



TUGAS AKHIR - MO 184804

**ANALISIS RESPONS DINAMIS PIPA BAWAH LAUT DENGAN  
*FREE SPAN* AKIBAT *VORTEX INDUCED VIBRATION (VIV)***

**NOVI JESIKA ANASTASIA  
NRP. 0431154000060**

**Dosen Pembimbing :**

**Ir. Imam Rochani, M.Sc.**

**Dr. Eng. Rudi Waluyo P, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2019**



FINAL PROJECT - MO 184804

**DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS ON SUBSEA PIPELINE WITH  
FREE SPAN DUE TO VORTEX INDUCED VIBRATION (VIV)**

**NOVI JESIKA ANASTASIA**

**NRP. 04311540000060**

**Supervisors :**

**Ir. Imam Rochani, M.Sc.**

**Dr. Eng. Rudi Waluyo P, S.T., M.T.**

**DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING  
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2019**

**ANALISIS RESPONS DINAMIS PIPA BAWAH LAUT DENGAN *FREE SPAN*  
AKIBAT *VORTEX INDUCED VIBRATION (VIV)***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk memenuhi Salah Satu Syarat Memproleh Gelar Sarjana Teknik pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan,  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**NOVI JESIKA ANASTASIA**

NRP. 04311540000060

Disetujui oleh Pembimbing dan Penguji Tugas Akhir :

1. Ir. Imam Rochani, M.Sc. (Pembimbing 1)

2. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.Sc. (Pembimbing 2)

3. Dr.Eng Yeyes Mulyadi, ST., M.Sc (Penguji 1)

4. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D (Penguji 2)

5. Sholihin, S.T., M.T. (Penguji 3)

SURABAYA, JULI 2019

## ABSTRAK

### ANALISIS RESPONS DINAMIS PIPA BAWAH LAUT DENGAN *FREE SPAN* AKIBAT *VORTEX INDUCED VIBRATION* (VIV)

Nama : Novi Jesika Anastasia  
NRP : 0431154000060  
Departemen : Teknik Kelautan  
Dosen Pembimbing : Ir. Imam Rochani, M.Sc.  
Dr. Eng. Rudi Waluyo Prastianto, S.T., M.T.

#### Abstrak

Pada saat beroperasi kondisi seabed tempat pipa bawah laut (*offshore pipeline*) meletak tidak seluruhnya rata, hal inilah yang biasanya mengakibatkan adanya bentangan bebas antara pipa dan *seabed* yang biasa disebut dengan *free span*. Aliran partikel yang melewati bagian pipa yang mengalami *free span* akan timbul ulekan (*vortex*). *Vortex* ini jika besarnya melebihi 0.7 dari frekuensi natural maka akan terjadi getaran yang biasa disebut dengan *Vortex Induced Vibration* (VIV). Pada jalur pipa yang menghubungkan antara *Central Processing Platform-2* dengan *Onshore Receiving Facility* (Gresik) ditemukan adanya *free span* di beberapa segmen. Pada analisis kali ini menggunakan 20 titik span untuk mengetahui apakah span tersebut sudah memenuhi kriteria analisis dinamis serta statis sesuai dengan kode standar DNV RP F105 dan DNV OS F101. Pada analisis dinamis yang telah dilakukan terdapat 3 titik *free span* yang memerlukan *support* karena tidak memenuhi kriteria yang disyaratkan DNV RP F105. Dari hasil perhitungan, jarak *support* agar pipa dapat dikategorikan aman adalah sebesar 13 m. Untuk analisis sesuai dengan kriteria DNV OS F101 didapatkan hasil bahwa *pipeline* aman dari terjadinya keruntuhan, ledakan, maupun penjalaran *buckling*.

**Kata Kunci :** *offshore pipeline, free span, VIV*

## **ABSTRACT**

### **DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS ON SUBSEA PIPELINE WITH FREE SPAN DUE TO VORTEX INDUCED VIBRATION (VIV)**

Name : Novi Jesika Anastasia  
NRP : 0431154000060  
Department : Ocean Engineering  
Supervisors : Ir. Imam Rochani, M.Sc.  
Dr. Eng. Rudi Waluyo Prastianto, S.T., M.T.

#### **Abstract**

In operation, seabed condition where offshore pipeline placed not entirely flat, cause gap between pipeline and seabed was called free span. The particles flow that pass pipe with freespan will appear vortex. If vortex exceeds 0.7 of natural frequency, vibration will occur or commonly called Vortex Induced Vibration (VIV). Pipeline that connects Central Processing Platform-2 and Onshore Receiving Facility (Gresik) was found free span in several segments. In this analysis use 20 span points to determine that span fulfill dynamic and static criteria according to standard code DNV RP F105 and DNV OS F101. The result of dynamic analysis, there are 3 free span points require support because not fulfill DNV RP F105 criteria. The result of calculation is supports distance so the pipe can be categorized as safety is 13 m. Analysis according to DNV OS F101 criteria, the pipeline is safe from failure, explosion, and buckling propagation.

**Keyword:** *offshore pipeline, free span, VIV*

## KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan serangkaian kegiatan penelitian dan penulisan laporan Tugas Akhir dengan baik dan tepat waktu. Laporan ini berisi tentang tahapan proses dan hasil dari tugas akhir penulis. Tugas akhir ini berjudul “**Analisis Respons Dinamis Pipa Bawah Laut Dengan *Free Span Akibat Vortex Induced Vibration (VIV)***”.

Tugas akhir ini disusun agar memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Studi Kesarjanaan (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Tugas Akhir ini menganalisis tentang pipa bawah laut yang memiliki gap diantar pipa dengan *seabed* yang bisa mengakibatkan terjadinya *vortex induced vibration (VIV)*, sehingga memerlukan adanya penambahan *support*.

Penulis menyadari bahwa dalam penyelesaian tugas akhir dan penulisan laporan masih terdapat kekurangan. Kritik dan saran dari pembaca sangat diharapkan oleh penulis, agar menjadi evaluasi guna menghasilkan suatu penelitian dan penulisan yang lebih baik ke depannya. Semoga tugas akhir ini bisa memberikan manfaat bagi penulis serta pembaca pada umumnya.

Wassalamualaikum Wr.Wb.

Surabaya, 1 Agustus 2019

Novi Jesika Anastasia

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada beberapa pihak yang turut membantu kelancaran selama pengerjaan tugas akhir ini. Mungkin ucapan ini tidak sebanding dengan apa yang diberikan oleh pihak - pihak tersebut, namun diharapkan dapat menjadi sebuah pembelajaran untuk penulis agar senantiasa berterima kasih kepada pihak yang telah memberikan banyak bantuan dalam tugas akhir ini. Beberapa pihak tersebut diantaranya:

1. Allah SWT yang telah memberikan kesehatan dan kemudahan selama mengerjakan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua penulis yang sangat luar biasa yaitu ayahanda Agus Sakiyar dan Ibunda Misbah Sanusi Rerung, yang telah mengorbankan waktu dan tenaganya agar penulis dapat tetap melanjutkan kuliah sampai menyelesaikan tugas akhir ini, beserta kepercayaan dan doa-doa yang diberikan kepada penulis.
3. Adik tercinta penulis, Satrio Setia Hati Bijaksana yang telah memberikan semangat serta memotivasi penulis agar segera menyelesaikan jenjang studi S1.
4. Bapak Ir. Imam Rochani, M.Sc. dan Bapak Dr. Eng. Rudi Waluyo P, S.T., M.T.Ph.D., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir ini, atas bantuan masukan, dukungan serta ilmu bermanfaat dalam mengerjakan dan menyusun Tugas Akhir.
5. Seluruh Dosen, Karyawan, Tim tata usaha dan Administrasi Departemen Teknik Kelautan FTK ITS, yang telah memberikan ilmu, bantuan dan fasilitas kepada penulis selama menjalani perkuliahan dan menyelesaikan tugas akhir.
6. Bapak Ir. Murdjito, M.Sc.Eng selaku dosen wali penulis yang telah membantu dan mengarahkan selama masa perkuliahan di Teknik Kelautan.
7. Pihak penyelenggara Beasiswa YVDMI, atas bantuan biaya perkuliahan hingga penulis dapat berkuliah sampai dengan semester akhir.
8. Teman - teman satu bimbingan (Pak Imam & Pak Rudi) seperjuangan yang menjadi tempat *sharing* selama pengerjaan tugas akhir.

9. Keluarga besar angkatan TRITONOUS P-55 L-33, yang selalu mendukung penulis hingga selesainya tugas akhir ini. Terima kasih telah menjadi keluarga baru dari awal kehadiran penulis di ITS.
10. Keluarga Besar UKM Sepakbola ITS dan Tim Futsal Putri ITS khususnya yang selalu memberikan semangat serta dukungan kepada penulis selama pengerjaan tugas akhir ini.
11. Pihak-pihak lainnya yang belum bisa disebutkan satu persatu oleh penulis.



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>vi</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xiv</b>

### **BAB I PENDAHULUAN**

1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Manfaat .....	3
1.5 Batasan Masalah .....	4
1.6 Sistematika Penulisan Laporan.....	4

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

2.1 Tinjauan Pustaka.....	6
2.2 Dasar Teori .....	7
2.2.1 Stabilitas Pipa Bawah Laut.....	7
2.2.1.1 Stabilitas Vertikal Pipa dalam Air .....	7
2.2.1.2 Stabilitas Absolut Lateral .....	8
2.2.2 Beban Lingkungan.....	10
2.2.2.1 Gelombang.....	10
2.2.2.2 Arus.....	13
2.2.2 Massa Efektif Pipa.....	14
2.2.3 Free Span .....	16

2.2.4	Vortex Induced Vibration (VIV) .....	17
2.2.4.1	Kriteria Aliran.....	18
2.2.4.2	Reynold Number.....	19
2.2.4.3	Stability Parameter.....	21
2.2.4.4	Reduced Velocity ( $V_R$ ) .....	21
2.2.4.5	<i>Keulegan-Carpenter Number (KC)</i> .....	22
2.2.4.6	Frekuensi Vortex Shedding .....	22
2.2.5	Gaya Hidrodinamis.....	22
2.2.5.1	Gaya <i>Lift</i> .....	23
2.2.5.2	Gaya Drag.....	23
2.2.5.3	Gaya Inertia .....	27
2.2.6	Analisis Dinamis .....	27
2.2.6.1	<i>Boundary Condition</i> .....	28
2.2.6.2	<i>Concrete Stiffness Factor (CSF)</i> .....	29
2.2.6.3	Panjang <i>Span</i> Efektif .....	29
2.2.6.4	<i>Effective Axial Force</i> .....	30
2.2.6.5	<i>Critical Buckling Load</i> .....	31
2.2.6.6	<i>Static Deflection</i> .....	31
2.2.6.7	Frekuensi Natural Pipa .....	32
2.2.6.8	Panjang Maksimum <i>Span</i> .....	33
2.2.7	Kriteria Screening.....	33
2.2.8	Analisa Statis .....	35
2.2.8.1	<i>Pressure Containment (Bursting)</i> .....	35
2.2.8.2	<i>Local Buckling – Collapse Criteria</i> .....	36
2.2.8.3	<i>Local buckling - combined loading criteria</i> .....	38
2.2.8.4	<i>Local Buckling – Propagation Buckling</i> .....	39
2.2.9	Mitigasi.....	40
2.2.10	Tegangan .....	41
2.2.10.1	Tegangan Hoop.....	41
2.2.10.2	Tegangan Longitudinal .....	42
2.2.10.3	Tegangan Kombinasi .....	43

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

3.1	Diagram Alir ( <i>Flow Chart</i> ).....	44
3.2	Langkah – Langkah Pengerjaan.....	46

### **BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

4.1	Analisis Data.....	47
4.1.1	Data Pipeline .....	47
4.1.2	Data Lingkungan .....	48
4.1.3	Data Inspeksi <i>Free Span</i> .....	49
4.1.4	Data Perhitungan Dimensi Pipa.....	50
4.1.5	Data Perhitungan Massa Terendam Pipa.....	51
4.2	Analisis Kecepatan Partikel Air.....	51
4.2.1	Perhitungan Kecepatan Arus pada Pipa.....	51
4.2.2	Perhitungan Kecepatan Partikel Air Akibat Pengaruh Gelombang .....	52
4.3	Perhitungan Massa Efektif Pipa.....	54
4.4	Analisis <i>Vortex Induced Vibrations (VIV)</i> .....	55
4.4.1	Perhitungan <i>Reynolds Number (Re)</i> .....	56
4.4.2	Perhitungan <i>Stability Parameter (Ks)</i> .....	57
4.4.3	Perhitungan <i>Reduced Velocity (V<sub>R</sub>)</i> .....	58
4.4.4	Perhitungan <i>Keulegan Carpenter (KC)</i> .....	59
4.5	Analisis Gaya Hidrodinamis.....	60
4.5.1	Perhitungan Gaya Lift ( $F_L$ ).....	60
4.5.2	Perhitungan Gaya Drag ( $F_D$ ).....	61
4.6	Analisis Dinamis <i>Free Span</i> .....	62
4.6.1	Perhitungan <i>Concrete Stiffness Factor (CSF)</i> .....	63
4.6.2	Perhitungan <i>Efective Axial Force (S<sub>eff</sub>)</i> .....	63
4.6.3	Perhitungan Critical Buckling ( $P_{cr}$ ) .....	64
4.6.4	Perhitungan Defleksi ( $\delta$ ).....	65
4.6.5	Perhitungan Frekuensi <i>Vortex Shedding</i> dan Frekuensi Natural .....	66
4.6.6	Perhitungan Panjang Maksimum Span.....	67
4.7	Kriteria <i>Screening</i> .....	68
4.8	Mitigasi .....	77

4.9 Analisis Statis Span .....	83
4.10 Analisis Tegangan Dengan AUTOPIPE.....	85

**BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1 Kesimpulan.....	90
5.2 Saran .....	90

**DAFTAR PUSTAKA .....** 91

**LAMPIRAN - LAMPIRAN**

**BIODATA PENULIS**

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Diagram Gaya yang Bekerja pada Pipa di Dasar Laut .....	7
<b>Gambar 2.2</b> Tipe Span .....	17
<b>Gambar 2.3</b> Ilustrasi <i>Vortex Induced Vibration</i> pada Pipa.....	18
<b>Gambar 2.4</b> Bentuk Aliran Fluida Pada Silinder .....	20
<b>Gambar 2.5</b> Grafik $\Psi_{KC}$ , $\alpha_{CD}$ untuk $KC < 5$ (DNV RP F105, 2006).....	25
<b>Gambar 2.6</b> <i>Basic Cross-Flow Response Model</i> (DNV RP F105,2006).....	27
<b>Gambar 4.1</b> Input Data Properti Pipa .....	86
<b>Gambar 4.2</b> Input Data Pembebanan.....	86
<b>Gambar 4.3</b> Input Data Support.....	87
<b>Gambar 4.4</b> Model Pipa Tampak Depan .....	88
<b>Gambar 4.5</b> Hasil Tegangan Hoop .....	88
<b>Gambar 4.6</b> Hasil Tegangan Longitudinal .....	89
<b>Gambar 4.7</b> Hasil Tegangan <i>Von Mises</i> .....	89

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Koefisien Beban Horizontal (DNV RP-F109, 2010) .....	9
<b>Tabel 2.2</b> Koefisien Beban Vertical (DNV RP-F109, 2010).....	9
<b>Tabel 2.3</b> Seabed Roughness (DNV RP F109, 2010) .....	14
<b>Tabel 2.4</b> Kriteria Aliran (DNV RP F105, 2006).....	18
<b>Tabel 2.5</b> Kekasaran Permukaan Pipa (DNV RP F105, 2006).....	24
<b>Tabel 2.6</b> Koefisien <i>Boundary condition</i> (DNV RP F105, 2006).....	28
<b>Tabel 2.7</b> Screening Factor (DNV RP F105, 2006) .....	35
<b>Tabel 2.8</b> Faktor Fabrikasi Maksimum (DNV OS F101, 2000).....	36
<b>Tabel 2.9</b> Faktor Ketahanan Material (DNV OS F101, 2000) .....	37
<b>Tabel 2.10</b> Faktor Safety Class (DNV OS F101, 2000).....	37
<b>Tabel 2.11</b> Faktor Melakukan Mitigasi pada Span Kritis .....	40
<b>Tabel 2.12</b> Tegangan Pada Pipa (ASME B31.8 2012).....	41
<b>Tabel 4.1</b> Data Desain Pipa .....	47
<b>Tabel 4.2</b> Data Anti-Corrossion Coating dan Concrete Coating.....	48
<b>Tabel 4.3</b> Data Gelombang dan Arus .....	49
<b>Tabel 4.4.</b> Data Karakteristik Tanah.....	49
<b>Tabel 4.5</b> Data <i>Free Span</i> Hasil Inspeksi Bawah Laut.....	50
<b>Tabel 4.6</b> Perhitungan Dimensi Pipa (Syahroni, 2018).....	50
<b>Tabel 4.7</b> Hasil Perhitungan Berat Terendam Pipa (Syahroni, 2018).....	51
<b>Tabel 4.8</b> Perhitungan Kecepatan Arus Pada Pipa .....	52
<b>Tabel 4.9</b> Parameter JONSWAP .....	53
<b>Tabel 4.10</b> Perhitungan Angka Gelombang .....	53
<b>Tabel 4.11</b> Perhitungan Nilai Momen Spektra.....	54

<b>Tabel 4.12</b> Hasil Perhitungan Kecepatan Partikel Air Akibat Pengaruh Gelombang .....	54
<b>Tabel 4.13</b> Massa Efektif Pipa.....	55
<b>Tabel 4.14</b> Parameter Perhitungan Komponen VIV.....	56
<b>Tabel 4.15</b> Hasil Perhitungan <i>Reynolds Number</i> .....	56
<b>Tabel 4.16</b> Hasil Perhitungan <i>Stability Parameter</i> .....	57
<b>Tabel 4.17</b> Hasil Perhitungan <i>Stability Parameter</i> .....	58
<b>Tabel 4.18</b> Hasil Perhitungan <i>Keulegan Carpenter</i> .....	59
<b>Tabel 4.19</b> Hasil Perhitungan Gaya Lift.....	61
<b>Tabel 4.20</b> Hasil Perhitungan Gaya Drag.....	62
<b>Tabel 4.21</b> Parameter Perhitungan CSF .....	63
<b>Tabel 4.22</b> Hasil Perhitungan CSF .....	63
<b>Tabel 4.23</b> Parameter Perhitungan $S_{eff}$ .....	63
<b>Tabel 4.24</b> Hasil Perhitungan $S_{eff}$ .....	64
<b>Tabel 4.25</b> Parameter Perhitungan $P_{cr}$ .....	64
<b>Tabel 4.26</b> Hasil Perhitungan $P_{cr}$ .....	65
<b>Tabel 4.27</b> Hasil Perhitungan Defleksi.....	66
<b>Tabel 4.28</b> Hasil Perhitungan Frekuensi Natural .....	67
<b>Tabel 4.29</b> Hasil Perhitungan Frekuensi Natural .....	68
<b>Tabel 4.30</b> Screening Kriteria VIV arah <i>In-Line</i> .....	69
<b>Tabel 4.31</b> Screening Kriteria VIV arah <i>Crossflow</i> .....	69
<b>Tabel 4.32</b> Screening Osilasi arah <i>Inline</i> .....	70
<b>Tabel 4.33</b> Screening Osilasi arah <i>Crossflow</i> .....	71
<b>Tabel 4.34</b> Screening Kriteria Panjang Maksimum Span arah <i>Inline</i> .....	72
<b>Tabel 4.35</b> Screening Kriteria Panjang Maksimum Span arah <i>Crossflow</i> .....	73
<b>Tabel 4.36</b> Screening Kriteria Nilai <i>Critical Buckling</i> arah <i>Inline</i> .....	73

<b>Tabel 4.37</b> Screening Kriteria Nilai <i>Critical Buckling</i> arah <i>Crossflow</i> .....	74
<b>Tabel 4.38</b> Screening Kriteria Defleksi arah <i>Inline</i> .....	75
<b>Tabel 4.39</b> Screening Kriteria Defleksi arah <i>Crossflow</i> .....	76
<b>Tabel 4.40</b> Screening Kriteria Gap .....	77
<b>Tabel 4.41</b> Panjang Span Setelah Penambahan Support .....	78
<b>Tabel 4.42</b> Screening Kriteria VIV Setelah Mitigasi .....	79
<b>Tabel 4.43</b> Screening Osilasi.....	79
<b>Tabel 4.44</b> Screening Kriteria Panjang Maksimum Span Setelah Mitigasi .....	80
<b>Tabel 4.45</b> Screening Kriteria <i>Critical Buckling</i> Setelah Mitigasi.....	81
<b>Tabel 4.46</b> Screening Kriteria Defleksi Setelah Mitigasi .....	82
<b>Tabel 4.47</b> Kriteria Tekanan <i>Brusting</i> .....	83
<b>Tabel 4.48</b> Kriteria Tekanan <i>Collapse</i> .....	84
<b>Tabel 4.49</b> Parameter Kriteria <i>Combined Load</i> .....	84
<b>Tabel 4.50</b> Kriteria <i>Combined Load</i> .....	85
<b>Tabel 4.51</b> Kriteria Tekanan <i>Propagation Buckling</i> .....	85
<b>Tabel 4.52</b> Nilai Tegangan Hasil Pemodelan Software AutoPIPE .....	87



# BAB I

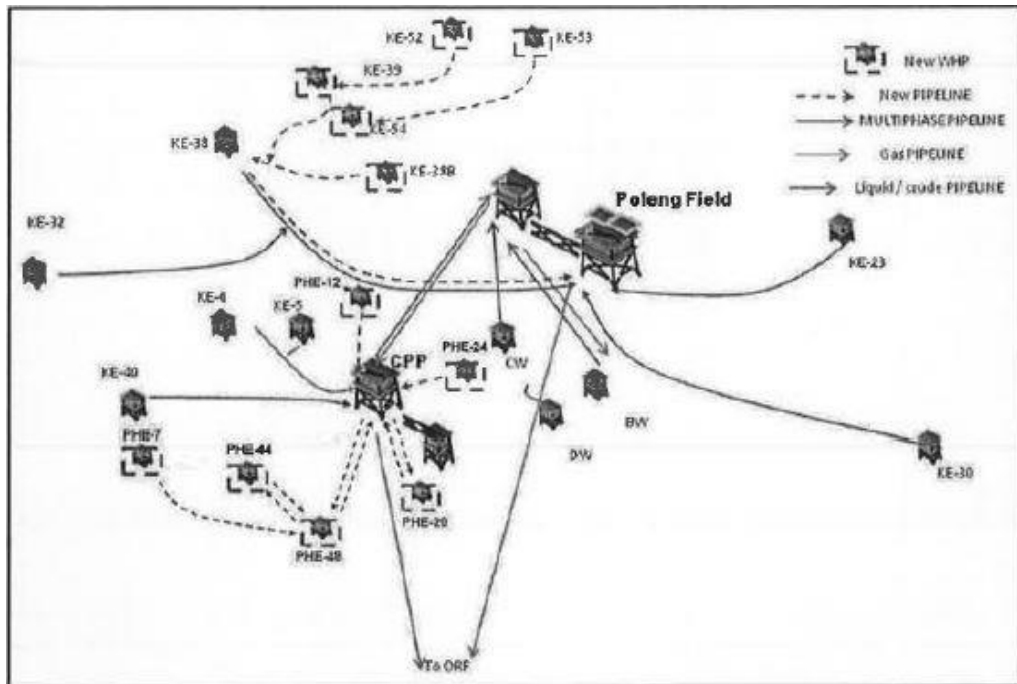
## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Eksplorasi minyak dan gas bumi semakin gencar dilakukan sebagai upaya untuk memenuhi kebutuhan manusia akan minyak dan gas sebagai sumber energi utama yang semakin meningkat. Kini Eksplorasi minyak dan gas bumi tidak lagi hanya dilakukan di daratan (*onshore*) saja, melainkan juga di laut (*offshore*). Perkembangan teknologi yang semakin canggih dimanfaatkan oleh industri migas untuk eksplorasi minyak dan gas bumi di laut dalam dimana hidrokarbon banyak dijumpai. Dalam produksi minyak dan gas bumi di tengah laut membutuhkan akomodasi untuk menyalurkan hasil produksi dari suatu titik distribusi ke titik distribusi lainnya. Jaringan pipa bawah laut merupakan salah satu alternative penyalur minyak dan gas yang banyak digunakan dalam dunia industri migas karna cukup ekonomis dan efisien.

*Subsea Pipeline* digunakan untuk sejumlah tujuan dalam perkembangan pemanfaatan sumber hidrokarbon bawah laut. Pemanfaatan jaringan pipa digunakan untuk mengalirkan minyak dan gas dianggap lebih praktis dan efektif dibanding dengan cara curah (Soegiono,2007).

Jaringan pipa bawah laut membentang dari *Central Processing Platform-2* menuju *Onshore Receiving Facility* (Gresik) merupakan jaringan pipa yang mendistribusikan fluida jenis gas. Jalur pipa ini memiliki panjang sekitar 65 km. Gambar 1.1 berikut menunjukkan beberapa fasilitas yang ada di *Field West Madura Offshore*.



**Gambar 1.1** Fasilitas Produksi *Field West Madura Offshore*.

Permasalahan yang timbul pada *offshore pipeline* yang karena lokasinya berada di dasar laut, adalah beban lingkungan (gaya arus dan gaya gelombang) yang mengenai pipa. Gaya-gaya tersebut dapat mengakibatkan pipa mengapung dan bergeser karena kondisinya yang tidak stabil. Selain itu, topografi dasar laut yang tidak semuanya rata akan memberikan ruang bebas antar pipa dengan *seabed* yang kemudian kondisi ini disebut dengan *free span*. Selain itu *free span* juga bisa disebabkan karna proses penggerusan dasar laut (*scouring*), dan juga akibat *crossing* dengan pipa yang sudah ada. Pipeline yang memiliki permukaan bebas tanpa ada penyangga akan mengalami beban berlebih serta dapat memungkinkan terjadinya *vortex* disekitar area pipa dioperasikan. Jika beban tersebut terjadi dalam kurun waktu yang lama akan mengakibatkan kegagalan pada pipeline (Pratomo, 2015).

Pada pipa yang mengalami *free span* partikel air yang melewati bawah pipa akan menyebabkan pusaran di daerah sekitar pipa. Pelepasan pusaran atau yg biasa disebut (*vortex shedding*) ini merupakan perubahan terhadap tekanan hidrodinamis pada pipa secara periodik. Perubahan tekanan hidrodinamis ini dapat menyebabkan pipa bergetar (Mouselli, 1981). Jika frekuensi *vortex shedding* yang terjadi lebih besar 0.7 kali dari frekuensi natural pipa, maka pipa akan mengalami osilasi atau

getaran yang menyebabkan kegagalan (Guo *et al* , 2005). Untuk mengurangi resiko terjadinya kegagalan akibat freespan bisa dilakukan dengan menambahkan support agar kestabilan pipa tetap terjaga. Dalam tugas akhir ini akan membahas tentang *freespan* yang mengalami bentangan melebihi batas atau dikategorikan kritis. Yang kemudian akan dilakukan perhitungan mitigasi peletakan supportnya.

## 1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Apakah pipa yang mengalami *free span* telah sesuai dengan kriteria analisis dinamis?
2. Apakah pipa telah memenuhi kriteria analisis statis?
3. Dimana posisi support yang seharusnya diberikan terhadap span yang tidak memenuhi kriteria analisis dinamis?

## 1.3 Tujuan

Dari permasalahan diatas, tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui apakah pipa yang mengalami *free span* telah sesuai dengan kriteria analisis dinamis *span*.
2. Mengetahui apakah pipa telah memenuhi kriteria analisis statis *span*.
3. Menghitung posisi peletakan support untuk span yang tidak memenuhi kriteria analisis dinamis.

## 1.4 Manfaat

Manfaat dari analisis yang dilakukan pada Tugas Akhir ini, diharapkan dapat mengetahui stabilitas vertical dan lateral dari pipa akibat dari adanya beban lingkungan. Selain hal itu karena beberapa segmen pipa yang dianalisis terdapat *freespan*, maka diharapkan dapat mengetahui stabilitas pipa yang mengalami *free span* sesuai dengan kriteria dinamis maupun kriteria statis *span*, sehingga dapat mengetahui apakah pipa tersebut membutuhkan *support* atau tidak.

## 1.5 Batasan Masalah

Pembatasan masalah ini digunakan untuk menghindari pembahasan yang melebar dan mempermudah perhitungan sehingga digunakan asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. Data yang digunakan merupakan data pipa gas yang menghubungkan antara *Central Processing Platform-2* dengan *Onshore Receiving Facility* (Gresik) sepanjang 65 km.
2. Perhitungan *dynamic analysis* dan *static analysis* hanya dilakukan pada lokasi span yang ditinjau.
3. Aliran fluida dalam pipa diasumsikan *steady*.
4. *Scouring* dan *marine growth* diabaikan.
5. Tumpuan pada ujung bentangan bebas di asumsikan *pinned-pinned*.
6. Analisis dinamis pada *free span* mengacu pada kode & standar DNV RP F105 tentang *free spanning pipelines*.
7. Analisis statis pada pipa mengacu pada kode & standar DNV OS F101 tentang *submarine pipeline systems*.

## 1.6 Sistematika Penulisan Laporan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan laporan ini adalah sebagai berikut :

### BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang penulisan, rumusan masalah yang di bahas dalam penelitian ini, tujuan yang ingin dicapai, manfaat penelitian serta batasan masalah dalam penelitian ini.

### BAB II : TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab ini disajikan beberapa penelitian sebelumnya yang terkait dan dijadikan referensi penulis dalam melakukan penelitian ini. Bab ini juga memuat landasan teori, persamaan serta standard/codes yang digunakan dalam penelitian ini.

### BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan tentang alur proses penelitian, mulai dari studi literatur, pengumpulan data, hingga proses analisis.

### BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini disajikan hasil penelitian yang diperoleh dalam bentuk Tabel dan gambar/grafik serta pembahasan dari tiap-tiap hasil yang diperoleh.

### BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi penarikan kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian guna menjawab rumusan masalah yang ada. Pada bab ini juga berisikan saran sebagai tindak lanjut dari penelitian ini kedepannya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Analisis free span pada jaringan pipa bawah laut yang telah beroperasi sangat penting dilakukan guna mengetahui perlukah adanya tindakan agar pipa tersebut terhindar dari kegagalan. Panjang bentangan bebas pipa tidak diperbolehkan melebihi batas izin yang ditentukan. Penelitian mengenai analisis *free span* pada pipa bawah laut banyak dilakukan pada beberapa *thesis* dan jurnal. Seperti penelitian yang dilakukan Arif (2012), membahas tentang *freespan* pipa bawah laut akibat adanya *scouring*. Dalam penelitian tersebut disebutkan bahwa bentangan bebas pada pipa sangat berbahaya terhadap konstruksi pipa yang nantinya mengakibatkan kerusakan. Bending diakibatkan beban statis yang timbul pada pipa. Sementara itu beban siklis berakibat pipa terkena beban dinamis. Fenomena vortex shedding ditimbulkan akibat beban dinamis, dimana disebabkan getaran/osilasi pada pipa.

Pratomo (2015), telah melakukan analisis tentang stabilitas pipa bawah laut akibat terjadinya bentangan bebas. Pada pipa bawah laut yang frekuensi *vortex shedding*nya mendekati frekuensi natural akan terjadi osilasi atau getaran. Dengan terjadinya osilasi maka dimungkinkan pipa akan mengalami kelelahan yang berdampak pada berkurangnya umur operasi. Untuk mengurangi resiko terjadinya kegagalan akibat *freespan* bisa dilakukan dengan menambahkan support agar kestabilan pipa tetap terjaga.

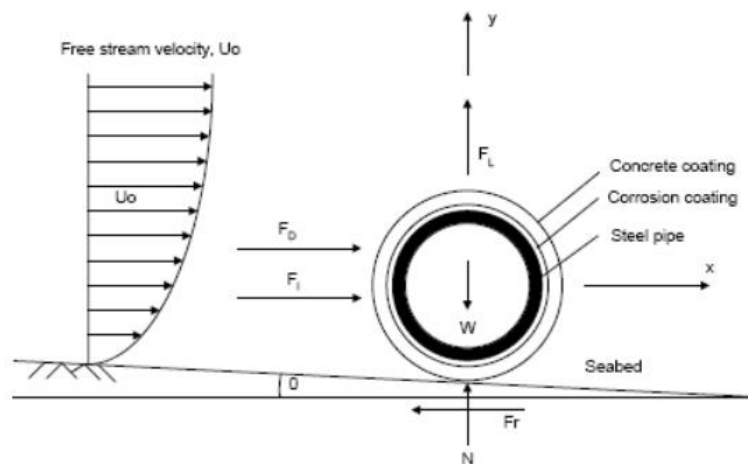
Tugas akhir ini mengacu pada analisis yang dilakukan oleh Syahroni (2018), yang membahas tentang analisis dinamis dilakukan pada *free span* yang mengalami VIV untuk mengetahui keadaan pipa dalam kondisi beroperasi yang rentan akan terjadinya kegagalan seperti kelelahan pipa. Pada bagian saran menyebutkan pada tugas akhir ini dapat dilakukan analisis stabilitas pipa bawah laut akibat adanya VIV yang kemudian saran ini penulis jadikan sebagai topik tugas akhir.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Stabilitas Pipa Bawah Laut

Stabilitas pipa bawah laut merupakan kemampuan kestabilan pipa di dasar laut, baik kestabilan dalam arah vertikal maupun arah horizontal. Kestabilan pipa bawah laut sangat dipengaruhi oleh gaya-gaya lingkungan yang bekerja pada pipa, berat pipa dalam air dan resistensi tanah di dasar laut.

Gaya lingkungan yang masuk ke dalam analisis kestabilan pipa bawah laut merupakan gabungan dari gaya-gaya hidrodinamika, seperti gaya seret (*drag force*), gaya inersia (*inertia force*), dan gaya angkat (*lift force*). Sedangkan resistensi tanah dasar laut merupakan gaya gesek yang terjadi antara pipa dengan permukaan tanah dasar laut. Berikut Gambar 2.1 merupakan ilustrasi gaya-gaya yang bekerja pada pipa bawah laut :



**Gambar 2.1** Diagram Gaya yang Bekerja pada Pipa di Dasar Laut

Sumber : *Offshore Pipeline Design, Analysis, and Method* (A.H.Mouselli)

#### 2.2.1.1 Stabilitas Vertikal Pipa dalam Air

Untuk menghindari pipa mengapung dalam air, berat pipa yang terendam harus memenuhi kriteria berikut :

$$\gamma_w \frac{b}{b + w_s} \leq 1 \quad \dots(2.1)$$

Keterangan :

$\gamma_w$  : *safety factor* = 1.1

B : *bouyancy* pipa

Ws : berat pipa terendam

### 2.2.1.2 Stabilitas Absolut Lateral

Metode ini memberikan kriteria absolut statis untuk keseimbangan statis pipa, dimana pipa tidak akan mengalami perpindahan lateral saat menahan beban hidrodinamika maksimum selama kondisi badai. Desain kriteria untuk metode *absolute stability* adalah sebagai berikut :

$$\gamma_{SC} \frac{F_y^* + \mu F_z^*}{\mu w_s + F_R} \leq 1.0 \quad \dots(2.2)$$

dan

$$\gamma_{SC} \frac{F_z^*}{w_s} \leq 1.0 \quad \dots(2.3)$$

Keterangan :

$\gamma_{SC}$  : *safety factor*

$F_y^*$  : beban hidrodinamis horizontal (gaya *drag* dan *inertia*)

$F_z^*$  : beban hidrodinamis vertikal (gaya angkat)

$\mu$  : koefisien friksi

$w_s$  : berat terendam pipa

Beban horizontal dan vertikal maksimal diperoleh dengan persamaan berikut:

$$F_y^* = r_{tot,y} \cdot \frac{1}{2} \rho_w \cdot D \cdot C_y^* (U^* + V^*)^2 \quad \dots(2.4)$$

$$F_z^* = r_{tot,z} \cdot \frac{1}{2} \rho_w \cdot D \cdot C_z^* (U^* + V^*)^2 \quad \dots(2.5)$$



Keterangan :

$r_{tot,y}$  : reduksi beban horizontal

$r_{tot,z}$  : reduksi beban vertikal

$\rho_w$  : densitas air

$D$  : diameter pipa

$C_y^*$  : koefisien beban horizontal

$g$  : koefisien beban vertikal

Koefisien  $C_y^*$  dan  $C_z^*$  terdapat pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 berikut:

**Tabel 2.1** Koefisien Beban Horizontal (DNV RP-F109, 2010)

$C_T^*$		$K^*$										
		2.5	5	10	20	30	40	50	60	70	100	$\geq 140$
$M^*$	0.0	13.0	6.80	4.55	3.33	2.72	2.40	2.15	1.95	1.80	1.52	1.30
	0.1	10.7	5.76	3.72	2.72	2.20	1.90	1.71	1.58	1.49	1.33	1.22
	0.2	9.02	5.00	3.15	2.30	1.85	1.58	1.42	1.33	1.27	1.18	1.14
	0.3	7.64	4.32	2.79	2.01	1.63	1.44	1.33	1.26	1.21	1.14	1.09
	0.4	6.63	3.80	2.51	1.78	1.46	1.32	1.25	1.19	1.16	1.10	1.05
	0.6	5.07	3.30	2.27	1.71	1.43	1.34	1.29	1.24	1.18	1.08	1.00
	0.8	4.01	2.70	2.01	1.57	1.44	1.37	1.31	1.24	1.17	1.05	1.00
	1.0	3.25	2.30	1.75	1.49	1.40	1.34	1.27	1.20	1.13	1.01	1.00
	2.0	1.52	1.50	1.45	1.39	1.34	1.20	1.08	1.03	1.00	1.00	1.00
	5.0	1.11	1.10	1.07	1.06	1.04	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	

**Tabel 2.2** Koefisien Beban Vertikal (DNV RP-F109, 2010)

$C_z^*$		$K^*$										
		$\leq 2.5$	5	10	20	30	40	50	60	70	100	$\geq 140$
$M^*$	0.0	5.00	5.00	4.85	3.21	2.55	2.26	2.01	1.81	1.63	1.26	1.05
	0.1	3.87	4.08	4.23	2.87	2.15	1.77	1.55	1.41	1.31	1.11	0.97
	0.2	3.16	3.45	3.74	2.60	1.86	1.45	1.26	1.16	1.09	1.00	0.90
	0.3	3.01	3.25	3.53	2.14	1.52	1.26	1.10	1.01	0.99	0.95	0.90
	0.4	2.87	3.08	3.35	1.82	1.29	1.11	0.98	0.90	0.90	0.90	0.90
	0.6	2.21	2.36	2.59	1.59	1.20	1.03	0.92	0.90	0.90	0.90	0.90
	0.8	1.53	1.61	1.80	1.18	1.05	0.97	0.92	0.90	0.90	0.90	0.90
	1.0	1.05	1.13	1.28	1.12	0.99	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	2.0	0.96	1.03	1.05	1.00	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	5.0	0.91	0.92	0.93	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
10	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	

## 2.2.2 Beban Lingkungan

Beban lingkungan merupakan beban yang bekerja pada pipa karena adanya kondisi lingkungan. Untuk pipa bawah laut beban yang bekerja yaitu beban gelombang dan beban arus. Beban lingkungan ini bersifat acak sehingga data yang digunakan adalah data kala ulang (*return period*).

### 2.2.2.1 Gelombang

Gaya-gaya hidrodinamika yang bekerja pada struktur lepas pantai belum bisa dihitung secara eksak, oleh karena itu digunakan metode penyederhanaan untuk mendekati perhitungan gaya hidrodinamik pada struktur lepas pantai tersebut. Pendekatan ini harus bisa menggambarkan lokasi dimana pipa diletakkan.

Gelombang laut acak dalam kurun waktu pendek dapat dijelaskan dengan spektra gelombang. Spektra Pierson-Moskowitz (PM) dan JONSWAP merupakan spektra yang sering digunakan. Spektra PM ditujukan untuk laut terbuka, sedangkan spektra JONSWAP merupakan formulasi yang dimodifikasi dari spektra PM untuk laut dengan batas fetch.

Pada tugas akhir ini karena lokasi peletakan pipa berada pada laut tertutup maka digunakan spektra JONSWAP. Adapun persamaan spectra JONSWAP dijelaskan sebagai berikut :

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \gamma^{\exp\left(-0.5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma \cdot \omega_p}\right)^2\right)} \quad \dots(2.6)$$

dengan :

$\alpha$  : konstanta *Generalized Phillips*

$$\alpha = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega_p^4}{g^2} (1 - 0.287 \ln \gamma) \quad \dots(2.7)$$

$\sigma$  : *Parameter lebar spektra*

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0.09 & \text{jika } \omega > \omega_p \end{cases} \quad \dots(2.8)$$

$\gamma$  : faktor *peak – enhancement*

$$\gamma = \begin{cases} 5.0 & \varphi \leq 3.6 \\ \exp(5.75 - 1.15\varphi) & 3.6 < \varphi < 5.0; \quad \varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \\ 1.0 & \varphi \geq 5.0 \end{cases} \quad \dots(2.9)$$

Keterangan :

$S_{\eta\eta}(\omega)$  : Spektrum JONSWAP

$g$  : Percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

$\omega$  : Frekuensi gelombang (rad/s)

$\omega_p$  : Frekuensi puncak gelombang (rad/s)

Spektra kecepatan gelombang pada dasar laut  $S_{UU}(\omega)$  ditentukan dengan transformasi gelombang pada permukaan menggunakan persamaan berikut :

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) S_{\eta\eta}(\omega) \quad \dots(2.10)$$

dengan :

$G(\omega)$ : konstanta (*transfer function*)

$$G(\omega) = \frac{\omega}{\sinh(k d)} \quad \dots(2.11)$$

$\omega$  : frekuensi gelombang, diperoleh dari iterasi persamaan  $\omega^2/g$

$$\frac{\omega^2}{g} = k \tanh(k d) \quad \dots(2.12)$$

Keterangan :

$g$  : Percepatan gravitasi

$k$  : Angka gelombang

$d$  : Kedalaman laut

Momen spektra pada orde ke – n diberikan seperti persamaan sebagai berikut:

$$M_n = \int_0^{\infty} \omega^n S_{UU}(\omega) d\omega \quad \dots(2.13)$$

dengan :

$M_n$  : momen *spectra*

$\omega$  : frekuensi gelombang

Kecepatan aliran gelombang signifikan pada pipa diberikan pada persamaan berikut:

$$U_s = 2\sqrt{M_0} \quad \dots(2.14)$$

dengan :

$U_s$  : Kecepatan aliran gelombang signifikan pada seabed

$M_0$  : momen *spectra* pertama

*Mean zero up-crossing period* dari osilasi aliran pada pipa diberikan pada persamaan sebagai berikut :

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \quad \dots(2.15)$$

dengan :

$T_u$  : *Mean zero up – crossing period*

$M_0$  : momen *spectra* pertama

$M_2$  : momen *spectra* kedua

Dengan asumsi teori gelombang linear,  $T_n$  diberikan pada persamaan berikut :

$$T_n = \sqrt{\frac{d}{g}} \quad \dots(2.16)$$

dengan :

$T_n$  : *reference period*

$d$  : kedalaman laut

$g$  : percepatan gravitasi

Rasio antara *single oscillation velocity* dan *spectral velocity amplitude* pada osilasi  $\tau$  adalah diberikan pada persamaan berikut :

$$k_U = \frac{U^*}{U_s} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{2 \cdot \ln \tau} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln \tau}} \right) \quad \dots(2.17)$$

dengan :

$k_U$  : rasio single oscillation velocity & spectral velocity amplitude

$\tau$  : jumlah osilasi pada keadaan bada

Dengan adanya *wave directional and spreading effect*, maka reduksi terhadap  $U^*$  diberikan pada persamaan berikut :

$$U_w = R_D U^* \quad \dots(2.18)$$

dengan :

$U_w$  : *single oscillation velocity* setelah reduksi

$R_D$  : *reduction factor*

$U^*$  : *single oscillation velocity*

Sedangkan rasio antara *single oscillation period* dan *mean zero-up crossing period* diberikan pada persamaan berikut :

$$k_T = \frac{T^*}{T_u} = \begin{cases} k_t(k_t - 1) T_n/T_u & \text{for } T_n/T_u \leq 0.2 \\ 1 & \text{for } T_n/T_u > 0.2 \end{cases} \quad \dots(2.19)$$

dengan :

$$k_t = \begin{cases} 1.25 & \text{for } \gamma = 1.0 \\ 1.21 & \text{for } \gamma = 3.3 \\ 1.17 & \text{for } \gamma = 5.0 \end{cases}$$

$k_T$  : rasio *single oscillation period & mean zero up crossing period*

$T_n$  : *reference period*

$T_u$  : *mean zero – up crossing period*

$\gamma$  : *peakness parameter*

#### 2.2.2.2 Arus

Arus steady pada pipa mempunyai keterkaitan dengan,

- ✓ Pasang surut
- ✓ Angin
- ✓ Gelombang akibat badai dan densitas

Kecepatan arus yang melewati pipa diberikan pada persamaan berikut :

$$U_C = R_C \cdot U_{(z_r)} \frac{(\ln(z) - \ln(z_0))}{(\ln(z_r) - \ln(z_0))} \quad \dots(2.20)$$

dimana :

$U_C$  : Kecepatan arus pada level pipa (m/s)

$U_{(z_r)}$  : Kecepatan arus pada ketinggian referensi (m/s)

$R_C$  : Faktor reduksi kecepatan arus

$z_r$  : Elevasi referensi

$$R_C = \sin(\theta_{rel}) \quad \dots(2.21)$$

$(\theta_{rel})$  : sudut datang aliran arus terhadap pipa

$$z = e + \frac{D_t}{2} \quad \dots(2.22)$$

$z$  : Elevasi dasar laut

$z_0$  : Parameter kekasaran bawah laut (untuk nilai parameter sesuai DNV RP F109, ditampilkan pada Tabel 2.3 berikut :

**Tabel 2.3** Seabed Roughness (DNV RP F109, 2010)

Seabed	Grain size $d_{50}$ [mm]	Roughness $z_0$ [m]
Silt and clay	0.0625	$\approx 5 \cdot 10^{-6}$
Fine sand	0.25	$\approx 1 \cdot 10^{-5}$
Medium sand	0.5	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$
Coarse sand	1.0	$\approx 1 \cdot 10^{-4}$
Gravel	4.0	$\approx 3 \cdot 10^{-4}$
Pebble	25	$\approx 2 \cdot 10^{-3}$
Cobble	125	$\approx 1 \cdot 10^{-2}$
Boulder	500	$\approx 4 \cdot 10^{-2}$

### 2.2.2 Massa Efektif Pipa

Massa efektif pipa merupakan penjumlahan dari masa pipa, massa konten pipa, massa tambah dan massa selimut beton pipa (concrete). Menurut Bai dan Bai (2005), persamaan massa efektif pipa dijelaskan pada persamaan berikut :

$$m_e = m_{str} + m_c + m_a \quad \dots(2.23)$$

Dimana

$$m_e = \text{Massa efektif} \quad (\text{kg/m})$$

$$m_{str} = \text{Massa struktur pipa (termasuk coating)} \quad (\text{kg/m})$$

$$m_c = \text{Massa Konten} \quad (\text{kg/m})$$

$$m_a = \text{Massa tambah} \quad (\text{kg/m})$$

#### a. Massa Struktur Pipa

Massa struktur pipa merupakan penjumlahan dari massa pipa, massa lapisan anti korosi dan massa selimut beton (*concrete*). Rumus perhitungan massa struktur dijabarkan pada persamaan berikut :

$$m_{str} = m_{st} + m_{cc} + m_{conc} \quad \dots(2.24)$$

$$m_{st} = \pi \frac{(Do^2 - Di^2)}{4} \rho_{st} \quad \dots(2.25)$$

$$m_{cc} = \pi \frac{(Dcc^2 - Do^2)}{4} \rho_{cc} \quad \dots(2.26)$$

$$m_{conc} = \pi \frac{(Dwc^2 - Do^2)}{4} \rho_{conc} \quad \dots(2.27)$$

Dimana

$$m_{str} = \text{Massa struktur pipa} \quad (\text{kg/m})$$

$$m_{st} = \text{Massa pipa baja} \quad (\text{kg/m})$$

$$m_{cc} = \text{Massa lapisan anti korosi} \quad (\text{kg/m})$$

$$m_{conc} = \text{Massa selimut beton} \quad (\text{kg/m})$$

$$\rho_{st} = \text{Massa jenis baja} \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$\rho_{cc} = \text{Massa jenis lapisan anti korosi} \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$\rho_{conc} = \text{Massa jenis selimut beton} \quad (\text{kg/m}^3)$$

### b. Massa Konten Pipa

$$m_c = \pi \frac{(Di^2)}{4} \rho_c \quad \dots(2.28)$$

Dimana

$$\rho_{cc} = \text{Massa jenis konten pipa} \quad (\text{kg/m}^3)$$

### c. Massa Tambah

Menurut DNV RP-F105 massa tambah dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$m_a = \pi \frac{(Di^2)}{4} \cdot \rho_w \cdot C_a \quad \dots(2.29)$$

Dimana

$$\rho_w = \text{Massa jenis air laut} \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$C_a = \text{Koefisien massa tambah}$$

Untuk koefisien massa tambah dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut :

$$C_a = \begin{cases} 0.68 + \frac{1.6}{1 + 5 \left( \frac{e}{Dt} \right)} & \text{Untuk } e/Dt < 0.8 \\ 1 & \text{Untuk } e/Dt \geq 0.8 \end{cases} \quad \dots(2.30)$$

Dimana

$$e = \text{Jarak antara seabed dan pipa}$$

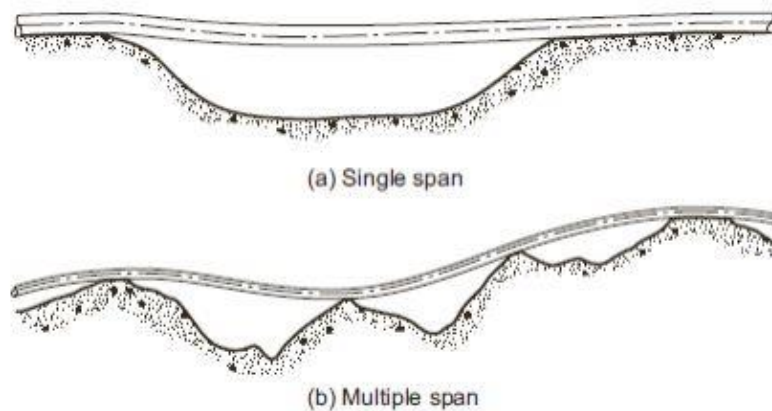
$$e/Dt = \text{Rasio } gap \text{ span dengan diameter total pipa}$$

### 2.2.3 Free Span

Konfigurasi pipa di dasar laut tergantung dari profil topografi dasar laut tempat pipa diletakkan, jenis tanah, tegangan sisa, kekakuan pipa, serta berat terendahnya. Pipa cenderung membentuk span atau bentangan dari pada



mengikuti topografi dasar laut karena topografinya yang sangat tidak teratur atau kasar. Span pada pipa dapat terbentuk karena penyimpangan selama instalasi, scouring (penggerusan) dan gerakan horizontal pipa selama operasi. Jenis span pada *pipeline* tidak hanya bentangan tunggal (*single span*), namun juga beberapa bentangan (*multi span*). *Multi span* yang berdekatan dapat saling berpengaruh atau saling berinteraksi (Bai, 2014). Berikut ditampilkan tipe-tipe span pada Gambar 2.2 di bawah ini

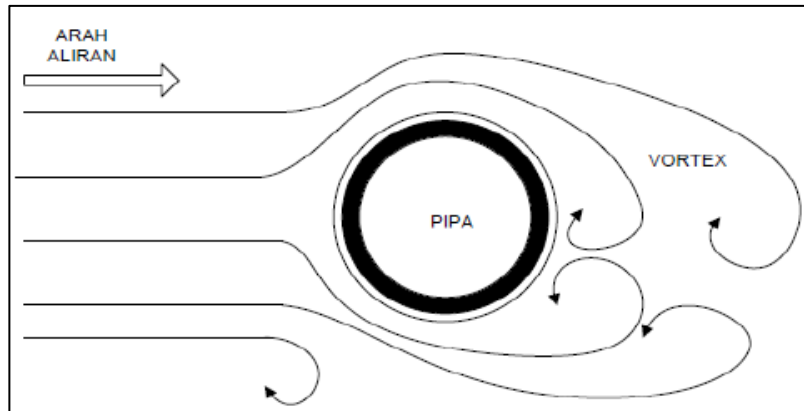


**Gambar 2.2** Tipe Span

Sumber: *Bai dan Bai, 2014*

#### **2.2.4 Vortex Induced Vibration (VIV)**

Ketika struktur ramping seperti pipa terkena beban gelombang dan arus laut, struktur tersebut akan mengalami getaran yang cukup signifikan. Selain akibat adanya beban lingkungan, partikel air yang mengalir disekitar pipa yang mengalami *free span* akan mengakibatkan pusaran (*vortices*). Pusaran tersebut terbentuk karena turbulensi dan ketidakstabilan aliran di belakang pipa. Pelepasan pusaran (*vortex shedding*) ini bisa menimbulkan getaran yang biasa disebut dengan *vortex induced vibration* (VIV). Berikut pada Gambar 2.3 ditampilkan ilustrasi *vortex induced vibration* pada pipa bawah laut:



**Gambar 2.3** Ilustrasi *Vortex Induced Vibration* pada Pipa

Sumber : Guo, 2005

#### 2.2.4.1 Kriteria Aliran

VIV yang terbentuk di sekitar pipa diklasifikasikan menjadi 3 kriteria sesuai dengan *current flow velocity* rasionya, dimana dirumuskan :

$$\alpha = \frac{U_{C,100 \text{ tahun}}}{U_{C,100 \text{ tahun}} + U_{W,1 \text{ tahun}}} \quad \dots(2.31)$$

dengan :

$\alpha$  : *current flow velocity*

$U_w$  : Kecepatan signifikan gelombang *induced*

$U_c$  : Kecepatan Arus (m/s)

Untuk kriteria Aliran menurut DNV RP F105, ditampilkan pada Tabel 2.4 berikut :

**Tabel 2.4** Kriteria Aliran (DNV RP F105, 2006)

$\alpha < 0.5$	<p><b>Gelombang Dominan (<math>U_w &gt; U_c</math>)</b></p> <p><b><u>Arah Inline</u> :</b> Pembebanan arah <i>In-line</i> dihitung berdasarkan persamaan Morrison. <i>In-line</i> VIV akibat <i>vortex shedding</i> diabaikan.</p> <p><b><u>Arah crossflow</u> :</b> Beban arah <i>cross-flow</i> dominan disebabkan oleh <i>vortex shedding</i></p>
----------------	--

$0.5 < \alpha < 0.8$	<p><b>Gelombang Dominan (<math>U_w &lt; U_c</math>)</b></p> <p><b><u>Arah Inline</u></b> :  Pembebanan arah <i>In-line</i> dihitung berdasarkan persamaan Morrison. <i>In-line</i> VIV akibat <i>vortex shedding</i> berkurang dengan keberadaan gelombang.</p> <p><b><u>Arah crossflow</u></b> :  Beban Cross-flow dominan disebabkan oleh <i>vortex shedding</i> asimetris dan menunjukkan situasi arus yang dominan.</p>
$\alpha > 0.8$	<p><b>Gelombang Dominan (<math>U_w \gg U_c</math>)</b></p> <p><b><u>Arah Inline</u></b> :  Pembebanan <i>In-line</i> berdasarkan <i>steady drag component</i> dan <i>oscillatory component</i> akibat <i>vortex shedding</i>. Pembebanan <i>In-line</i> dihitung berdasarkan persamaan Morrison diabaikan.</p> <p><b><u>Arah crossflow</u></b> :  Pembebanan arah <i>cross-flow</i> secara siklik akibat <i>vortex shedding</i>, dan menunjukkan situasi arus murni yang dominan.</p>

#### 2.2.4.2 Reynold Number

Persamaan *reynold number* diberikan sebagai berikut :

$$R_e = \frac{(U_{tot} \cdot D_t)}{\nu} \quad \dots(2.32)$$

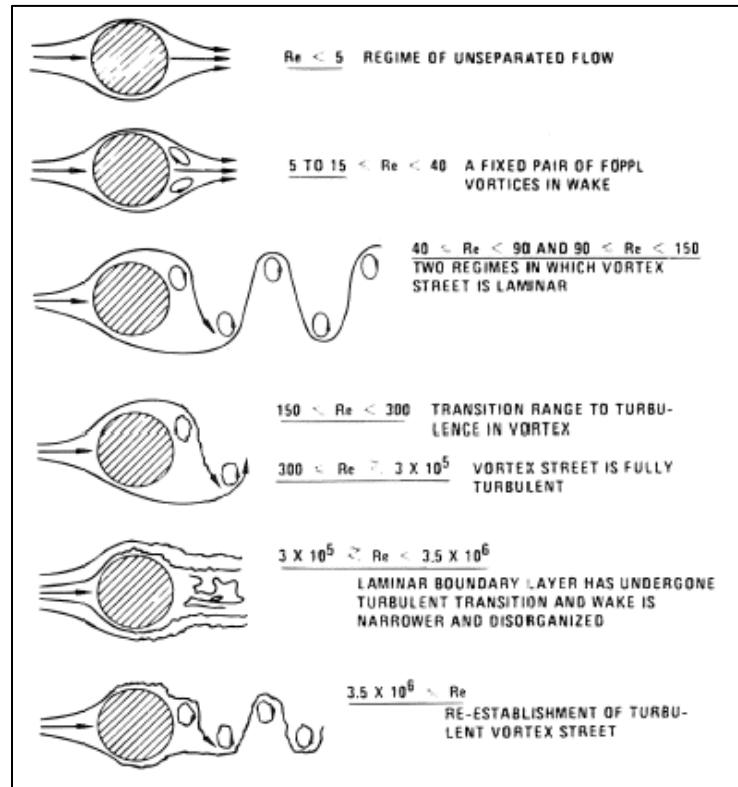
dengan :

$U_{tot}$  : kecepatan total aliran (m/s)

$\nu$  : viskositas kinematis air (m<sup>2</sup>/s), [1.5 x 10<sup>-6</sup> (m<sup>2</sup>/s)]

$D_t$  : diameter luar pipa (m)

Selain itu, dari hasil perhitungan bilangan Reynolds dapat mempresentasikan aliran yang terjadi di belakang struktur *pipeline*. Bentuk aliran yang dihasilkan berbeda-beda, tergantung pada nilai Re yang didapat. Untuk bentuk aliran berdasarkan bilangan Reynolds ditampilkan pada Gambar 2.4 berikut :



**Gambar 2.4** Bentuk Aliran Fluida Pada Silinder

Dari gambar di atas didapat penjelasan mengenai terbentuknya *vortex* di belakang silinder sebagai berikut :

- Nilai *Reynold Number*  $< 5$ , aliran yang melewati silinder belum membentuk aliran *vortex*.
- Nilai *Reynold Number*  $5 - 15 < Re < 40$ , aliran yang melewati silinder akan membentuk *foppl vortices*.
- Nilai *Reynold Number*  $40 < Re < 90$  dan  $90 < Re < 150$ , terbentuk dua daerah aliran *vortex* pada bagian sisi kanan dan kiri dari silinder dimana sifat dari *vortex* yang terbentuk adalah laminar.
- Nilai *Reynold Number*  $150 < Re < 300$ , merupakan rentang terjadinya perubahan aliran menjadi turbulen,  $300 < Re < 3 \times 10^5$  aliran *vortex* sepenuhnya turbulen.
- Nilai *Reynold Number*  $3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$ , *laminar boundary condition* membentuk atau memisahkan aliran. Aliran turbulen bertransisi menjadi aliran lebih sempit dan tidak teratur.
- Nilai *Reynold Number*  $Re > 3.5 \times 10^6$ , aliran *vortex* yang terjadi pada belakang silinder akan menjadi banyak dan semakin tidak teratur.

### 2.2.4.3 Stability Parameter

Menurut Guo dkk. (2005), salah satu parameter penting dalam mengatur gerakan akibat *vortex* adalah *Stability parameter*. Parameter ini digunakan untuk menentukan respon maksimal akibat beban hidrodinamis. Persamaan *stability parameter* adalah sebagai berikut :

$$K_s = \frac{4\pi m_e \zeta_T}{\rho D^2} \quad \dots(2.33)$$

dengan :

$K_s$  : *parameter stability*

$M_e$  : massa efektif pipa (kg/m)

$\zeta_T$  : damping ratio

$\rho$  : *density air laut* (kg/m<sup>3</sup>)

$D$  : diameter luar pipa (m)

Di dalam DNV RP F105 (2006) total modal damping ratio terdiri dari:

- Structural Damping ( $\zeta_{str}$ ), merupakan damping yang diakibatkan oleh gaya gesekan internal material pipa. Jika tidak tersedia data yang detail, structural damping dapat diasumsikan sebesar 0.05. Jika terdapat concrete, maka geser pada permukaan selimut beton dan corrosion coating dapat meningkatkan damping menjadi 0.01-0.02
- Hydrodynamic Damping ( $\zeta_h$ ) untuk VIV yang terletak di daerah lockin nilainya dapat dianggap 0.
- Soil damping ( $\zeta_{soil}$ ), untuk tujuan screening bernilai 0.01.
- Di dalam DNV RP F105, stability parameter ini dibagi dengan safety factor untuk meningkatkan keamanan.

### 2.2.4.4 Reduced Velocity ( $V_R$ )

Persamaan *Reduced Velocity* dijelaskan sebagai berikut:

$$V_R = \frac{U_C \cdot U_W}{f_n \cdot D_t} \quad \dots(2.34)$$

$U_C$  : kecepatan normal arus pada pipa (m/s)

$U_W$  : kecepatan aliran gelombang signifikan yang mengenai pipa (m/s)

$f_n$  : frekuensi natural (Hz)

$D_t$  : diameter luar pipa (m)

#### 2.2.4.5 Keulegan-Carpenter Number (KC)

Persamaan *Keulegan-Carpenter Number* dijelaskan sebagai berikut:

$$KC = \frac{U_W}{f_n \cdot D_t} \quad \dots(2.35)$$

$f_W$  : frekuensi gelombang signifikan (Hz)

#### 2.2.4.6 Frekuensi Vortex Shedding

Frekuensi vortex shedding sangat berhubungan dengan diameter pipa dan kecepatan aliran. Jika frekuensi *vortex shedding* mendekati frekuensi natural bentangan bebas pipa, maka resonansi akan terjadi dan pipa mengalami getaran. Pipa dapat mengalami kegagalan akibat *vortex induced vibration*. Kegagalan pipa ini dapat dicegah jika frekuensi *vortex shedding* memiliki perbedaan cukup besar dengan frekuensi natural pipa (Mouselli, 1981). Nilai frekuensi *vortex shedding* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini :

$$f_s = \frac{S \cdot U_C}{D} \quad \dots(2.36)$$

dengan :

$F_s$  : Frekuensi *vortex shedding*

$S$  : *Strouhal Number* (0.2 untuk silinder bulat)

$U_C$  : Kecepatan Arus (m/s)

$D$  : Diameter luar pipa

#### 2.2.5 Gaya Hidrodinamis

Pipa bawah laut didesign harus bisa menahan gaya-gaya yang bekerja di dasar laut dimana pipa itu meletak. Berat pipa yang tenggelam harus lebih besar

dari gaya-gaya yang bekerja di sekitarnya. Gaya hidrodinamis yang bekerja di sekitar pipa antara lain gaya angkat (*lift*), gaya *drag* dan gaya inerti.

### 2.2.5.1 Gaya Lift

Gaya Lift atau angkat adalah gaya yang bekerja tegak lurus terhadap arah rambat gelombang atau arus. Gaya ini muncul akibat adanya aliran di atas pipa yang memiliki kecepatan lebih besar dibandingkan aliran di bawah pipa, tekanan aliran yang muncul di atas pipa akan lebih kecil dibandingkan tekanan aliran di bawah pipa. Perbedaan tekanan ini akan mengakibatkan pipa terangkat. Besar gaya angkat dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D_t \cdot C_L \cdot (U_w + U_C)^2 \quad \dots(2.37)$$

dimana,

$F_L$  : Gaya Lift (N/m)

$\rho_w$  : Massa jenis air laut (Kg/m<sup>3</sup>)

$D_t$  : Diameter total pipa (coating)(m)

$C_L$  : koefisien gaya lift (Persamaan 2.37)

$U_w$  : kecepatan partikel air akibat gelombang (m/s<sup>2</sup>)

$U_C$  : kecepatan arus laut (m/s<sup>2</sup>)

### 2.2.5.2 Gaya Drag

Gaya *drag* adalah gaya yang bekerja dalam arah horizontal. Berkaitan dengan kecepatan akibat arus *steady* yang dibangkitkan oleh gelombang. Kecepatan arus total (kecepatan arus akibat gelombang dan kecepatan arus pada elevasi pipa) mempengaruhi nilai dari gaya drag. Besar gaya drag dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D_t \cdot C_D \cdot (U_w + U_C)^2 \quad \dots(2.38)$$

Dimana:

$F_D$  : gaya drag (N/m)

$\rho_w$  : Massa jenis air laut (Kg/m<sup>3</sup>)

$D_t$  : Diameter total pipa (coating)(m)

$C_D$  : koefisien drag (Persamaan 2. )

$U_w$  : kecepatan partikel air akibat gelombang ( $m/s^2$ )

$U_c$  : kecepatan arus laut ( $m/s^2$ )

Koefisien drag pada DNV RP F105 diberikan pada persamaan berikut:

$$C_D = C_D^0(k/D_t) \cdot \psi_{KC,\alpha}^{CD} \cdot \psi_{proxi}^{CD} \cdot \psi_{trench}^{CD} \cdot \psi_{VIV}^{CD} \quad \dots(2.39)$$

Parameter koefisien drag dijelaskan berikut ini:

**a. Koefisien Drag Dasar untuk Aliran Steady ( $C_D^0$  (k / Dt))**

Koefisien drag dasar merupakan fungsi kekasaran permukaan pipa  $k/Dt$ .

Ketentuan koefisien drag dasar dijelaskan pada persamaan berikut :

$$C_D^0\left(\frac{k}{Dt}\right) = \begin{cases} 0,65 & ; \frac{k}{Dt} < 10^{-4} \text{ (smooth)} \\ 0,65\left(\frac{29}{13} + \frac{4}{13} \log_{10}\left(\frac{k}{Dt}\right)\right) & ; 10^{-4} < \frac{k}{Dt} < 0 \\ 1,05 & ; \frac{k}{Dt} < 10^{-2} \text{ (rough)} \end{cases} \quad \dots(2.40)$$

$k$  : kekasaran permukaan pipa

$Dt$  : Diameter total pipa (coating)(m)

Untuk kekasaran permukaan pipa ditampilkan pada Tabel 2.5 berikut:

**Tabel 2.5** Kekasaran Permukaan Pipa (DNV RP F105, 2006)

Permukaan Pipa	k (meter)
<i>Steel, surface</i>	$10^{-6}$
<i>Steel, un-coated</i>	10-5
<i>Concrete</i>	1/300
<i>Marine Growth</i>	1/200 → 1/20

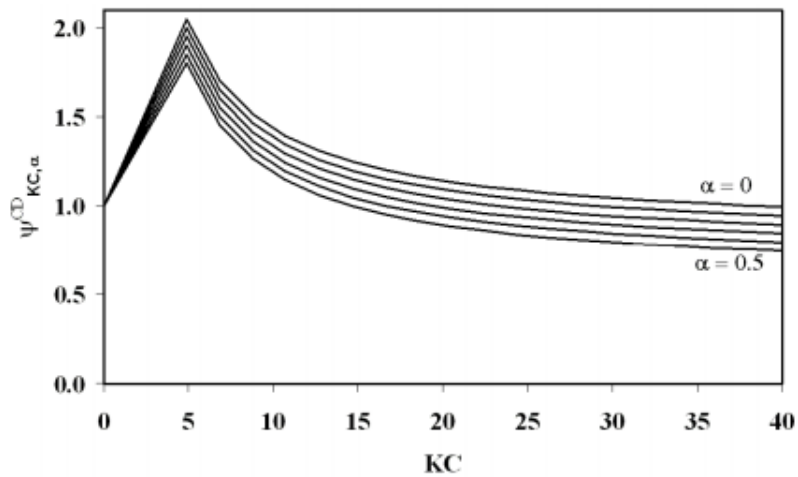


**b. Faktor Koreksi untuk Aliran *Unsteady* ( $\Psi_{KC,\alpha}^{CD}$ )**

Faktor koreksi ini digunakan untuk mempertimbangkan efek *unsteadiness* dari aliran fluida, termasuk efek bilangan *Keulegan Carpenter* dan rasio aliran arus. Ketentuan ( $\Psi_{KC,\alpha}^{CD}$ ) dijelaskan pada persamaan dan Gambar 2.5 berikut:

$$\Psi_{KC,\alpha}^{CD} = \begin{cases} 0,85 + \frac{6}{KC} - \frac{\alpha}{2} & ; \alpha \leq 0.5 \\ 0,6 + \frac{6}{KC} & ; \alpha \leq 0.5 \end{cases} \quad 5 < KC < 4 \quad \dots(2.41)$$

**Gambar 2.5** Grafik  $\Psi_{KC,\alpha}^{CD}$  untuk  $KC < 5$  (DNV RP F105, 2006)



Dimana,

$KC$  : *Keulegan Carpenter Number*

Untuk  $KC > 40$ , komponen  $6/KC$  pada persamaan di atas bernilai 0.15. Beban *drag* seringkali diperhitungkan dalam hal ini untuk nilai  $KC$  kecil dan dapat diinterpolasikan untuk melengkapi  $KC < 5$ .

**c. Faktor Koreksi Perkiraan Dasar Laut**

Ketentuan faktor koreksi perkiraan dasar laut dijelaskan pada persamaan berikut:

$$\psi_{proxi}^{CD} = \begin{cases} 0,9 + \frac{0,5}{1 + 5 \frac{e}{Dt}} - \frac{\alpha}{2} & ; \text{untuk } \frac{e}{Dt} \leq 0.8 \\ 1 & ; \text{lainnya} \end{cases} \quad \dots(2.42)$$

#### d. Faktor Koreksi Akibat Pengaruh *Trench*

Ketentuan faktor koreksi akibat *trench* dijelaskan pada persamaan berikut:

$$\psi_{trench}^{CD} = 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{\Delta}{Dt} \quad \dots(2.43)$$

Dimana  $\Delta/Dt$  merupakan kedalaman relative *trench*, dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\frac{\Delta}{Dt} = \frac{1.25d - e}{D} ; 0 \leq \frac{\Delta}{Dt} \leq 1 \quad \dots(2.44)$$

$e$  : jarak pipa dengan *seabed* (*gap*)

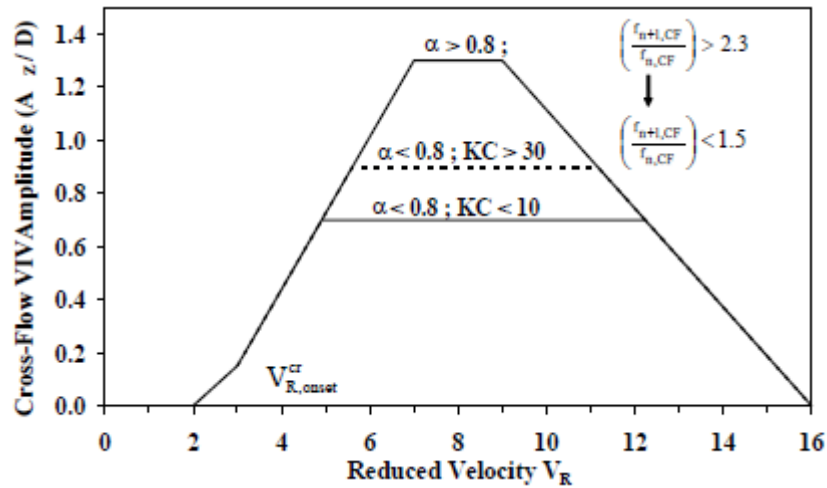
Jika pipa meletak di atas *seabed* dan tidak di *trenching* maka nilai  $\Delta/Dt = 0$ .

#### e. Faktor Amplifikasi Akibat Getaran *Cross-Flow*

Merupakan faktor tambahan karena pipa mengalami getaran crossflow. Ketentuan amplifikasi akibat getaran *cross-flow* dijelaskan pada persamaan berikut:

$$\psi_{VIV}^{CD} = 1 + 1.043 \sqrt{2} \frac{Az}{Dt} \quad \dots(2.45)$$

Dimana  $Az/Dt$  merupakan amplitude VIV *crossflow*, ditentukan dengan diagram pada Gambar 2.6 berikut :



Gambar 2.6 Basic Cross-Flow Response Model (DNV RP F105,2006)

### 2.2.5.3 Gaya Inertia

Beban siklis akibat gelombang akan mengurangi atau menambah kecepatan air. Pipa akan memberikan gaya untuk menolah perubahan kecepatan partikel air yang bekerja pada pipa. Besar gaya inersia dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$F_I = \frac{\pi}{4} \cdot \rho_w \cdot D_t \cdot C_M \cdot a_n \quad \dots(2.46)$$

Dimana,

$F_I$  : Gaya Inersia (N/m)

$\rho_w$  : Massa jenis air laut ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_M$  : Koefisien gaya inersia

$D_t$  : Diameter total pipa (coating)(m)

$a_n$  : Percepatan partikel air ( $\text{m/s}^2$ )

### 2.2.6 Analisis Dinamis

Pipa yang terletak didasar laut akan terkena beban hidrodinamis baik akibat gelombang maupun arus. Pada pipa yang mengalami *free span*, beban hidrodinamis dan aliran partikel yang mengalir di sekitar pipa bisa menimbulkan pusaran (*vortices*). Pelepasan pusaran (*vortex shedding*) ini bisa menimbulkan getaran yang biasa disebut dengan *vortex induced vibration* (VIV). Getaran yang

terjadi secara terus menerus bisa mengakibatkan berkurangnya umur pipa hingga keruntuhan pada struktur pipa.

Sebelum menghitung frekuensi natural dari pipeline, diperlukan beberapa variable pendukung seperti *Concrete Stiffness Factor* (CSF), Panjang Span Efektif ( $L_{eff}$ ), *Effective Axial Force* ( $S_{eff}$ ) *Critical Buckling* ( $P_{cr}$ ), dan Defleksi.

### 2.2.6.1 *Boundary Condition*

Untuk melakukan analisis *free span*, diharuskan untuk menentukan kondisi peletakan dari *free span* yang ditinjau. Dalam hal ini DNV GL RP F105 telah memberikan 3 macam kondisi peletakan sesuai dengan teori pembebanan. Berikut ini adalah keterangan penggunaan dari 3 kondisi peletakan.

- *Pinned-pinned*: Digunakan untuk *span* yang masing – masing ujungnya tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-line* & *cross-flow* terhadap arah aliran arus, tetapi masih diperbolehkan berotasi terhadap sumbu pipa tersebut.
- *Fixed-fixed*: Digunakan untuk *span* yang masing – masing ujungnya tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-line* dan *cross-flow* terhadap arah aliran arus, tetapi masih diperbolehkan berotasi terhadap sumbu pipa tersebut.
- *Pinned-fixed*: Digunakan untuk *span* yang salah satu ujungnya tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-line* dan *cross-flow* terhadap arah aliran arus serta rotasi terhadap sumbu pipanya, sedangkan ujung yang lain masih diperbolehkan berotasi terhadap sumbu pipanya.

*Boundary condition coefficient* (C1-C6) ditentukan dalam DNV RP F105 yang disajikan pada Tabel 2.6 berikut:

**Tabel 2.6** Koefisien *Boundary condition* (DNV RP F105, 2006)

	<i>Pinned-pinned</i> <sup>(2)</sup>	<i>Fixed-fixed</i> <sup>(3)</sup>	<i>Single Span on seabed</i>
C <sub>1</sub>	1.57	3.56	3.56
C <sub>2</sub>	1.0	4.0	4.0

C <sub>3</sub>	0.8 <sup>(1)</sup>	0.2 <sup>(1)</sup>	0.4 <sup>(1)</sup>
C <sub>4</sub>	4.93	14.1	<i>Shoulder:</i> $\frac{1}{18 (L_{eff}/L)^2 - 6}$ <i>Midspace:</i> 8.6
C <sub>5</sub>	1/8	1/12	<i>Shoulder</i> <sup>(4)</sup> : 14.1 (L/L <sub>eff</sub> ) <sup>2</sup> <i>Midspace:</i> 8.6
C <sub>6</sub>	5/384	1/384	1/384
1) Note that C3 = 0 is normally assumed for in-line direction if the steady current is not accounted for. 2) For pinned-pinned boundary condition Leff shall be replaced by L in all expressions, including the expression for Pcr. 3) For fixed-fixed boundary conditions, Leff/L = 1 per definition. 4) C5 shall be calculated using the static soil stiffness in the Leff/L calculation.			

### 2.2.6.2 Concrete Stiffness Factor (CSF)

Fungsi penambahan selimut beton adalah untuk menambah berat pipa sehingga dapat meningkatkan kestabilan pipa di dasar laut. Selain itu, penambahan selimut beton dapat mempengaruhi kekakuan pipa. *Concrete stiffness factor* menunjukkan kekakuan selimut beton relatif terhadap kekakuan pipa baja. Persamaan CSF dijelaskan pada persamaan berikut:

$$CSF = k_c \left( \frac{EI_{conc}}{EI_{steel}} \right)^{0,75} \quad \dots(2.47)$$

Dimana,

$k_c$  : konstanta empiris

: 0.33 untuk AE dan 0.25 untuk  $\frac{PP}{PE}$  coating

$EI_{CONC}$  : *bending stiffness* selimut beton

$EI_{STEEL}$  : *bending stiffness* pipa baja

### 2.2.6.3 Panjang Span Efektif

Dalam analisa panjang bentangan bebas pipa bawah laut menggunakan DNV RP F105, digunakan parameter panjang bentangan bebas yaitu panjang bentangan bebas efektif. Panjang bentangan bebas efektif digunakan untuk mempertimbangkan efek tumpuan *fully fixed* pada bentangan be ...  
...  
Persamaan panjang bentangan bebas efektif dijelaskan pada Persamaan berikut:

$$\frac{L_{eff}}{L} = \begin{cases} \frac{4,73}{-0,066\beta^2 + 1,02\beta + 0,63} & , \text{ untuk } \beta \geq 2,7 \\ \frac{4,73}{0,036\beta^2 + 0,6\beta + 1,0} & , \text{ untuk } \beta < 2,7 \end{cases}$$

Dengan,

$$\beta = \log_{10}\left(\frac{K \cdot L^4}{(1 + CSF)E_{st}I_{st}}\right) \quad \dots(2.49)$$

Dimana,

$L_{eff}$  : Panjang efektif span (m)

$L$  : Panjang aktual free span (m)

$\beta$  : Relative soil stiffness parameter

$K$  : Relevant soil stiffness (vertikal/ horisontal, statis/dinamis)

$CSF$  : Concrete stiffness factor

$E_{st}$  : Young's modulus pipa baja (N/m<sup>2</sup>)

$I_{st}$  : Momen inersia pipa baja (m<sup>4</sup>)

#### 2.2.6.4 Effective Axial Force

Pada dasarnya, ketika sebuah pipa bawah laut memiliki suatu penampang tertentu, memiliki nilai momen inersia dan kelakuan, maka pipa bawah laut dapat dikategorikan sebagai balok secara umum. Akan tetapi, pada suatu free span, pipa mengalami regangan yang disebabkan oleh pemuaian material akibat temperatur content, dan juga tekanan content tersebut ... (2.50) karena itu, pipa bawah laut memiliki karakteristik yang unik dalam analisis mekanika teknik, sehingga tidak dapat disebut balok. Sebuah free span akan mengalami regangan pada kedua ujungnya, sehingga disimpulkan ada gaya aksial yang bekerja padanya. Pada umumnya perpanjangan ini menjad suatu lendutan vertikal. Di dalam DNV RP F105, penentuan nilai fundamental natural frequency membutuhkan parameter effective axial force yang dijelaskan dalam Persamaan 2.50 berikut:

$$S_{eff} = H_{eff} - (1 - 2\nu) \cdot P_i \frac{\pi}{4} \cdot (D_i)^2 - \alpha_e \cdot \Delta T \cdot A_{st}$$

Dimana,

$S_{eff}$  : effective axial force (N)

- $H_{eff}$  : *Effective lay tension*(N)  
 $\nu$  : *Poisson ratio* baja (0.3s)  
 $P_i$  : Perbedaan tekanan internal(Pa)  
 $D_i$  : Diameter dalam pipa(m)  
 $\alpha_e$  : koefisien ekspansi suhu(/°C)  
 $\Delta T$  : Perbedaan temperatur(°C)  
 $A_{st}$  : Luas penampang pipa baja(m<sup>2</sup>)

#### 2.2.6.5 *Critical Buckling Load*

*Critical buckling load* dipengaruhi oleh kekakuan pipa, berat terendam pipa dan pengaruh kontak pipa dengan tanah (Bai dan Bai, 2014). Di dalam DNV GL RP F105, *critical buckling load* dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$P_{cr} = (1 + CSF) C_2 \pi^2 \frac{E_{st} I_{st}}{L_{eff}^2} \quad \dots(2.51)$$

Dimana,

- $P_{cr}$  : *critical buckling load*  
 $C_2$  : *boundary condition coefficient*  
 $CSF$  : *concrete stiffness factor*  
 $E_{st}$  : *Young's modulus* pipa baja (N/m<sup>2</sup>)  
 $I_{st}$  : Momen inersia pipa baja (m<sup>4</sup>)  
 $L_{eff}$  : Panjang efektif span (m)

#### 2.2.6.6 *Static Deflection*

Bentangan bebas pipa akan mengalami lendutan atau defleksi di sepanjang bagian tengah pipa yang tidak ditumpu oleh tanah. Defleksi ini terjadi di arah *cross-flow* dan *in-line*. Defleksi untuk arah *cross-flow* disebabkan karena beban terendam pipa, sedangkan untuk arah *in-line* disebabkan karena beban hidrodinamis. Terjadinya defleksi dapat meningkatkan risiko kegagalan *buckling* pipa. Di dalam DNV RP F105, *static deflection* dijelaskan dalam persamaan berikut:

$$\delta = C_6 \pi^2 \frac{q \cdot L_{eff}^4}{E_{st} I_{st} \cdot (1 + CSF)} \cdot \frac{1}{(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}})} \quad \dots(2.52)$$

Dimana,

$\delta$  : static deflection (m)

$C_6$  : boundary condition coefficient

$q$  : deflection load unit per length (N/m)

$L_{eff}$  : Panjang efektif span (m)

$E_{st}$  : Young's modulus pipa baja (N/m<sup>2</sup>)

$CSF$  : Concrete stiffness factor

$I_{st}$  : Momen inersia pipa baja (m<sup>4</sup>)

$S_{eff}$  : effective axial force (N)

$P_{cr}$  : critical buckling load (N)

### 2.2.6.7 Frekuensi Natural Pipa

Getaran pada pipa biasanya bergerak sejajar (*in line*) dengan arah aliran, namun juga bisa bergerak tegak lurus terhadap aliran (*crossflow*). Maka dari itu dalam hal ini, *in line* maupun *crossflow* haruslah di analisis untuk menentukan apakah pipa telah aman dari gerakan arah horizontal maupun vertical. Untuk mengetahui itu, diperlukan perhitungan frekuensi natural dari pipa dari arah *inline* maupun *crossflow* sebagai respon dinamikanya terhadap beban lingkungan dan operasi yang diterima. Frekuensi natural dapat dihitung berdasarkan persamaan sesuai DNV RP F105 berikut :

$$f_n = C_1 \times \sqrt{(1 + CSF)} \times \sqrt{\frac{E_{pipa} \times I_{pipa}}{M_{eff} \times L_{eff}} \times \left( \left( 1 + \frac{S_{eff}}{P_e} \right) + \left( C_3 \times \left( \frac{\delta}{D_{tot}} \right)^2 \right) \right)} \quad \dots(2.53)$$

dimana:

$C_1$  dan  $C_3$  : Koefisien kondisi batas

$CSF$  : Concrete stiffness enhancement factor

$E_{pipa}$  : Modulus Young's untuk pipa (N/m<sup>2</sup>)

$I_{pipa}$  : Momen inersia pipa (m<sup>4</sup>)

$M_e$  : Massa efektif (kg/m)



- $L_{eff}$  : Panjang span efektif (m)  
 $D$  : Diameter luar pipa (m)  
 $S_{eff}$  : Gaya aksial efektif (N/m)  
 $P_e$  : Beban Euler (N)  
 $\delta$  : Defleksi statis (m)

### 2.2.6.8 Panjang Maksimum Span

Pipeline yang terbentang bebas atau mengalami *freespan* memiliki panjang maksimum yang diijinkan. Jika panjang dari bentangan bebas melebihi panjang maksimum yang diijinkan, maka akan terjadi osilasi dan Dampak lebih buruknya adalah dapat mengurangi umur dari pipeline. Untuk menghitung panjang maksimum span pada arah crossflow adalah :

$$L_c = \sqrt{\frac{C_e U_r D}{2\pi U_c} \sqrt{\frac{E I}{M_e}}} \quad \dots(2.54)$$

Sementara untuk arah inline adalah :

$$L_c = \sqrt{\frac{C_e f_n}{2\pi} \sqrt{\frac{E I}{M_e}}} \quad \dots(2.55)$$

$C_e$  = Konstanta ujung span (9.87 untuk pinned-pinned)

### 2.2.7 Kriteria Screening

Setelah mendapatkan nilai frekuensi natural pada arah *inline* maupun arah *crossflow*, langkah selanjutnya yang harus dilakukan adalah melakukan screening sesuai dengan standar DNV RP F105. Frekuensi natural arah *inline* , nilainya harus memenuhi kriteria sebagai berikut :

$$f_{n,IL} > \frac{U_{extreme} \times \gamma_{IL}}{VR_{onset} \times D} \quad \dots(2.56)$$

Dimana :

$$U_{extreme} = U_{c,100year} + U_{w,1year} \quad \dots(2.57)$$

$f_{n.il}$  : Frekuensi natural *in line*

$\gamma_{il}$  : Screening factor untuk *inline*

$U_{extreme}$  : Kecepatan arus ekstrim

$V_{R.onset}^{IL}$  : Nilai onset inline untuk reduced velocity

Untuk nilai onset *in line* untuk *reduced velocity* ditentukan oleh persamaan berikut ini:

$$V_{R.onset}^{IL} = \begin{cases} \left( \frac{1}{\gamma_{on.IL}} \right) & \text{Untuk } K_{sd} < 0.4 \\ \left( \frac{0.6+K_{sd}}{\gamma_{on.IL}} \right) & \text{Untuk } 0.4 < K_{sd} \\ \left( \frac{2.2}{\gamma_{on.IL}} \right) & \text{Untuk } K_{sd} > 1.6 \end{cases} \quad \dots(2.58)$$

Dimana :

$\gamma_{on.il}$  : Safety factor pada onset *inline*

$K_{sd}$  : Parameter stabilitas untuk perancangan

$\gamma_k$  : Safety factor pada parameter stabilitas

Untuk natural frekuensi arah *crossflow*, nilainya harus memenuhi kriteria berikut :

$$f_{n,CF} > \frac{U_{extreme} \times \gamma_{CF}}{2D} \quad \dots(2.59)$$

Dimana :

$f_{n.cf}$  : Frekuensi natural *in line*

$\gamma_{CF}$  : Safety factor pada parameter stabilitas

Untuk ketentuan screening factor pipa menurut DNV RP F105 ditampilkan pada Tabel 2.7 berikut :

**Tabel 2.7** Screening Factor (DNV RP F105, 2006)

$\gamma_{IL}$	1.4
$\gamma_{CF}$	1.4

### 2.2.8 Analisa Statis

*Ultimate Limit State* (ULS) dilakukan pada kondisi statis. Secara statis pipa dapat mengalami defleksi yang dapat menyebabkan keruntuhan sedangkan secara dinamis pipa akan mengalami getaran yang dapat beresiko kegagalan karena pipa mengalami kelelahan/*fatigue*.

Pada analisis statis pipa harus memenuhi kriteria *limit state* untuk bisa menghindari terjadinya *buckling*. Ada empat kriteria moda kegagalan yang harus dipenuhi sesuai persyaratan DNV OS F101 agar pipa dapat dikatakan aman dari kegagalan *buckling*, yaitu :

#### 2.2.8.1 *Pressure Containment (Bursting)*

Pipa harus mampu menahan tekanan dari dalam agar tidak melebihi nilai dari system pipa yang diijinkan. Pada kriteria ini perbedaan tekanan yang terjadi harus dianalisis agar meminimalisir terjadinya *buckling*. Tujuan dari perlindungan ini juga untuk melindungi system selama beroperasi dimana harga maksimum *incidental pressure* yang diijinkan sama dengan *incidental pressure* dikurang dengan toleransi kemanan tekanan system. Kriteria untuk tekanan *bursting* adalah sebagai berikut :

$$P_{li} - P_e \leq \frac{P_b}{\gamma_m \cdot \gamma_{sc,pc}} \quad \dots(2.60)$$

Sementara itu, untuk mendapatkan nilai *local incidental pressure* dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$P_{li} = P_{inc} + \rho_{cont} \cdot g \cdot h \quad \dots(2.61)$$

Dimana :

$$P_{inc} = P_d \cdot \gamma_{inc} \quad \dots(2.62)$$

$P_{li}$  : local incidental pressure

$P_e$  : eksternal pressure

$P_b$  : pressure containment resistance

$\gamma_m$  : material resistance factor

$\gamma_{sc}$  : safety factor resistance factor

$P_{inc}$  : pressure containment resistance

$\rho_{cont}$  : content density pipa

$g$  : percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

$h$  : Jarak vertical dari point referensi ke permukaan laut (m)

$P_d$  : design pressure

### 2.2..8.2 Local Buckling – Collapse Criteria

*Collapse pressure* atau tekanan keruntuhan adalah tekanan yang diperlukan suatu pipa untuk menahan gaya eksternal sehingga pipa tidak mengalami perubahan bentuk (*buckling*). Nilai dari *collapse pressure* dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$(P_c - P_{el}) \cdot (P_c^2 - P_p^2) = P_c \cdot P_{el} \cdot P_p \cdot f_o \cdot \frac{D}{t} \quad \dots(2.63)$$

Untuk ketentuan faktor fabrikasi maksimum pipa ditampilkan pada Tabel 2.8 berikut :

**Tabel 2.8** Faktor Fabrikasi Maksimum (DNV OS F101, 2000)

Pipe	Seamless	UO & TRB & ERW	UOE
$\alpha_{fab}$	1.00	0.93	0.85

Untuk ketentuan faktor Ketahanan Material pipa ditampilkan pada Tabel 2.9 berikut :

**Tabel 2.9** Faktor Ketahanan Material (DNV OS F101, 2000)

Faktor ketahanan material	SLS/ULS/ALS	FLS
$\gamma_m$	1.15	1.00

Pemilihan factor kelas keamanan berdasarkan pada jenis fluida yang dialirkan dalam pipa dan Dampak bahaya yang ditimbulkan bagi manusia, lingkungan, perekonomian, dan politik. Berikut klasifikasi factor kelas keamanan berdasarkan DNV OS F101 ditampilkan pada Tabel 2.10 berikut :

**Tabel 2.10** Faktor Safety Class (DNV OS F101, 2000)

Safety class $\gamma_{sc}$	Low	Normal	High
Pressure containment	1.046	1.138	1.308
Other	1.04	1.14	1.26

Ketika kriteria pengaman telah dipenuhi, maka selanjutnya adalah dengan memastikan tekanan eksternal tidak melebihi tekanan collapse dibagi dengan safety factornya. Kriteria tersebut dijabarkan pada persamaan berikut :

$$P_e \leq \frac{P_c(t1)}{\gamma_m \gamma_{sc}} \quad \dots(2.64)$$

Dimana :

$P_e$  : Tekanan eksternal maksimum (N/m<sup>2</sup>)

$P_c(t1)$  : Tekanan karakteristik keruntuhan (N/m<sup>2</sup>)

$\gamma_m$  : *material resistance factor*

$\gamma_{sc}$  : *safety factor resistance factor*

### 2.2..8.3 Local buckling - combined loading criteria

Menurut Dong dkk (2015) kriteria kegagalan local buckling pada pipeline karena kombinasi beban dari external pressure, internal pressure, bending moment, dan effective axial force sesuai dengan yang ditunjukkan pada DNV OS F101 (2013) yaitu:

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{sc} S_{sd} \cdot (P_i)}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left( \alpha_p \frac{P_i - P_e}{\alpha_c \cdot P_b(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad \dots(2.65)$$

Dimana :

$$M_p(t) = f_y \cdot (D - t)^2 \cdot t \quad \dots(2.66)$$

$$S_p(t) = f_y \pi (D - t) \cdot t \quad \dots(2.67)$$

$$\alpha_c = (1 - \beta) + \beta \frac{f_u}{f_y}; \text{ (nilai maksimum 1.2)} \quad \dots(2.68)$$

$$\alpha_p = \begin{cases} 1 - \beta & \frac{P_i - P_e}{P_b} < \frac{2}{3} \\ 1 - 3\beta \left( 1 - \frac{P_i - P_e}{P_b} \right) & \frac{P_i - P_e}{P_b} > \frac{2}{3} \end{cases} \quad \dots(2.69)$$

$\gamma_m$  : material resistance factor

$\gamma_{sc}$  : safety factor resistance factor

$M_{sd}$  : desain momen bending

$S_{sd}$  : desain gaya axial efektif

$P_i$  : internal pressure (N/m<sup>2</sup>)

$\alpha_c$  : parameter tegangan aliran untuk perhitungan regangan

$P_e$  : eksternal pressure (N/m<sup>2</sup>)

$P_b$  : pressure containment resistance

Dimana untuk  $\beta$ ,

$$\beta = \begin{cases} 0.5 & \text{Untuk } D/t_2 < 5 \\ \frac{(60 - \frac{D}{t_2})}{90} & \text{Untuk } 15 \leq D/t_2 \leq 60 \\ 0 & \text{Untuk } D/t_2 \geq 60 \end{cases} \quad \dots(2.70)$$

Untuk nilai  $f_y$  (karakteristik tegangan luluh) dan  $f_u$  (karakteristik tegangan tarik) adalah sebagai berikut :

$$f_y = (SMYS - f_{y, temp}) \alpha_u \quad \dots(2.71)$$

$$f_u = (SMTS - f_{u, temp}) \alpha_u \cdot \alpha_A \quad \dots(2.72)$$

Dimana :

*SMYS* : *Specified Minimum Yield Stress*

*SMTS* : *Specified Minimum Tensile Strength*

$\alpha_u$  : factor kekuatan material

$\alpha_A$  : factor anisotrophy 0.95 untuk arah axial & 1 untuk arah lainnya

#### **2.2..8.4 Local Buckling – Propagation Buckling**

Langkah terakhir adalah dengan menganalisis kriteria perambatan buckling untuk mengetahui apakah terjadi perambatan buckling pada pipa. Untuk memeriksa tekanan perambatan, dapat diketahui dengan rumus sebagai berikut :

$$P_e < \frac{P_{pr}}{\gamma_m \gamma_{sc}} \quad \dots(2.73)$$

Dimana untuk nilai  $P_{pr}$  dapat ditemukan dengan rumus :

$$P_{pr} = 35 \cdot f_y \cdot \alpha_{fab} \quad \dots(2.74)$$

Dimana :

$P_e$  : tekanan eksternal maksimum ( $N/m^2$ )

$P_{pr}$  : tekanan propagasi ( $N/m^2$ )

$\gamma_m$  : *material resistance factor*

$\gamma_{sc}$  : *safety factor resistance factor*

$f_y$  : karakteristik tegangan luluh

$\alpha_{fab}$  : faktor pabrikasi

### 2.2.9 Mitigasi

Ketika *vortex shedding* timbul akibat dari adanya *free span* pada pipa bawah laut yang beroperasi dan frekuensi *vortex shedding*nya mendekati frekuensi natural pipa maka pipa bisa terjadi kegagalan. Kegagalan pipa bisa diatasi dengan cara mitigasi. Mitigasi yang umum dilakukan pada kasus *freespan* adalah berupa penambahan *support* buatan. Penambahan *support* ini dilakukan agar panjang span dapat berkurang sehingga stabilitas pipa yang terbentang bebas tetap terjaga dan getaran yang bisa berakibat buckling pada pipa juga dapat berkurang.

Menurut Guo dkk (2005) dalam melakukan mitigasi, ada beberapa factor yang perlu diperhatikan dan harus dilakukan. Faktor tersebut ditampilkan pada Tabel 2.11 berikut :

**Tabel 2.11** Faktor Melakukan Mitigasi pada Span Kritis

Faktor	Keterangan
$F_s > 0.7 F_n$	Mitigasi perlu dilakukan apabila frekuensi <i>vortex shedding</i> lebih besar dari 0.7 kalinya frekuensi natural pipa sehingga osilasi terjadi.
$L > L_{max}$	Mitigasi perlu dilakukan apabila panjang span actual melebihi Panjang Maksimum Span.
$S_{eff}/P_{cr} < -0.5$	Mitigasi perlu dilakukan apabila nilai gaya aksial efektif dibagi dengan nilai critical buckling pada arah inline maupun crossflow lebih kecil dari -0.5
$\delta/D > 2.5$	Apabila defleksi yang terjadi di arah <i>inline</i> dan <i>crossflow</i> dibagi dengan diameter luar pipa 2.5.
<i>Gap</i> pipa dengan tanah > 5D	Mitigasi perlu dilakukan apabila jarak pipa dengan tanah ( <i>Gap</i> ) melebihi 5 kali diameter luar pipa.



### 2.2.10 Tegangan

Saat pipa beroperasi, maka ada beberapa tegangan yang terjadi di sekitar pipa dan dapat membuat pipa kehilangan kekuatannya. Tegangan ijin pada pipa sudah diatur dalam ASME B31.8 2012, dimana telah dijelaskan beberapa aturan terkait presentase ijin nilai tegangan terhadap SMYS suatu material yang dipakai. Untuk nilai batas ijin tegangan menurut ASME B31.8 ditampilkan pada Tabel 2.12 berikut :

**Tabel 2.12** Tegangan Pada Pipa (ASME B31.8 2012)

Design Condition	Hoop stress	Longitudinal stress	Combined stress
Operasi	72% SMYS	80% SMYS	90% SMYS
Hydrotest	90% SMYS	-	96% SMYS
Instalasi	72% SMYS	80% SMYS	90% SMYS

#### 2.2.10.1 Tegangan Hoop

Aliran fluida yang mengalir dalam pipa merukan suatu beban yang dapat menyebabkan tekanan internal. *Hoop stress* merupakan reaksi yang diakibatkan oleh tekanan internal yang dapat ditentukan besarnya. *Hoop stress* ini merupakan tekanan yang bekerja dalam arah tangensial terhadap pipa. Tekanan hoop stress yang terjadi nilainya tidak boleh melebihi nilai yang diijinkan. Syarat kriterianya seperti berikut:

$$S_H = (P_i - P_e) \frac{D}{2 \cdot t} \leq F_1 \cdot SMYS. \quad \dots(2.75)$$

Dimana:

$S_H$  : *Hoop stress*, psi (MPa)

$P_i$  : internal pressure (N/m<sup>2</sup>)

$P_e$  : eksternal pressure (N/m<sup>2</sup>)

$D$  : Diameter nominal luar pipa (m)

$t$  : Ketebalan pipa

$F_1$  : Faktor desain dari *hoop stress*

$SMYS$  : *Specified Minimum Yield Stress*

Untuk factor desain menurut ASME B31.8 ditampilkan pada Tabel 2.13 berikut :

**Tabel 2.13** Faktor Desain untuk Pipa (ASME B31.8, 2012)

Content Type	Hoop Stress F1	Longitudinal Stress F2	Combined Stress F3
Gas	0.72	0.80	0.90
Minyak	0.60	0.675/0.54/0.80	-

### 2.2.10.2 Tegangan Longitudinal

Tegangan longitudinal merupakan tegangan aksial yang dialami oleh dinding pipa. Tegangan bending ini terjadi akibat pipa mengalami bentangan bebas dan menimbulkan momen, sehingga pipa diasumsikan mengalami 2 tumpuan dari masing-masing ujung pipa sepanjang span. Untuk menghitung tegangan longitudinal pada bentangan bebas dapat menggunakan rumus berikut:

$$S_L = S_a + S_b + S_p + S_t \quad \dots(2.76)$$

Dimana :

$S_L$  : Longitudinal stress, psi (MPa)

$S_a$  : Tegangan aksial [tarik + atau tekan -] (MPa)

$$S_a = F_a / A \quad \dots(2.77)$$

$F_a$  : gaya aksial (N)

$A$  : Cross sectional area dari material pipa (m<sup>2</sup>)

$S_b$  : Maksimum resultant bending stress (Pa)

Dimana nilai  $S_b$  adalah :

$$S_b = \pm \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{z} \quad \dots(2.78)$$

$z$  : Section modulus pipa (m<sup>3</sup>)

$i_i$  : Faktor tekanan intensifikasi in – plane

- $M_i$  : Bending moment in – plane
- $i_o$  : Faktor tekanan intensifikasi out – plane
- $M_o$  : Bending moment out – plane
- $S_p$  : Tegangan longitudinal akibat tekanan internal (Pa) = 0.3 x SH
- $S_t$  : Tegangan ekspansi thermal (Pa) = E.  $\alpha$ . (T1 – T2)
- T1 : Temperatur saat instalasi (°C)
- T2 : Temperatur saat operasi (°C)

Nilai dari tegangan longitudinal harus memenuhi persyaratan berikut:

$$| S_L | \leq F_2 S_y \quad \dots(2.79)$$

Dimana :

- $S_L$  : maximum longitudinal stress, psi [tarik + atau tekan –] (MPa)
- $F_2$  : Desain factor *longitudinal stress*

### 2.2.10.3 Tegangan Kombinasi

Tegangan *von misses* atau tegangan kombinasi dapat ditemukan setelah mendapatkan nilai tegangan hoop dan tegangan longitudinal. Maka persamaannya sebagai berikut :

$$S_v = \sqrt{S_h^2 + S_L^2 + S_h S_L} \quad \dots(2.80)$$

Dimana,

- $S_v$  : Von misses stress, psi (MPa)
- $S_H$  : *Hoop stress*, psi (MPa)
- $S_L$  : *Longitudinal stress*, psi (MPa)

Nilai dari tegangan von misses harus memenuhi persamaan berikut :

$$| S_v | \leq F_3 S_y \quad \dots(2.81)$$

Dimana :

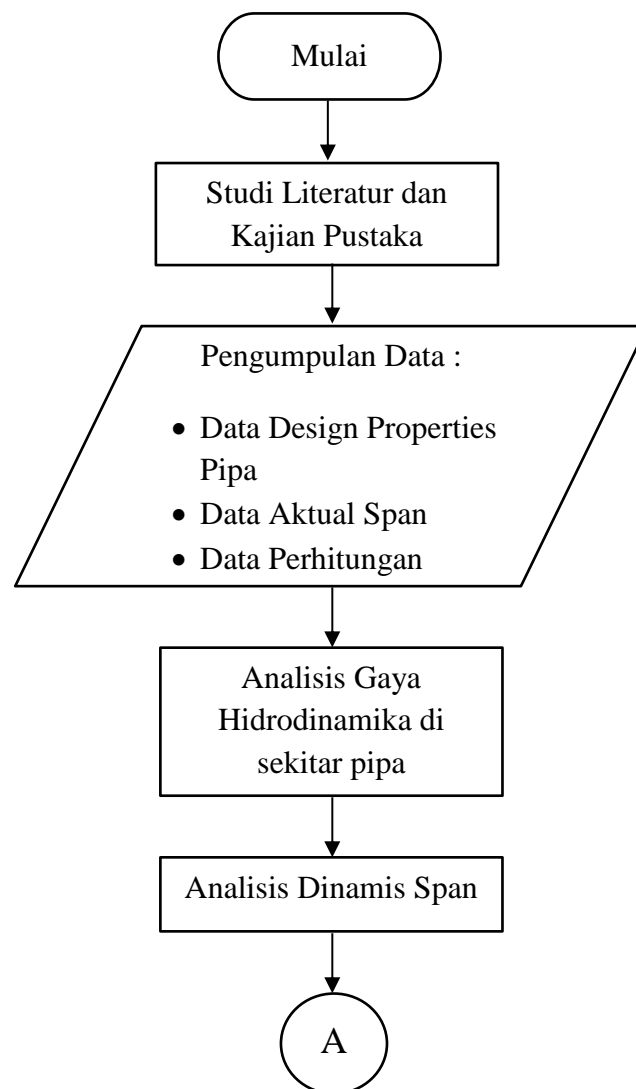
- $F_3$  : Desain factor combined stress

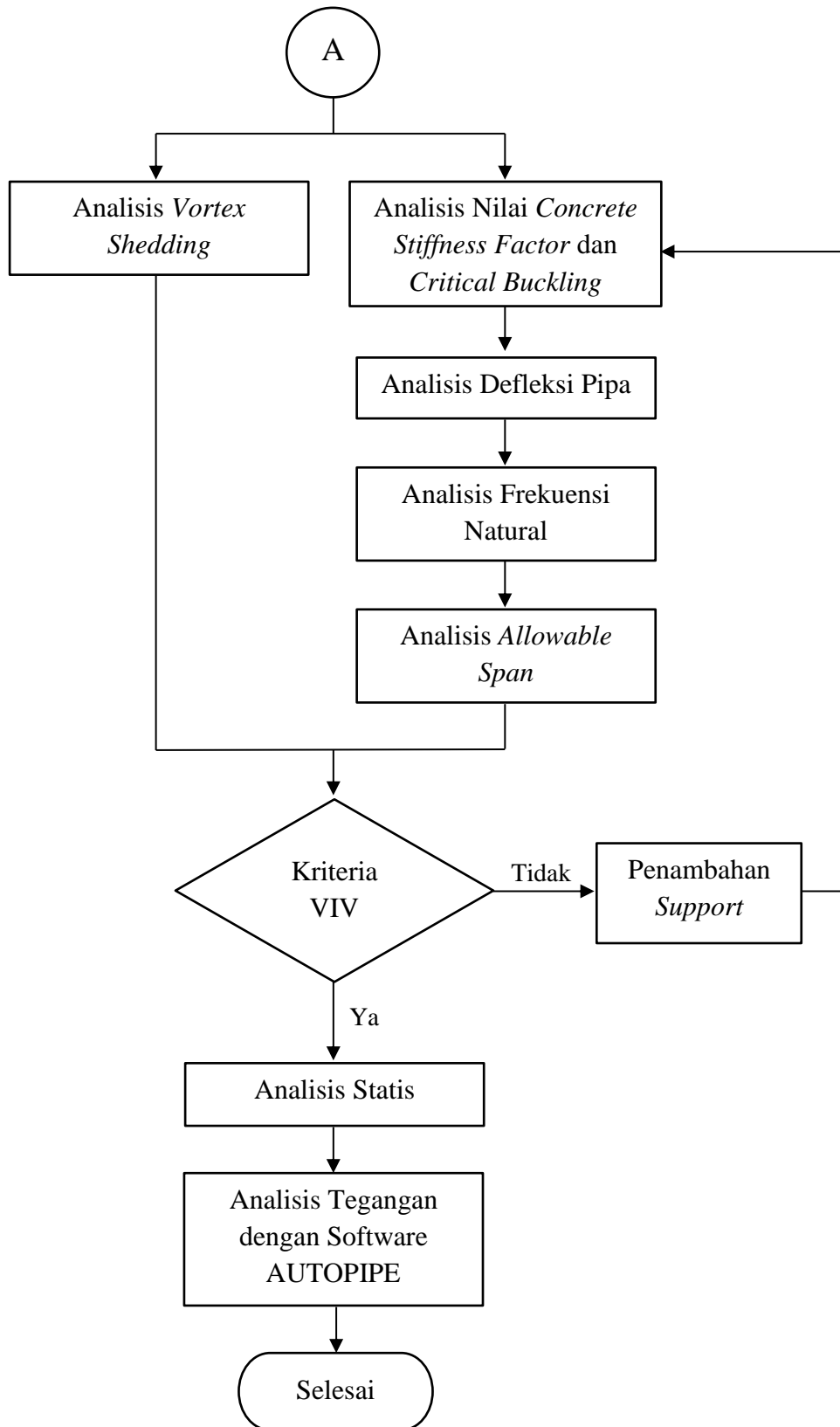
## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir (*Flow Chart*)

Metodologi penelitian dalam tugas akhir ini dijelaskan dalam diagram alir sebagai berikut :





### 3.2 Langkah – Langkah Pengerjaan

1. Studi Literatur

Membaca dan mempelajari studi literature, buku, jurnal, penelitian ilmiah dan standard dengan topik yang serupa yang telah dilakukan sebelumnya dalam menyelesaikan permasalahan dalam tugas akhir ini.

2. Pengumpulan data

Data yang akan digunakan dalam penyelesaian tugas akhir ini adalah data design pipa, data metocean di lokasi pipa beroperasi, data aktual span serta data perhitungan dari tugas akhir Ahmad Syahroni tahun 2018.

3. Analisis gaya hidrodinamis di sekitar pipa

Melakukan perhitungan gaya hidrodinamis dari arus dan gelombang yang bekerja di sekitar pipa dengan kombinasi beban yang dianggap paling ekstrem.

4. Analisis Dinamis Span

Pada tahap ini dilakukan analisis dinamis mengacu pada kode DNV RP F105. Dikarenakan pipa terbentang bebas , gaya hidrodinamis yang bekerja dapat menyebabkan *vortex shedding* pada pipa. Oleh karena itu, perlu dilakukan screening VIV apakah sesuai pada arah in line maupun cross flow. Apabila setelah dilakukan screening tidak memenuhi persyaratan, maka diperlukan mitigasi berupa penambahan *support*.

5. Analisis Statis

Pada tahap ini dilakukan analisis statis dengan mengacu kode DNV OS F101. Dimana tekanan yang terjadi harus memenuhi kriteria statis.

6. Analisis Tegangan Dengan Software AUTOPIPE

Melakukan pemodelan dan perhitungan tegangan pipa dengan menggunakan software AUTOPIPE. Perhitungan meliputi Analisa tegangan hoop, tegangan longitudinal, dan tegangan kombinasi (*von mises*).

## BAB IV

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Analisis Data

Tugas akhir ini merupakan lanjutan dari analisis yang dilakukan oleh Syahroni (2018) tentang umur kelelahan pipa bawah laut akibat adanya *Vortex Induced Vibration* (VIV). Data – data pipa yang digunakan dalam tugas akhir ini mengacu pada analisis tersebut. Pipa mendistribusikan gas pada jalur *Central Processing Platform-2* menuju *Onshore Receiving Facility* (Gresik) dengan panjang 65km. Menurut analisis yang dilakukan Syahroni (2018), pada tahun 2016 dilakukan inspeksi *span* berupa survei di sepanjang jalur pipa dan pada beberapa segmen pipa mengalami bentangan bebas. Dari hasil survei tersebut didapatkan informasi mengenai lokasi segmen pipa dengan data petunjuk panjang dan kedalaman *span*.

##### 4.1.1 Data Pipeline

###### a. Data Properti Pipa

Berikut data properti pipa jalur *Central Processing Platform-2* menuju *Onshore Receiving Facility* (Gresik) yang ditampilkan pada Tabel 4.1 berikut :

**Tabel 4.1** Data Desain Pipa

Deskripsi	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
Steel Grade	API 5L-X65-W-PSL 2			
Process Manufacture	SEAMLESS			
Pipeline Route	Central Processing Platform - Onshore Receiving Facility			
Outside Diameter (DO)	355.6	mm	0.3556	m
Wall Thickness	14.3	mm	0.0143	m
Length	65	km	65000	m
Corrosion Allowance	3	mm	0.003	m
Steel Density	7850	kg/m <sup>3</sup>	-	-
Young's Modulus Steel	207000	Mpa	2.07E+11	Pa
Thermal Expansion Ceoff.	1.17E-05	1/°C	-	-
SMYS	360	MPa	3.60E+08	Pa

Deskripsi	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
SMTS	460	MPa	-	-
Poisson Ratio	0.3	-	-	-
Design Pressure	1440.25	psig	9930178.1	Pa
Internal Pressure at Spanning Pipe	137.89	bar	13789000	Pa
Maximal Design Temperature	75	°C	-	-
Minimal Design Temperature	-10	°C	-	-
Maximum Operating Temperature	65	°C	-	-
Marine Growth	0	mm	0	mm
Design Life	20	years	-	-
Service	GAS			
Content Density	29.3	KG/M <sup>3</sup>	-	-
Gas Flowrate	70	MMSCFD	70000	MMBtu

#### b. Data Coating Pipa

Pipa 18' *Export Pipeline* memiliki dua *coating* yang melapisinya. Data *coating* pipa ditampilkan pada Tabel 4.2 berikut :

**Tabel 4.2** Data *Anti-Corrosion Coating* dan *Concrete Coating*

Deskripsi	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
Material Anti-Corrosion Coating	Asphalt Enamel			
Anti-Corrosion Coating Thickness	6	mm	0.006	m
Concrete Coating Thickness	50.8	mm	0.0508	m
Anti-Corrosion Coating Density	1280	kg/m <sup>3</sup>	-	-
Concrete Coating Density	3043	kg/m <sup>3</sup>	-	-

#### 4.1.2 Data Lingkungan

Data – data lingkungan yang digunakan pada analisis ini adalah data gelombang, arus dan data karakteristik tanah di sekitar perairan Madura, Poleng *Field*.



**a. Data Gelombang dan Arus**

Data Gelombang dan Arus ditampilkan dalam Tabel 4.3 berikut :

**Tabel 4.3** Data Gelombang dan Arus

Deskripsi	Nilai			Satuan
	1 tahun	10 tahun	100 tahun	
Significant Wave Height, Hs	1.08	2.9	4.17	m
Significant Wave Period, Ts	5.51	8.085	9.035	sec
Peak Period for Design Spectrum, Tp	5.8	8.51	9.51	sec
<b>Current Velocity</b>				
Surface	1.07	1.37	1.7	m/s
Bottom	0.24	0.5	0.9	m/s
Highest Astronomical Tide (HAT), Above MSL	1.1	1.39	1.54	m
Lowest Astronomical Tide (LAT), Below MSL	-0.67	-0.38	-0.17	m
Seawater Kinematics Viscosity	1.02E-06			m <sup>2</sup> /s
Maximum Water Depth	56.77			m
Minimum Water Depth	51.1			m

**b. Data Karakteristik Tanah**

Berikut merupakan data tanah di lokasi pipa beroperasi disajikan pada Tabel 4.4 berikut :

**Tabel 4.4.** Data Karakteristik Tanah

Deskripsi	Nilai	Satuan
Jenis Tanah	Fine to medium loose sand	-
Layer Thickness	0.5 - 0.8	m
Unit Weight (Drained)	15.6	kN/m <sup>3</sup>
Lateral Friction Factor	0.6	-

**4.1.3 Data Inspeksi *Free Span***

Data *Free Span* ini menggunakan data inspeksi jalur *Central Processing Platform-2* menuju *Onshore Receiving Facility* (Gresik) pada tahun 2016. Dari jalur sepanjang 65 km hanya digunakan beberapa data, dimana pada kilometer poin berikut panjang span bernilai besar. Data *span* aktual beserta ketinggian jarak antara pipa dengan *seabed* ditampilkan pada Tabel 4.5 berikut :

**Tabel 4.5** Data *Free Span* Hasil Inspeksi Bawah Laut

No	KP Event (km)	KP Length (m)	Height (m)
1	11.992 - 11.998	5.38	0.3
2	12.058 - 12.061	2.88	0.3
3	12.126 - 12.14	12.87	0.5
4	12.239 - 12.243	3.61	0.3
5	12.284 - 12.302	19.15	0.3
6	12.34 - 12.347	6.88	0.3
7	12.397 - 12.404	6.98	0.3
8	12.572 - 12.579	7.44	0.5
9	12.6 - 12.616	16.08	0.3
10	12.625 - 12.628	4.39	0.3
11	12.631 - 12.638	7.68	0.3
12	12.647 - 12.659	12.11	0.3
13	12.697 - 12.709	11.89	0.3
14	12.723 - 12.735	11.38	0.5
15	12.736 - 12.747	10.63	0.5
16	12.768 - 12.778	10.41	0.3
17	12.806 - 12.821	15.54	0.7
18	12.828 - 12.836	6.73	0.3
19	12.857 - 12.869	12.65	0.2
20	12.993 - 13.002	8.63	0.1

#### 4.1.4 Data Perhitungan Dimensi Pipa

Perhitungan dimensi pipa telah dilakukan pada analisis sebelumnya. Hasil perhitungan dimensi pipa ditampilkan pada Tabel 4.6 berikut :

**Tabel 4.6** Perhitungan Dimensi Pipa (Syahroni, 2018)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tebal Dinding Pipa	$t_2$	0.0113	m
Diameter Total Pipa	$D_t$	0.469	m
Diameter Dalam Pipa	$D_i$	0.327	m
Diameter Lapisan Anti Korosi	$D_{cc}$	0.368	m
Diameter Lapisan Concrete	$D_{conc}$	0.469	m
Luas Penampang Internal Pipa Baja	$A_i$	0.084	$m^2$
Luas Penampang Pipa Baja	$A_{st}$	0.015	$m^2$

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Luas Penampang Lapisan Anti Korosi	$A_{cc}$	0.007	$m^2$
Luas Penampang Lapisan Concrete	$A_{conc}$	0.067	$m^2$
Momen Inersia Pipa Baja	$I_{st}$	$2.24 \times 10^{-4}$	$m^4$
Momen Inersia Selimut Beton	$I_{conc}$	$1.48 \times 10^{-3}$	$m^4$

#### 4.1.5 Data Perhitungan Massa Terendam Pipa

Berat terendam pipa diperlukan untuk mengetahui beban lateral yang timbul akibat berat pipa itu sendiri. Perhitungan berat terendam pipa telah dilakukan pada analisis sebelumnya. Hasil perhitungan ditampilkan dalam Tabel 4.7 berikut :

**Tabel 4.7** Hasil Perhitungan Berat Terendam Pipa (Syahroni, 2018)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Massa Konten Pipa	$M_{fluida}$	2.46	Kg/m
Massa Pipa Baja	$M_{st}$	120.36	Kg/m
Massa Lapisan Anti Korosi	$M_{cc}$	8.72	Kg/m
Massa Lapisan Concrete	$M_{conc}$	203.19	Kg/m
Massa Struktur Pipa	$M_{str}$	332.28	Kg/m
Massa Displacement	$M_{disp}$	177.23	Kg/m
Gaya Apung	$F_b$	1738.6	N/m
Berat Terendam Pipa	$W_{sub}$	1545.2	N/m

## 4.2 Analisis Kecepatan Partikel Air

### 4.2.1 Perhitungan Kecepatan Arus pada Pipa

Perhitungan Kecepatan Arus yang bekerja pada pipa bisa dihitung dengan persamaan (2.19). Hal-hal yang perlu dipertimbangkan dalam perhitungan ini antara lain gap ( $e$ ) yaitu jarak antara pipa dengan *seabed* karena pipa meletak pada dasar laut dengan kondisi freespan, kekasaran dasar laut ( $z_o$ ) dimana untuk kasus ini jenis tanah di lokasi pipa adalah *fine to loose sand*. Nilai  $z_o$  yang dipilih adalah *fine sand*. Untuk arah arus yang dianalisis merupakan arah yang tegak lurus dengan pipa (sudut  $90^\circ$ ), karena arah tersebut memiliki pengaruh beban arus yang

paling besar dibandingkan arah lain. Hasil perhitungan kecepatan arus yang bekerja pada pipa ditampilkan pada Tabel 4.8 berikut :

**Tabel 4.8** Perhitungan Kecepatan Arus Pada Pipa

Perhitungan Kecepatan Arus Pada Elevasi Pipa							
Panjang Span Aktual	Gap ( e )	Kecepatan Arus Pada Ketinggian Referensi, 10 tahun $U(Z_r)$	Kecepatan Arus Pada Ketinggian Referensi, 100 tahun $U(Z_r)$	Elevasi Di atas Dasar Laut ( z )	Parameter Kekasaran Dasar Laut	Kecepatan Arus	
						10 Tahun $V(z)$	100 Tahun $V(z)$
m	m	m/s	m/s	m	m	m/s	m/s
5.38	0.3	0.5	0.9	0.535	0.00001	0.473	0.851
2.88	0.3	0.5	0.9	0.535	0.00001	0.473	0.851
12.87	0.5	0.5	0.9	0.735	0.00001	0.487	0.876
3.61	0.3	0.5	0.9	0.535	0.00001	0.473	0.851
19.15	0.3	0.5	0.9	0.535	0.00001	0.473	0.851
6.88	0.3	0.5	0.9	0.535	0.00001	0.473	0.851
6.98	0.3	0.5	0.9	0.535	0.00001	0.473	0.851
7.44	0.5	0.5	0.9	0.735	0.00001	0.487	0.876
16.08	0.3	0.5	0.9	0.535	0.00001	0.473	0.851
4.39	0.3	0.5	0.9	0.535	0.00001	0.473	0.851
7.68	0.3	0.5	0.9	0.535	0.00001	0.473	0.851
12.11	0.3	0.5	0.9	0.535	0.00001	0.473	0.851
11.89	0.3	0.5	0.9	0.535	0.00001	0.473	0.851
11.38	0.5	0.5	0.9	0.735	0.00001	0.487	0.876
10.63	0.5	0.5	0.9	0.735	0.00001	0.487	0.876
10.41	0.3	0.5	0.9	0.535	0.00001	0.473	0.851
15.54	0.7	0.5	0.9	0.935	0.00001	0.497	0.895
6.73	0.3	0.5	0.9	0.535	0.00001	0.473	0.851
12.65	0.2	0.5	0.9	0.435	0.00001	0.464	0.835
8.63	0.1	0.5	0.9	0.335	0.00001	0.452	0.814

#### 4.2.2 Perhitungan Kecepatan Partikel Air Akibat Pengaruh Gelombang

Kecepatan partikel akibat gelombang dapat dicari dengan dengan mengolah data gelombang menggunakan spektra gelombang. Spektra gelombang yang sesuai dengan kondisi laut Indonesia yang berbatas pulau – pulau (tertutup) yaitu spektra JONSWAP. Data gelombang seperti kedalaman, tinggi gelombang

signifikan ( $H_s$ ), periode puncak ( $T_p$ ), dan periode gelombang signifikan ( $T_s$ ) diolah untuk mencari parameter spektra JONSWAP seperti frekuensi puncak gelombang ( $\omega_p$ ), fungsi distribusi ( $\phi$ ), *peakedness parameter* ( $\gamma$ ), dan konstanta *generalised Philips* ( $\alpha$ ). Hasil perhitungan parameter spektra JONSWAP ditampilkan pada Tabel 4.9 berikut:

**Tabel 4.9** Parameter JONSWAP

Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 Tahun	100 Tahun	
Tinggi Gelombang Signifikan	$H_s$	1.08	4.17	m
Periode Gelombang Signifikan	$T_s$	5.51	9.0345	s
Periode Puncak Gelombang	$T_p$	5.80	9.51	s
Percepatan Gravitasi	$g$	9.81		m/s
Kedalaman	$h$	56.77		m
Frekuensi Gelombang Signifikan	$\omega_s$	1.14	0.70	rad/s
Frekuensi Puncak Gelombang	$\omega_p$	1.08	0.66	rad/s
Fungsi Ditribusi	$\phi$	5.58	4.66	-
<i>Peakedness Parameter</i>	$\gamma$	1.00	1.48	-
Konstanta <i>Generalised Philips</i>	$\alpha$	0.0052	0.0095	-

Setelah parameter JONSWAP didapatkan, langkah selanjutnya adalah menentukan angka gelombang. Angka gelombang merupakan salah satu variable yang digunakan untuk mentransformasi kecepatan gelombang di permukaan laut menjadi kecepatan partikel gelombang disekitar pipa (dasar laut), didapatkan dengan cara iterasi. Hasil perhitungan iterasi angka gelombang ditampilkan dalam Tabel 4.10 berikut:

**Tabel 4.10** Perhitungan Angka Gelombang

Angka Gelombang				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 Tahun	100 Tahun	
Angka Gelombang	$k_w$	0.120	0.045	-

Setelah angka gelombang didapat, langkah selanjutnya adalah menentukan spektrum gelombang dan transformasi gelombang dengan Persamaan (2.6) dan (2.10). Kemudian menentukan momen spektrum dengan metode *Simpson 1*. Rumus perhitungan momen spektrum orde ke-n telah di jelaskan pada Persamaan (2.13). Hasil perhitungan momen spektrum ditampilkan pada Tabel 4.11 berikut :

**Tabel 4.11** Perhitungan Nilai Momen Spektra

Momen Spektra Gelombang		
Rumus	Nilai	
	10 Tahun	100 Tahun
$M0 = 1/3 \times \Delta w \times \Sigma M0$	5.5E-07	1.9E-02
$M1 = 1/3 \times \Delta w \times \Sigma M1$	7.6E-07	1.9E-02
$M2 = 1/3 \times \Delta w \times \Sigma M2$	1.1E-06	2.2E-02
$M4 = 1/3 \times \Delta w \times \Sigma M4$	2.7E-06	3.8E-02

Momen spektrum yang telah didapat digunakan untuk menghitung kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa ( $U_s$ ). Untuk variable *reduction factor* ditentukan menggunakan grafik. Dengan mengalikan kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa dengan *reduction factor* akan didapatkan kecepatan partikel air akibat gelombang ( $U_w$ ). Hasil Perhitungan kecepatan arus signifikan dan beberapa variable lainnya dicantumkan pada Tabel 4.12 berikut :

**Tabel 4.12** Hasil Perhitungan Kecepatan Partikel Air Akibat Pengaruh Gelombang

Kecepatan Partikel Air Akibat Gelombang				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 tahun	100 Tahun	
Kec. Arus Signifikan pada Elevasi Pipa	$U_s$	0.00148	0.2747	m/s
Mean Zero-Up Crossing Period	$T_u$	4.417	5.955	s
Reduction Factor	$R_D$	0.95		-
Kecepatan Partikel Air Akibat Gelombang	$U_w$	0.00141	0.2609	m/s

### 4.3 Perhitungan Massa Efektif Pipa

Pada analisis data (Tabel 4.7) berat terendam pipa telah dilakukan pada analisis sebelumnya sehingga langkah selanjutnya adalah menghitung massa efektif

pipa. Masa efektif pipa didapatkan dari penambahan berat pipa, berat concrete dan berat coating dengan massa tambah (Persamaan 2.23). Massa efektif nantinya akan dibutuhkan untuk memperhitungkan frekuensi natural dari pipa. Hasil Perhitungan massa efektif ditampilkan pada Tabel 4.13 berikut:

**Tabel 4.13** Massa Efektif Pipa

Perhitungan Massa Efektif						
Panjang Span Aktual	Gap (e)	Rasio (e/D <sub>t</sub> )	Added Mass Coefficient (C <sub>a</sub> )	Massa Bouyancy	Massa Tambah	Massa Efektif (m <sub>e</sub> )
m	m	-	-	kg/m	kg/m	kg.m
5.38	0.3	0.64	1.06	177.23	188.06	522.80
2.88	0.3	0.64	1.06	177.23	188.06	522.80
12.87	0.5	1.07	1.00	177.23	177.23	511.97
3.61	0.3	0.64	1.06	177.23	188.06	522.80
19.15	0.3	0.64	1.06	177.23	188.06	522.80
6.88	0.3	0.64	1.06	177.23	188.06	522.80
6.98	0.3	0.64	1.06	177.23	188.06	522.80
7.44	0.5	1.07	1.00	177.23	177.23	511.97
16.08	0.3	0.64	1.06	177.23	188.06	522.80
4.39	0.3	0.64	1.06	177.23	188.06	522.80
7.68	0.3	0.64	1.06	177.23	188.06	522.80
12.11	0.3	0.64	1.06	177.23	188.06	522.80
11.89	0.3	0.64	1.06	177.23	188.06	522.80
11.38	0.5	1.07	1.00	177.23	177.23	511.97
10.63	0.5	1.07	1.00	177.23	177.23	511.97
10.41	0.3	0.64	1.06	177.23	188.06	522.80
15.54	0.7	1.49	1.00	177.23	177.23	511.97
6.73	0.3	0.64	1.06	177.23	188.06	522.80
12.65	0.2	0.43	1.19	177.23	211.05	545.79
8.63	0.1	0.21	1.45	177.23	257.76	592.50

#### 4.4 Analisis Vortex Induced Vibrations (VIV)

Analisis Parameter VIV dilakukan sebelum analisis dinamis untuk mengetahui bentuk aliran yang terjadi pada pipa. Beberapa parameter VIV yang

perlu dianalisis diantaranya adalah *Reynolds Number* ( $Re$ ), *Stability Parameter* ( $K_s$ ), *Reduced Velocity* ( $Re$ ), dan *Keulegan Carpenter* ( $KC$ ). Beberapa parameter awal perhitungan ditampilkan pada Tabel 4.14 berikut :

**Tabel 4.14** Parameter Perhitungan Komponen VIV

Data Parameter VIV				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
Viskositas Kinematis Air Laut	$V_k$	0.00000102		$m^2/s$
Diameter Total Pipa	$D_t$	0.469		m
Densitas Air Laut	$\rho_w$	1025		$kg/m^3$
<i>Soil Damping</i>	$\zeta_{soil}$	0.01		-
<i>Structural Damping</i>	$\zeta_{str}$	0.025		-
Kekasaran Permukaan Pipa	k	0.003		m
Rasio k/Dt	$k/D_t$	0.006		-
Frekuensi Gelombang Signifikan	$\omega_s$	1.140	0.695	rad/s
Frekuensi Natural	$f_n$	0.426		-

#### 4.4.1 Perhitungan *Reynolds Number* ( $Re$ )

Untuk perhitungan *Reynolds number* menggunakan Persamaan 2.32. perhitungan *reynolds number* ini akan menggambarkan bentuk aliran yang ada di belakang pipa yang telah dijelaskan pada Gambar 2.4. Berikut ini merupakan hasil perhitungan *reynolds number* ditampilkan pada Tabel 4.15 berikut :

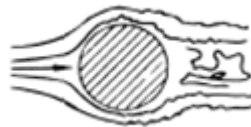
**Tabel 4.15** Hasil Perhitungan *Reynolds Number*

Hasil Perhitungan <i>Reynolds Number</i>							
Panjang Aktual Span	Gap (e)	$U_c$		$U_w$		$Re$	
		10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun
m	m	m/s	m/s	m/s	m/s	-	-
5.38	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
2.88	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
12.87	0.5	0.487	0.876	0.002	0.363	2.25E+05	5.69E+05
3.61	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
19.15	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
6.88	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
6.98	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
7.44	0.5	0.487	0.876	0.002	0.363	2.25E+05	5.69E+05
16.08	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05



Hasil Perhitungan Reynolds Number							
Panjang Aktual Span	Gap ( e )	U <sub>c</sub>		U <sub>w</sub>		R <sub>e</sub>	
		10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun
m	m	m/s	m/s	m/s	m/s	-	-
4.39	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
7.68	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
12.11	0.3	0.473	0.851	0.007	0.363	2.20E+05	5.58E+05
11.89	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
11.38	0.5	0.487	0.876	0.002	0.363	2.25E+05	5.69E+05
10.63	0.5	0.487	0.876	0.002	0.363	2.25E+05	5.69E+05
10.41	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
15.54	0.7	0.497	0.895	0.002	0.363	2.30E+05	5.78E+05
6.73	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
12.65	0.2	0.464	0.835	0.002	0.363	2.14E+05	5.51E+05
8.63	0.1	0.452	0.814	0.002	0.363	2.09E+05	5.41E+05

Dari Perhitungan diatas didapatkan bahwa nilai reynolds number dikisaran angka  $3 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$  sehingga aliran yang terjadi merupakan perubahan aliran laminar ke aliran turbulen, bentuk aliran yang terjadi adalah sebagai berikut



#### 4.4.2 Perhitungan Stability Parameter (Ks)

Perhitungan *stability parameter* menggunakan Persamaan 2.33. Perhitungan *stability parameter* ini akan mempengaruhi nilai *reduced velocity*. Hasil perhitungan parameter stabilitas ditampilkan pada Tabel 4.16 berikut :

**Tabel 4.16** Hasil Perhitungan *Stability Parameter*

Hasil Perhitungan Stability Parameter				
Panjang Aktual Span	Gap ( e )	Massa Efektif ( m <sub>e</sub> )	K <sub>s</sub>	K <sub>sd</sub>
m	m	kg.m		-
5.38	0.3	522.80	1.020	0.785
2.88	0.3	522.80	1.020	0.785

<b>Hasil Perhitungan <i>Stability Parameter</i></b>				
Panjang Aktual Span	Gap ( e )	Massa Efektif ( $m_e$ )	$K_s$	$K_{sd}$
m	m	kg.m		-
12.87	0.5	511.97	0.999	0.768
3.61	0.3	522.80	1.020	0.785
19.15	0.3	522.80	1.020	0.785
6.88	0.3	522.80	1.020	0.785
6.98	0.3	522.80	1.020	0.785
7.44	0.5	511.97	0.999	0.768
16.08	0.3	522.80	1.020	0.785
4.39	0.3	522.80	1.020	0.785
7.68	0.3	522.80	1.020	0.785
12.11	0.3	522.80	1.020	0.785
11.89	0.3	522.80	1.020	0.785
11.38	0.5	511.97	0.999	0.768
10.63	0.5	511.97	0.999	0.768
10.41	0.3	522.80	1.020	0.785
15.54	0.7	511.97	0.999	0.768
6.73	0.3	522.80	1.020	0.785
12.65	0.2	545.79	1.065	0.819
8.63	0.1	592.50	1.156	0.889

#### 4.4.3 Perhitungan *Reduced Velocity* ( $V_R$ )

Parameter ini bisa dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.34. Nilai reduced velocity ini juga bisa menentukan pipa terjadi VIV. Hasil perhitungannya ditampilkan pada Tabel 4.17 berikut :

**Tabel 4.17** Hasil Perhitungan *Stability Parameter*

<b>Hasil Perhitungan <i>Reduced Velocity</i></b>					
Panjang Aktual Span	$U_c$		$U_w$		Vrd
	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	
m	m/s	m/s	m/s	m/s	
5.38	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
2.88	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
12.87	0.487	0.876	0.002	0.363	6.192
3.61	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
19.15	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067

<b>Hasil Perhitungan <i>Reduced Velocity</i></b>					
Panjang Aktual Span	$U_c$		$U_w$		Vrd
	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	
m	m/s	m/s	m/s	m/s	
6.88	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
6.98	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
7.44	0.487	0.876	0.002	0.363	6.192
16.08	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
4.39	0.473	0.851	0.002	0.363	6.068
7.68	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
12.11	0.473	0.851	0.007	0.363	6.067
11.89	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
11.38	0.487	0.876	0.002	0.363	6.192
10.63	0.487	0.876	0.002	0.363	6.192
10.41	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
15.54	0.497	0.895	0.002	0.363	6.286
6.73	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
12.65	0.464	0.835	0.002	0.363	5.986
8.63	0.452	0.814	0.002	0.363	5.884

Dari hasil perhitungan reduced velocity nilainya berada pada angka  $> 2.3$  yang dikategorikan bisa menyebabkan pipa mengalami getaran dan terjadi VIV.

#### 4.4.4 Perhitungan *Keulegan Carpenter (KC)*

Bilangan keulegan carpenter merupakan parameter yang dapat menentukan perubahan jenis aliran partikel air (laminar / turbulen) pada silinder di bawah air. Parameter ini bisa dihitung dengan Persamaan 2.35. Hasil perhitungan keulegan carpenter ditampilkan pada Tabel 4.18 berikut:

**Tabel 4.18** Hasil Perhitungan *Keulegan Carpenter*

<b>Hasil Perhitungan <i>Keulegan-Carpenter</i></b>						
Panjang Aktual Span	$\omega_s$		$U_w$		KC	
	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun
m	rad/s	rad/s	m/s	m/s	-	-
5.38	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
2.88	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
12.87	1.140	0.695	0.002	0.363	0.005	1.112

<b>Hasil Perhitungan Keulegan-Carpenter</b>						
Panjang Aktual Span	$\omega_s$		$U_w$		KC	
	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun
m	rad/s	rad/s	m/s	m/s	-	-
3.61	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
19.15	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
6.88	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
6.98	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
7.44	1.140	0.695	0.002	0.363	0.005	1.112
16.08	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
4.39	1.140	0.695	0.002	0.363	0.005	1.112
7.68	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
12.11	1.140	0.695	0.007	0.363	0.012	1.111
11.89	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
11.38	1.140	0.695	0.002	0.363	0.005	1.112
10.63	1.140	0.695	0.002	0.363	0.005	1.112
10.41	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
15.54	1.140	0.695	0.002	0.363	0.005	1.112
6.73	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
12.65	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
8.63	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111

#### 4.5 Analisis Gaya Hidrodinamis

Perhitungan gaya hidrodinamis ini dilakukan untuk mengetahui besar gaya yang diakibatkan oleh arus dan gelombang laut terhadap pipa. Gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa adalah gaya *drag* dan gaya angkat (*lift*).

##### 4.5.1 Perhitungan Gaya Lift ( $F_L$ )

Gaya lift ini muncul akibat adanya perbedaan tekanan aliran yang bisa mengakibatkan pipa terangkat. Perhitungan gaya lift atau gaya angkat bisa menggunakan Persamaan 2.37. Hasil perhitungan gaya lift ditampilkan pada Tabel 4.19 berikut:

**Tabel 4.19** Hasil Perhitungan Gaya Lift

Hasil Perhitungan Gaya Lift							
Panjang Aktual Span	Gap ( e )	Utot		Lift Coefficient (CL)		Lift Force	
		10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun
m	m	m/s	m/s	-	-	N/m	N/m
5.38	0.3	0.475	1.214	0.76	0.7	41.463	247.793
2.88	0.3	0.475	1.214	0.76	0.7	41.463	247.793
12.87	0.5	0.489	1.239	0.75	0.7	43.178	258.098
3.61	0.3	0.475	1.214	0.76	0.7	41.463	247.793
19.15	0.3	0.475	1.214	0.76	0.7	41.463	247.793
6.88	0.3	0.475	1.214	0.76	0.7	41.463	247.793
6.98	0.3	0.475	1.214	0.76	0.7	41.463	247.793
7.44	0.5	0.489	1.239	0.75	0.7	43.178	258.098
16.08	0.3	0.475	1.214	0.76	0.7	41.463	247.793
4.39	0.3	0.475	1.214	0.76	0.7	41.464	247.846
7.68	0.3	0.475	1.214	0.76	0.7	41.463	247.793
12.11	0.3	0.479	1.214	0.76	0.7	42.207	247.793
11.89	0.3	0.475	1.214	0.76	0.7	41.463	247.793
11.38	0.5	0.489	1.239	0.75	0.7	43.178	258.098
10.63	0.5	0.489	1.239	0.75	0.7	43.178	258.098
10.41	0.3	0.475	1.214	0.76	0.7	41.463	247.793
15.54	0.7	0.499	1.257	0.74	0.7	44.468	266.004
6.73	0.3	0.475	1.214	0.76	0.7	41.463	247.793
12.65	0.2	0.466	1.197	0.77	0.7	40.340	241.225
8.63	0.1	0.455	1.177	0.78	0.7	38.918	233.057

#### 4.5.2 Perhitungan Gaya Drag ( $F_D$ )

Gaya drag merupakan gaya yang bekerja dengan arah horizontal. Gaya drag bisa dihitung dengan Persamaan 2.38 dimana pada persamaan tersebut terdapat koefisien gaya drag yang bisa dicari dengan Persamaan 2.39. untuk hasil perhitungan gaya drag ditampilkan pada Tabel 4.20 berikut:

**Tabel 4.20** Hasil Perhitungan Gaya Drag

Hasil Perhitungan Gaya Drag				
Panjang Aktual Span	Gap (e)	Coefficient Drag (CD)	Utot	Drag Force (FD)
m	m	-	m/s	N/m
5.38	0.30	1.280	1.214	453.060
2.88	0.30	1.280	1.214	453.060
12.87	0.50	1.256	1.239	463.058
3.61	0.30	1.280	1.214	453.060
19.15	0.30	1.280	1.214	453.060
6.88	0.30	1.280	1.214	453.060
6.98	0.30	1.280	1.214	453.060
7.44	0.50	1.256	1.239	463.058
16.08	0.30	1.280	1.214	453.060
4.39	0.30	1.280	1.214	453.156
7.68	0.30	1.280	1.214	453.060
12.11	0.30	1.280	1.214	453.060
11.89	0.30	1.280	1.214	453.060
11.38	0.50	1.256	1.239	463.058
10.63	0.50	1.256	1.239	463.058
10.41	0.30	1.280	1.214	453.060
15.54	0.70	1.256	1.257	477.242
6.73	0.30	1.280	1.214	453.060
12.65	0.20	1.331	1.197	458.594
8.63	0.10	1.434	1.177	477.507

#### 4.6 Analisis Dinamis *Free Span*

Pada analisis dinamis *free span* hal utama yang menjadi perhitungan adalah frekuensi natural pipa. Sesuai dengan DNV RP F105, nilai frekuensi natural akan dilakukan screening untuk menentukan apakah pipa dalam keadaan aman atau kritis. Screening dilakukan dari arah *inline* maupun *crossflow*. Sebelum masuk pada perhitungan frekuensi natural pipa ada beberapa variable pendukung yang perlu dihitung terlebih dahulu seperti *Concrete Stiffness Factor* (CSF), Panjang Span Efektif ( $L_{eff}$ ), *Effective Axial Force* ( $S_{eff}$ ), *Critical Buckling* ( $P_{cr}$ ), dan Defleksi. Untuk Panjang Maksimum Span pada arah *Inline* dan *crossflow* juga dapat diketahui ketika nilai dari frekuensi natural sudah didapatkan. Untuk batasan

daripada analisis dinamis free span ini adalah penggunaan tumpuan *pinned-pinned* yang nantinya akan mempengaruhi nilai dari boundary conditionnya.

#### 4.6.1 Perhitungan Concrete Stiffness Factor (CSF)

Concrete Stiffness Factor (CSF) menunjukkan kekakuan selimut beton relatif terhadap kekakuan pipa baja. sebelum mencari nilai CSF berikut merupakan parameter awal perhitungan CSF ditampilkan pada Tabel 4.21 berikut:

**Tabel 4.21** Parameter Perhitungan CSF

<b>Parameter Concrete Stiffness Factor</b>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Konstanta Empiris (Asphalt)	$k_C$	0.33	-
Momen Inersia Pipa Baja	$I_{st}$	$2.2 \times 10^{-4}$	$m^4$
Momen Inersia Selimut Beton	$I_{conc}$	$1.48 \times 10^{-3}$	$m^4$
Young's Modulus Pipa Baja	$E_{st}$	207000	Mpa
Kekuatan Material Selimut Beton	$f_{cn}$	45	Mpa

Kemudian untuk perhitungan nilai CSF bisa menggunakan Persamaan 2.47. untuk hasil perhitungannya ditampilkan pada Tabel 4.22 berikut :

**Tabel 4.22** Hasil Perhitungan CSF

<b>Hasil Perhitungan Concrete Stiffness Factor</b>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Young Modulus Selimut Beton	$E_{conc}$	31330.24	Mpa
Concrete Stiffness Factor	CSF	0.330	-

#### 4.6.2 Perhitungan Effective Axial Force ( $S_{eff}$ )

Pada perhitungan *Effective Axial Force* ada beberapa parameter perhitungan awal yang harus dipenuhi, diantaranya ditampilkan pada Tabel 4.23 berikut :

**Tabel 4.23** Parameter Perhitungan  $S_{eff}$

<b>Parameter Perhitungan Effective Axial Force</b>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Perbedaan tekanan	$\Delta P$	9.36E+06	Pa
Poisson's ratio baja	$\nu_{st}$	0.30	-

<b>Parameter Perhitungan <i>Effective Axial Force</i></b>			
<b>Parameter</b>	<b>Notasi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>
Diameter dalam pipa	$D_i$	0.33	m
Luas penampang internal pipa baja	$A_i$	0.08	$m^2$
Luas penampang pipa baja	$A_{st}$	1.50E-02	$m^2$
Koefisien <i>thermal expansion</i>	$\alpha_e$	1.17E-05	$^{\circ}C$
Temperatur Operasi	$T_1$	65.00	$^{\circ}C$
Temperatur air laut	$T_0$	25.00	$^{\circ}C$
<i>Young's modulus</i> pipa baja	$E_{st}$	2.07E+11	Pa

Untuk nilai  $S_{eff}$  bisa dicari dengan Persamaan 2.50. Hasil perhitungannya ditampilkan pada Tabel 4.24 berikut :

**Tabel 4.24** Hasil Perhitungan  $S_{eff}$

<b><i>Effective Axial Force</i></b>			
<b>Parameter</b>	<b>Notasi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>
Effective Axial Force	$S_{eff}$	-1.77E+06	N

#### 4.6.3 Perhitungan Critical Buckling ( $P_{cr}$ )

*Critical Buckling* merupakan kemampuan pipa menahan beban dan tekanan sebelum terjadinya *buckling*. Untuk menghitung nilai  $P_{cr}$  ada beberapa parameter awal perhitungan yang harus dipenuhi. Salah satunya adalah boundary condition, pada DNV RP F105 mensyaratkan pipa dengan tumpuan *pinned-pinned* panjang span efektif diganti dengan panjang span aktual ( $L_{eff} = L$ ). parameter perhitungan *critical buckling* ditampilkan pada Tabel 4.25 berikut :

**Tabel 4.25** Parameter Perhitungan  $P_{cr}$

<b>Parameter</b>	<b>Notasi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>
<i>Concrete stiffness factor</i>	CSF	0.330	-
<i>Young's modulus</i> pipa baja	$E_{st}$	2.07E+11	Pa
momen inersia pipa baja	$I_{st}$	2.24E-04	$m^4$
Boundary condition	$C_2$	1.00	-

Untuk perhitungan nilai critical buckling dapat dilihat pada Persamaan 2.51. Hasil perhitungannya ditampilkan pada Tabel 4.26 berikut :



**Tabel 4.26** Hasil Perhitungan Pcr

<b>Hasil Perhitungan <i>Critical Buckling</i></b>		
<b>Panjang Aktual Span</b>	<b>Pcr <i>In-Line</i></b>	<b>Pcr <i>Crossflow</i></b>
m	N	N
5.38	2.10E+07	2.10E+07
2.88	7.34E+07	7.34E+07
12.87	3.67E+06	3.67E+06
3.61	4.67E+07	4.67E+07
19.15	1.66E+06	1.66E+06
6.88	1.29E+07	1.29E+07
6.98	1.25E+07	1.25E+07
7.44	1.10E+07	1.10E+07
16.08	2.35E+06	2.35E+06
4.39	3.16E+07	3.16E+07
7.68	1.03E+07	1.03E+07
12.11	4.15E+06	4.15E+06
11.89	4.31E+06	4.31E+06
11.38	4.70E+06	4.70E+06
10.63	5.39E+06	5.39E+06
10.41	5.62E+06	5.62E+06
15.54	2.52E+06	2.52E+06
6.73	1.34E+07	1.34E+07
12.65	3.80E+06	3.80E+06
8.63	8.17E+06	8.17E+06

#### 4.6.4 Perhitungan Defleksi ( $\delta$ )

Defleksi diakibatkan oleh tekanan dan gaya yang bekerja mengenai pipa selama masa operasi. Analisis defleksi yang dilakukan arah *inline* dan arah *crossflow*. Untuk menghitung nilai defleksi pada pipa dapat menggunakan Persamaan 2.52. Untuk hasil perhitungan defleksi pada arah *inline* maupun *crossflow* ditampilkan pada Tabel 4.27 berikut:

**Tabel 4.27** Hasil Perhitungan Defleksi

<b>Hasil Perhitungan Defleksi</b>					
<b>Panjang Aktual Span</b>	<b>Pcr <i>In-Line</i></b>	<b>Pcr <i>Crossflow</i></b>	<b>F<sub>tot</sub></b>	<b>Defleksi <i>In-Line</i></b>	<b>Defleksi <i>Crossflow</i></b>
<b>m</b>	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>N/m</b>	<b>m</b>	<b>m</b>
5.38	2.10E+07	2.10E+07	453.060	0.000	0.000
2.88	7.34E+07	7.34E+07	453.060	0.000	0.000
12.87	3.67E+06	3.67E+06	463.058	0.005	0.017
3.61	4.67E+07	4.67E+07	453.060	0.000	0.000
19.15	1.66E+06	1.66E+06	453.060	-0.198	-0.675
6.88	1.29E+07	1.29E+07	453.060	0.000	0.001
6.98	1.25E+07	1.25E+07	453.060	0.000	0.001
7.44	1.10E+07	1.10E+07	463.058	0.000	0.001
16.08	2.35E+06	2.35E+06	453.060	0.026	0.088
4.39	3.16E+07	3.16E+07	453.156	0.000	0.000
7.68	1.03E+07	1.03E+07	453.060	0.000	0.001
12.11	4.15E+06	4.15E+06	453.060	0.004	0.012
11.89	4.31E+06	4.31E+06	453.060	0.003	0.011
11.38	4.70E+06	4.70E+06	463.058	0.003	0.009
10.63	5.39E+06	5.39E+06	463.058	0.002	0.006
10.41	5.62E+06	5.62E+06	453.060	0.002	0.006
15.54	2.52E+06	2.52E+06	477.242	0.020	0.064
6.73	1.34E+07	1.34E+07	453.060	0.000	0.001
12.65	3.80E+06	3.80E+06	458.594	0.005	0.016
8.63	8.17E+06	8.17E+06	477.507	0.001	0.002

#### **4.6.5 Perhitungan Frekuensi *Vortex Shedding* dan Frekuensi Natural**

Frekuensi vortex shedding dapat dicari dengan Persamaan 2.36. Untuk nilai frekuensi natural pipa dapat dicari dari Persamaan 2.53 dengan parameter yang telah dihitung sebelumnya. Keduanya antara Frekuensi vortex shedding dengan frekuensi natural nantinya akan dijadikan screening kriteria pipa mengalami VIV atau tidak. Untuk hasil perhitungan frekuensi vortex shedding dan frekuensi natural ditampilkan pada Tabel 4.28 berikut :

**Tabel 4.28** Hasil Perhitungan Frekuensi Natural

Perhitungan Frekuensi Natural			
Panjang Aktual Span	Vortex Shedding ( $f_s$ )	Frekuensi Natural ( $f_{n\ il}$ )	Frekuensi Natural ( $f_{n\ cf}$ )
m	Hz	Hz	Hz
5.4	0.52	17.83	17.83
2.9	0.52	64.22	64.22
12.9	0.53	2.37	2.37
3.6	0.52	40.59	40.59
19.2	0.52	0.41	1.86
6.9	0.52	10.58	10.58
7.0	0.52	10.25	10.25
7.4	0.53	9.02	9.02
16.1	0.52	1.05	1.10
4.4	0.52	27.19	27.19
7.7	0.52	8.32	8.32
12.1	0.52	2.79	2.79
11.9	0.52	2.93	2.93
11.4	0.53	3.32	3.32
10.6	0.53	3.95	3.95
10.4	0.52	4.12	4.12
15.5	0.54	1.24	1.26
6.7	0.52	11.09	11.09
12.7	0.51	2.41	2.41
8.63	0.50	6.02	6.02

#### 4.6.6 Perhitungan Panjang Maksimum Span

Panjang maksimum span ini merupakan batas span yang diijinkan untuk menghindari kegagalan pada pipa. Analisis dilakukan baik dari arah *inline* maupun *crossflow*. Panjang maksimum span pada arah *inline* dan *crossflow* dapat dihitung dengan Persamaan 2.54 dan Persamaan 2.55. Hasil perhitungan panjang maksimum span ditampilkan pada Tabel 4.29 berikut :

**Tabel 4.29** Hasil Perhitungan Frekuensi Natural

<b>Hasil Perhitungan Panjang Maksimum Span</b>		
Panjang Aktual Span	Panjang Maksimum Span (Lc IL)	Panjang Maksimum Span (Lc CF)
m	m	m
5.38	91.329	39.550
2.88	173.334	39.550
12.87	33.473	39.591
3.61	137.793	39.550
19.15	13.834	39.550
6.88	70.353	39.550
6.98	69.264	39.550
7.44	65.293	39.591
16.08	22.119	39.550
4.39	112.773	39.552
7.68	62.397	39.550
12.11	36.102	39.550
11.89	37.013	39.550
11.38	39.638	39.591
10.63	43.227	39.591
10.41	43.898	39.550
15.54	24.173	39.469
6.73	72.044	39.550
12.65	33.239	39.240
8.63	51.437	38.589

#### **4.7 Kriteria Screening**

Screening kriteria VIV pada arah crossflow maupun inline perlu dilakukan untuk mengetahui apakah VIV yang terjadi pada pipeline masih dalam batas aman kriteria DNV RP F105 atau tidak. Screening kriteria ini nantinya akan menjadi salah satu faktor untuk melakukan mitigasi pada pipeline. Screening kriteria yang dilakukan mengacu pada DNV RP F105 dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 2.56 untuk arah *inline* dan Persamaan 2.57 untuk arah *crossflow*. Hasil Perhitungan untuk kriteria VIV arah *inline* ditampilkan pada Tabel 4.30 berikut :

**Tabel 4.30** Screening Kriteria VIV arah *In-Line*

Panjang Aktual Span	Nilai Kriteria	fn il	Kondisi In-Line
m		Hz	
5.38	2.024	17.83	AMAN
2.88	2.024	64.22	AMAN
12.87	2.108	2.37	AMAN
3.61	2.024	40.59	AMAN
19.15	2.024	0.41	TERJADI VIV
6.88	2.024	10.58	AMAN
6.98	2.024	10.25	AMAN
7.44	2.108	9.02	AMAN
16.08	2.024	1.05	TERJADI VIV
4.39	2.024	27.19	AMAN
7.68	2.024	8.32	AMAN
12.11	2.034	2.79	AMAN
11.89	2.024	2.93	AMAN
11.38	2.108	3.32	AMAN
10.63	2.108	3.95	AMAN
10.41	2.024	4.12	AMAN
15.54	2.153	1.24	TERJADI VIV
6.73	2.024	11.09	AMAN
12.65	1.937	2.41	AMAN
8.63	1.801	6.02	AMAN

Hasil Perhitungan untuk kriteria VIV arah *inline* ditampilkan pada Tabel 4.31 berikut :

**Tabel 4.31** Screening Kriteria VIV arah *Crossflow*

Panjang Aktual Span	Nilai Kriteria	fn cf	Kondisi Crossflow
m		Hz	
5.38	1.274	17.83	AMAN
2.88	1.274	64.22	AMAN
12.87	1.311	2.37	AMAN
3.61	1.274	40.59	AMAN
19.15	1.274	1.86	AMAN
6.88	1.274	10.58	AMAN
6.98	1.274	10.25	AMAN
7.44	1.311	9.02	AMAN

Panjang Aktual Span	Nilai Kriteria	fn cf	Kondisi Crossflow
m		Hz	
16.08	1.274	1.10	TERJADI VIV
4.39	1.274	27.19	AMAN
7.68	1.274	8.32	AMAN
12.11	1.280	2.79	AMAN
11.89	1.274	2.93	AMAN
11.38	1.311	3.32	AMAN
10.63	1.311	3.95	AMAN
10.41	1.274	4.12	AMAN
15.54	1.339	1.26	TERJADI VIV
6.73	1.274	11.09	AMAN
12.65	1.250	2.41	AMAN
8.63	1.219	6.02	AMAN

Berdasarkan hasil screening kriteria di atas, terdapat beberapa titik pipa yang mengalami VIV yaitu pada panjang span 19.15 m pada arah *inline*, pada 16.08 m dan juga 15.54 m terjadi VIV *multi directions*.

Untuk melakukan mitigasi diperlukan screening kriteria lain seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Menurut Guo,dkk. (2005) ada beberapa faktor yang perlu di perhitungkan dalam melakukan mitigasi pada pipeline yang mengalami *free span*. Terdapat 5 faktor yang perlu diperhitungkan seperti ditampilkan pada Tabel (Tabel 2.13). Hasil perhitungannya ditampilkan pada Tabel 4.32 sampai dengan Tabel 4.40 berikut ini:

**Tabel 4.32** Screening Osilasi arah *In-Line*

Screening Kriteria VIV arah <i>In-Line</i>			
Panjang Aktual Span	Vortex Shedding ( $f_s$ )	0.7 x Frekuensi Natural ( $f_{n\ il}$ )	Kondisi <i>In-Line</i>
m	Hz	Hz	
5.38	0.518	12.481	AMAN
2.88	0.518	44.956	AMAN
12.87	0.528	1.659	AMAN
3.61	0.518	28.410	AMAN
19.15	0.518	0.286	OSILASI
6.88	0.518	7.406	AMAN
6.98	0.518	7.178	AMAN

<b>Screening Kriteria VIV arah <i>In-Line</i></b>			
Panjang Aktual Span	Vortex Shedding ( $f_s$ )	0.7 x Frekuensi Natural ( $f_{n\ il}$ )	Kondisi <i>In-Line</i>
m	Hz	Hz	
7.44	0.528	6.313	AMAN
16.08	0.518	0.732	AMAN
4.39	0.518	19.030	AMAN
7.68	0.518	5.826	AMAN
12.11	0.518	1.950	AMAN
11.89	0.518	2.050	AMAN
11.38	0.528	2.326	AMAN
10.63	0.528	2.767	AMAN
10.41	0.518	2.883	AMAN
15.54	0.536	0.865	AMAN
6.73	0.518	7.766	AMAN
12.65	0.510	1.689	AMAN
8.63	0.502	4.214	AMAN

**Tabel 4.33** Screening Osilasi arah *Crossflow*

<b>Screening Kriteria VIV arah <i>Crossflow</i></b>			
Panjang Aktual Span	Vortex Shedding ( $f_s$ )	0.7 x Frekuensi Natural ( $f_{n\ cf}$ )	Kondisi <i>Crossflow</i>
m	Hz	Hz	
5.38	0.518	12.481	AMAN
2.88	0.518	44.956	AMAN
12.87	0.528	1.661	AMAN
3.61	0.518	28.410	AMAN
19.15	0.518	1.299	AMAN
6.88	0.518	7.406	AMAN
6.98	0.518	7.178	AMAN
7.44	0.528	6.313	AMAN
16.08	0.518	0.768	AMAN
4.39	0.518	19.030	AMAN
7.68	0.518	5.826	AMAN
12.11	0.518	1.951	AMAN
11.89	0.518	2.051	AMAN
11.38	0.528	2.327	AMAN
10.63	0.528	2.767	AMAN

<b>Screening Kriteria VIV arah Crossflow</b>			
Panjang Aktual Span	Vortex Shedding ( $f_s$ )	0.7 x Frekuensi Natural ( $f_{n\ cf}$ )	Kondisi Crossflow
m	Hz	Hz	
10.41	0.518	2.884	AMAN
15.54	0.536	0.884	AMAN
6.73	0.518	7.766	AMAN
12.65	0.510	1.690	AMAN
8.63	0.502	4.215	AMAN

**Tabel 4.34** Screening Kriteria Panjang Maksimum Span arah *In-Line*

<b>Screening Kriteria Panjang Maksimum Span arah In-Line</b>		
Panjang Aktual Span	Panjang Span Maksimum <i>In-Line</i>	Kondisi <i>In-Line</i>
m	( $L_c\ IL$ )	
5.38	91.329	AMAN
2.88	173.334	AMAN
12.87	33.473	AMAN
3.61	137.793	AMAN
19.15	13.834	<b>TERJADI VIV</b>
6.88	70.353	AMAN
6.98	69.264	AMAN
7.44	65.293	AMAN
16.08	22.119	AMAN
4.39	112.773	AMAN
7.68	62.397	AMAN
12.11	36.102	AMAN
11.89	37.013	AMAN
11.38	39.638	AMAN
10.63	43.227	AMAN
10.41	43.898	AMAN
15.54	24.173	AMAN
6.73	72.044	AMAN
12.65	33.239	AMAN
8.63	51.437	AMAN



**Tabel 4.35** Screening Kriteria Panjang Maksimum Span arah *Crossflow*

<b>Screening Kriteria Panjang Maksimum Span arah <i>Crossflow</i></b>		
Panjang Aktual Span	Panjang Span Maksimum <i>Crossflow</i>	Kondisi <i>Crossflow</i>
m	(Lc CF)	
5.38	39.550	AMAN
2.88	39.550	AMAN
12.87	39.591	AMAN
3.61	39.550	AMAN
19.15	39.550	AMAN
6.88	39.550	AMAN
6.98	39.550	AMAN
7.44	39.591	AMAN
16.08	39.550	AMAN
4.39	39.552	AMAN
7.68	39.550	AMAN
12.11	39.550	AMAN
11.89	39.550	AMAN
11.38	39.591	AMAN
10.63	39.591	AMAN
10.41	39.550	AMAN
15.54	39.469	AMAN
6.73	39.550	AMAN
12.65	39.240	AMAN
8.63	38.589	AMAN

DNV RP F105 mensyaratkan gaya aksial efektif dibagi dengan nilai *critical buckling* tidak boleh kurang dari -0.5. Hasil analisis screening nilai *critical buckling* ditampilkan pada Tabel 4.36 untuk arah *inline* dan Tabel 4.37 untuk arah *crossflow* berikut :

**Tabel 4.36** Screening Kriteria Nilai *Critical Buckling* arah *Inline*

<b>Screening Kriteria Nilai <i>Critical Buckling</i> arah <i>In-Line</i></b>			
Panjang Aktual Span	Seff/Pcr <i>In-Line</i>	Nilai Batas	Kondisi <i>In-Line</i>
m			
5.38	-0.08	-0.5	AMAN
2.88	-0.02	-0.5	AMAN

<b>Screening Kriteria Nilai Critical Buckling arah <i>In-Line</i></b>			
Panjang Aktual Span	Seff/Pcr <i>In-Line</i>	Nilai Batas	Kondisi <i>In-Line</i>
m			
12.87	-0.48	-0.5	AMAN
3.61	-0.04	-0.5	AMAN
19.15	-1.07	-0.5	TERJADI VIV
6.88	-0.14	-0.5	AMAN
6.98	-0.14	-0.5	AMAN
7.44	-0.16	-0.5	AMAN
16.08	-0.75	-0.5	TERJADI VIV
4.39	-0.06	-0.5	AMAN
7.68	-0.17	-0.5	AMAN
12.11	-0.43	-0.5	AMAN
11.89	-0.41	-0.5	AMAN
11.38	-0.38	-0.5	AMAN
10.63	-0.33	-0.5	AMAN
10.41	-0.31	-0.5	AMAN
15.54	-0.70	-0.5	TERJADI VIV
6.73	-0.13	-0.5	AMAN
12.65	-0.46	-0.5	AMAN
8.63	-0.22	-0.5	AMAN

**Tabel 4.37** Screening Kriteria Nilai *Critical Buckling* arah *Crossflow*

<b>Screening Kriteria Nilai Critical Buckling arah <i>Crossflow</i></b>			
Panjang Aktual Span	Seff/Pcr <i>Crossflow</i>	Nilai Batas	Kondisi <i>Crossflow</i>
m			
5.38	-0.08	-0.5	AMAN
2.88	-0.02	-0.5	AMAN
12.87	-0.48	-0.5	AMAN
3.61	-0.04	-0.5	AMAN
19.15	-1.07	-0.5	TERJADI VIV
6.88	-0.14	-0.5	AMAN
6.98	-0.14	-0.5	AMAN
7.44	-0.16	-0.5	AMAN
16.08	-0.75	-0.5	TERJADI VIV
4.39	-0.06	-0.5	AMAN
7.68	-0.17	-0.5	AMAN

<b>Screening Kriteria Nilai Critical Buckling arah <i>Crossflow</i></b>			
Panjang Aktual Span	Seff/Pcr <i>Crossflow</i>	Nilai Batas	Kondisi <i>Crossflow</i>
m			
12.11	-0.43	-0.5	AMAN
11.89	-0.41	-0.5	AMAN
11.38	-0.38	-0.5	AMAN
10.63	-0.33	-0.5	AMAN
10.41	-0.31	-0.5	AMAN
15.54	-0.70	-0.5	TERJADI VIV
6.73	-0.13	-0.5	AMAN
12.65	-0.46	-0.5	AMAN
8.63	-0.22	-0.5	AMAN

Untuk Screening nilai defleksi dilakukan pada arah inline dan crossflow. Nilai rasio antara defleksi dengan diameter terluar pipa tidak boleh melebihi 2.5. Untuk hasil analisis screening nilai rasio defleksi ditampilkan pada Tabel 4.38 untuk arah *inline* dan Tabel 4.39 untuk arah *crossflow* berikut :

**Tabel 4.38** Screening Kriteria Defleksi arah *Inline*

<b>Screening Kriteria Nilai Defleksi arah <i>In-Line</i></b>			
Panjang Aktual Span	Defleksi <i>In-Line</i> ( $\delta$ )	$\delta$ Inline/D	Kondisi <i>In-Line</i>
m			
5.38	0.000	0.000	AMAN
2.88	0.000	0.000	AMAN
12.87	0.005	0.011	AMAN
3.61	0.000	0.000	AMAN
19.15	-0.198	-0.422	TERJADI VIV
6.88	0.000	0.001	AMAN
6.98	0.000	0.001	AMAN
7.44	0.000	0.001	AMAN
16.08	0.026	0.055	AMAN
4.39	0.000	0.000	AMAN
7.68	0.000	0.001	AMAN
12.11	0.004	0.008	AMAN
11.89	0.003	0.007	AMAN
11.38	0.003	0.006	AMAN

<b>Screening Kriteria Nilai Defleksi arah <i>In-Line</i></b>			
Panjang Aktual Span	Defleksi <i>In-Line</i> ( $\delta$ )	$\delta$ Inline/D	Kondisi <i>In-Line</i>
m			
10.63	0.002	0.004	AMAN
10.41	0.002	0.003	AMAN
15.54	0.020	0.042	AMAN
6.73	0.000	0.000	AMAN
12.65	0.005	0.010	AMAN
8.63	0.001	0.002	AMAN

**Tabel 4.39** Screening Kriteria Defleksi arah *Crossflow*

<b>Screening Kriteria Nilai Defleksi arah <i>Crossflow</i></b>			
Panjang Aktual Span	Defleksi <i>Crossflow</i> ( $\delta$ )	$\delta$ Crossflow/D	Kondisi <i>Crossflow</i>
m			
5.38	0.000	0.001	AMAN
2.88	0.000	0.000	AMAN
12.87	0.017	0.037	AMAN
3.61	0.000	0.000	AMAN
19.15	-0.675	-1.439	TERJADI VIV
6.88	0.001	0.002	AMAN
6.98	0.001	0.002	AMAN
7.44	0.001	0.003	AMAN
16.08	0.088	0.187	AMAN
4.39	0.000	0.000	AMAN
7.68	0.001	0.003	AMAN
12.11	0.012	0.026	AMAN
11.89	0.011	0.024	AMAN
11.38	0.009	0.019	AMAN
10.63	0.006	0.013	AMAN
10.41	0.006	0.012	AMAN
15.54	0.064	0.136	AMAN
6.73	0.001	0.002	AMAN
12.65	0.016	0.033	AMAN
8.63	0.002	0.005	AMAN

Untuk screening kriteria gap (jarak pipa dengan seabed) disyaratkan nilainya harus kurang dari 5 kali diameternya. Hasil analisisnya ditampilkan pada Tabel 4.40 berikut :

**Tabel 4.40** Screening Kriteria Gap

Screening Kriteria Gap			
Panjang Aktual Span	Gap ( e )	5D	Kondisi
m	m		
5.38	0.30	2.345	AMAN
2.88	0.30	2.345	AMAN
12.87	0.50	2.345	AMAN
3.61	0.30	2.345	AMAN
19.15	0.30	2.345	AMAN
6.88	0.30	2.345	AMAN
6.98	0.30	2.345	AMAN
7.44	0.50	2.345	AMAN
16.08	0.30	2.345	AMAN
4.39	0.30	2.345	AMAN
7.68	0.30	2.345	AMAN
12.11	0.30	2.345	AMAN
11.89	0.30	2.345	AMAN
11.38	0.50	2.345	AMAN
10.63	0.50	2.345	AMAN
10.41	0.30	2.345	AMAN
15.54	0.70	2.345	AMAN
6.73	0.30	2.345	AMAN
12.65	0.20	2.345	AMAN
8.63	0.10	2.345	AMAN

#### 4.8 Mitigasi

Setelah melakukan screening kriteria, terdapat 3 titik span yang perlu dilakukan mitigasi. Menurut DNV RP F105, dalam peletakkan *support* minimal adalah 0.5 kali dari panjang span, namun dalam pengaplikasiannya diharapkan semua factor mitigasi dapat terpenuhi. Jarak *support* yang dikonfigurasi pada Tugas Akhir ini adalah berjarak 13 meter antar *support*. Pemilihan jarak *support* berdasarkan nilai panjang maksimum paling minimum yang terjadi pada arah *inline*

maupun *crossflow* agar semua kriteria yang disyaratkan oleh DNV RP F105 dapat terpenuhi. Berikut Tabel 4.41 menyajikan hasil konfigurasi span setelah penambahan *support*.

**Tabel 4.41** Panjang Span Setelah Penambahan Support

<b>Panjang Span dengan Jarak Support 13m</b>			
Panjang Aktual Span	Gap ( e )	Panjang Span Setelah disupport	Panjang Span Setelah disupport
m	m	m	m
5.38	0.30	5.38	-
2.88	0.30	2.88	-
12.87	0.50	12.87	-
3.61	0.30	3.61	-
19.15	0.30	13	6.15
6.88	0.30	6.88	-
6.98	0.30	6.98	-
7.44	0.50	7.44	-
16.08	0.30	13	3.08
4.39	0.30	4.39	-
7.68	0.30	7.68	-
12.11	0.30	12.11	-
11.89	0.30	11.89	-
11.38	0.50	11.38	-
10.63	0.50	10.63	-
10.41	0.30	10.41	-
15.54	0.70	13	2.54
6.73	0.30	6.73	-
12.65	0.20	12.56	-
8.63	0.10	8.63	-

Untuk Panjang span baru setelah dimitigasi penambahan support dianalisis kembali agar memenuhi kriteria yang telah ditetapkan sesuai DNV RP F105. Hasil screening kriteria setelah dilakukan penambahan *support* ditampilkan pada Tabel 4.42 sampai dengan Tabel 4.45 berikut :

**Tabel 4.42** Screening Kriteria VIV Setelah Mitigasi

Screening Kriteria Frekuensi Natural Terhadap U extreme						
Panjang Aktual Span	Nilai Kriteria Inline	Nilai Kriteria Crossflow	fn il	fn cf	Kondisi In-Line	Kondisi Crossflow
m			Hz	Hz		
5.38	2.02	1.27	17.83	17.83	AMAN	AMAN
2.88	2.02	1.27	64.22	64.22	AMAN	AMAN
12.87	2.11	1.31	2.37	2.37	AMAN	AMAN
3.61	2.02	1.27	40.59	40.59	AMAN	AMAN
13.00	2.02	1.27	2.28	2.28	AMAN	AMAN
6.15	2.02	1.27	13.45	13.45	AMAN	AMAN
6.88	2.02	1.27	10.58	10.58	AMAN	AMAN
6.98	2.02	1.27	10.25	10.25	AMAN	AMAN
7.44	2.11	1.31	9.02	9.02	AMAN	AMAN
13.00	2.02	1.27	2.28	2.28	AMAN	AMAN
3.08	2.02	1.27	56.05	56.05	AMAN	AMAN
4.39	2.02	1.27	27.19	27.19	AMAN	AMAN
7.68	2.02	1.27	8.32	8.32	AMAN	AMAN
12.11	2.02	1.27	2.79	2.79	AMAN	AMAN
11.89	2.02	1.27	2.93	2.93	AMAN	AMAN
11.38	2.11	1.31	3.32	3.32	AMAN	AMAN
10.63	2.11	1.31	3.95	3.95	AMAN	AMAN
10.41	2.02	1.27	4.12	4.12	AMAN	AMAN
13.00	2.15	1.34	2.30	2.30	AMAN	AMAN
2.54	2.15	1.34	83.66	83.66	AMAN	AMAN
6.73	2.02	1.27	11.09	11.09	AMAN	AMAN
12.56	1.94	1.25	2.46	2.46	AMAN	AMAN
8.63	1.80	1.22	6.02	6.02	AMAN	AMAN

**Tabel 4.43** Screening Osilasi

Screening Osilasi Setelah Mitigasi					
Panjang Aktual Span	Vortex Shedding (Fs)	0.7 x fn il	0.7 x fn cf	Kondisi In-Line	Kondisi Crossflow
m	Hz				
5.38	0.518	12.481	12.481	AMAN	AMAN
2.88	0.518	44.956	44.956	AMAN	AMAN
12.87	0.528	1.659	1.661	AMAN	AMAN
3.61	0.518	28.410	28.410	AMAN	AMAN
13.00	0.518	1.594	1.596	AMAN	AMAN

<b>Screening Osilasi Setelah Mitigasi</b>					
Panjang Aktual Span	<i>Vortex Shedding (Fs)</i>	0.7 x fn il	0.7 x fn cf	Kondisi In-Line	Kondisi Crossflow
m	Hz				
6.15	0.518	9.416	9.416	AMAN	AMAN
6.88	0.518	7.406	7.406	AMAN	AMAN
6.98	0.518	7.178	7.178	AMAN	AMAN
7.44	0.528	6.313	6.313	AMAN	AMAN
13.00	0.518	1.594	1.596	AMAN	AMAN
3.08	0.518	39.237	39.237	AMAN	AMAN
4.39	0.518	19.030	19.030	AMAN	AMAN
7.68	0.518	5.826	5.826	AMAN	AMAN
12.11	0.518	1.950	1.951	AMAN	AMAN
11.89	0.518	2.050	2.051	AMAN	AMAN
11.38	0.528	2.326	2.327	AMAN	AMAN
10.63	0.528	2.767	2.767	AMAN	AMAN
10.41	0.518	2.883	2.884	AMAN	AMAN
13.00	0.536	1.611	1.612	AMAN	AMAN
2.54	0.536	58.565	58.565	AMAN	AMAN
6.73	0.518	7.766	7.766	AMAN	AMAN
12.56	0.511	1.724	1.725	AMAN	AMAN
8.63	0.502	4.214	4.215	AMAN	AMAN

**Tabel 4.44** Screening Kriteria Panjang Maksimum Span Setelah Mitigasi

<b>Screening Kriteria Panjang Span Maksimum Setelah Mitigasi</b>				
Panjang Aktual Span	Panjang Span Maks Inline	Panjang Span Maks Crossflow	Kondisi In-Line	Kondisi Crossflow
m	m	m		
5.38	91.33	39.55	AMAN	AMAN
2.88	173.33	39.55	AMAN	AMAN
12.87	33.47	39.59	AMAN	AMAN
3.61	137.79	39.55	AMAN	AMAN
13.00	32.64	39.55	AMAN	AMAN
6.15	79.33	39.55	AMAN	AMAN
6.88	70.35	39.55	AMAN	AMAN
6.98	69.26	39.55	AMAN	AMAN
7.44	65.29	39.59	AMAN	AMAN
13.00	32.64	39.55	AMAN	AMAN
3.08	161.93	39.55	AMAN	AMAN
4.39	112.77	39.55	AMAN	AMAN



<b>Screening Kriteria Panjang Span Maksimum Setelah Mitigasi</b>				
Panjang Aktual Span	Panjang Span Maks Inline	Panjang Span Maks Crossflow	Kondisi In-Line	Kondisi Crossflow
m	m	m		
7.68	62.40	39.55	AMAN	AMAN
12.11	36.10	39.55	AMAN	AMAN
11.89	37.01	39.55	AMAN	AMAN
11.38	39.64	39.59	AMAN	AMAN
10.63	43.23	39.59	AMAN	AMAN
10.41	43.90	39.55	AMAN	AMAN
13.00	32.98	39.47	AMAN	AMAN
2.54	198.88	39.47	AMAN	AMAN
6.73	72.04	39.55	AMAN	AMAN
12.56	33.58	39.24	AMAN	AMAN
8.63	51.44	38.59	AMAN	AMAN

**Tabel 4.45** Screening Kriteria *Critical Buckling* Setelah Mitigasi

<b>Screening Kriteria Nilai <i>Critical Buckling</i> Setelah Mitigasi</b>					
Panjang Aktual Span	Seff/Pcr In-Line	Seff/Pcr Crossflow	Nilai Batas	Kondisi In-Line	Kondisi Crossflow
m					
5.38	-0.08	-0.08	-0.50	AMAN	AMAN
2.88	-0.02	-0.02	-0.50	AMAN	AMAN
12.87	-0.48	-0.48	-0.50	AMAN	AMAN
3.61	-0.04	-0.04	-0.50	AMAN	AMAN
13.00	-0.49	-0.49	-0.50	AMAN	AMAN
6.15	-0.11	-0.11	-0.50	AMAN	AMAN
6.88	-0.14	-0.14	-0.50	AMAN	AMAN
6.98	-0.14	-0.14	-0.50	AMAN	AMAN
7.44	-0.16	-0.16	-0.50	AMAN	AMAN
13.00	-0.49	-0.49	-0.50	AMAN	AMAN
3.08	-0.03	-0.03	-0.50	AMAN	AMAN
4.39	-0.06	-0.06	-0.50	AMAN	AMAN
7.68	-0.17	-0.17	-0.50	AMAN	AMAN
12.11	-0.43	-0.43	-0.50	AMAN	AMAN
11.89	-0.41	-0.41	-0.50	AMAN	AMAN
11.38	-0.38	-0.38	-0.50	AMAN	AMAN
10.63	-0.33	-0.33	-0.50	AMAN	AMAN
10.41	-0.31	-0.31	-0.50	AMAN	AMAN
13.00	-0.49	-0.49	-0.50	AMAN	AMAN

Screening Kriteria Nilai <i>Critical Buckling</i> Setelah Mitigasi					
Panjang Aktual Span	Seff/Pcr In-Line	Seff/Pcr Crossflow	Nilai Batas	Kondisi In-Line	Kondisi Crossflow
m					
2.54	-0.02	-0.02	-0.50	AMAN	AMAN
6.73	-0.13	-0.13	-0.50	AMAN	AMAN
12.56	-0.46	-0.46	-0.50	AMAN	AMAN
8.63	-0.22	-0.22	-0.50	AMAN	AMAN

**Tabel 4.46** Screening Kriteria Defleksi Setelah Mitigasi

Screening Kriteria Defleksi Setelah Mitigasi						
Panjang Aktual Span	Defleksi <i>In-Line</i> ( $\delta$ )	Defleksi <i>Crossflow</i> ( $\delta$ )	$\delta$ <i>In-Line</i> /D	$\delta$ <i>Crossflow</i> /D	Kondisi In-Line	Kondisi Crossflow
m	m	m				
5.38	8.7E-05	3.0E-04	1.9E-04	6.4E-04	AMAN	AMAN
2.88	6.7E-06	2.3E-05	1.4E-05	4.9E-05	AMAN	AMAN
12.87	5.2E-03	1.7E-02	1.1E-02	3.7E-02	AMAN	AMAN
3.61	1.7E-05	5.8E-05	3.6E-05	1.2E-04	AMAN	AMAN
13.00	5.4E-03	1.8E-02	1.1E-02	3.9E-02	AMAN	AMAN
6.15	1.5E-04	5.2E-04	3.3E-04	1.1E-03	AMAN	AMAN
6.88	2.5E-04	8.5E-04	5.3E-04	1.8E-03	AMAN	AMAN
6.98	2.6E-04	9.0E-04	5.6E-04	1.9E-03	AMAN	AMAN
7.44	3.6E-04	1.2E-03	7.6E-04	2.5E-03	AMAN	AMAN
13.00	5.4E-03	1.8E-02	1.1E-02	3.9E-02	AMAN	AMAN
3.08	8.9E-06	3.0E-05	1.9E-05	6.4E-05	AMAN	AMAN
4.39	3.8E-05	1.3E-04	8.0E-05	2.7E-04	AMAN	AMAN
7.68	4.0E-04	1.4E-03	8.6E-04	2.9E-03	AMAN	AMAN
12.11	3.6E-03	1.2E-02	7.6E-03	2.6E-02	AMAN	AMAN
11.89	3.2E-03	1.1E-02	6.9E-03	2.4E-02	AMAN	AMAN
11.38	2.6E-03	8.8E-03	5.6E-03	1.9E-02	AMAN	AMAN
10.63	1.9E-03	6.2E-03	4.0E-03	1.3E-02	AMAN	AMAN
10.41	1.6E-03	5.6E-03	3.5E-03	1.2E-02	AMAN	AMAN
13.00	5.7E-03	1.8E-02	1.2E-02	3.9E-02	AMAN	AMAN
2.54	4.3E-06	1.4E-05	9.1E-06	3.0E-05	AMAN	AMAN
6.73	2.3E-04	7.7E-04	4.8E-04	1.6E-03	AMAN	AMAN
12.56	4.4E-03	1.5E-02	9.5E-03	3.2E-02	AMAN	AMAN
8.63	7.1E-04	2.3E-03	1.5E-03	4.9E-03	AMAN	AMAN

Setelah dilakukan mitigasi semua titik span yang sebelumnya terjadi VIV sudah dikategorikan aman, sesuai dengan kriteria yang ditetapkan oleh DNV RP F105.

#### 4.9 Analisis Statis Span

Menurut DNV OS F101 (2000), dalam kriteria ultimate limit state diperlukan 4 moda kegagalan yang harus dipenuhi oleh pipa sehingga pipa tersebut aman dari terjadinya buckling. Kriteria tersebut adalah kriteria tekanan bursting (Persamaan 2.60), kriteria tekanan collapse (Persamaan 2.64), kriteria beban kombinasi (Persamaan 2.65) dan kriteria tekanan perambatan buckling (Persamaan 2.73). Ketika keempat kriteria kegagalan tersebut telah dipenuhi oleh pipa, maka pipa tergolong aman dari terjadinya *buckling*.

Pada kriteria tekanan pengamanan ini, DNV OS F101 telah menetapkan syarat (lihat Persamaan 2.60) bahwa tekanan lokal incidental (tekanan maksimum internal pipeline pada kondisi operasi ekstrim) dikurangi dengan nilai minimum tekanan eksternal, harus lebih kecil dari tekanan burst dibagi dengan safety factornya. Hasil analisis kriteria tekanan bursting ditampilkan pada Tabel 4.46 berikut :

**Tabel 4.47** Kriteria Tekanan *Brusting*

<b>Kriteria Tekanan <i>Brusting</i></b>			
<b>Syarat</b>		<b><math>P_{li} - P_e \leq P_b(t1) / \gamma_m \cdot \gamma_{sc}</math></b>	
<b>Deskripsi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>	<b>Kondisi</b>
P <sub>li</sub> - P <sub>e</sub>	13729163.46	Pa	AMAN
P <sub>b</sub> (t1)	18011054.83	Pa	
P <sub>b</sub> (t1) / $\gamma_m \cdot \gamma_{sc}$	13762554.31	Pa	

Pada analisis kriteria yang kedua, melakukan pengecekan ketahanan pipa terhadap tekanan eksternal, dimana DNV OS F101 mensyaratkan tekanan eksternal maksimum dikurangi dengan tekanan internal minimum yang bekerja pada pipeline, tidak boleh melebihi kapasitas tekanan maksimum eksternal yang dapat diterima oleh pipeline, dimana kapasitas tekanan maksimum pipeline ditandai

dengan nilai tekanan collapsenya (Persamaan 2.63). Hasil analisis kriteria tekanan collapse ditampilkan pada Tabel 4.47 berikut :

**Tabel 4.48** Kriteria Tekanan *Collapse*

<b>Kriteria Tekanan <i>Collapse</i></b>			
<b>Syarat</b>		<b><math>P_e - P_{min} \leq P_c(t) / \gamma_m \cdot \gamma_{sc}</math></b>	
<b>Deskripsi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>	<b>Kondisi</b>
Pe - Pmin	4.46E+01	bar	AMAN
Pc	64.2893846	bar	
Pc(t) / $\gamma_m \cdot \gamma_{sc}$	49.03843219	bar	

Analisis ini selanjutnya adalah analisis kriteria *combined load* yang meliputi beban dari momen bending, gaya axial efektif, tekanan internal maupun tekanan eksternal. ). Sebelum melakukan perhitungan ada beberapa parameter yang harus dipenuhi. Parameter ditampilkan pada Tabel 4.48 berikut :

**Tabel 4.49** Parameter Kriteria *Combined Load*

<b>Parameter</b>	<b>Notasi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>
Faktor tahanan material	$\gamma_m$	1.15	-
Faktor keamanan <i>resistance</i>	$\gamma_{sc}$	1.04	-
Resultan bending moment	$M_{Sd}$	2.14E+05	Nm
Parameter aliran tegangan	$\alpha_c$	1.10	-
Plastic moment resistance	$M_p$	518415.40	Nm
Tebal dinding pipa	$t_2$	12.21	m
Design efective axial force	$S_{Sd}$	81000	N
Tekanan internal	$P_i$	0	Pa
Plastic axial force resistance	$S_p$	4742893.29	N
Faktor tekanan pada beban kombinasi	$\alpha_p$	0.68298918	-
Tekanan eksternal	$P_e$	573149.25	Pa
Tekanan bursting	$P_b$	29568114.1	Pa
Unity Check	UC	0.20334968	$\leq 1$

Hasil analisis kriteria *combined load* ditampilkan pada Tabel 4.49 berikut :

**Tabel 4.50** Kriteria *Combined Load*

<b>Kriteria <i>Combined Load</i></b>			
<b>Syarat</b>		<b>UC ≤ 1</b>	
<b>Deskripsi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>	<b>Kondisi</b>
UC	0.20335	≤ 1	AMAN

Analisis terakhir yaitu kriteria propagation buckling dimana pada kriteria menentukan apakah pipa aman dari terjadinya perambatan buckling. Hasil analisis kriteria *propagation buckling* ditampilkan pada Tabel 4.50 berikut :

**Tabel 4.51** Kriteria Tekanan *Propagation Buckling*

<b>Kriteria Tekanan <i>Propagation Buckling</i></b>			
<b>Syarat</b>		<b>Pe - Pmin ≤ Ppr(t2) / γm.γsc</b>	
<b>Deskripsi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>	<b>Kondisi</b>
Pe - Pmin	19.36790	bar	AMAN
Ppr	23.39776	bar	
Ppr(t2) / γm.γsc	19.56334	bar	

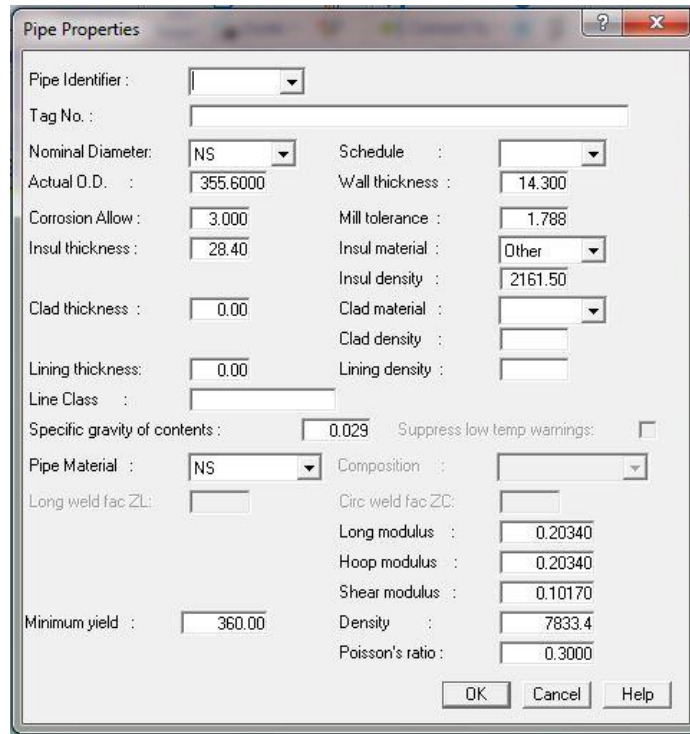
Dari keempat moda kegagalan yang disyaratkan oleh DNV OS F101, pipa tersebut dinyatakan aman dari terjadinya buckling dikarenakan telah memenuhi semua kriteria yang disyaratkan.

#### 4.10 Analisis Tegangan Dengan AUTOPIPE

Pada analisis tegangan pada software AutoPIPE ini akan didapatkan output berupa tegangan hoop, tegangan longitudinal dan tegangan *von mises*. Hasil tersebut untuk mengecek apakah pipa yang dianalisis masih memenuhi tegangan yang diijinkan. Untuk pipa yang dimodelkan merupakan pipa setelah dimitigasi dimana panjang span terpanjangnya adalah 13m dengan gap terbesar 0.7m. berikut merupakan langkah-langkah pemodelan struktur pada software AutoPIPE.

##### 1. Input Data Properti Pipa

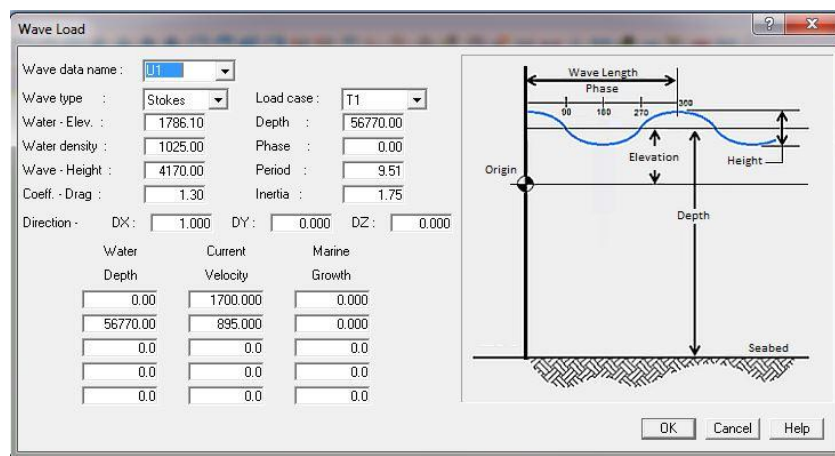
Gambar 4.1 dibawah ini menunjukkan data-data yang diperlukan untuk input properti pipa pada pemodelan di AutoPIPE :



**Gambar 4.1** Input Data Properti Pipa

## 2. Input Pembebanan

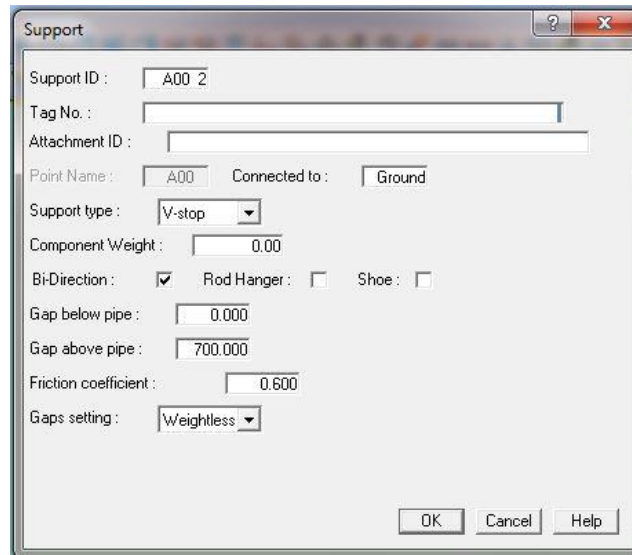
Pembebanan bertujuan untuk mendapatkan tegangan yang bekerja pada struktur yang dianalisis. Pembebanan meliputi buoyancy dan arus. Pembebanan arus dilakukan dengan 4 arah yang disetiap kedalamannya memiliki kecepatan arus yang berbeda. Pembebanan ini merupakan input dari data perhitungan manual yang sebelumnya telah dianalisis. Berikut ditampilkan input pembebanan pada Gambar 4.2:



**Gambar 4.2** Input Data Pembebanan

### 3. Input Data Support

Karena Pipa yang dianalisis mempunyai bentangan maka diperlukan adanya support. Untuk input data support meliputi panjang gap dan koefisien friksi. Berikut ditampilkan input support pada Gambar 4.3 :



**Gambar 4.3** Input Data Support

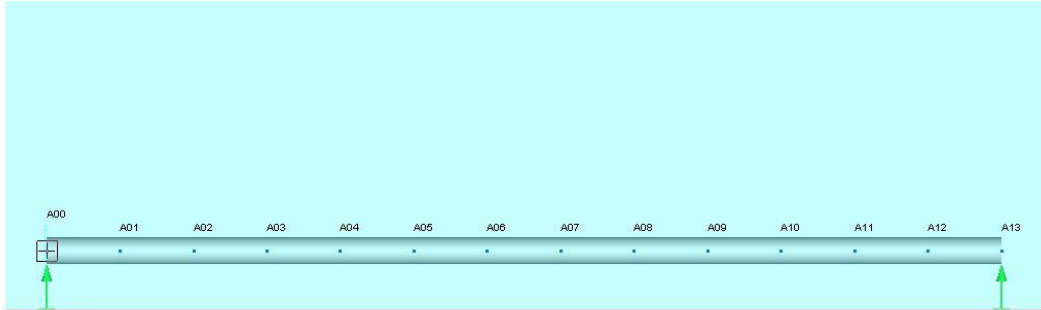
### 4. Hasil Analisis

Analisis yang dilakukan pada software AutoPIPE ini merupakan analisa statis yang outputnya berupa tegangan hoop, tegangan longitudinal dan tegangan von mises. Pada analisis ini didapatkan nilai masing masing tegangan dan nilai tegangan ijinnya, ditampilkan pada Tabel 4.51 berikut :

**Tabel 4.52** Nilai Tegangan Hasil Pemodelan Software AutoPIPE

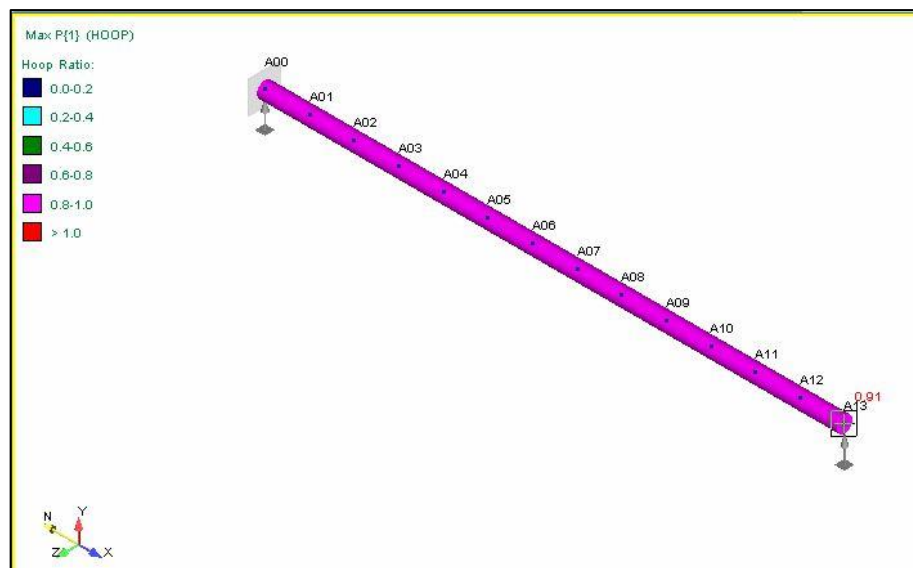
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		Tegangan	Allowable	
Tegangan Hoop	$\sigma_h$	164.55	180.00	N/mm <sup>2</sup>
Tegangan Longitudinal	$\sigma_L$	107.53	208.00	N/mm <sup>2</sup>
Tegangan Von Mises	$\sigma_{eq}$	179.47	324.00	N/mm <sup>2</sup>

Untuk hasil pemodelan menggunakan software AutoPIPE ditampilkan pada Gambar 4.4 sampai dengan Gambar 4.7 berikut:



**Gambar 4.4** Model Pipa Tampak Depan

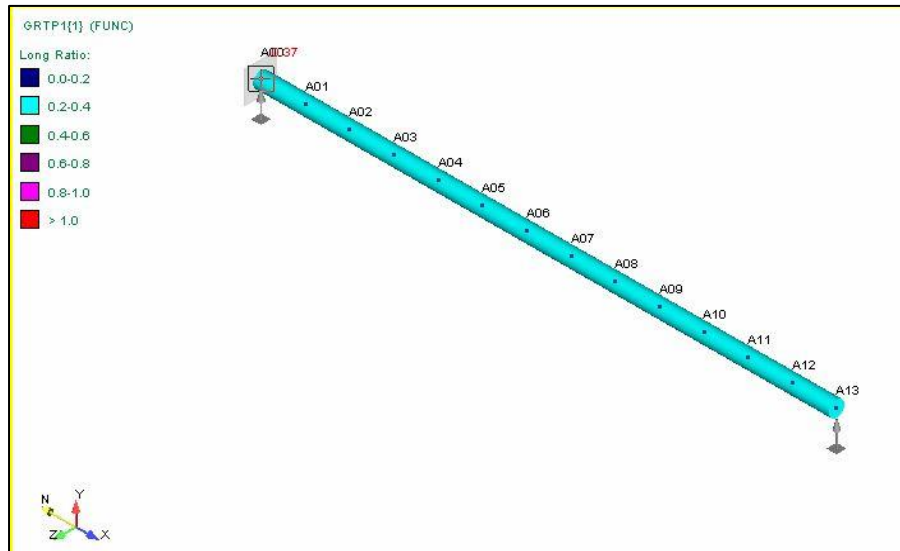
Gambar di atas menunjukkan pipa dengan panjang span aktual 13 m yang disangga oleh support dengan jarak antara pipa dan seabed (gap) sebesar 0.7 m



**Gambar 4.5** Hasil Tegangan Hoop

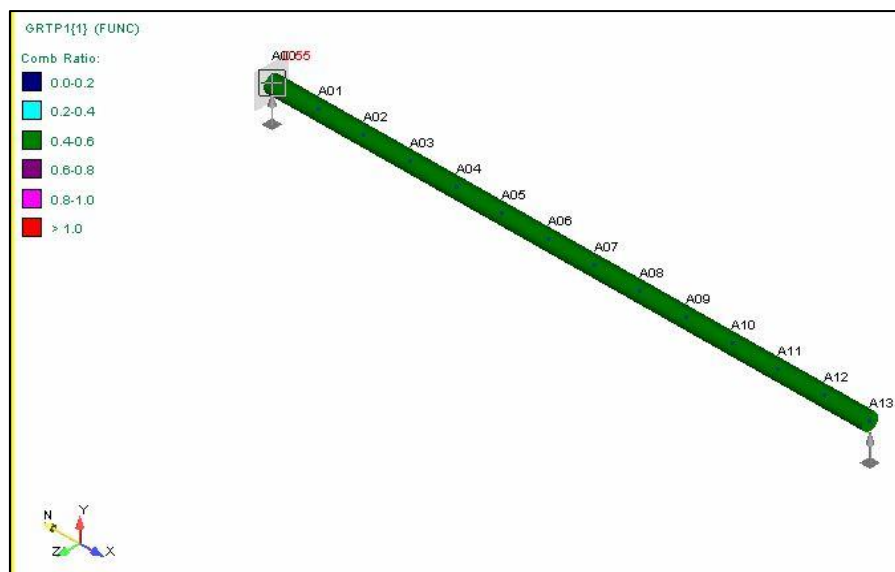
Gambar di atas menunjukkan hasil dari running tegangan hoop dimana nilai dari tegan hoop mendekati nilai tegangan ijinnya. Ditunjukkan dengan warna ungu muda yang merupakan kategori rasio dari keduanya diantara 0.8 s/d 1.0.





**Gambar 4.6** Hasil Tegangan Longitudinal

Gambar di atas menunjukkan hasil dari running tegangan longitudinal dimana nilai dari tegan longitudinal berbeda jauh dengan nilai tegangan ijinnya ditunjukkan dengan warna biru muda yang merupakan kategori rasio dari keduanya diantara 0.2 s/d 0.4



**Gambar 4.7** Hasil Tegangan Von Mises

Gambar di atas menunjukkan hasil dari running tegangan von mises dimana nilai dari tegan von mises berbeda jauh dengan nilai tegangan ijinnya ditunjukkan dengan warna hijau yang merupakan kategori rasio dari keduanya diantara 0.4 s/d 0.6.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari proses analisis yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Pada analisis dinamis yang telah dilakukan menurut standar DNV RP F105, bentangan bebas pipa yang mengalami kegagalan karena melebihi batas ijin yang telah ditentukan sebanyak 3 bentangan, dengan masing masing panjang bentangan 19.15 m, 16.1 m, dan 15.5 m.
2. Pada analisis statis yang telah dilakukan sesuai dengan standar DNV OS F101, pipa telah memenuhi kriteria yang disyaratkan yaitu kriteria tekanan *bursting*, kriteria tekanan *collapse*, kriteria *combine load* dan kriteria *propagation buckling*. Maka dapat dinyatakan bahwa pipa aman dari terjadinya keruntuhan, ledakan, maupun penjaralan buckling.
3. Span yang tidak memenuhi kriteria analisis dinamis perlu adanya mitigasi berupa penambahan support, jarak support yang telah dihitung dan memenuhi kriteria dinamis setelah dilakukan screening adalah sebesar 13 m.

#### **5.2 Saran**

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, terdapat beberapa kekurangan di dalamnya, sehingga dapat menjadi penelitian lanjutan ke depannya. Adapun saran yang dapat diberikan sebagai masukan dalam penelitian lanjutan ke depannya antara lain:

1. Penempatan *support* yang optimal pada titik span yang kritis beserta optimalisasi biaya.
2. Analisis lingkungan dan beban tambahan yang mungkin dapat terjadi seperti gempa, *dropped object* dan kapal karam.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arif, U. 2012. *Studi Kasus Dry Gas Pipeline dari HESS (Indonesia-Pangkajene) Ltd yang Menghubungkan Wellhead Platform-A di Perairan Madura Menuju Gresik Onshore Processing Facility (OPF)*. Tugas Akhir Departemen Teknik Kelautan, ITS Surabaya, Indonesia.
- American Society of Mechanical Engineers B31.8., 2012, *Gas Transmission and Distribution Piping Systems*. American Steel Mechanical Engineering, USA
- Bai, Yong dan Qiang Bai. 2005. *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation*. Oxford, UK: Gulf Professional Publishing Elsevier.
- DNV OS F101. 2000. *Submarine Pipeline System*. Recommended Practice. Det Norske Veritas, Norway.
- DNV RP F105. 2006. *Free Spanning Pipeline*. Recommended Practice. Det Norske Veritas, Norway.
- DNV RP F109. 2010. *On-bottom Stability Design of Submarine Pipelines*. Det Norske Veritas, Norway.
- Guo, Boyun, S. Song, Chako. J, dan Ali Ghalambor. 2005. *Offshore Pipelines*. Elsevier, USA
- Mousselli, A.H. 1981. *Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods*. Penwell Books, Oklahoma, USA.
- Pratomo, U.H.B., 2015, *Analisa Stabilitas Pada Pipeline Akibat Dampak Dari Bentangan Bebas*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITS, Surabaya, Indonesia
- Q. Bai, Y. Bai. 2014. *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation*. Boston: Gulf Professional Publishing

Soegiono. 2007. *Pipa Bawah Laut*. Airlangga University Press, Surabaya.

Susetyo, H. 2016. *Analisis Local Buckling Pada Free Span Pipa Bawah Laut 20” Di Sangatta, Kalimantan Timur*. Tugas Akhir Departemen Teknik Kelautan, ITS Surabaya, Indonesia

Syahroni, A. 2018. *Analisis Umur Kelelahan Akibat Vortex Induced Vibration Pada Pipa Bawah Laut Saat Kondisi Operasi Studi Kasus: Export Pipeline 14” Jalur Central Processing Platform – Onshore Receiving Facility, Pertamina Hulu Energi West Madura Offshore*. Tugas Akhir Departemen Teknik Kelautan, ITS Surabaya, Indonesia

**LAMPIRAN A**  
**PERHITUNGAN *ON-BOTTOM***  
***STABILITY***

## LAMPIRAN A

### A.1 Perhitungan Koefisien *On-Bottom Stability*

#### 1. Data Parameter *On-Bottom Stability*

**Tabel A.1** Data On-Bottom Stability

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Unit Weight (Drained)	$\gamma'_s$	15600	N/m <sup>3</sup>
Diameter Total Pipa	D	0.469	m
Vertical contact force antara pipa & tanah	$F_c$	1545.2	N/m

#### 2. Perhitungan Koefisien *On-Bottom Stability*

##### a. *Single Oscillation Velocity* ( $U^*$ )

**Tabel A.2** Parameter *Single Oscillation Velocity*

Parameter	Notasi	Nilai
Osilasi Gelombang	t	1832.71
Kec. Arus Signifikan pada Elevasi Pipa	$U_s$	0.2776

$$k_U = \frac{U^*}{U_s} = \frac{1}{2} \cdot \left( \sqrt{2 \cdot \ln \tau} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln \tau}} \right)$$

$$U^* = 0.559$$

##### b. *Single Oscillation Period* ( $T^*$ )

**Tabel A.3** Parameter *Single Oscillation Period*

Parameter	Notasi	Nilai
Peakedness Parameter	$\gamma$	1.00
Periode Natural Gelombang	$T_n$	2.406
Mean Zero-Up Crossing Period	$T_u$	5.893

$$k_T = \frac{T^*}{T_u} = \begin{cases} k_T - 5 \cdot (k_T - 1) \cdot T_n / T_u & \text{for } T_n / T_u \leq 0.2 \\ 1 & \text{for } T_n / T_u > 0.2 \end{cases}$$

$$T_u / T_n = 0.409$$

$$k_T = 1 \quad ; \quad T^* = 5.893$$

##### c. *Steady Current Velocity with Design Oscillation* ( $V^*$ )

**Tabel A.4** Parameter *Steady Current Velocity with Design Oscillation*

Parameter	Notasi	Nilai
Diameter pipa	D	0.469
Bottom Roughness	$z_0$	0.00
Tinggi referensi diatas seabed	$z_r = d - (90\% \cdot d)$	5.677
Elevasi diatas seabed	$z = (d - D)$	56.301
Arus permukaan referensi	$V(z_r)$	0.5

$$V(z) = V(z_r) \cdot \frac{\ln(z + z_0) - \ln z_0}{\ln(z_r + z_0) - \ln z_0} \cdot \sin \theta_c$$

$$V(z) = U_c = V^*$$

$$V^* = 0.587$$

d. *Soil Passive Resistance (sand)*

$$\frac{F_R}{F_c} = \begin{cases} (5.0 \cdot \kappa_s - 0.15 \cdot \kappa_s^2) \cdot \left(\frac{z_p}{D}\right)^{1.25} & \text{if } \kappa_s \leq 26.7 \\ \kappa_s \cdot \left(\frac{z_p}{D}\right)^{1.25} & \text{if } \kappa_s > 26.7 \end{cases} \quad \kappa_s = \frac{\gamma'_s \cdot D^2}{w_s - F_z} = \frac{\gamma'_s \cdot D^2}{F_c}, \quad F_c = w_s - F_z$$

$$K^* = U^* \cdot T^* / D$$

$$M^* = V^* / U^*$$

**Tabel A.5** Perhitungan *Soil Passive Resistance*

$K_s$	$z_p/D$	Passive Soil Resistance $F_R$	Keulegan Carpenter $(K^*)$	$M^*$
2.221	0.022	17147.449	7.019	1.050

e. Nilai Koefisien Beban Horizontal ( $C^*y$ ) dan Vertikal ( $C^*z$ )

Dengan Tabel A.6 berikut bisa didapatkan interpolasi nilai  $C^*y$

**Tabel A.6** Koefisien Beban Horizontal (DNV RP-F109, 2010)

$C_y^*$		$K^*$										
		2.5	5	10	20	30	40	50	60	70	100	$\geq 140$
$M^*$	0.0	13.0	6.80	4.55	3.33	2.72	2.40	2.15	1.95	1.80	1.52	1.30
	0.1	10.7	5.76	3.72	2.72	2.20	1.90	1.71	1.58	1.49	1.33	1.22
	0.2	9.02	5.00	3.15	2.30	1.85	1.58	1.42	1.33	1.27	1.18	1.14
	0.3	7.64	4.32	2.79	2.01	1.63	1.44	1.33	1.26	1.21	1.14	1.09
	0.4	6.63	3.80	2.51	1.78	1.46	1.32	1.25	1.19	1.16	1.10	1.05
	0.6	5.07	3.30	2.27	1.71	1.43	1.34	1.29	1.24	1.18	1.08	1.00
	0.8	4.01	2.70	2.01	1.57	1.44	1.37	1.31	1.24	1.17	1.05	1.00
	1.0	3.25	2.30	1.75	1.49	1.40	1.34	1.27	1.20	1.13	1.01	1.00
	2.0	1.52	1.50	1.45	1.39	1.34	1.20	1.08	1.03	1.00	1.00	1.00
	5.0	1.11	1.10	1.07	1.06	1.04	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	

**Interpolasi  $C^*y$**

$C^*y$	5	7.019	10
1	2.3	2.078	1.75
1.050		2.048	
2	1.5	1.480	1.45

Dari hasil perhitungan interpolasi diatas didapatkan nilai koefisien beban horizontal  $C^*y$  sebesar 2.048

Dengan Tabel A.7 berikut bisa didapatkan interpolasi nilai  $C^*z$

**Tabel A.7** Koefisien Beban Vertikal (DNV RP-F109, 2010)

$C_z^*$		$K^*$										
		$\leq 2.5$	5	10	20	30	40	50	60	70	100	$\geq 140$
$M^*$	0.0	5.00	5.00	4.85	3.21	2.55	2.26	2.01	1.81	1.63	1.26	1.05
	0.1	3.87	4.08	4.23	2.87	2.15	1.77	1.55	1.41	1.31	1.11	0.97
	0.2	3.16	3.45	3.74	2.60	1.86	1.45	1.26	1.16	1.09	1.00	0.90
	0.3	3.01	3.25	3.53	2.14	1.52	1.26	1.10	1.01	0.99	0.95	0.90
	0.4	2.87	3.08	3.35	1.82	1.29	1.11	0.98	0.90	0.90	0.90	0.90
	0.6	2.21	2.36	2.59	1.59	1.20	1.03	0.92	0.90	0.90	0.90	0.90
	0.8	1.53	1.61	1.80	1.18	1.05	0.97	0.92	0.90	0.90	0.90	0.90
	1.0	1.05	1.13	1.28	1.12	0.99	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	2.0	0.96	1.03	1.05	1.00	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	5.0	0.91	0.92	0.93	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
10	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	

**Interpolasi  $C^*z$**



$$\begin{aligned}
r_{tot,y} &= 0.9696 & C_y^* &= 2.0480 \\
r_{tot,z} &= 1.1018 & C_z^* &= 1.1830 \\
\rho_w &= 1025 & U^* &= 0.5587 \\
D &= 0.4690 & V^* &= 0.5866
\end{aligned}$$

<b>C*z</b>	5	7.0195	10
1	1.13	1.191	1.28
1.050		1.183	
2	1.03	1.038	1.05

Dari hasil perhitungan interpolasi diatas didapatkan nilai koefisien beban horizontal C\*z sebesar 1.183

## A.2 On-Bottom Stability Check

### 1. Cek Vertical Stability

Cek vertikal stabilitas dengan persamaan pada DNV RP-F109

$$\gamma_w \frac{b}{b + w_s} \leq 1$$

$$\begin{aligned}
&\text{Safety Factor} \\
&\text{Vertical Stability} &= & 1.1 \\
&(\gamma_w)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\text{Buoyancy pipa per} \\
&\text{satuan panjang (b)} &= & 1738.6
\end{aligned}$$

Dengan parameter di atas didapatkan perhitungan stabilitas vertikal pipa sebagai berikut :

<b>0.5824 ≤ 1.0</b>
<b>STABIL</b>

### 2. Cek Absolute Lateral Stability

Sebelum masuk pada cek stabilitas lateral maka diperlukan  $F_y^*$  (horizontal hydrodynamic load) dan  $F_z^*$  (Vertical hydrodynamic load). Dengan mengacu pada persamaan DNV RP-F109 sebagai berikut:

$$F_y^* = r_{tot,y} \cdot \frac{1}{2} \rho_w \cdot D \cdot C_y^* (U^* + V^*)^2$$

$$F_z^* = r_{tot,z} \cdot \frac{1}{2} \rho_w \cdot D \cdot C_z^* (U^* + V^*)^2$$

Dari parameter di atas didapatkan nilai horizontal hydrodynamic load ( $F_y^*$ ) dan nilai Vertical hydrodynamic load ( $F_z^*$ ) sebagai berikut :

$F_y^* = 626.0296$	$F_z^* = 410.9011$
--------------------	--------------------

Cek stabilitas lateral dengan persamaan 3.38 pada DNV RP-F109

Safety Factor ( $\gamma_{sc}$ ) = 1.32	Koefisien Friksi ( $\mu$ ) = 0.6
Passive Soil Resistance ( $F_R$ ) = 17147.45	Berat Terendam Pipa ( $w_s$ ) = 1545.2 N/m

$$\gamma_{sc} \cdot \frac{F_y^* + \mu \cdot F_z^*}{\mu \cdot w_s + F_R} \leq 1.0$$

$$\gamma_{sc} \cdot \frac{F_z^*}{w_s} \leq 1.0$$

Dengan parameter dan persamaan di atas didapatkan perhitungan stabilitas absolut lateral pipa sebagai berikut :

$0.0637 \leq 1.0$	$0.3510 \leq 1.0$
<b>STABIL</b>	<b>STABIL</b>

### 3. Cek stabilitas Absolut Lateral dan Vertikal Pipa

Berikut Tabel A.8 merupakan hasil perhitungan pengecekan stabilitas pipa :

**Tabel A.8 Hasil Perhitungan Cek Stabilitas**

Hasil Perhitungan Cek Stabilitas			
Stabilitas	Nilai	Batas	Kondisi
Absolut Lateral	0.064	$\leq 1.0$	STABIL
	0.351		
Vertikal	0.583		

**LAMPIRAN B**  
**PERHITUNGAN *VORTEX INDUCED***  
***VIBRATION***

## LAMPIRAN B

### B.1 Perhitungan Parameter VIV

#### 3. Data Parameter VIV

**Tabel B.1** Data Parameter VIV

Data Parameter VIV			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Viskositas Kinematis Air Laut	$V_k$	0.00000102	m <sup>2</sup> /s
Diameter Total Pipa	$D_t$	0.469	m
Densitas Air Laut	$\rho_w$	1025	kg/m <sup>3</sup>
<i>Soil Damping</i>	$\zeta_{soil}$	0.01	-
<i>Structural Damping</i>	$\zeta_{str}$	0.025	-
Kekasaran Permukaan Pipa	$k$	0.003	m
Rasio $k/D_t$	$k/D_t$	0.006	-
Frekuensi Gelombang Signifikan	$\omega_s$	1.140   0.695	rad/s
Frekuensi Natural	$f_n$	0.426	-

#### 4. Parameter *Vortex Induced Vibrations*

##### a. *Reynolds Number*

$$Re = \left( \frac{U_{tot} \cdot D_t}{\nu} \right)$$

**Tabel B.2** Hasil Perhitungan Parameter *Reynolds Number*

Hasil Perhitungan <i>Reynolds Number</i>							
Panjang Aktual Span	Gap (e)	$U_c$		$U_w$		$Re$	
		10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun
m	m	m/s	m/s	m/s	m/s	-	-
5.38	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
2.88	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
12.87	0.5	0.487	0.876	0.002	0.363	2.25E+05	5.69E+05
3.61	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
19.15	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
6.88	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
6.98	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
7.44	0.5	0.487	0.876	0.002	0.363	2.25E+05	5.69E+05
16.08	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
4.39	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
7.68	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
12.11	0.3	0.473	0.851	0.007	0.363	2.20E+05	5.58E+05
11.89	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
11.38	0.5	0.487	0.876	0.002	0.363	2.25E+05	5.69E+05
10.63	0.5	0.487	0.876	0.002	0.363	2.25E+05	5.69E+05

Hasil Perhitungan Reynolds Number							
Panjang Aktual Span	Gap (e)	U <sub>c</sub>		U <sub>w</sub>		R <sub>e</sub>	
		10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun
m	m	m/s	m/s	m/s	m/s	-	-
10.41	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
15.54	0.7	0.497	0.895	0.002	0.363	2.30E+05	5.78E+05
6.73	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	2.18E+05	5.58E+05
12.65	0.2	0.464	0.835	0.002	0.363	2.14E+05	5.51E+05
8.63	0.1	0.452	0.814	0.002	0.363	2.09E+05	5.41E+05

b. Stability Parameter

$$K_s = \frac{4 \cdot \pi \cdot m_e \cdot \zeta_T}{\rho_w \cdot Dt^2}$$

Tabel B.3 Hasil Perhitungan Parameter Stability Parameter

Hasil Perhitungan Stability Parameter				
Panjang Aktual Span	Gap (e)	Massa Efektif (m <sub>e</sub> )	K <sub>s</sub>	K <sub>sd</sub>
m	m	kg.m		-
5.38	0.3	522.80	1.020	0.785
2.88	0.3	522.80	1.020	0.785
12.87	0.5	511.97	0.999	0.768
3.61	0.3	522.80	1.020	0.785
19.15	0.3	522.80	1.020	0.785
6.88	0.3	522.80	1.020	0.785
6.98	0.3	522.80	1.020	0.785
7.44	0.5	511.97	0.999	0.768
16.08	0.3	522.80	1.020	0.785
4.39	0.3	522.80	1.020	0.785
7.68	0.3	522.80	1.020	0.785
12.11	0.3	522.80	1.020	0.785
11.89	0.3	522.80	1.020	0.785
11.38	0.5	511.97	0.999	0.768
10.63	0.5	511.97	0.999	0.768
10.41	0.3	522.80	1.020	0.785
15.54	0.7	511.97	0.999	0.768
6.73	0.3	522.80	1.020	0.785
12.65	0.2	545.79	1.065	0.819
8.63	0.1	592.50	1.156	0.889

c. Reduced Velocity

$$V_R = \frac{U_c + U_w}{f_n \cdot Dt}$$

**Tabel B.4** Hasil Perhitungan Parameter *Reduced Velocity*

<b>Hasil Perhitungan <i>Reduced Velocity</i></b>					
Panjang Aktual Span	U <sub>c</sub>		U <sub>w</sub>		Vrd
	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	
m	m/s	m/s	m/s	m/s	
5.38	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
2.88	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
12.87	0.487	0.876	0.002	0.363	6.192
3.61	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
19.15	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
6.88	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
6.98	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
7.44	0.487	0.876	0.002	0.363	6.192
16.08	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
4.39	0.473	0.851	0.002	0.363	6.068
7.68	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
12.11	0.473	0.851	0.007	0.363	6.067
11.89	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
11.38	0.487	0.876	0.002	0.363	6.192
10.63	0.487	0.876	0.002	0.363	6.192
10.41	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
15.54	0.497	0.895	0.002	0.363	6.286
6.73	0.473	0.851	0.002	0.363	6.067
12.65	0.464	0.835	0.002	0.363	5.986
8.63	0.452	0.814	0.002	0.363	5.884

d. Frekuensi *Vortex Shedding*

$$f_s = S_t \left( \frac{U_{tot}}{Dt} \right)$$

**Tabel B.5** Hasil Perhitungan Parameter Frekuensi *Vortex Shedding*

Panjang Aktual Span	U <sub>c</sub>		U <sub>w</sub>		fs
	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	
m	m/s	m/s	m/s	m/s	hz
5.38	0.473	0.851	0.002	0.363	0.51751
2.88	0.473	0.851	0.002	0.363	0.51751
12.87	0.487	0.876	0.002	0.363	0.52816
3.61	0.473	0.851	0.002	0.363	0.51751
19.15	0.473	0.851	0.002	0.363	0.51751
6.88	0.473	0.851	0.002	0.363	0.51751
6.98	0.473	0.851	0.002	0.363	0.51751
7.44	0.487	0.876	0.002	0.363	0.52816
16.08	0.473	0.851	0.002	0.363	0.51751
4.39	0.473	0.851	0.002	0.363	0.51757
7.68	0.473	0.851	0.002	0.363	0.51751

Panjang Aktual Span	U <sub>c</sub>		U <sub>w</sub>		fs
	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	
m	m/s	m/s	m/s	m/s	hz
12.11	0.473	0.851	0.007	0.363	0.51751
11.89	0.473	0.851	0.002	0.363	0.51751
11.38	0.487	0.876	0.002	0.363	0.52816
10.63	0.487	0.876	0.002	0.363	0.52816
10.41	0.473	0.851	0.002	0.363	0.51751
15.54	0.497	0.895	0.002	0.363	0.53619
6.73	0.473	0.851	0.002	0.363	0.51751
12.65	0.464	0.835	0.002	0.363	0.51061
8.63	0.452	0.814	0.002	0.363	0.50189

e. *Keulegan Carpenter Number*

$$KC = \frac{U_w}{f_w \cdot D_t}$$

**Tabel B.6** Hasil Perhitungan Parameter *Keulegan Carpenter Number*

Hasil Perhitungan <i>Keulegan-Carpenter</i>						
Panjang Aktual Span	ω <sub>s</sub>		U <sub>w</sub>		KC	
	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun
m			m/s	m/s		
5.38	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
2.88	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
12.87	1.140	0.695	0.002	0.363	0.005	1.112
3.61	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
19.15	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
6.88	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
6.98	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
7.44	1.140	0.695	0.002	0.363	0.005	1.112
16.08	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
4.39	1.140	0.695	0.002	0.363	0.005	1.112
7.68	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
12.11	1.140	0.695	0.007	0.363	0.012	1.111
11.89	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
11.38	1.140	0.695	0.002	0.363	0.005	1.112
10.63	1.140	0.695	0.002	0.363	0.005	1.112
10.41	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
15.54	1.140	0.695	0.002	0.363	0.005	1.112
6.73	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
12.65	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111
8.63	1.140	0.695	0.002	0.363	0.004	1.111

f. *Current flow ratio*

$$\alpha = \frac{U_{c100 \text{ tahun}}}{U_{c100 \text{ tahun}} \cdot U_{w1 \text{ tahun}}}$$

**Tabel B.7** Hasil Perhitungan Parameter *current flow ratio*

Panjang Aktual Span	Gap ( e )	U <sub>c</sub>		U <sub>w</sub>		α
		10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	
m	m	m/s	m/s	m/s	m/s	
5.38	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	0.9972
2.88	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	0.9972
12.87	0.5	0.487	0.876	0.002	0.363	0.9973
3.61	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	0.9972
19.15	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	0.9972
6.88	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	0.9972
6.98	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	0.9972
7.44	0.5	0.487	0.876	0.002	0.363	0.9973
16.08	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	0.9972
4.39	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	0.9972
7.68	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	0.9972
12.11	0.3	0.473	0.851	0.007	0.363	0.9922
11.89	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	0.9972
11.38	0.5	0.487	0.876	0.002	0.363	0.9973
10.63	0.5	0.487	0.876	0.002	0.363	0.9973
10.41	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	0.9972
15.54	0.7	0.497	0.895	0.002	0.363	0.9973
6.73	0.3	0.473	0.851	0.002	0.363	0.9972
12.65	0.2	0.464	0.835	0.002	0.363	0.9971
8.63	0.1	0.452	0.814	0.002	0.363	0.9971



**LAMPIRAN C**

**PERHITUNGAN *DYNAMIC SOIL***  
***STIFFNESS* DAN *CONCRETE STIFFNESS***  
***FACTOR***

## LAMPIRAN C

### C.1 *Dynamic Soil Stiffness*

5. Data Awal Parameter Gaya Drag

**Tabel C.1** Parameter *Dynamic Soil Stiffness*

Parameter <i>Dynamic Soil Stiffness</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien <i>dynamic soil stiffness</i> vertikal	C <sub>v</sub>	16000	kN/m <sup>5/2</sup>
Koefisien <i>dynamic soil stiffness</i> horizontal	C <sub>L</sub>	12000	kN/m <sup>5/2</sup>
<i>Poisson ratio</i> tanah vertikal (corroded)	v <sub>soil,V</sub>	0.35	-
<i>Poisson ratio</i> tanah horizontal (corroded)	v <sub>soil,L</sub>	0.35	-
Massa pipa di udara	-	334.74	kg/m
Massa air yang dipindahkan	mdisp	177.23	kg/m
Diameter total pipa	D <sub>t</sub>	0.469	m

6. Perhitungan *Dynamic Soil stiffness*

g. Rasio Massa Spesifik

$$\frac{\rho_s}{\rho} = \left( \frac{334.74}{177.23} \right) = 1,889$$

h. Koefisien *Dynamic Soil Stiffness*

<b>Table 7-7 Dynamic stiffness factor and static stiffness for pipe-soil interaction in sand.</b>			
Sand type	C <sub>v</sub> (kN/m <sup>5/2</sup> )	C <sub>L</sub> (kN/m <sup>5/2</sup> )	K <sub>V,S</sub> (kN/m/m)
Loose	16000	12000	250
Medium	22000	16500	530
Dense	32000	24000	1350

i. *Poisson ratio* Tanah

<b>Table 7-1 Typical geotechnical parameters for sand</b>				
<i>Soil type</i>	φ <sub>s</sub>	γ <sub>soil</sub> ' [kN/m <sup>3</sup> ]	ν	e <sub>s</sub>
Loose	28 – 30°	8.5 – 11.0	0.35	0.7 – 0.9
Medium	30 – 36°	9.0 – 12.5	0.35	0.5 – 0.8
Dense	36 – 41°	10.0 – 13.5	0.35	0.4 – 0.6

j. *Dynamic Soil stiffness Vertikal*

$$K_v = \frac{C_v}{1-v_{soil}} \left( \frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{Dt} = 17621.27 \text{ kN/m}^2$$

k. *Dynamic Soil stiffness*

$$K_L = C_L(1 + v_{soil}) \left( \frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{Dt} = 13523.71 \text{ kN/m}^2$$

## C.2 Concrete Stiffness Factor

**Tabel C.2** Parameter perhitungan *Concrete Stiffness Factor*

<b>Parameter Concrete Stiffness Factor</b>			
<b>Parameter</b>	<b>Notasi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>
Konstanta Empiris (Asphalt)	$K_c$	0.331	-
Momen Inersia Pipa Baja	$I_{st}$	2.24e-04	m <sup>4</sup>
Momen Inersia Selimut Beton	$I_{conc}$	1.48e-03	m <sup>4</sup>
<i>Young's Modulus</i> Pipa Baja	$E_{st}$	2,07 x 10 <sup>11</sup>	Pa
Kekuatan Material Selimut Beton	$F_{cn}$	45.00	MPa

a. *Young Modulus Selimut Beton*

$$E_{conc} = 1000 x (f_{cn})^{0.3} = 31330.24 \text{ MPa}$$

b. *Concrete Stiffness factor*

$$CSF = k_c \left( \frac{EI_{conc}}{EI_{stell}} \right)^{0.75} = 0.331$$

## **LAMPIRAN D**

### ***PERHITUNGAN BURSTING PRESSURE, COLLAPSE PRESSURE, COMBINED LOAD DAN PROPAGATION BUCKLING***

## LAMPIRAN D

### D.1 Data Parameter Perhitungan

**Tabel D.1** Data Parameter Perhitungan

<b>Pipe Data</b>					
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
Outer Diameter	Do	355.6	mm	0.3556	m
Nominal thickness	tnom	14.3	mm	0.0143	m
Fabrication tolerance	tfab	1			
Corrosion allowance	tcorr	3			
Ovality (DNV definition)	fo	0.50%			
<b>Material Data</b>					
Material Grade	X65				
Young's Modulus	E	207000	MPa	2.07E+11	Pa
Poisson Ratio	v	0.3			
Specified Minimum Yield Stress	SMYS	360	MPa	3.60E+08	Pa
Specified Minimum Tensile Stress	SMTS	460	MPa	4.60E+08	Pa
SMYS at relevant temperature	SMYS(T)		MPa	(at 100C)	
SMTS at relevant temperature	SMTS(T)		MPa	(at 100C)	
Reduction in SMYS due to manufacturing process		15%			
Supplementary requirement U fulfilled		YES			
<b>Pressure Data-Oil</b>					
Design Pressure	Pd	130	barg @30m		
	@	30	m		
Design depth	EL_d	56.7	m		
		86.7	m		
	Yinc	1.1			
Variation of mean sea level/Tide	wmin/wmax	1.5	m		
Density – gas	poil	29.3	kg/m <sup>3</sup>		
Standard Acceleration	g	9.81	m/s <sup>2</sup>		
Density of sea-water	pseawater	1025	kg/m <sup>3</sup>		
Operating Temperature		100	Oc		

## D.2 *Brusting Pressure Criteria*

### 1. *Local Incidental Pressure (Pli/Pinc)*

$$P_{inc} = P_d \times \gamma_{inc}$$

$$P_{inc} = 143 \text{ bar} = 14300000 \text{ Pa}$$

### 2. *External Pressure*

$$P_e = 5.71 \text{ bar} = 571000 \text{ Pa}$$

### 3. *Brusting Pressure*

$$t_1 = 8.21 \text{ mm} = 0.00821 \text{ m}$$

$$t_{nom} = 12.21 \text{ mm} = 0.01221 \text{ m}$$

$$p_b(t) = \frac{2 \cdot t}{D - t} \cdot f_{cb} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}$$

where

$$f_{cb} = \text{Min} \left[ f_y, \frac{f_u}{1.15} \right]$$

$$f_{cb} = 330000000$$

$$P_b(t_1) = 180.111 \text{ bar} = 18011105 \text{ Pa}$$

### 4. Rekap Hasil Perhitungan

**Tabel D.2** Perhitungan Criteria Brusting

<b>Kriteria Tekanan <i>Brusting</i></b>			
<b>Syarat</b>		<b><math>P_{li} - P_e \leq P_b(t_1) / \gamma_m \cdot \gamma_{sc}</math></b>	
<b>Deskripsi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>	<b>Kondisi</b>
P <sub>li</sub> - P <sub>e</sub>	13729163.46	Pa	AMAN
P <sub>b</sub> (t <sub>1</sub> )	18011054.83	Pa	
P <sub>b</sub> (t <sub>1</sub> ) / γ <sub>m</sub> .γ <sub>sc</sub>	13762554.31	Pa	

## D.3 *Collapse Pressure Criteria*

### 1 *Collapse Pressure (Pc)*

$$\gamma_{sc} = 1.14 \text{ (normal)}$$

$$\alpha_{fab} = 0.85$$

$$f_0 = 0.01$$

$$t_2 = 9.21 \text{ mm} = 0.00921 \text{ m}$$

$$f_y = 360 \text{ Mpa}$$

$$f_u = 460 \text{ Mpa}$$

a. Pel

$$P_{el}(t) = \frac{2 \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^3}{1 - \nu^2}$$

$$P_{el}(t) = 7904102.845 \text{ Pa}$$

b. Pp

$$P_p(t) = f_y \cdot \alpha_{f_{ob}} \cdot \frac{2 \cdot t}{D}$$

$$P_p(t) = 15850731.16 \text{ Pa}$$

c. Collapse Pressure (Pc)

$$(P_c(t) - P_{el}(t)) \cdot (P_c(t)^2 - P_p(t)^2) = P_c(t) \cdot P_{el}(t) \cdot P_p(t) \cdot f_0 \cdot \frac{D}{t}$$

$$P_c = 6428938.46 \text{ Pa}$$

2 Eksternal Pressure (Pe)

$$P_e = 44.5803929 \text{ bar}$$

3 Rekap Hasil Perhitungan

**Tabel D.3** Perhitungan Criteria Collapse

<b>Kriteria Tekanan Collapse</b>			
<b>Syarat</b>		<b>Pe - Pmin ≤ Pc (t) / γm.γsc</b>	
<b>Deskripsi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>	<b>Kondisi</b>
Pe - Pmin	4.46E+01	bar	AMAN
Pc	64.2893846	bar	
Pc(t) / γm.γsc	49.03843219	bar	

#### D.4 Combined Load Criteria

##### 1 Parameter

**Tabel D.4** Parameter *Combined Load*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Faktor tahanan material	$\gamma_m$	1.15	-
Faktor keamanan <i>resistance</i>	$\gamma_{SC}$	1.04	-
Resultan bending moment	$M_{Sd}$	2.14E+05	Nm
Parameter aliran tegangan	$\alpha_c$	1.10	-
Plastic moment resistance	$M_p$	518415.40	Nm
Tebal dinding pipa	$t_2$	12.21	m
Design effective axial force	$S_{Sd}$	81000	N
Tekanan internal	$P_i$	0	Pa
Plastic axial force resistance	$S_p$	4742893.29	N
Faktor tekanan pada beban kombinasi	$\alpha_p$	0.68298918	-
Tekanan eksternal	$P_e$	573149.25	Pa
Tekanan bursting	$P_b$	29568114.1	Pa
Unity Check	UC	0.20334968	$\leq 1$

Anisotropy factor

$$\alpha_a = 0.95$$

Supplementary requirement U fulfilled

$$\alpha_u = 1$$

$$\alpha_{fab} = 0.85$$

Bending moment beban fungsional

$$MF = 100 \quad \text{kNm}$$

$$SF = 50 \quad \text{KN}$$

$$ME = 80 \quad \text{KNm}$$

$$SE = 20 \quad \text{KN}$$

$$t_2 = t = 12.21 \quad \text{mm}$$

$$f_o = 0.01$$

$$M_d = 214 \quad \text{kNm}$$

$$S_d = 81 \quad \text{KN}$$

$$W_d = -57 \quad \text{m}$$

$$P_e = 573149.25 \quad \text{Pa}$$



fy	=	360	Mpa
fu	=	437	Mpa
Mp	=	518.415397	kNm
Sp	=	4742.89329	KN
Pb	=	29.5681141	MPa

#### 4 Rekap Hasil Perhitungan

**Tabel D.5** Perhitungan *Combined Load*

<b>Kriteria <i>Combined Load</i></b>			
<b>Syarat</b>		<b>UC ≤ 1</b>	
<b>Deskripsi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>	<b>Kondisi</b>
UC	0.20335	≤ 1	AMAN

### **D.5** *Propagation Buckling Criteria*

#### 1. *Propagation Buckling (Ppr)*

$$P_{pr} = 35 \cdot f_y \cdot \alpha_{fab} \left( \frac{t_2}{D} \right)^{2.5}$$

$$\begin{aligned} \gamma_{sc} &= 1.04 && \text{low} \\ t_2 = t &= 12.21 && \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_u &= 1 \\ \alpha_{fab} &= 0.85 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{ytemp} &= 0 && \text{ambient temp} \\ f_y &= 360 && \text{Mpa} \quad 360000000 \text{ Pa} \\ &= 3600 && \text{bar} \end{aligned}$$

$$P_{pr} = 23.3978 \text{ bar}$$

2 *Propagation Buckling (Ppr)*

**Tabel D.6** Perhitungan *Propagation Buckling*

<b>Kriteria Tekanan <i>Propagation Buckling</i></b>			
<b>Syarat</b>		<b><math>P_e - P_{min} \leq P_{pr}(t2) / \gamma_m \cdot \gamma_{sc}</math></b>	
<b>Deskripsi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>	<b>Kondisi</b>
Pe - Pmin	19.36790	bar	AMAN
Ppr	23.39776	bar	
Ppr(t2) / $\gamma_m \cdot \gamma_{sc}$	19.56334	bar	

## BIODATA PENULIS



Novi Jesika Anastasia lahir di Banyuwangi, 30 Desember 1997. Merupakan anak pertama dari 2 bersaudara, pasangan Bapak Agus Sakiyar dan Ibu Misbah Sanusi Rerung. Penulis mengawali pendidikan formal di TK Dharmawanita Plampangrejo, Cluring. Kemudian melanjutkan pendidikan dasar di SD Negeri 4 Plampangrejo, jenjang SLTP di SMP Negeri 1 Cluring dan jenjang SLTA di SMA Negeri 1 Glagah Banyuwangi. Pada tahun 2015 penulis berhasil lolos Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) dan diterima sebagai mahasiswa di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama masa perkuliahan, penulis juga aktif di beberapa organisasi kemahasiswaan dan berbagai kegiatan mahasiswa serta pelatihan dan seminar dalam rangka pengembangan diri. Penulis tercatat sebagai Staff Departemen Minat dan Bakat HIMATEKLA (2016-2017). Mendapatkan amanah sebagai Bendahara II UKM SEPAKBOLA ITS (2016-2017) dan Kepala Divisi Futsal Putri UKM SEPAKBOLA ITS (2017-2018). Pada tahun 2017 penulis diamanahi sebagai kapten tim Futsal Putri ITS dan berhasil meraih juara 3 ajang Liga Mahasiswa Futsal McDonald's East Java Conference. Penulis juga mendapatkan beberapa penghargaan dalam bentuk beasiswa, antara lain: Beasiswa Yayasan *Van Deventer-Maas* Indonesia (2016-2019), Beasiswa PPA-ITS (2016) dan Beasiswa Program Banyuwangi Cerdas Pemerintah Kabupaten Banyuwangi (2017). Pada tahun 2018 penulis melakukan Kerja Praktek di Pengembangan Terpadu Pesisir Ibukota Negara (PTPIN) Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), Jakarta. Selama masa studi S1 yang ditempuh selama 4 tahun, penulis tertarik dalam bidang ahli perancangan dan produksi bangunan laut sehingga hal itulah yang mendasari penulis untuk membuat tugas akhir ini dengan fokus *offshore pipeline*.

*Email : novijesiansts@gmail.com*