dimana :

D = Diameter pipa

I = Momen Inersia

### 3.3.4 Tegangan Longitudinal Akibat Beda Tekanan

Tegangan longitudinal akibat beda tekanan ( $\sigma_1$ ) dinyatakan dengan persamaan :

$$\sigma_1 = \frac{S_{eff} + P_i \cdot A_i - P_e \cdot A_e}{A_{steel}} \quad (3.17)$$

Dimana :

$S_{eff}$  = gaya aksial efektif

$A_i$  = luas permukaan dalam penampang melintang pipa

$A_e$  = luas permukaan luar penampang melintang pipa

### 3.3.5 Panjang Span Statik

Panjang span statik diperoleh dari modifikasi persamaan. Panjang span static ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$L = \sqrt{\frac{8M}{W}} \quad (3.18)$$

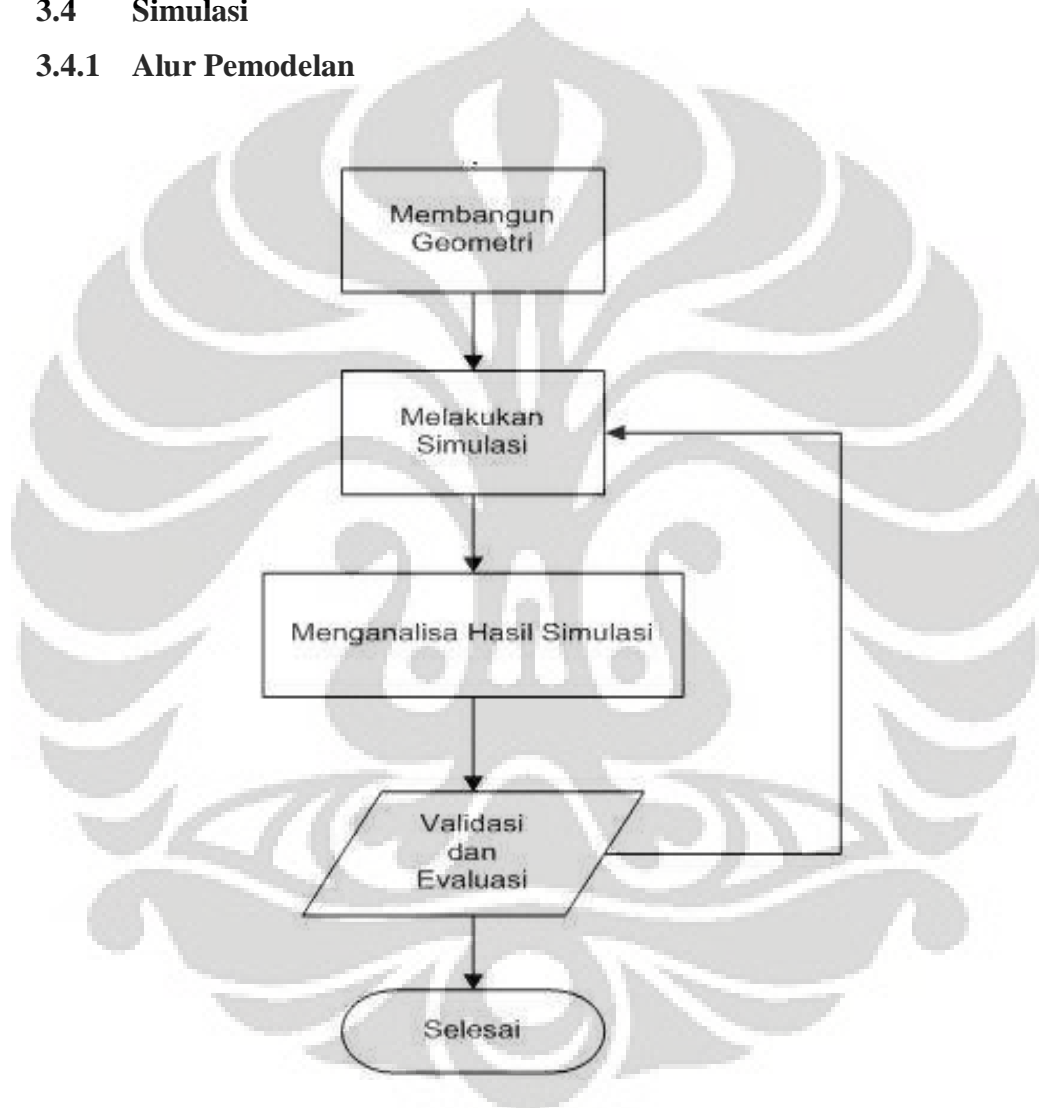
Dimana :

$M$  = Momen lentur

$W$  = Beban terdistribusi merata

### 3.4 Simulasi

#### 3.4.1 Alur Pemodelan



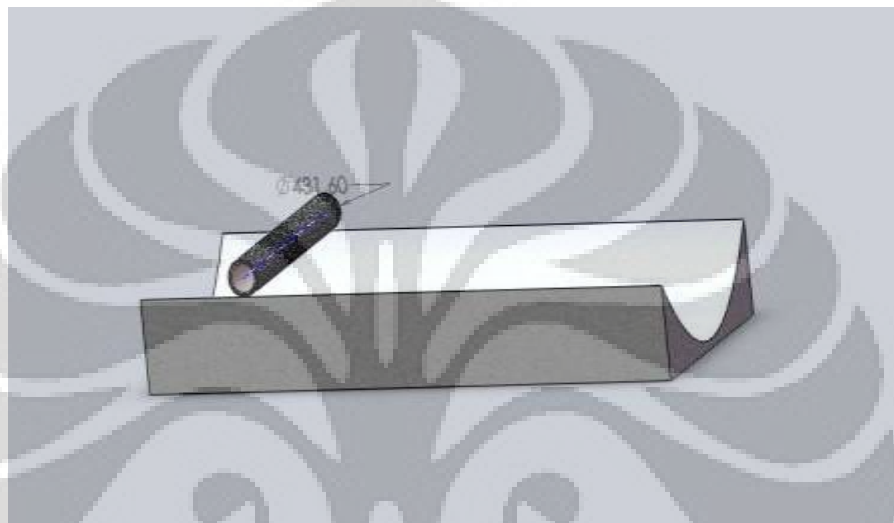
**Gambar 3.8** Alur Pemodelan

#### 3.4.2 Proses Pembuatan Geometri

Pada simulasi ini, skenarionya adalah pipa yang diletakkan diatas tanah (dasar laut) yang diantara pipa dan dasar laut diberi variasi gap (jarak).

Penyederhanaan dilakukan dengan hanya menggambarkan pipa dan tanah, tanpa menyertakan objek lain seperti ikan, terumbu karang, dan sebagainya. Adalah penting untuk membuat dasar laut tempat dimana pipa ini diletakkan dan jarak yang diberikan diantara keduanya, karena ini akan mempengaruhi pola aliran air laut di tempat itu, terutama dalam pengaruhnya terhadap pembentukan *boundary layer*. Simulasi akan dilakukan dengan arus bergerak dalam arah sumbu z-positif.

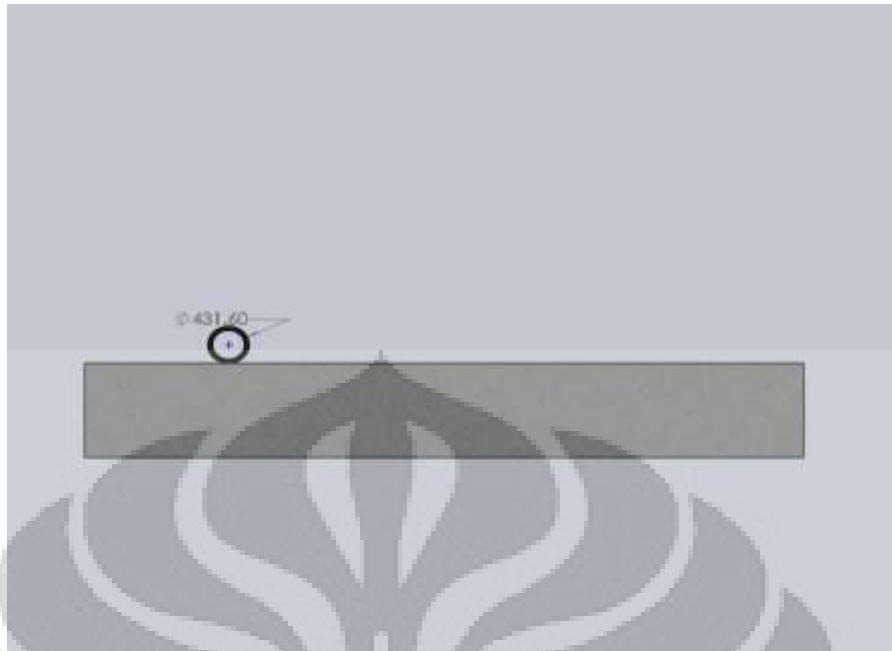
Model yang disimulasikan adalah seperti pada gambar berikut ini.



**Gambar 3.9** Tampak isometric model yang disimulasikan



**Gambar 3.10** Tampak depan



Gambar 3.11 Tampak samping

### 3.4.3 Prosedur Simulasi

Mengingat aliran yang terjadi pada kondisi nyata aplikasi sistem pipa bawah laut bukanlah suatu aliran *steady*, maka untuk simulasi *CFD* kasus ini dilakukan analisis *time dependent*. Selang waktu yang digunakan untuk analisis adalah selama 45 detik, dengan time step 1 detik. Pemilihan selang waktu 45 detik ini adalah untuk memperoleh karakteristik yang aliran yang sudah tidak berubah lagi.

### 3.4.4 Parameter-Parameter Aliran

Pada simulasi ini dibuat 2 model geometri karena terdapat dua jenis pipa yang berbeda diameternya ( $\text{Ø}$  0,4316 m dan  $\text{Ø}$  0,4916 m). Pada diameter 0,4316 memiliki variasi 3 kecepatan arus (0,32 m/s; 0,43 m/s; 0,42 m/s) yang masing-masing kecepatan arus diberi variabel 5 gap (0,2 m; 0,4 m; 0,6 m; 0,8 m dan 1 m). Untuk diameter 0,4916 terdapat satu kecepatan arus (0,89) dengan variasi 5 gap (0,2 m; 0,4 m; 0,6 m; 0,8 m dan 1 m).

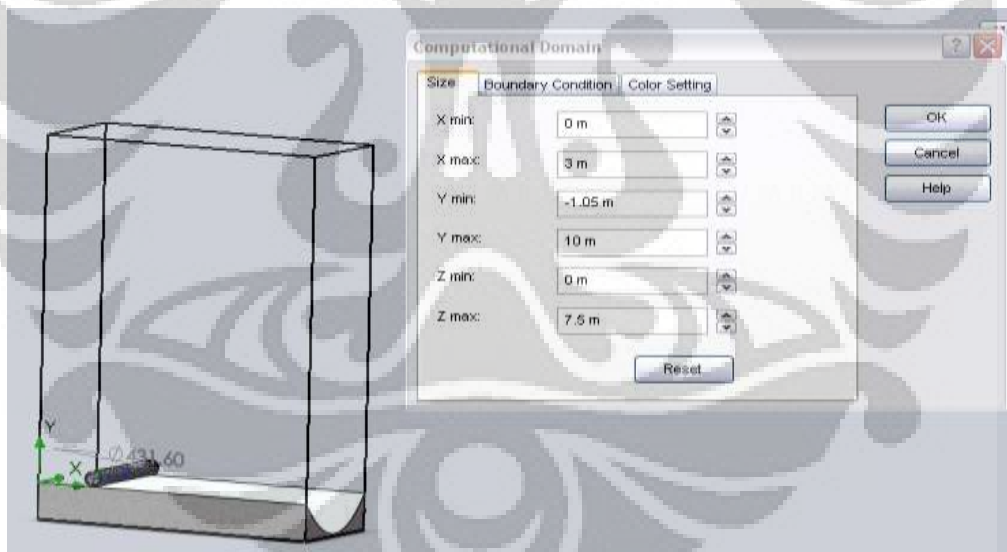
. Pemilihan besarnya gap ini didasarkan pada keadaan riil dari kontur dasar laut di sekitar sistem pipa tersebut, serta tidak diambil nilai yang terlalu tinggi

karena jika terjadi gap yang terlalu tinggi, akan diletakkan support untuk menopang pipa tersebut.

### 3.4.5 Computational Domain & Meshing

Secara default, *EFD Lab* membuat *computational domain* untuk model dan aliran yang akan dianalisis. Namun demikian, penulis melakukan perubahan terhadap setting *default* itu untuk memperoleh hasil yang lebih akurat dengan tetap efisien. *Computational domain* default diperpanjang ke arah *downstream*, batas bawahnya disesuaikan tepat pada permukaan dasar laut, serta batas atas diset lebih tinggi, untuk memperoleh daerah yang sudah tidak terganggu alirannya (*freestream*).

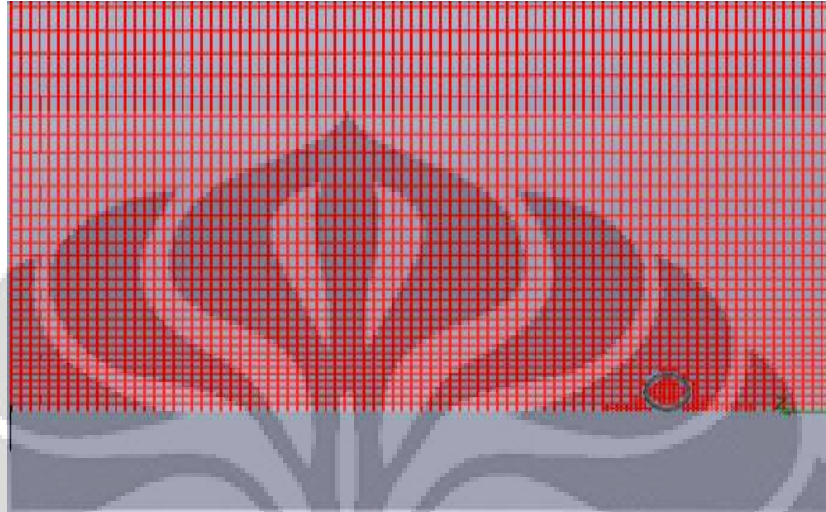
Analisis akan dilakukan dengan satu jenis *computational domain*, yaitu analisis 3 dimensi. Karena analisa hanya pada batang pipa saja, jadi dengan analisa 3 dimensi sudah cukup untuk memperoleh parameter aliran pada keseluruhan batang pipa.



Gambar 3.12 Computational Domain pada pemodelan 3 dimensi

*Meshing* pada *computational domain* pemodelan 3 dimensi adalah sebagaimana pada Gambar 3.9. Dapat dilihat bahwa bagian yang dekat dengan permukaan solid dibuatkan meshing yang lebih rapat karena pada bagian-bagian ini terdapat gradien-gradien yang besar dari parameter-parameter aliran. Setting mesh ini dilakukan secara otomatis oleh *software*, yaitu *adaptive mesh*, dan pada

pemodelan ini penulis tidak menggunakan fitur *local mesh* karena berdasarkan pengalaman pada model sederhana penggunaan fitur ini tidak berpengaruh signifikan terhadap hasil simulasi.



**Gambar 3.13** Meshing Pada pemodelan *EFD Lab*

### 3.4.6 Goals

Tujuan dari simulasi ini adalah untuk menghasilkan plot koefisien drag ( $c_d$ ) dan *Strouhal number* ( $St$ ) terhadap *Reynolds number*. Untuk memperoleh  $c_d$  maka dibutuhkan nilai gaya yang searah aliran arus, dengan demikian diperlukan *Force* dalam komponen searah aliran sebagai *Surface goal*. Koefisien drag,  $c_d$ , diperoleh dengan memasukkan rumus  $c_d$  ke *Equation goal* yaitu,

$$Cd = \frac{Fz}{\frac{1}{2}\rho v^2 DL} \quad (3.19)$$

dengan  $D$  adalah diameter pipa,  $L$  adalah panjang pipa.

Dari grafik plot *Force* atau grafik koefisien drag, dapat dilihat besarnya frekuensi *vortex shedding* dari fluktuasi gaya. *Force* yang digunakan dalam analisis frekuensi fluktuasi ini adalah *Force* yang searah aliran (sumbu  $z$  positif). Dengan mengetahui frekuensi *vortex shedding*, dapat diketahui panjang pipa yang diizinkan agar frekuensi vorteks tidak mendekati frekuensi natural ( $f_v < f_n$ ) pipa

dengan mensubsitusikan nilai frekuensi vorteks dengan frekuensi natural pipa tersebut.

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

Maka, Panjang pipa dapat dihitung;

$$L = \sqrt[4]{\frac{EI \left(\frac{C_e}{2\pi}\right)^2}{M_e f_n^2}} \quad (3.20)$$

Perhitungan *Strouhal number* dioperasikan di *Microsoft Excel*, dengan mengambil data plot *Goals* hasil analisa *EFD Lab*. Dari grafik plot *Force* atau grafik koefisien drag, dapat dilihat besarnya frekuensi dari fluktuasi gaya. *Force* yang digunakan dalam analisis frekuensi fluktuasi ini adalah *force* yang searah aliran. Dengan mengetahui frekuensi, maka dapat dihitung nilai *Strouhal number* berdasarkan persamaan (2.2).

Dalam perhitungan frekuensi, tidak digunakan nilai parameter di suatu titik, misalnya tekanan atau kecepatan di suatu titik di dalam wake atau di sekitar solid, melainkan digunakan nilai parameter yang adalah rata-rata dalam sistem yang ditinjau, oleh karena itu digunakan parameter-parameter gaya dan koefisien gaya untuk kemudian dilihat fluktuasinya dari waktu ke waktu. Namun demikian, pada dasarnya nilai dari gaya ini juga adalah merupakan fungsi dari parameter tekanan dan kecepatan, sehingga fluktuasi gaya sebenarnya juga menggambarkan adanya fluktuasi tekanan dan kecepatan. Perhitungan dengan *point parameter* sudah pernah coba dilakukan, dan hasilnya menjadi sulit untuk diinterpretasikan karena pada tempat-tempat yang berbeda maka fluktuasinya juga akan berbeda.

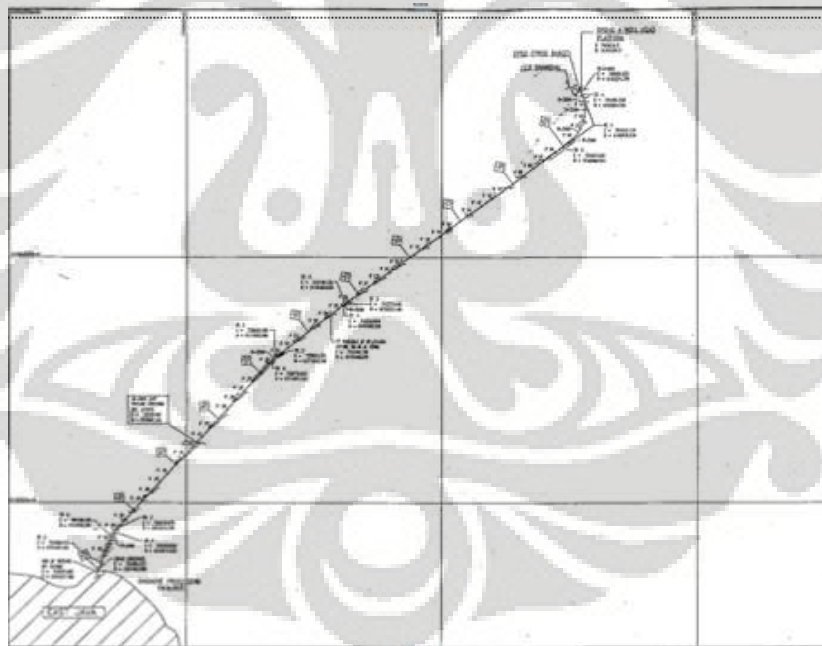
### 3.5 Data Sistem Perpipaan *Oyong Field*

#### 3.5.1 Lokasi

Sistem perpipaan yang dianalisis sebagai studi kasus pada tugas akhir ini adalah sistem perpipaan milik *Santos Pty Ltd.* yang berada 8 kilometer selatan Pulau Madura tepatnya di area *Oyong field*.

#### 3.5.2 Jalur Perpipaan

Jalur *pipeline* berada pada area *Oyong field* tersebut meliputi dua jalur *pipeline*, yaitu *10-inchi flexible jumper* dari Production Barge ke *Wellhead Platform* dengan panjang 80 meter dan *14-inchi infield pipeline* dari *Wellhead Platform* menuju Grati dengan panjang 56 km. Seperti pada gambar 4.2. Pipeline yang dianalisis adalah *14-inchi infield pipeline* dari *Wellhead Platform* menuju Grati.



Gambar 3.14 Skema Jalur Pipeline di *Oyong Project*

#### 3.5.3 Data Pipa dan *Coating*

Data pipa terdiri dari dimensi pipa dan data material pipa. Data dimensi pipa ini meliputi diameter dan *wall thickness*. Sedangkan data material pipa yang akan digunakan adalah material baja *Carbon Steel*. Data material pipa ini meliputi



mechanical properties seperti modulus elastisitas serta sifat termal seperti koefisien ekspansi termal. Sedangkan untuk *coating* terdiri dari *external anti-corrosion coating* dan *concrete coating*. Data *coating* meliputi material yang digunakan untuk *anti-corrosion coating*, ketebalan *coating*, dan densitas *coating* tersebut.

**Tabel 3.1** Data Pipa

Parameter	unit	
Nominal Outside Diameter	mm	355.6
Wall Thickness	mm	12.7 (KP 0.000 - KP 0.500) 10.3 (KP 0.500 - KP 55.044) 12.7 (KP 55.044 - KP 55.544)
Corrosion Allowance	mm	3
Anti- Corrosion Coating Thickness	mm	5
Anti- Corrosion Coating Density	kg/m <sup>3</sup>	1280
Concrete Coating Thickness	mm	30 (KP 0.000 - KP 0.500) 60 (KP 0.500 - KP 55.044) 100 (KP 55.044 - KP 55.544)
Concrete Coating Density	kg/m <sup>3</sup>	3040
Product Density	kg/m <sup>4</sup>	28
Seawater Density	kg/m <sup>5</sup>	1025
Steel Density	kg/m <sup>6</sup>	7850
Design Pressure	Mpa	12.22 (Operating), 15.4 (Hydrotest)

Design Temperature	°C	80 (Operating), 29.7 (Hydrotest)
Installation Temperature	°C	26.2
Specified Minimum Yield Stress	MPa	448
Overall Pipeline Length	m	55544
Longitudinal Friction Factor	-	0.4
Modulus Young	MPa	$2.07 \times 10^5$
Thermal Expansion Coefficient	/°C	$1.17 \times 10^5$
Poisson Ratio	-	0.3

Tabel 3.2 Data Coating

Parameter		Offshore Pipeline
Corrosion Coating Thickness	for Splash Zone	Elastomeric (12.7mm)
	for Riser, Spool & Hot Induction Bend	FBE (0.5mm)
	for Subsea	Asphalt Enamel (5mm)
	for Pipe Joint	Heat Shrink Sleeve (min 1.5mm)
	for Flange & Fitting	Painting
Concrete Coating Thickness (mm) (for Subsea)		30 60 67 100
Field Joint Coating		HSS + Infill Foam (HDPU)
Concrete Coating Cutback (mm)		225 ± 20
Material	Density	Thermal Conductivity (W/Mk)
Carbon Steel Pipe	7850 kg/m <sup>3</sup>	47
Asphalt Enamel	1280 kg/m <sup>3</sup>	0.69
Fusion Bonded Epoxy	1400 kg/m <sup>3</sup>	0.27
Concrete Coating	3040 kg/m <sup>3</sup> & 2800 kg/m <sup>3</sup>	1.8
Elastomeric, Material Properties BS 903		
Heat Shrink Sleeve, Width (425 ± 5 mm) x Length (1250 mm)		

**Tabel 3.3** Tegangan Izin

Design Conditions	Longitudinal Stress % of SMYS	Combined Stress % of SMYS
Installation (Functional + 2 Yr. Environment Loads)	80	96
Waterfilled (Functional + 2 Yr. Environmental Loads)	80	96
Hydrotest (Functional + 2 Yr. Environmental Loads)	100	100
Operating ((Functional + 100 Yr. Environment Loads)	80	90

### 3.5.4 Data Lingkungan

Data-data lingkungan yang akan digunakan untuk analisis span adalah data lingkungan di sekitar lokasi *pipeline*. Data-data lingkungan ini meliputi data kedalaman laut, data arus laut, dan data gelombang laut.

**Tabel 3.4** Kedalaman laut

KP	Design Water Depth (m) (2 years)		Design Water Depth (m) (100 years)	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
0.000 - 0.500	42	48.17	42	48.21
0.500 - 35.000	26	39.25	26	39.29
35.000 - 52.900	13	27.36	13	27.4
52.900 - 53.500	9	18.36	9	18.4
53.500 - 55.044	2	7.36	2	7.4
55.044 - 55.544	2	7.36	2	7.4

**Tabel 3.5 Gelombang Laut**

Description	Oyong-grati											
	2-Years						100-Years					
	Oyong	KP5	KP15	KP25	KP35	KP45	Oyong	KP5	KP15	KP25	KP35	KP45
Maximum wave height, Hmax (m)	3.44	3.31	3.49	3.52	3.44	3.6	4.41	4.07	4.37	4.46	4.41	4.39
Period of maximum wave, Tmax (sec)	5.3	5.09	5.31	5.21	5.11	5.37	5.88	5.68	5.81	5.92	5.93	5.64
JONSWAP Parameters - peakedness	2.29	2.52	2.31	2.54	2.63	2.34	2.46	2.46	2.5	2.45	2.45	2.8

**Tabel 3.6 Arus Laut**

Depth (m)	Oyong-grati											
	2-Years						100-Years					
	Oyong	KP5	KP15	KP25	KP35	KP45	Oyong	KP5	KP15	KP25	KP35	KP45
1 m above sea bed (m/s)	0.27	0.39	0.39	0.37	0.36	0.78	0.32	0.43	0.42	0.41	0.39	0.89

## BAB 4

### ANALISIS PANJANG SPAN DAN PEMODELAN

#### 4.1. *Span* Dinamik Berdasarkan *Boyun Guo*

##### 4.1.1. Data Input

Data input berupa data operasional, data lingkungan, dan data hasil desain.

Data input tersebut antara lain sebagai berikut:

- a) diameter luar pipa baja ( $D_s$ ) = 0.3556 m
- b) tebal dinding pipa ( $t$ ) = 0.0103 m dan 0.0127 m
- c) tebal lapisan anti-korosi ( $t_{cc}$ ) = 0.005 m
- d) tebal lapisan beton ( $t_{crt}$ ) = 0.03 dan 0.06 m
- e) korosi yang di izinkan ( $t_{ca}$ ) = 0.003 m
- f) densitas pipa ( $\rho_{pipe}$ ) = 7850 kg/m<sup>3</sup>
- g) densitas fluida dalam pipa ( $\rho_f$ ) = 28 kg/m<sup>3</sup>
- h) densitas lapisan anti-korosi ( $\rho_{cc}$ ) = 1280 kg/m<sup>3</sup>
- i) densitas lapisan beton ( $\rho_{crt}$ ) = 3040 kg/m<sup>3</sup>
- j) densitas air laut ( $\rho$ ) = 1025 kg/m<sup>3</sup>
- k) viskositas ( $\nu$ ) = 0,0016 kg/m/s
- l) kecepatan arus ( $U_c$ ) = 0.32, 0.41, 0.43 dan 0.89 m/s
- m) kondisi batas span adalah *fixed-fixed*, yaitu masing-masing ujung span tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-line* dan *cross-flow* terhadap arah aliran arus serta rotasi terhadap sumbu pipanya, sehingga nilai konstanta kondisi batas ( $C_e$ ) adalah  $C_e = 22,2$ .

Data input perhitungan diatas digunakan untuk di beberapa Kilometer Point (KP) dengan variasi data sebagai berikut :

1. Kilometer Point (KP) antara 0.000 – 0.500 km, dengan data sebagai berikut :  
tebal dinding pipa (t) = 0.0127 m, tebal lapisan beton (tcrt) = 0.03 m dan kecepatan arus (Uc) = 0.32 m/s
2. Kilometer Point (KP) antara 0.500 – 3.496 km, dengan data sebagai berikut :  
tebal dinding pipa (t) = 0.0103 m, tebal lapisan beton (tcrt) = 0.03 m dan kecepatan arus (Uc) = 0.43 m/s
3. Kilometer Point (KP) antara 3.496 – 35.000 km, dengan data sebagai berikut :  
tebal dinding pipa (t) = 0.0103 m, tebal lapisan beton (tcrt) = 0.03 m dan kecepatan arus (Uc) = 0.41 m/s
4. Kilometer Point (KP) antara 35.000 – 52.900 km, dengan data sebagai berikut :  
tebal dinding pipa (t) = 0.0103 m, tebal lapisan beton (tcrt) = 0.06 m dan kecepatan arus (Uc) = 0.89 m/s

#### **4.1.2 Perhitungan Pada Tiap-Tiap Kilometer Point (KP)**

##### **4.1.2.1 Kilometer Point (KP) antara 0.000 – 0.500 km**

- **Perhitungan Massa Efektif Pipeline**

Perhitungan massa persatuan panjang pipa baja menggunakan persamaan (3.4) yaitu:

$$M_s = \frac{\pi}{4} \times [0.3556^2 - (0.3556 - 2 \times 0.0127)^2] \times 7850 = 85.003 \text{ kg/m}$$

Massa persatuan panjang lapisan anti-korosi dihitung berdasarkan persamaan (3.5) yaitu :

$$M_{cc} = \frac{\pi}{4} \times [(0.3556 + 2 \times 0.05)^2 - 0.3556^2] \times 1280 = 7.250 \text{ kg/m}$$

Massa persatuan panjang lapisan semen dihitung berdasarkan persamaan (3.6) yaitu :

Mert =

$$\frac{\pi}{4} \times [(0.3556 + 2 \times 0.005 + 2 \times 0.03)^2 - (0.3556 + 2 \times 0.005)^2] \times 3040$$
$$= 113.344 \text{ kg/m}$$

Maka massa persatuan panjang pipa termasuk coating dapat diketahui dengan persamaan (3.3) yaitu :

$$M_p = 85.003 + 7.250 + 113.344 = 205.598 \text{ kg/m}$$

Perhitungan massa persatuan panjang fluida dalam pipa dilakukan berdasarkan persamaan (3.7) yaitu :

$$M_c = \frac{\pi}{4} \times (0.3556 - 2 \times 0.0127)^2 \times 28 = 2.397 \text{ kg/m}$$

Perhitungan massa persatuan panjang yang ditambahkan (*added unit mass*) menggunakan persamaan (3.8) yaitu :

$$M_a = \frac{\pi}{4} \times (0.3556 + 2 \times 0.005 + 2 \times 0.03)^2 \times 1025 = 145.819 \text{ kg/m}$$

Berdasarkan persamaan (3.2), perhitungan massa efektif *pipeline* adalah sebagai berikut :

$$M_e = 113.344 + 2.397 + 145.819 = 353.816 \text{ kg/m}$$

- **Stability Parameter**

*Stability parameter* (Ks) dihitung dengan menggunakan persamaan (3.9) yaitu:

$$K_s = \frac{2 \times 353.816 \times 0.125}{1025 \times (0.4316)^2} = 0.463$$

- **Reynolds Number**

Perhitungan *Reynolds number* (Re) berdasarkan persamaan (3.10) yaitu sebagai berikut :

$$Re = \frac{0.32 \times 0.4316}{1.56 \times 10^{-6}} = 8.85 \times 10^4$$

- **Reduced Velocity**

*Reduced velocity* didapat dari grafik hubungan *reduced velocity* dan *stability parameter* atau *reynolds number*. *Reduced velocity* untuk osilasi secara *in-line* didapat dari grafik hubungannya dengan *stability parameter* seperti pada gambar 3.2. Dari grafik tersebut, nilai *stability parameter* yang besarnya 0.463266609 akan sebanding dengan nilai *reduced velocity* untuk osilasi *in-line* yang besarnya 1.55. *Reduced velocity* untuk osilasi secara *cross-flow* didapat dari grafik hubungannya dengan *Reynolds Number* seperti pada gambar 3.3. dari grafik tersebut, nilai *Reynolds Number* yang besarnya  $8.85 \times 10^4$  akan sebanding dengan nilai *reduced velocity* untuk osilasi *cross-flow* yang besarnya 4.912740741.

- **Panjang Span**

Panjang *span* kritis terdiri dari panjang *span* kritis untuk gerakan *in-line* dan panjang *span* kritis untuk gerakan *cross-flow*. Perbedaannya terletak pada penggunaan *reduced velocity*. Perhitungan panjang *span* kritis menggunakan persamaan (3.13). Perhitungan panjang *span* kritis untuk gerakan *in-line* adalah sebagai berikut :

$$Lc = \left( \frac{22.2 \times 1.55 \times 0.4316}{2 \times \pi \times 0.32} \right)^{0.5} \times \left( \frac{2.07 \times 10^{11} \times \frac{\pi}{64} \times (0.3556^4 - (0.3556 - 2 \times 0.0127)^4)}{353.816} \right)^{0.25}$$

$$= 50.350 \text{ m}$$

Sedangkan perhitungan panjang *span* kritis untuk gerakan *cross-flow* adalah sebagai berikut :



$$L_c = \left( \frac{22.2 \times 4.912 \times 0.4316}{2 \times \pi \times 0.32} \right)^{0.5} \times \left( \frac{2.07 \times 10^{11} \times \frac{\pi}{64} \times (0.3556^4 - (0.3556 - 2 \times 0.0127)^4)}{353.816} \right)^{0.25}$$

$$= 89.640 \text{ m}$$

Dari kedua panjang *span* kritis di atas, penentuan panjang *span* minimum yang diijinkan berdasarkan *Guo* adalah berdasarkan panjang *span* terpendek di antara kedua hasil perhitungan tersebut yaitu 50.35 m.

*Calculation sheet* untuk perhitungan panjang *span* berdasarkan *Guo* untuk KP 0.000 – 0.500 ditunjukkan pada tabel 4.1 Berikut ini.

Input (Design and Environmental Data)	symbol	unit	value
Outside diameter of steel	$D_s$	m	0.3556
Pipe wall thickness	$t$	m	0.0127
Corrosion coating thickness	$t_{cc}$	m	0.005
Concrete thickness	$t_{crt}$	m	0.03
Corrosion allowance	$t_{ca}$	m	0.003
Pipe Density	$\rho_{pipe}$	kg/m <sup>3</sup>	7850
Density of fluid in pipe	$\rho_f$	kg/m <sup>3</sup>	28
Corrosion coating density	$\rho_{cc}$	kg/m <sup>3</sup>	1280
Concrete coating density	$\rho_{crt}$	kg/m <sup>3</sup>	3040
Density of fluid around the pipe (seawater)	$\rho_{sw}$	kg/m <sup>3</sup>	1025
Kinematic viscosity of external fluid	$\nu_k$	m <sup>2</sup> /s	1.56 X 10 <sup>-6</sup>
Current velocity	$U_c$	m/s	0.32
<a href="#">End condition constant</a>	$C_e$		22.2
General Calculation	symbol	unit	value
Outside diameter of pipe	$D$	m	0.4316
Mass of pipe and coatings	$M_p$	kg/m	205.598

unit mass of contents	$M_c$	kg/m	2.397
added unit mass	$M_a$	kg/m	145.819
effective mass	$M_e$	kg/m	353.816
<a href="#">stability parameter</a>	$K_s$		0.463
reduced velocity (in-line)	$U_{r,IL}$		1.55
<a href="#">reynolds number</a>	$R_e$		$8.85 \times 10^4$
reduced velocity (cross-flow)	$U_{r,CF}$		4.912
Span Length	symbol	unit	value
Critical Span Length for In-Line Motion	$L_{c,IL}$	m	50.350
Critical Span Length for Cross-Flow Motion	$L_{c,CF}$	m	89.640
Maximum Allowable Span Length	$L_{max,allow}$	m	50.350

#### 4.1.2.2. Kilometer Point (KP) antara 0.500 – 3.496 km

- **Perhitungan Massa Efektif Pipeline**

Perhitungan massa persatuan panjang pipa baja menggunakan persamaan (3.4) yaitu:

$$M_s = \frac{\pi}{4} \times \left[ 0.3556^2 - (0.3556 - 2 \times 0.0103)^2 \right] \times 7850 = 87.492 \text{ kg/m}$$

Massa persatuan panjang lapisan anti-korosi dihitung berdasarkan persamaan (3.5) yaitu :

$$M_{cc} = \frac{\pi}{4} \times \left[ (0.3556 + 2 \times 0.05)^2 - 0.3556^2 \right] \times 1280 = 7.250 \text{ kg/m}$$

Massa persatuan panjang lapisan semen dihitung berdasarkan persamaan (3.6) yaitu :

$$\begin{aligned} M_{crt} &= \frac{\pi}{4} \times \left[ (0.3556 + 2 \times 0.005 + 2 \times 0.03)^2 - (0.3556 + 2 \times 0.005)^2 \right] \times 3040 \\ &= 113.344 \text{ kg/m} \end{aligned}$$

Maka massa persatuan panjang pipa termasuk *coating* dapat diketahui dengan persamaan (3.3) yaitu :

$$M_p = 87.492 + 7.250 + 113.344 = 208.087 \text{ kg/m}$$

Perhitungan massa persatuan panjang fluida dalam pipa dilakukan berdasarkan persamaan (3.7) yaitu :

$$M_c = \frac{\pi}{4} \times (0.3556 - 2 \times 0.0103)^2 \times 28 = 2.467 \text{ kg/m}$$

Perhitungan massa persatuan panjang yang ditambahkan (*added unit mass*) menggunakan persamaan (3.8) yaitu :

$$M_a = \frac{\pi}{4} \times (0.3556 + 2 \times 0.005 + 2 \times 0.03)^2 \times 1025 = 145.819 \text{ kg/m}$$

Berdasarkan persamaan (3.2), perhitungan massa efektif *pipeline* adalah sebagai berikut :

$$M_e = 208.087 + 2.467 + 145.819 = 356.375 \text{ kg/m}$$

- **Stability Parameter**

*Stability parameter* ( $K_s$ ) dihitung dengan menggunakan persamaan (3.9) yaitu:

$$K_s = \frac{2 \times 356.3757239 \times 0.125}{1025 \times (0.4316)^2} = 0.466$$

- **Reynolds Number**

Perhitungan *Reynolds number* ( $Re$ ) berdasarkan persamaan (3.10) yaitu sebagai berikut :

$$Re = \frac{0.43 \times 0.4316}{1.56 \times 10^{-6}} = 1.19 \times 10^5$$

- **Reduced Velocity**

*Reduced velocity* didapat dari grafik hubungan *reduced velocity* dan *stability parameter* atau *reynolds number*. *Reduced velocity* untuk osilasi secara *in-line* didapat dari grafik hubungannya dengan *stability parameter* seperti pada gambar 3.2. Dari grafik tersebut, nilai *stability parameter* yang besarnya 0.466617888 akan sebanding dengan nilai *reduced velocity* untuk osilasi *in-line*

yang besarnya 1.55. *Reduced velocity* untuk osilasi secara *cross-flow* didapat dari grafik hubungannya dengan *Reynolds Number* seperti pada gambar 3.3. dari grafik tersebut, nilai *Reynolds Number* yang besarnya  $1.19 \times 10^5$  akan sebanding dengan nilai *reduced velocity* untuk osilasi *cross-flow* yang besarnya 4.885.

- **Panjang Span**

Panjang *span* kritis terdiri dari panjang *span* kritis untuk gerakan *in-line* dan panjang *span* kritis untuk gerakan *cross-flow*. Perbedaannya terletak pada penggunaan *reduced velocity*. Perhitungan panjang *span* kritis menggunakan persamaan (3.13). Perhitungan panjang *span* kritis untuk gerakan *in-line* adalah sebagai berikut :

$$L_c = \left( \frac{22.2 \times 1.55 \times 0.4316}{2 \times \pi \times 0.43} \right)^{0.5} \times \left( \frac{2.07 \times 10^{11} \times \frac{\pi}{64} \times (0.3556^4 - (0.3556 - 2 \times 0.0127)^4)}{353.816} \right)^{0.25}$$

$$= 41.356 \text{ m}$$

Sedangkan perhitungan panjang *span* kritis untuk gerakan *cross-flow* adalah sebagai berikut :

$$L_c = \left( \frac{22.2 \times 4.885 \times 0.4316}{2 \times \pi \times 0.43} \right)^{0.5} \times \left( \frac{2.07 \times 10^{11} \times \frac{\pi}{64} \times (0.3556^4 - (0.3556 - 2 \times 0.0103)^4)}{356.375} \right)^{0.25}$$

$$= 73.420 \text{ m}$$

Dari kedua panjang *span* kritis di atas, penentuan panjang *span* minimum yang diijinkan berdasarkan *Guo* adalah berdasarkan panjang *span* terpendek di antara kedua hasil perhitungan tersebut yaitu 41.35639982 m.

*Calculation sheet* untuk perhitungan panjang *span* berdasarkan *Guo* untuk KP 0.500 – 3.496 ditunjukkan pada tabel 4.2 Berikut ini.

Tabel Hasil perhitungan panjang span berdasarkan *Guo* untuk pipa 14 Inchi

Input (Design and Environmental Data)	symbol	unit	value
Outside diameter of steel	$D_s$	m	0.3556
Pipe wall thickness	$t$	m	0.0103
Corrosion coating thickness	$t_{cc}$	m	0.005
Concrete thickness	$t_{crt}$	m	0.03
Corrosion allowance	$t_{ca}$	m	0.003
Pipe Density	$\rho_{pipe}$	kg/m <sup>3</sup>	7850
Density of fluid in pipe	$\rho_f$	kg/m <sup>3</sup>	28
Corrosion coating density	$\rho_{cc}$	kg/m <sup>3</sup>	1280
Concrete coating density	$\rho_{crt}$	kg/m <sup>3</sup>	3040
Density of fluid around the pipe (seawater)	$\rho_{sw}$	kg/m <sup>3</sup>	1025
Kinematic viscosity of external fluid	$\nu_k$	m <sup>2</sup> /s	$1.56 \times 10^{-6}$
Current velocity	$U_c$	m/s	0.43
<a href="#">End condition constant</a>	$C_e$		22.2
General Calculation	symbol	unit	value
Outside diameter of pipe	$D$	m	0.4316
Mass of pipe and coatings	$M_p$	kg/m	208.087
unit mass of contents	$M_c$	kg/m	2.467
added unit mass	$M_a$	kg/m	145.819
effective mass	$M_e$	kg/m	356.375
<a href="#">stability parameter</a>	$K_s$		0.466
reduced velocity (in-line)	$U_{r,IL}$		1.55
<a href="#">reynolds number</a>	$R_e$		$1.19 \times 10^5$
reduced velocity (cross-flow)	$U_{r,CF}$		4.885
Span Length	symbol	unit	value
Critical Span Length for In-Line Motion	$L_{c,IL}$	m	41.356
Critical Span Length for Cross-Flow Motion	$L_{c,CF}$	m	73.420
Maximum Allowable Span Length	$L_{max,allow}$	m	41.356

#### 4.1.2.3. Kilometer Point (KP) antara 3.496 – 35.000 km

- **Perhitungan Massa Efektif Pipeline**

Perhitungan massa persatuan panjang pipa baja menggunakan persamaan (3.4) yaitu:

$$M_s = \frac{\pi}{4} \times [0.3556^2 - (0.3556 - 2 \times 0.0103)^2] \times 7850 = 87.492 \text{ kg/m}$$

Massa persatuan panjang lapisan anti-korosi dihitung berdasarkan persamaan (3.5) yaitu :

$$M_{cc} = \frac{\pi}{4} \times [(0.3556 + 2 \times 0.05)^2 - 0.3556^2] \times 1280 = 7.250 \text{ kg/m}$$

Massa persatuan panjang lapisan semen dihitung berdasarkan persamaan (3.6) yaitu :

$$\begin{aligned} M_{crt} &= \frac{\pi}{4} \times [(0.3556 + 2 \times 0.005 + 2 \times 0.03)^2 - (0.3556 + 2 \times 0.005)^2] \times 3040 \\ &= 113.344 \text{ kg/m} \end{aligned}$$

Maka massa persatuan panjang pipa termasuk coating dapat diketahui dengan persamaan (3.3) yaitu :

$$M_p = 87.49286879 + 7.2502932 + 113.34464 = 208.087 \text{ kg/m}$$

Perhitungan massa persatuan panjang fluida dalam pipa dilakukan berdasarkan persamaan (3.7) yaitu :

$$M_c = \frac{\pi}{4} \times (0.3556 - 2 \times 0.0103)^2 \times 28 = 2.467 \text{ kg/m}$$

Perhitungan massa persatuan panjang yang ditambahkan (*added unit mass*) menggunakan persamaan (3.8) yaitu :

$$M_a = \frac{\pi}{4} \times (0.3556 + 2 \times 0.005 + 2 \times 0.03)^2 \times 1025 = 145.819 \text{ kg/m}$$

Berdasarkan persamaan (3.2), perhitungan massa efektif *pipeline* adalah sebagai berikut :

$$M_e = 208.087 + 2.467 + 145.819 = 356.375 \text{ kg/m}$$

- **Stability Parameter**

*Stability parameter* (Ks) dihitung dengan menggunakan persamaan (3.9) yaitu:

$$K_s = \frac{2 \times 356.375 \times 0.125}{1025 \times (0.4316)^2} = 0.466$$

- **Reynolds Number**

Perhitungan *Reynolds number* (Re) berdasarkan persamaan (3.10) yaitu sebagai berikut :

$$Re = \frac{0.41 \times 0.4316}{1.56 \times 10^{-6}} = 1.13 \times 10^5$$

- **Reduced Velocity**

*Reduced velocity* didapat dari grafik hubungan *reduced velocity* dan *stability parameter* atau *reynolds number*. *Reduced velocity* untuk osilasi secara *in-line* didapat dari grafik hubungannya dengan *stability parameter* seperti pada gambar 3.2. Dari grafik tersebut, nilai *stability parameter* yang besarnya 0.466617888 akan sebanding dengan nilai *reduced velocity* untuk osilasi *in-line* yang besarnya 1.55. *Reduced velocity* untuk osilasi secara *cross-flow* didapat dari grafik hubungannya dengan *Reynolds Number* seperti pada gambar 3.3. dari grafik tersebut, nilai *Reynolds Number* yang besarnya  $1.13 \times 10^5$  akan sebanding dengan nilai *reduced velocity* untuk osilasi *cross-flow* yang besarnya 4.889.

- **Panjang Span**

Panjang *span* kritis terdiri dari panjang *span* kritis untuk gerakan *in-line* dan panjang *span* kritis untuk gerakan *cross-flow*. Perbedaannya terletak pada penggunaan *reduced velocity*. Perhitungan panjang *span* kritis menggunakan persamaan (3.13). Perhitungan panjang *span* kritis untuk gerakan *in-line* adalah sebagai berikut :

$$L_c = \left( \frac{22.2 \times 1.55 \times 0.4316}{2 \times \pi \times 0.41} \right)^{0.5} \\ \times \left( \frac{2.07 \times 10^{11} \times \frac{\pi}{64} \times (0.3556^4 - (0.3556 - 2 \times 0.0103)^4)}{356.375} \right)^{0.25} \\ = 42.353 \text{ m}$$

Sedangkan perhitungan panjang *span* kritis untuk gerakan *cross-flow* adalah sebagai berikut :

$$L_c = \left( \frac{22.2 \times 4.889 \times 0.4316}{2 \times \pi \times 0.41} \right)^{0.5} \\ \times \left( \frac{2.07 \times 10^{11} \times \frac{\pi}{64} \times (0.3556^4 - (0.3556 - 2 \times 0.0103)^4)}{356.375} \right)^{0.25} \\ = 75.223 \text{ m}$$

Dari kedua panjang *span* kritis di atas, penentuan panjang *span* minimum yang diijinkan berdasarkan *Guo* adalah berdasarkan panjang *span* terpendek di antara kedua hasil perhitungan tersebut yaitu 42.353 m.

*Calculation sheet* untuk perhitungan panjang *span* berdasarkan *Guo* untuk KP 3.496 – 35.000 ditunjukkan pada tabel 4.3 Berikut ini.

Input (Design and Environmental Data)	symbol	unit	value
Outside diameter of steel	$D_s$	m	0.3556
Pipe wall thickness	$t$	m	0.0103
Corrosion coating thickness	$t_{cc}$	m	0.005
Concrete thickness	$t_{crt}$	m	0.03
Corrosion allowance	$t_{ca}$	m	0.003
Pipe Density	$\rho_{pipe}$	kg/m <sup>3</sup>	7850
Density of fluid in pipe	$\rho_f$	kg/m <sup>3</sup>	28



Corrosion coating density	$\rho_{cc}$	kg/m <sup>3</sup>	1280
Concrete coating density	$\rho_{crt}$	kg/m <sup>3</sup>	3040
Density of fluid around the pipe (seawater)	$\rho_{sw}$	kg/m <sup>3</sup>	1025
Kinematic viscosity of external fluid	$\nu_k$	m <sup>2</sup> /s	1.56 x 10 <sup>-6</sup>
Current velocity	$U_c$	m/s	0.41
<a href="#">End condition constant</a>	$C_e$		22.2
General Calculation	symbol	unit	value
Outside diameter of pipe	D	m	0.4316
Mass of pipe and coatings	$M_p$	kg/m	208.087
unit mass of contents	$M_c$	kg/m	2.467
added unit mass	$M_a$	kg/m	145.819
effective mass	$M_e$	kg/m	356.375
<a href="#">stability parameter</a>	$K_s$		0.466
reduced velocity (in-line)	$U_{r,IL}$		1.55
<a href="#">reynolds number</a>	$R_e$		1.13 x 10 <sup>5</sup>
reduced velocity (cross-flow)	$U_{r,CF}$		4.889
Span Length	symbol	unit	value
Critical Span Length for In-Line Motion	$L_{c,IL}$	m	42.353
Critical Span Length for Cross-Flow Motion	$L_{c,CF}$	m	75.223
Maximum Allowable Span Length	$L_{max,allow}$	m	42.353

#### 4.1.2.4. Kilometer Point (KP) antara 35.000 – 52.900 km

- **Perhitungan Massa Efektif Pipeline**

Perhitungan massa persatuan panjang pipa baja menggunakan persamaan (3.4) yaitu:

$$M_s = \frac{\pi}{4} \times \left[ 0.3556^2 - (0.3556 - 2 \times 0.0103)^2 \right] \times 7850 = 87.492 \text{ kg/m}$$

Massa persatuan panjang lapisan anti-korosi dihitung berdasarkan persamaan (3.5) yaitu :

$$M_{cc} = \frac{\pi}{4} \times [(0.3556 + 2 \times 0.05)^2 - 0.03556^2] \times 1280 = 7.250 \text{ kg/m}$$

Massa persatuan panjang lapisan semen dihitung berdasarkan persamaan (3.6) yaitu :

$M_{crt}$

$$= \frac{\pi}{4} \times [(0.3556 + 2 \times 0.005 + 2 \times 0.06)^2 - (0.3556 + 2 \times 0.005)^2] \times 3040$$

$$= 243.880 \text{ kg/m}$$

Maka massa persatuan panjang pipa termasuk coating dapat diketahui dengan persamaan (3.3) yaitu :

$$M_p = 87.492 + 7.250 + 243.880 = 338.6232404 \text{ kg/m}$$

Perhitungan massa persatuan panjang fluida dalam pipa dilakukan berdasarkan persamaan (3.7) yaitu :

$$M_c = \frac{\pi}{4} \times (0.3556 - 2 \times 0.0103)^2 \times 28 = 2.467 \text{ kg/m}$$

Perhitungan massa persatuan panjang yang ditambahkan (*added unit mass*) menggunakan persamaan (3.8) yaitu :

$$M_a = \frac{\pi}{4} \times (0.3556 + 2 \times 0.005 + 2 \times 0.06)^2 \times 1025 = 189.832 \text{ kg/m}$$

Berdasarkan persamaan (3.2), perhitungan massa efektif *pipeline* adalah sebagai berikut :

$$M_e = 208.087 + 2.467 + 189.832 = 530.923 \text{ kg/m}$$

- **Stability Parameter**

*Stability parameter* ( $K_s$ ) dihitung dengan menggunakan persamaan (3.9) yaitu:

$$K_s = \frac{2 \times 530.9239312 \times 0.125}{1025 \times (0.4316)^2} = 0.535$$

- **Reynolds Number**

Perhitungan *Reynolds number* (Re) berdasarkan persamaan (3.10) yaitu sebagai berikut :

$$Re = \frac{0.89 \times 0.4316}{1.56 \times 10^{-6}} = 2.80 \times 10^5$$

- **Reduced Velocity**

*Reduced velocity* didapat dari grafik hubungan *reduced velocity* dan *stability parameter* atau *reynolds number*. *Reduced velocity* untuk osilasi secara *in-line* didapat dari grafik hubungannya dengan *stability parameter* seperti pada gambar 3.2. Dari grafik tersebut, nilai *stability parameter* yang besarnya 0.535827127 akan sebanding dengan nilai *reduced velocity* untuk osilasi *in-line* yang besarnya 1.7. *Reduced velocity* untuk osilasi secara *cross-flow* didapat dari grafik hubungannya dengan *Reynolds Number* seperti pada gambar 3.3. dari grafik tersebut, nilai *Reynolds Number* yang besarnya  $2.80E \times 10^5$  akan sebanding dengan nilai *reduced velocity* untuk osilasi *cross-flow* yang besarnya 4.759639031.

- **Panjang Span**

Panjang *span* kritis terdiri dari panjang *span* kritis untuk gerakan *in-line* dan panjang *span* kritis untuk gerakan *cross-flow*. Perbedaannya terletak pada penggunaan *reduced velocity*. Perhitungan panjang *span* kritis menggunakan persamaan (3.13). Perhitungan panjang *span* kritis untuk gerakan *in-line* adalah sebagai berikut :

$$Lc = \left( \frac{22.2 \times 1.7 \times 0.4316}{2 \times \pi \times 0.89} \right)^{0.5} \times \left( \frac{2.07 \times 10^{11} \times \frac{\pi}{64} \times (0.3556^4 - (0.3556 - 2 \times 0.0103)^4)}{530.9239312} \right)^{0.25}$$

$$= 29.082 \text{ m}$$

Sedangkan perhitungan panjang *span* kritis untuk gerakan *cross-flow* adalah sebagai berikut :

$$L_c = \left( \frac{22.2 \times 4.759639031 \times 0.4316}{2 \times \pi \times 0.89} \right)^{0.5} \times \left( \frac{2.07 \times 10^{11} \times \frac{\pi}{64} \times (0.3556^4 - (0.3556 - 2 \times 0.0103)^4)}{530.923} \right)^{0.25}$$

$$= 48.661 \text{ m}$$

Dari kedua panjang *span* kritis di atas, penentuan panjang *span* minimum yang diijinkan berdasarkan *Guo* adalah berdasarkan panjang *span* terpendek di antara kedua hasil perhitungan tersebut yaitu 29.08203102 m.

*Calculation sheet* untuk perhitungan panjang *span* berdasarkan *Guo* untuk KP 35.000 – 52.900 ditunjukkan pada tabel 4.4 Berikut ini.

Input (Design and Environmental Data)	symbol	unit	value
Outside diameter of steel	D <sub>s</sub>	m	0.3556
Pipe wall thickness	t	m	0.0103
Corrosion coating thickness	t <sub>cc</sub>	m	0.005
Concrete thickness	t <sub>crt</sub>	m	0.06
Corrosion allowance	t <sub>ca</sub>	m	0.003
Pipe Density	ρ <sub>pipe</sub>	kg/m <sup>3</sup>	7850
Density of fluid in pipe	ρ <sub>f</sub>	kg/m <sup>3</sup>	28
Corrosion coating density	ρ <sub>cc</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1280
Concrete coating density	ρ <sub>crt</sub>	kg/m <sup>3</sup>	3040
Density of fluid around the pipe (seawater)	ρ <sub>sw</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1025
Kinematic viscosity of external fluid	ν <sub>k</sub>	m <sup>2</sup> /s	1.56 x 10 <sup>-6</sup>
Current velocity	U <sub>c</sub>	m/s	0.89
<a href="#">End condition constant</a>	C <sub>e</sub>		22.2
General Calculation	symbol	unit	value
Outside diameter of pipe	D	m	0.4916

Mass of pipe and coatings	$M_p$	kg/m	338.623
unit mass of contents	$M_c$	kg/m	2.467
added unit mass	$M_a$	kg/m	189.832
effective mass	$M_e$	kg/m	530.923
<u>stability parameter</u>	$K_s$		0.535
reduced velocity (in-line)	$U_{r,IL}$		1.7
<u>reynolds number</u>	$Re$		$2.80 \times 10^5$
reduced velocity (cross-flow)	$U_{r,CF}$		4.759
Span Length	symbol	unit	value
Critical Span Length for In-Line Motion	$L_{c,IL}$	m	29.082
Critical Span Length for Cross-Flow Motion	$L_{c,CF}$	m	48.661
Maximum Allowable Span Length	$L_{max,allow}$	m	29.082

#### 4.1.3 Panjang Maksimum *Span* Berdasarkan *Boyun Guo*

Hasil dari perhitungan berdasarkan *Boyun Guo*, Panjang *Span* yang diizinkan untuk masing-masing kilometer point (KP) dapat dilihat dalam tabel 4.5 berikut :

Kilometer Point (km)	Pipe wall thickness (m)	Concrete thickness (m)	Current velocity (m/s)	Span Length		
				Critical Span Length for In-Line Motion (m)	Critical Span Length for Cross-Flow Motion (m)	Maximum Allowable Span Length (m)
0,000 s.d 0,500	0.0127	0.03	0.32	50.35	89.64	50.35
0,500 s.d 3,496	0.0103	0.03	0.43	41.84	70.83	41.84
3,496 s.d 35,000	0.0103	0.03	0.41	42.35	75.22	42.35
35,000 s.d 52,900	0.0103	0.06	0.89	29.08	48.66	29.08

## 4.2. *Span* Statik Berdasarkan ASME B31.8

### 4.2.1. Data Input

Data yang digunakan dalam analisis *span* statik ini berupa data perancangan dan data hasil perhitungan *span* dinamik seperti berat terendam, gaya aksial efektif, tekanan hidrostatik, dan luas penampang pipa. Data input tersebut antara lain adalah:

a)	yield Strength (SMYS)	= 448 MPa
b)	tekanan dalam pipa ( $P_i$ )	= 12.22 MPa
c)	diameter luar pipa baja ( $D_s$ )	= 0.3556 m
d)	tebal lapisan beton ( $t_{crt}$ )	= 0.03 dan 0.06 m
e)	tebal pipa ( $t_{pipa}$ )	= 0.0103 dan 0.0127 m
f)	Kecepatan arus ( $U_c$ )	= 0.32, 0.41, 0.43 & 0.89 m/s
g)	densitas air laut ( $\rho$ )	= 1025 kg/m <sup>3</sup>
h)	viskositas air laut ( $\mu$ )	= 0.0016 kg/ms
i)	water depth ( $W_d$ )	= 27.4, 39,29 dan 48,21 m
j)	tekanan luar pipa ( $P_e$ )	= 275513.85 Pa
k)	diameter terluar pipa ( $D$ )	= 0.4916 m
l)	luas penampang pipa bagian dalam ( $A_i$ )	= 0.088141309 m <sup>2</sup>
m)	luas penampang pipa ( $A_s$ )	= 0.011173357 m <sup>2</sup>
n)	luas penampang pipa bagian luar ( $A_e$ )	= 0.099314666 m <sup>2</sup>
o)	poisson ratio ( $\nu$ )	= 0.3
p)	ambient temperature ( $T_{amb}$ )	= 26.2 C
q)	operation temperature ( $T_{op}$ )	= 80.0 C
r)	temperature expansion coefficient ( $\alpha_e$ )	= 1.17 x 10 <sup>-5</sup> C <sup>-1</sup>
s)	pipe youngs modulus ( $E$ )	= 2.07 x 10 <sup>11</sup> Pa

Data input perhitungan diatas digunakan untuk di beberapa Kilometer Point (KP) dengan variasi data sebagai berikut :

1. Kilometer Point (KP) antara 0.000 – 0.500 km, dengan data sebagai berikut : tebal dinding pipa ( $t$ ) = 0.0127 m, tebal lapisan beton ( $t_{crt}$ ) =

0.03 m, kecepatan arus ( $U_c$ ) = 0.32 m/s dan kedalaman laut ( $W_d$ ) = 48.21 m

2. Kilometer Point (KP) antara 0.500 – 3.496 km, dengan data sebagai berikut : tebal dinding pipa ( $t$ ) = 0.0103 m, tebal lapisan beton ( $t_{crt}$ ) = 0.03 m, kecepatan arus ( $U_c$ ) = 0.43 m/s dan kedalaman laut ( $W_d$ ) = 39.29 m

3. Kilometer Point (KP) antara 3.496 – 35.000 km, dengan data sebagai berikut : tebal dinding pipa ( $t$ ) = 0.0103 m, tebal lapisan beton ( $t_{crt}$ ) = 0.03 m, kecepatan arus ( $U_c$ ) = 0.41 m/s dan kedalaman laut ( $W_d$ ) = 39.29 m

4. Kilometer Point (KP) antara 35.000 – 52.900 km, dengan data sebagai berikut : tebal dinding pipa ( $t$ ) = 0.0103 m, tebal lapisan beton ( $t_{crt}$ ) = 0.06 m, kecepatan arus ( $U_c$ ) = 0.89 m/s dan kedalaman laut ( $W_d$ ) = 27.4 m

#### 4.2.2. Perhitungan Pada Tiap-Tiap Kilometer Point (KP)

##### 4.2.2.1. Kilometer Point (KP) antara 0.000 – 0.500 km

- **Massa Pipa Terendam ( $M_{sub}$ )**

$$M_{sub} = M_p - \frac{\pi}{4} \times D^2 \times \rho = 205.5985078 - \frac{\pi}{4} \times 0.4316^2 \times 1025 = 56 \text{ kg/m}$$

- **berat terendam ( $W_{sub}$ )**

$$W_{sub} = B \times 9.81 = 546 \text{ N/m}$$

- **momen inersia ( $I$ )**

$$I = \frac{\pi}{64} \times (D_s^4 - (D_s - 2 \times t_{pipa})^4) \\ = \frac{\pi}{64} \times (0.3556^4 - (0.3556 - 2 \times 0.0127)^4) = 0.0002013 \text{ m}^4$$

- **beban hidrodinamik**

Sebelum menghitung beban hidrodinamik dari arus laut, maka perlu diketahui terlebih dahulu nilai koefisien drag yaitu dengan menggunakan hubungan antara *Reynolds Number* dan koefisien drag

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{1025 \times 0,32 \times 0,4316}{0,0016} = 8,85 \times 10^4$$

Dengan nilai  $Re = 8,85E+04$ , maka nilai koefisien drag ( $C_d$ ) = 1.2

Beban hidrodinamik didefinisikan sebagai berikut :

$$F_{IL} = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_d = \frac{1}{2} \times 1025 \times 0,32^2 \times 0,4316 \times 1,2 = 27,180 \text{ N/m}$$

- **beban terdistribusi merata**

Beban terdistribusi merata yang terjadi pada pipa berdasarkan persamaan (3.15) adalah sebagai berikut :

$$W = \sqrt{27,180^2 + 546^2} = 546,486 \text{ N/m}$$

- **Tegangan Longitudinal Akibat Momen Lentur**

Tegangan longitudinal ( $\sigma_b$ ) pada pipa akibat momen lentur dinyatakan sebagai berikut:

$$\sigma_b = M \times \frac{D}{2 \times I} = M \times \frac{0,4316}{2 \times 0,0002013} = M \times 1071,741$$

- **Tegangan Longitudinal Akibat Beda Tekanan**

Tegangan longitudinal akibat beda tekanan ( $\sigma_l$ ) yang terjadi pada pipa akibat beda tekanan adalah :

dimana :

$$S_{eff} = 430000 - (11735236,4 \times 0,085 \times (1 - 2 \times 0,3) - (0,0136 \times 2,07 \times 10^{11} \times 53,8 \times 1,17 \times 10^{-5})) = -1,75 \times 10^6 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} \sigma_l &= \frac{-1,75 \times 10^6 + (12,22 \times 10^6 \times 0,085) - (484763,602 \times 0,099)}{0,0136} \\ &= -5,53 \times 10^7 \text{ Pa} \end{aligned}$$



- **Batas Tegangan**

Batas tegangan untuk tegangan longitudinal adalah :

$$\sigma_b + \sigma_l \leq 0.8 \text{ SMYS}$$

Maka nilai momen lentur didapat yaitu

$$M \times 1071.741 + (-5.53E+07) \leq 0.8 \times 448$$

$$M \leq 3.86 \times 10^5 \text{ Nm}$$

- **Panjang *Span* Statik**

Nilai *span* kritis secara statik diperoleh dari modifikasi persamaan momen lentur untuk batang sederhana dengan tumpuan *fixed-pinned* (3.18) yaitu:

$$M = \frac{w \times L^2}{8} = \text{maka } L = \sqrt{\frac{8M}{w}}$$

Sehingga panjang *span* statik adalah:

$$L \text{ statik} = \sqrt{\frac{8 \times 3.86 \times 10^5}{546.4860926}} = 75.169 \text{ m}$$

*Calculation sheet* untuk perhitungan panjang *span* statik untuk KP 0.000 – 0.500 ditunjukkan pada tabel 4.6 Berikut ini.

Input (Design and Environmental Data)	symbol	unit	value
Yield Strength	SMYS	MPa	448
Tekanan dalam pipa	$P_i$	MPa	12.22
Diameter luar pipa baja	$D_s$	m	0.3556
Tebal pipa	$t_{\text{pipa}}$	m	0.0127
Kecepatan arus	$U_c$	m/s	0.32
Densitas air laut	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1025
Viskositas air laut	$\mu$	kg/ms	0.0016
Water depth	Wd	m	48.21
Tekanan luar pipa	$P_e$	Pa	484763.6025
Diameter terluar pipa	D	m	0.4316

Luas penampang pipa bagian dalam	$A_i$	$m^2$	0.085633564
Luas penampang pipa	$A_s$	$m^2$	0.013681102
Luas penampang pipa bagian luar	$A_e$	$m^2$	0.099314666
Buoyancy	$B$	kg/m	56
Berat terendam	$W_{sub}$	N/m	546
Poisson ratio	$\nu$		0.3
Ambient Temperature	$T_{amb}$	C	26.2
Operation Temperature	$T_{op}$	C	80.0
Temperature expansion coefficient	$\alpha_e$	$C^{-1}$	$1.17 \times 10^{-5}$
pipe youngs modulus	$E$	Pa	$2.07 \times 10^{11}$
momen inersia	$I$	$m^4$	0.000201
Calculation	symbol	unit	value
reynolds number	$Re$		$8.85 \times 10^4$
koefisien drag	$Cd$		1.2
beban hidrodinamik	$F_{IL}$	N/m	27.180
beban terdistribusi merata	$W$	N/m	546.486
effective residual lay tension	$H_{eff}$	N	430000
pressure difference	$\Delta p$	Pa	11735236.4
Temperature difference	$\Delta T$	C	53.8
Effective Tension	$S_{eff}$	N	$-1.75 \times 10^6$
tegangan longitudinal akibat momen lentur	$\sigma_b$	Pa	$M \times 1071.741$
tegangan longitudinal akibat beda tekanan	$\sigma_l$	Pa	$-5.53 \times 10^7$
batas tegangan	$M$	Nm	$3.86 \times 10^5$
panjang span statik	$L_{statik}$	m	75.169715

#### 4.2.2.2. Kilometer Point (KP) antara 0.500 – 3.496 km

- **Massa Pipa Terendam (Msub)**

$$M_{sub} = M_p - \frac{\pi}{4} \times D^2 \times \rho = 208.087 - \frac{\pi}{4} \times 0.4316^2 \times 1025 = 58 \text{ kg/m}$$

- **berat terendam (Wsub)**

$$W_{sub} = B \times 9.81 = 570 \text{ N/m}$$

- **momen inersia (I)**

$$\begin{aligned} I &= \frac{\pi}{64} \times (D_s^4 - (D_s - 2 \times t_{pipa})^4) \\ &= \frac{\pi}{64} \times (0.3556^4 - (0.3556 - 2 \times 0.0103)^4) = 0.00016 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

- **beban hidrodinamik**

Sebelum menghitung beban hidrodinamik dari arus laut, maka perlu diketahui terlebih dahulu nilai koefisien drag yaitu dengan menggunakan hubungan antara *Reynolds Number* dan koefisien drag

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{1025 \times 0.43 \times 0.4316}{0.0016} = 1.19 \times 10^5$$

Dengan nilai  $Re = 1.19 \times 10^5$ , maka nilai koefisien drag ( $C_d$ ) = 1.2

Beban hidrodinamik didefinisikan sebagai berikut :

$$F_{IL} = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_d = \frac{1}{2} \times 1025 \times 0.43^2 \times 0.4316 \times 1.2 = 49.078 \text{ N/m}$$

- **beban terdistribusi merata**

Beban terdistribusi merata yang terjadi pada pipa berdasarkan persamaan (3.15) adalah sebagai berikut :

$$W = \sqrt{49.0787^2 + 570^2} = 572.337 \text{ N/m}$$

- **Tegangan Longitudinal Akibat Momen Lentur**

Tegangan longitudinal ( $\sigma_b$ ) pada pipa akibat momen lentur dinyatakan sebagai berikut:

$$\sigma_b = M \times \frac{D}{2 \times I} = M \times \frac{0.4316}{2 \times 0.000166} = M \times 1294.727$$

- **Tegangan Longitudinal Akibat Beda Tekanan**

Tegangan longitudinal akibat beda tekanan ( $\sigma_l$ ) yang terjadi pada pipa akibat beda tekanan adalah :

dimana :

$$S_{eff} = 430000 - (11824929.23 \times 0.088 \times (1 - 2 \times 0.3) - (0.0111 \times 2.07 \times 10^{11} \times 53.8 \times 1.17 \times 10^{-5})) = -1.44 \times 10^6 \text{ N}$$

$$\sigma_l = \frac{-1.44 \times 10^6 + (12.22 \times 10^6 \times 0.088) - (395070.772 \times 0.0993)}{0.0111}$$

$$= -3.62 \times 10^7 \text{ Pa}$$

- **Batas Tegangan**

Batas tegangan untuk tegangan longitudinal adalah :

$$\sigma_b + \sigma_l \leq 0.8 \text{ SMYS}$$

Maka nilai momen lentur didapat yaitu

$$M \times 1294.727 + (-3.62 \times 10^7) \leq 0.8 \times 448$$

$$M \leq 3.05 \times 10^5 \text{ Nm}$$

- **Panjang Span Statik**

Nilai *span* kritis secara statik diperoleh dari modifikasi persamaan momen lentur untuk batang sederhana dengan tumpuan *fixed-pinned* (3.18) yaitu:

$$M = \frac{W \times L^2}{8} \text{ maka } L = \sqrt{\frac{8M}{W}}$$

Sehingga panjang span statik adalah:

$$L_{\text{statik}} = \sqrt{\frac{8 \times 3.05 \times 10^5}{572.337}} = 65.272 \text{ m}$$

*Calculation sheet* untuk perhitungan panjang span statik untuk KP 0.500 – 3.496 ditunjukkan pada tabel 4.7 berikut ini.

Input (Design and Environmental Data)	symbol	unit	value
Yield Strength	SMYS	MPa	448
Tekanan dalam pipa	$P_i$	MPa	12.22
Diameter luar pipa baja	$D_s$	m	0.3556
Tebal pipa	$t_{\text{pipa}}$	m	0.0103
Kecepatan arus	$U_c$	m/s	0.43
Densitas air laut	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1025
Viskositas air laut	$\mu$	kg/ms	0.0016
Water depth	Wd	m	39.29
Tekanan luar pipa	$P_e$	Pa	395070.772
Diameter terluar pipa	D	m	0.4316
Luas penampang pipa bagian dalam	$A_i$	m <sup>2</sup>	0.088
Luas penampang pipa	$A_s$	m <sup>2</sup>	0.01117
Luas penampang pipa bagian luar	$A_e$	m <sup>2</sup>	0.099
Buoyancy	B	kg/m	58
Berat terendam	$W_{\text{sub}}$	N/m	570
Poisson ratio	$\nu$		0.3
Ambient Temperature	$T_{\text{amb}}$	C	26.2
Operation Temperature	$T_{\text{op}}$	C	80.0
Temperature expansion coefficient	$\alpha_e$	C <sup>-1</sup>	$1.17 \times 10^{-5}$
pipe youngs modulus	E	Pa	$2.07 \times 10^{11}$
momen inersia	I	m <sup>4</sup>	0.0001666
Calculation	symbol	unit	value
reynolds number	$R_e$		$1.19 \times 10^5$
koefisien drag	Cd		1.2
beban hidrodinamik	$F_{\text{IL}}$	N/m	49.078
beban terdistribusi merata	W	N/m	572.337

effective residual lay tension	$H_{eff}$	N	430000
pressure difference	$\Delta p$	Pa	11824929.23
Temperature difference	$\Delta T$	C	53.8
Effective Tension	$S_{eff}$	N	$-1.44 \times 10^6$
tegangan longitudinal akibat momen lentur	$\sigma_b$	Pa	$M \times 1294.727$
tegangan longitudinal akibat beda tekanan	$\sigma_1$	Pa	$-3.62 \times 10^7$
batas tegangan	M	Nm	$3.05 \times 10^5$
panjang span statik	$L_{statik}$	m	65.272

#### 4.2.2.3. Kilometer Point (KP) antara 3.496 – 35.000 km

- **Massa Pipa Terendam (Msub)**

$$M_{sub} = M_p \frac{\pi}{4} \times D^2 \times \rho = 208.087 - \frac{\pi}{4} \times 0.4316^2 \times 1025 = 58 \text{ kg/m}$$

- **berat terendam (Wsub)**

$$W_{sub} = B \times 9.81 = 570 \text{ N/m}$$

- **momen inersia (I)**

$$I = \frac{\pi}{64} \times (Ds^4 - (Ds - 2 \times tpipa)^4)$$

$$= \frac{\pi}{64} \times (0.3556^4 - (0.3556 - 2 \times 0.0103)^4) = 0.000166 \text{ m}^4$$

- **beban hidrodinamik**

Sebelum menghitung beban hidrodinamik dari arus laut, maka perlu diketahui terlebih dahulu nilai koefisien *drag* yaitu dengan menggunakan hubungan antara *Reynolds Number* dan koefisien *drag*

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{1025 \times 0.41 \times 0.4316}{0.0016} = 1.13 \times 10^5$$

Dengan nilai  $Re = 1.13 \times 10^5$ , maka nilai koefisien drag ( $C_d$ ) = 1.2

Beban hidrodinamik didefinisikan sebagai berikut :

$$F_{IL} = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_d = \frac{1}{2} \times 1025 \times 0.41^2 \times 0.4316 \times 1.2 = 44.6194554 \text{ N/m}$$

- **beban terdistribusi merata**

Beban terdistribusi merata yang terjadi pada pipa berdasarkan persamaan (3.15) adalah sebagai berikut :

$$W = \sqrt{44.619^2 + 570^2} = 571.972 \text{ N/m}$$

- **Tegangan Longitudinal Akibat Momen Lentur**

Tegangan longitudinal ( $\sigma_b$ ) pada pipa akibat momen lentur dinyatakan sebagai berikut:

$$\sigma_b = M \times \frac{D}{2 \times I} = M \times \frac{0.4316}{2 \times 0.000166676} = M \times 1294.727$$

- **Tegangan Longitudinal Akibat Beda Tekanan**

Tegangan longitudinal akibat beda tekanan ( $\sigma_l$ ) yang terjadi pada pipa akibat beda tekanan adalah :

dimana :

$$S_{eff} = 430000 - (11824929.23 \times 0.088 \times (1 - 2 \times 0.3) - (0.0111 \times 2.07 \times 10^{711} \times 53.8 \times 1.17 \times 10^{-5})) = -1.44 \times 10^6 \text{ N}$$

$$\sigma_l = \frac{-1.44 \times 10^6 + (12.22 \times 10^6 \times 0.088141309) - (395070.7725 \times 0.099314666)}{0.011173357} = -3.62 \times 10^7 \text{ Pa}$$

- **Batas Tegangan**

Batas tegangan untuk tegangan longitudinal adalah :

$$\sigma_b + \sigma_l \leq 0.8 \text{ SMYS}$$

Maka nilai momen lentur didapat yaitu

$$M \times 1294.727 + (-3.62 \times 10^7) \leq 0.8 \times 448$$

$$M \leq 3.05 \times 10^5 \text{ Nm}$$

- **Panjang *Span* Statik**

Nilai *span* kritis secara statik diperoleh dari modifikasi persamaan momen lentur untuk batang sederhana dengan tumpuan *fixed-pinned* (3.18) yaitu:

$$M = \frac{W \times L^2}{8} \text{ maka } L = \sqrt{\frac{8M}{W}}$$

Sehingga panjang span statik adalah:

$$L \text{ statik} = \sqrt{\frac{8 \times 3.05 \times 10^5}{571.9727655}} = 65.293 \text{ m}$$

*Calculation sheet* untuk perhitungan panjang *span* statik untuk KP 3.496 – 35.000 ditunjukkan pada tabel 4.8 berikut ini.

Input (Design and Environmental Data)	symbol	unit	value
Yield Strength	SMYS	MPa	448
Tekanan dalam pipa	$P_i$	MPa	12.22
Diameter luar pipa baja	$D_s$	m	0.3556
Tebal pipa	$t_{\text{pipa}}$	m	0.0103
Kecepatan arus	$U_c$	m/s	0.41
Densitas air laut	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1025
Viskositas air laut	$\mu$	kg/ms	0.0016
Water depth	Wd	m	39.29
Tekanan luar pipa	$P_e$	Pa	395070.7725
Diameter terluar pipa	D	m	0.4316
Luas penampang pipa bagian dalam	$A_i$	m <sup>2</sup>	0.088
Luas penampang pipa	$A_s$	m <sup>2</sup>	0.0111
Luas penampang pipa bagian luar	$A_e$	m <sup>2</sup>	0.099
Buoyancy	B	kg/m	58
Berat terendam	$W_{\text{sub}}$	N/m	570
Poisson ratio	$\nu$		0.3
Ambient Temperature	$T_{\text{amb}}$	C	26.2
Operation Temperature	$T_{\text{op}}$	C	80.0
Temperature expansion coefficient	$\alpha_e$	C <sup>-1</sup>	$1.17 \times 10^{-5}$



pipe youngs modulus	E	Pa	$2.07 \times 10^{11}$
momen inersia	I	$m^4$	0.000166
Calculation	symbol	unit	value
reynolds number	$Re$		$1.13 \times 10^5$
koefisien drag	Cd		1.2
beban hidrodinamik	$F_{IL}$	N/m	44.619
beban terdistribusi merata	W	N/m	571.972
effective residual lay tension	$H_{eff}$	N	430000
pressure difference	$\Delta p$	Pa	11824929.23
Temperature difference	$\Delta T$	C	53.8
Effective Tension	$S_{eff}$	N	$-1.44 \times 10^6$
tegangan longitudinal akibat momen lentur	$\sigma_b$	Pa	$M \times 1294.727$
tegangan longitudinal akibat beda tekanan	$\sigma_l$	Pa	$-3.62 \times 10^7$
batas tegangan	M	Nm	$3.05 \times 10^5$
panjang span statik	$L_{statik}$	m	65.293

#### 4.2.2.4 Kilometer Point (KP) antara 35.000 – 52.900 km

- **Massa Pipa Terendam (Msub)**

$$M_{sub} = M_p - \frac{\pi}{4} \times D^2 \times \rho = 338.62324 - \frac{\pi}{4} \times 0.4916^2 \times 1025 = 144 \text{ kg/m}$$

- **berat terendam (Wsub)**

$$W_{sub} = B \times 9.81 = 1413 \text{ N/m}$$

- **momen inersia (I)**

$$\begin{aligned} I &= \frac{\pi}{64} \times (Ds^4 - (Ds - 2 \times t_{pipa})^4) \\ &= \frac{\pi}{64} \times (0.3556^4 - (0.3556 - 2 \times 0.0103)^4) = 0.000166 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

- **beban hidrodinamik**

Sebelum menghitung beban hidrodinamik dari arus laut, maka perlu diketahui terlebih dahulu nilai koefisien drag yaitu dengan menggunakan hubungan antara *Reynolds Number* dan koefisien drag

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu} = \frac{1025 \times 0.89 \times 0.4916}{0.0016} = 2.80 \times 10^5$$

Dengan nilai  $Re = 2.80E \times 10^5$ , maka nilai koefisien drag ( $C_d$ ) = 1.2

Beban hidrodinamik didefinisikan sebagai berikut :

$$F_{IL} = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_d = \frac{1}{2} \times 1025 \times 0.89^2 \times 0.4316 \times 1.2 = 239.4787614 \text{ N/m}$$

- **beban terdistribusi merata**

Beban terdistribusi merata yang terjadi pada pipa berdasarkan persamaan (3.15) adalah sebagai berikut :

$$W = \sqrt{239.478^2 + 1413^2} = 1433.476 \text{ N/m}$$

- **Tegangan Longitudinal Akibat Momen Lentur**

Tegangan longitudinal ( $\sigma_b$ ) pada pipa akibat momen lentur dinyatakan sebagai berikut:

$$\sigma_b = M \times \frac{D}{2 \times I} = M \times \frac{0.4916}{2 \times 0.000166676} = M \times 1474.717$$

- **Tegangan Longitudinal Akibat Beda Tekanan**

Tegangan longitudinal akibat beda tekanan ( $\sigma_l$ ) yang terjadi pada pipa akibat beda tekanan adalah :

dimana :

$$S_{eff} = 430000 - (11944486.15 \times 0.088 \times (1 - 2 \times 0.3)) - (0.0111 \times 2.07 \times 10^{11} \times 53.8 \times 1.17 \times 10^{-5}) = -1.45 \times 10^6 \text{ N}$$

$$\sigma_l = \frac{-1.45 \times 10^6 + (12.22 \times 10^6 \times 0.088) - (275513.85 \times 0.099)}{0.0111}$$

$$= -3.56 \times 10^7 \text{ Pa}$$

- **Batas Tegangan**

Batas tegangan untuk tegangan longitudinal adalah :

$$\sigma_b + \sigma_l \leq 0.8 \text{ SMYS}$$

Maka nilai momen lentur didapat yaitu

$$M \times 1474.717 + (-3.56 \times 10^7) \leq 0.8 \times 448$$

$$M \leq 2.67 \times 10^5 \text{ Nm}$$

### • Panjang *Span* Statik

Nilai *span* kritis secara statik diperoleh dari modifikasi persamaan momen lentur untuk batang sederhana dengan tumpuan *fixed-pinned* (3.18) yaitu:

$$M = \frac{W \times L^2}{8} \text{ maka } L = \sqrt{\frac{8M}{W}}$$

Sehingga panjang *span* statik adalah:

$$L \text{ statik} = \sqrt{\frac{8 \times 2.67 \times 10^5}{1433.476379}} = 38.611 \text{ m}$$

*Calculation sheet* untuk perhitungan panjang *span* statik untuk KP 35.000 – 52.900 ditunjukkan pada tabel 4.9 berikut ini.

Input (Design and Environmental Data)	symbol	unit	value
Yield Strength	SMYS	MPa	448
Tekanan dalam pipa	$P_i$	MPa	12.22
Diameter luar pipa baja	$D_s$	m	0.3556
Tebal pipa	$t_{\text{pipa}}$	m	0.0103
Kecepatan arus	$U_c$	m/s	0.89
Densitas air laut	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1025
Viskositas air laut	$\mu$	kg/ms	0.0016
Water depth	Wd	m	27.4
Tekanan luar pipa	$P_e$	Pa	275513.85
Diameter terluar pipa	D	m	0.4916
Luas penampang pipa bagian dalam	$A_i$	m <sup>2</sup>	0.088
Luas penampang pipa	$A_s$	m <sup>2</sup>	0.0111
Luas penampang pipa bagian luar	$A_e$	m <sup>2</sup>	0.099

Buoyancy	B	kg/m	144
Berat terendam	$W_{sub}$	N/m	1413
Poisson ratio	$\nu$		0.3
Ambient Temperature	$T_{amb}$	C	26.2
Operation Temperature	$T_{op}$	C	80.0
Temperature expansion coefficient	$\alpha_e$	$C^{-1}$	$1.17 \times 10^{-5}$
pipe youngs modulus	E	Pa	$2.07 \times 10^{11}$
momen inersia	I	$m^4$	0.000166
Calculation	symbol	unit	value
reynolds number	$Re$		$2.80 \times 10^5$
koefisien drag	$C_d$		1.2
beban hidrodinamik	$F_{IL}$	N/m	239.478
beban terdistribusi merata	W	N/m	1433.476
effective residual lay tension	$H_{eff}$	N	430000
pressure difference	$\Delta p$	Pa	11944486.15
Temperature difference	$\Delta T$	C	53.8
Effective Tension	$S_{eff}$	N	$-1.45 \times 10^6$
tegangan longitudinal akibat momen lentur	$\sigma_b$	Pa	$M \times 1474.717$
tegangan longitudinal akibat beda tekanan	$\sigma_l$	Pa	$-3.56 \times 10^7$
batas tegangan	M	Nm	$2.67 \times 10^5$
panjang span statik	$L_{statik}$	m	38.611

#### 4.2.3 Panjang *Span* Statik Berdasarkan ASME B31.8

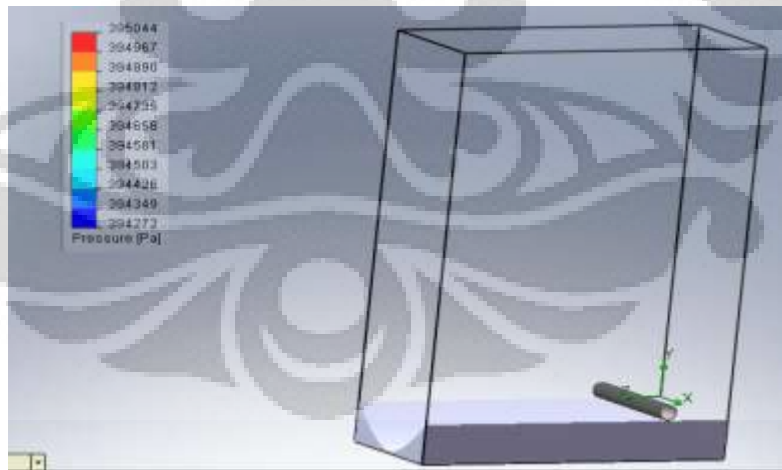
Hasil dari perhitungan berdasarkan ASME B31.8, Panjang span statik untuk masing-masing kilometer point (KP) dapat dilihat dalam tabel berikut :

Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Panjang *Span* statik berdasarkan ASME B31.8

Kilometer Point (km)	Pipe wall thickness (m)	Concrete thickness (m)	Current velocity (m/s)	Water depth (m)	panjang span statik (m)
0,000 s.d 0,500	0.0127	0.03	0.32	48.21	75.17
0,500 s.d 3,496	0.0103	0.03	0.43	39.29	65.27
3,496 s.d 35,000	0.0103	0.03	0.41	39.29	65.29
35,000 s.d 52,900	0.0103	0.06	0.89	27.4	38.61

### 4.3 Hasil Simulasi

Hasil simulasi 3 dimensi menghasilkan nilai parameter-parameter aliran secara keseluruhan. Gaya-gaya yang dihitung adalah gaya yang bekerja pada seluruh batang pipa.

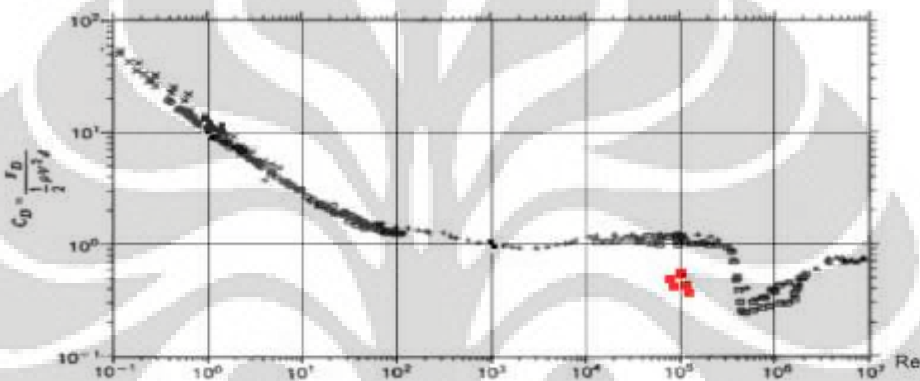


**Gambar 4.1** Contoh visualisasi 3 dimensi batang pipa dengan *gap* dari dasar laut

Hasil dari simulasi pada 4 kecepatan arus (dengan variasi 5 *gap*) yang berbeda ini adalah sebagai berikut:

### 4.3.1 Coefficient Drag (Cd)

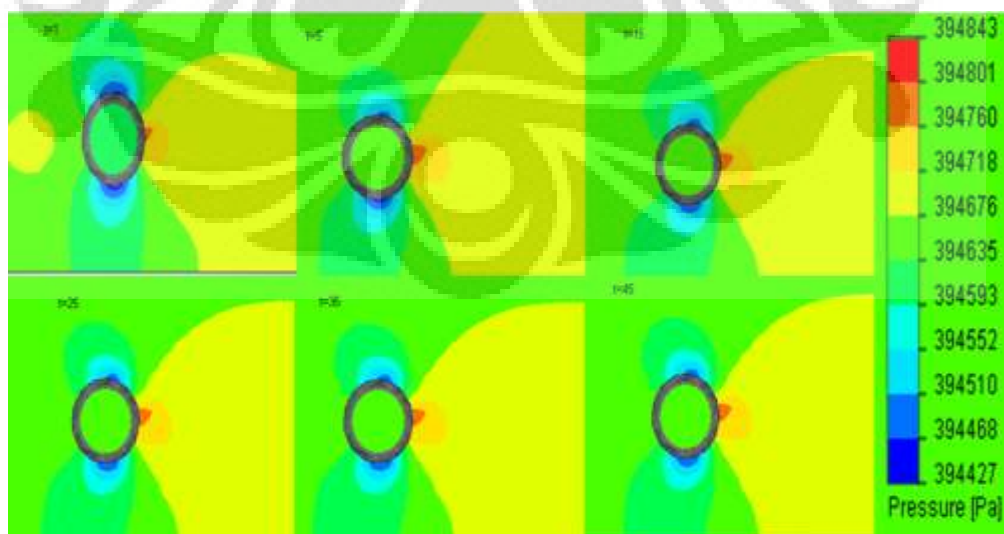
Data Cd yang didapat dari simulasi ini di plot ke grafik dari referensi sebagai bahan untuk validasi data hasil simulasi. Plot koefisien gaya (koefisien drag) terhadap  $Re$  menunjukkan nilai yang cukup jauh antara data hasil simulasi CFD (titik-titik merah) dengan data koefisien drag dari sebuah silinder yang terdapat pada grafik dari referensi. Hal ini disebabkan karena pada  $Re$  disekitar  $10^5$  terjadi aliran transisi, dimana terjadi perubahan dari aliran laminar ke turbulen. Ini juga kemungkinan terjadi karena fluktuasi gaya yang tidak terbaca oleh grafik.



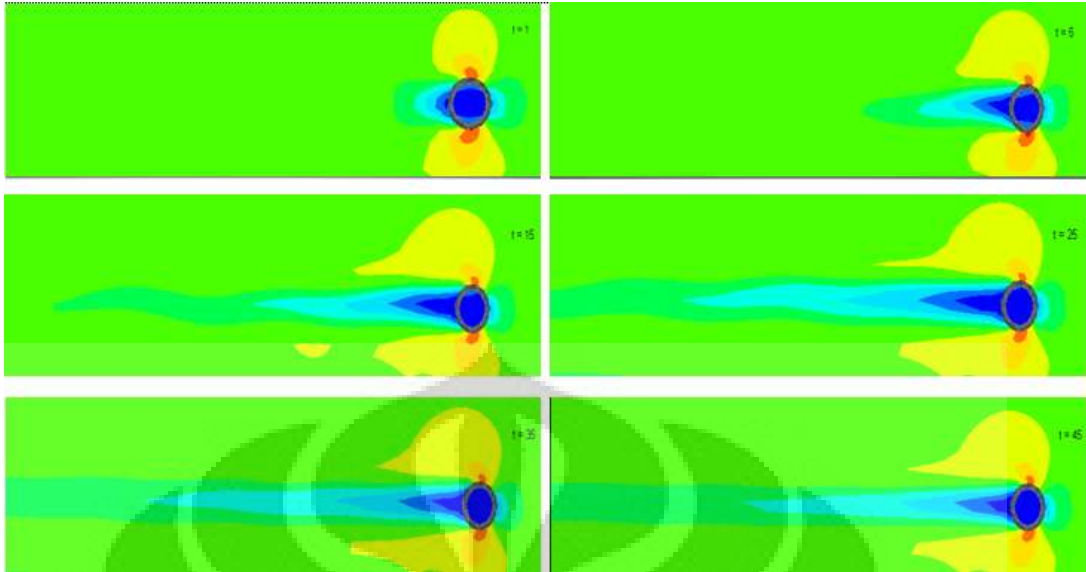
Gambar 4.2 Perbandingan Hasil Cd dari simulasi dan referensi

### 4.3.2 Cut Plot

Cut plot untuk perubahan tekanan (P) dan kecepatan (v) tiap waktunya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



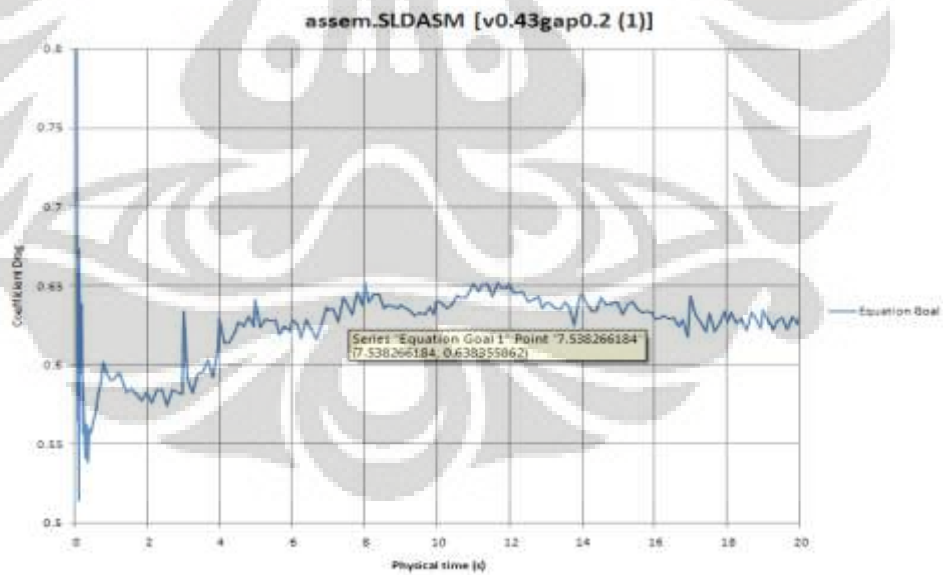
Gambar 4.3 Cut plot distribusi tekanan pada  $v = 0.43$  gap 0.4



Gambar 4.4 Cut plot distribusi kecepatan pada  $v = 0.43$  gap 0.4

### 4.3.3 Frekuensi Vorteks ( $f_s$ )

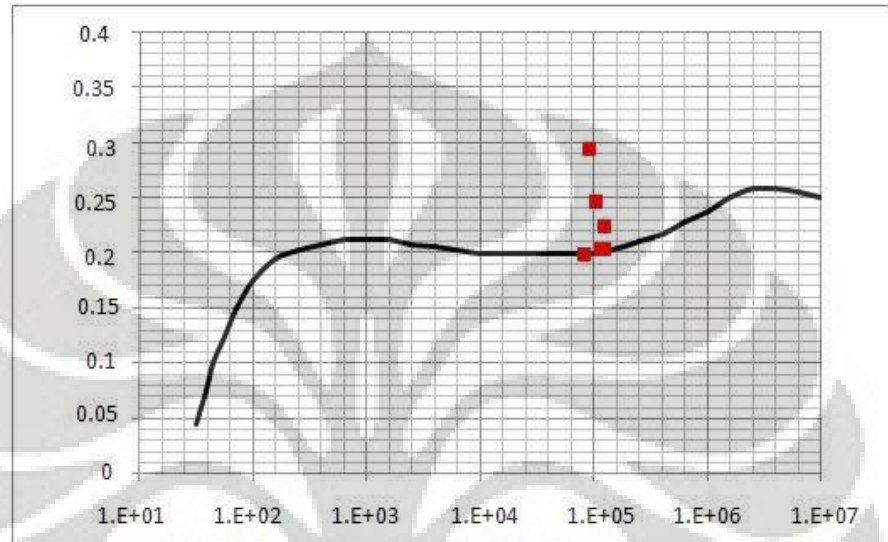
Frekuensi vorteks didapat dari grafik fluktuasi koefisien beban (*Coefficient Drag*) terhadap waktu.



Gambar 4.5 Contoh grafik fluktuasi beban (*Coefficient Drag*) terhadap waktu

#### 4.3.4 Bilangan *Strouhal* (*St*)

Bilangan *Strouhal* dapat dihitung dengan persamaan 2.3 dengan memasukkan nilai frekuensi vorteks yang didapat dari grafik fluktuasi beban (*Coefficient Drag*).



Gambar 4.6 Perbandingan Hasil *St* dari simulasi dan referensi

#### 4.3.5 Panjang *span* Hasil Simulasi

Untuk Perhitungan panjang *span* digunakan persamaan 3.3 dengan nilai  $f_n$  didapat dari rasio perbandingan  $f_s/f_n$  dari perhitungan Boyun Guo.

Untuk Semua perhitungan simulasi secara keseluruhan digunakan *Microsoft office sheet* sehingga dapat dilihat dari table hasil simulasi berikut:

Tabel 4.11 Hasil simulasi 3 dimensi

Kilometer	Gap	Cd	St	fs	fn	L
Point				(Hz)	(Hz)	(m)
0,000 s.d 0,500	0.2	0.596	0.269	0.2	0.530514	43.19795
	0.4	0.492	0.269	0.2	0.530514	43.19795
	0.6	0.595	0.202	0.15	0.398379	49.84981



	0.8	0.586	0.269	0.2	0.530514	43.19795
	1	0.572	0.33	0.25	0.650817	39.00159
0,500 s.d 3,496	0.2	0.641	0.301	0.3	0.782185	33.93398
	0.4	0.547	0.2	0.2	0.519724	41.62968
	0.6	0.682	0.2	0.2	0.519724	41.62968
	0.8	0.609	0.25	0.25	0.649655	37.23472
	1	0.682	0.301	0.3	0.782185	33.93398
3,496 s.d 35,000	0.2	0.555	0.202	0.15	0.512266	41.93165
	0.4	0.483	0.269	0.2	0.682175	36.33637
	0.6	0.542	0.269	0.2	0.682175	36.33637
	0.8	0.541	0.31	0.3	0.78615	33.84829
	1	0.52	0.21	0.2	0.532553	41.1252
35,000 s.d 52,900	0.2	0.537	0.276	0.5	1.484477	24.63218
	0.4	0.479	0.33	0.6	1.774918	22.52684
	0.6	0.478	0.16	0.3	0.860566	32.35172
	0.8	0.478	0.22	0.4	1.183279	27.58964
	1	0.462	0.276	0.5	1.484477	24.63218

#### 4.3.6 Screening Span

Dari hasil perhitungan dan simulasi untuk panjang span, didapatkan panjang span untuk masing – masing criteria seperti tertera pada tabel berikut ini.

**Tabel 4.12** Panjang *Span* Masing – Masing Kriteria

Kilometer Point (km)	Panjang Span (m)		
	Boyun Guo	panjang span statik	Simulasi EFD Lab
0,000 s.d 0,500	50.35	75.17	39.00
0,500 s.d 3,496	41.84	65.27	33.93
3,496 s.d 35,000	42.35	65.29	33.85
35,000 s.d 52,900	29.08	38.61	22.53

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi menggunakan data-data yang didapat, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Panjang *span* dipengaruhi oleh kecepatan arus eksternal. Kecepatan arus yang rendah memungkinkan panjang *span* yang besar. Sebaliknya jika kecepatan arus tinggi panjang *span* harus pendek untuk mencegah terjadinya kegagalan.
2. Jarak pipa dengan dasar laut (*gap*) mempengaruhi koefisien drag dari pipa tersebut. Makin besar *gap*, nilai koefisien drag cenderung semakin kecil.
3. Output koefisien drag dari simulasi cukup jauh jika dibandingkan dengan nilai koefisien drag dari referensi. Hal ini mungkin disebabkan karena pada bilangan *Reynold*  $10^5$  merupakan aliran transisi sehingga fluktuasi beban sulit dibaca oleh grafik.

#### 5.2 Saran

Pembacaan frekuensi vorteks pada grafik *Cd* terhadap waktu harus dilakukan secara teliti untuk mendapatkan hasil perhitungan yang akurat (bilangan Strouhal).

Penggunaan program *EFD Lab* dapat digunakan untuk melakukan perhitungan rentangan bebas (*free span analysis*) untuk mendapatkan panjang *span* maksimum selain metode perhitungan *Boyun Guo*.

## DAFTAR REFERENSI

- Santos Pty Ltd. (2007). *Basis For Detail Design - Project EPCI Offshore Pipeline-Oyong Phase 2* (no Document 9815-50-BD-100 rev.2).
- Santos Pty Ltd. (2008). *Pipeline Span Analysis - Project EPCI Offshore Pipeline-Oyong Phase 2* (no Document 9815-50-CA-104).
- Guo, Boyun. (2005) *Offshore Pipelines*. Elsevier Inc.
- ASME B31.8. *Gas Transmission and Distribution Piping Systems*. ASME - 2007
- Versteeg et.al. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*
- Panton L, Ronald. *Incompressible Flow*. John Willey Publisher
- Choi, H.S. (2001). *Free spanning analysis of offshore pipelines*. *Ocean Engineering*, vol. 28, pp. 1325–1338.
- Larsen, C.M., Koushan, K., and Passano, E. (2002). *Frequency and time domain analysis of vortex induced vibrations for free span pipelines*. In: *the twenty first International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Oslo, Norway, OMAE2002-28064.
- Dalton, Charles. *Fundamentals of Vortex - Induced Vibration*. University of Houston.
- Fossati, F., and Fichera, G. (2005). *Sea Current Vortex Shedding Induced Vibration of Nemo Tower*. University of Catania.