TUGAS AKHIR – MO 184804

ANALISIS UMUR KELELAHAN AKIBAT *VORTEX INDUCED VIBRATION* PADA PIPA BAWAH LAUT BERLOKASI DI TERANG SIRASUN BATUR *FIELD*

FERDY ADITYAWAN

NRP. 04311640000054

Dosen Pembimbing :

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2020

FINAL PROJECT – MO 184804

FATIGUE LIFE ANALYSIS DUE TO VORTEX INDUCED VIBRATION ON SUBSEA PIPELINE LOCATED AT TERANG SIRASUN BATUR *FIELD*

FERDY ADITYAWAN

NRP. 04311640000054

Supervisors :

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY

SEPULUH NOPEMBER INTITUTE OF TECHNOLOGY

SURABAYA

2020

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS UMUR KELELAHAN AKIBAT *VORTEX INDUCED VIBRATION* PADA PIPA BAWAH LAUT BERLOKASI DI TERANG SIRASUN BATUR *FIELD*

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T) pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

Ferdy Adityawan

NRP 04311640000054

Disetujui Oleh :

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

.....

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

.....

Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D (Penguji 1)

.....

Dr. Dendy Satrio, S.ST (Penguji 2)

.....

Surabaya, Juli 2020

ANALISIS UMUR KELELAHAN AKIBAT *VORTEX INDUCED VIBRATION* PADA PIPA BAWAH LAUT BERLOKASI DI TERANG SIRASUN BATUR *FIELD*

Nama **: Ferdy Adityawan**

NRP **: 04311640000054**

Departemen **: Teknik Kelautan FTK-ITS**

Dosen Pembimbing **: Ir. Imam Rochani,M.Sc.**

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Freespan merupakan suatu kondisi yang dialami oleh *subsea pipeline* dimana terdapat bentangan karena ketiadaan *support* dari tanah. *Freespan* terjadi akibat adanya perubahan topografi dasar laut dan penggerusan akibat arus yang berada pada dasar laut. Arus yang mengenai pipa akan mengakibatkan adanya aliran *vortex* pada belakang sisi pipa. *Vortex Induced Vibration* (VIV) merupakan fenomena yang terjadi pada komponen yang berbentuk silindris yang disebabkan arus laut, menyebabkan terjadinya getaran oleh pergerakan fluida yang mengenai pipa sehingga menimbulkan getaran pada pipa. Oleh karena itu, pada penelitian ini penulis melakukan analisa umur kelelahan akibat *VIV*. Tahap pertama yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini adalah screening kriteria statis sesuai DNV GL-RP-F105. Dari *screening* tersebut dihasilkan panjang *free span* maksimal yang diizinkan. Panjang tersebut selanjutnya dilakukan screening tahap dua dengan kriteria FLS untuk *fatigue criteria* sesuai DNV-GL RP F105. Tegangan ekuivalen (Von Mises) yang diperoleh pada setiap span yang ditinjau untuk 24 bentangan bebas dipatatkan *range* tegangan sebesar 161,14 MPa – 189,41 MPa. Berdasarkan hasil perhitungan frekuensi natural, didapatkan bahwa hubungan antara panjang bentangan pipa dengan frekuensi natural pipa dalam kondisi *in-line* maupun *cross-flow*, hasil menunjukkan bahwa pada panjang span terkecil memiliki frekuensi natural pipa yang besar, dan sebaliknya. Umur Kelelahan pada 24 bentangan pipa mengalami kegagalan kondisi *in-line* dan *crossflow* dan diharuskan ditambah *support.*

Kata kunci: *Freespan, Fatigue, Vortex Induced Vibration, in-line, crossflow*

ANALYSIS OF FATIGUE AGE DUE TO VORTEX INDUCED VIBRATION IN THE UNDERWATER PIPES LOCATED IN TERANG SIRASUN BATUR FIELD

Name **: Ferdy Adityawan**

NRP **: 04311640000054**

Department **: Ocean Engineering FTK-ITS**

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

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

Freespan is a condition experienced by the subsea pipeline where there is a stretch due to the lack of support from the ground. Freespan occurs due to changes in the seabed topography and scouring due to currents that are on the seabed. The current that hits the pipe will cause vortex flow on the back side of the pipe. Vortex Induced Vibration (VIV) is a phenomenon that occurs in cylindrical components caused by ocean currents, causing vibrations by the movement of fluids that hit the pipe, causing vibrations in the pipe. Therefore, in this study the authors analyzed the age of fatigue due to VIV. The first step carried out in this Final Project is screening static criteria according to DNV GL-RP-F105. The screening results in the maximum free span length allowed. The length is then carried out stage two screening with FLS criteria for fatigue criteria according to DNV-GL RP F105. The equivalent voltage (Von Mises) obtained at each span reviewed for 24 free stretches is recorded with a voltage range of 161.14 MPa - 189.41 MPa. Based on the results of natural frequency calculation, it is found that the relationship between the length of the pipe stretch with the natural frequency of the pipe in both in-line and cross-flow conditions, the results show that the smallest span length has a large natural frequency of the pipe, and vice versa. Fatigue life in 24 stretches of pipe has failed in-line and crossflow conditions and support must be added.

Keywords: Freespan, Fatigue, Vortex Induced Vibration, in-line, crossflow

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT tuhan semesta alam atas berkah, rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan serangkaian kegiatan penelitian dan penulisan laporan Tugas Akhir ini dengan baik dan lancar. Adapun judul dari Tugas Akhir ini adalah **"Analisis Umur Kelalahan Akibat *Vortex Induced Vibration* pada Pipa Bawah Laut Berlokasi di Terang Sirasun Batur *Field*".**

Perlu diketahui, Tugas Akhir ini disusun guna memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Program Sarjana (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Dalam Tugas Akhir ini, mengangkat permasalahan tentang pengaruh *Vortex Induced Vibration* (VIV) terhadap tegangan dan umur kelelahan dari suatu pipa yang telah beroperasi .

Besar kesadaran penulis mengenai banyaknya kekurangan dalam laporan ini sehingga kritik dan saran sangat dibutuhkan agar menjadi evaluasi guna meghasilkan suatu penelitian dan penulisan yang lebih baik kedepannya. Semoga, laporan ini dapat bermanfaat bagi perkembangan teknologi kemaritiman dan industri migas (minyak dan gas) di Indonesia terkhusus pada bidang *pipelines* untuk pembaca umumnya dan penulis khususnya.

Surabaya, Juli 2020

Ferdy Adityawan

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini penulis tidak terlepas dari bantuan serta dorongan moral maupun material dari banyak pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu. Pada kesempatan ini saya ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Rasa syukur saya panjatkan ke Allah SWT., karena atas berkah, rahmat, dan anugerah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
2. Orang tua terbaik dan luar biasa yang pernah ada, Ayahku, Sonny Setiawan dan Ibuku, Dian Restiasari, terima kasih atas segala doa, kasih sayang, perhatian, dukungan, kepercayaan, kesabaran, dan cinta yang telah kalian berikan selama ini.
3. Adikku yang sangat dibanggakan Verrin Viraditya.
4. Nabila Larasati Balqis yang selalu menemani dan memberikan semangat dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Kedua Dosen Pembimbing Tugas Akhir saya, yaitu Bapak Ir. Imam Rochani, M.Sc., dan Bapak Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D., saya berterima kasih sebesar- besarnya atas pengetahuan dan bimbingannya selama ini.
6. Seluruh Dosen, Karyawan, Tim Tata Usaha dan Administrasi Departemen Teknik Kelautan FTK ITS, yang telah memberikan ilmu, bantuan dan fasilitas kepada penulis selama menjalani masa perkuliahan dan menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Bapak Sujantoko S.T.,M.T. selaku dosen wali yang telah membantu, mengarahkan serta memberikan nasihat selama saya berkuliah di Teknik Kelautan FTK ITS.
8. Teruntuk Ari Affandi yang telah membimbing saya menyelesaikan Tugas Akhir ini
9. Teman – teman Cah Wiguna yang telah mengisi hari saya di Jakarta.
10. Terima kasih untuk teman-teman satu bimbingan seperjuanganku, yang telah menjadi teman *sharing* dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
11. Keluarga besar Adhiwamastya P-56 L-34, yang selalu mendukung penulis hingga selesainya Tugas Akhir ini. Terima kasih telah menjadi keluarga baru dari awal kehadiran penulis di ITS ini.
12. Teman-teman Kura – Kura Ninja dan Arek-Arek yang telah menjadi tempat *sharing* selama masa perkuliahan penulis di ITS ini.

13. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per-satu yang telah turut berperan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Sekali lagi, terima kasih banyak untuk semua pihak yang telah tertuliskan maupun tidak. Semoga, kebaikan ini akan mendapatkan balasan pahala dari Allah S.W.T.

Surabaya, Juli 2020

Ferdy Adityawan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
LEMBAR PENGESAHAN ii
ABSTRAK iii
KATA PENGANTAR v
UCAPAN TERIMA KASIH vi
DAFTAR ISI viii
DAFTAR GAMBAR xi
DAFTAR TABEL xii
DAFTAR NOTASI xv
DAFTAR LAMPIRAN xxi
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan 4
1.4 Manfaat 4
1.5 Batasan Masalah 4
1.6 Sistematika Penulisan 5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI 7
2.2 Dasar Teori 7
2.2.1 *Free Span* (Bentangan Bebas) 7
2.2.2 Kondisi Beban 8
2.2.3 Dimensi Pipa 9
2.2.4 Massa Efektif Pipa 11
2.2.5 Berat Terendam Pipa 12
2.2.6 Beban Lingkungan 13
2.2.7 Kriteria Aliran 18
2.2.8 Gaya Hidrodinamis 20
2.2.9 Tegangan Ekuivalen (*von Mises Stress*) 22
2.2.10 *Allowable Span* Statik 25
2.2.11 *Vortex Induced Vibration* (VIV) 26

2.2.12 Panjang *Effective Span* 32
2.2.13 Frekuensi Natural Pipa 34
2.2.14 *Screening Criteria Fatigue* 39
2.2.15 Umur Kelelahan Pipa..... 40
BAB III 49
METODOLOGI PENELITIAN.....49
3.1 Diagram Alir 49
3.2 Prosedur Penelitian..... 51
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....57
4.1 Analisis Data 57
4.2 Pengmpulan Data 58
4.2.1 Data *Pipeline* 58
4.2.2 Data Lingkungan 59
4.2.3 Data *Freespan*..... 60
4.3 Analisis Dimensi Pipa 62
4.3.1 Perhitungan Dimensi Pipa 62
4.3.2 Perhitungan Massa Efektif Pipa 63
4.3.3 Perhitungan Berat Terendam Pipa..... 65
4.4 Analisis Kecepatan Partikel Air 65
4.4.1 Perhitungan Kecepatan Arus pada Pipa..... 65
4.4.2 Perhitungan Kecepatan Arus Akibat Gelombang..... 67
4.5 Analisis Gaya Hidrodinamis 71
4.5.1 Perhitungan Gaya *Drag* 71
4.5.2 Perhitungan Gaya *Lift*..... 72
4.5.3 Perhitungan Gaya Hidrodinamis 74
4.6 Perhitungan Tegangan Ekivalen (*von Mises)*..... 75
4.6.1 Perhitungan *Hoop Stress* 75
4.6.2 Perhitungan Longitudinal Stress..... 76
4.6.3 Perhitungan *Von Mises Stress*..... 79
4.7 Pemodelan Bentangan Bebas di ANSYS 80
4.7.1 Pemodelan Aliran pada ANSYS CFX..... 81
4.7.2 Hasil Pemodelan ANSYS CFX 84

4.7.3 Pemodelan Tegangan pada ANSYS *Structural* 86
4.7.4 *Meshing Sensitivity* 87
4.7.5 Hasil Pemodelan Tegangan 89
4.7.6 Validasi nilai Tegangan *von Mises* 90
4.8 Perhitungan Panjang *Allowable Span* Statik 90
4.9 *Screening* Panjang *Span* Aktual 93
4.10 Analisis Vortex Induced Vibrations (VIV) 94
4.11 Perhitungan Panjang *Effective Span* 98
4.11.1 Boundary Condition 98
4.11.2 Perhitungan *Concrete Stiffness Factor* 99
4.11.3 Perhitungan Dynamic Soil Stiffness 99
4.11.4 Parameter Panjang *Effective Span* 101
4.11.5 Perhitungan Panjang *Effective Span* 101
4.12 Frekuensi Natural 102
4.12.1 Perhitungan Effective Axial Force 103
4.12.2 Perhitungan Critival Buckling Load 104
4.12.3 Perhitungan *Static Deflection* 105
4.12.4 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa 108
4.13 *Screening Fatigue Criteria* 111
4.14 Perhitungan Respone Model 114
4.15 Perhitungan Umur Kelelahan Pipa 118
4.15.1 Perhitungan Unit Stress Amplitude 118
4.15.2 Perhitungan *Stress Range* 120
4.15.3 Perhitungan Siklus Tegangan dan VIV 122
4.15.4 Perhitungan *Fatigue Life* 129
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 132
5.1 Kesimpulan 132
5.2 Saran 133
DAFTAR PUSTAKA 134

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 *Freespan* (Guo,2005) 7
Gambar 2.2 *Reduction Factor* Akibat Sebaran Gelombang (DNV RP F105) 17
Gambar 2.3 Zona Aliran Arus (DNV RP F105, 2017) 19
Gambar 2.4 Ilustrasi Konsentrasi *Streamline* yang Melewati Pipa (Pratama, 2007) 22
Gambar 2.5 Ilustrasi *Vortex Induced Vibration* (VIV) pada Pipa (Mouselli,(1981) 25
Gambar 2.6 Regime Aliran Fluida pada Silinder Halus (Lienhard,1966) 26
Gambar 2.7 *Plotting stress* S-N *Curve* di *Seawater* (DNV RP C203,2005) 41
Gambar 2.8 Respon Amplitudo *In-Line* VIV (DNV RP F105,2017) 42
Gambar 2.9 Respon Amplitudo *Crossflow* VIV (DNV RP f105,2017) 43
Gambar 3.1 Diagram Alir Tugas Akhir 48
Gambar 4.1 Terang Sirasun Batur *Pipeline Layout* (PT.XYZ, 2019) 53
Gambar 4.2 Tabel Penentuan Koefisien 64
Gambar 4.3 Permodelan Bentangan Bebas pada ANSYS CFX 74
Gambar 4.4 Model Aliras Arus pada Bentangan Bebas 74
Gambar 4.5 Bentuk *Meshing* pada Permodelan 75
Gambar 4.6 *Setup* untuk Permodelan ANSYS CFX 76
Gambar 4.7 *Output* Kecepatan Arus Setelah Melewati Pipa 76
Gambar 4.8 Hasil *Vortex Pressure* dari ANSYS CFX 77
Gambar 4.9 Arah Pembebanan Untuk ANSYS *Static Structural* 79
Gambar 4.10 Letak *Probe Coordinate* pada Pipa 79
Gambar 4.11 Grafik *Meshing Sentivity* 80
Gambar 4.12 Meshing pada Pipa 80
Gambar 4.13 *Output* Tegangan *Von-Mises* dari Permodelan 81
Gambar 4.14 Grafik Hubungan Intensitas Turbulensi Dengan Sudut Aliran 102
Gambar 4.15 Prinsip Umum *Respone Model In-Line* 103
Gambar 4.16 Prinsip Umum *Respone Model Crossflow* 104

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tegangan Izin pada Pipa Menurut ASME B31.8 (ASME B31.8, 2012) 18
Tabel 2.2 Parameter Kekasaran Dasar Laut 19
Tabel 2.3 Rekomendasi Koefisien Hidrodinamika untuk Aliran *Steady* 23
Tabel 2.4 Klasifikasi Respon *Free Span* 31
Tabel 2.5 Koefisien *Dynamic Soi Stiffness* untuk Jenis Tanah *Sand* (DNV RP F105, 2017) 33
Tabel 2.6 Faktor Keamanan *Screering Criteria* (DNV RP F105, 2017) 34
Tabel 2.7 Faktor Keamanan *Screening Fatigue* (DNV RP F105, 2017) 34
Tabel 2.8 Koefisien *Boundary Condition* (DNV RP F105, 2017) 37
Tabel 2.9 Tabel S-N *Curve* di *Seawater* dengan *Cathodic Protection* (DNV RP C203,2005) 40
Tabel 4.1 Data Properti Pipa (PT.XYZ, 2017) 54
Tabel 4.2 Data Fungsional Pipa (PT.XYZ, 2017) 54
Tabel 4.3 Data *Corrsion* dan *Coating* Pipa (PT.XYZ, 2017) 55
Tabel 4.4 Data *Water Depth* Pipa (PT.XYZ, 2017) 55
Tabel 4.5 Data Gelombang dan Arus (PT.XYZ, 2017) 55
Tabel 4.6 Data Parameter Tanah (PT.XYZ, 2017) 56
Tabel 4.7 Data *Freespan* (PT.XYZ, 2017) 56
Tabel 4.8 Perhitungan Dimensi Pipa 57
Tabel 4.9 Perhitungan Massa Pipa di Udara 58
Tabel 4.10 Perhitungan Massa Efektif Pipa 58
Tabel 4.11 Perhitungan Berat Terendam Pipa 59
Tabel 4.12 Perhitungan Kecepatan Arus pada Pipa 60
Tabel 4.13 Data Gelombang 61
Tabel 4.14 Parameter JONSWAP 62
Tabel 4.15 Perhitungan Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang 63
Tabel 4.16 Kecepatan Arus Total 63
Tabel 4.17 Hasil Perhitungan Gaya *Drag* 64
Tabel 4.18 Perhitungan Gaya *Lift* 65
Tabel 4.19 Perhitungan Gaya Hidrodinamis 66
Tabel 4.20 Parameter Perhitungan *Hoop Stress* 67
Tabel 4.21 Perhitungan *Hoop Stress* 68

Tabel 4.22 Perhitungan Cek Batas Ijin *Hoop Stress* 68
Tabel 4.23 Perhitungan *Longitudinal Stress* 69
Tabel 4.24 Perhitungan Cek Batas Ijin *Longitudinal Stress* 70
Tabel 4.25 Perhitungan *Von Misses Stress* 71
Tabel 4.26 *Input* untuk ANSYS *Static Structural* 78
Tabel 4.27 Validasi *Equivalent Stress* 81
Tabel 4.28 Perhitungan Parameter Panjang *Allowable Span Statik* 82
Tabel 4.29 Hasil Perhitungan Panjang *Allowable Span Statik* dan Pengecekan 83
Tabel 4.30 Perhitungan *Screening* L/D pada Bentangan Pipa 84
Tabel 4.31 Parameter Perhitungan Awal Parameter VIV 85
Tabel 4.32 Perhitungan *Current Flow Ratio* dan Nilai Stabilitas 85
Tabel 4.33 Perhitungan Parameter VIV 87
Tabel 4.34 *Boundary Condition* 88
Tabel 4.35 Perhitungan *Concrete Stiffness Factor* 88
Tabel 4.36 Parameter *Dynamic Soil Stiffness* 89
Tabel 4.37 Perhitungan *Dynamic Soil Stiffness* 89
Tabel 4.38 Parameter Perhitungan Panjang *Span* Efektif 90
Tabel 4.39 Perhitungan Panjang *Effective Span* Kondisi *In-line* dan *Crossflow* 90
Tabel 4.40 Parameter Perhitungan *Effective Axial Force* 92
Tabel 4.41 Perhitungan Nilai Perbedaan Tekanan 92
Tabel 4.42 Parameter Perhitungan *Critical Bucling Load* 93
Tabel 4.43 Hasil Perhitungan *Critical Buckling Load* 93
Tabel 4.44 Parameter Perhitungan *Static Deflection* 94
Tabel 4.45 Hasil Perhitungan *Static Deflection* Kondisi *In-line* 95
Tabel 4.46 Hasil Perhitungan *Static Deflection* Kondisi *Crossflow* 96
Tabel 4.47 Parameter Perhitungan Frekuensi Natural Pipa 97
Tabel 4.48 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa Kondisi *In-line* 97
Tabel 4.49 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa Kondisi *Crossflow* 98
Tabel 4.50 Parameter *Screening In-Line* dan *Crossflow* 99
Tabel 4.51 Hasil *Screening Fatigue* Kondisi *In-Line* 100
Tabel 4.52 Hasil *Screening Fatigue* Kondisi *Crossflow* 100

Tabel 4.53 Parameter Perhitungan *Respone Model* 102
Tabel 4.54 Parameter *Respone Model In-Line* 103
Tabel 4.55 Parameter *Respone Mode Crossflow* 105
Tabel 4.56 Parameter Perhitungan *Unit Stress Amplitude* 105
Tabel 4.57 Perhitungan *Unit Stress Amplitude* 106
Tabel 4.58 Hasil *Stress Range* Kondisi *In-Line* 107
Tabel 4.59 Hasil *Stress Range* Kondisi *Crossflow* 108
Tabel 4.60 Data Kejadian Arus 109
Tabel 4.61 Jumlah Kejadian dari Kecepatan Arus 109
Tabel 4.62 Hasil Siklus Kejadian Arus yang Mengenai Pipa Kondisi *In-Line* (n) 110
Tabel 4.63 Hasil Siklus Kejadian Arus yang Mengenai Pipa Kondisi *Crossflow* 111
Tabel 4.64 Parameter S-N *Curve* 112
Tabel 4.65 Hasil Jumlah Siklus Tegangan Pipa Kondisi *In-Line* (N) 112
Tabel 4.66 Hasil Jumlah Siklus Tegangan Pipa Kondisi *Crossflow* (N) 113
Tabel 4.67 Hasil Perhitungan *Fatigue Damage* dan *Fatigue Life* Kondisi *In-Line* 114
Tabel 4.68 Hasil Perhitungan *Fatigue Damage* dan *Fatigue Life* Kondisi *Crossflow* 114

DAFTAR NOTASI

A_i	= luas penampang internal pipa
A_{IL}	= *in-line unit amplitude stress*
A_{CF}	= *cross-flow unit amplitude stress*
A_s	= luas penampang luar pipa
(A_Y/D)	= *Normalised in-line VIV amplitude*
(A_Z/D)	= *Normalised cross-flow VIV amplitude*
C_a	= Koefisien massa tambah
C_D	= koefisien *drag*
C_M	= koefisien inersia
C_L	= Koefisien lateral kekakuan tanah
C_V	= koefisien vertical kekakuan tanah
C_{1-6}	= koefisien Boundary condition
d	= kedalaman *trenching*
D	= Diameter total pipa
D_{fat}	= *deterministic fatigue damage*
Ds	= Diameter pipa luar
E	= *Young's modulus*
EI	= *bending stiffness*
e	= gap dasar laut
e_s	= *void ratio*
(e/D)	= *seabed gap ratio*
f_n	= frekuensi natural gelombang
f_s	= *vortex shedding frequency (Strouhal frequency)*
f_w	= wave frequency
g	= percepatan gravitasi
G(ö)	= *frequency transfer function*
H_{eff}	= *effective lay tension*
H_S	= gelombang signifikan
h	= kedalaman laut

I = momen inersia

Ic = *turbulence intensity*

K = *soil stiffness*

KL = *lateral (horizontal) dynamic soil stiffness*

KV = *vertical dynamic soil stiffness*

(k/D) = *pipe roughness*

KC = Keulegan Carpenter *number*

K_S = *Stability parameter*

L = panjang bentang bebas

L_a = panjang *span adjacent*

L_{eff} = panjang bentangan efektif

L_{sh} = *length of span shoulder*

m_e = massa efektif

m = *fatigue exponent*

M_{static} = *static bending moment*

M_n = *spectral moments of order n*

n_i = jumlah stress cycles untuk tegangan

N_i = jumlah siklus kegagalan untuk tegangan

N_c = *soil bearing capacity parameter*

N_q = *soil bearing capacity parameter*

$N_{à}$ **=** *soil bearing capacity parameter*

P_e = Tekanan eksternal

P_i = Tekanan internal

q = beban defleksi

P_{cr} = *critical buckling load*

R_c = *current reduction factor*

R_D = reduction factor gelombang

$R_{Iå}$ = reduction factor from turbulence and flow direction

R_k = reduction factor from damping

R_e = *Reynolds Number*

S = *stress range*

S_{eff} = *effective axial force*

$S_{ä}$ = *wave spectral density*

S_{UU} = spectra kecepatan gelombang pada pipa

s_u = *undrained shear strength*

S_t = *Strouhal number*

t = *pipe wall thickness*

$T_{exposure}$ = beban waktu terjadinya siklus

T_{life} = umur desain operasi

T_p = *peak period*

T_u = *mean zero up-crossing period*

T_w = *wave period*

U = kecepatan arus

U_c = kecepatan arus terhadap pipa

U_s = kecepatan gelombang signifikan

U_w = Kecepatan arus akibat gelombang

v = vertical soil settlement (pipe embedment)

V_R = *reduced velocity*

V_{Rd} = *reduced velocity (design value) with safety factor*

z = height above seabed or in-line pipe displacement

z_0 = sea-bottom roughness

z_r = reference (measurement) height

Þ **=** current flow velocity ratio, generalised Phillips' constant

$Þ_e$ = temperature expansion coefficient

$Þ_{fat}$ = Allowable fatigue damage ratio according to DNV OS-F101

$Þ_T$ = parameter to determine wave period

ß **=** Weibull shape parameter and relative soil stiffness parameter

ΔD = relative trench depth

Δp_i = internal pressure difference relative to laying

ΔT = temperature difference relative to laying or storm duration

á = pipe deflection or statistical skewness

â = band-width parameter

Á = gamma function

à = peak-enhancement factor for JONSWAP spectrum parameter

$à_{soil}$ = total unit weight of soil

$à_{soil'}$ = submerged unit weight of soil

$à_{water}$ = unit weight of water

$à_s$ = safety factor on stress amplitude

$à_f$ = safety factor on natural frequency

$à_{CF}$ = safety factor for cross-flow screening criterion

$à_{IL}$ = safety factor for in-line screening criterion

$à_k$ = safety factor on stability parameter

$à_{on,IL}$ = safety factor on onset value for in-line VR

$à_{on,CF}$ = safety factor on onset value for cross-flow VR

ç = curvature

è1 = mode shape factor

èmax = equivalent stress factor

ä = usage factor

w = mean value

wa = axial friction coefficient

wL = lateral friction coefficient

ê = Poisson's ratio or kinematic viscosity (≈1.5·10-6 [m2/s]

ó = mode shape

ϕ_{CM}^{s} = angle of friction, cohesionless soils

ψ_{CM}^{k} = correction factor for CM due to pipe roughness

ψ_{CM}^{trench} =correction factor for CM due to effect of pipe in trench

ψ_{CD}^{proxi} = reduction factor for CM due to seabed proximity

$\psi_{KC,\alpha}^{proxy}$ = correction factor for CD due to Keulean-Carpenter number and current flow ratio.

ψ_{CD}^{trench} = correction factor for CD due to effect of pipe in trench

ψ_{CD}^{VIV} = amplification factor for CD due to cross-flow vibrations

$\tilde{o}_{proxy}$ = reduction factor for CD due to seabed proximity

$\tilde{o}_{proxy,onset}$ = correction factor for onset cross-flow due to seabed proximity

$\tilde{o}_{trench,onset}$ = reduction factor for onset cross-flow due to the effect of a trench

$\tilde{o}_{Þ,IL}$ = correction factor for onset of in-line due wave

î = density of water

î s/î = specific mass ratio between the pipe mass (not including added mass) and the displaced water.

ð = stress, spectral width parameter or standard deviation

$å_{rel}$ = relative angle between flow and pipeline direction flow direction

$\tilde{a}_{\tilde{N}}$ = total modal damping ratio

$\tilde{a}_{soil}$ = soil modal damping ratio

ζ_{str} = structural modal damping ratio

$\tilde{a}_h$ = hydrodynamic modal damping ratio

ω_n = angular natural frequency

ω_p = angular spectral peak wave frequency

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A Perhitungan Dimensi, Massa Efektif Pipa dan Berat Pipa Terendam

LAMPIRAN B Perhitungan Kecepatan Partikel Air pada Pipa Akibat Arus dan Gelombang

LAMPIRAN C Perhitungan *Vortex Induced Vibration*

LAMPIRAN D Perhitungan *Dynamic Soil Stiffness* dan *Concrete Stiffness Factor*

LAMPIRAN E Perhitungan Panjang *Span* Efektif, *Effective Axial Force, Critival Buckling Load, Static Deflection,* dan Frekuensi Natural Pipa

LAMPIRAN F *Screening Freespan* dan *Fatigue* Criteria

LAMPIRAN G Perhitungan *Respone Model*

LAMPIRAN H Perhitungan *Unit Stress Amplitude* dan *Stress RAnge*

LAMPIRAN I Perhitungan *Fatigue Life*

LAMPIRAN J Perhitungan Tegangan Ekivalen (Von Mises *Stress*)

LAMPIRAN K ANSYS *Static Structural* dan ANSYS CFX

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menghadapi dunia industri perminyakan yang dinamis dan permintaan dunia akan kebutuhan ini yang terus meningkat dari tahun ke tahun, dimana dilain sisi cadangan sumber energi pun semakin menipis sehingga beralih ke lahan marginal untuk memenuhinya. Untuk tu dibutuhkan inovasi baik dari segi desain struktur, prosedur, perealatan dan sebagainya agar tetap ekonomis tanpa mengurangi filosofi dan efiseiensi. Salah satu kegiatan yang penting dalam industri perminyakan adalah sistem transportasi, yang dalam hal ini adalah sistem transportasi dari reservoir sampai pada tempat pemroresan hidrokarbon, maupun penyaluran produk jadi dari satu tempat ke tempat lainnya (Addy, 2007). Pipa bawah laut merupakan salah satu cara untuk mengangkut minyak atau gas alam daris umur minyak di lepas pantai menuju lokasi pantai atau dermaga bongkar muat (Kriswidianto, 2013). Dibandingkan dengan trasnportasi secara curah, pengangkutan dengan pipeline relative aman. Oleh karena itu pipeline bisa dikatakan sebagai salah satu solusi yang tepat sebagai sarana transportasi hidrokarbon yang cukup handal untuk jangka panjangnya, dan untuk terjaminnya pasokan secara kontinu maka dibutuhkan suatu kajian yang tepat terhadap pipeline (Soegiono, 2007).

Sistem pipeline untuk *offshore facilities* berbeda dengan onshore facilities. Pada *system offshore pipeline facilitites*, jalur *pipeline* berada pada lingkungan laut mempunyai kondisi lingkungan yang sangat berbeda dengan lingkungan di darat (Fathurozi, 2016). Pipa laut kebanyakan dipasang dalam kondisi kosong, sehingga pipa tersebut dibebani dengan tekanan hidrostatik yang tinggi (Rizaldy, 2011). Karena tingkat keamanaan yang tinggi dalam operasional sistem pipa bawah laut, maka banyak faktor yang harus dipertimbangkan dalam proses desain (Silalahi, 2010). Dalam perancangan suatu struktur, baik itu struktur yang berada di darat maupun struktur yang berada dilepas pantai, salah satu hal yang perlu dianalisa

adalah melakukan analisa tegangan. Analisa tersebut tidak hanya digunakan pada struktur bangunan saja, namun juga meliputi kemampuan struktur *pipeline* untuk memenuhi tujuan desain yang telah ditetapkan sejak awal, termasuk tegangan pada *pipeline* (Ramadhan, 2014).

Jaringan pipa transmisi bawah laut merupakan suatu insfrastruktur yang membutuhkan perencanaan yang sangat matang dan membutuhkan biaya yang mahal. Jaringan pipa ini didesain untuk kuat terhadap gaya – gaya yang bekerja padanya, baik pada saat instalasi maupun setelah beroperasi. Berdasarkan aspek keamanan operasional, sistem pipa bawah laut harus merupakan sistem yang kompak, terintegrasi dengan baik, serta memiliki kewajaran yang baik dalam menerima semua beban yang bekerja baik beban internal maupun beban lingkungan yang berada di sekitarnya (Aji, 2014). Pada saat pipa berada di dasar laut selama masa operasi, permasalahan yang dihadapi dalam penggunaan *pipeline* adalah ketidakstabilan akibat pengaruh gaya-gaya hidrodinamika yang bekerja pada pipa (Al Amin, 2014).

Seperti yang di jelaskan sebelumnya dalam perancangan pipeline ada beberapa aspek yang perlu diperhatikan. Beberapa aspek tersebut adalah kondisi wilayah operasi pipa dan bagian pipa yang tidak tertumpu. Banyak pipa yang beroperasi pada kawasan rawan gempa, yang mengakibatkan kemungkinan terjadi *cracking.* Selain itu, kegagalan sistem perpipaan bawah laut sering terjadi karena adanya fenomena alam pengaruh lingkungan dari gelombang, arus dan gempa bumi. Fenomena alam yang terjadi pada pipa bwah laut meliputi *scouring, soil liquefaction,* dan *landslide* yang kemudian berakibat *settlement.* Apabila terjadi likuifaksi tanah sehingga terdapat bentangan bebas (*freespan)* akibat getaran gempa, hal ini sangat berbahaya dan berpengaruh pada ketahanan pipa karena mengakibatkan kerusakan pipa seperti tertekuk atau terangkatnya pipa (Aji, 2014).

Kegagalan dalam *pipeline* salah satunya disebabkan oleh *free span* (Susetyo, 2016). Kondisi *freespan* pada pipa seperti itu dapat

mengakibatkan kerusakan pada pipa itu sendiri. Posisi pipa yang tertumpu oleh dua tumpuan mengakibatkan pipa menahan beban beratnya sendiri serta beban – beban lainnya dan melawan beban gelombang dan arus yang tinggi. *Freespan* pada pipa mengalami osilasi yang disebabkan oleh beban lingkungan disebut *vortex shedding.* Hal ini disebabkan oleh gerakan fluida yang mengenai pipa yang terbentuk silinder akan menimbulkan ulekan dibawah atau dibelakang silinder. Ulekan pertama yang mengenai struktur masih bersifat simetri, tetapi ketika kecepatan fluidanya bertambah atau Reynold number besar, maka ulekan yang terjadi tidak simetri dan jika terus-menerus akan menyebabkan terjadinya getaran. Gaya yang disebabkan oleh *vortex shedding* akan menimbulkan kerusakan jika frekuensi alami system yang dinamakan *lock-in.* Pada kondisi *lock in* ini juga, *vortex shedding* selanjutnya gaya lift, akan berosilasi serempak. Hal inilah yang disebut *vortex induced vibration (VIV).* VIV memberikan dampak yang cukup besar dan menyebabkan kekuatan struktur menjadi lemah secara signifikan dalam waktu yang relative singkat (Dessy, 2010). Oleh karena itu dibutuhkan perhitungan besar VIV pada kondisi *free span* tersebut. Kemudian setelah mendapatkan parameter dari VIV, dilihat juga besaran frekuensi natural dari pipa. Ketika baesar VIV dan frekuensi natural hamper sama maka akan dilanjutkan dengan melakukan perhitungan berapa umur kelelahan (*fatigue)* dari struktur pipa tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa nilai tegangan ekivalen untuk masing – masing bentangan bebas?
2. Berapa nilai frekuensi natural tiap bentangan bebas pada kondisi *in-line* dan *crossflow?*
3. Berapa umur kelelahan *free span* yang terdapat pada lokasi tersebut?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui tegangan ekivalen untuk masing – masing bentangan bebas.
2. Mengetahui nilai frekuensi natural tiap bentangan bebas pada kondisi *in-line* dan *crossflow*.
3. Mengetahui umur kelelahan *free span* yang terdapat pada lokasi tersebut.

1.4 Manfaat

Adapun manfaat yang dapat diambil dari Tugas Akhir ini sebagai berikut:

1. Dari analisis tegangan ekivalen, penulis diharapkan mampu menunjukkan perhitungan analisis tegangan sesuai dengan code ASME B 31.8.2000 mengenai Gas Transmission and Distributing Piping System) serta menunjukkan perhitungan tegangan pada pipa yang ditinjau apakah masih dalam berada batas aman yang ditentukan.
2. Mendapatkan nilai frekuensi natural tiap bentangan bebas pada konisi *in-line* dan *crossflow*.
3. Sedangkan dari analisis kelelahan dari *free span*, penulis dapat membuktikan analisis free span mendapatkan pengaruh VIV (*vortex induced vibration*) sehingga terjadi vibrasi dan menyebabkan kelelahan atau tidak berdasarkan screening yang telah ditetapkan (sesuai dengan code DNV-RP-F105 mengenai *Free Spanning Pipelines*), dan menunjukkan langkah yang sesuai dalam mencari umur kelelahan pada span yang ditinjau.

1.5 Batasan Masalah

Batasan Masalah dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Analisis tegangan pipa, statis dan dinamis *free span* dilakukan hanya pada kondisi operasi saja;
2. Analisis stabilitas dari pipa dan *free span* diabaikan;
3. Pengaruh *scouring* dan *marine growth* diabaikan;
4. Aliran yang mengenai pipa adalah tegak lurus dengan pipa;

5. Aliran fluida dalam pipa diasumsikan aliran *steady*;
6. Tumpuan pada kedua ujung pipa diasumsikan *fixed-fixed*;
7. Perhitungan *dynamic analysis* dan *fatigue analysis* hanya dilakukan pada lokasi bentangan bebas;

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan tugas akhir ini adalah :

BAB I : Pendahuluan

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang tentang dasar mengapa penilitian tersebut dilakukan, perumusan masalah yang akan dibahas, tujuan yang ingin dicapai, manfaat yang dapat diperoleh, serta batasan masalah yang akan membatasi ruang lingkup penelitian tugas akhir.

BAB II : Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

Bab ini merupakan tinjauan pustaka serta dasar teori yang digunakan sebagai acuan atau pedoman yang mendukung penyelesaikan tugas akhir. Referensi tersebut dapat berupa jurnal lokal maupun internasional, rules atau code dan juga dapat berupa buku yang memiliki kaitan terhadap bahasan tugas akhir.

BAB III : Metodologi Penelitian

Bab ini menjelaskan tentang metodologi penelitian yang berisi tentang alur pengerjaan tugas akhir yang disajikan dalam diagram alir atau flow chart agar dapat dipahami lebih mudah dan tersusun dengan sistematis.

BAB IV : Analisis dan Pembahasan

Bab ini membahas data berdasarkan dasar teori yang ada yang dikerjakan sesuai alur pada diagram alir, sehingga didapatkan hasil olahan data yang menjadi inti bahasan untuk dianalisis berupa output dari penelitian tugas akhir.

BAB V : Kesimpulan dan Saran

Bab ini merupakan kesimpulan dari hasil yang telah didapatkan dan dianalisis, selain itu juga terdapat saran yang berisikan masukan untuk menyempurnakan hasil dari Tugas Akhir untuk penelitian kedepannya

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Analisis *free span* akan menghasilkan panjang *free span* yang diijinkan agar tegangan yang terjadi pada *free span* tidak melebihi tegangan *yield* material pipa. Aliran dari gelombang dan arus yang timbul di sekitar pipa akan menimbulkan pusaran yang menghasilkan distribusi tekanan. Pusaran ini menghasilkan osilasi atau getaran pada pipa. Jika frekuensi dari pusaran ini mendekati frekuensi natural pipa, maka terjadi resonansi, dan inilah yang menyebabkan kelelahan pada pipa (Bai, 2001).

Pada dasarnya, telah banyak Tugas Akhir yang telah dikerjakan mengenai *freespan* pada pipa bawah laut. Banyak dari mereka yang menganalisis kelelahan akibat dari adanya *Vortex Induced Vibration* (VIV) atau menghitung scouring yang terjadi pada pipa bawah laut yang mengakibatkan terjadinya freespan. Misalnya saja pada Turdjail (2008) dalam tugas akhirnya membuktikan bahwa selain beban lingkungan seperti gelombang dan arus laut menyebabkan terjadinya vibrasi terhadap struktur, terdapat fenomena sekunder yang juga dapat menyebabkan vibrasi pada pipelines. Fenomena tersebut adalah pelepasan vortex (vortex shedding). Lalu acuan lain yang digunakan pada penelitian ini adalah analisa yang dilakukan oleh Putra (2011). Dalam penelitiannya, Putra membahas tentang pengaruh VIV pada *free span* pipa.

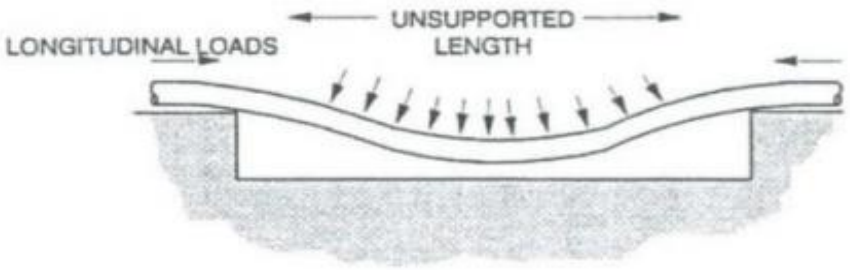
Akibat terjadinya *freespan* tersebut maka harus dilakukan perhitungan besar VIV yang menyebabkan pipa mengalami defleksi dan menghitung umur kelelahan dari bentangan *freespan.* Oleh karena itu, penulis akan mencoba menghitung untuk masalah tersebut.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 *Free Span* (Bentangan Bebas)

Salah satu permasalahan yang umum pada pemasangan pipa bawah laut adalah *Free Span. Free span* atau yang disebut juga bentangan bebas adalah kondisi dimana ketidakrataan seabed membuat pipa bertumpu hanya

pada 2 tumpuan dan pipa menggantung.. Dan mengakibatkan kelebihan tegangan, stress yang berulang dapat berefek kegagalan atau kelelahan. Beban yang terjadi pada pipa diakibatkan oleh gaya pipa itu sendiri, gaya dinamik dari beban lingkungan (gelombang, arus laut).



Gambar 2.1 *Freespan* (Guo, 2005)

2.2.2 Kondisi Beban

Kenny (1993) mengklasifikasikan 4 kondisi pembebanan pipa bawah laut selama umur operasi, yaitu:

A. Instalasi

Beban utama yang bekerja pada kondisi intalasi pipa bawah laut adalah beban gelombang, beban arus *steady*, dan beban pipa itu sendiri (*selfweight*). Selain itu, kombinasi tekanan dan beban *bending* akibat metode instalasi dan formasi span memberikan pengaruh signifikan pada perilaku pipa.

B. **Kondisi *Water Filled***

Kondis ini terjadi sebelum dan sesudah dilakukan *hydrotest* pada pipa. Kondisi ini mungkin juga dapat terjadi jika pipa ditinggalkan sementara pada saat kondisi tertentu. Pipa yang ditinggalkan akan diisi air laut untuk meningkatkan stabilitas pipa (*on-bottom stability*). Meningkatnya berat terendam pipa dapat mempengaruhi tegangan pada pipa.

C. Hydrotest

Pada saat *hydrotest*, pipa akan dialiri fluida (air laut) yang bertekanan tinggi yang melebihi tekanan desain pipa. Hal ini dilakukan untuk menguji integritas pipa bawah laut dan memeriksa ada tidaknya kebocoran pada pipa. Pipa pada kondisi ini akan mengalami pembebanan yang berat dikarenakan kenaikan berat pipa terendam serta kenaikan tekanan internal.

D. Operasi

Setelah proses instalasi dan *hydrotest* dilakukan, pipa akan memasuki fase operasi. Pada saat operasi, pipa akan menerima tekanan internal serta *temperature* yang tinggi akibat aliran fluida di dalam pipa

2.2.3 Dimensi Pipa

Pipa bawah laut memiliki beberapa lapisan yaitu pipa baja, lapisan anti korosi (*corrosion coating*) dan selimut beton (*concrete coating*). Dimensi dari seluruh lapisan pipa ini harus dihitung dalam analisis pipa bawah laut. Persamaan untuk menghitung dimensi pipa diuraikan pada Persamaan 2.1– 2.9 sebagai berikut:

a. Tebal Dinding Pipa

Tebal dinding pipa yang dimaksud adalah ketebalan pipa tanpa ada tambahan perlindungan korosi, Persamaan tebal dinding pipa (DNV OS F101, 2013) dirumuskan pada Persamaan 2.1 sebagai berikut:

$t_2 = t_{nom} - t_{corr}$ …….…… (2.1)

di mana,

t_{nom} = tebal nominal dinding pipa (m)

t_{corr} = tebal *corrosion allowance* (m)

Tebal dinding pipa diatas digunakan untuk analisis kegagalan pipa dibawah pengaruh kondisi beban ekstrim dan pertimbangan kondisi operasi pipa.

b. Diameter Total Pipa

Diameter total pipa merupakan diameter pipa secara keseluruhan termasuk diameter pipa baja, lapisan anti korosi, selimut beton (*concrete coating*). Diameter total pipa dirumuskan pada Persamaan 2.2 sebagai berikut:

$D_t = D_0 + 2t_{cc} + 2t_{conc}$ ……. (2.2)

Di mana,

D_t = Diameter total pipa (m)

D_0 = Diameter luar pipa baja (m)

t_{cc} = Tebal lapisan anti korosi (m)

t_{conc} = Tebal *concrete coating* (m)

c. Diameter Dalam Pipa

Diameter dalam pipa adalah diameter maksimal yang dapat dilewati oleh fluida yang dialirkan di dalamnya. Ditampilkan pada Persamaan 2.3 berikut:

$D_i = D_0 - 2 \times t_{nom}$ ……. (2.3)

Di mana,

D_i = Diameter dalam pipa (m)

d. Diameter *Concrete Coating*

Concrete coating memiliki fungsi sebagai pemberat untuk meningkatkan stabilitas pipa di dasar laut (Soegiono, 2007). Di dalam DNV OS F101, ketebalan minimal *concrete coating* adalah 40 mm. Diameter *concrete coating* dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.4 berikut :

$D_{wc} = D_0 + 2(t_{cc} + t_{conc})$ ……. (2.4)

Di mana,

D_{wc} = Diameter Selimut Beton (m)

t_{conc} = Tebal *Concrete Coating* (m)

e. Diameter Lapisan Anti Korosi (*Corrosion Coating)*

$D_{cc} = D_0 + 2.t_{cc}$ …….. (2.5)

Di mana,

D_{cc} = Diameter *corrosion coating* (m)

f. Momen Inersia Pipa Baja

$I_{st} = \pi \frac{(Do^4 + Di^4)}{64}$…….……(2.6)

Di mana,

I_{st} = Momen Inersia Pipa Baja (m^4)

g. Momen Inersia Selimut Beton

$I_{conc} = \pi \frac{(Dt^4 + Dconc^4)}{64}$……(2.7)

Di mana,

I_{conc} = Momen Inersia Selimut Beton (m^4)

h. Luas Penampang Internal Pipa Baja

$$A_i = \pi \frac{(Di^2)}{4} \quad \text{.....(2.8)}$$

Di mana,

A_i = Luas Penampang Internal Pipa Baja (m^2)

i. Luas Penampang Pipa Baja

$$A_{st} = \pi \frac{(D0^2 - Di^2)}{4} \quad \text{.....(2.9)}$$

Di mana,

A_{st} = Luas Penampang Pipa Baja (m^2)

2.2.4 Massa Efektif Pipa

Massa efektif pipa merupakan penjumlahan massa pipa, massa konten pipa, massa tambah dan massa selimut beton pipa (concrete). Menurut Bai dan Bai (2005), persamaan massa efektif pipa dijelaskan pada Persamaan 2.10 sebagai berikut,

$$m_e = m_{str} + m_c + m_a \quad \text{.....(2.10)}$$

di mana,

m_{str} = Massa Struktur Pipa (termasuk *coating*) (kg/m)

m_c = Massa konten Pipa (kg/m)

m_a = Massa Tambah (kg/m)

a. Massa Struktur Pipa

Massa struktur pipa merupakan penjumlahan massa pipa ditambah dengan massa lapisan anti korosi dan selimut beton (*concrete*). Persamaan untuk mendapatkan massa struktur pada pipa dijelaskan pada Persamaan 2.11 – 2.14 berikut.

$$m_{str} = m_{st} + m_{cc} + m_{conc} \quad \text{.....} \quad (2.11)$$

$$m_{st} = A_{st} \, x \, \rho_{st} \quad \text{.....} \quad (2.12)$$

$$m_{cc} = \pi \frac{(Dcc^2 - D0^2)}{4} \rho_{cc} \quad \text{.....} \quad (2.13)$$

$m_{conc} = \pi \frac{(Dwc^2 - D0^2)}{4} \rho_{conc}$ ……..… (2.14)

di mana,

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

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

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

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

ρ_{st} = Massa jenis baja (kg/m^3)

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

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

b. Massa Konten Pipa

$m_c = A_i + \rho_c$ ……(2.15)

di mana,

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

c. Massa Tambah Pipa

$m_a = \frac{\pi}{4} D_t^2 \,.\, \rho_w \,.\, C_a$ ……(2.16)

di mana,

ρ_w = Massa jenis air laut (kg/m^3)

C_a = Koefisien massa tambah

Menurut DNV RP F105, koefisien massa tambah dapat ditentukan dengan Persamaan 2.17 sebagai berikut :

$$Ca = \begin{cases} 0.68 + \frac{1.6}{1+5\,(\frac{e}{Dt})} & untuk\ (\frac{e}{Dt}) < 0.8 \\ 1 & untuk\ \left(\frac{e}{Dt}\right) > 0.8 \end{cases} \quad \text{……(2.17)}$$

Di mana,

e/Dt = Rasio *gap span*

e = jarak antara *seabed* dan pipa

2.2.5 Berat Terendam Pipa

Berat pipa yang tercelup di bawah air akan memiliki berat yang berbeda dibandingkan saat di daratan. Berat pipa yang berada dibawah air akan lebih ringan dibandingkan dengan di daratan karena adanya gaya

bouyancy (gaya apung). Persamaan untuk menghitung berat terendam pipa ditampilkan pada Persamaan 2.18 berikut :

$$W_{sub} = (m_{st} + m_{cc} + m_c + m_{wc}).g - F_b \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.18)$$

Di mana,

F_b = Gaya Apung (*Bouyancy*) (N/m)

Gaya apung dijelaskan pada Persamaan 2.19 dan 2.20 berikut :

$$F_b = m_{disp} \, . \, g \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\

Untuk gelombang acak kurun waktu pendek (*short term wave condition*) dapat dijelaskan menggunakan spectra gelombang. Menurut DNV RP F105 (2017), spektra yang sesuai digunakan untuk menjelaskan gelombang acak adalah spectra JONSWAP. JONSWAP sendiri merupakan singkatan dari *Joint North Sea Wave Project*, yaitu proyek yang dilakukan secara bersama – smaa oleh sejumlah negara untuk melakukan penelitian gelombang di perairan utara. Spektra JONSWAP cukup cocok digunakan di Indonesia karena perairan Indonesia termasuk perairan tertutup atau kepulauan. Berikut Persamaan 2.21 mengenai spektra JONSWAP.

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \,.\, g^2 . \omega^{-5} . exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) . \gamma^{exp\left(-0{,}5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma.\omega_p}\right)^2\right)} \quad (2.21)$$

dengan,

$S_{\eta\eta}$ = Spektra Gelombang

α = Konstanta *Generalized Phillips*

ω = Frekuensi Gelombang (rad/s)

γ = *Peak-enhancement factor*

ω_p = Frekuensi puncak gelombang (rad/s)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

σ = Parameter lebar spektra

Persamaan 2.22 mengenai konstanta *Generalized Phillips* yaitu,

$$\alpha = \frac{5}{16}\frac{Hs^2\,\omega p^4}{g^2}(1 - 0{,}287.\ln\gamma) \quad \text{.....(2.22)}$$

di mana,

Hs = Tinggi gelombang signifikan (m)

Parameter lebar spektra

$$\sigma = \begin{cases} 0{,}07 & jika\ \omega \leq \omega p \\ 0{,}09 & jika\ \omega > \omega p \end{cases} \quad \text{.....(2.23)}$$

Peak-enhancement factor yang digunakan yaitu:

$$\gamma = \begin{cases} 5{,}0 & \varphi < 3{,}6 \\ \exp(5{,}75 - 1{,}15\varphi), & 3{,}6 < \varphi < 5{,}0;\ \ \varphi = \frac{Tp}{\sqrt{Hs}} \\ 1{,}0 & \varphi \geq 5{,}0 \end{cases} \quad \text{..... (2.24)}$$

Setelah itu, spektrum kecepatan yang diinduksi gelombang (*wave induced velocity spectrum*) di *seabed* S_{UU} (ω) bisa ditentukan melalui

transformasi spektra gelombang pada permukaan laut menggunakan teori gelombang orde pertama ditampilkan pada Persamaan 2.25:

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) \, . \, S_{\eta\eta}(\omega) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.25)$$

Di mana,

G = *Transfer Function*

$S_{\eta\eta}$ = Spektrum JONSWAP

Fungsi transfer G mentransformasi elevasi permukaan laut menjadi kecepatan aliran yang diinduksi gelombang di dasar laut, yakni pada Persamaan 2.26 berikut ini:

$$G^2(\omega) = \frac{\omega \cos h\,(k.(D+e))}{\sinh(k.d)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.26)$$

Di mana, d dan k diiterasi dari persamaan *transcendental* sebagai berikut:

$$\frac{\omega^2}{g} = k. \tanh (k.d) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.27)$$

Di mana,

ω	= Frekuensi gelombang	(rad/s)
g	= percepatan gravitasi (9,81)	(m/s^2)
k	= Angka gelombang	
d	= kedalaman perairan	(m)

Kecepatan aliran gelombang signifikan pada elevasi pipa (U_s) dan mean zero-up crossing dari osilasi aliran pipa (T_u) dijelaskan pada Persamaan 2.28 dan 2.29.

$$U_s = 2\sqrt{M_0} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.28)$$

Di mana,

M_0 = Momen spektra orde pertama

$$T_u = 2\pi\sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.29)$$

Di mana,

M_2 = Momen spektra orde ke-2

M_0 dan M_2 dapat ditentukan dengan mengintegrasikan persamaan momen spektra pada orde ke-n sesuai persamaan 2.30:

$$M_n = \int_0^\infty \omega_n \, SUU\,(\omega)\; d(\omega) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.30)$$

Kecepatan aliran gelombang signifikan pada elevasi pipa akan mengalami penurunan karena pengaruh arah dan sebaran gelombang. Persamaan kecepatan aliran gelombang normal pada pipa dan pengaruh sebaran gelombang adalah sebagai berikut:

$U_w = U_s \cdot R_D$ …….(2.31)

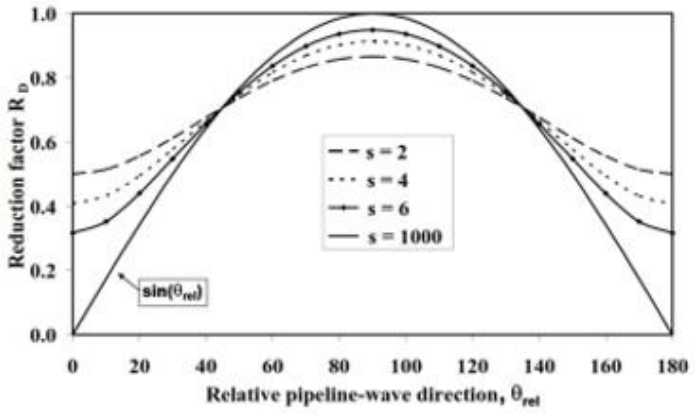
Di mana,

U_s = Kecepatan aliran gelombang normal pada pipa (m/s)

U_w = Kecepatan arus akibat gelombang (m/s)

R_D = Reduction factor, akibat efek arah dan sebaran gelombang.

Nilai R_D dapat ditentukan dengan menggunakan grafik pada Gambar 2.2



Gambar 2. 2 *Reduction Factor* Akibat Sebaran Gelombang (DNV RP F105)

B. Arus

Beban arus yang terdiri dari data kecepatan dan arah arus didapat dari pengukuran di laut. Pengukuran pada suatu rute pipa bawah laut dibagi menjadi beberapa zona pengukuran. Dengan memperhitungkan efek *boundary layer*, maka alat pengukur (*current meter probe*) diletakkan pada suatu elevasi referensi. Data arus yang diperoleh bersifat diskrit, per detik, per menit atau per jam. Dari data diskrit ini lalu dilakukan analisis spektrum kecepatan dan diambil rata – ratanya. Asumsi yang digunakan adalah arus dianggap *steady current*, yang terdiri dari :

1. Arus pasang surut
2. *Wind induced current*, diabaikan dalam Tugas Akhir ini.
3. *Storm surge induced current*, diabaikan dalam Tugas Akhir ini.

4. *Density driven current,* diabaikan dalam Tugas Akhir ini.

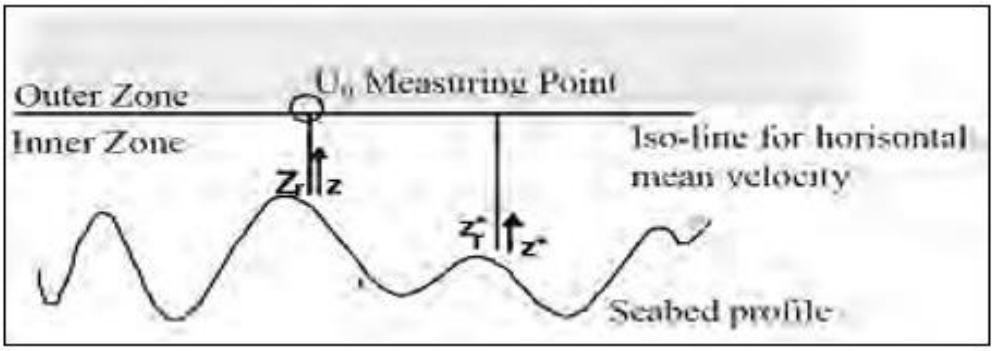
Untuk perairan dengan kedalaman lebih dari 100 m, arus memiliki dua karakteristik berbeda, sebagai *driving agent* dan *steering agent*. *Driving agent* adalah arus pasang surut, dimana gradien tekanan disebabkan oleh elevasi permukaan atau perubahan tekanan, angin dan gaya *storm surge*. *Steering agent* adalah arus yang terjadi karena pengaruh topografi dan gaya rotasi bumi. Selain itu, jenis aliran arus dibagi menjadi dua zona, yaitu:

a. Outer zone

Merupakan zona aliran yang terjadi pada elevasi yang jauh dari dasar laut, dimana rata-rata kecepatan arus dan turbulensi aliran hanya sedikit bervariasi dalam arah horizontal. *Outer zone* ini terletak pada suatu bentuk *seabed* yang membentuk suatu puncak atau lebih tinggi dari lembah *seabed.* Pada suatu *seabed* yang rata/flat, *outer zone* diasumsikan terletak pada ketinggian 3600 z_0 dari *seabed*. Nilai z_0 dilihat pada Tabel 2.2.

b. Inner zone

Merupakan zona aliran dimana rata-rata kecepatan arus dan turbulensi aliran menunjukkan variasi secara signifikan dalam arah horizontal. Kecepatan dan arah arus adalah fungsi dari geometri lokal dasar laut. Pada *inner zone*, profil kecepatan arus dianggap logaritmik karena tidak



Gambar 2. 3 Zona Aliran Arus (DNV RP F105, 2017)

terjadi pemisahan aliran. Untuk lebih jelasnya perhatikan Gambar 2.3 berikut.

Di dalam DNV RP F105, kecepatan arus pada level pipa dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.32 berikut :

$U_c = R_c \cdot U(z_r) \frac{(ln(z)-ln(z0))}{(ln(zr)-ln(z0))}$ .....(2.32)

Di mana,

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

R_c = sin (θ_{rel}) .....(2.33)

(θ_{rel}) = sudut datang aliran arus terhadap pipa

z = Elevasi diatas dasar laut (m)

$z = e + \frac{Dt}{2}$.....(2.34)

z_r = Elevasi referensi (m)

z_0 = Parameter kekasaran bawah laut (Tabel 2.2)

Tabel 2. 1 Parameter Kekasaran Dasar Laut (DNV RP F105, 2017)

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	$\approx 4 \cdot 10^{-2}$

2.2.7 Kriteria Aliran

Dengan telah diketahuinya besar kecepatan arus dan partikel gelombang. Maka besar kecepatan arus total tersebut harus diklasifikasikan untuk pengambilan analisis selanjutnya. Dasar dari pembagian kriteria ini adalah rasio antara kecepatan arus dan kecepatan partikel gelombang yaitu sebagai berikut :

$$\propto = \frac{Uc}{Uw+Uc} \quad \text{.....(2.35)}$$

Di mana,

Uc = Kecepatan arus (m/s)

Uw = Kecepatan Gelombang (m/s)

Rasio dari kecepatan arus dan kecepatan partikel ini merupakan faktor yang menentukan dampak aliran arus terhadap pipa. Adanya aliran yang melewati pipa menyebabkan pipa memiliki respon, dalam arah *in-line* (searah arus) dan arah *cross-flow* (tegak lurus vertikal arah arus). Tabel kriteria respon dan dampak terhadap pipa berdasarkan rasio kecepatan arus dan gelombang ditampilkan Tabel 2.3.

Tabel 2. 2 Kriteria Respon Pipa terhadap Rasio Aliran (DNV RP F105, 2017)

α < 0.5	**Gelombang Dominan (Uw>Uc)** **Arah *In-Line*:** Pembebanan arah *In-line* dihitung berdasarkan persamaan Morrison. *In-line* VIV akibat *vortex shedding* diabaikan. **Arah *Cross-Flow*:** Beban arah *cross-flow* dominan disebabkan oleh *vortex shedding*
0.5 < α < 0.8	**Gelombang Dominan (Uw<Uc)** **Arah *In-Line*:** Pembebanan arah *In-line* dihitung berdasarkan persamaan Morrison. *In-line* VIV akibat *vortex shedding* berkurang dengan keberadaan gelombang. **Arah *Cross-Flow*:** Beban *Cross-flow* dominan disebabkan oleh *vortex shedding* asimetris dan menunjukkan situasi arus yang dominan.
α > 0.8	**Arah Dominan (Uc>>Uw)** **Arah *In-Line*:** Pembebanan *In-line* berdasarkan *steady drag component* dan *oscillatory component* akibat *vortex shedding*

Pembebanan *In-line* dihitung berdasarkan persamaan Morrison diabaikan.

Arah *Cross-Flow*:

Pembebanan arah *cross-flow* secara siklik akibat *vortex shedding*, dan menunjukkan situasi arus murni yang dominan.

2.2.8 Gaya Hidrodinamis

Pipa bawah laut yang terletak di dasar laut akan terkena gaya hidrodinamis yang muncul akibat aksi gelombang dan arus laut. Variasi gaya yang terjadi cukup kompleks. Persamaan analitis sederhana hanya dapat menjelaskan pendekatan persamaan gaya yang terjadi pada pipa (*Braestrup* dkk, 2005). Gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa di dasar laut terdiri dari gaya *drag* (seret), gaya inersia dan gaya *lift* (angkat).

A. Gaya Seret (*Drag Force*)

Gaya *drag* adalah gaya yang 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 menggunakan Persamaan 2.36:

$$F_D = \frac{1}{2} . \rho_w . D_t . C_D . (U_w + U_C)^2 \quad \text{.....(2.36)}$$

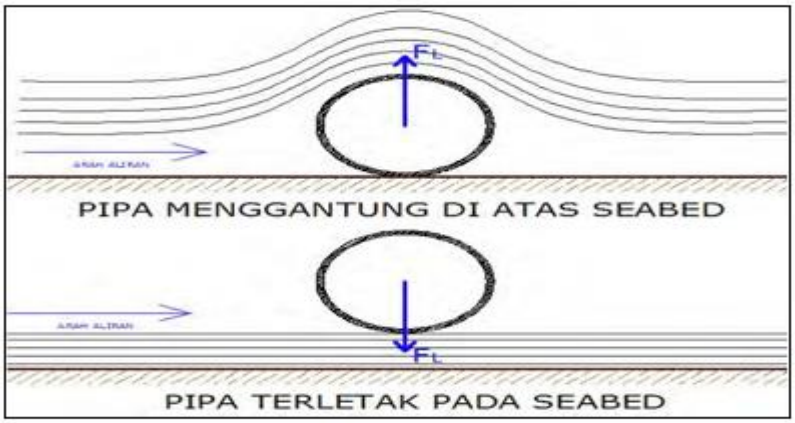
Di mana,

F_D	= gaya *drag*	(N/m)
C_D	= koefisien *drag*	
U_w	= kecepatan partikel air akibat gelombang	(m/s^2)
U_c	= kecepatan arus laut	(m/s^2)
ρ_w	= Massa jenis air laut	(kg/m^3)
D_t	= Diameter total pipa	(kg/m^3)

B. Gaya Angkat (*Lift Force*)

Gaya *Lift* atau angkat pada pipa muncul karena adanya aliran yang bekerja pada pipa. Ketika kecepatan aliran air di atas pipa lebih cepat

dibandingkan kecepatan aliran air di bawah pipa, tekanan aliran yang muncul di atas pipa akan lebih kecil di bandingkan tekanan aliran di bawah pipa. Perbedaan tekanan ini akan mengakibatkan pipa terangkat. Perhatikan Gambar 2.4 mengenai konsentrasi *streamline* pada pipa.



Gambar 2. 4 Ilustrasi Konsentrasi *Streamline* yang Melewati Pipa (Pratama, 2007)

Besar gaya angkat dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 2.37:

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

Di mana,

F_L	= Gaya *Lift*	(N/m)
ρ_w	= Massa jenis air laut	(kg/m^3)
C_L	= Koefisien gaya *lift*	
U_w	= kecepatan partikel air akibat gelombang	(m/s^2)
U_c	= kecepatan arus laut	(m/s^2)
D_t	= Diameter total pipa	(kg/m^3)

C. Gaya Inersia (*Inertia Force*)

Pipa bawah laut yang berinteraksi dengan fluida yang dipercepat akan mengalami gaya yang proporsional dengan percepatan dari fluida tersebut (Bai, 2014). Beban siklis akibat gelombang akan mengurangi atau menambah kecepatan air. Pipa akan memberikan gaya untuk mengolah perubahan kecepatan partikel air yang bekerja pada pipa. Besar gaya inersia dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 2.38:

$$F_I = \frac{\pi}{4} \cdot \rho_w \cdot D_t \cdot C_M \cdot a_n \quad \text{.....(2.38)}$$

Di mana,

F_I = Gaya Inersia (N/m)

C_M = Koefisien gaya inersia

a_n = percepatan partikel air (m/s^2)

D. Koefisien Hidrodinamika

Koefisien-koefisien C_D, C_L, dan C_M dalam penentuannya digunakan *Reynolds Number* untuk pipa terekspos pada aliran *steady*. Dalam Tabel 2.3 dibawah dapat diketahui rekomendasi koefisien hidrodinamika untuk aliran *steady*.

Tabel 2. 3 Rekomendasi Koefisien Hidrodinamika untuk Aliran *Steady* (Mouselli, 1981)

Re	C_D	C_L	C_M
$Re < 5.0 \times 10^4$	1.3	1.5	2.0
$5.0 \times 10^4 < Re < 1.0 \times 10^5$	1.2	1	2.0
$1.0 \times 10^5 < Re < 2.5 \times 10^5$	$1.53 - (Re / 3.0 \times 10^5)$	$1.2 - (Re / 5.0 \times 10^5)$	2
$2.5 \times 10^5 < Re < 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	$2.5 - (Re / 5.0 \times 10^5)$
$Re > 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	1.5

2.2.9 Tegangan Ekuivalen (*von Mises Stress*)

Untuk mengetahui kondisi batas dari pipa, maka diperlukan analisis tegangan pipa. Pada perhitungan ini, menggunakan ketentuan yang divalidasi terhadap aturan yang ada dalam *code* desain pipa yang digunakan. Beban yang bekerja pada pipa bawah laut (*offshore pipeline*) akan menyebabkan timbulnya tegangan di dinding pipa. Kombinasi tegangan-tegangan yang bekerja pada dinding pipa menyebabkan regangan atau defleksi.

Berdasarkan ASME B31.8 *(Gas Transmission and Distributing Piping System*) memberikan batasan-batasan pada tegangan yang terjadi pipa penyalur gas dengan menggunakan konsep *allowable stress design*. Berdasarkan kode ini, tegangan yang diizinkan terjadi pada pipa penyalur gas ditampilkan pada Tabel 2.4 berikut:

Tabel 2. 4 Tegangan Izin pada Pipa Menurut ASME B31.8 (ASME B31.8, 2012)

Design Calculation	*Allowable Stress*		
	Hoop Stress	*Longitudinal Stress*	*Combined Stress*
Operation	72% SMYS	80% SMYS	90% SMYS
Hydrotest	90% SMYS	72% SMYS	96% SMYS
Installation	72% SMYS	80% SMYS	90% SMYS

Sebagai catatan, yang menjadi perhatian dalam Tugas Akhir ini adalah tegangan yang bekerja hanya pada kondisi operasional saja.

A. Hoop Stress

Tegangan *hoop* merupakan tegangan yang bekerja pada dinding pipa akibat adanya pengaruh tekanan dari sisi luar dan dalam pipa. Tegangan ini bekerja pada arah *tangensial* atau *circumferential* (Guo dkk., 2014). ASME B31.8 merumuskan persamaan tegangan *hoop* yang dapat dilihat pada Persamaan 2.39 berikut:

$$\sigma_h = \begin{cases} (p_i - p_e)\frac{D_0}{2t} & untuk \ \ \frac{D}{t} \geq 30 \\ (p_i - p_e)\frac{D_0 - t}{2t} & untuk \ \frac{D}{t} < 30 \end{cases} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.39)$$

Di mana,

σ_h = tegangan *hoop* (MPa)

p_i = tekanan desain internal pipa (MPa)

p_e = tekanan eksternal (MPa)

D_0 = Diameter luar pipa (m)

t = ketebalan pipa (m)

B. Longitudinal Stress

Menurut Bai dan Bai, 2014, tegangan longitudinal merupakan tegangan aksial yang berkerja pada dinding pipa. Menurut ASME B31.8 komponen utama tegangan longitudinal adalah tegangan aksial kombinasi dan tegangan *bending*. Persamaan tegangan longitudinal dijelaskan dalam Persamaan 2.40 berikut.

$\sigma_L = \sigma_a + \sigma_b \ atau \ \sigma_a - \sigma_b$ ……(2.40)

Di mana,

σ_L = tegangan *longitudinal* (MPa)

σ_a = tekanan aksial kombinasi (MPa)

σ_b = tekanan *bending* (MPa)

Untuk pipa yang mengalami bentangan bebas, pipa dapat dianggap dalam kondisi *restrained* karena terdapat asumsi tumpuan pada bentangan bebas. Tumpuan pipa dapat menahan gerakan aksial, gerakan lateral maupun rotasi pipa yang dapat mempengaruhi tegangan pipa akibat tekanan dan temperatur pipa. Menurut ASME B31.8, tegangan aksial kombinasi dijelaskan di dalam Persamaan 2.41 dan 2.42 berikut:

$$\sigma_a = \sigma_{a0} + v_{st}\sigma_h + \sigma_t \quad \text{.....(2.41)}$$

$$\sigma_a = \frac{F_a}{A} + v_{st}\sigma_h + E_{st}\alpha_e(T_1 - T_2) \quad \text{.....(2.42)}$$

Di mana,

σ_{a0} = tegangan aksial (MPa)

F_a = gaya aksial (N)

σ_t = tegangan *thermal* (/^{0}C)

T_1 = temperatur pipa saat instalasi (^{0}C)

T_2 = temperatur pipa saat operasi (^{0}C)

v_{st} = *poisson ratio* pipa baja

Tegangan *bending* diakibatkan oleh momen yang terjadi pada bentangan bebas karena beban struktur pipa dan beban hidrodinamis. Persamaan tegangan *bending* dijelaskan pada Persamaan 2.43 berikut:

$$\sigma_b = \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{z_a} \quad \text{.....(2.43)}$$

Di mana**,**

M_i = *in-plane bending moment* (N.m)

M_o = *out-plane bending moment* (N.m)

i_i = *in-plane stress intensification factor*

i_o = *out-plane stress intensification factor*

z_a = modulus penampang pipa (m^3)

C. Ekuivalen Stress (*von Mises Stress*)

Tegangan ekuivalen atau *von mises* merupakan resultan dari seluruh tegangan yang terjadi pada pipa. Persamaan tegangan ekuivalen (*von mises*) ditampilkan pada Persamaan 2.44 berikut:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2 - \sigma_L \sigma_h + 3\tau^2} \quad \text{.....(2.44)}$$

Di mana,

τ = tegangan torsional (MPa)

Tegangan torsional biasanya relative kecil dibandingkan dengan tegangan – tegangan lain yang bekerja sehingga dapat diabaikan dalam analisis. Untuk kasus bentangan bebas pipa bawah laut dapat diabaikan sehingga nilainya adalah 0 (Bai dan Bai, 2014)

2.2.10 *Allowable Span* Statik

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, analisis terhadap *free span* pada pipa bawah laut dilakukan terhadap dua kriteria utama, yaitu *Fatigue Limit State* dan *Ultimate Limit State*. Analisis dikerjakan pada dua kondisi berbeda, yaitu kondisi statik dan dinamik. Pada suatu pipa bawah laut, di bentang bebas tersebut terjadi tegangan dengan besar tertentu akibat massa pipa yang tidak tertumpu oleh *seabed.* Bentang bebas yang terlalu panjang dapat menyebabkan tegangan berlebihan (*excessive yielding*) pada pipa. Dengan asumsi kedua ujung pipa pada bentang bebas bertumpu pada perletakan sederhana, maka panjang *allowable span* statik dapat ditentukan berdasarkan Persamaan 2.45 berikut.

$$L_{st} = \sqrt{\frac{2 . C . I . \sigma_e}{W_t . D}} \quad \text{. . . . . (2.45)}$$

Di mana,

L_{st} = panjang *allowable span* statik yang diijinkan (m)

C = konstanta ujung peletakan

I = *momen inertia* penampang pipa (m^4)

σ_e = tegangan ekuivalen (*von mises stress*) (N/m^2)

Wt = berat pipa terdistribusi merata per satuan panjang

(N/m)

D_{tot} = diameter total terluar pipa (m)

Untuk nilai W_t, dapat dirumuskan dalam Persamaan 2.46 berikut :

$$W_t = \sqrt{{W_{sub}}^2 + (F_D + F_I)^2} \quad \ldots\ldots\ldots (2.46)$$

Di mana,

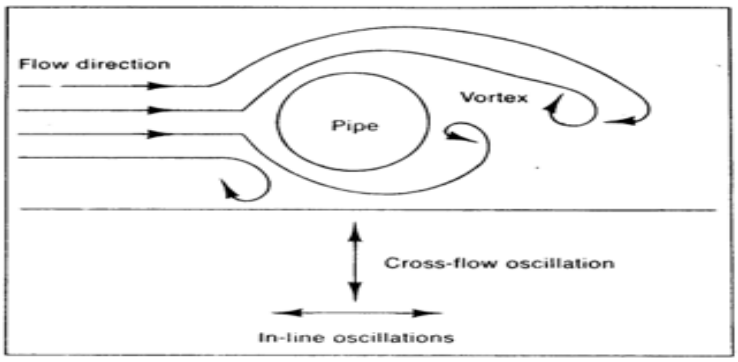
W_{sub} = berat pipa terendam dalam air per satuan panjang (*submerged weight*) (N/m)

F_D = gaya *drag* per satuan panjang (N/m)

F_I = gaya *inertia* per satuan panjang (N/m)

2.2.11 *Vortex Induced Vibration* (VIV)

Ketika partikel air mengalir melalui pipa bawah laut, *vortices* (pusaran) akan terbentuk di daerah pipa (gambar). Pusaran ini terbentuk karena turbulensi dan ketidakstabilan aliran di belakang pipa. Pelepasan pusaran (*vortex shedding*) ini perubahan terhadap tekanan hidrodinamis pada pipa secara periodik. Perubahan tekanan hidrodinamis ini dapat menyebabkan pipa bergetar, terutama pipa yang mengalami *free span* (Mouselli, 1981). Berikut permodelan *vortex induced vibration* ditampilkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Ilustrasi *Vortex Induced Vibration* (VIV) pada Pipa (Mouselli, 1981)

VIV dari *free span* tidak diperbolehkan terjadi selama masa desain *pipeline*. Dalam beberapa tahun terakhir pendekatan perhitungan VIV yang mempengaruhi *freespan* menjadi diterima dengan beberapa kriteria yang

telah ditentukan, di mana parameter VIV yang diizinkan terbukti tidak menyebabkan kelelahan.

Berdasarkan (Bai and Bai, 2005), bahwa kriteria VIV adalah sebagai berikut:

- Onset *in-line* VIV diperbolehkan pada setiap fase dari *design life* asalkan menunjukkan bahwa tegangan yang diijinkan dan kerusakan *fatigue* yang diijinkan tidak terlampaui.
- Onset *cross-flow* VIV diperbolehkan pada setiap fase dari *design life* asalkan menunjukkan bahwa tegangan yang diijinkan dan kelelahan yang diperbolehkan tidak terlampaui.

A. 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). Persamaan frekuensi *vortex shedding* dapat dilihat pada Persamaan 2.47 berikut:

$$f_s = S_t(\frac{U_{tot}}{Dt})\text{.....(2.47)}$$

Di mana,

S_t = *Strouhal Number* (0.2 untuk silinder bulat)

U_{tot} = kecepatan partikel air total ($U_w + U_c$)

B. *Reynolds Number*

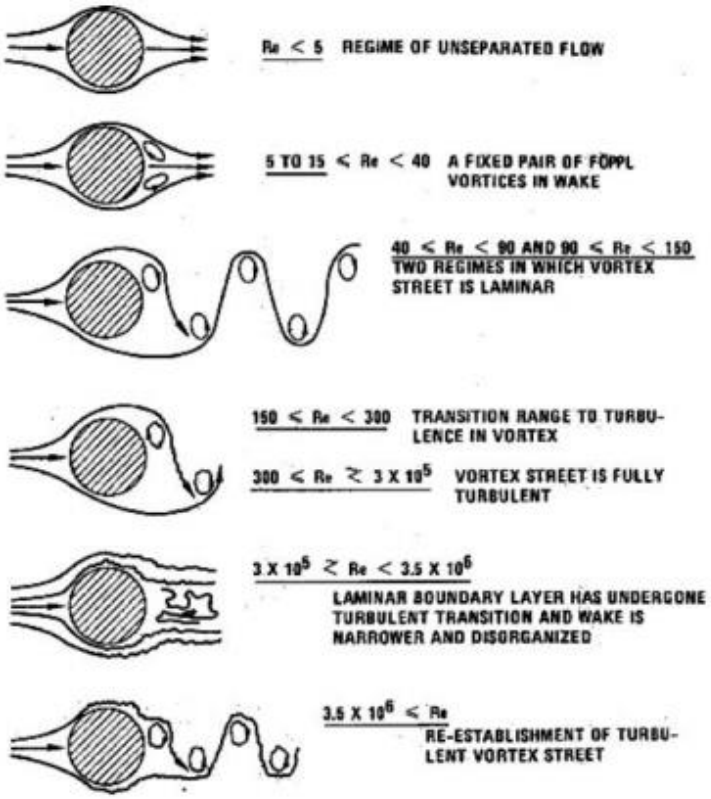
Persaman 2.48 berikut merupakan persamaan *reynolds number*:

$$R_e = (\frac{U_{tot}\,.Dt}{v})\text{ .....(2.48)}$$

Di mana,

v = Viskositas kinematik air laut ($1.02 \times 10^{-6}\ m^2/s$)

Bentuk-bentuk aliran fluida berbeda-beda untuk setiap *range* harga *Reynolds Number* yang berbeda. Hal ini dapat digunakan untuk mengetahui kondisi aliran di daerah tersebut seperti dijelaskan oleh Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Regime Aliran Fluida pada Silinder Halus (Lienhard, 1966)

Berdasarkan gambar 2.6 dapat diketahui fenomena terbentuknya *vortex* di belakang silinder yaitu:

- Nilai *reynolds number* untuk R_e < 5, aliran yang melewati silinder belum terbentuk aliran *vortex.*
- Nilai *reynolds number* untuk 5-15 < R_e < 40, aliran yang melewati silinder akan terbetuk *foppl vortices* dibagian belakang aliran silinder.
- Nilai *reynolds number* untuk 40 < R_e < 90 dan 90 < R_e < 150, terbentuk dua daerah pembentuk aliran *vortex* pada bagian sisi kanan dan kiri dari silinder dimana sifat dari *vortex* yang terbentuk adalah *laminer*
- Nilai *reynolds number* untuk 150 < R_e < 300, *vortex shedding* akan mengalami transisi ke bentuk yang lebih tidak teratur. Pada harga *reynolds number* tersebut aliran akan tampak menjadi *turbulent.*
- Nilai *reynolds number* untuk 300 < R_e < 3.10^5 dan 3.10^5 < R_e < 3.10^6

laminer boundary condition membentuk atau memisahkan aliran. Sehingga terlihat aliran sepenuhnya menjadi *turbulent* dan tidak teratur.

- Nilai *reynolds number* untuk R_e > 3.10^6 aliran *vortex* yang terjadi pada belakang silinder akan menjadi banyak dan semakin tidak teratur.

C. Stability Parameter

Sumer dan Fredsoe (1994) di dalam Choi (2000) menjelaskan bahwa *stability parameter* menentukan keunikan amplitudo getaran maksimum. *Stability parameter* dapat dilihat dalam Persamaan 2.49 berikut:

$$K_s = \frac{4 .\pi .m_e .\zeta_T}{\rho_w .Dt^2} \text{.....(2.49)}$$

Di mana,

m_e = massa efektif pipa (kg/m)

ζ_T = Total modal *damping ratio*

Di dalam DNV GL RP F105 (2017) total modal *damping ratio* terdiri dari:

- *Structural Damping* (ζ_{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 *corrossion coating* dapat meningkatkan *damping* menjadi 0.01-0.02
- *Hydrodynamic Damping* (ζ_h) untuk VIV yang terletak di daerah *lockin* nilainya dapat dianggap 0
- *Soil damping* (ζ_{soil}), untuk tujuan screening bernilai 0.01
- Di dalam DNV RP F105, *stability parameter* ini dibagi dengan *safety factor* untuk meningkatkan keamanan, sesuai Persamaan 2.50.

$$K_{sd} = \frac{K_s}{\gamma_k} \text{.....(2.50)}$$

D. Reduced Velocity

Parameter *reduced velocity* adalah besaran non dimensional yang dihitung untuk menentukan eksistensi *vortex shedding*. Dari harga *reduced velocity* maka dapat diketahui tipe gerakan disekitar aliran yaitu *in-line* atau *cross-flow*. *In-line* atau *cross-flow response* terjadi apabila harga *reduced velocity*-nya memenuhi batasan sebagai berikut:

- *In-line response* terjadi apabila harga V_R pada $1.0<V_R<2.2$
- *Cross-flow response* terjadi apabila harga V_R pada $V_R>2.2$

Reduced velocity merupakan kecepatan aliran partikel air dimana getaran pada pipa akibat *vortex shedding* terjadi (Guo dkk, 2014). Persamaan 2.51 (*reduced velocity)* adalah sebagai berikut:

$$V_R = \frac{U_c+U_w}{f_n .Dt} \text{.....(2.51)}$$

Di mana,

U_c = Kecepatan normal arus pada pipa (m/s)

U_w = Kecepatan aliran gelombang signifikan yang mengenai pipa.(m/s)

f_n = frekuensi natural pipa (Hz)

D_t = Diameter total pipa (m)

E. Keulegan-Carpenter Number

Perhitungan *Keulegan-Carpenter Number*, ditunjukkan dalam Persamaan 2.52

$$KC = \frac{U_w}{f_w .D_t} \text{.....(2.52)}$$

Di mana,

f_w = frekuensi gelombang signifikan (1/*Tu*)

F. Current Flow Ratio

Perhitungan rasio aliran arus, ditunjukkan dalam Persamaan 2.53

$$\alpha = \frac{U_{c100\ tahun}}{U_{c100tahun} .U_{w10tahun}} \text{.....(2.53)}$$

Di mana,

$U_{c,100\ tahun}$ = Kecepatan arus 100 tahun rata-rata pada pipa.

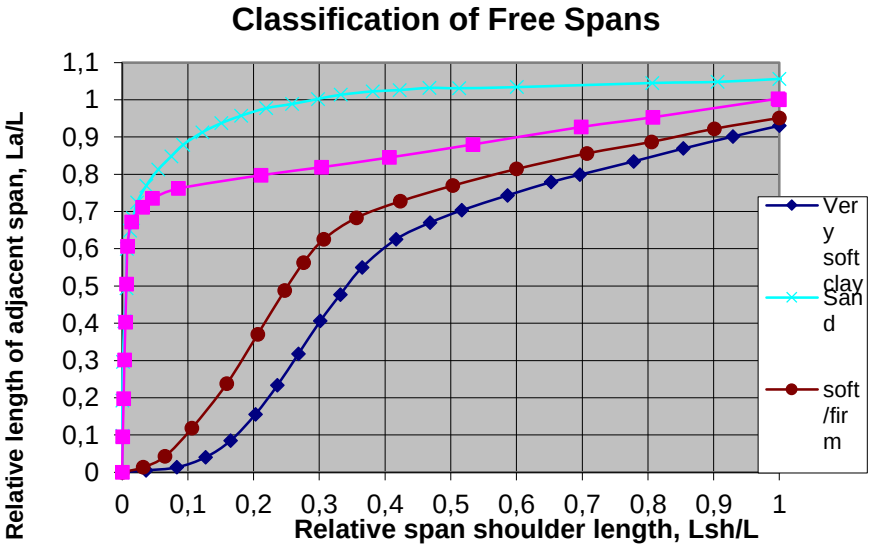
$U_{w,10tahun}$ = Kecepatan aliran gelombang signifikan pada pipa.

Semakin tinggi nilai KC, *regime* aliran pada akhirnya akan menyerupai kondisi arus murni. Dalam DNVGL RP F105, jika KC> 40, aliran harus dianggap sebagai arus dominan terlepas dari komponen arus aktual. Dalam perhitungan model respons, ini dapat diasumsikan α = 1, ketika KC> 40. Asumsi ini tidak boleh digunakan dalam perhitungan gelombang langsung, di mana kecepatan aliran arus yang benar harus diterapkan tanpa memperhatikan *regime* KC.

G. Klasifikasi Morfologi *Seabed*

Objek dari morfologi *seabed* adalah untuk menentukan apakah *free span* terisolasi atau berinteraksi. Klasifikasi morfologi ini ditentukan berdasarkan tingkat kerumitan atau kompleksitas untuk analisis selanjutnya. Kriteria ini adalah

- Dua atau lebih *free span* yang berurutan/ber*dampingan* dianggap terisolasi (masing-masing) jika perilaku dan karatersitik statik dan dinamiknya tidak dipengaruhi oleh *span* disebelahnya.
- Rangkaian suatu *free span* dikatakan saling berinteraksi jika perilaku dan karakteristik statik dan dinamiknya terpengaruhi oleh keberadaan *span* di sebelahnya. Dalam hal ini maka lebih dari satu *span* yang harus dimodelkan dalam pemodelan perilaku dan interaksi*pipe-s*



Gambar 2. 7 Klasifikasi Morfologi Interaksi *Free Span* (DNV F105, 2017)

Untuk analisis yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini, digunakan asumsi bahwa hanya satu *span* tunggal yang akan dilakukan analisis. Interaksi antar *span* yang melewati gundukan (*low deppression*) dianggaptidak ada. Analisis hanya dilakukan pada satu *span*, secara statik dan dinamik.

H. Klasifikasi Respon Pipa pada *Free Span*

Klasifikasi respon pipa pada suatu *free span* ditentukan berdasarkan rasio L (panjang *span*) dan D (diameter terluar pipa). Kriteria L/D ini diberikan oleh DNV-RP-F105 dengan klasifikasi pada Tabel 2.4 berikut.

Tabel 2. 4 Klasifikasi Respon *Free Span* (DNV RP F105, 2017)

L/D	Jenis Respon
L/D < 30	**Amplifikasi dinamik sangat kecil**
	Secara umum, analisis fatigue tidak perlu dilakukan. Beban lingkungan dianggap tidak signifikan untuk menyebabkan respon dinamik pipa dan VIV tidak akan terjadi.
30 < L/D < 100	**Respon didominasi oleh perilaku balok (beam)**
	Merupakan tipikal panjang span untuk kondisi operasi Frekuensi natural sensitif terhadap kondisi batas dan gaya aksial efektif.
100 < L/D < 200	**Respon didominasi oleh perilaku kombinasi balok dan kabel**
	Keadaan yang relevan untuk free span pada *uneven seabed* untuk sementara. Frekuensi natural sensitif terhadap kondisi batas, gaya aksial efektif, termasuk defleksi awal dan kekakuan geometrik.
L/D > 200	**Respon didominasi oleh perilaku kabel**
	Keadaan relevan untuk pipa berdiameter kecil pada kondisi sementara. Frekuensi natural dipengaruhi oleh bentuk terdefleksi dan gaya aksial efektif.

2.2.12 Panjang *Effective Span*

Dalam analisa panjang bentangan bebas pipa bawah laut menggunakan DNV RP F105, digunakan parameter panjang bentangan bebas yaitu panjang bentangan bebas efektif. Panjang *span* efektif merupakan panjang ideal *span*, yang mengasumsikan panjang aktual *span* tersebut pada kondisi *fixed-fixed constraint* (sudah dipengaruhi oleh kekakuan tanah *seabed*). Persamaan panjang *span* efektif dijelaskan pada Persamaan 2.54 dan 2.55:

$$\frac{L_{eff}}{L} = \begin{cases} \dfrac{4{,}73}{-0{,}066\beta^2+1{,}02\beta+0{,}63} & ,untuk\ \beta \geq 2{,}7 \\ \dfrac{4{,}73}{0{,}036\beta^2+0{,}6\beta+1{,}0} & ,untuk\ \beta < 2{,}7 \end{cases} \quad \ldots(2.54)$$

Dengan,

$\beta = log_{10}(\frac{K.L^4}{(1+CSF)E_{st}I_{st}}$.....(2.55)

Di mana,

L_{eff} = Panjang *efektif span* (m)

L = Panjang aktual *free span* (m)

β = *Relative soil stiffness parameter*

K = *Relevant soil stiffness* (vertikal/ horizontal, statis/dinamis)

CSF = *Concrete stiffness factor*

E_{st} = *Young's modulus* pipa baja (N/m^2)

I_{st} = Momen inersia pipa baja (m^4)

A. Dynamic Soil Stiffness

Dynamic soil stiffness muncul akibat adanya interaksi pipa bawah laut dengan tanah di lokasi pipa. *Dynamic soil stiffness* muncul di dua arah interaksi pipa yaitu arah vertikal dan horizontal. *Dynamic soil stiffness* vertikal merupakan kekakuan tanah yang dipengaruhi gaya vertikal dinamis antara pipa dan tanah per satuan panjang pipa dan *displacement* vertikal pipa. Sedangkan *dynamic soil stiffness* horizontal merupakan kekakuan tanah yang dipengaruhi gaya horizontal dinamis antara pipa dan tanah per satuan panjang pipa dan *displacement* horizontal pipa.

Jika kondisi topologi di daerah pipa tidak kompleks dan tanah bersifat homogen, nilai *dynamic soil stiffness* dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.56 dan 2.57 sesuai persamaan yang tertera pada DNV GL RP F105 berikut :

- **Vertikal**

$K_v = \frac{C_v}{1-v_{soil}}(\frac{2}{3}M_{ratio} + \frac{1}{3})\sqrt{Dt}$.....(2.56)

Di mana,

K_v = *Dynamic soil stiffness* vertical (kN/m/m)

C_v = Koefisien *Dynamic soil stiffness* vertical (kN/$m^{\frac{5}{2}}$)

M_{ratio} = Rasio massa spesifik antara massa pipa (tanpa massa tambah) dan massa air yang dipindahkan

- **Horizontal**

$K_L = C_L(1 + v_{soil})(\frac{2}{3}M_{ratio} + \frac{1}{3})\sqrt{Dt}$.....(2.57)

Di mana,

K_L = *Dynamic soil stiffness* horizontal (kN/m/m)

C_L = Koefisien *Dynamic soil stiffness* horizontal (kN/$m^{\frac{5}{2}}$)

B.* Koefisien *Dynamic Soil Stiffness

Koefisien *dynamic soil stiffness* ditentukan di dalam DNV GL RP F105 untuk setiap jenis tanah. Pada tugas akhir ini, jenis tanah di lokasi pipa merupakan *sand* sehingga koefisien yang digunakan dijelaskan pada Tabel 2.5 berikut :

Tabel 2. 5 Koefisien *Dynamic Soil Stiffness* untuk Jenis Tanah *Sand* (DNV RP F105, 2016)

Sand type	C_V *(kN/m$^{5/2}$)*	C_L *(kN/m$^{5/2}$)*	$K_{V,S}$ *(kN/m/m)*
Loose	10500	9000	250
Medium	14500	12500	530
Dense	21000	18000	1350

2.2.13 Frekuensi Natural Pipa

Sebuah benda memiliki frekuensi natural yang merupakan jumlah getaran alami sebuah benda yang dihasilkan tiap detik. Walaupun benda tidak diberikan pemicu untuk bergetar (gaya luar), benda tersebut akan senantiasa bergetar tetapi tidak dalam nilai yang besar. Setiap stuktur memiliki frekuensi natural yang berbeda tergantung dari massa dan kekakuannya. Craig (1981) menjelaskan bahwa frekuensi natural sebuah struktur dapat ditentukan dengan mengabaikan pemicu dari gaya luar dan redaman dari struktur (*Undamped Free Vibration*). Frekuensi natural di dalam DNV-GL RP F105 (2017) dijelaskan di dalam persamaan *fundamental natural frequency* pada Persamaan 2.58:

$f_1 = C_1\sqrt{1 + CSF}\sqrt{\frac{E_{st}I_{st}}{m_e L_{eff}^4}(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}} + C_3(\frac{\delta}{D_t})^2)}$.....(2.58)

Di mana,

f_1 = *fundamental natural frequency* (Hz)

C_1, C_3 = *boundary condition coefficient*

CSF = *concrete stiffness factor*

E_{st} = *Young's modulus* pipa baja (N/m^2)

I_{st} = Momen inersia pipa baja (m^4)

L_{eff} = Panjang *Freespan* efektif (m)

S_{eff} = *effective axial force* (N)

P_{cr} = *critical buckling load* (N)

δ = *static deflection* (m)

Setiap parameter pada persamaan frekuensi natural dasar, akan dijelaskan lebih lanjut dibawah ini.

A. Safety Factor

Safety factor merupakan faktor yang digunakan untuk meningkatkan keamanan suatu parameter analisis. *Safety factor* memiliki nilai yang berbeda-beda tergantung pada kondisi pada suatu parameter analisis. Nilai *safety factor* untuk setiap parameter analisis terdapat didalam DNVGL RP F105 dijelaskan di dalam Tabel 2.6 dan Tabel 2.7 berikut:

Tabel 2. 6 Faktor Keamanan *Screening Criteria* (DNV RP F105, 2017)

γ_{IL}	1,4
γ_{CF}	1,4

Tabel 2. 7 Faktor Keamanan *Screening Fatigue* (DNV RP F105, 2017)

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

B. 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. Oleh 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 menjadi suatu lendutan vertikal. Parameter *effective axial force* dijelaskan dalam Persamaan 2.59 berikut:

$$S_{eff} = H_{eff} - (1 - 2v).P_i \frac{\pi}{4}.(D_i)^2 - \alpha_e.\Delta T\,.A_{st} \text{.....(2.59)}$$

Di mana,

H_{eff} = *Effective lay tension* (N)

v = *Poisson ratio* baja (0.3s)

P_i = Perbedaan tekanan internal (Pa)

D_i = Diameter dalam pipa (m)

α_e = koefisien ekspansi suhu (/^{0}C)

ΔT = Perbedaan temperatur (^{0}C)

A_{st} = Luas penampang pipa baja (m^2)

C. 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 ditetukan dengan Persamaan 2.60 berikut :

$$P_{cr} = (1 + CSF)\, C_2 \pi^2 \frac{E_{st} I_{st}}{L_{eff}^2} \text{.....(2.60)}$$

Di mana,

C_2 = *boundary condition coefficient*

CSF = *concrete stiffness factor*

I_{st} = Momen inersia pipa baja (m^4)

D. 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 2.61 berikut:

$$\delta = C_6 \pi^2 \frac{q \cdot L_{eff}^4}{E_{st} I_{st} \cdot (1+CSF)} \cdot \frac{1}{(1+\frac{S_{eff}}{P_{cr}})} \text{.....(2.61)}$$

Di mana,

C_6 = *boundary condition coefficient*

q = *deflection load unit per length* (N/m)

P_{cr} = *critical buckling load* (N)

I_{st} = Momen inersia pipa baja (m^4)

S_{eff} = *effective axial force* (N)

E. 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 2.62 berikut:

$$CSF = k_c \left(\frac{EI_{conc}}{EI_{steel}}\right)^{0,75} \text{.....(2.62)}$$

Di mana,

k_c = konstanta empiris

= 0.33 untuk AE dan 0.25 untuk PP/PE *coating*

EI_{conc} = *bending stiffness* selimut beton

EI_{steel} = *bending stiffness* pipa baja

F. 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 GL RP F105 yang disajikan pada Tabel 2.8 berikut:

Tabel 2. 8 Koefisien *Boundary Condition* (DNV RP F105, 2017)

	Pinned-pinned	*Fixed-fixed*	*Single Span on seabed*
C_1	1.57	3.56	3.56
C_2	1.0	0.25	0.25
C_3	$0.8^{(1)}$	$0.2^{(1)}$	$0.4^{(1)}$
C_4	4.93	14.1	*Shoulder:* $\frac{1}{18\,(L_{eff}/\mathrm{L})^2 - 6}$ *Midspan:* 8.6
C_5	1/8	1/12	*Shoulder* $^{(4)}$*:* 14.1 $(\mathrm{L}/\mathrm{L}_{\mathrm{eff}})^2$ *Midspan:* 8.6

C_6	5/384	1/384	1/384

2.2.14 *Screening Criteria Fatigue*

Screening fatigue yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini mengacu pada DNV GL RP F105. Kriteria *screening* adalah meninjau terjadinya *fatigue* akibat VIV yang disebabkan oleh beban gelombang secara langsung dan kombinasi beban arus & gelombang secara bersamaan. Kriteria *fatigue* ini telah dikalibrasikan dengan analisis *fatigue* lengkap untuk memastikan usia *fatigue* lebih dari 20 tahun. Di dalam DNV GL RP F105 (2017), evaluasi bentangan bebas pipa bawah laut dijelaskan di dalam Persamaan *screening criteria* berikut:

Untuk arah *In-Line*, harus memenuhi persamaan 2.63 sebagai berikut:

$$\frac{f_{o,IL}}{\gamma_f} > \frac{U_{c,100\ tahun}}{V_{R,onset}^{IL} . D_t} . \left(1 - \frac{L/_{Dt}}{250}\right) . \frac{\gamma_{IL}}{\bar{\alpha}} \text{.....(2.63)}$$

Di mana,

$f_{o,IL}$ = Frekuensi natural *in-line*

γ_{IL} = *Safety Factor (in-line)*

$U_{c,100\ tahun}$ = Periode ulang arus 100 tahun (m/s)

$V_{R,onset}^{IL}$ = *In-line onset value*

D_t =Diameter total pipa (m)

L = Panjang aktual *freespan* pipa (m)

$\bar{\alpha}$ = *Current flow ratio*

Untuk nilai *onset* arah *In-Line*, dijelaskan pada persamaan 2.64 sebagai berikut:

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_{on,IL}} & ; untuk\ K_{sd} < 0{,}4 \\ (\frac{0{,}6+K_{sd}}{\gamma_{on,IL}}) & ; untuk\ K_{sd}\ 0{,}4 < K_{sd} < 1{,}6 \\ \frac{2{,}2}{\gamma_{on,IL}} & ; untuk\ K_{sd} > 1{,}6 \end{cases} \text{.(2.64)}$$

Di mana,

$\gamma_{on,IL}$ = *Safety Factor (in-line) value*

K_{sd} = *Stability Parameter/γ_k (safety factor)*

Untuk arah *Cross-Flow*, harus memenuhi persamaan 2.65 sebagai berikut:

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_f} > \frac{U_{c,100\ tahun} + U_{w,10\ tahun}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D_t}\ x\ \gamma_{CF} \quad \text{……..(2.65)}$$

Di mana,

$f_{n,CF}$ = Frekuensi natural *cross-flow*

γ_{CF} = *Safety Factor (cross-flow)*

$U_{c,100\ tahun}$ = Periode ulang arus 100 tahun (m/s)

$U_{w,10\ tahun}$ = Periode ulang gelombang 10 tahun (m/s)

$V_{R,onset}^{CF}$ = *Cross-flow onset value*

D_t =Diameter total pipa (m)

Untuk nilai *onset* arah *Cross-flow*, dijelaskan pada persamaan 2.66 sebagai berikut:

$$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3\ .\ \Psi_{proxi,onset}\ .\ \Psi_{mass,onset}\ .\ \Psi_{a,onset}}{\gamma_{on,CF}} \quad \text{……(2.66)}$$

Di mana,

$\gamma_{on,CF}$ = *Safety Factor (cross-flow) value*

$\Psi_{proxi,onset}$ = faktor koreksi untuk *cross-flow* dekat seabed

$\Psi_{mass,onset}$ = *Reduction factor* untuk *cross-flow* karena massa

$\Psi_{a,onset}$ = faktor koreksi untuk kecepatan arus

2.2.15 Umur Kelelahan Pipa

Fatigue life atau sisa waktu operasi merupakan jumlah siklus kelelahan yang terjadi pada suatu struktur hingga menyebabkan terjadinya kegagalan pada suatu sruktur tersebut. Seperti yang telah dijelaskan pada DNV-RP- C 203 yaitu dimana dalam melakukan perhitungan *fatigue life*, menggunakan pendekatan kurva S-N dengan metode *Palmgren-Miner Rule*.

Komponen-komponen dasar dari analisa umur kelelahan (*fatigue life*) sebagai berikut:

1. Karakteristik siklus beban yang terjadi baik untuk kurun waktu pendek maupun kurun waktu panjang.
2. Perhitungan beban-beban siklis yang mengenai struktur.
3. Evaluasi siklus rentang tegangan pada suatu elemen yang ditinjau.

4. Perhitungan kerusakan pada elemen yang ditinjau akibat siklus rentang tegangan yang terjadi.
5. Evaluasi kekuatan elemen yan ditinjau.

Dalam desain suatu struktur pada kasus pipa bawah laut, salah satu kriteria persyaratan desainnya adalah memiliki waktu operasi yang tak terhingga waktunya untuk dapat bertahan karena adanya kegagalan akibat kelelahan pada pipa. Sehingga jika pipa mendapatkan tekanan baik itu dari dalam dan dari luar yang pada akhirnya menyebabkan pipa mengalami kelelahan, struktur material dari pipa tersebut masih mampu dalam menahan tingkat kelelahan yang terjadi atau dengan kata lain tidak terjadi kegagalan pada pipa tersebut.

A. Siklus Kelelahan

Berdasarkan DNV RP C203 untuk menentukan sisa waktu operasi harus mencari terlebih dahulu tingkat kelelahan dengan Persamaan 2.67:

$D_{fat} = \sum \frac{n}{N}$……(2.67)

Di mana,

D_{fat} = Akumulasi *fatigue damage*

n = *Total number of stress cycles corresponding to Stress Range*

N = *Number cycles to failure at stress range*

Untuk mendapatkan besarnya nilai n dan N maka diperlukan kurva S-N. Perhitungan umur kelelahan ini mengacu pada DNV GL RP F 105 dan DNV RP C203. Melalui proses pemilihan jenis kurvanya dan kategori kurva S-N, maka nilai N dapat diperoleh melalui Persamaan 2.68 berikut ini (DNV RP-C 203):

$$\log N = \log a - m \log S_i \text{……(2.68)}$$

Di mana,

S_i = *Stress Range*

a = *intercept of the design S-N Curve with the log N axis*

m = *negative inverse slope oh the S-N Curve*

Nilai n dapat ditentukan dengan menggunakan grafik pada Gambar 2.9 sesuai nilai *stress range*. Probabilitas kejadian siklus tegangan pada nilai

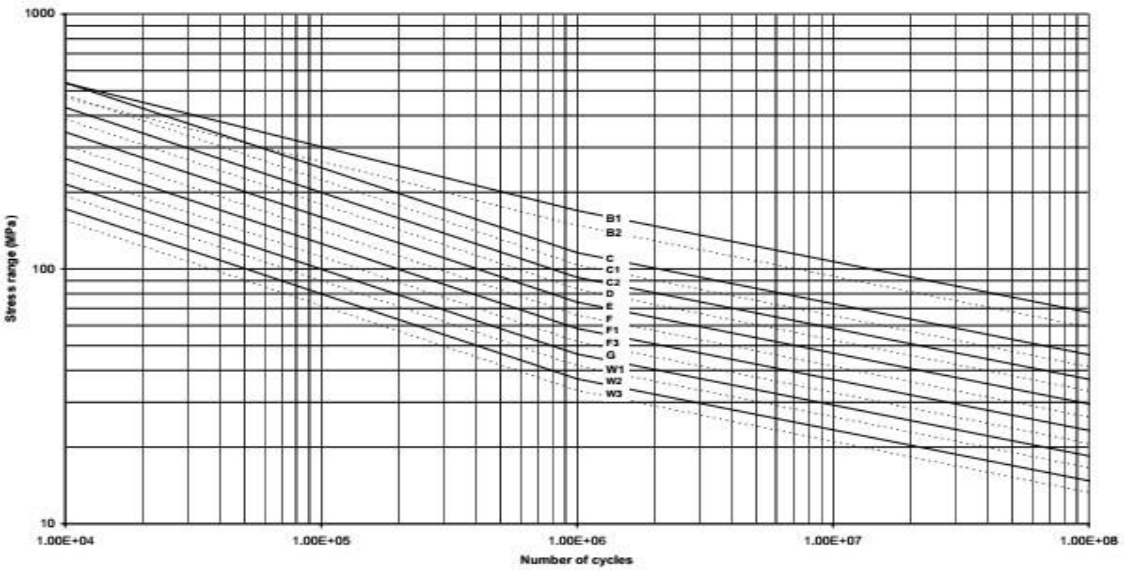
n berkisar 2% - 10%. Kurva S-N yang digunakan seperti pada Gambar 2.9, mengacu pada *Figure 2-5* DNV RP C203 *Fatigue Strength of Offshore Steel Structure* yaitu kategori D. Pemilihan kurva harus didasarkan ciri-ciri struktur yang dianalisa. Berikut pemilihan jenis kurva S-N dan *plotting* tegangan dalam grafik kurva S-N dalam menentukan jumlah tegangan lelah yang terjadi di struktur tersebut dijelaskan oleh Tabel 2.9 dan Gambar 2.8.

Tabel 2. 9 Tabel *S-N Curve* di *Seawater* dengan *Cathodic Protection* (DNV RP C203, 2005)

Table 2-2 S-N curves in seawater with cathodic protection

S-N curve	*N ≤ 10 6 cycles*		*N > 10 6 cycles*	*Fatigue limit at 10 7 cycles*)*	*Thickness exponent k*	*Stress concentration in the S-N detail as derived by the hot spot method*
	m_1	$\log \bar{a}_1$	$\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5.0$			
B1	4.0	14.917	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.685	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.192	16.320	73.10	0.15	
C1	3.0	12.049	16.081	65.50	0.15	
C2	3.0	11.901	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	11.764	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	11.610	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.455	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.299	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.146	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	10.998	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	10.861	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	10.707	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.570	13.617	21.05	0.25	2.50
T	3.0	11.764	15.606	52.63	0.25 for SCF ≤ 10.0 0.30 for SCF >10.0	1.00

*) see also 2.10



Gambar 2. 8 *Plotting stress* S-N *Curve* di *Seawter* (DNV RP C203, 2005)

Pada perhitungan estimasi sisa waktu operasi harus di cari terlebih dahulu nilai rasio kelelahan kerusakan. Oleh sebab itu, dalam penentuan rasio *fatigue damage* atau rasio kelelahan kerusakan, semua komponen yang berasal dari sumber lainnya perlu dihitung lebih lanjut. Komponen tersebut meliputi adanya penambahan *safety factor* dan rasio *damage*. Penentuan jenis kurva S-N seperti pada Gambar 2.7 berdasarkan pada struktur yang digunakan. Maka dari itu, perlunya penyesuaian kurva-SN untuk mendapatkan grafik yang benar agar mendapatkan nilai jumlah siklus menuju gagal pada saat *stress range*.

B. Response Model dan *Stress Range*

Pemodelan respon amplitudo adalah model empirik yang berguna untuk mencari besar amplitudo respon VIV *steady state maximum* sebagai fungsi dasar hidrodinamika dan parameter struktur.

Dalam respon model ini, analisis *in-line* dan *cross-flow* VIV dilakukan terpisah. Kontribusi kerusakan yang dari *first & second in-line instability region* dalam kondisi arus dominan dianalisis secara implisit dalam model *in-line*. Respon amplitudo bergantung pada beberapa parameter hidrodinamika dan data lingkungan, yaitu :

- *Reduced velocity*, VR
- Bilangan *Keulegan-Carpenter*, KC
- Rasio kecepatan aliran arus, α
- Intensitas turbulensi, I_C
- Sudut aliran relatif terhadap pipa, θrel
- Parameter stabilitas, K_S

1. *In-line response model*

Respon arah *in-line* dari suatu *free span* pipa pada kondisi arus dominan berkaitan dengan kondisi *vortex shedding* simetris. Amplitudo respon terutama bergantung pada *reduced velocity* (V_R), parameter stabilitas (Ks), dan sudut datang arah arus relatif terhadap pipa θ_{rel}.

Besar *range* tegangan dari *in-line* VIV berdasarkan Persamaan 2.69.

$$S_{IL} = 2\, A_{IL} \left(\frac{A_\gamma}{D}\right) \psi_{a,IL} \cdot \gamma_{IL} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.69)$$

Di mana,

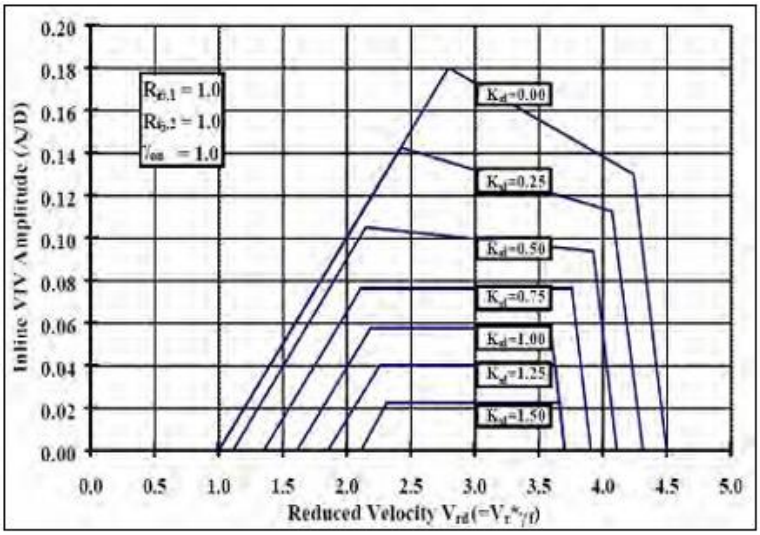
S_{IL} = *stress range* pada arah *in-line* VIV (N/m^2)

A_{IL} = *unit amplitude stress*, tegangan yang dilakukan unit diameter dari mode bentuk defleksi *in-line* (N/m^2)

$\psi_{a,IL}$ = faktor koreksi untuk rasio kecepaan aliran arus

γ_{IL} = faktor keamanan untuk *in-line* VIV (Tabel 2.7)

A_γ/D = amplitudo maksimum dari vibrasi pada arah *in-line* VIV (dapat dilihat pada Gambar 2.9)



Gambar 2. 9 Respon Amplitudo *In-Line* VIV (DNV RP F105, 2017)

Untuk besarnya nilai $\psi_{a,IL}$ yang merupakan fungsi reduksi *in-line* VIV akibat kondisi gelombang dominan didapatkan dari Persamaan 2.70 berikut :

$$\psi_{a,IL} = \begin{cases} 0.0\ untuk\ a < 0.5 \\ \frac{(a-0.5)}{0.3}\ untuk\ 0.5 < a < 0.5 \\ 1.0\ untuk\ a > 0.5 \end{cases} \quad \text{.....(2.70)}$$

Maka dari itu, pada kasus dimana α < 0.5 maka *in-line* VIV diabaikan. Sedangkan untuk nilai A_{IL} yang merupakan *Unit Stress Amplitude* pipa didapatkan dari Persamaan 2.71 berikut.

$$A_{IL} = C_4\ x\ (1 + CSF)\ x\ \frac{D\ x\ (D_o - t)\ x\ E}{L^2_{eff}} \text{.....(2.71)}$$

Di mana,

C_4 = *boundary condition coefficient* (Tabel 2.9)

CSF = *Concrete Stiffness Factor*

D_o = Diameter *steel pipe* (tanpa concrete) (m)

Persamaan *in-line reduced velocity* untuk *region* lainnya dalam grafik pada Gambar 2.10 dijelaskan oleh Persamaan 2.72-2.76.

$$V_{R,1}^{IL} = 10 \left(\frac{A_{y,1}}{D}\right) + V_{R,onset}^{IL} \quad (2.72)$$

$$V_{R,2}^{IL} = V_{R,1}^{IL} - 2\left(\frac{A_{y,2}}{D}\right) \quad (2.73)$$

$$V_{R,end}^{IL} = \begin{cases} 4.5 - 0.8\, K_{sd}\,; untuk\ K_{sd} < 1.0 \\ 3.7\,; untuk\ K_{sd} \geq 1.0 \end{cases} \quad (2.74)$$

$$\left(\frac{A_{y,1}}{D}\right) = \max\left[0.18\left(1 - \frac{K_{sd}}{1.2}\right) R_{I\theta,1}; \left(\frac{A_{y,2}}{D}\right)\right] \quad (2.75)$$

$$\left(\frac{A_{y,2}}{D}\right) = 0.13\left(1 - \frac{K_{sd}}{1.8}\right) R_{I\theta,2} \quad (2.76)$$

Besaran $R_{I\theta}$ merupakan fungsi reduksi untuk memperhitungkan efek intensitas turbulensi yang terjadi, yang ditentukan berdasarkan arah datang aliran arus/ gelombang menuju pipa (dalam radian). $R_{I\theta}$ untuk tiap daerah *instability* sesuai Persamaan 2.77-2.78 berikut.

$$R_{I\theta,1} = 1 - \pi^2\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{rel}\sqrt{2}\right)(I_c - 0.03) \quad (2.77)$$

$$R_{I\theta,2} = 1.0 - \left(\frac{I_c - 0.03}{0.17}\right) \quad .....(2.78)$$

Besar $R_{I\theta,1}$ dan $R_{I\theta,2}$ berada diantara 0.0 dan 1.0.

2. Cross-flow response model

Respon arah *cross-flow* dari suatu *free span* pipa pada kondisi arus dominan berkaitan dengan kondisi *vortex shedding* simetris. Amplitudo respon terutama bergantung pada *reduced velocity* (V_R), faktor koreksi (Ψ) dan *Keulegan-Carpenter*.

Besar *range* tegangan yang diakibatkan *cross-flow* VIV akibat beban lingkungan dituliskan oleh Persamaan 2.79 berikut :

$$S_{CF} = 2\, A_{CF}\left(\frac{A_Z}{D}\right) R_k\, \gamma_s \quad .....(2.79)$$

Di mana,

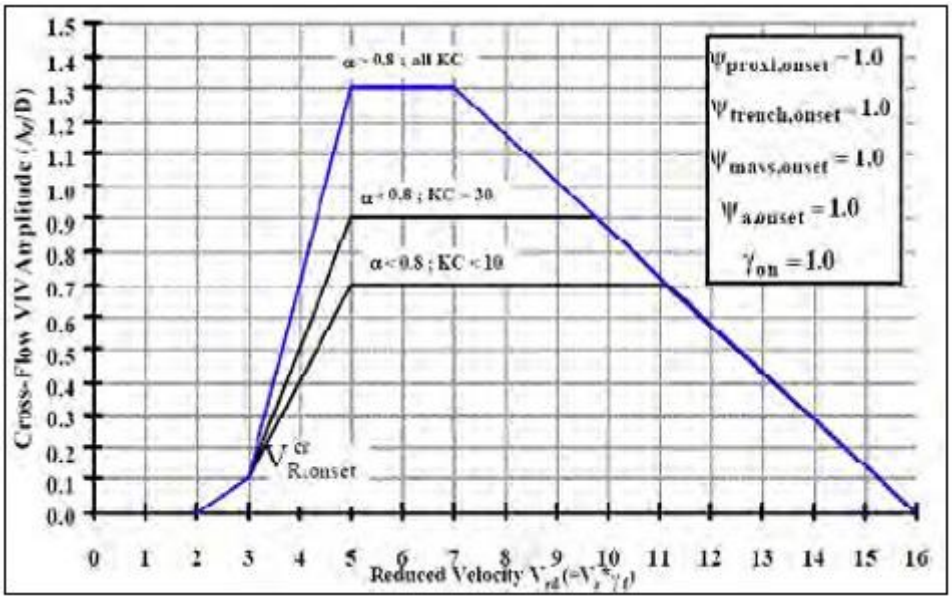
S_{CF} = *stress range* pada arah *cross-flow* VIV (N/m^2)

A_{CF} = *unit amplitude stress*, tegangan yang dilakukan unit diameter dari mode bentuk defleksi *cross-flow* (N/m^2)

R_k = faktor reduksi amplitude akibat adanya *damping*/redaman

γ_S = faktor keamanan untuk *stress range* (Tabel 2.8)

A_Z/D = amplitudo vibrasi arah *cross-flow* VIV (Gambar 2.10)



Gambar 2. 10 *Response Amplitude Cross-Flow* VIV
(DNV RP F105, 2017)

Untuk Parameter R_K merupakan faktor reduksi akibat adanya efek *damping*. Karakteristik vibrasi arah *cross-flow* berkurang dengan adanya *damping* ini. Persamaan 2.80 ini merupakan persamaan R_K.

$$R_k = \begin{cases} 1 - 0.15K_{sd}\ ; untuk\ K_{sd} \leq 4 \\ 3.2K_{sd}\ ; untuk\ K_{sd} > 4 \end{cases} \quad .....(2.80)$$

Sedangkan untuk nilai A_{CF} yang merupakan *Unit Stress Amplitude* pipa didapatkan dari Persamaan 2.81 berikut.

$$A_{CF} = C_4\ x\ (1 + CSF)\ x\ \frac{D\ x\ (D_o\ -\ t)\ x\ E}{L_{eff}^2} ..(2.81)$$

Di mana,

C4 = Boundary Condition Coefficient

D_o = Diameter *steel pipe* (tanpa concrete) (m)

Selain itu, untuk menentukan nilai dari *cross-flow onset velocity*, hal ini sangat bergantung pada kedekatan dengan *seabed* geometri *trench*, rasio

aliran arus, dan faktor massa spesifik pipa. Secara umum dijelaskan dalam Persamaan 2.82-2.85 berikut.

$$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3\ x\ \psi_{proxi,onset}\ x\ \psi_{mass,onset}\ x\ \psi_{a,onset}}{\gamma_{on,CF}} \quad \text{.....(2.82)}$$

Di mana,

$$\psi_{proxy,onset} = \begin{cases} \frac{1}{4}\left(3 + 1.25\frac{e}{D}\right)\ untuk\ {}^{e}/_{D} < 0.8 \\ 1\ untuk\ {}^{e}/_{D} \geq 0.8 \end{cases} \quad \text{.....(2.83)}$$

untuk nilai dari faktor koreksi antara kedekatan jarak antara pipa dan *seabed*,

$$\psi_{mass,onset} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{3}\ x\ M_{ratio}\ ;untuk\ M_{ratio} < 1.5 \\ 1\ ;untuk\ M_{ratio} \geq 1.5 \end{cases} \quad \text{.....(2.84)}$$

untuk nilai dari faktor koreksi massa dimana $M_{ratio} = M_{str} / M_{disp}$,

$$\psi_{a,onset} = \begin{cases} 1 + \frac{\alpha}{3}\ ;untuk\ \alpha < 1.5 \\ 1.167\ ;untuk\ \alpha\ \geq 1.5 \end{cases} \quad \text{.....(2.85)}$$

untuk nilai dari faktor koreksi dari kecepatan arus.

Dan persamaan *cross-flow reduced velocity* untuk *region* lainnya dalam grafik pada Gambar 2.11 sesuai Persamaan 2.86-2.89 berikut.

$$V_{R,1}^{CF} = 5 \quad \text{.....(2.86)}$$

$$V_{R,2}^{CF} = V_{R,1}^{CF} - \left(\frac{9}{1.3}\right)\left(\frac{A_{z,1}}{D}\right) \quad \text{.....(2.87)}$$

$$V_{R,end}^{IL} = 16 \quad \text{.....(2.88)}$$

$$\left(\frac{A_{z,1}}{D}\right) = \left(\frac{A_{z,2}}{D}\right) = \begin{cases} 1.30\ \ a > 0.8\ ;semua\ KC \\ 0.7\ \ a > 0.8\ ;semua\ KC \\ 0.7 + 0.01 + (KC - 10)\ a \leq 0.8\ ;untuk\ 10 \leq KC \leq 30 \\ 0.9\ a \leq 0.8\ ;untuk\ KC\ \geq 30 \end{cases} \quad (2.89)$$

D. Perkiraan Sisa Waktu Operasi Pipeline

Dalam melakukan perhitungan perkiraan sisa waktu operasi, dapat menggunakan perhitungan dengan berdasarkan Persamaan 2.90 yang telah ditentukan pada kode standar DNV GL RP F-105 sebagai berikut:

$$T_{life} = \frac{T_{exposure}}{D_{fat}} \; x \; \eta \text{.....(2.90)}$$

Di mana,

T_{life} = Sisa waktu operasi pipa

$T_{exposure}$ =Waktu pipa yang sudah beroperasi

D_{fat} = Total akumulasi *fatigue damage*

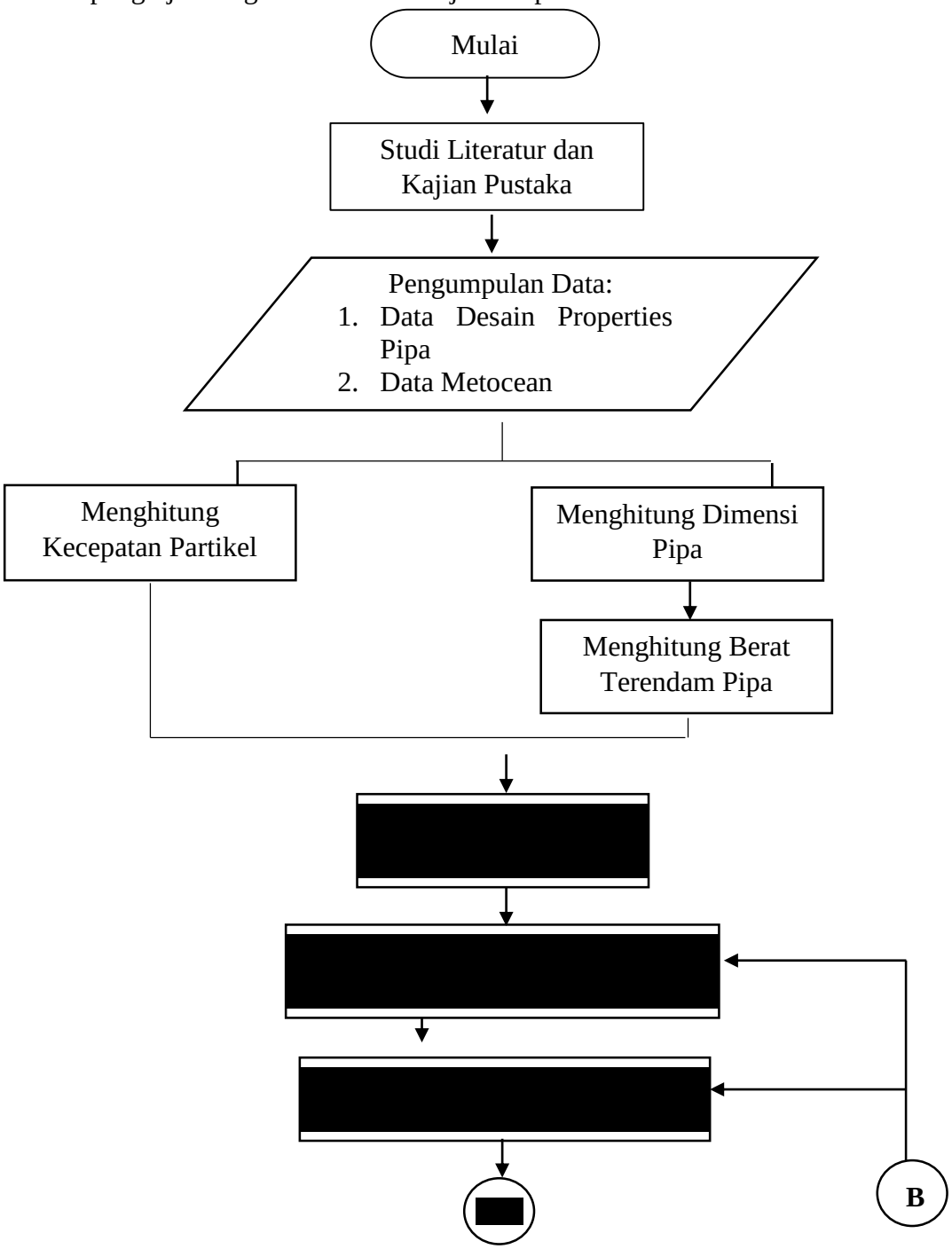
η =*safety factor*

BAB III

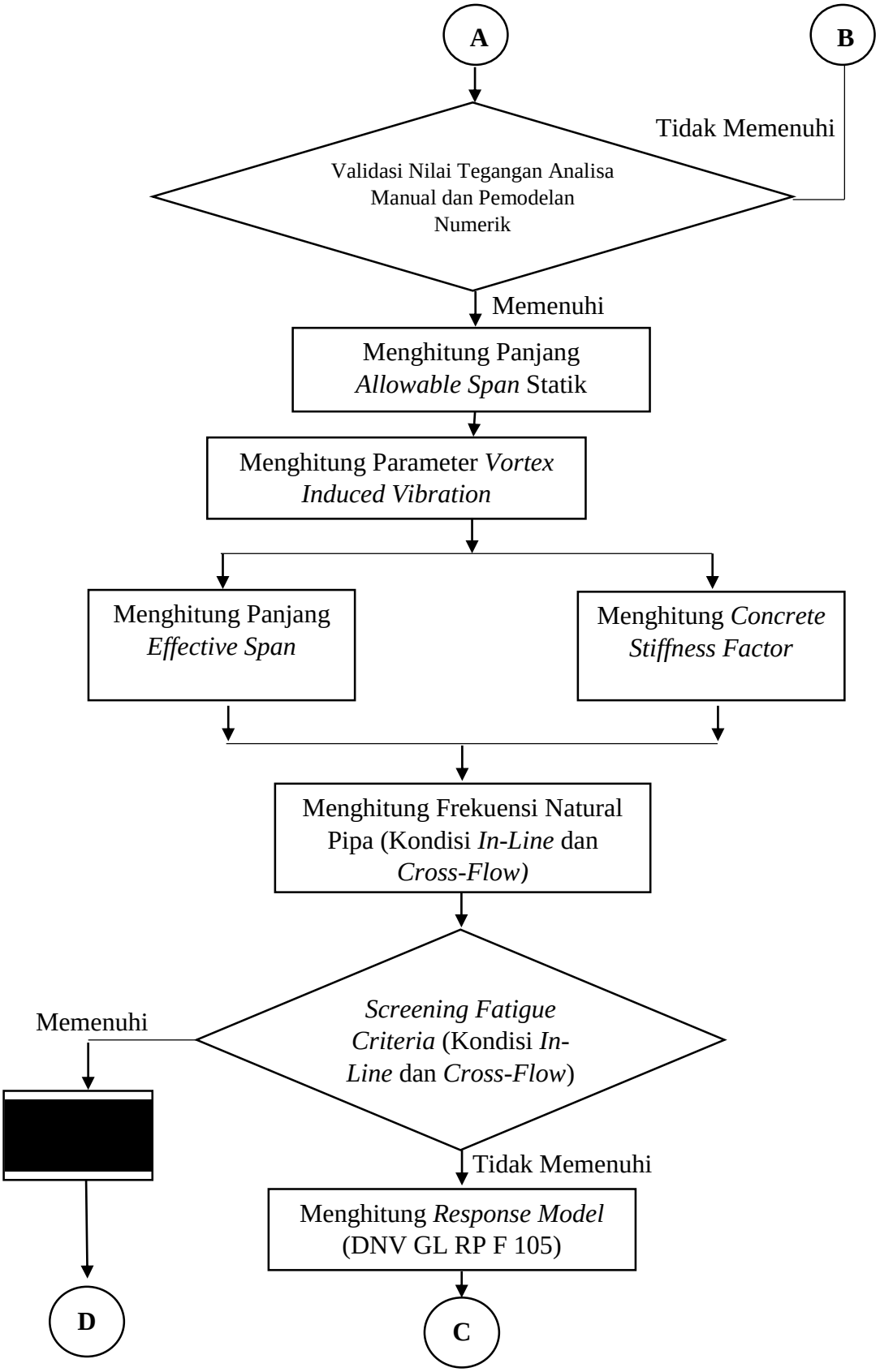
METODOLOGI PENELITIAN

3.1Diagram Alir

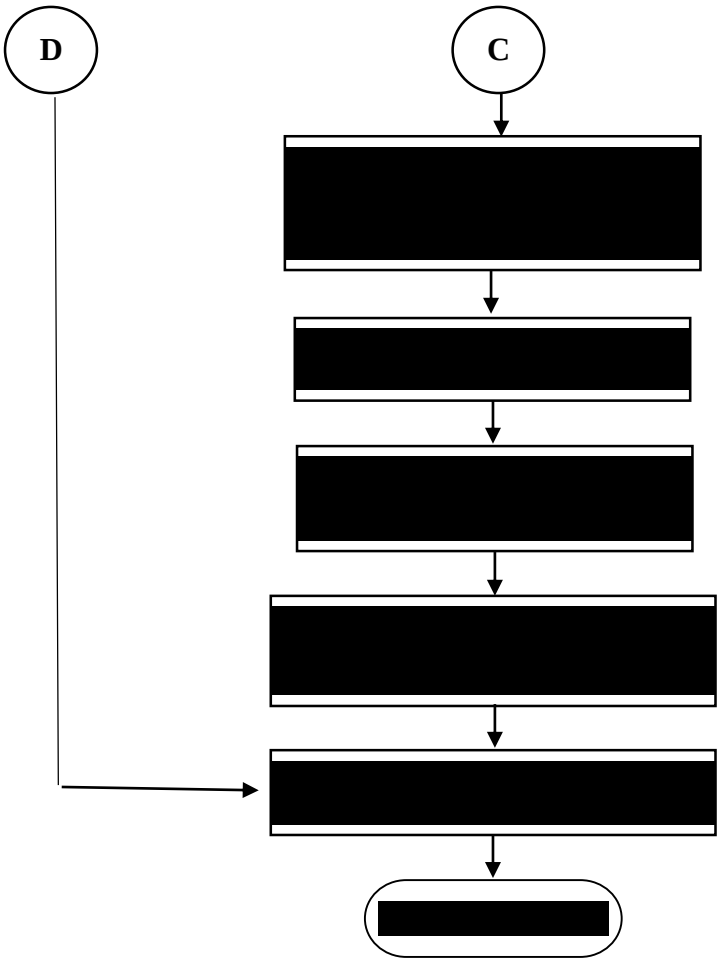
Di bawah ini Metodologi penelitian yang digunakan selama pengerjaan tugas akhir ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Tugas Akhir



Gambar 3. 1 Diagram Alir Tugas Akhir



Gambar 3. 1 Diagram Alir Tugas Akhir

3.2 Prosedur Penelitian

Rumusan masalah yang telah dirumuskan sebelumnya diselesaikan dengan mengau pada diagram alir. Diagram alir yang telah dibuat sebelumnya merupakan alur dari prosedur tugas akhir ini. Berikut penjelasan prosedur tugas akhir pada diagram alir:

1. Studi Literatur

Hal pertama yang dilakukan dalam proses pengerjaan tugas akhir ini adalah mengumpulkan literatur yang berasal dari buku, jurnal penelitian, laporan tugas akhir dan *codes.* Literatur yang digunakan sebagai referensi mempunyai keterkaitan dengan teori pipa bawah laut, analisis bentangan bebas dan analisis kelelahan pada pipa. *Codes* yang digunakan adalah DNV GL RP F 105 & DNV RP C203 yang berhubungan dengan

freespan dan analisis *fatigue*. Dan ASME B31.8 untuk analisis tegangan pada pipa gas.

2. Pengumpulan Data

Tahap berikutnya adalah proses pengumpulan data *pipeline* berupa data properties pipa, data lingkungan, data crossing pipeline serta data-data lain yang dibutuhkan dalam analisis di Tugas Akhir ini.

3. Perhitungan Dimensi dan Berat Terendam Pipa

Tahap perhitungan pertama kali adalah dilakukan perhitungan dimensi pipa. Dimensi pipa yang dihitung meliputi tebal dinding pipa, diameter total pipa, diameter dalam pipa, diameter *concrete*, diameter *corrosion coating*, momen inersia pipa, momen inersia *concrete*, dan luas penampang pipa. Kemudian dilakukan perhitungan massa efektif pipa yang merupakan total dari komponen massa seperti massa struktur pipa, massa konten pipa dan massa tambah pipa.

Berat terendam pipa dapat diperoleh dengan menjumlahkan berat seluruh struktur pipa dengan gaya apung pipa di dalam air. Berat seluruh struktur pipa dapat diperoleh dari massa seluruh struktur pipa (termasuk konten dan *coating*) dikalikan dengan gaya gravitasi. Sedangkan gaya apung dapat diperoleh dari massa air yang dipindahkan akibat pencelupan pipa di dalam air dikalikan dengan gaya gravitasi.

4. Perhitungan Kecepatan Partikel Air

Selanjutnya, mengolah data lingkungan (*metocean*) dalam hal ini adalah perhitungan arus dan gelombang untuk medapatkan kecepatan partikel air di lokasi pipa. Kecepatan partikel air muncul akibat efek arus, gelombang, maupun kombinasi arus dan gelombang. Untuk gelombang, perlu dilakukan analisis spectra untuk gelombang acak. Untuk efek arus, kecepatan partikel air yang diukur pada elevasi tertentu

harus ditransformasi terlebih dahulu menjadi kecepatan arus dasar laut di lokasi peletakan pipa.

5. Perhitungan Gaya Hidrodinamis pada Pipa

Gaya hidrodinamis yang terjadi pada pipa muncul akibat interaksi antara pipa dengan aliran air laut di sekitar pipa. Gaya hidrodinamis yang terjadi pada bentangan bebas pipa adalah gaya *drag , gaya lift* dan gaya inersia. Gaya- gaya ini dapat mempengaruhi kestabilan pipa terutama defleksi yang terjadi pada pipa.

6. Perhitungan Tegangan pada *Free Span* yang Ditinjau

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui tegangan yang terjadi pada bentangan bebas pipa dan hanya dilakukan dalam kondisi operasi saja. Adapun perhitungan yang dilakukan adalah perhitungan *hoop stress*, *longitudinal stress,* dan tegangan ekivalen (*von Mises*). Setelah mendapatkan nilai dari tegangan ekivalen, nantinya akan divalidasi dengan kriteria *allowable stress design* ASME B 31.8

7. Pemodelan dan Validasi Tegangan pada Pipa Menggunakan ANSYS

Nilai validasi tegangan diperlukan sebagai pembanding dari perhitungan numerik yang dihasilkan dari *pipeline free span*. Nilai ini akan dibandingkan dengan tegangan *von-mises* pada perhitungan manual sehingga dapat menjadi batasan untuk toleransi kesalahan suatu kriteria yang terlalu besar.

8. Menghitung Panjang *Allowable Span* Statik

Setelah mendapatkan tegangan, *submerged weight*, momen inersia, *drag* dan *inertia force* dilakukan perhitungan panjang *allowable span* untuk kondisi statis. Nilai panjang *allowable span* secara statis merupakan nilai batas aman dari panjang aktual *span* pipa agar pipa tersebut tidak mengalami *excessive yielding*.

9. Menghitung Parameter *Vortex Induced Vibration* (VIV)

Setelah mendapatkan data lingkungan seperti data gelombang dan arus, dilakukan perhitungan parameter VIV dari *free span*. Adapun perhitungannya adalah *Reynold Number* (*Re*), *Keulegan- Carpenter Number* (*KC*), rasio aliran (*flow rasio*), *total damping ratio*, *stability parameter*, *stability parameter factor*, dan faktor koreksi seperti *seabed correction factor*, *mass correction factor*, dan *current correction factor*.

10. Perhitungan Panjang *Span* Efektif

Panjang bentangan bebas efektif dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan yang terdapat pada DNV RP F105. Panjang bentangan bebas efektif dapat mempengaruhi defleksi statis, *crititical buckling load* dan frekuensi natural pipa. Panjang bentangan bebas efektif ini akan dihitung untuk arah *in-line* dan *cross-flow* pipa.

11. Perhitungan Frekuensi Natural Pipa

Perhitungan frekuensi natural pipa memerlukan beberapa parameter yang terlebih dahulu dihitung besarannya. Beberapa diantaranya adalah *effective axial load,* defleksi statis dan *critical buckling load*. Ketiga parameter ini mempengaruhi besar frekuensi natural yang dimiliki oleh pipa. Persamaan untuk menghitung ketiga parameter ini terdapat di DNV RP F105. Selain ketiga parameter yang disebutkan di atas, perhitungan frekuensi natural pipa juga memerlukan parameter CSF dari panjang bentangan bebas efektif yang telah dihitung sebelumnya.

12. *Screening Fatigue Criteria*

Frekuensi natural yang telah didapat kemudian di *screening* menggunakan kriteria yang ditentukan di dalam DNV RP F-105. *Screening* dilakukan untuk memeriksa panjang bentangan bebas pipa mana saja yang perlu dilakukan

perhitungan umur kelelahan akibat *Vortex Induxed Vibration*. Pada *Screening Fatigue Critera*, Frekuensi natural pipa dibandingkan dengan frekuensi *fortex shedding*. Selain membutuhkan frekuensi natural, parameter lain yang dibutuhkan untuk proses *screening* adalah *reduced velocity* dan *current flow ratio*. *Span* yang tidak memenuhi kriteria *screening* akan dilakukan perhitungan *fatigue life* nya, sedangkan yang memenuhi tidak dianalisis.

13. Perhitungan *Stress Range (S)*

Stress range dapat dihitung menggunakan persamaan yang terdapat pada DNV RP F-105. Penggolongan *stress range* pada *codes* dibagi menjadi 2. *Stress range* untuk arah *in-line* dan *stress range* untuk arah *cross-flow*.

14. Penentuan Kurva S – N

Selanjutnya penentuan kurva S-N diperlukan untuk mengetahui berapa siklus yang dibutuhkan pipa tesebut untuk terjadi kegagalan pada rentang tegangan yang ditentukan (N). Untuk melengkapi penjelasana mengenai kurva S-N dalam DNV RP F105, direkomendasikan DNV RP C-203 mengenai *"Fatigue Design of Offshore Steel Structures"* sehingga pada tugas akhir ini Kurva S-N yang dipakai dalam perhitungan adalah kurva berdasarkan DNV RP C-203. Dari kurva diperoleh nilai konstanta kekuatan karakteristik *fatigue* dan nilai slope negative *inverse (m).*

15. Perhitungan *Fatigue Damage* dan Umur Kelelahan Pipa

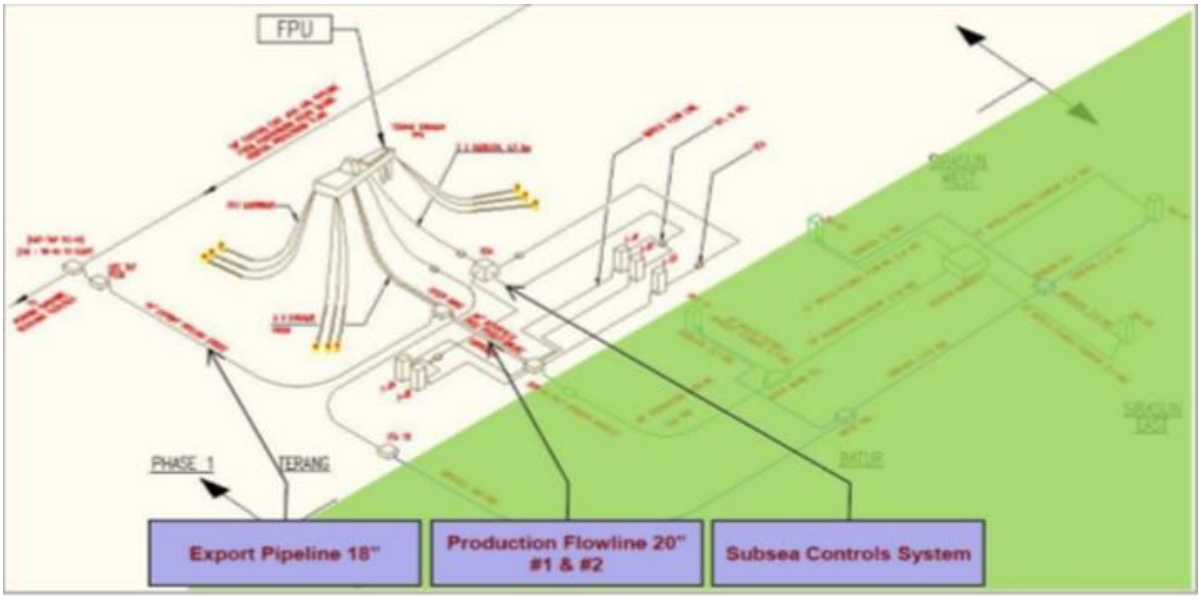
Langkah selanjutnya adalah menghitung *fatigue damage* dari *stress range* & umur kelelahan pada pipa menggunakan teori *cumulative damage* / akumulasi kerusakan (Hukum Palmgren-Miner). Perhitungan dilakukan secara manual berdasarkan pada ketentuan yang ada pada DNV RP F-105.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV
ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

PT. XYZ memiliki wilayah kerja di Laut Utara Bali sekitar 100 kilometer dari utara Pulau Bali. Dalam Studi Kasus yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah proyek pada lapangan Terang Sirasun Batur. Dalam proses produksinya, gas yang diproduksi akan disalurkan menuju *Floating Production Unit* (FPU). Kemudian akan didistribusikan ke *East Java Gas Pipeline* (EJGP). Dalam penyaluran dari FPU menuju EJGP menggunakan *subsea pipeline* berdiameter 18 in. Berikut gambar lokasi *pipeline* yang ditinjau pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Terang Sirasun Batur *Pipeline Layout* (PT. XYZ, 2019)

Studi kasus yang diangkat dalam pengerjaan Tugas Akhir ini yaitu terdapatnya beberapa segmen pipa yang mengalami bentangan bebas di jalur pipeline yang dijelaskan pada paragraf sebelumnya. Inspeksi span ini dilakukan dengan survei jalur pipa pada tahun 2016. Dari hasil survei tersebut didapatkan informasi mengenai lokasi segmen pipa dengan data petunjuk panjang dan kedalaman span. Sehingga perlu dilakukan analisis

bentangan bebas untuk mengetahui panjang bentangan bebas yang masih diizinkan terjadi pada pipa dan berapa umur sisa dari segmen pipa yang mengalami bentangan bebas. Studi kasus ini membutuhkan data – data di antaranya adalah data desain dan operasional pipa, data lingkungan, data karakteristik tanah di lokasi pipa dan data hasil survei bentangan bebas yang telah dilakukan.

4.2 Pengmpulan Data

Data yang diperlukan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini antara lai data desain dan operasional pipa, data lingkungan, dan data karateristik tanah.

4.2.1 Data *Pipeline*

A. Data Properti Pipa

Di bawah ini adalah data properti pipa yang ditampilkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Properti Pipa (PT.XYZ, 2017)

Pipeline Properties		
Deskripsi	**Satuan**	**Nilai**
Density	kg/m³	7850
Modulus of Elasticity	Mpa	207000
Poissons Ratio	-	0,3
Steel Coefficient of Thermal Expansion	m/m/K	1,1E-05
Steel Thermal Conductivity	W/m/K	45
SMYS-GRADE X65	MPa	448
SMTS-GRADE X65	MPa	531
Nominal Outside Diameter (OD)	mm	457
Pipeline Thickness	mm	20,6

B. Data Fungsional Pipa

Di bawah ini adalah data properti pipa yang ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data Fungsional Pipa (PT. XYZ, 2017)

Pipeline Functional Data		
Deskripsi	**Satuan**	**Nilai**
Design Pressure at Reference Height	MPa	3,59
Design Temperature		60
Operating Pressure at Reference Height	MPa	3,59
Operating Temperature		25,48
Product Density	kg/m³	70,6

C. Data *Corrosion* dan *Coating*

Di bawah ini adalah data *corossion* dan *coating* pipa yang ditampilan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data *Corrosion* dan *Coating* Pipa (PT.XYZ, 2017)

Corrosion & Coating Data		
Deskripsi	**Satuan**	**Nilai**
Concrete Coating Density	kg/m³	3043,5
Concrete Coating Thickness	mm	50
Anti Corrosion Coating Density	kg/m³	1281,5
Anti Corrosion Coating Thickness	mm	4
Corrosion Coating Type	-	Asphalt Enamel

4.2.2 Data Lingkungan

Data – data lingkungan yang digunakan antara lain adalah data arus serta gelombang dan data karakterististik tanah.

A. *Water Depth*

Tabel 4.4 Data Water Depth Pipa (PT. XYZ, 2017)

Water Depth		
Deskripsi	**Satuan**	**Nilai**
Minimum WD	m	90,3
Maksimum WD	m	137,7

B. Data Gelomband dan Arus

Tabel 4.5 Data Gelombang dan Arus (PT. XYZ, 2017)

Wave and Current Data				
Deskripsi	**Satuan**	**1 year Return Period**	**10 year Return Period**	**100 year Return Period**
Significant Wave Height (Hs)	m	3,1	4,40	6,00
Wave Period (Tp)	s	8,1	10,10	12,40
Maximum Wave Height (Hmax)	m	6	8,40	11,30
Maximum Wave Period (Tmax)	s	6,33	7,24	7,93
Near Seabed Current Speed	m/s	0,7	0,80	0,90

C. Data Parameter Tanah

Tabel 4.6 Data Parameter Tanah (PT. XYZ, 2017)

KP	Zone	Soil Type	Seabed Roughness (m)
0-14	1	Coralline silti sand to coralline sandy gravel	4×10^{-5}
14-19	2	Sandy clay to loose silty fine sand	1×10^{-5}
19,21,5	3	very soft to soft clay	$5{,}21 \times 10^{-6}$
21,5-23,6	4	coralline silty sand	4×10^{-5}

4.2.3 Data *Freespan*

Data inspeksi yang dilakukan oleh PT. XYZ adalah menggunakan ROV yang kemudian dicatat untuk mendapatkan data freespan Aktual. Di bawah ini adalah hasil inspeksi ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Data *Freespan* (PT. XYZ, 2017)

No.	KP (Km)	Gap (m)	Length (m)
FS 1	0,603-0,647	1,4	44,00
FS 2	4,068-4,107	1,5	39,00
FS 3	7,789-7,919	1,4	40,00
FS 4	9,717-9,759	0,5	42,00
FS 5	11,023-11,059	0,3	36,00
FS 6	13,137-13,173	0,3	36,00
FS 7	13,177-13,214	0,4	37,00
FS 8	13,252-13,290	0,55	38,00
FS 9	13,427-13,466	0,35	39,00
FS 10	13,523-13,56	0,65	37,00
FS 11	13,81-13,853	0,45	43,00
FS 12	13.949-13,991	0,8	42,00
FS 13	14,091-14,13	0,35	39,00
FS 14	14,295-14,335	0,35	40,00
FS 15	14,408-14,444	0,3	36,00
FS 16	14,512-14,55	0,25	38,00
FS 17	14,685-14,722	0,55	37,00
FS 18	14,999-15,035	0,4	36,00
FS 19	16,28-16,316	0,45	36,00
FS 20	17,252-17,288	0,5	36,00

Tabel 4.7 Data Freespan lanjutan (PT. XYZ, 2017)

No.	KP (Km)	Gap (m)	Length (m)
FS 21	17,331-17,37	0,5	39,00
FS 22	18,118-18,155	1,5	37,00
FS 23	18,53-18,566	0,3	36,00
FS 24	19,084-19,121	0,5	37,00

4.3 Analisis Dimensi Pipa

4.3.1 Perhitungan Dimensi Pipa

Perhitungan dimensi pipa dilakukan untuk menghitung diameter pipa dan juga massa total dari pipa. Perhitungan ini digunakan sebagai dasar untuk selanjutnya menghitung analisis *freespan*, seperti menghitung panjang efektif *span* dan frekuensi natural. Di bawah ini adalah hasil perhitungan dimensi pipa yang ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Perhitungan Dimensi Pipa

No.	Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
1	Tebal Dinding Pipa	t_2	0,0200	m
2	Diameter Total Pipa	D_t	0,5650	m
3	Diameter Dalam Pipa	D_i	0,4170	m
4	Diameter Luar Pipa	D	0,4570	m
4	Diameter Lapisan Anti Korosi	D_{cc}	0,4650	m
5	Diameter Lapisan Concrete	D_{conc}	0,5650	m
6	Luas Penampang Internal Pipa Baja	A_i	0,2234	m2
7	Luas Penampang Pipa Baja	A_{st}	0,0274	m2
8	Luas Penampang Lapisan Anti Korosi	A_{cc}	0,0072	m2
9	Luas Penampang Lapisan Concrete	A_{conc}	0,0979	m2
10	Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	7,E-04	m^4
11	Momen Inersia Concrete	I_{conc}	3,E-03	m^4

Hasil perhitungan dimensi pipa ini akan digunakan untuk selanjutnya menghitung massa efektif pipa itu sendiri.

4.3.2 Perhitungan Massa Efektif Pipa

Massa Efektif pipa adalah penjumlahan dari massa seluruh struktur pipa ditambahkan dengan massa fluida yang dialirkan dan massa tambah. Di bawah ini adalah hasil penjumlahan untuk massa efektif ditampilkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Perhitungan Massa Pipa di Udara

MASSA PIPA DI UDARA				
No.	**Description**	**Simbol**	**Nilai**	**Satuan**
1	Massa Konten Pipa	M_{fluida}	15,77	kg/m
2	Massa Pipa Baja	M_{st}	221,59	kg/m
3	Massa Lapisan Anti Korosi	M_{corr}	9,03	kg/m
4	Massa Lapisan Concrete	M_{cc}	242,26	kg/m
5	Total		488,65	kg/m

Tabel di atas menunjukkan massa total pipa di udara sebesar **488,66** kg/m. Selanjutnya melakukan perhitungan unntuk massa tambah dan massa efektif pipa yang ditampilkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Perhitungan Massa Efektif Pipa

Panjang Span Aktual (m)	Gap (m)	Rasio (e/Dt)	Ca	Massa Bouyancy (kg/m)	Massa Tambah (kg/m)	Massa Efektif (kg/m)
44,00	1,4	2,456	1,000	261,42	261,423	750,07
39,00	1,5	2,632	1,000	261,42	261,423	750,07
40,00	1,4	2,456	1,000	261,42	261,423	750,07
42,00	0,5	0,877	1,000	261,42	261,423	750,07
36,00	0,3	0,526	1,121	261,42	292,945	781,60
36,00	0,3	0,526	1,121	261,42	292,945	781,60
37,00	0,4	0,702	1,035	261,42	270,537	759,19
38,00	0,55	0,965	1,000	261,42	261,423	750,07
39,00	0,35	0,614	1,073	261,42	280,534	769,18
37,00	0,65	1,140	1,000	261,42	261,423	750,07
43,00	0,45	0,789	1,003	261,42	262,313	750,96
42,00	0,8	1,404	1,000	261,42	261,423	750,07
39,00	0,35	0,614	1,073	261,42	280,534	769,18
40,00	0,35	0,614	1,073	261,42	280,534	769,18
36,00	0,3	0,526	1,121	261,42	292,945	781,60
38,00	0,25	0,439	1,181	261,42	308,766	797,42
37,00	0,55	0,965	1,000	261,42	261,423	750,07
36,00	0,4	0,702	1,035	261,42	270,537	759,19
36,00	0,45	0,789	1,003	261,42	262,313	750,96
36,00	0,5	0,877	1,000	261,42	261,423	750,07
39,00	0,5	0,877	1,000	261,42	261,423	750,07
37,00	1,5	2,632	1,000	261,42	261,423	750,07
36,00	0,3	0,526	1,121	261,42	292,945	781,60
37,00	0,5	0,877	1,000	261,42	261,423	750,07

4.3.3 Perhitungan Berat Terendam Pipa

Analisis ini diperlukan untuk mengetahui beban lateral yang timbul akibat berat pipa itu sendiri. Perhitungan ini unutk mementukan berat material, berat muatan pipa, berat *coating*, berat *concrete*, dan berat akibat *buoyancy*.Di bawah ini adalah hasil perhitungan berat terendam pipa yang ditampilkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Perhitungan Berat Terendam Pipa

BERAT TERENDAM PIPA				
No.	**Deskripsi**	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
1	Massa Konten Pipa	M_{fluida}	15,77	N/m
2	Massa Pipa Baja	M_{st}	221,59	N/m
3	Massa Lapisan Anti Korosi	M_{corr}	9,03	N/m
4	Massa Lapisan Concrete	M_{ccc}	242,26	N/m
5	Massa Struktur Pipa	M_{str}	472,88	N/m
6	Massa Displacement	M_{disp}	474,82	N/m
7	Gaya Apung	F_b	2829,26	N/m
8	Berat Terendam Pipa	W_{sub}	2309,04	N/m

4.4 Analisis Kecepatan Partikel Air

4.4.1 Perhitungan Kecepatan Arus pada Pipa

Arus yang dianalisis adalah arus yang arahnya tegak lurus dengan pipa (sudut 90o), karena arah tersebut memiliki pengaruh beban arus yang paling besar dibandingkan dengan arah yang lain. Aliran arus yang digunakan pada penelitian ini adalah inner zone. Zona ini memiliki nilai kelajuan arus rata – rata yang berbeda searah dengan arah horizontal dan kecepatan arus beserta arahnya merupakan fungsi dari geometri dasar laut.

Hal yang harus dipertimbangkan dalam menghitung kecepatan arus yang bekerja pada pipa adalah kekasaran dasar laut (zo) karena letak pipa dekat dengan dasar laut dan dan gap (e) karena pipa meletak pada dasar laut dengan kondisi freespan. Nilai kekasaran dasar laut disesuaikan dengan

jenis tanah pada posisi pipa meletak. Hasil perhitungan kecepatan arus yang bekerja pada pipa disajikan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Perhitugan Kecepatan Arus pada Pipa

No. Free Span	Gap (e) [m]	Kec. Arus pada Ketinggian Referensi 100 Tahun (U(zr)) [m/s]	Elevasi di Atas Dasar Laut (z) [m]	Kec. Arus Efektif 100 tahun [m/s]
FS-1	1,4	0,9	1,683	0,946
FS-2	1,5	0,9	1,783	0,951
FS-3	1,4	0,9	1,683	0,946
FS-4	0,5	0,9	0,783	0,878
FS-5	0,3	0,9	0,583	0,852
FS-6	0,3	0,9	0,583	0,852
FS-7	0,4	0,9	0,683	0,866
FS-8	0,55	0,9	0,833	0,884
FS-9	0,35	0,9	0,633	0,859
FS-10	0,65	0,9	0,933	0,894
FS-11	0,45	0,9	0,733	0,872

Tabel 4.12 Perhitungan Kecepatan Arus pada Pipa (Lanjutan)

No. Free Span	Gap (e) [m]	Kec. Arus pada Ketinggian Referensi 100 Tahun (U(zr)) [m/s]	Elevasi di Atas Dasar Laut (z) [m]	Kec. Arus Efektif 100 tahun [m/s]
FS-12	0,8	0,9	1,083	0,907
FS-13	0,35	0,9	0,633	0,982
FS-14	0,35	0,9	0,633	0,982
FS-15	0,3	0,9	0,583	0,975
FS-16	0,25	0,9	0,533	0,967
FS-17	0,55	0,9	0,833	1,007
FS-18	0,4	0,9	0,683	0,989
FS-19	0,45	0,9	0,733	0,996
FS-20	0,5	0,9	0,783	1,001
FS-21	0,5	0,9	0,783	1,001
FS-22	1,5	0,9	1,783	1,075
FS-23	0,3	0,9	0,583	0,975
FS-24	0,5	0,9	0,783	1,059

4.4.2 Perhitungan Kecepatan Arus Akibat Gelombang

Kecepatan arus akibat gelombang dapat dicari dengan mengolah data gelombang menggunakan *spectrum* gelombang. Spektrum gelombang yang digunakan adalah spektrum JONSWAP, karena pipa yang dianalisis berada pada perairan Indonesia yang merupakan perairan tertutup (kepulauan) yang sesuai dengan spektrum gelombang JONSWAP.

Data gelombang yang telah diberikan, diolah untuk mencari parameter-parameter spektrum JONSWAP yang ditampilkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Data Gelombang

Data Gelombang				
Parameter	**Notasi**	**Nilai (10 Tahun)**	**Nilai (100 Tahun)**	**Satuan**
Kedalaman	h	137,7	137,7	m
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	4,4	6	m
Periode Gelombang Signifikan	T_s	9,595	11,78	s

Data di atas kemudian digunakan untuk mencari parameter spectrum JONSWAP yaitu periode puncak gelombang, frekuensi puncak gelombang, fungsi distribusi *peakedness parameter*, dan konstanta *generalized Philips* ditunjukkan pada Tabel 4,14.

Tabel 4.14 Parameter JONSWAP

Parameter JONSWAP				
Parameter	**Notasi**	**Nilai (10 Tahun)**	**Nilai (100 Tahun)**	**Satuan**
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	4,4	6	m
Periode Gelombang Signifikan	T_s	9,595	11,78	s
frekuensi Gelombang Signifikan	X_s	0,65	0,53	rad/s
Percepatan Gravitasi	g	9,8	9,8	m/s
Periode Puncak Gelombang	T_p	10,1	12,4	s
Frekuensi Puncak Gelombang	X_p	0,62	0,51	rad/s
Fungsi Distribusi	T	5,70	4,13	
Peakedness Parameter	/	0,42	5,00	
Konstanta Generalized Philips	=	0,03	0,004	

Langkah selanjutnya adalah menentukan angka gelombang, angka gelombang merupakan salah satu variabel yang digunakan untuk mentransformasikan gelombang permukaan ke gelombang di elevasi pipa. Setelah angka gelombang diperoleh, selanjutnya adalah menghitung spektrum gelombang dan transformasi gelombang. Setelah itu, menentukan momen spektrum dengan metode Simpson 1. Setelah itu didapat nilai kecepatan arus akibat gelombang pada kedalaman pipa.

Kemudian kecepatan arus tersebut, diolah menggunakan persamaan untuk mempertimbangkan efek arah datang arus. Terdapat grafik untuk mendapatkan variabel *reduction factor*. Untuk metode perhitungan kecepatan arus akibat gelombang dicantumkan dalam lampiran. Hasil kecepatan arus akibat gelombang dilampirkan dalam Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Perhitungan Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang				
Parameter	**Notasi**	**100 Tahun**	**10 Tahun**	**Satuan**
Kec. Arus Signifikan pada Elevasi Pipa	U_s	0,138	0,007	m/s
Mean Zero-Up Crossing Period	T_u	5,768	5,502	s
Reduction Factor	R_D	0,95	0,950	-
Kecepatan Arus Signifikan Normal pada Pipa	U_w	0,131	0,007	m/s
Periode Natural Gelombang	T_n	1,40		s
Osilasi Gelombang	τ	1872,48	1963,03	

Hasil dari perhitungan kecepatan arus akibat gelombang di dapatkan nilai sebesar 0,131 m/s untuk kecepatan pada periode 100 Tahun dan nilai 0,009 m/s untuk kecepatan pada periode 10 Tahun. Selanjutnya di dapatkan nilai osilasi gelombang 1872,48 untuk 100 Tahun dan 1963,03 untuk 10 Tahun.

Tabel 4.16 Kecepatan Arus Total

No. Freespan	Panjang Span	Gap (e)	Uc (10 Tahun)	Uc (100 Tahun)	Uw (10 Tahun)	Uw (100 Tahun)	Kec. Arus Total (10 Tahun) m/s	Kec. Arus Total (100 Tahun) m/s
FS-1	44,00	1,4	0,841	0,946	0,007	0,131	0,848	1,077
FS-2	39,00	1,5	0,846	0,951	0,007	0,131	0,852	1,082
FS-3	40,00	1,4	0,841	0,946	0,007	0,131	0,848	1,077
FS-4	42,00	0,5	0,781	0,878	0,007	0,131	0,787	1,009
FS-5	36,00	0,3	0,757	0,852	0,007	0,131	0,764	0,983
FS-6	36,00	0,3	0,757	0,852	0,007	0,131	0,764	0,983
FS-7	37,00	0,4	0,770	0,866	0,007	0,131	0,776	0,997
FS-8	38,00	0,55	0,786	0,884	0,007	0,131	0,792	1,015
FS-9	39,00	0,35	0,764	0,859	0,007	0,131	0,770	0,990
FS-10	37,00	0,65	0,794	0,894	0,007	0,131	0,801	1,025
FS-11	43,00	0,45	0,775	0,872	0,007	0,131	0,782	1,003
FS-12	42,00	0,8	0,806	0,907	0,007	0,131	0,813	1,038
FS-13	39,00	0,35	0,873	0,982	0,007	0,131	0,880	1,114
FS-14	40,00	0,35	0,873	0,982	0,007	0,131	0,880	1,114
FS-15	36,00	0,3	0,867	0,975	0,007	0,131	0,873	1,106
FS-16	38,00	0,25	0,860	0,967	0,007	0,131	0,866	1,098
FS-17	37,00	0,55	0,895	1,007	0,007	0,131	0,902	1,138
FS-18	36,00	0,4	0,879	0,989	0,007	0,131	0,886	1,120
FS-19	36,00	0,45	0,885	0,996	0,007	0,131	0,892	1,127
FS-20	36,00	0,5	0,890	1,001	0,007	0,131	0,897	1,132
FS-21	39,00	0,5	0,890	1,001	0,007	0,131	0,897	1,132
FS-22	37,00	1,5	0,955	1,075	0,007	0,131	0,962	1,206
FS-23	36,00	0,3	0,867	0,975	0,007	0,131	0,873	1,106
FS-24	37,00	0,5	0,942	1,059	0,007	0,131	0,948	1,190

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 *lift*. Penentuan koefisien drag dan lift diambil dari besar *Reynold Number*. Setelah itu koefisien ditentukan pada Gambar 4.2.

Re	C_D	C_L	C_M
$Re < 5.0 \times 10^4$	1.3	1.5	2.0
$5.0 \times 10^4 < Re < 1.0 \times 10^5$	1.2	1	2.0
$1.0 \times 10^5 < Re < 2.5 \times 10^5$	$1.53 - (Re / 3.0 \times 10^5)$	$1.2 - (Re / 5.0 \times 10^5)$	2
$2.5 \times 10^5 < Re < 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	$2.5 - (Re / 5.0 \times 10^5)$
$Re > 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	1.5

Gambar 4. 2 Tabel Penentuan Koefisien

4.5.1 Perhitungan Gaya *Drag*

Gaya drag pada analisis bentangan bebas mempengaruhi besar defleksi yang terjadi pada pipa. Sebelum gaya drag dihitung, koefisien drag harus diperoleh terlebih dahulu. Koefisien *drag* didapatkan setelah menghitung *Reynold Number* setiap span lalu dilihat besaran *Reynold Number* untuk menentukan koefisien yang di tampilkan pada Gambar 4.2. Di bawah ini

Tabel 4.17 Hasil Perhitungan Gaya *Drag*

No. Free Span	Panjang Span (m)	Kecepatan Total (m/s)	Koefisien Drag	Gaya Drag (N/m)
FS-1	44,00	1,077	0,7	237,31
FS-2	39,00	1,082	0,7	239,57
FS-3	40,00	1,077	0,7	237,31
FS-4	42,00	1,009	0,7	208,28
FS-5	36,00	0,983	0,7	197,59
FS-6	36,00	0,983	0,7	197,59
FS-7	37,00	0,997	0,7	203,29

Tabel 4.17 Hasil Perhitungan Gaya *Drag* (Lanjutan)

No. Free Span	Panjang Span (m)	Kecepatan Total (m/s)	Koefisien Drag	Gaya Drag (N/m)
FS-8	38,00	1,015	0,7	210,56
FS-9	39,00	0,990	0,7	200,55
FS-10	37,00	1,025	0,7	214,76
FS-11	43,00	1,003	0,7	205,86
FS-12	42,00	1,038	0,7	220,35
FS-13	39,00	1,114	0,7	253,55
FS-14	40,00	1,114	0,7	253,55
FS-15	36,00	1,106	0,7	250,23
FS-16	38,00	1,098	0,7	246,63
FS-17	37,00	1,138	0,7	264,79
FS-18	36,00	1,120	0,7	256,64
FS-19	36,00	1,127	0,7	259,53
FS-20	36,00	1,132	0,7	262,24
FS-21	39,00	1,132	0,7	262,24
FS-22	37,00	1,206	0,7	297,22
FS-23	36,00	1,106	0,7	250,23
FS-24	37,00	1,190	0,7	289,76

4.5.2 Perhitungan Gaya *Lift*

Gaya *lift* atau angkat pada pipa muncul karena adanya aliran yang bekerja pada pipa. Koefisien *lift* dan kecepatan total telah diketahui, maka untuk perhitungan gaya *lift* sesuai dengan Tabel 4.18 berikut

Tabel 4.18 Perhitungan Gaya *Lift*

No. Free Span	Panjang Span (m)	Kecepatan Total (m/s)	Koefisien Lift	Gaya Lift (N/m)
FS-1	44,00	1,077	0,7	237,31
FS-2	39,00	1,082	0,7	239,57
FS-3	40,00	1,077	0,7	237,31
FS-4	42,00	1,009	0,7	208,28
FS-5	36,00	0,983	0,7	197,59
FS-6	36,00	0,983	0,7	197,59
FS-7	37,00	0,997	0,7	203,29
FS-8	38,00	1,015	0,7	210,56
FS-9	39,00	0,990	0,7	200,55
FS-10	37,00	1,025	0,7	214,76
FS-11	43,00	1,003	0,7	205,86
FS-12	42,00	1,038	0,7	220,35
FS-13	39,00	1,114	0,7	253,55
FS-14	40,00	1,114	0,7	253,55
FS-15	36,00	1,106	0,7	250,23
FS-16	38,00	1,098	0,7	246,63
FS-17	37,00	1,138	0,7	264,79
FS-18	36,00	1,120	0,7	256,64
FS-19	36,00	1,127	0,7	259,53
FS-20	36,00	1,132	0,7	262,24
FS-21	39,00	1,132	0,7	262,24
FS-22	37,00	1,206	0,7	297,22
FS-23	36,00	1,106	0,7	250,23
FS-24	37,00	1,190	0,7	289,76

4.5.3 Perhitungan Gaya Hidrodinamis

Gaya Hidrodinamis Total yang digunakan merupakan hasil penjumlahan dari Gaya *Drag* dan Gaya *Lift.* Nilai Gaya hidrodinamis total ditampilkan pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Perhitungan Gaya Hidrodinamis

No. Free Span	Panjang Span (m)	Gaya Hidrodinamis Total (N/m)
FS-1	44,00	474,61
FS-2	39,00	479,15
FS-3	40,00	474,61
FS-4	42,00	416,56
FS-5	36,00	395,19
FS-6	36,00	395,19
FS-7	37,00	406,59
FS-8	38,00	421,11
FS-9	39,00	401,09
FS-10	37,00	429,52
FS-11	43,00	411,73
FS-12	42,00	440,71
FS-13	39,00	507,10
FS-14	40,00	507,10
FS-15	36,00	500,46
FS-16	38,00	493,27
FS-17	37,00	529,58
FS-18	36,00	513,28
FS-19	36,00	519,05
FS-20	36,00	524,47
FS-21	39,00	524,47
FS-22	37,00	594,43
FS-23	36,00	500,46
FS-24	37,00	579,52

4.6 Perhitungan Tegangan Ekivalen (*von Mises)*

4.6.1 Perhitungan *Hoop Stress*

Analisis *Hoop Stress* pada pipa di analisis berdasarkan ASME B31.8 dan API 5L 2000. Di bawah ini merupakan parameter yang digunakan untuk perhitugan *Hoop Stress* yang ditampilkan pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Parameter Perhitungan *Hoop Stress*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter luar pipa baja	D_0	0,57	m
Tebal nominal dinding pipa	t_{nom}	0,02	m
Corrosion allowance	t_{corr}	0,003	m
Product Density		70,6	kg/m^3
Mill Tolerance	t_{mill}	0,0025	m
Tebal dinding pipa	t	0,0145	m
Tekanan eksternal	P_e	9,08E+05	Pa
Tekanan internal	P_i	9,75E+06	Pa
Design Pressure	Pd	9,65	Mpa

Data parameter diatas lalu diolah berdasarkan persamaan *hoop stress*, sehingga didapatkan nilai *Hoop Stress* pada pipa sesuai Tabel 4.21

Tabel 4.21 Perhitungan *Hoop Stress*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tegangan hoop	s_h	125932665,25	Pa
		125,93	MPa

Dari hasil perhitungan tegangan hoop yang didapatkan, hasil perhitungan tersebut kemudian dicek dengan batas ijin yang diberikan yaitu 0,72 x SMYS. Tabel 4.22 merupakan perhitungan cek ASME B31.8.

Tabel 4.22 Perhitungan Cek Batas Ijin *Hoop Stress*

***Hoop Stress (*Mpa)**	**CEK ASME 31.8 (0,72 x SMYS) (Mpa)**	**Cek**
125,93	322,560	OK

Dari hasil perhitungan di atas, *hoop stress* pada pipa masih memenuhi batas yang ditentukan oleh ASME B31.8.

4.6.2 Perhitungan Longitudinal Stress

Tegangan Longitudinal sesuai yang sudah dijelaskan merupakan kombinasi dari tegangan aksial, tegangan poisson, tegangan thermal dan tegangan bending. Hasil penjumlahan dari tegangan aksial, tegangan poisson dan tegangan thermal menghasilkan tegangan aksial kombinasi.

Tegangan longitudinal kemudian dapat dihitung dengan menjumlahkan tegangan aksial kombinasi dan tegangan bending. Hasil tegangan longitudinal yang digunakan adalah nilai terbesar dari penjumlahan aksial kombinasi dan tegangan bending. Setelah diperoleh, kembali dilakukan pengecekan hasil dengan Allowable Stress yang ada pada ASME B31.8. Semua hasil perhitungan untuk tegangan longitudinal ditampilkan pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Perhitungan *Longitudinal Stress*

TEGANGAN				Longitudinal maksimum
Aksial Kombinasi	***Bending***	**Longitudinal**		
MPa	**MPa**	**MPa**	**MPa**	**Mpa**
59,15	109,27	168,42	-50,12	217,83
59,15	85,86	145,01	-26,71	194,41
59,15	90,31	149,46	-31,16	198,86
59,15	99,44	158,59	-40,29	208,00
59,15	73,03	132,18	-13,88	181,59
59,15	73,03	132,18	-13,88	181,59
59,15	77,16	136,31	-18,01	185,72
59,15	81,41	140,56	-22,26	189,97
59,15	85,72	144,87	-26,57	194,28
59,15	77,20	136,35	-18,05	185,75
59,15	104,23	163,38	-45,08	212,78
59,15	99,49	158,64	-40,34	208,05
59,15	85,91	145,06	-26,76	194,47
59,15	90,37	149,52	-31,22	198,93
59,15	73,19	132,34	-14,04	181,75
59,15	81,54	140,69	-22,39	190,09
59,15	77,37	136,52	-18,22	185,92
59,15	73,21	132,36	-14,06	181,77
59,15	73,22	132,37	-14,07	181,78
59,15	73,23	132,38	-14,08	181,79
59,15	85,95	145,10	-26,80	194,50
59,15	77,50	136,65	-18,35	186,05
59,15	73,19	132,34	-14,04	181,75
59,15	77,47	136,62	-18,32	186,02

Dari hasil analisis, nilai *longitudinal stress* pada masing – masing *span* kemudian dicek dengan batas ijin yang diberikan yaitu 0,8 x SMYS sesuai dengan ASME B31.8. Pengecekan ditampilkan pada Tabel 4.24.

Tabel 4.24 Perhitungan Cek Batas Ijin *Longitudinal Stress*

Longitudinal maksimum	0.8 SMYS	Cek ASME B31.8
Mpa	MPa	
217,83	358,40	OK
194,41	358,40	OK
198,86	358,40	OK
208,00	358,40	OK
181,59	358,40	OK
181,59	358,40	OK
185,72	358,40	OK
189,97	358,40	OK
194,28	358,40	OK
185,75	358,40	OK
212,78	358,40	OK
208,05	358,40	OK
194,47	358,40	OK
198,93	358,40	OK
181,75	358,40	OK
190,09	358,40	OK
185,92	358,40	OK
181,77	358,40	OK
181,78	358,40	OK
181,79	358,40	OK

Tabel 4.24 Perhitungan Cek Batas Ijin *Longitudinal Stress* (Lanjutan)

Longitudinal maksimum	0.8 SMYS	Cek ASME B31.8
Mpa	MPa	
186,05	358,40	OK
181,75	358,40	OK
186,02	358,40	OK

Dari hasil perhitungan di atas, *longitudinal stress* pada masing – masing *span* masih memenuhi batas yang ditentukan oleh ASME B31.8.

4.6.3 Perhitungan *Von Mises Stress*

Setelah nilai tegangan Hoop Stress dan Tegangan Longitudinal didapat, tegangan von mises dapat ditentukan. Nilai hasil perhitungan Von Mises Stress dan pengecekan dengan batas ijin 0,9 x SMYS sesuai ASME B31.8 ditampilkan pada Tabel 4.25.

Tabel 4.25 Perhitungan *Von Mises Stress*

TEGANGAN VON MISES						
Panjang Bentangan Bebas	TEGANGAN			0.9 SMYS	Cek ASME B31.8	RASIO
	Hoop	Longitudinal	*Von Mises*			
m	MPa	Mpa	MPa			MPa
44,000	125,93	217,83	189,41	403,20	OK	0,47
39,000	125,93	194,41	170,80	403,20	OK	0,42
40,000	125,93	198,86	174,25	403,20	OK	0,43
42,000	125,93	208,00	181,46	403,20	OK	0,45
36,000	125,93	181,59	161,14	403,20	OK	0,40
36,000	125,93	181,59	161,14	403,20	OK	0,40

Tabel 4.25 Perhitungan *Von Mises Stress* (Lanjutan)

TEGANGAN VON MISES						
Panjang Bentangan Bebas	**TEGANGAN**			**0.9 SMYS**	**Cek ASME B31.8**	**RASIO**
	Hoop	**Longitudinal**	***Von Mises***			
m	**MPa**	**Mpa**	**MPa**			**MPa**
37,000	125,93	185,72	164,20	403,20	OK	0,41
38,000	125,93	189,97	167,40	403,20	OK	0,42
39,000	125,93	194,28	170,69	403,20	OK	0,42
37,000	125,93	185,75	164,23	403,20	OK	0,41
43,000	125,93	212,78	185,31	403,20	OK	0,46
42,000	125,93	208,05	181,50	403,20	OK	0,45
39,000	125,93	194,47	170,84	403,20	OK	0,42
40,000	125,93	198,93	174,30	403,20	OK	0,43
36,000	125,93	181,75	161,25	403,20	OK	0,40
38,000	125,93	190,09	167,50	403,20	OK	0,42
37,000	125,93	185,92	164,36	403,20	OK	0,41
36,000	125,93	181,77	161,27	403,20	OK	0,40
36,000	125,93	181,78	161,28	403,20	OK	0,40
36,000	125,93	181,79	161,29	403,20	OK	0,40
39,000	125,93	194,50	170,87	403,20	OK	0,42
37,000	125,93	186,05	164,45	403,20	OK	0,41
36,000	125,93	181,75	161,25	403,20	OK	0,40
37,000	125,93	186,02	164,43	403,20	OK	0,41

Dari hasil pengecekan di atas, nilai tegangan *von mises* pada setiap *span* yang ada masih memenuhi kriteria dari ASME B31.8.

4.7 Pemodelan Bentangan Bebas di ANSYS

Pemodelan bentangan bebas yang dilakukan yaitu pemodelan bentangan bebas pada bagian struktur pipa yang ditinjau dengan data yang sudah diperoleh dan gunakan. Tujuan dari pemodelan ini yaitu untuk melihat *vortex pressure* yang terjadi pada pipa dan sebagai validasi

perhitungan tegangan *von Mises* analitis dengan numeris yang dilakukan pada *software* ANSYS.

Langkah pengerjaan pemodelan bentang bebas ini yaitu:

Pemodelan bentang bebas pada *software* ANSYS CFX (*Computational Fluid Dynamic*). Pemodelan pada ANSYS CFX dilakukan untuk melihat pola aliran fluida yang mengenai pipa. Pemodelan fluida dilakukan untuk mendapatkan nilai *pressure* akibat adanya VIV dan arus terhadap pipa (*vortex pressure*) dimana *output* nilai *vortex pressure* tersebut akan menjadi *input* nilai pada langkah berikutnya.

Pemodelan tegangan akibat bentang bebas pada pipa. Untuk mencari nilai tegangan maksimum *von-Mises* pada pipa, digunakan *software* ANSYS *Static Structural*. *Input* pada *software* ANSYS *Static Structural* yaitu berupa gaya-gaya yang bekerja pada pipa serta tekanan yang terjadi pada pipa. *Output* dari ANSYS CFX yang berupa *vortex pressure* kemudian dimasukkan pada ANSYS Static Structural sebagai *input* dari VIV yang terjadi.

Setelah nilai tegangan maksimum *von Mises* didapatkan, diperlukan *meshing sensitivity* untuk mendapatkan nilai *meshing* yang tepat sehingga *meshing* tersebut tidak mempengaruhi nilai *output* tegangan yang dihasilkan.

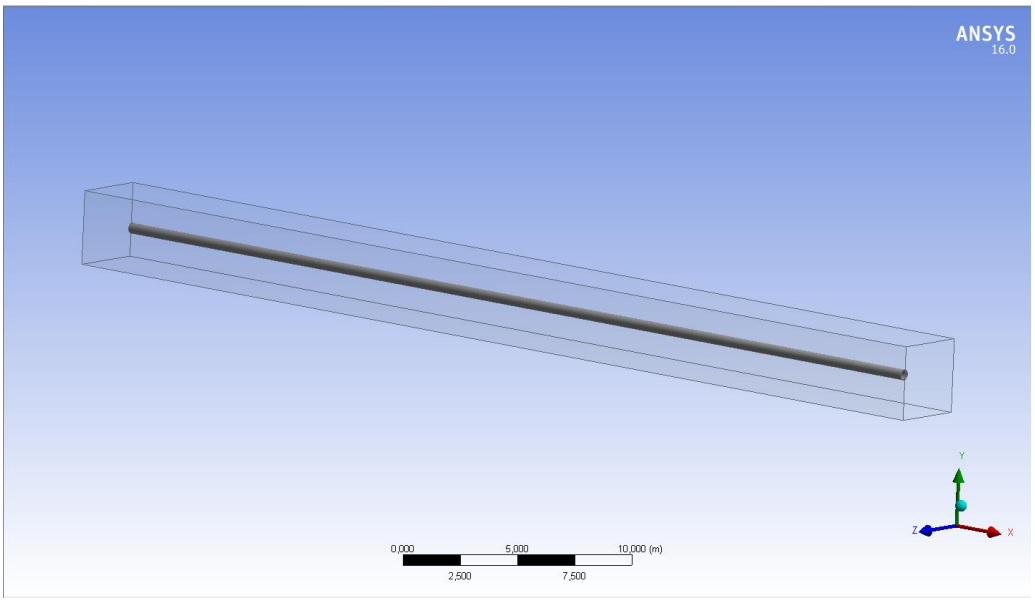
Validasi tegangan maksimum. Nilai tegangan maksimum *von-Mises* yang didapatkan pada *software* ANSYS *Static Structural* selanjutnya divalidasi dengan tegangan *von Mises* hasil perhitungan analitis. Dari validasi ini maka akan didapatkan nilai *error* dari kedua perhitungan.

4.7.1 Pemodelan Aliran pada ANSYS CFX

Langkah Pengerjaan untuk pemodelan aliran pada ANSYS CFX sebagai berikut :

1. Menggambarkan geometri permodelan *free span* yang ditinjau. Permodelan yang sebelumnya telah dilakukan di *software* SOLIDWORK di *convert* ke dalam CFX lalu dilakukan *meshing*. *Meshing* adalah diskritisasi dari elemen dan merupakan bagian terpenting dari ANSYS. Adapun variable geometri yang digunakan

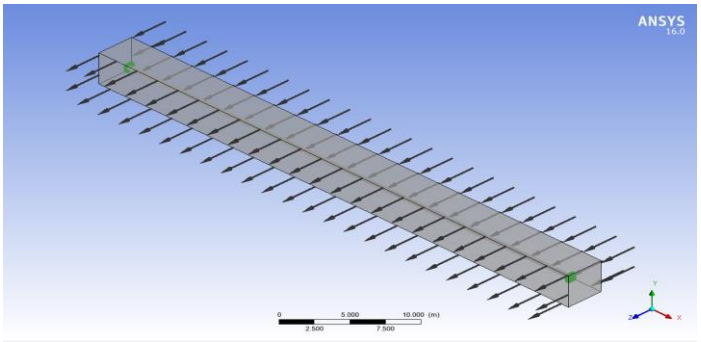
adalah diameter terluar pipa dan panjang dari *free span*. Dalam tugas akhir ini, nilai panjang dari *free span* adalah 12 m dengan diameter 0,303 m dan *gap* sebesar 1 m. Gambar pemodelan ditampilkan pada Gambar 4.3 berikut:



Gambar 4. 3 Permodelan Bentangan Bebas pada ANSYS CFX

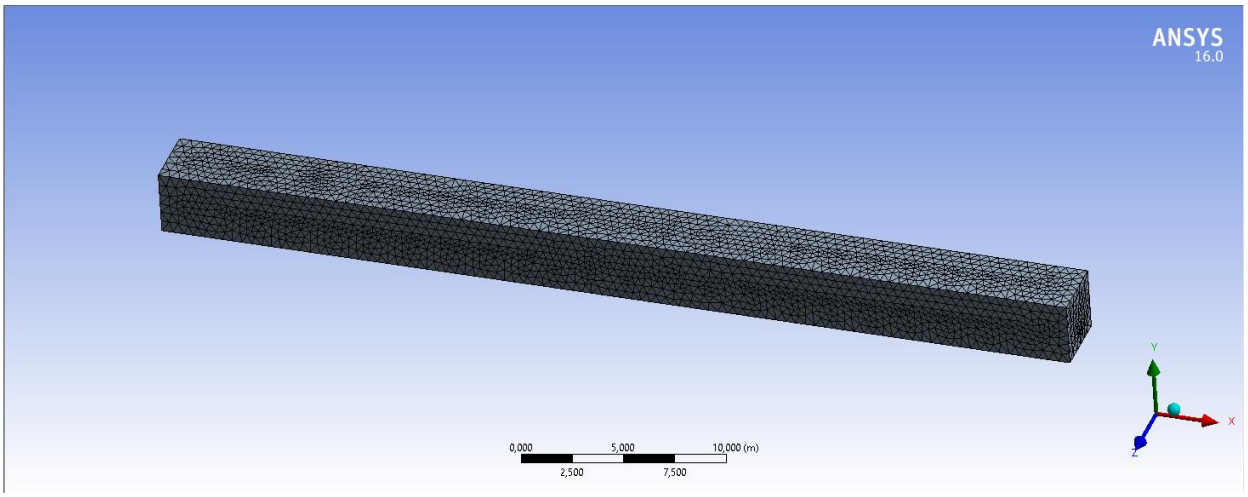
Pemodelan di atas merupakan hasil dari SOLIDWORK yang di *convert* ke dalam ANSYS CFX. Untuk balok merupakan *domain* arus laut, dan model silinder merupakan model pipa dari *free span* yang ditinjau.

2. Tahapan berikutnya adalah memberikan nama sisi *part* yang dimodelkan. Seperti sisi balok untuk arah awal arus mengalir diberi nama *inlet* dan akhir arus bergerak diberi nama *outlet*. Sisi balok yang lain diberi nama *wall*. Gambar penamaan model ditampilkan pada Gambar 4.4 berikut.



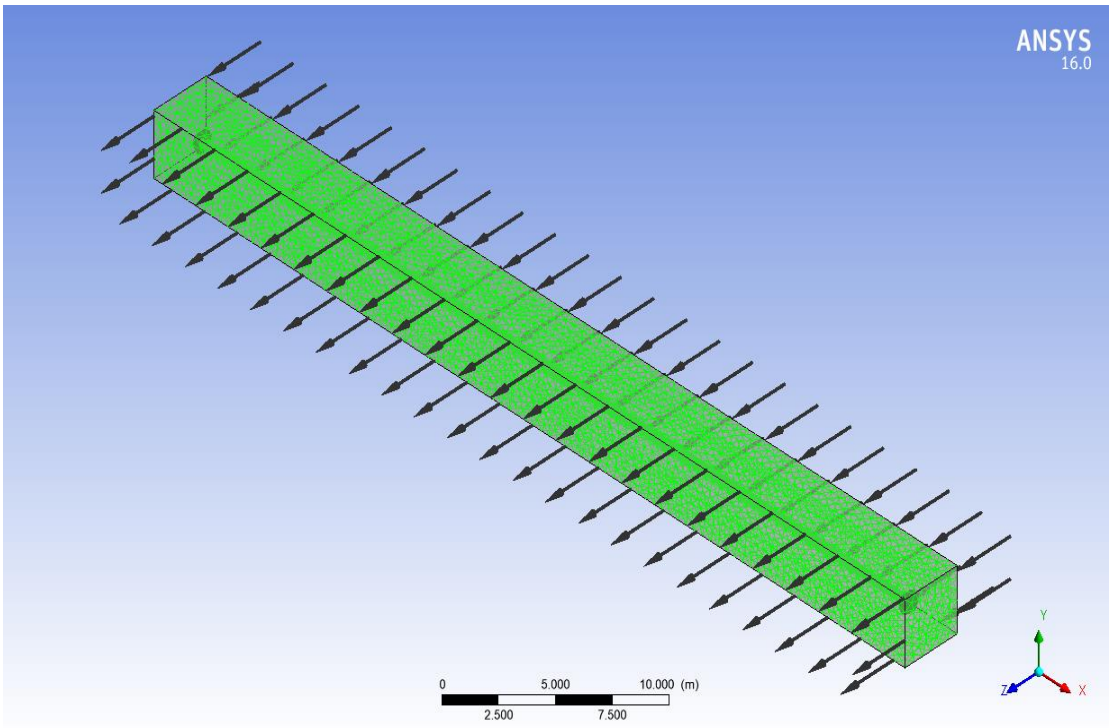
Gambar 4. 4 Model Aliran Arus pada Bentangan Bebas

Tahapan selanjutnya adalah pemberian *meshing* pada model *free span*. Untuk melihat jumlah elemen (*meshing*) yang terbentuk yaitu dengan cara memasukkan nilai *Max Face Time* sehingga didapatkan jumlah elemennya. Model *meshing* yang dilakukan dibuat sekecil mungkin. Nilai *Max Face Time* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *default* dari programnya yaitu 0,304110 m dengan jumlah elemen yang dihasilkan sebesar 1478595 elemen. Berikut visualisasi *meshing* pada model ditampilkan pada Gambar 4.5 berikut.



Gambar 4. 5 Bentuk *Meshing* pada Permodelan

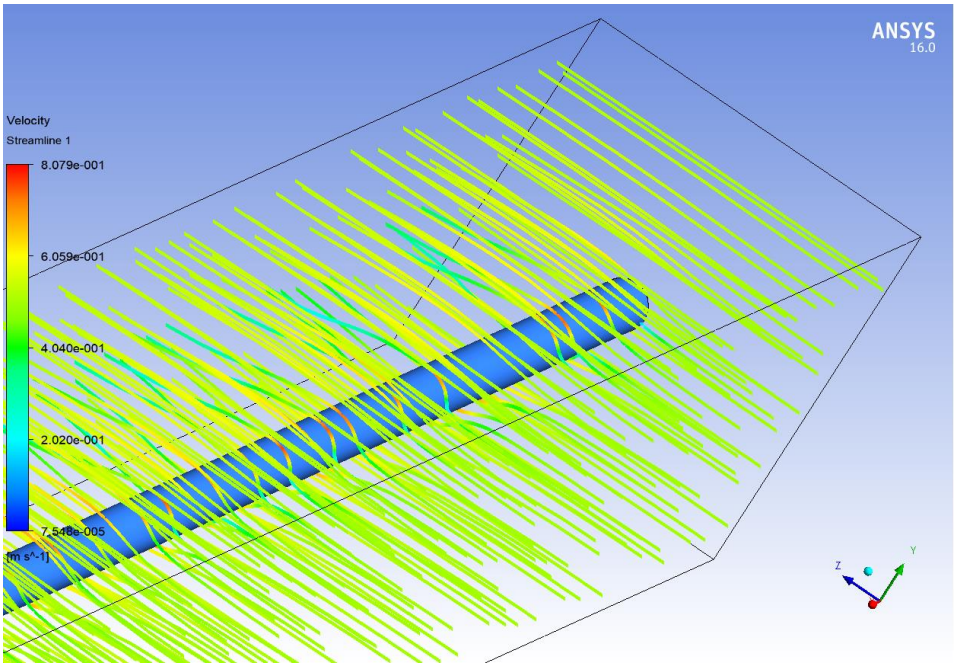
3. Langkah berikutnya adalah pemberian batas – batas analisis pada model geometri. Untuk kondisi batas *inlet* diberikan nilai kecepatan arus sebesar 0,426 m/s (kondisi ekstrem), sedangkan *output* diberi luaran *pressure* 0 MPa. Hal ini dimaksudkan untuk melihat *pressure* yang terjadi pada pipa. Sedangkan untuk sisi – sisi domain yang lain, diberikan *boundary condition* berupa *wall*. Setelah itu dipindahkan ke ANSYS Solver Manager agar bisa di *running* sesuai dengan *input* yang diberikan. Pemberian *Boundary Condition* pada model ditampilkan pada Gambar 4.6 berikut.



Gambar 4. 6 *Setup* untuk Pemodelan ANSYS CFX

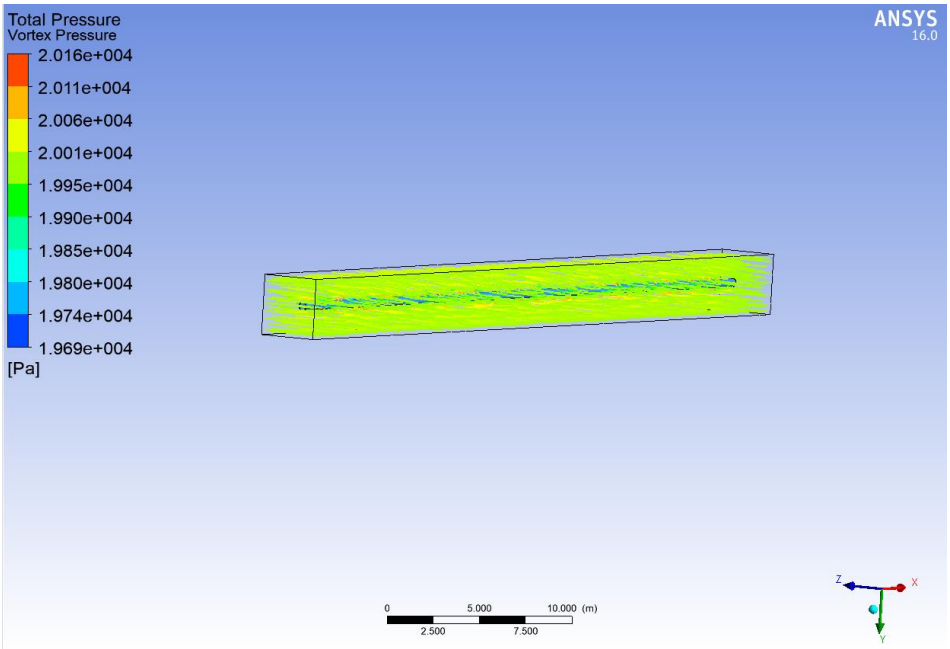
4.7.2 Hasil Pemodelan ANSYS CFX

Hasil Permodelan pada ANSYS CFX yang diperoleh memperlihatkan bentuk interaksi antara aliran fluida arus yang terjadi di depan dan belakang pipa seperti ditampilkan pada Gambar 4.7 berikut.



Gambar 4. 7 *Output* Kecepatan Arus setelah melewati Pipa

Arah aliran yang menabrak *free span* ini berbentuk *streamline* sesuai bentuk geometri pipa. Tetapi untuk daerah di belakang arus mengalami sedikit *vortex*. Adapun hasil *output* dari CFX sebenernya bermacam – macam, beberapa diantaranya yaitu kecepatan aliran setelah menabrak pipa sebesar 0,8 m/s maksimum. Selain itu output nilai *pressure* akibat dari aliran arus yang menabrak (*vortex pressure*) didapatkan sebesar 20164,4 Pa (Gambar 4.8). Nilai ini nantinya di *input* kedalam ANSYS *static structural.*



Gambar 4. 8 Hasil *Vortex Pressure* dari ANSYS CFX

4.7.3 Pemodelan Tegangan pada ANSYS *Structural*

Pemodelan dengan menggunakan ANSYS *static structural* memiliki tujuan untuk mendapatkan tegangan ekuivalen atau tegangan *von mises.* Hasil tegangan yang diperoleh nanti diperlukan untuk validasi terhadap perhitungan tegangan ekuivalen yang sudah dihitung secara analitis dan untuk memvisualisasikan tegangan ekuivalen pada pipa yang ditinjau.

1. Pemodelan Pipa

Input pemodelan pipa yang digunakan sama dengan input untuk Ansys CFX, tetapi dalam Ansys Static Structural tidak dimasukkan domain balok untuk pemodelan arusnya. Selain itu pada Engineering Data dimasukkan nilai massa jenis struktur pipa, SMYS, SMTS, Modulus young, koefisien thermal expansionyang telah didapatkan dari data awal pipa.

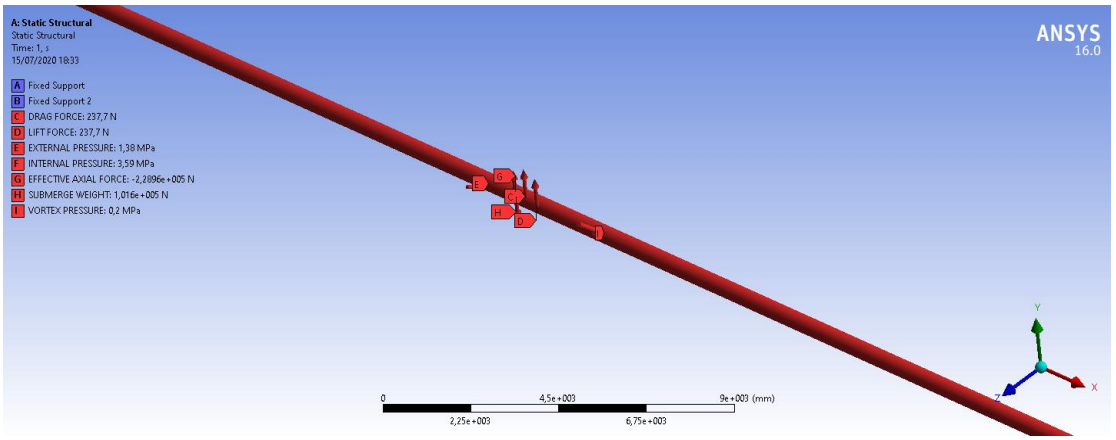
2. Input Force, Pressure dan Support

Beban yang dimasukkan merupakan beban-beban yang mempengaruhi besarnya tegangan ekivalen dan besarnya didapat dari perhitungan sebelumnya dan hasiloutput dari Ansys CFX. Berikut merupakan Tabel 4.26 dari input pembebanan untuk ANSYS static structural.

Tabel 4. 26 *Input* untuk ANSYS *Static Structural*

Parameter	Nilai
Vortex Pressure	2,01 x 10^{-1} MPa
Support	Fixed-Fixed Support
Drag Force	237,7 N
Lift Force	237,7N
Submerged Weight	101597 N
Effective Axial	228955 N
Internal Pressure	3590000 Pa
External Pressure	1384607 Pa

Besarnya beban yang diinput serta arah pembebanannya harus sesuai dengan kondisi aktual agar hasil analisis yang didapatkan sesuai. Gambar 4.9 menampilkan arah pembebanan untuk ANSYS Static Structural.

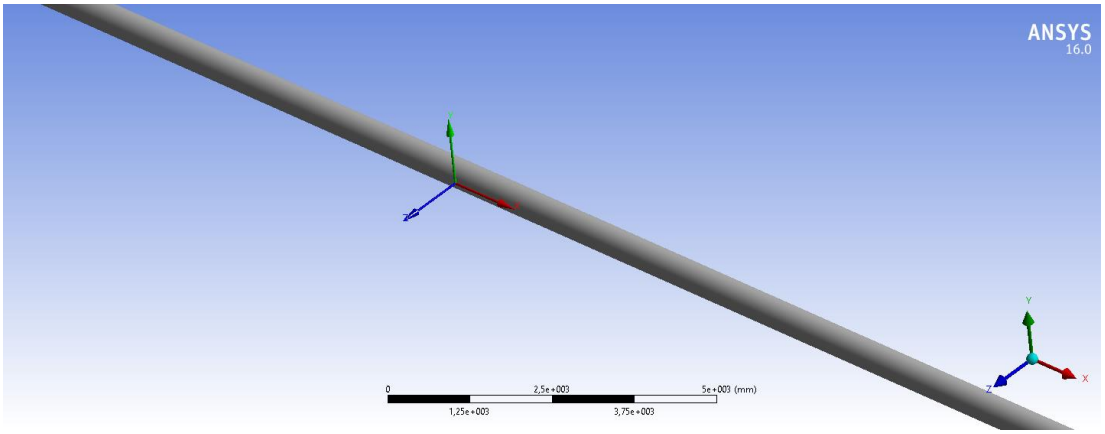


Gambar 4. 9 Arah pembebanan untuk ANSYS *Static Structural*

4.7.4 *Meshing Sensitivity*

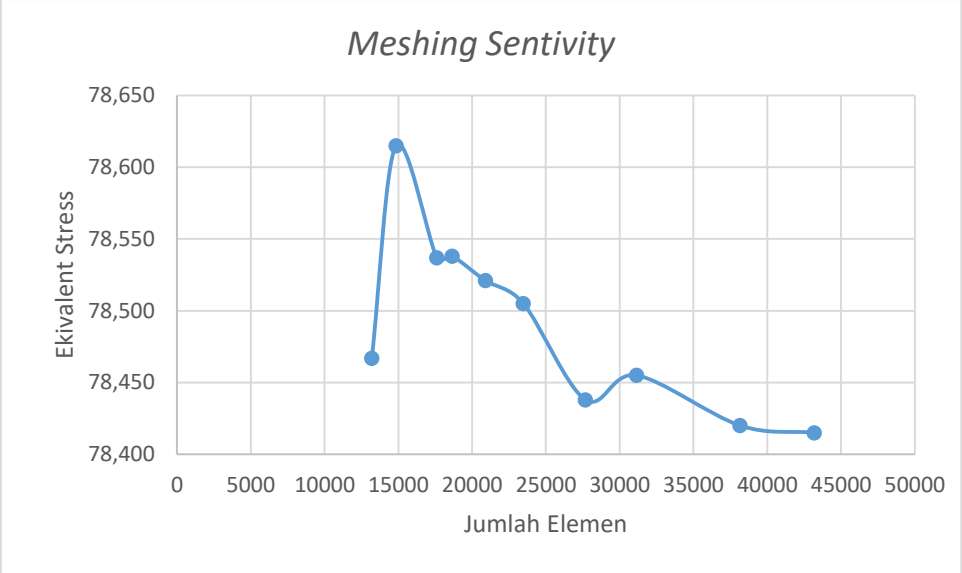
Setelah melakukan running model, maka selanjutnya diperlukan analisis meshing yang tepat pada struktur pipa tersebut sehingga meshing tersebut tidak mempengaruhi nilai output tegangan yang dihasilkan.

Dalam melakukan analisameshing diperlukan pembuatanprobe coordinat agar nilai tegangan yang ditinjau hanya pada titikprobe tersebut. Untukprobecoordinat, dalam Tugas Akhir ini diletakkan tepat ditengah pipa tersebut dapat dilihat padaGambar 4.10 berikut.



Gambar 4. 10 Letak *Probe Coordinate* pada Pipa

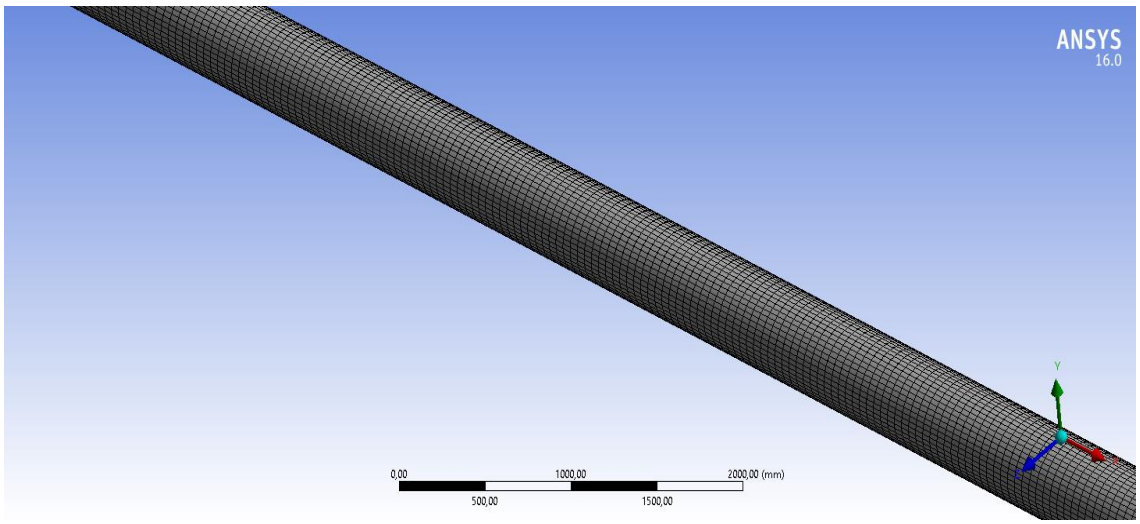
Setelah itu, maka dilakukan running berkali-kali sampai menemukan jumlah elemen yang sesuai Berikut merupakan grafik perbandingan jumlah elemen denganekuivalen stresspada probe coordinat pada Gambar4.11.



Gambar 4. 11 Grafik *Meshing Sensitivity*

Dari grafik tersebut kita dapatkan nilai *meshing* yang tidak mempengaruhi *output* dari *software* Ansys tersebut yaitu dengan jumlah

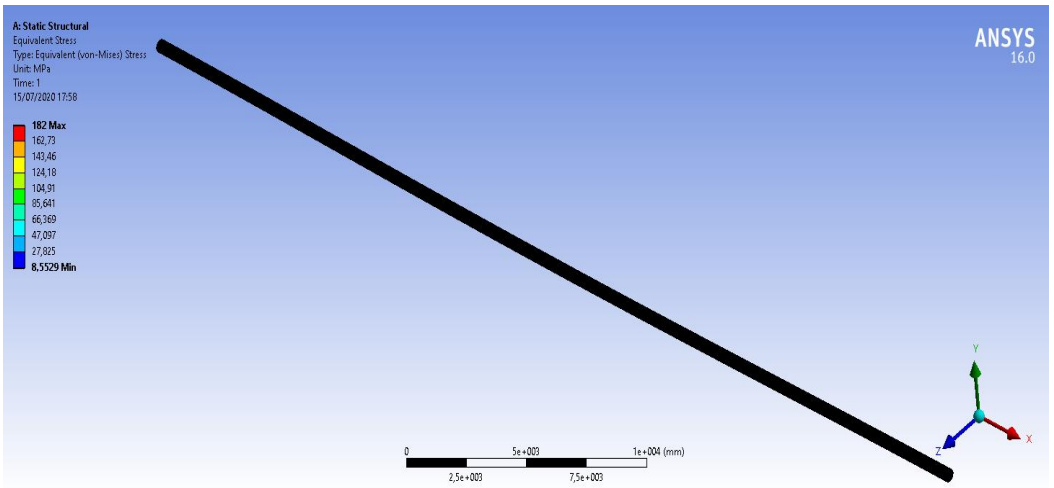
elemen sebanyak 38777 elemen dengan element size sebesar 21 mm. Untuk gambar *meshing* pada struktur pipa, dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 12 *Meshing* pada Pipa

4.7.5 Hasil Pemodelan Tegangan

Output Solution yang dipilih dalam software ini adalah Equivalent Stress (Von Mises Stress). Nilai ini ditampilkan berupa nilai range tegangan yang diterima pada struktur pipa, terdapat juga nilai maksimal dan minimal yang diterima pipa tersebut. Gambar 4.13 berikut merupakan Output Solution dari Ansys static structural yang dihasilkan.



Gambar 4. 13 Output Tegangan *von-Mises* dari Pemodelan

4.7.6 Validasi nilai Tegangan *von Mises*

Setelah didapatkan *output* nilai tegangan *von Mises* dari software ANSYS *Static Structural*, maka selanjutnya melakukan validasi nilai *output* tersebut dengan nilai tegangan hasil analitis. Perhatikan Tabel 4.27 untuk melihat hasil validasi tersebut.

Tabel 4. 27 Validasi *Equivalent Stress*

Perhitungan	Nilai	Satuan
Manual (DNV dan ASME)	189,41	MPa
Permodelan (Ansys Static Structural)	182	MPa

4.8 Perhitungan Panjang *Allowable Span* Statik

Berdasarkan perbandingan seluruh nilai tegangan dengan *allowable stress* dari ASME B31.8 telah didapatkan kesimpulan bahwa seluruh nilai tegangan tidak melebihi nilai kriteria tegangan yang diizinkan sehingga tegangan yang terjadi tidak membuat struktur gagal. Selain itu, setelah mendapatkan hasil validasi perhitungan tegangan maka tegangan hasil analitis yang telah dihitung sebelumnya digunakan untuk melakukan analisis panjang *allowable span statis*. Panjang *allowable span* kondisi *statis* disini yaitu panjang maksimum *span* yang diizinkan sehingga pipa tidak mengalami tegangan leleh atau runtuh yang disebabkan oleh berat pipa dan fluida yang mengalir dalam pipa maupun luar pipa tersebut. Di bawah ini adalah perhitungan parameter untuk mendapatkan panjang *allowable span* static yang ditampilkan pada Tabel 4.28.

Tabel 4.28 Perhitungan Parameter Panjang *Allowable Span Statik*

L (m)	Gap (m)	Tegangan Ekivalen (N/m^2)	Momen Intersia Penampang Pipa (m^4)	Gaya Drag (N/m)	Gaya Inersia (N/m)	Berat Pipa Terendam (N/m)	Berat Pipa Terdistribusi Merata (N/m)
44,00	1,4	1,89,E+08	7,E-04	237,31	184,30	2309,04	2347,22
39,00	1,5	1,71,E+08	7,E-04	239,57	184,30	2309,04	2347,63
40,00	1,4	1,74,E+08	7,E-04	237,31	184,30	2309,04	2347,22
42,00	0,5	1,81,E+08	7,E-04	208,28	184,30	2309,04	2342,18
36,00	0,3	1,61,E+08	7,E-04	197,59	187,99	2309,04	2341,02
36,00	0,3	1,61,E+08	7,E-04	197,59	187,99	2309,04	2341,02
37,00	0,4	1,64,E+08	7,E-04	203,29	185,53	2309,04	2341,55
38,00	0,55	1,67,E+08	7,E-04	210,56	184,30	2309,04	2342,56
39,00	0,35	1,71,E+08	7,E-04	200,55	186,76	2309,04	2341,30
37,00	0,65	1,64,E+08	7,E-04	214,76	184,30	2309,04	2343,27
43,00	0,45	1,85,E+08	7,E-04	205,86	185,53	2309,04	2341,98
42,00	0,8	1,82,E+08	7,E-04	220,35	184,30	2309,04	2344,23
39,00	0,35	1,71,E+08	7,E-04	253,55	184,30	2309,04	2350,19
40,00	0,35	1,74,E+08	7,E-04	253,55	184,30	2309,04	2350,19
36,00	0,3	1,61,E+08	7,E-04	250,23	184,30	2309,04	2349,57
38,00	0,25	1,67,E+08	7,E-04	246,63	184,30	2309,04	2348,91
37,00	0,55	1,64,E+08	7,E-04	264,79	184,30	2309,04	2352,31
36,00	0,4	1,61,E+08	7,E-04	256,64	184,30	2309,04	2350,77
36,00	0,45	1,61,E+08	7,E-04	259,53	184,30	2309,04	2351,31
36,00	0,5	1,61,E+08	7,E-04	262,24	184,30	2309,04	2351,82
39,00	0,5	1,71,E+08	7,E-04	262,24	184,30	2309,04	2351,82
37,00	1,5	1,64,E+08	7,E-04	297,22	184,30	2309,04	2358,72
36,00	0,3	1,61,E+08	7,E-04	250,23	184,30	2309,04	2349,57
37,00	0,5	1,64,E+08	7,E-04	289,76	184,30	2309,04	2357,21

Dari hasil perhitungan parameter di Tabel 4.28, selanjutnya dilakukan perhitungan panjang *allowable span* statik dan pengecekan apakah panjang actual *span* melebihi dari hasil perhitungan panjang *allowable span* sratik. Hasil ditampilkan pada Tabel 4.29

Tabel 4.29 Hasil Perhitungan Panjang *Allowable Span* Statik dan Pengecekan

Panjang Span Aktual (m)	Panjang Allowable Span Statik (m)	Cek
44,00	38,98	GAGAL
39,00	41,41	TIDAK GAGAL
40,00	41,82	TIDAK GAGAL
42,00	42,71	TIDAK GAGAL
36,00	40,31	TIDAK GAGAL
36,00	40,31	TIDAK GAGAL
37,00	40,68	TIDAK GAGAL
38,00	41,05	TIDAK GAGAL
39,00	41,46	TIDAK GAGAL
37,00	40,67	TIDAK GAGAL
43,00	43,15	TIDAK GAGAL
42,00	42,69	TIDAK GAGAL
39,00	41,39	TIDAK GAGAL
40,00	41,80	TIDAK GAGAL
36,00	40,25	TIDAK GAGAL
38,00	41,01	TIDAK GAGAL
37,00	40,60	TIDAK GAGAL
36,00	40,24	TIDAK GAGAL
36,00	40,24	TIDAK GAGAL
36,00	40,23	TIDAK GAGAL
39,00	41,38	TIDAK GAGAL

Panjang Aktual Span (m)	Panjang Allowable Span Statik (m)	Cek
37,00	40,55	TIDAK GAGAL
36,00	40,25	TIDAK GAGAL
37,00	40,56	TIDAK GAGAL

Dari Tabel 4.29 maka didapatkan salah satu *span* bahwa terjadi *overspan.* Panjang *allowable span* kondisi statis yang didapatkan sebesar 39,98 m, sedangkan panjang *actual span* 44 m Maka dapat disimpulkan bahwa *freespan* akibat yang terjadi pada pipa tidak dalam batas aman dan mengalami tegangan leleh atau runtuh yang disebabkan oleh berat pipa dan fluida yang mengalir di dalam pipa ataupun luar pipa. Untuk panjang span actual lainnya masih dalam batas aman.

4.9 *Screening* Panjang *Span* Aktual

Screening panjang span menurut DNV GL RP F-105 ini untuk asumsi bahwa pipa tidak mengalami kegagalan secara statis. Dibawah ini merupakan Tabel 4.30 yang menunjukkan bahwa pada bentangan berapa span akan mengalami kegagalan statis sesuai DNV GL RP F 105.

Tabel 4.30 Perhitungan *screening* L/D pada Bentangan Pipa

No. Free Span	L (m)	Gap (m)	L/D	LD>30
FS-1	44,00	1,4	77,19	GAGAL STATIS
FS-2	39,00	1,5	68,42	GAGAL STATIS
FS-3	40,00	1,4	70,18	GAGAL STATIS
FS-4	42,00	0,5	73,68	GAGAL STATIS
FS-5	36,00	0,3	63,16	GAGAL STATIS
FS-6	36,00	0,3	63,16	GAGAL STATIS
FS-7	37,00	0,4	64,91	GAGAL STATIS
FS-8	38,00	0,55	66,67	GAGAL STATIS
FS-9	39,00	0,35	68,42	GAGAL STATIS
FS-10	37,00	0,65	64,91	GAGAL STATIS
FS-11	43,00	0,45	75,44	GAGAL STATIS

Tabel 4.30 Perhitungan *Screening* L/D pada Bentangan Pipa

No. Free Span	L (m)	Gap (m)	L/D	LD>30
FS-12	42,00	0,8	73,68	GAGAL STATIS
FS-13	39,00	0,35	68,42	GAGAL STATIS
FS-14	40,00	0,35	70,18	GAGAL STATIS
FS-15	36,00	0,3	63,16	GAGAL STATIS
FS-16	38,00	0,25	66,67	GAGAL STATIS
FS-17	37,00	0,55	64,91	GAGAL STATIS
FS-18	36,00	0,4	63,16	GAGAL STATIS
FS-19	36,00	0,45	63,16	GAGAL STATIS
FS-20	36,00	0,5	63,16	GAGAL STATIS
FS-21	39,00	0,5	68,42	GAGAL STATIS
FS-22	37,00	1,5	64,91	GAGAL STATIS
FS-23	36,00	0,3	63,16	GAGAL STATIS
FS-24	37,00	0,5	64,91	GAGAL STATIS

4.10 Analisis Vortex Induced Vibrations (VIV)

Parameter VIV yang digunakan dalam analisis terdiri dari *stability parameter*, *current flow ratio*, bilangan *keulegan carpenter* dan *reduced velocity*. Beberapa parameter awal yang digunakan dalam perhitungan parameter VIV disajikan pada Tabel 4.31.

Tabel 4.31 Parameter Perhiutngan Awal Parameter VIV

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas Air Laut	ρ_w	1025	kg/m3
Stability Parameter Safety Factor	@	1,15	-
Soil Damping	ζ_{soil}	0,01	-
Hydrodynamic Damping	ζ_h	0	-
Structural Damping	ζ_{str}	0,005	-
Kekasaran Permukaan Pipa	C‘–	0,015	
Diameter Total Pipa	D_I	0,57	m
Rasio k/Di	K/DI	0,005	-
Frek. Gelombang Signifikan (10 Tahun)	X_s	0,65	rad/s
Frek. Gelombang Signifikan (100 Tahun)	X_s	0,53	rad/s
Viskositas Kinematis Air Laut	V_k	1,E-06	m2/s

Dari parameter di atas, maka unutk parameter – parameter VIV ditentukan nilainya. Parameter *current flow ratio* yaitu parameter yang dapat memengaruhi bentuk aliran. Kemudian, untuk parameter stabilitas dipengaruhi oleh massa efektif pipa dan modal *damping.* Modal *damping* terdiri dari *structural damping*, *hydrodynamic damping*, dan *soil damping* yang dapat dilihat pada Tabel 4.31. Di bawah ini adalah hasil perhitungan untuk *current flow ratio* dan nilai stabilitas yang ditampilkan pada Tabel 4.32.

Tabel 4.32 Perhitungan *Current Flow Ratio* dan Nilai Stabilitas

Reynold Number 10 Tahun	Reynold Number 100 Tahun	Current Flow Ratio r^*	Stability Parameter (Ks)	Stability Parameter Factor (Ksd)
5,E+05	6,E+05	0,993	0,42	0,37
5,E+05	6,E+05	0,993	0,42	0,37
5,E+05	6,E+05	0,993	0,42	0,37
4,E+05	6,E+05	0,993	0,42	0,37
4,E+05	5,E+05	0,992	0,44	0,38
4,E+05	5,E+05	0,992	0,44	0,38
4,E+05	6,E+05	0,992	0,43	0,37
4,E+05	6,E+05	0,993	0,42	0,37
4,E+05	6,E+05	0,992	0,44	0,38
4,E+05	6,E+05	0,993	0,42	0,37
4,E+05	6,E+05	0,992	0,42	0,37
5,E+05	6,E+05	0,993	0,42	0,37
5,E+05	6,E+05	0,993	0,44	0,38
5,E+05	6,E+05	0,993	0,44	0,38
5,E+05	6,E+05	0,993	0,44	0,38
5,E+05	6,E+05	0,993	0,45	0,39
5,E+05	6,E+05	0,993	0,42	0,37
5,E+05	6,E+05	0,993	0,43	0,37
5,E+05	6,E+05	0,993	0,42	0,37
5,E+05	6,E+05	0,993	0,42	0,37
5,E+05	6,E+05	0,993	0,42	0,37
5,E+05	7,E+05	0,994	0,42	0,37
5,E+05	6,E+05	0,993	0,44	0,38
5,E+05	7,E+05	0,994	0,42	0,37
0,E+00	0,E+00	0,000	0,00	0,00

Dari perhitungan parameter VIV yang diperoleh komponen nilai *Reynolds Number* melebihi angka $>10^5$ yang berarti aliran yang terjadi adalah aliran jenis laminar yang bertransisi menjadi aliran turbulen dengan nilai *reduce velocity* berada pada angka >2.2 yang dikategorikan bisa menyebabkan pipa mengalami getaran dan terjadi VIV. Hasil dari perhitungan *reduce velocity*, *Keulegan Carpenter* (KC), *Storuhan Number*, dan Frekuensi *Vortex Shedding* dapat dilihat pada Tabel 4.33

Tabel 4.33 Perhitungan Parameter VIV

STROUHAL NUMBER	Vortex shedding 10 (Hz)	Vortex Shedding 100 (Hz)	KC 10 Tahun	KC 100 Tahun	Reduce Velocity (Vr)
0,26	0,39	0,49	0,02	0,43	7,08
0,26	0,39	0,50	0,02	0,43	7,11
0,26	0,39	0,49	0,02	0,43	7,08
0,26	0,36	0,46	0,02	0,43	6,63
0,26	0,35	0,45	0,02	0,43	6,46
0,26	0,35	0,45	0,02	0,43	6,46
0,26	0,36	0,46	0,02	0,43	6,55
0,26	0,36	0,47	0,02	0,43	6,67
0,26	0,35	0,45	0,02	0,43	6,51
0,26	0,37	0,47	0,02	0,43	6,74
0,26	0,36	0,46	0,02	0,43	6,59
0,26	0,37	0,48	0,02	0,43	6,82
0,26	0,40	0,51	0,02	0,43	7,32
0,26	0,40	0,51	0,02	0,43	7,32
0,26	0,40	0,51	0,02	0,43	7,27
0,26	0,40	0,50	0,02	0,43	7,22
0,26	0,41	0,52	0,02	0,43	7,48
0,26	0,41	0,51	0,02	0,43	7,36
0,26	0,41	0,52	0,02	0,43	7,40

Tabel 4.33 Perhitungan ParameterVIV (Lanjutan)

STROUHAL NUMBER	Vortex shedding 10 (Hz)	Vortex Shedding 100 (Hz)	KC 10 Tahun	KC 100 Tahun	Reduce Velocity (Vr)
0,26	0,41	0,52	0,02	0,43	7,44
0,26	0,41	0,52	0,02	0,43	7,44
0,26	0,44	0,55	0,02	0,43	7,92
0,26	0,40	0,51	0,02	0,43	7,27

4.11 Perhitungan Panjang *Effective Span*

Analisis panjang *span* menggunakan *code* DNV GL RP F-105 merupakan analisis *span* pada pipa bawah laut yang menggunakan beberapa parameter yang lebih kompleks.

4.11.1 Boundary Condition

Sebelum Panjang *Span* Efektif, *Effective Axial Force*, *Critical Buckling Load* dan *Static Deflection* dihitung asumsi tumpuan bentangan bebas perlu ditentukan terlebih dahulu. Asumsi tumpuan yang efektif digunakan untuk kasus bentangan bebas ini adalah *fixed-fixed.* Nilai koefisien *boundary condition* dari *fixed-fixed span* menurut DNV GL RP F-105 yang dijelaskan kembali dalam Tabel 4.34.

Tabel 4. 34 *Boundary Condition*

	Pinned-pinned (2)	*Fixed-fixed (3)*	*Single Span on seabed*
C_1	1.57	3.56	3.56
C_2	1.0	4.0	4.0
C_3	$0.8^{(1)}$	$0.2^{(1)}$	$0.4^{(1)}$
C_4	4.93	14.1	*Shoulder:* $\frac{1}{18\,(L_{eff}/\mathrm{L})^2 - 6}$ *Midspan:* 8.6
C_5	1/8	1/12	*Shoulder* $^{(4)}$*:* 14.1 $(\mathrm{L}/\mathrm{L}_{\mathrm{eff}})^2$ *Midspan:* 8.6
C_6	5/384	1/384	1/384

1) Note that $C_3 = 0$ is normally assumed for in -line direction if the steady current is not accounted for. 2) For pinned -pinned boundary condition L_{eff} shall be replaced by L in all expressions, including the expression for P_{cr}. 3) For fixed -fixed boundary conditions, $L_{eff}/L = 1$ per definition. 4) C_5 shall be calculated using the static soil stiffness in the L_{eff}/L calculation.

4.11.2 Perhitungan *Concrete Stiffness Factor*

Concrete stiffness factor menunjukkan kekakuan selimut beton relatif terhadap kekakuan pipa baja. Perhitungan *concrete stiffness factor* merupakan perhitungan faktor kekakuan dari *concrete* yang dipengaruhi oleh momen inersia pipa dan momen inersia *concrete* itu sendiri. Hasil CSF sebesar 0,228 dapat dilihat dalam Tabel 4.35.

Tabel 4.35 Perhitungan *Concrete Stiffness Factor*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Konstanta Empiris (Asphalt)	k_C	0,330	-
Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	0,001	m4
Momen Inersia Selimut Beton	I_{conc}	0,003	m4
Young's Modulus Pipa Baja	E_{st}	207000	Mpa
Young's Modulus Selimut Beton	E_{conc}	31330,242	Mpa
Kekuatan Material Selimut Beton	f_{cn}	45	Mpa
Concrete Stiffness Factor	CSF	0,228	

4.11.3 Perhitungan Dynamic Soil Stiffness

Panjang efektif bentangan bebas pipa dapat memengaruhi frekuensi natural pipa terutama bentangan bebas pipa terutama bentangan bebas pipa yang diasumsikan dengan tumpuan *span on seabed* dan *fixed-fixed*. Nilai panjang *free span* efektif juga bergantung pada nilai *Relative Soil Stiffness Number*. Tabel 4.36 menunjukkan parameter perhitungan *dynamic soil stiffeness* untuk mengetahui besar gaya dari interaksi tanah dengan pipa.

Tabel 4.36 Parameter *Dynamic Soil Stiffness*

Parameter Dynamic Soil Stiffness			
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Koef. Dynamic Soil Stiffness Vertikal	C_V	10500	$kN/m^{5/2}$
Koef. Dynamic Soil Stiffness Horizontal	C_L	9000	$kN/m^{5/3}$
Poisson Ratio Tanah vertikal (Corroded)	$V_{soil,V}$	0,35	-
Poisson Ratio Tanah Horizontal (Corroded)	$V_{soil,L}$	0,35	-
Massa Pipa di Udara	-	488,65	kg/m
Massa Air yang Dipindahkan	mdisp	474,82	kg/m

Untuk mengetahui besar gaya interaksi tanah dengan pipa maka dilakukan perhitungan untuk menghitung gaya kekakuan dari tanah itu sendiri yang mana hasil dari perhitungan tersebut akan digunakan untuk menentukan panjang span kritis dari span yang terjadi. Tabel 4.37 dibawah ini menampilkan perhitungan kekakuan tanah dinamis untuk pipa yang berinteraksi dengan tumpuan yang berupa *fixed-fixed*.

Tabel 4.37 Perhitungan *Dynamic Soil Stiffness*

Dynamic Soil Stiffness			
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Rasio Massa Spesifik	Q_s	1,03	-
Dynamic Soil Stiffness Vertikal	K_V	11077,61	kN/m2
Dynamic Soil Stiffness Horizontal	K_L	9351,18	kN/m2

4.11.4 Parameter Panjang *Effective Span*

Studi kasus yang digunakan pada tugas akhir ini adalah pipa yang telah dilakukan survei freespan sebelumnya, sehingga panjang span yang digunakan merupakan panjang span aktual.

Oleh karena hal ini, panjang efektif bentangan bebas yang dihitung berdasarkan panjang tiap – tiap span aktualnya. Berikut adalah parameter yang digunakan untuk melakukan perhitungan panjang efektif ditampilkan pada Tabel 4.38.

Tabel 4.38 Parameter Perhitungan Panjang *Span* Efektif

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Dynamic soil stiffness vertikal	K_v	1,11E+04	N/m^2
Dynamic soil stiffness horizontal	K_L	9,35E+03	N/m^2
Concrete Stiffness Factor	CSF	0,228	-
momen inersia pipa baja	I_{st}	6,56E-04	m^4
zµP[•ıpp•ı pipa baja	E_{st}	2,07E+11	Pa

4.11.5 Perhitungan Panjang *Effective Span*

Perhitungan panjang efektif *span* dilakukan untuk dua kondisi, yaitu kondisi *in-line* dan *crossflow*. Dalam DNV RP F105 apabila tumpuan fixed-fixed maka nilai Leff/L = 1 sehingga nilai panjang effective span sama dengan nilai actual span. Dibawah ini adalah hasil perhitungan panjang efektif yang ditampilkan pada Tabel 4.39.

Tabel 4.39 Perhitungan Panjang *Effective Span* Kondisi *In-line* dan *Crossflow*

Cross-Flow			In-Line		
L	**L_{eff}/L**	**L_{eff}**	**L**	**L_{eff}/L**	**L_{eff}**
m		**m**	**m**		**m**
44,00	1,000	44,000	44,00	1,00	44,00
39,00	1,000	39,000	39,00	1,00	39,00
40,00	1,000	40,000	40,00	1,00	40,00
42,00	1,000	42,000	42,00	1,00	42,00
36,00	1,000	36,000	36,00	1,00	36,00
36,00	1,000	36,000	36,00	1,00	36,00
37,00	1,000	37,000	37,00	1,00	37,00
38,00	1,000	38,000	38,00	1,00	38,00
39,00	1,000	39,000	39,00	1,00	39,00
37,00	1,000	37,000	37,00	1,00	37,00
43,00	1,000	43,000	43,00	1,00	43,00
42,00	1,000	42,000	42,00	1,00	42,00
39,00	1,000	39,000	39,00	1,00	39,00
40,00	1,000	40,000	40,00	1,00	40,00
36,00	1,000	36,000	36,00	1,00	36,00
38,00	1,000	38,000	38,00	1,00	38,00
37,00	1,000	37,000	37,00	1,00	37,00
36,00	1,000	36,000	36,00	1,00	36,00
36,00	1,000	36,000	36,00	1,00	36,00
36,00	1,000	36,000	36,00	1,00	36,00
39,00	1,000	39,000	39,00	1,00	39,00
37,00	1,000	37,000	37,00	1,00	37,00
36,00	1,000	36,000	36,00	1,00	36,00
37,00	1,000	37,000	37,00	1,00	37,00

4.12 Frekuensi Natural

Dalam perhitungan frekuensi natural, terlebih dahulu harus atau diperlukan melakukan perhitungan lain yaitu *effective axial force, static defelction,* dan *critival buckling load.*

4.12.1 Perhitungan Effective Axial Force

Effective axial force dapat mempengaruhi besar frekuensi pipa bawah laut. Parameter yang digunakan untuk perhitungan ini dijelaskan pada Tabel 4.40 dan hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 4.41.

Tabel 4.40 Parameter Perhitungan *Effective Axial Force*

Parameter Perhitungan *Effective Axial Force*			
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Perbedaan tekanan	DP	2,21E+06	Pa
Poisson's ratio baja	v_{st}	0,30	-
diameter dalam pipa	D_i	0,42	m
Luas penampang internal pipa baja	A_i	0,22	m^2
Luas penampang pipa baja	A_{st}	2,74E-02	m^2
Koefisien *thermal expansion*	a_e	1,17E-05	$/^0C$
Temperatur Operasi	T_1	25,48	^0C
Temperatur air laut	T_0	25,00	^0C
Young's modulus pipa baja	E_{st}	2,07E+11	Pa

Tabel 4.41 Perhitungan Nilai Perbedaan Tekanan

Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Densitas air laut	ρ_w	1025,00	kg/m^3
Kedalaman laut	h	137,70	m
Percepatan gravitasi	g	9,81	m/s^2
Tekanan Internal Desain	P_i	3,59E+06	Pa
Tekanan eksternal	P_e	1,38E+06	Pa
Perbedaan tekanan	ΔP	2,21E+06	Pa

Perhitungan effective axial force juga menambahkan parameter perbedaan tekanan (DP) yang merupakan pengurangan antara tekanan internal pipa dan tekanan di luar pipa yang berupa tekanan hidrostatis. Perbedaan tekanan dihitung sehingga menghasilkan nilai P sesuai dengan Tabel 4.41. Dari Parameter yang telah ditentukan di atas diperoleh haasil effective axial force sebesar -2,29E+05 Newton.

4.12.2 Perhitungan Critival Buckling Load

Critical Buckling Load merupakan faktor yang mempengaruhi frekuensi natural pipa bawah laut. Perhitungan beban buckling kritis juga untuk menentukan berapa besar gaya untuk terjadinya buckling dari pipa itu sendiri. Perhitungan dihitung dalam kondisi *inline* dan Selain panjang bentangan, beberapa parameter yang digunakan untuk perhitungan critical buckling load ditampilkan dalam Tabel 4.42 dan hasil perhitungan ditunjukkan dalam Tabel 4.43.

Tabel 4.42 Parameter Perhitugan *Critical Buckling Load*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Concrete stiffness factor	CSF	0,228	-
Young's modulus pipa baja	E_{st}	2,07E+11	Pa
momen inersia pipa baja	I_{st}	6,56E-04	m^4
Boundary condition	C_2	4,00	-

Tabel 4.43 Hasil Perhitungan *Critical Buckling Load*

Cross-Flow			In-Line		
L	**L_{eff}**	**P_{cr}**	**L**	**L_{eff}**	**P_{cr}**
m	**m**	**N**	**m**	**m**	**N**
44,00	44,00	3,40E+06	44,00	44,00	3,40E+06
39,00	39,00	4,33E+06	39,00	39,00	4,33E+06
40,00	40,00	4,11E+06	40,00	40,00	4,11E+06
42,00	42,00	3,73E+06	42,00	42,00	3,73E+06
36,00	36,00	5,08E+06	36,00	36,00	5,08E+06
36,00	36,00	5,08E+06	36,00	36,00	5,08E+06
37,00	37,00	4,81E+06	37,00	37,00	4,81E+06
38,00	38,00	4,56E+06	38,00	38,00	4,56E+06
39,00	39,00	4,33E+06	39,00	39,00	4,33E+06
37,00	37,00	4,81E+06	37,00	37,00	4,81E+06
43,00	43,00	3,56E+06	43,00	43,00	3,56E+06
42,00	42,00	3,73E+06	42,00	42,00	3,73E+06
39,00	39,00	4,33E+06	39,00	39,00	4,33E+06
40,00	40,00	4,11E+06	40,00	40,00	4,11E+06

Tabel 4.43 Hasil Perhitungan *Critical Buckling Load* (Lanjutan)

Cross-Flow		
L	**L_{eff}**	**P_{cr}**
m	**m**	**N**
36,00	36,00	5,08E+06
38,00	38,00	4,56E+06
37,00	37,00	4,81E+06
36,00	36,00	5,08E+06
36,00	36,00	5,08E+06
36,00	36,00	5,08E+06
39,00	39,00	4,33E+06
37,00	37,00	4,81E+06
36,00	36,00	5,08E+06
37,00	37,00	4,81E+06

In-Line		
L	**L_{eff}**	**P_{cr}**
m	**m**	**N**
36,00	36,00	5,08E+06
38,00	38,00	4,56E+06
37,00	37,00	4,81E+06
36,00	36,00	5,08E+06
36,00	36,00	5,08E+06
36,00	36,00	5,08E+06
39,00	39,00	4,33E+06
37,00	37,00	4,81E+06
36,00	36,00	5,08E+06
37,00	37,00	4,81E+06

4.12.3 Perhitungan *Static Deflection*

Static Deflection juga merupakan salah satu parameter yang menentukan besar frekuensi natural pipa. Parameter ini juga dipengaruhi oleh panjang efektif bentangan bebas pipa dan beban defleksi. Beban defleksi untuk arah *in-line* adalah total gaya hidrodinamis, sedangkan untuk arah *cross-flow* adalah berat terendam pipa. Selain itu, beberapa parameter lain yang digunakan untuk memperoleh static deflection ditampilkan dalam Tabel 4.44.

Tabel 4. 44 Parameter Perhitungan Static Deflection

Parameter Perhitungan S*tatic Deflecton*			
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Concrete stiffness factor	CSF	0,228	-
Young's modulus pipa baja	E_{st}	2,07E+11	Pa
momen inersia pipa baja	I_{st}	6,56E-04	m^4
Boundary condition	C_6	0,0026	-
Effective Axial Force	S_{eff}	-2,29E+05	N
Berat terendam pipa (q *cross-flow*)	W_{sub}	2309,04	N/m

Sehingga *static deflection* dapat ditentukan, dan hasil perhitungan ditampilkan dalam Tabel 4.45 dan Tabel 4.46.

Tabel 4.45 Hasil Perhitungan *Static Deflection* Kondisi *In-Line*

In-Line				
L	**L_{eff}**	**P_{cr}**	**Ftot**	**δ**
m	**m**	**N**		**m**
44,00	44,00	3,40E+06	474,613	2,98E-02
39,00	39,00	4,33E+06	479,145	1,83E-02
40,00	40,00	4,11E+06	474,613	2,01E-02
42,00	42,00	3,73E+06	416,558	2,15E-02
36,00	36,00	5,08E+06	395,186	1,08E-02
36,00	36,00	5,08E+06	395,186	1,08E-02
37,00	37,00	4,81E+06	406,587	1,25E-02
38,00	38,00	4,56E+06	421,114	1,44E-02
39,00	39,00	4,33E+06	401,092	1,53E-02
37,00	37,00	4,81E+06	429,523	1,32E-02
43,00	43,00	3,56E+06	411,728	2,35E-02
42,00	42,00	3,73E+06	440,707	2,28E-02
39,00	39,00	4,33E+06	507,100	1,93E-02
40,00	40,00	4,11E+06	507,100	2,15E-02
36,00	36,00	5,08E+06	500,456	1,37E-02
38,00	38,00	4,56E+06	493,266	1,69E-02
37,00	37,00	4,81E+06	529,583	1,63E-02
36,00	36,00	5,08E+06	513,277	1,41E-02
36,00	36,00	5,08E+06	519,051	1,42E-02
36,00	36,00	5,08E+06	524,472	1,44E-02
39,00	39,00	4,33E+06	524,472	2,00E-02
37,00	37,00	4,81E+06	594,433	1,83E-02
36,00	36,00	5,08E+06	500,456	1,37E-02
37,00	37,00	4,81E+06	579,520	1,78E-02

Tabel 4.46 Hasil Perhitungan *Static Deflection* Kondisi *Crossflow*

Cross-Flow			
L	**L_{eff}**	**P_{cr}**	**δ**
m	**m**	**N**	**m**
44,00	44,00	3,40E+06	1,4,E-01
39,00	39,00	4,33E+06	8,8,E-02
40,00	40,00	4,11E+06	9,8,E-02
42,00	42,00	3,73E+06	1,2,E-01
36,00	36,00	5,08E+06	6,3,E-02
36,00	36,00	5,08E+06	6,3,E-02
37,00	37,00	4,81E+06	7,1,E-02
38,00	38,00	4,56E+06	7,9,E-02
39,00	39,00	4,33E+06	8,8,E-02
37,00	37,00	4,81E+06	7,1,E-02
43,00	43,00	3,56E+06	1,3,E-01
42,00	42,00	3,73E+06	1,2,E-01
39,00	39,00	4,33E+06	8,8,E-02
40,00	40,00	4,11E+06	9,8,E-02
36,00	36,00	5,08E+06	6,3,E-02
38,00	38,00	4,56E+06	7,9,E-02
37,00	37,00	4,81E+06	7,1,E-02
36,00	36,00	5,08E+06	6,3,E-02
36,00	36,00	5,08E+06	6,3,E-02
36,00	36,00	5,08E+06	6,3,E-02
39,00	39,00	4,33E+06	8,8,E-02
37,00	37,00	4,81E+06	7,1,E-02
36,00	36,00	5,08E+06	6,3,E-02
37,00	37,00	4,81E+06	7,1,E-02

4.12.4 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa

Frekuensi natural pipa merupakan parameter pentng yang harus ditentukan karena parameter ini digunakan sebagai tolak ukur penentuan panjang maksimum bentangan bebas pipa bawah laut yang boleh terjadi. Jika frekuensi natural pipa bawah laut mendekati frekuensi vortex shedding yang terjadi di daerah pipa, maka pipa akan mengalami getaran yang dapat mengakibatkan kegagalan kelelahan pada pipa. Frekuensi natural pipa dihitung menggunakan persamaan yang membutuhkan beberapa parameter yang telah ditentukan dan dihitung sebelumnya. Parameter ditampilkan dalam Tabel 4.47.

Tabel 4.47 Parameter Perhitungan Frekuensi Natural Pipa

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Concrete stiffness factor	CSF	0,23	-
Young's modulus pipa baja	E_{st}	2,07E+11	Pa
momen inersia pipa baja	I_{st}	6,56E-04	m^4
Boundary condition	C_1	3,56	-
	C_3	0,20	-
Effective Axial Force	S_{eff}	-2,29E+05	N
Diameter total pipa	D_t	0,57	m

Selanjutnya dilakukan perhitungan frekuensi natural pipa untuk setiap bentangan bebas actual. Perhitungan untuk kondisi *in-line* dan *crossflow.* Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 4.48 dan Tabel 4.49.

Tabel 4.48 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa Kondisi *In-Line*

Inline					
L	L_{eff}	P_{cr}	δ	me	f_1
m	m	N	m	kg/m	Hz
44,0	44,000	3,40E+06	2,98E-02	750,073	0,838
39,0	39,000	4,33E+06	1,83E-02	750,073	1,075
40,0	40,000	4,11E+06	2,01E-02	750,073	1,020
42,0	42,000	3,73E+06	2,15E-02	750,073	0,922
36,0	36,000	5,08E+06	1,08E-02	781,595	1,240
36,0	36,000	5,08E+06	1,08E-02	781,595	1,240
37,0	37,000	4,81E+06	1,25E-02	759,187	1,190
38,0	38,000	4,56E+06	1,44E-02	750,073	1,133
39,0	39,000	4,33E+06	1,53E-02	769,184	1,061
37,0	37,000	4,81E+06	1,32E-02	750,073	1,197
43,0	43,000	3,56E+06	2,35E-02	750,963	0,878
42,0	42,000	3,73E+06	2,28E-02	750,073	0,922
39,0	39,000	4,33E+06	1,93E-02	769,184	1,061
40,0	40,000	4,11E+06	2,15E-02	769,184	1,007

Tabel 4.48 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa Kondisi *In-Line* (Lanjutan)

Inline					
L	L_{eff}	P_{cr}	δ	me	f_1
m	m	N	m	kg/m	Hz
36,0	36,000	5,08E+06	1,37E-02	781,595	1,240
38,0	38,000	4,56E+06	1,69E-02	797,416	1,099
37,0	37,000	4,81E+06	1,63E-02	750,073	1,197
36,0	36,000	5,08E+06	1,41E-02	759,187	1,259
36,0	36,000	5,08E+06	1,42E-02	750,963	1,266
36,0	36,000	5,08E+06	1,44E-02	750,073	1,266
39,0	39,000	4,33E+06	2,00E-02	750,073	1,075
37,0	37,000	4,81E+06	1,83E-02	750,073	1,197
36,0	36,000	5,08E+06	1,37E-02	781,595	1,240
37,0	37,000	4,81E+06	1,78E-02	750,073	1,197

Tabel 4.49 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa Kondisi *Crossflow*

Cross-Flow					
L	L_{eff}	P_{cr}	δ	me	f_1
m	m	N	m	kg/m	Hz
44,0	44,000	3,40E+06	1,45E-01	750,073	0,843
39,0	39,000	4,33E+06	8,80E-02	750,073	1,077
40,0	40,000	4,11E+06	9,77E-02	750,073	1,023
42,0	42,000	3,73E+06	1,19E-01	750,073	0,927
36,0	36,000	5,08E+06	6,34E-02	781,595	1,242
36,0	36,000	5,08E+06	6,34E-02	781,595	1,242
37,0	37,000	4,81E+06	7,09E-02	759,187	1,192
38,0	38,000	4,56E+06	7,91E-02	750,073	1,136
39,0	39,000	4,33E+06	8,80E-02	769,184	1,064
37,0	37,000	4,81E+06	7,09E-02	750,073	1,199
43,0	43,000	3,56E+06	1,32E-01	750,963	0,883

Tabel 4.49 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa Kondisi *Crossflow*

(Lanjutan)

Cross-Flow					
L	L_{eff}	P_{cr}	δ	me	f_1
m	m	N	m	kg/m	Hz
42,0	42,000	3,73E+06	1,19E-01	750,073	0,927
39,0	39,000	4,33E+06	8,80E-02	769,184	1,064
40,0	40,000	4,11E+06	9,77E-02	769,184	1,010
36,0	36,000	5,08E+06	6,34E-02	781,595	1,242
38,0	38,000	4,56E+06	7,91E-02	797,416	1,101
37,0	37,000	4,81E+06	7,09E-02	750,073	1,199
36,0	36,000	5,08E+06	6,34E-02	759,187	1,260
36,0	36,000	5,08E+06	6,34E-02	750,963	1,267
36,0	36,000	5,08E+06	6,34E-02	750,073	1,268
39,0	39,000	4,33E+06	8,80E-02	750,073	1,077
37,0	37,000	4,81E+06	7,09E-02	750,073	1,199
36,0	36,000	5,08E+06	6,34E-02	781,595	1,242
37,0	37,000	4,81E+06	7,09E-02	750,073	1,199

4.13 *Screening Fatigue Criteria*

Dalam menentukan apakah pipa tersebut terjadi VIV serta mengalami *fatigue*, maka diperlukan *screening check criteria* yang berdasarkan code DNV RP F105. Untuk menentukan *screening check criteria fatigue* tersebut diperlukan perhitungan *onset reduced velocity*.

Pada Tabel 4.50 merupakan parameter yang digunakan untuk *screening fatigue* arah *in-line* dan *cross-flow*.

Tabel 4.50 Parameter *Screeing In-Line* dan *Crossflow*

Parameter *Screening* Kelelahan			
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Diameter total pipa	D_t	0,570	m
Safety factor in-line	γ_{IL}	1,4	-
Safety factor crossflow	γ_{CF}	1,4	-

Setelah mengetahui parameter yang diperlukan untuk melakukan *screening*, langkah berikutnya adalah melakukan *screening* dengan mengelompokkan ruas kanan dan kiri yang akan dibandingkan untuk arah *in-line* dan untuk arah *cross-flow*. Tabel 4.51 dan Tabel 4.52 merupakan hasil *screening* untuk masing – masing arah *in-line* dan *cross-flow*. Pada kedua tabel tersebut terdapat keterangan "LOLOS" yang berarti panjang *freespan* tersebut lolos *screening* dan "TIDAK LOLOS" yang berarti sebaliknya.

Tabel 4.51 Hasil *Screening Fatigue* Kondisi *In-Line*

In-Line							
L	**$f_{n,\,IL}$**	**$f_{n,\,IL}$ / γ_{IL}**	**$V_R^{IL}{}_{onset}$**	**Uc 100 year**	***r***	**Ruas Kanan**	**Kriteria**
m	**Hz**			**m/s**			
44,00	0,838	0,599	0,957	0,946	0,993	1,207	TIDAK LOLOS
39,00	1,075	0,768	0,962	0,951	0,993	1,269	TIDAK LOLOS
40,00	1,020	0,729	0,957	0,946	0,993	1,256	TIDAK LOLOS
42,00	0,922	0,659	0,897	0,878	0,993	1,221	TIDAK LOLOS
36,00	1,240	0,886	0,873	0,852	0,992	1,289	TIDAK LOLOS
36,00	1,240	0,886	0,873	0,852	0,992	1,289	TIDAK LOLOS
37,00	1,190	0,850	0,886	0,866	0,992	1,279	TIDAK LOLOS
38,00	1,133	0,810	0,902	0,884	0,993	1,270	TIDAK LOLOS
39,00	1,061	0,758	0,880	0,859	0,992	1,254	TIDAK LOLOS
37,00	1,197	0,855	0,911	0,894	0,993	1,284	TIDAK LOLOS
43,00	0,878	0,627	0,891	0,872	0,992	1,208	TIDAK LOLOS
42,00	0,922	0,659	0,922	0,907	0,993	1,226	TIDAK LOLOS
39,00	1,061	0,758	0,989	0,982	0,993	1,274	TIDAK LOLOS
40,00	1,007	0,720	0,989	0,982	0,993	1,262	TIDAK LOLOS
36,00	1,240	0,886	0,983	0,975	0,993	1,310	TIDAK LOLOS
38,00	1,099	0,785	0,976	0,967	0,993	1,284	TIDAK LOLOS
37,00	1,197	0,855	1,011	1,007	0,993	1,302	TIDAK LOLOS
36,00	1,259	0,899	0,995	0,989	0,993	1,312	TIDAK LOLOS
36,00	1,266	0,904	1,001	0,996	0,993	1,313	TIDAK LOLOS

Tabel 4.51 Hasil *Screening Fatigue* Kondisi *In-Line* (Lanjutan)

In-Line							
L	$f_{n,\ IL}$	$f_{n,\ IL}$ / γf	$V_R^{IL}{}_{onset}$	Uc 100 year	r	Ruas Kanan	Kriteria
m	Hz			m/s			
36,00	1,266	1,151	1,006	1,001	0,993	1,839	TIDAK LOLOS
39,00	1,075	0,977	1,006	1,001	0,993	1,787	TIDAK LOLOS
37,00	1,197	1,088	1,071	1,075	0,994	1,835	TIDAK LOLOS
36,00	1,240	1,128	0,983	0,975	0,993	1,834	TIDAK LOLOS
37,00	1,197	1,088	1,058	1,059	0,994	1,833	TIDAK LOLOS

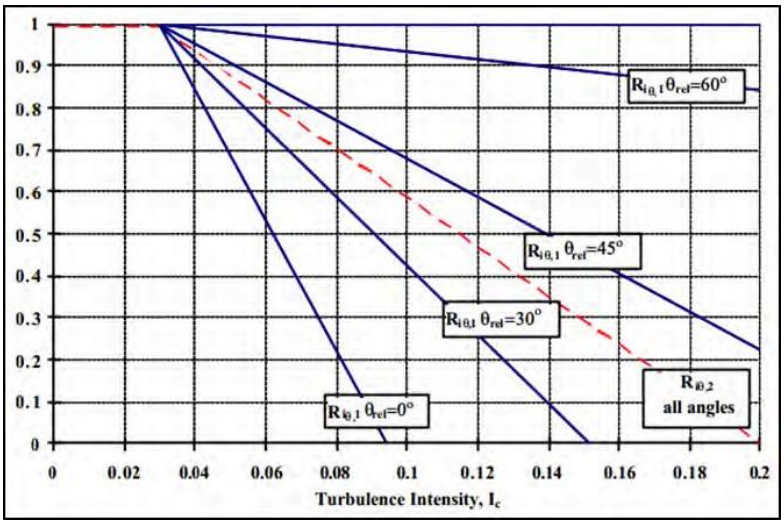
Tabel 4.52 Hasil *Screening Fatigue* Kondisi *Crossflow*

Cross-Flow							
L	$f_{n,\ CF}$	$f_{n,\ CF}$ / γf	$V_{Rcfonset}$	Uc 100 year	Uw 1 year	Ruas Kanan	Kriteria
m	Hz			m/s	m/s		
44,00	0,843	0,703	2,500	0,946	0,85	1,762	TIDAK LOLOS
39,00	1,077	0,898	2,500	0,951	0,85	1,772	TIDAK LOLOS
40,00	1,023	0,853	2,500	0,946	0,85	1,762	TIDAK LOLOS
42,00	0,927	0,772	2,500	0,878	0,79	1,636	TIDAK LOLOS
36,00	1,242	1,035	2,286	0,852	0,76	1,736	TIDAK LOLOS
36,00	1,242	1,035	2,286	0,852	0,76	1,736	TIDAK LOLOS
37,00	1,192	0,993	2,423	0,866	0,78	1,665	TIDAK LOLOS
38,00	1,136	0,946	2,500	0,884	0,79	1,646	TIDAK LOLOS
39,00	1,064	0,886	2,355	0,859	0,77	1,700	TIDAK LOLOS
37,00	1,199	0,999	2,500	0,894	0,80	1,665	TIDAK LOLOS
43,00	0,883	0,736	2,492	0,872	0,78	1,631	TIDAK LOLOS
42,00	0,927	0,772	2,500	0,907	0,81	1,690	TIDAK LOLOS
39,00	1,064	0,886	2,355	0,982	0,88	1,943	TIDAK LOLOS
40,00	1,010	0,842	2,355	0,982	0,88	1,943	TIDAK LOLOS
36,00	1,242	1,035	2,286	0,975	0,87	1,986	TIDAK LOLOS
38,00	1,101	0,918	2,218	0,967	0,87	2,031	TIDAK LOLOS
37,00	1,199	0,999	2,500	1,007	0,90	1,875	TIDAK LOLOS
36,00	1,260	1,050	2,423	0,989	0,89	1,901	TIDAK LOLOS
36,00	1,267	1,056	2,492	0,996	0,89	1,860	TIDAK LOLOS
36,00	1,268	1,057	2,500	1,001	0,90	1,865	TIDAK LOLOS
39,00	1,077	0,898	2,500	1,001	0,90	1,865	TIDAK LOLOS
37,00	1,199	0,999	2,500	1,075	0,96	2,001	TIDAK LOLOS
36,00	1,242	1,035	2,286	0,975	0,87	1,986	TIDAK LOLOS
37,00	1,199	0,999	2,500	1,059	0,95	1,972	TIDAK LOLOS

Dari tabel di atas diketahui bahwa hasil *screening fatigue* semua bentangan untuk dua kondisi menunjukkan keterangan TIDAK LOLOS. Dari keterangan tersebut diartikan bahwa semua bentangan bebas terjadi VIV dan perlu di analisa *fatigue.* Selanjutnya diharuskan perhitungan *fatigue* untuk kondisi *in-line* dan *crossflow* pada semua bentangan bebas.

4.14 Perhitungan Respone Model

Dalam perhitungan *response model*, diperlukan beberapa parameter sehingga nilai *response model* didapatkan. Untuk nilai faktor reduksi dari turbulensi arah aliran ($R_{I\Phi,1}$ dan $R_{I\Phi,2}$), didapatkan dari grafik hubungan antara intensitas turbulensi (Ic) dan sudut aliran yang ditampilkan dalam Gambar 4.14 berikut.



Gambar 4. 14 Grafik Hubungan Intensitas Turbulensi (Ic) dengan sudut aliran

Setelah nilai dari faktor reduksi didapat dari grafik diatas, maka parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan *response model* dapat dilihat pada Tabel 4.53 berikut.

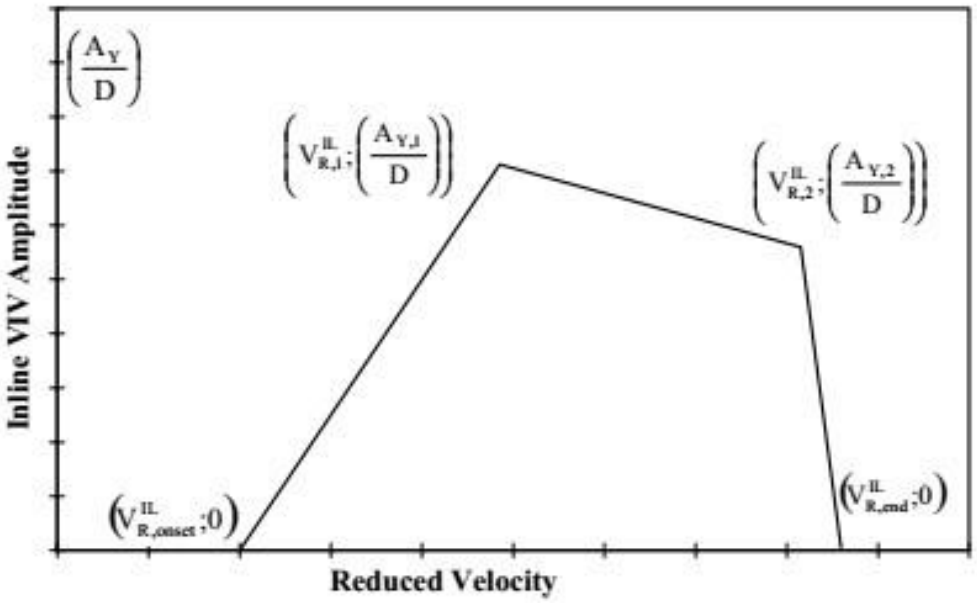
Tabel 4. 53 Parameter Perhitungan *Response Model*

Parameter Perhitungan *Response Model*			
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Stability Parameter Factor	K_{sd}	0.37	-
Intensitas Turbulensi	Ic	0.12	-
Safety Factor Onset In-Line	† on,IL	1.1	-
Safety Factor Onset Cross-Flow	† on,CF	1.2	-
Reduction Factor 1	$R_{I\theta,1}$	0.86	-
Reduction Factor 2	$R_{I\theta,2}$	0.47	-

Dari parameter diatas, maka nilai *stress amplitude ratio* dan nilai setiap *reduced velocity* pada kondisi *in-line* maupun *cross-flow* didapatkan.

A. *In-Line Response Model*

Respon amplitudo utamanya tergantung pada *reduced velocity*, *stability parameter*, *turbulency intensity*, sudut aliran *relative* pada pipa. *In-Line* VIV menyebabkan rentang tegangan dengan konstruksi nilai *reduced velocity* pada gambar berikut:



Gambar 4. 15 Prinsip Umum *Response Model In-Line*

Dengan *response model* dapat dikonstruksi dengan menggunakan koordinat parameter pada Tabel 4.54 berikut.

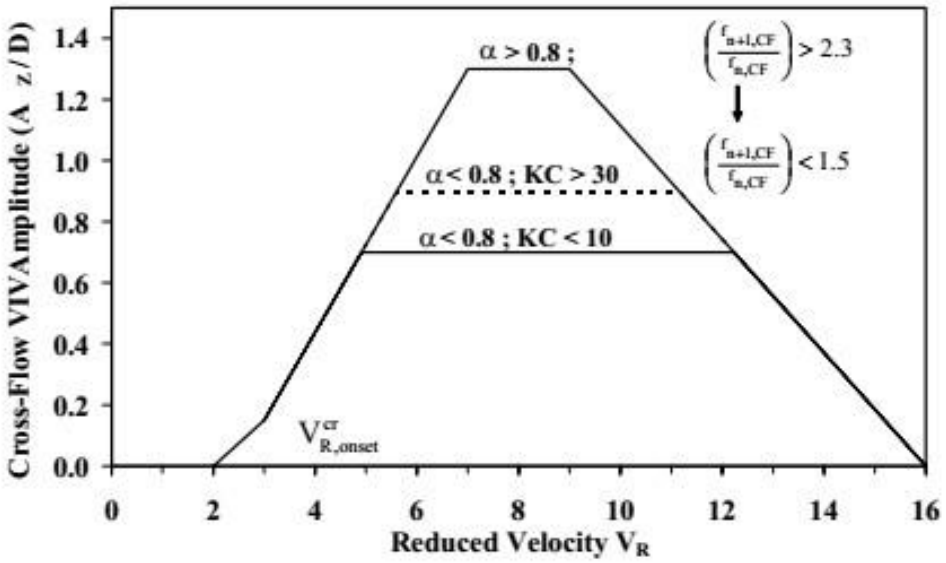
Tabel 4. 54 Parameter *Response Model In-Line*

Parameter *Response Model*	
Parameter	**Nilai**
$\frac{A_{y,1}}{D}$	0.049
$\frac{A_{y,2}}{D}$	0.049
$V_{r,onset}^{IL}$	0,90
$V_{r,1}^{IL}$	1.98
$V_{r,2}^{IL}$	4.11
$V_{r,end}^{IL}$	4.20

B. *Cross-Flow Response Model*

Cross-flow VIV disebabkan oleh beberapa parameter seperti *reduced velocity*, *Keulegan-Carpenter number*, rasio *current flow*, *stability parameter*, rasio *gap* dasar laut, *Strouhal number*, kekasaran pipa dan lain-lain.

Untuk situasi aliran yang didominasi arus *steady*, *onset* dari *cross-flow* VIV untuk amplitudo signifikan terjadi secara tipikal pada nilai signifikan amplitude VR antara 3.0 dan 4.0, dimana level getaran maksimum terjadi pada nilai terbesar Vr. Untuk pipa dengan massa spesifik rendah, getaran cross-flow dimulai pada VR antara 2 dan 3. *Crossflow* VIV menyebabkan rentang tegangan dengan konstruksi nilai *reduced velocity onset* pada Gambar 4.16 berikut.



Gambar 4.16 Prinsip Umum *Response Model Cross-Flow*

Respon amplitude sebagai fungsi dari *current flow ratio* dan KC dengan *response model* dapat dikonstruksi dengan menggunakan koordinat parameter yang ditampilkan dalam Tabel 4.55 berikut.

Tabel 4. 55 Parameter *Response Model Cross-Flow*

Parameter *Response Model*	
Parameter	**Nilai**
$\frac{A_{z,1}}{D}$	0.9
$\frac{A_{z,2}}{D}$	0.9
$V_{r,onset}^{CF}$	2,5
$V_{r,1}^{CF}$	5,4
$V_{r,2}^{CF}$	11.15
$V_{r,end}^{CF}$	16

4.15 Perhitungan Umur Kelelahan Pipa

Analisis umur kelelahan dalam studi kasus Tugas akhir ini mengacu pada DNV GL RP F 105 dan DNV RP C 203. Perhitungan fatigue damage pada tiap tiap bentangan menggunakan komponen stress range yang akan menjadi parameter dari nilai siklus pada pipa yang mengalami getaran dinamis VIV. Panjang bentangan yang telah diseleksi dan memenuhi kriteria fatigue akan dianalisis berapa umur kelelahannya.

4.15.1 Perhitungan Unit Stress Amplitude

Nilai *Unit Stress Amplitude* berhubungan erat dengan nilai stress range untuk tiap tiap arah (arah *in- line* atau *cross-flow*). Berikut parameter yang digunakan untuk perhitungan nilai *Unit Stress Amplitude* ditampilkan pada Tabel 4.56.

Tabel 4.56 Parameter Perhitungan Unit Stress Amplitude

Parameter	Notasi	Nilai
C4	C4	14,1
Diameter total	Dt	0,57
Diameter pipa	OD	0,46
modulus young baja	E	2,07E+11
wall thickness	t	0,02
Concrete Stiffness Factor	CSF	0,228
Safety Factor for Fatigue	γs	1,3

Di bawah ini adalah hasil perhitungan *unit stress amplitude* dalam kondisi *in-line* dan *crossflow* ditampilkan pada Tabel 4.57.

Tabel 4.57 Perhitungan *Unit Stress Amplitude*

In-Line		
Panjang Span	L kritis	*Unit Stress Amlitude*
44,000	23,675	1,60E+09
39,000	26,811	1,25E+09
40,000	26,122	1,32E+09
42,000	24,841	1,46E+09
36,000	28,511	1,11E+09
36,000	28,511	1,11E+09
37,000	28,129	1,14E+09
38,000	27,536	1,19E+09
39,000	26,476	1,28E+09
37,000	28,299	1,12E+09
43,000	24,230	1,53E+09
42,000	24,841	1,46E+09
39,000	26,476	1,28E+09
40,000	25,796	1,35E+09
36,000	28,512	1,11E+09
38,000	26,706	1,26E+09
37,000	28,299	1,12E+09
36,000	28,929	1,07E+09
36,000	29,087	1,06E+09
36,000	29,105	1,06E+09
39,000	26,811	1,25E+09
37,000	28,300	1,12E+09
36,000	28,512	1,11E+09
37,000	28,300	1,12E+09

Cross Flow		
Panjang Span	L kritis	*Unit Stress Amplitude*
44,000	23,753	1,6,E+09
39,000	26,843	1,2,E+09
40,000	26,161	1,3,E+09
42,000	24,897	1,5,E+09
36,000	28,529	1,1,E+09
36,000	28,529	1,1,E+09
37,000	28,151	1,1,E+09
38,000	27,562	1,2,E+09
39,000	26,508	1,3,E+09
37,000	28,321	1,1,E+09
43,000	24,297	1,5,E+09
42,000	24,897	1,5,E+09
39,000	26,508	1,3,E+09
40,000	25,834	1,3,E+09
36,000	28,529	1,1,E+09
38,000	26,732	1,3,E+09
37,000	28,321	1,1,E+09
36,000	28,947	1,1,E+09
36,000	29,105	1,1,E+09
36,000	29,122	1,1,E+09
39,000	26,843	1,2,E+09
37,000	28,321	1,1,E+09
36,000	28,529	1,1,E+09
37,000	28,321	1,1,E+09

Dari perhitungan disimpulkan bahwa semakin panjang bentangannya maka semakin besar juga *unit stress amplitude*. Hasil *stress amplitude* memengaruhi untuk besar *stress range*.

4.15.2 Perhitungan *Stress Range*

Perhitungan *Stress Range* berkaitan erat dengan nilai *unit stress amplitude*, faktor koreksi damping, dan faktor koreksi *current flow ratio*. *Stress range* tersebut nantinya akan digunakan untuk menentukan siklus tegangan. Tabel 4.58 dan Tabel 4.59 menampilkan hasil perhitungan *stress range* untuk kondisi *in-line* dan *crossflow*.

Tabel 4.58 Hasil *Stress Range* Kondisi *In-line*

In-Line							
Panjang Span	L effektif	*Unit Stress Amplitude*	Ay/D	*r*	ΨIL	*Stress Range*	*Stress Range* (Mpa)
44	23,675	1,60E+09	0,0486	0,99	1	2,03E+08	202,55
39	26,811	1,25E+09	0,0486	0,99	1	1,58E+08	157,95
40	26,122	1,32E+09	0,0486	0,99	1	1,66E+08	166,39
42	24,841	1,46E+09	0,0486	0,99	1	1,84E+08	184,00
36	28,511	1,11E+09	0,0480	0,99	1	1,38E+08	138,16
36	28,511	1,11E+09	0,0480	0,99	1	1,38E+08	138,16
37	28,129	1,14E+09	0,0484	0,99	1	1,43E+08	143,05
38	27,536	1,19E+09	0,0486	0,99	1	1,50E+08	149,75
39	26,476	1,28E+09	0,0483	0,99	1	1,61E+08	160,91
37	28,299	1,12E+09	0,0486	0,99	1	1,42E+08	141,77
43	24,230	1,53E+09	0,0486	0,99	1	1,93E+08	193,33
42	24,841	1,46E+09	0,0486	0,99	1	1,84E+08	183,99
39	26,476	1,28E+09	0,0483	0,99	1	1,61E+08	160,90
40	25,796	1,35E+09	0,0483	0,99	1	1,70E+08	169,50
36	28,512	1,11E+09	0,0480	0,99	1	1,38E+08	138,15
38	26,706	1,26E+09	0,0478	0,99	1	1,57E+08	156,60

Tabel 4.58 Hasil *Stress Range* Kondisi *In-line* (Lanjutan)

In-Line							
Panjang Span (m)	Panjang Span Kritis (m)	AIL	Ay/D	r	ΨIL	SIL	SIL (Mpa)
37	28,299	1,12E+09	0,0486	0,99	1	1,42E+08	141,77
36	28,929	1,07E+09	0,0484	0,99	1	1,35E+08	135,24
36	29,087	1,06E+09	0,0486	0,99	1	1,34E+08	134,15
36	29,105	1,06E+09	0,0486	0,99	1	1,34E+08	134,03
39	26,811	1,25E+09	0,0486	0,99	1	1,58E+08	157,94
37	28,300	1,12E+09	0,0486	0,99	1	1,42E+08	141,77
36	28,512	1,11E+09	0,0480	0,99	1	1,38E+08	138,15
37	28,300	1,12E+09	0,0486	0,99	1	1,42E+08	141,77

Tabel 4.59 Hasil *Sress Range* Kondisi *Crossflow*

Cross Flow							
Panjang Span (m)	Panjang Span Kritis (m)	ACF	Az/D	Ksd	Rk	*Stress Range*	*Stress Range* (Mpa)
44	23,753	1,59E+09	0,0800	0,37	0,816	2,70E+08	270,26
39	26,843	1,25E+09	0,0800	0,37	0,816	2,12E+08	211,63
40	26,161	1,31E+09	0,0800	0,37	0,816	2,23E+08	222,81
42	24,897	1,45E+09	0,0800	0,37	0,816	2,46E+08	246,01
36	28,529	1,10E+09	0,0600	0,38	0,808	1,39E+08	139,18
36	28,529	1,10E+09	0,0600	0,38	0,808	1,39E+08	139,18
37	28,151	1,13E+09	0,0700	0,37	0,813	1,68E+08	167,91
38	27,562	1,18E+09	0,0800	0,37	0,816	2,01E+08	200,73
39	26,508	1,28E+09	0,0700	0,38	0,811	1,89E+08	188,80
37	28,321	1,12E+09	0,0800	0,37	0,816	1,90E+08	190,12
43	24,297	1,52E+09	0,0800	0,37	0,815	2,58E+08	258,25
42	24,897	1,45E+09	0,0800	0,37	0,816	2,46E+08	246,01
39	26,508	1,28E+09	0,0700	0,38	0,811	1,89E+08	188,80
40	25,834	1,35E+09	0,0700	0,38	0,811	1,99E+08	198,78
36	28,529	1,10E+09	0,0600	0,38	0,808	1,39E+08	139,18

Tabel 4.59 Hasil *Sress Range* Kondisi *Crossflow* (Lanjutan)

Cross Flow							
Panjang Span (m)	Panjang Span Kritis (m)	ACF	Az/D	Ksd	Rk	SCF	SCF (Mpa)
38	26,732	1,26E+09	0,0500	0,39	0,804	1,31E+08	131,47
37	28,321	1,12E+09	0,0800	0,37	0,816	1,90E+08	190,12
36	28,947	1,07E+09	0,0700	0,37	0,813	1,59E+08	158,80
36	29,105	1,06E+09	0,0800	0,37	0,815	1,80E+08	179,96
36	29,122	1,06E+09	0,0800	0,37	0,816	1,80E+08	179,80
39	26,843	1,25E+09	0,0800	0,37	0,816	2,12E+08	211,63
37	28,321	1,12E+09	0,0800	0,37	0,816	1,90E+08	190,12
36	28,529	1,10E+09	0,0600	0,38	0,808	1,39E+08	139,18
37	28,321	1,12E+09	0,0700	0,37	0,816	1,66E+08	166,35

4.15.3 Perhitungan Siklus Tegangan dan VIV

Langkah pertama adalah menghitung jumlah siklus selama masa operasi pipeline dengan menggunakan frekuensi vortex shedding yang menyebabkan pipa mengalami VIV. Kemudian dari hasil tersebut dikalikan dengan jumlah kejadian berdasarkan data arus di daerah West Madura. Data jumlah kejadian arus pada studi kasus Tugas Akhir ini menggunakan data lingkungan Terang Sirasun Batur *Field* . Tabel 4.60 menampilkan data kejadian arus.

Tabel 4.60 Data Kejadian Arus

No	Arah	0.01 - 0.05 (m/s)	0.05 - 0.1 (m/s)	0.1 - 0.5 (m/s)	0.5 - 1 (m/s)	1 - 1.5 (m/s)	1.5 - 2 (m/s)	2 - 3 (m/s)	>= 3 (m/s)	Total (%)
1	Utara (337.5° - 22.5°)	0	0.62	6.87	0	0	0	0	0	7.5
2	Timur Laut (22.5° - 67.5°)	0	1.87	17.5	3.12	1.87	0.62	0.62	0	25.62
3	Timur (67.5° - 112.5°)	0	0.62	1.25	0	0	0	0	0	1.87
4	Tenggara (112.5° - 157.5°)	0.62	1.87	1.87	0	0	0	0	0	4.37
5	Selatan (157.5°-202.5°)	0	2.5	5	1.25	0	0	0	0	8.75
6	Barat Daya (202.5°-247.5°)	0.62	0.62	18.12	5.62	1.87	3.75	0	0	30.62
7	Barat (247.5°-292.5°)	1.87	0.62	9.37	3.12	0	0	0	0	15
8	Barat Laut (292.5°-337.5°)	0.62	2.5	3.12	0	0	0	0	0	6.25
	Sub-Total	3.75	11.25	63.12	13.12	3.7	4.37	0.62	0	100
	Calm									0
	Total									100

Setelah mendapat peluang kejadian dari kecepatan arus untuk setiap arah, maka selanjutnya data tersebut dikonversi sehingga menghasilkan jumlah kejadian dari siklus arus tersebut yang nantinya akan digunakan untuk mengetahui siklus kejadian VIV. Tabel 4.61 berikut menampilkan jumlah kejadian dari siklus arus dengan interval satu detik (total kejadian = 31536000 siklus).

Tabel 4.61 Jumlah Kejadian dari Kecepatan Arus

Arah	Utara	Timur Laut	Timur	Tenggara	Selatan	Barat Daya	Barat	Barat Laut	Sub Total
0,01-0,05	0	0	0	195523	0	195523,2	589723	195523	1182600
0,05-0,1	195523	589723,2	195523	589723	788400	195523,2	195523	788400	3547800
0,1-0,5	2166523	5518800	394200	589723	1576800	5714323,2	2954923	983923	2E+07
0,5-1	0	983923,2	0	0	394200	1772323,2	983923	0	4137523
1-1,5	0	589723,2	0	0	0	589723,2	0	0	1166832
1,5-2	0	195523,2	0	0	0	1182600	0	0	1378123
02-Mar	0	195523,2	0	0	0	0	0	0	195523
>=3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	2365200	8079523,2	589723	1378123	2759400	9656323,2	4730400	1971000	**3,2E+07**

Dari Tabel 4.58 diatas, maka didapatkan jumlah siklus kecepatan arus yang digunakan sebesar 195523,2. Nilai tersebut digunakan karena dari arah barat daya arus paling banyak yang mengenai pipa. Setelah itu dilakukan perhitungan untuk mendapatkan siklus kejadian VIV yang dipengaruhi oleh frekuensi *Vortex Shedding.* Pada Tabel 4.62 dan Tabel 4.63 ditampilkan hasil siklus kejadian arus yang mengenai pipa.

Tabel 4.62 Hasil Siklus Kejadian Arus yang Mengenai Pipa Kondisi *In-line* (n)

Panjang Span	Strouhal Number	Frekuensi *Vortex Shedding*	Jumlah Siklus (n)
44,00	0,261	0,389	7,60E+04
39,00	0,261	0,391	7,64E+04
40,00	0,261	0,389	7,60E+04
42,00	0,261	0,361	7,06E+04
36,00	0,261	0,350	6,85E+04
36,00	0,261	0,350	6,85E+04
37,00	0,261	0,356	6,96E+04
38,00	0,261	0,363	7,10E+04
39,00	0,261	0,353	6,91E+04
37,00	0,261	0,367	7,18E+04
43,00	0,261	0,359	7,01E+04
42,00	0,261	0,373	7,29E+04
39,00	0,261	0,403	7,89E+04
40,00	0,261	0,403	7,89E+04
36,00	0,261	0,400	7,83E+04
38,00	0,261	0,397	7,77E+04
37,00	0,261	0,413	8,08E+04
36,00	0,261	0,406	7,94E+04
36,00	0,261	0,409	7,99E+04
36,00	0,261	0,411	8,04E+04

Tabel 4.62 Hasil Siklus Kejadian Arus yang Mengenai Pipa Kondisi *In-line* (n) (Lanjutan)

Panjang Span (m)	Strouhal Number	Frekuensi Vortex SHedding	Jumlah Siklus
		fs	n
39,00	0,261	0,411	8,04E+04
37,00	0,261	0,441	8,62E+04
36,00	0,261	0,400	7,83E+04
37,00	0,261	0,435	8,50E+04

Tabel 4.63 Hasil Siklus Kejadian Arus yang Mengenai Pipa Kondisi *Crossflow* (n)

Panjang Span	Strouhal Number	Frekuensi *Vortex Shedding*	Jumlah Siklus (n)
44,00	0,261	0,389	7,60E+04
39,00	0,261	0,391	7,64E+04
40,00	0,261	0,389	7,60E+04
42,00	0,261	0,361	7,06E+04
36,00	0,261	0,350	6,85E+04
36,00	0,261	0,350	6,85E+04
37,00	0,261	0,356	6,96E+04
38,00	0,261	0,363	7,10E+04
39,00	0,261	0,353	6,91E+04
37,00	0,261	0,367	7,18E+04
43,00	0,261	0,359	7,01E+04
42,00	0,261	0,373	7,29E+04
39,00	0,261	0,403	7,89E+04
40,00	0,261	0,403	7,89E+04
36,00	0,261	0,400	7,83E+04
38,00	0,261	0,397	7,77E+04
37,00	0,261	0,413	8,08E+04
36,00	0,261	0,406	7,94E+04

Tabel 4.63 Hasil Siklus Kejadian Arus yang Mengenai Pipa Kondisi *Crossflow* (n) (Lanjutan)

Panjang Span	Strouhal Number	Frekuensi *Vortex Shedding*	Jumlah Siklus (n)
36,00	0,261	0,409	7,99E+04
36,00	0,261	0,411	8,04E+04
39,00	0,261	0,411	8,04E+04
37,00	0,261	0,441	8,62E+04
36,00	0,261	0,400	7,83E+04
37,00	0,261	0,435	8,50E+04

Setelah didapatkan jumlah kejadian siklus arus, maka selanjutnya menentukan kategori kurva S-N pada kode DNV RP C203 yang mendekati kriteria struktur. Penentuan kategori kurva SN struktur yang digunakan dalam analisis *fatigue* dan disesuaiakan dalam Tabel A.9 kode DNV RP – C 203. Dalam table tersebut mengklasifikasikan detail struktur *tubular*, karena struktur pada Tugas Akhir ini adalah pipa.

Kemudian menentukan jumlah nilai siklus tegangan struktur dan nilai siklus tegangan menuju kegagalan pada *stress range*. Pada perkiraan jumlah siklus tegangan pada struktur biasanya terjadi sekitar 2% - 10% dari nilai siklus terjadi. Tabel 4.64 menjelaskan parameter S-N *Curve* dari Jenis S-N *Curve* D.

Tabel 4. 64 Parameter *S-N Curve*

Parameter	Notasi	Nilai
Eksponen S-N Curve	m	3
S-N Curve Jenis Pipa	-	D
Log A	-	11,764

Selanjutnya pada Tabel 4.65 dan Tabel 4.66 menampilkan hasil untuk siklus tegangan yaitu N.

Tabel 4.65 Hasil Jumlah Siklus Tegangan Pipa Kondisi *In-Line* (N)

Panjang Span (m)	Tegangan Si	n	A Log A	m	Ni
44,00	202,55	7,60E+04	5,08E+10	3	6,11E+03
39,00	157,95	7,64E+04	5,08E+10	3	1,29E+04
40,00	166,39	7,60E+04	5,08E+10	3	1,10E+04
42,00	184,00	7,06E+04	5,08E+10	3	8,15E+03
36,00	138,16	6,85E+04	5,08E+10	3	1,92E+04
36,00	138,16	6,85E+04	5,08E+10	3	1,92E+04
37,00	143,05	6,96E+04	5,08E+10	3	1,73E+04
38,00	149,75	7,10E+04	5,08E+10	3	1,51E+04
39,00	160,91	6,91E+04	5,08E+10	3	1,22E+04
37,00	141,77	7,18E+04	5,08E+10	3	1,78E+04
43,00	193,33	7,01E+04	5,08E+10	3	7,03E+03
42,00	183,99	7,29E+04	5,08E+10	3	8,15E+03
39,00	160,90	7,89E+04	5,08E+10	3	1,22E+04
40,00	169,50	7,89E+04	5,08E+10	3	1,04E+04
36,00	138,15	7,83E+04	5,08E+10	3	1,93E+04
38,00	156,60	7,77E+04	5,08E+10	3	1,32E+04
37,00	141,77	8,08E+04	5,08E+10	3	1,78E+04
36,00	135,24	7,94E+04	5,08E+10	3	2,05E+04
36,00	134,15	7,99E+04	5,08E+10	3	2,10E+04
36,00	134,03	8,04E+04	5,08E+10	3	2,11E+04
39,00	157,94	8,04E+04	5,08E+10	3	1,29E+04
37,00	141,77	8,62E+04	5,08E+10	3	1,78E+04
36,00	138,15	7,83E+04	5,08E+10	3	1,93E+04
37,00	141,77	8,50E+04	5,08E+10	3	1,78E+04

Tabel 4.66 Hasil Jumlah Siklus Tegangan Pipa Kondisi *Crossflow* (N)

Panjang Span (m)	Tegangan Scf	n	A Log A	m	Ni
44,00	270,26	7,60E+04	5,08E+10	3	2,57E+03
39,00	211,63	7,64E+04	5,08E+10	3	5,36E+03
40,00	222,81	7,60E+04	5,08E+10	3	4,59E+03
42,00	246,01	7,06E+04	5,08E+10	3	3,41E+03
36,00	139,18	6,85E+04	5,08E+10	3	1,88E+04
36,00	139,18	6,85E+04	5,08E+10	3	1,88E+04
37,00	167,91	6,96E+04	5,08E+10	3	1,07E+04
38,00	200,73	7,10E+04	5,08E+10	3	6,28E+03
39,00	188,80	6,91E+04	5,08E+10	3	7,54E+03
37,00	190,12	7,18E+04	5,08E+10	3	7,39E+03
43,00	258,25	7,01E+04	5,08E+10	3	2,95E+03
42,00	246,01	7,29E+04	5,08E+10	3	3,41E+03
39,00	188,80	7,89E+04	5,08E+10	3	7,54E+03
40,00	198,78	7,89E+04	5,08E+10	3	6,46E+03
36,00	139,18	7,83E+04	5,08E+10	3	1,88E+04
38,00	131,47	7,77E+04	5,08E+10	3	2,23E+04
37,00	190,12	8,08E+04	5,08E+10	3	7,39E+03
36,00	158,80	7,94E+04	5,08E+10	3	1,27E+04
36,00	179,96	7,99E+04	5,08E+10	3	8,71E+03
36,00	179,80	8,04E+04	5,08E+10	3	8,73E+03
39,00	211,63	8,04E+04	5,08E+10	3	5,36E+03
37,00	190,12	8,62E+04	5,08E+10	3	7,39E+03
36,00	139,18	7,83E+04	5,08E+10	3	1,88E+04
37,00	166,35	8,50E+04	5,08E+10	3	1,10E+04

4.15.4 Perhitungan *Fatigue Life*

Langkah berikutnya adalah menghitung *fatigue damage.* Didalam DNV RP C 203 *fatigue damage* diperoleh dari pembagian antara nilai jumlah siklus yang terjadi dengan jumlah siklus kegagalan tegangan pada pipa. Setelah mendapatkan nilai dari *fatigue damage*, maka langkah terakhir dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah menghitung umur kelelahan pada tiap - tiap panjang bentangan aktual pipa dalam kondisi *In-line* dan *crossflo.* Hasil perhitungan *fatigue damage dan fatigue life* ditampilkan pada Tabel 4.67 dan Tabel 4.68.

Tabel 4.67 Hasil Perhitungan *Fatigue Damage* dan *Fatigue Life* Kondisi *In-line*

Panjang Span (m)	n	Ni	Fatigue Damage	Fatigue Life
				Tahun
44,00	7,60E+04	6,11E+03	12,4	1,6
39,00	7,64E+04	1,29E+04	5,9	3,4
40,00	7,60E+04	1,10E+04	6,9	2,9
42,00	7,06E+04	8,15E+03	8,7	2,3
36,00	6,85E+04	1,92E+04	3,6	5,6
36,00	6,85E+04	1,92E+04	3,6	5,6
37,00	6,96E+04	1,73E+04	4,0	5,0
38,00	7,10E+04	1,51E+04	4,7	4,3
39,00	6,91E+04	1,22E+04	5,7	3,5
37,00	7,18E+04	1,78E+04	4,0	5,0
43,00	7,01E+04	7,03E+03	10,0	2,0
42,00	7,29E+04	8,15E+03	8,9	2,2
39,00	7,89E+04	1,22E+04	6,5	3,1
40,00	7,89E+04	1,04E+04	7,6	2,6
36,00	7,83E+04	1,93E+04	4,1	4,9
38,00	7,77E+04	1,32E+04	5,9	3,4

Tabel 4.67 Hasil Perhitungan *Fatigue Damage* dan *Fatigue Life* Kondisi *In-line* (Lanjutan)

Panjang Span (m)	n	Ni	Fatigue Damage	Fatigue Life (Tahun)
37,00	8,08E+04	1,78E+04	4,5	4,4
36,00	7,94E+04	2,05E+04	3,9	5,2
36,00	7,99E+04	2,10E+04	3,8	5,3
36,00	8,04E+04	2,11E+04	3,8	5,2
39,00	8,04E+04	1,29E+04	6,2	3,2
37,00	8,62E+04	1,78E+04	4,8	4,1
36,00	7,83E+04	1,93E+04	4,1	4,9
37,00	8,50E+04	1,78E+04	4,8	4,2

Tabel 4.68 Hasil Perhitungan *Fatigue Damage* dan *Fatigue Life* Kondisi *Crossflow*

Panjang Span (m)	n	Ni	Fatigue Damage	Fatigue Life Tahun
44,00	7,60E+04	2,57E+03	29,6	0,68
39,00	7,64E+04	5,36E+03	14,3	1,40
40,00	7,60E+04	4,59E+03	16,6	1,21
42,00	7,06E+04	3,41E+03	20,7	0,97
36,00	6,85E+04	1,88E+04	3,6	5,50
36,00	6,85E+04	1,88E+04	3,6	5,50

Tabel 4.68 Hasil Perhitungan *Fatigue Damage* dan *Fatigue Life* Kondisi *Crossflow* (Lanjutan)

Panjang Span (m)	n	Ni	Fatigue Damage	Fatigue Life
				Tahun
37,00	6,96E+04	1,07E+04	6,5	3,08
38,00	7,10E+04	6,28E+03	11,3	1,77
39,00	6,91E+04	7,54E+03	9,2	2,18
37,00	7,18E+04	7,39E+03	9,7	2,06
43,00	7,01E+04	2,95E+03	23,8	0,84
42,00	7,29E+04	3,41E+03	21,4	0,94
39,00	7,89E+04	7,54E+03	10,5	1,91
40,00	7,89E+04	6,46E+03	12,2	1,64
36,00	7,83E+04	1,88E+04	4,2	4,81
38,00	7,77E+04	2,23E+04	3,5	5,75
37,00	8,08E+04	7,39E+03	10,9	1,83
36,00	7,94E+04	1,27E+04	6,3	3,19
36,00	7,99E+04	8,71E+03	9,2	2,18
36,00	8,04E+04	8,73E+03	9,2	2,17
39,00	8,04E+04	5,36E+03	15,0	1,33
37,00	8,62E+04	7,39E+03	11,7	1,71
36,00	7,83E+04	1,88E+04	4,2	4,81
37,00	8,50E+04	1,10E+04	7,7	2,59

Dari perhitungan diatas, maka dapat disimpulkan *fatigue damage* melebihi 1 dan dinyatakan tidak aman atau gagal. Selaras dengan *fatigue damage*, umur kelelahan tersebut tidak berada pada batas aman karena kurang dari 20 tahun.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Hasil perhitungan nilai tegangan ekuivalen (Von Mises) yang diperoleh pada setiap span yang ditinjau untuk 24 bentangan bebas dipatatkan *range* tegangan sebesar 161,14 MPa – 189,41 MPa. Untuk nilai tegangan ekuivalen terbesar, terjadi pada span dengan panjang aktual 44 m dengan gap 1,4 m sebesar 189,41 MPa dengan rasio 0,47 terhadap tegangan ijin yang ditentukan oleh ASME B3.18. Dan nilai tegangan ekuivalen terkecil terjadi pada dua bentangan bebas dengan panjang aktual 36 m dengan gap 0,3 m sebesar 161,14 MPa dengan rasio 0,4 terhadap Allowable stress ASME B3.18.

2. Berdasarkan hasil perhitungan frekuensi natural, didapatkan bahwa hubungan antara panjang bentangan pipa dengan frekuensi natural pipa dalam kondisi *in-line* maupun *cross-flow*, hasil menunjukkan bahwa pada panjang span terkecil memiliki frekuensi natural pipa yang besar, dan sebaliknya. Contohnya pada bentangan sepanjang 44 m didapatkan nilai frekuensi natural sebesar 0,8 Hz, sedangkan bentangan sepanjang 36 m nilai yang didapatkan sebesar 1,2 Hz. Hasil perhitungan frekuensi natural dapat dilihat pada Tabel 4.45 dan Tabel 4.46.

3. Berdasarkan analisis umur kelelahan yang telah dilakukan, semua bentangan bebas pada data yang diperoleh mengalami kegagalan secara *in-line* dan *crossflow*. Hasil didapatkan semua bentangan mendapatkan *fatigue damage* melebihi 1 yang berarti mengalami kegagalan. Ketika mendapatkan hasil *fatigue life*, semua bentangan mendapatkan *fatigue life* di bawah 20 Tahun yang berarti pipa sudah tidak aman untuk beroperasi dan harus dilakukan *maintenance.* Hasil

dapat dilihat pada Tabel 4.64 dan Tabel 4.65. Bentangan bebas terpanjang yaitu 44 meter untuk arah *in-line fatigue life*-nya sebesar 1,6 Tahun sedang untuk bentangan terpendek yaitu 36 meter untuk arah *in-line fatigue life*-nya sebesar 5,6 Tahun. Untuk arah *crossflow* bentangan bebas 44 meter *fatigue life*-nya 0,68 Tahun, sedangkan untuk bentangan bebas 36 meter *fatigue life*-nya 5,5 Tahun. Semua bentangan disimpulkan gagal dan harus ditambahkan *support.*

5.2 Saran

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, terdapat beberapa kekurangan di dalamnya, sehingga dapat menjadi penelitian lanjutan kedepannya. Adapun saran yang dapat diberikan sebagai masukan dalam peneltian lanjutan kedepannya antara lain :

1. Perlu ditambahkannya *support* untuk menunjang pipa saat masa operasi agar tidak terjadi kegagalan.
2. Perlu dilakukan validasi perhitungan menggunakan *software* untuk lebih memastikan hasil perhitungan yang didapat.
3. Analisis bentangan bebas dapat dilakukan kembali dengan menambahkan analisis pada *freespan* dengan mempertimbangkan scouring dan beban gempa.
4. Perlu dilakukan analisis *fatigue* menggunakan *software* FATFREE.

DAFTAR PUSTAKA

Affandi, A. 2019. **Analisis Tegangan dan Kelelahan Akibat Pengaruh *Vortex Induced Vibration* (VIV) yang Terjadi Pada *Crossing Pipelines :* Studi Kasus *Platform* B1C KCOM Pertamina Hulu Energi *Offshore North West Java*.** Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan –FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember; Surabaya.

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. Jurusan Teknik Kelautan –FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember; Surabaya.

Aji, J.H. 2014. **Analisa *Free Span* pada Pipa Bawah Laut di Selat Sunda Terhadap Beban Gempa**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Al Amin. M.R. **Analisa Stabilitas *On-Bottom* Pipa Bawah Laut : Studi Kasus Pipa APNE-A PT. Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Bai, Y. dan Qiang, B. 2001. **Subsea Pipelines and Risers**. New York: Elsevier.

Det Norske Veritas. 2005 **DNV-RP-C203**. **Fatigue Design Of Offshore Steel Structure**. Norway.

Det Norske Veritas. 2002. **DNV-RP-F105**. **Free *Span*ning Pipelines**. Norway.

Fathurozi, M. 2016**. Analisa Tegangan Pipa saat *Pulling* pada Instalasi *Pipeline* dengan Metode *Push Pull : Project PT*. Dwisatu Mustika BUmi (DMB)**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Kriswidiatnto, O. 2013. **Analisa *on Bottom Stability* Pipa Bawah Laut pada Kondisi *Sloping Seabed***. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Mouselli, A. H. 1981. **Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods**. Tulsa: PennWell Books.

Pratama, D. A. 2007. **Analisis Free *Span* Pipa Bawah Laut Dan *Span* Remediation**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTSL, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

Purnama, A. 2007. **Analisa Tegangan Pipa Bawah Laut pada Proses Instalasi Akibat Gerakan *Lay Barge* dengan Metode S-Lay**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Purnamasari, D.N. 2010. **Studi Keandalan *Free Span* pada Pipa Bawah Laut dengan Adanya Fenomena Vortex Induced Vibration**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Putra, S.A., 2011, **Studi Kasus Pengaruh *Vortex Induced Vibration* Pada *Freespan* Pipa Pertamina Hulu Energi-Offshore North West Java**. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITS, Surabaya, Indonesia.

Ramadhan, R.O. 2014**. Analisa Tegangan Pipeline Terhadap *Fix Stinger* pada saat Instalasi Di Laut Dangkal Area TN-DX62r**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Rizaldy, A.C.M. 2011**. Analisa Buckling pada Saat Instalasi Pipa Bawah Laut : Studi Kasus Saluran Pipa Baru Karmila Titi Milik CNOOC di Offshore South East Sumatera**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Silalahih, I.H. 2010. **Analisa Instalasi Baru Pipa Penyalur BBM Bawah Laut Milik PT. Pertamina Semarang**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

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

Susetyo, H. 2016. **Analisa *Local Buckling* pada *Free Span* Pipa Bawah Laut 20' Di Sangatta, Kalimantan Timur**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

(Halaman sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN A

PERHITUNGAN DIMENSI, MASSA EFEKTIF DAN BERAT PIPA TERENDAM

LAMPIRAN A

A.1 Perhitungan Dimensi Pipa

1. Diameter Dalam Pipa (Di) $D_i = D_0 - 2(t_{nom} + t_{int})$

   $= 0{,}3556 - 2\ (0{,}0143)$ $= 0{,}417$ m

2. Diameter Total Pipa (Dt)

   $D_t = D_0 + 2t_{cc} + 2t_{conc} + 2t_{mg}$

   $= 0{,}3556 + 2(0{,}051) + 2(0{,}006)$ $= 0{,}565$ m

3. Diameter Lapisan Anti Korosi (Dcc)

   $D_{cc} = D_0 + 2.t_{cc}$

   $= 0{,}3556 + 2(0{,}006)$ $= 0{,}465$ m

4. Diameter Lapisan *Concrete* (Dconc)

   $D_{conc} = D_0 + 2(t_{cc} + t_{conc})$

   $= 0{,}3556 + 2\ (0{,}006 + 0{,}05)$ $= 0{,}565$ m

5. Luas Internal Pipa (Ai)

   $A_i = \pi^{(D_i^2)/4}$

   $= 3{,}14 \times 0{,}327 / 4$ $= 0{,}2234\ m^2$

6. Luas Pipa Lapisan Baja (Ast)

   $A_{st} = \pi \frac{(D0^2 - D_i^2)}{4}$

   $= (3{,}14/4) \times (0{,}3556 - 0{,}327)$ $= 0{,}0274\ m^2$

7. Luas Pipa Lapisan Anti Korosi (Acc)

   $A_{cc} = \pi \frac{(Dcc^2)}{4} - A_{st} - A_i$

   $= (3{,}14/4 \times 0{,}366) - 0{,}084 - 0{,}015$ $= 0{,}007\ m^2$

8. Luas Pipa Lapisan Concrete (Aconc)

   $A_{conc} = \pi \frac{(Dcc^2)}{4} - A_{st} - A_i - A_{cc}$

   $= (3{,}14/4 \times 0{,}366) - 0{,}015 - 0{,}084 - 0{,}007 = 0{,}0979$ m

A.2 Perhitungan Massa Efektif dan Berat Pipa Terendam

1. Perhitungan Massa Pipa di Udara

a. Massa Struktur Pipa Baja (Mst)

$$m_{st} = A_{st} \, x \, \rho_{st}$$

$$= 0{,}015 \text{ x } 7850 \qquad = 221{,}59 \text{ Kg/m}$$

b. Massa Lapisan Pipa Anti Korosi (Mcc)

$$m_{cc} = \pi \frac{(Dcc^2 - D0^2)}{4} \rho_{cc}$$

$$= 0{,}007 \text{ x } 1300 \qquad = 9{,}03 \text{ Kg/m}$$

c. Massa Lapisan Concrete (Mcc)

$$m_{conc} = \pi \frac{(Dwc^2 - D0^2)}{4} \rho_{conc}$$

$$= 0{,}067 \text{ x } 3043 \qquad = 242{,}26 \text{ Kg/m}$$

d. Massa Konten Pipa (Mfluida)

$$m_{fluida} = A_i \, x \, \rho_{fluida}$$

$$= 0{,}084 \text{ x } 60 \qquad = 15{,}77 \text{ Kg/m}$$

1. Perhitungan Berat Terendam Pipa

a. Massa Struktur Pipa (Mstr)

$$m_{str} = m_{st} + m_{cc} + m_{conc}$$

$$= 120{,}36 + 8{,}72 + 203{,}19 \qquad = 221{,}59 \text{ Kg/m}$$

b. Massa Displacement (Mdisp)

$$m_{disp} = \frac{\pi}{4} D_t^2 \, . \, \rho_w$$

$$= 3{,}14/4 \text{ x } 0{,}469 \text{ x } 1025 \qquad = 474{,}82 \text{ Kg/m}$$

c. Gaya Bouyancy (Fb)

$$F_b = m_{disp} \, . \, g$$

$$= 177{,}23 \text{ x } 9{,}81 \qquad = 2829{,}26 \text{ N/m}$$

d. Berat Terendam Pipa (Wsub)

$$W_{sub} = (m_{st} + m_{cc} + m_c + m_{fluida}).g - F_b$$

$$= (332{,}28 + 2{,}461)\ 9{,}81 - 1738{,}6 \qquad = 2309{,}04 \text{ N/m}$$

2. Perhitungan Massa Efektif Pipa

a. Koefisien Massa Tambah (Ca)

$$C_a = \begin{cases} 0{,}68 + \frac{1{,}6}{1+5\left(\frac{e}{Dt}\right)} & \text{untuk } \left(\frac{e}{Dt}\right) < 0.8 \\ 1 & \text{untuk } \left(\frac{e}{Dt}\right) > 0.8 \end{cases}$$

e/dt = 2,456 maka Ca = 1

b. Massa Tambah Pipa (Ma_{dd})

M_{add} = M_{disp} x C_a

= 261,423 x 1 = 261,423 Kg

c. Massa Efektif Pipa Terendam (M_{eff})

M_{eff} = M_{str} + M_{fluida} + M_{add}

= 332,28 + 2,46 + 177,23 = 750, Kg

LAMPIRAN B

PERHITUNGAN KECEPATAN PARTIKEL AIR PADA PIPA (AKIBAT ARUS DAN GELOMBANG

LAMPIRAN B

B.1 Perhitungan Kecepatan Partikel Air Akibat Gelombang

1. Data Gelombang

Tabel B.1 Data Gelombang

Data Gelombang				
Parameter	**Notasi**	**Nilai**		**Satuan**
		10 Tahun	**100 Tahun**	
Kedalaman	h	137,7		m
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	4,4	6	m
Periode Gelombang Signifikan	T_s	9,595	11,78	s

2. Parameter Spektra JONSWAP

a. Fungsi Distribusi

$$\varphi = \frac{Tp}{\sqrt{Hs}}$$

b. Parameter Lebar Spektra

$$\sigma = \begin{cases} 0{,}07 & jika\ \omega \leq \omega p \\ 0{,}09 & jika\ \omega > \omega p \end{cases}$$

c. Peak Enhancement Factor

$$\gamma = \begin{cases} 5{,}0 & \varphi < 3{,}6 \\ \exp(5{,}75 - 1{,}15\varphi), & 3{,}6 < \varphi < 5{,}0; \\ 1{,}0 & \varphi \geq 5{,}0 \end{cases}$$

d. Konstanta Generalised Phillips

$$\alpha = \frac{5}{16}\frac{Hs^2\,\omega p^4}{g^2}(1 - 0{,}287.\ln\gamma)$$

Tabel B.2 Hasil Perhitungan Parameter Spektra JONSWAP

Parameter JONSWAP				
Parameter	**Notasi**	**Nilai (10 Tahun)**	**Nilai (100 Tahun)**	**Satuan**
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	4,4	6	m
Periode Gelombang Signifikan	T_s	9,595	11,78	s
Periode Gelombang Signifikan	X_s	0,65	0,53	rad/s
Percepatan Gravitasi	g	9,8	9,8	m/s
Periode Puncak Gelombang	T_p	10,1	12,4	s
Frekuensi Puncak Gelombang	X_p	0,62	0,51	rad/s
Fungsi Distribusi	T	5,70	4,13	
Peakedness Parameter	/	0,42	5,00	
Konstanta Generalized Philips	=	0,03	0,004	

3. Angka Gelombang

$$k_w h = \frac{\omega^2 . h}{g} coth\ (k_w h)$$

Tabel B.3 Perhitungan angka Gelombang 10 Tahun

ANGKA GELOMBANG 10 TAHUN								
Kw Asumsi	**h**	**g**	**~**	**Kwh**	**TANH Kwh**	**COTH Kwh**	**k**	**error**
0,002	106,50	9,81	0,78	0,21	0,21	4,77	0,01	0,84
0,013	106,50	9,81	0,78	1,37	0,88	1,14	0,05	0,76
0,054	106,50	9,81	0,78	5,73	1,00	1,00	0,06	0,12
0,061	106,50	9,81	0,78	6,53	0,9999957	1,00	0,06127	0,00
0,061	106,50	9,81	0,78	6,53	0,9999957	1,00	0,06	0,00
0,061	106,50	9,81	0,78	6,53	0,9999957	1,00	0,06	0,00
0,061	106,50	9,81	0,78	6,53	0,9999957	1,00	0,06	0,00
0,061	106,50	9,81	0,78	6,53	0,9999957	1,00	0,06	0,00
0,061	106,50	9,81	0,78	6,53	0,9999957	1,00	0,06	0,00
0,061	106,50	9,81	0,78	6,53	0,9999957	1,00	0,06	0,00

Tabel B.4 Perhiutgan angka Gelombang 100 Tahun

ANGKA GELOMBANG 100 TAHUN								
Kw Asumsi	h	g	~	Kwh	TANH Kwh	COTH Kwh	k	error
0,02	106,50	9,81	0,51	2,13	0,97	1,03	0,03	0,21
0,03	106,50	9,81	0,51	2,71	0,99	1,01	0,03	0,04
0,03	106,50	9,81	0,51	2,81	0,99277	1,01	0,02634	0,00
0,03	106,50	9,81	0,51	2,80	0,99	1,01	0,03	0,00
0,03	106,50	9,81	0,51	2,81	0,99	1,01	0,03	0,00
0,03	106,50	9,81	0,51	2,81	0,99	1,01	0,03	0,00
0,03	106,50	9,81	0,51	2,81	0,99	1,01	0,03	0,00
0,03	106,50	9,81	0,51	2,81	0,99	1,01	0,03	0,00
0,03	106,50	9,81	0,51	2,81	0,99	1,01	0,03	0,00
0,03	106,50	9,81	0,51	2,81	0,99	1,01	0,03	0,00

Tabel B.5 Perhitungan angka Gelombang 1 dan 100 Tahun

Angka Gelombang				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 Tahun	100 Tahun	
Angka gelombang	k_w	0.06	0.03	-

4. Perhitungan Spektra Gelombang

a. Parameter Lebar Spektra

$$\sigma = \begin{cases} 0{,}07 & jika\, \omega \leq \omega p \\ 0{,}09 & jika\, \omega > \omega p \end{cases}$$

b. Fungsi Transfer G

$$G^2(\omega) = \frac{\omega \cos h\,(k.(D+e))}{\sinh(k.d)}$$

c. First Order Wave Theory

$$S_{UU}\,(\omega) = G^2(\omega)\,.\,S_{\eta\eta}\,(\omega)$$

d. Spektra JONSWAP

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha\,.\,g^2.\omega^{-5}.exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right).\gamma^{exp\left(-0{,}5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma.\omega_p}\right)^2\right)}$$

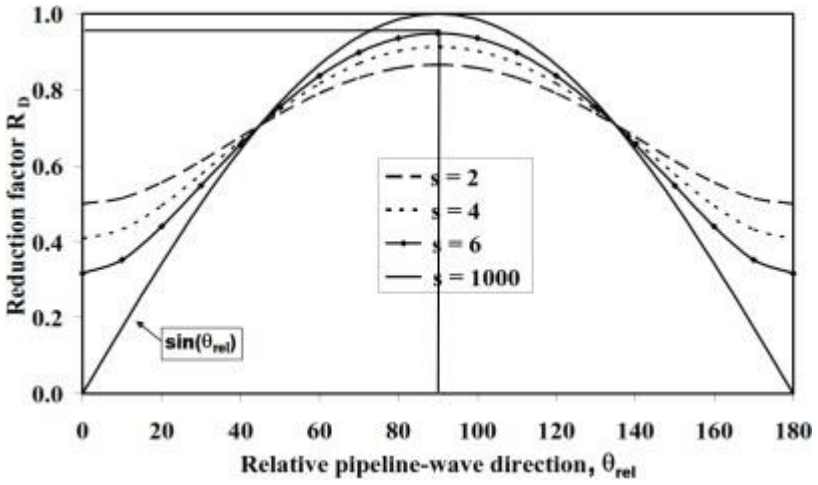
5. Kecepatan Arus Signifikan pada Pipa

$$U_s = 2\sqrt{M_0}$$

6. *Mean Zero up Crossing Period*

$$2\pi\sqrt{\frac{M_0}{M_2}}$$

7. Menentukan nilai R_D



8. Kecepatan Signifikan Arus Normal pada Pipa

$$U_W = U_s \,.\, R_D$$

Tabel B.6 Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang				
Parameter	**Notasi**	**Nilai**		**Satuan**
		10 Tahun	**100 Tahun**	
kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa	U_s	7,E-03	1.4E-01	m/s
mean zero up-crossing period	T_u	5,494	5,768	s
reduction factor	R_D	0.95		-
kecepatan arus signifikan normal pada pipa	U_W	0,0066	0,131	m/s
Periode natural Gelombang	T_n	1,4		s
Osilasi Gelombang	τ	1872,48	1965,74	

B.2 Perhitungan Kecepatan Arus *Steady* pada Pipa

Tabel B.7 Data Arus

Data Arus				
Parameter	**Notasi**	**Nilai**		**Satuan**
		10 Tahun	**100 Tahun**	
Kedalaman	h	56.77		m
Kecepatan Arus Di Near Bottom	$U(z_r)$	0,8	0,9	m/s

Tabel B.8 Data Parameter Arus

Parameter Kecepatan Arus pada Elevasi Pipa			
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Diameter Total Pipa	D_t	0,565	m
Diameter Luar Pipa	D_0	0,457	m
Arah Aliran Arus	Θ_{rel}	90	o

1. Faktor Reduksi

$$R_c = \sin(\theta_{rel})$$

2. Elevasi diatas Dasar Laut

$$z = e + \frac{Dt}{2}$$

3. Kecepatan Arus pada Elevasi Pipa

$$U_{c,10tahun} = R_c \,.\, U(z_r)_{1tahun} \frac{(ln(z) - ln(z0))}{(ln(zr) - ln(z0))}$$

$$U_{c,100tahun} = R_c \,.\, U(z_r)_{100tahun} \frac{(ln(z) - ln(z0))}{(ln(zr) - ln(z0))}$$

Tabel B.9 Nilai Parameter & Perhitungan Kecepatan Arus di Setiap Bentangan Pipa

No. Free Span	Panjang Span Aktual (m)	Gap (m)	Kec. Arus pada Ketinggian Referensi 10 Tahun U(zr)	Kec. Arus pada Ketinggian Referensi 100Tahun U(zr)	Parameter Kekasaran Dasar Laut	Kec. Arus Efektif 10 tahun V(z) [m/s]	Kec. Arus Efektif 100 tahun V(z) [m/s]
FS-1	44,00	1,4	0,80	0,9	0,000040	0,841	0,946
FS-2	39,00	1,5	0,80	0,9	0,000040	0,846	0,951
FS-3	40,00	1,4	0,80	0,9	0,000040	0,841	0,946
FS-4	42,00	0,5	0,80	0,9	0,000040	0,781	0,878
FS-5	36,00	0,3	0,80	0,9	0,000040	0,757	0,852
FS-6	36,00	0,3	0,80	0,9	0,000040	0,757	0,852
FS-7	37,00	0,4	0,80	0,9	0,000040	0,770	0,866
FS-8	38,00	0,55	0,80	0,9	0,000040	0,786	0,884
FS-9	39,00	0,35	0,80	0,9	0,000040	0,764	0,859
FS-10	37,00	0,65	0,80	0,9	0,000040	0,794	0,894
FS-11	43,00	0,45	0,80	0,9	0,000040	0,775	0,872
FS - 12	42,00	0,8	0,80	0,9	0,000040	0,806	0,907
FS-13	39,00	0,35	0,80	0,9	0,000010	0,873	0,982
FS-14	40,00	0,35	0,80	0,9	0,000010	0,873	0,982
FS-15	36,00	0,3	0,80	0,9	0,000010	0,867	0,975
FS-16	38,00	0,25	0,80	0,9	0,000010	0,860	0,967
FS-17	37,00	0,55	0,80	0,9	0,000010	0,895	1,007
FS-18	36,00	0,4	0,80	0,9	0,000010	0,879	0,989
FS-19	36,00	0,45	0,80	0,9	0,000010	0,885	0,996
FS-20	36,00	0,5	0,80	0,9	0,000010	0,890	1,001
FS-21	39,00	0,5	0,80	0,9	0,000010	0,890	1,001
FS-22	37,00	1,5	0,80	0,9	0,000010	0,955	1,075
FS-23	36,00	0,3	0,80	0,9	0,000010	0,867	0,975
FS-24	37,00	0,5	0,80	0,9	0,000005	0,942	1,059

B.3 Perhitungan Kecepatan Arus Total

Nilai Kecepatan arus total merupakan hasil penjumlahan dari kecepatan arus akibat gelombang (Uw) dan kecepatan arus pada elevasi pipa (Uc).

Tabel B.10 Nilai Parameter & Perhitungan Kecepatan Arus Total

Panjang Span (m)	Gap (m)	Uc (10 Tahun)	Uc (100 Tahun)	Uw (10 Tahun)	Uw (100 Tahun)	Kec. Arus Total (10 Tahun) m/s	Kec. Arus Total (100 Tahun) m/s
44,00	1,4	0,841	0,946	0,007	0,131	0,848	1,077
39,00	1,5	0,846	0,951	0,007	0,131	0,852	1,082
40,00	1,4	0,841	0,946	0,007	0,131	0,848	1,077
42,00	0,5	0,781	0,878	0,007	0,131	0,787	1,009
36,00	0,3	0,757	0,852	0,007	0,131	0,764	0,983
36,00	0,3	0,757	0,852	0,007	0,131	0,764	0,983
37,00	0,4	0,770	0,866	0,007	0,131	0,776	0,997
38,00	0,55	0,786	0,884	0,007	0,131	0,792	1,015
39,00	0,35	0,764	0,859	0,007	0,131	0,770	0,990
37,00	0,65	0,794	0,894	0,007	0,131	0,801	1,025
43,00	0,45	0,775	0,872	0,007	0,131	0,782	1,003
42,00	0,8	0,806	0,907	0,007	0,131	0,813	1,038
39,00	0,35	0,873	0,982	0,007	0,131	0,880	1,114
40,00	0,35	0,873	0,982	0,007	0,131	0,880	1,114
36,00	0,3	0,867	0,975	0,007	0,131	0,873	1,106
38,00	0,25	0,860	0,967	0,007	0,131	0,866	1,098
37,00	0,55	0,895	1,007	0,007	0,131	0,902	1,138
36,00	0,4	0,879	0,989	0,007	0,131	0,886	1,120
36,00	0,45	0,885	0,996	0,007	0,131	0,892	1,127
36,00	0,5	0,890	1,001	0,007	0,131	0,897	1,132
39,00	0,5	0,890	1,001	0,007	0,131	0,897	1,132
37,00	1,5	0,955	1,075	0,007	0,131	0,962	1,206
36,00	0,3	0,867	0,975	0,007	0,131	0,873	1,106
37,00	0,5	0,942	1,059	0,007	0,131	0,948	1,190

LAMPIRAN C

PERHITUNGAN *VORTEX INDUCED VIBRATION*

LAMPIRAN C

C.1 Perhitungan Parameter VIV

1. Data Parameter VIV

Tabel C.1 Data Parameter VIV

Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 tahun	100 Tahun	
Densitas Air Laut	ρ_w	1025		kg/m^3
Soil damping	ζ_{soil}	0.01		-
Structural damping	ζ_{str}	0.005		-
Kekasaran permukaan pipa	k	0.003		m
Diameter total pipa	D_t	0.565		m
Rasio k/ D_t	k/D_t	0.007		-
frekuensi gelombang signifikan	ω_s	0,65	0,53	rad/s
Viskositas Kinematis Air Laut	v_k	1.02E-06		$m^{2/}s$
Frekuensi Natural	fn	0.267		

3. Parameter *Vortex Induced Vibrations*

Frekuensi *Vortex Shedding*

$$fs = St\left(\frac{U_{tot}}{Dt}\right)$$

Tabel C.2 Hasil Perhitungan Parameter Frekuensi *Vortex Shedding*

Panjang Span (m)	fs 10 Tahun	fs 100 tahun
44,00	0,39	0,49
39,00	0,39	0,50
40,00	0,39	0,49
42,00	0,36	0,46
36,00	0,35	0,45
36,00	0,35	0,45
37,00	0,36	0,46
38,00	0,36	0,47
39,00	0,35	0,45
37,00	0,37	0,47
43,00	0,36	0,46
42,00	0,37	0,48
39,00	0,40	0,51
40,00	0,40	0,51

Tabel C.2 Hasil Perhitungan Parameter Frekuensi *Vortex Shedding (lanjutan)*

Panjang Span (m)	fs 10 Tahun	fs 100 tahun
36,00	0,40	0,51
38,00	0,40	0,50
37,00	0,41	0,52
36,00	0,41	0,51
36,00	0,41	0,52
36,00	0,41	0,52
39,00	0,41	0,52
37,00	0,44	0,55
36,00	0,40	0,51
37,00	0,43	0,55

b. Reynolds Number

$$R_e = (\frac{U_{tot} . Dt}{v})$$

Tabel C.3 Hasil Perhitungan Parameter *Reynolds Number*

Panjang Span (m)	Re 10 Tahun	Re 100 tahun
44,00	5,E+05	6,E+05
39,00	5,E+05	6,E+05
40,00	5,E+05	6,E+05
42,00	4,E+05	6,E+05
36,00	4,E+05	5,E+05
36,00	4,E+05	5,E+05
37,00	4,E+05	6,E+05
38,00	4,E+05	6,E+05
39,00	4,E+05	6,E+05
37,00	4,E+05	6,E+05
43,00	4,E+05	6,E+05
42,00	5,E+05	6,E+05
39,00	5,E+05	6,E+05
40,00	5,E+05	6,E+05
36,00	5,E+05	6,E+05
38,00	5,E+05	6,E+05
37,00	5,E+05	6,E+05
36,00	5,E+05	6,E+05
36,00	5,E+05	6,E+05
36,00	5,E+05	6,E+05
39,00	5,E+05	6,E+05
37,00	5,E+05	7,E+05
36,00	5,E+05	6,E+05
37,00	5,E+05	7,E+05

c. Stability Parameter

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

Tabel C.4 Hasil Perhitungan Parameter *Stability Parameter*

Panjang Span (m)	Massa Efektif	Ksd
44,00	750	0,37
39,00	750	0,37
40,00	750	0,37
42,00	750	0,37
36,00	782	0,38
36,00	782	0,38
37,00	759	0,37
38,00	750	0,37
39,00	769	0,38
37,00	750	0,37
43,00	751	0,37
42,00	750	0,37
39,00	769	0,38
40,00	769	0,38
36,00	782	0,38
38,00	797	0,39
37,00	750	0,37
36,00	759	0,37
36,00	751	0,37
36,00	750	0,37
39,00	750	0,37
37,00	750	0,37
36,00	782	0,38
37,00	750	0,37

d. Reduced Velocity

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

Tabel C.5 Hasil Perhitungan Parameter *Reduced Velocity*

Panjang Span (m)	Vrd
44,00	7,1
39,00	7,1
40,00	7,1
42,00	6,6

Tabel C.5 Hasil Perhitungan Parameter *Reduced Velocity (lanjutan)*

Panjang Span (m)	Vrd
36,00	6,5
36,00	6,5
37,00	6,6
38,00	6,7
39,00	6,5
37,00	6,7
43,00	6,6
42,00	6,8
39,00	7,3
40,00	7,3
36,00	7,3
38,00	7,2
37,00	7,5
36,00	7,4
36,00	7,4
36,00	7,4
39,00	7,4
37,00	7,9
36,00	7,3
37,00	7,8

e. Keulegan Carpenter Number

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

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

Panjang Span (m)	KC 10 Tahun	KC 100 Tahun
44,00	0,02	0,43
39,00	0,02	0,43
40,00	0,02	0,43
42,00	0,02	0,43
36,00	0,02	0,43
36,00	0,02	0,43
37,00	0,02	0,43
38,00	0,02	0,43

Tabel C.6 Hasil Perhitungan Parameter *Keulegan Carpenter Number (lanjutan)*

Panjang Span (m)	KC 10 Tahun	KC 100 Tahun
39,00	0,02	0,43
37,00	0,02	0,43
43,00	0,02	0,43
42,00	0,02	0,43
39,00	0,02	0,43
40,00	0,02	0,43
36,00	0,02	0,43
38,00	0,02	0,43
37,00	0,02	0,43
36,00	0,02	0,43
36,00	0,02	0,43
36,00	0,02	0,43
39,00	0,02	0,43
37,00	0,02	0,43
36,00	0,02	0,43
37,00	0,02	0,43

f. Current flow ratio

$$\alpha = \frac{U_{c100\ tahun}}{U_{c100tahun} \cdot U_{w1tahun}}$$

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

Panjang Span (m)	*r*
44,00	0,993
39,00	0,993
40,00	0,993
42,00	0,993
36,00	0,992
36,00	0,992
37,00	0,992
38,00	0,993
39,00	0,992
37,00	0,993
43,00	0,992
42,00	0,993
39,00	0,993
40,00	0,993
36,00	0,993

Tabel C.7 Hasil Perhitungan Parameter *current flow ratio (lanjutan)*

Panjang Span (m)	*r*
38,00	0,993
37,00	0,993
36,00	0,993
36,00	0,993
36,00	0,993
39,00	0,993
37,00	0,994
36,00	0,993
37,00	0,994

LAMPIRAN D

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

LAMPIRAN D

D.1 Dynamic Soil Stiffness

1. Data Awal Parameter Gaya *Drag*

Tabel D.1 Parameter *Dynamic Soil Stiffness*

Parameter *Dynamic Soil Stiffness*			
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Koefisien *dynamic soil stiffness* vertikal	C_v	10500	$kN/m^{5/2}$
Koefisien *dynamic soil stiffness* horizontal	C_L	9000	$kN/m^{5/2}$
Poisson ratio tanah vertikal (corroded)	$v_{soil,V}$	0.35	-
Poisson ratio tanah horizontal (corroded)	$v_{soil,L}$	0.35	-
Massa pipa di udara	-	488,65	kg/m
Massa air yang dipindahkan	mdisp	474,82	kg/m
Diameter total pipa	D_t	0.57	m

2. Perhitungan *Dynamic Soil stiffness*

a. Rasio Massa Spesifik

$\frac{\rho_s}{\rho} = 1{,}03$

b. Koefisien *Dynamic Soil Stiffness*

Sand type	C_V (kN/m$^{5/2}$)	C_L (kN/m$^{5/2}$)	$K_{V.S}$ (kN/m/m)
Loose	10500	9000	250
Medium	14500	12500	530
Dense	21000	18000	1350

c. *Dynamic Soil stiffness Vertikal*

D

$$K_v = \frac{C_v}{1-v_{soil}}\left(\frac{2}{3}\frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3}\right)\sqrt{Dt}$$

= 11077,61 kN/m^2

d. *Dynamic Soil stiffness*

$$K_L = C_L(1 + v_{soil})\left(\frac{2}{3}\frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3}\right)\sqrt{Dt}$$

= 9351,18 kN/m^2

D.2 *Concrete Stiffness Factor*

Tabel D.2 Parameter perhitungan *Concrete Stiffness Factor*

Parameter *Concrete Stiffness Factor*			
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Konstanta Empiris (Asphalt)	K_c	0,33	-
Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	0,001	m4
Momen Inersia Selimut Beton	I_{conc}	0,003	m4
Young's Modulus Pipa Baja	E_{st}	207000	MPa
Kekuatan Material Selimut Beton	F_{cn}	45.00	MPa

a. Young Modulus Selimut Beton

$E_{conc} = 1000x(f_{cn})^{0.3}$ = 31330,242 MPa

b. *Concrete Stiffness factor*

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

=0,228

LAMPIRAN E

PERHITUNGAN *PANJANG SPAN EFEKTIF, EFFECTIVE AXIAL FORCE, CRITICAL BUCKLING LOAD, STATIC DEFLECTION, dan FREKUENSI NATURAL PIPA*

LAMPIRAN E

E.1 Panjang *Span* Efektif

1. Data Awal Parameter Perhitungan Panjang Span Efektif

Tabel E.1 Parameter *Dynamic Soil Stiffness*

Parameter Perhitungan β			
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Dynamic soil stiffness vertikal	K_v	1.76E+07	N/m^2
Dynamic soil stiffness horizontal	K_L	1.33E+07	N/m^2
Concrete Stiffness Factor	CSF	0.331	-
momen inersia pipa baja	I_{st}	2.24E-04	m^4
Young's modulus pipa baja	E_{st}	2.07E+11	Pa

2. Perhitungan Panjang *Span* Efektif

Untuk *fixes-fixes* Leff/L = 1

Tabel E.2 Perhitungan Panjang Span Efektif

In-Line				**Cross-Flow**			
L	**β**	**L_{eff}/L**	**L_{eff}**	**L**	**β**	**L_{eff}/L**	**L_{eff}**
m			**m**	**m**			**m**
44,00	2,32	1,00	44,00	44,00	2,40	1,000	44,000
39,00	2,11	1,00	39,00	39,00	2,19	1,000	39,000
40,00	2,16	1,00	40,00	40,00	2,23	1,000	40,000
42,00	2,24	1,00	42,00	42,00	2,32	1,000	42,000
36,00	1,97	1,00	36,00	36,00	2,05	1,000	36,000
36,00	1,97	1,00	36,00	36,00	2,05	1,000	36,000
37,00	2,02	1,00	37,00	37,00	2,09	1,000	37,000
38,00	2,07	1,00	38,00	38,00	2,14	1,000	38,000
39,00	2,11	1,00	39,00	39,00	2,19	1,000	39,000
37,00	2,02	1,00	37,00	37,00	2,09	1,000	37,000
43,00	2,28	1,00	43,00	43,00	2,36	1,000	43,000
42,00	2,24	1,00	42,00	42,00	2,32	1,000	42,000
39,00	2,11	1,00	39,00	39,00	2,19	1,000	39,000
40,00	2,16	1,00	40,00	40,00	2,23	1,000	40,000
36,00	1,97	1,00	36,00	36,00	2,05	1,000	36,000

Tabel E.2 Perhitungan Panjang Span Efektif (lanjutan)

38,00	2,07	1,00	38,00	38,00	2,14	1,000	38,000
37,00	2,02	1,00	37,00	37,00	2,09	1,000	37,000
36,00	1,97	1,00	36,00	36,00	2,05	1,000	36,000
36,00	1,97	1,00	36,00	36,00	2,05	1,000	36,000
36,00	1,97	1,00	36,00	36,00	2,05	1,000	36,000
39,00	2,11	1,00	39,00	39,00	2,19	1,000	39,000
37,00	2,02	1,00	37,00	37,00	2,09	1,000	37,000
36,00	1,97	1,00	36,00	36,00	2,05	1,000	36,000
37,00	2,02	1,00	37,00	37,00	2,09	1,000	37,000

E.2 *Boundary Condition (C_{1-6})*

Kondisi batas yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *fixed-fixed*, maka koefisien batas sesuai dengan tabel di awah ini beserta keterangannya.

Tabel E.3 Koefisien Boundary Condition

	Pinned-pinned (2)	*Fixed-fixed* (3)	*Single Span on seabed*
C_1	1.57	3.56	3.56
C_2	1.0	4.0	4.0
C_3	$0.8^{(1)}$	$0.2^{(1)}$	$0.4^{(1)}$
C_4	4.93	14.1	*Shoulder:* $\frac{1}{18\,(L_{eff}/L)^2 - 6}$ *Midspan:* 8.6
C_5	1/8	1/12	*Shoulder* (4)*:* $14.1\,(L/L_{eff})^2$ *Midspan:* 8.6
C_6	5/384	1/384	1/384

Note that $C_3 = 0$ is normally assumed for in -line direction if the steady current is not accounted for.

For pinned -pinned boundary condition L_{eff} shall be replaced by L in all expressions, including the expression for P_{cr}.

For fixed -fixed boundary conditions, $L_{eff}/L = 1$ per definition.

C_5 shall be calculated using the static soil stiffness in the L_{eff}/L calculation.

E.3 *Effective Axial Force*

Tabel E.4 Parameter Perhitungan Effective Axial Force

Parameter Perhitungan *Effective Axial Force*			
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Perbedaan tekanan	ΔP	2,21E+06	Pa
Poisson's ratio baja	v_{st}	0,3	-
diameter dalam pipa	D_i	0,42	m
luas penampang internal pipa baja	A_i	0,22	m^2
luas penampang pipa baja	A_{st}	2,74E-02	m^2
Koefisien *thermal expansion*	α_e	1.17E-05	$/^0C$
Temperatur Operasi	T_1	25.48	^0C
Temperatur air laut	T_0	25.00	^0C
Young's modulus pipa baja	E_{st}	2.07E+11	Pa

Perhitungan effective axial force:

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

$$= -2{,}3\ E{+}05\ N$$

E.4 *Critical Buckling Load*

Tabel E.5 Parameter Perhitungan Critical Buckling Load

Parameter Perhitungan *Critical Buckling Load*			
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Concrete Stiffness Factor	CSF	0,228	-
Young's Modulus Pipa Baja	E_{st}	2,07E+11	Pa
Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	6,56E-04	m^4
Boundary Condition	C_2	4.00	-

Perhitungan *Critical buckling load*

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

$$P_{cr} = (1 + 0.331)\ 4\pi^2\frac{E_{st}I_{st}}{L_{eff}^2}$$

Tabel E.6 Perhitungan Critical Buckling Load

In-Line			Cross-Flow		
L	L_{eff}	P_{cr}	L	L_{eff}	P_{cr}
m	m	N	m	m	N
44,00	44,00	3,40E+06	44,00	44,00	3,40E+06
39,00	39,00	4,33E+06	39,00	39,00	4,33E+06
40,00	40,00	4,11E+06	40,00	40,00	4,11E+06
42,00	42,00	3,73E+06	42,00	42,00	3,73E+06
36,00	36,00	5,08E+06	36,00	36,00	5,08E+06
36,00	36,00	5,08E+06	36,00	36,00	5,08E+06
37,00	37,00	4,81E+06	37,00	37,00	4,81E+06
38,00	38,00	4,56E+06	38,00	38,00	4,56E+06
39,00	39,00	4,33E+06	39,00	39,00	4,33E+06
37,00	37,00	4,81E+06	37,00	37,00	4,81E+06
43,00	43,00	3,56E+06	43,00	43,00	3,56E+06
42,00	42,00	3,73E+06	42,00	42,00	3,73E+06
39,00	39,00	4,33E+06	39,00	39,00	4,33E+06
40,00	40,00	4,11E+06	40,00	40,00	4,11E+06
36,00	36,00	5,08E+06	36,00	36,00	5,08E+06
38,00	38,00	4,56E+06	38,00	38,00	4,56E+06
37,00	37,00	4,81E+06	37,00	37,00	4,81E+06
36,00	36,00	5,08E+06	36,00	36,00	5,08E+06
36,00	36,00	5,08E+06	36,00	36,00	5,08E+06
36,00	36,00	5,08E+06	36,00	36,00	5,08E+06
39,00	39,00	4,33E+06	39,00	39,00	4,33E+06
37,00	37,00	4,81E+06	37,00	37,00	4,81E+06
36,00	36,00	5,08E+06	36,00	36,00	5,08E+06
37,00	37,00	4,81E+06	37,00	37,00	4,81E+06

E.5 *Static Deflection*

Tabel E.7 Parameter Perhitungan *Static Deflection*

Parameter Perhitungan S*tatic Deflecton*			
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Concrete stiffness factor	CSF	0,228	-
Young's modulus pipa baja	E_{st}	2.07E+11	Pa
momen inersia pipa baja	I_{st}	6,56E-04	m^4
Boundary condition	C_6	0.0026	-
Effective Axial Force	S_{eff}	-2,29E+05	N
Berat terendam pipa (q *cross-flow*)	W_{sub}	2309,04	N/m

Perhitungan *Static deflection :*

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

Tabel E.8 Perhitungan *Static Deflection (In-line)*

In-Line				
L	**L_{eff}**	**P_{cr}**	**Ftot**	**δ**
m	**m**	**N**		**m**
44,00	44,00	3,40E+06	474,613	2,98E-02
39,00	39,00	4,33E+06	479,145	1,83E-02
40,00	40,00	4,11E+06	474,613	2,01E-02
42,00	42,00	3,73E+06	416,558	2,15E-02
36,00	36,00	5,08E+06	395,186	1,08E-02
36,00	36,00	5,08E+06	395,186	1,08E-02
37,00	37,00	4,81E+06	406,587	1,25E-02
38,00	38,00	4,56E+06	421,114	1,44E-02
39,00	39,00	4,33E+06	401,092	1,53E-02
37,00	37,00	4,81E+06	429,523	1,32E-02
43,00	43,00	3,56E+06	411,728	2,35E-02
42,00	42,00	3,73E+06	440,707	2,28E-02
39,00	39,00	4,33E+06	507,100	1,93E-02
40,00	40,00	4,11E+06	507,100	2,15E-02
36,00	36,00	5,08E+06	500,456	1,37E-02
38,00	38,00	4,56E+06	493,266	1,69E-02
37,00	37,00	4,81E+06	529,583	1,63E-02
36,00	36,00	5,08E+06	513,277	1,41E-02
36,00	36,00	5,08E+06	519,051	1,42E-02
36,00	36,00	5,08E+06	524,472	1,44E-02
39,00	39,00	4,33E+06	524,472	2,00E-02
37,00	37,00	4,81E+06	594,433	1,83E-02
36,00	36,00	5,08E+06	500,456	1,37E-02
37,00	37,00	4,81E+06	579,520	1,78E-02

Tabel E.9 Perhitungan *Static Deflection (cross-flow)*

Cross-Flow			
L	**L_{eff}**	**P_{cr}**	**δ**
m	**m**	**N**	**m**
44,00	44,00	3,40E+06	1,4,E-01
39,00	39,00	4,33E+06	8,8,E-02
40,00	40,00	4,11E+06	9,8,E-02
42,00	42,00	3,73E+06	1,2,E-01
36,00	36,00	5,08E+06	6,3,E-02
36,00	36,00	5,08E+06	6,3,E-02
37,00	37,00	4,81E+06	7,1,E-02
38,00	38,00	4,56E+06	7,9,E-02
39,00	39,00	4,33E+06	8,8,E-02
37,00	37,00	4,81E+06	7,1,E-02
43,00	43,00	3,56E+06	1,3,E-01
42,00	42,00	3,73E+06	1,2,E-01
39,00	39,00	4,33E+06	8,8,E-02
40,00	40,00	4,11E+06	9,8,E-02
36,00	36,00	5,08E+06	6,3,E-02
38,00	38,00	4,56E+06	7,9,E-02
37,00	37,00	4,81E+06	7,1,E-02
36,00	36,00	5,08E+06	6,3,E-02
36,00	36,00	5,08E+06	6,3,E-02
36,00	36,00	5,08E+06	6,3,E-02
39,00	39,00	4,33E+06	8,8,E-02
37,00	37,00	4,81E+06	7,1,E-02
36,00	36,00	5,08E+06	6,3,E-02
37,00	37,00	4,81E+06	7,1,E-02

E.6 Frekuensi Natural Pipa

Tabel E.10 Parameter Perhitungan *Frekuensi Natural Pipa*

Parameter Perhitungan *Fundamental Natural Frequency*			
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Concrete stiffness factor	CSF	0.228	-
Young's modulus pipa baja	E_{st}	2.07E+11	Pa
momen inersia pipa baja	I_{st}	6,56E-04	m^4
Boundary condition	C_1	3.56	-
	C_3	0.20	-
Effective Axial Force	S_{eff}	-2,29E+06	N
Diameter total pipa	D_t	0.57	m

Perhitungan Frekuensi natural pipa:

1 $$f_1 = C_1\sqrt{1+CSF}\sqrt{\frac{E_{st}I_{st}}{m_e L_{eff}^4}(1+\frac{S_{eff}}{P_{cr}}+C_3(\frac{\delta}{D_t})^2)}$$

Tabel E.11 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa (In-Line)

Inline					
L	L_{eff}	P_{cr}	δ	me	f_1
m	m	N	m	kg/m	Hz
44,0	44,000	3,40E+06	2,98E-02	750,073	0,838
39,0	39,000	4,33E+06	1,83E-02	750,073	1,075
40,0	40,000	4,11E+06	2,01E-02	750,073	1,020
42,0	42,000	3,73E+06	2,15E-02	750,073	0,922
36,0	36,000	5,08E+06	1,08E-02	781,595	1,240
36,0	36,000	5,08E+06	1,08E-02	781,595	1,240
37,0	37,000	4,81E+06	1,25E-02	759,187	1,190
38,0	38,000	4,56E+06	1,44E-02	750,073	1,133
39,0	39,000	4,33E+06	1,53E-02	769,184	1,061
37,0	37,000	4,81E+06	1,32E-02	750,073	1,197
43,0	43,000	3,56E+06	2,35E-02	750,963	0,878
42,0	42,000	3,73E+06	2,28E-02	750,073	0,922
39,0	39,000	4,33E+06	1,93E-02	769,184	1,061
40,0	40,000	4,11E+06	2,15E-02	769,184	1,007
36,0	36,000	5,08E+06	1,37E-02	781,595	1,240
38,0	38,000	4,56E+06	1,69E-02	797,416	1,099
37,0	37,000	4,81E+06	1,63E-02	750,073	1,197
36,0	36,000	5,08E+06	1,41E-02	759,187	1,259
36,0	36,000	5,08E+06	1,42E-02	750,963	1,266
36,0	36,000	5,08E+06	1,44E-02	750,073	1,266
39,0	39,000	4,33E+06	2,00E-02	750,073	1,075
37,0	37,000	4,81E+06	1,83E-02	750,073	1,197
36,0	36,000	5,08E+06	1,37E-02	781,595	1,240
37,0	37,000	4,81E+06	1,78E-02	750,073	1,197

Tabel E.12 Perhitungan *Frekuensi Natural Pipa (cross-flow)*

Cross-Flow					
L	L_{eff}	P_{cr}	δ	me	f_1
m	m	N	m	kg/m	Hz
44,0	44,0	3,40E+06	1,45E-01	750,073	0,843
39,0	39,0	4,33E+06	8,80E-02	750,073	1,077
40,0	40,0	4,11E+06	9,77E-02	750,073	1,023
42,0	42,0	3,73E+06	1,19E-01	750,073	0,927
36,0	36,0	5,08E+06	6,34E-02	781,595	1,242
36,0	36,0	5,08E+06	6,34E-02	781,595	1,242

Tabel E.12 Perhitungan *Frekuensi Natural Pipa (cross-flow)* (Lanjutan)

Cross-Flow					
L	L_{eff}	P_{cr}	δ	me	f_1
m	m	N	m	kg/m	Hz
37,0	37,0	4,81E+06	7,09E-02	759,187	1,192
38,0	38,0	4,56E+06	7,91E-02	750,073	1,136
39,0	39,0	4,33E+06	8,80E-02	769,184	1,064
37,0	37,0	4,81E+06	7,09E-02	750,073	1,199
43,0	43,0	3,56E+06	1,32E-01	750,963	0,883
42,0	42,0	3,73E+06	1,19E-01	750,073	0,927
39,0	39,0	4,33E+06	8,80E-02	769,184	1,064
40,0	40,0	4,11E+06	9,77E-02	769,184	1,010
36,0	36,0	5,08E+06	6,34E-02	781,595	1,242
38,0	38,0	4,56E+06	7,91E-02	797,416	1,101
37,0	37,0	4,81E+06	7,09E-02	750,073	1,199
36,0	36,0	5,08E+06	6,34E-02	759,187	1,260
36,0	36,0	5,08E+06	6,34E-02	750,963	1,267
36,0	36,0	5,08E+06	6,34E-02	750,073	1,268
39,0	39,0	4,33E+06	8,80E-02	750,073	1,077
37,0	37,0	4,81E+06	7,09E-02	750,073	1,199
36,0	36,0	5,08E+06	6,34E-02	781,595	1,242
37,0	37,0	4,81E+06	7,09E-02	750,073	1,199

LAMPIRAN F

SCREENING FREE SPAN DAN KRITERIA *FATIGUE*

LAMPIRAN F

F.1 *Screening* Panjang *Span*

Tabel F.1 Perhitungan Kriteria L/D

L (m)	Gap (m)	L/D	LD>30
44,00	1,4	77,19	GAGAL STATIS
39,00	1,5	68,42	GAGAL STATIS
40,00	1,4	70,18	GAGAL STATIS
42,00	0,5	73,68	GAGAL STATIS
36,00	0,3	63,16	GAGAL STATIS
36,00	0,3	63,16	GAGAL STATIS
37,00	0,4	64,91	GAGAL STATIS
38,00	0,55	66,67	GAGAL STATIS
39,00	0,35	68,42	GAGAL STATIS
37,00	0,65	64,91	GAGAL STATIS
43,00	0,45	75,44	GAGAL STATIS
42,00	0,8	73,68	GAGAL STATIS
39,00	0,35	68,42	GAGAL STATIS
40,00	0,35	70,18	GAGAL STATIS
36,00	0,3	63,16	GAGAL STATIS
38,00	0,25	66,67	GAGAL STATIS
37,00	0,55	64,91	GAGAL STATIS
36,00	0,4	63,16	GAGAL STATIS
36,00	0,45	63,16	GAGAL STATIS
36,00	0,5	63,16	GAGAL STATIS
39,00	0,5	68,42	GAGAL STATIS
37,00	1,5	64,91	GAGAL STATIS
36,00	0,3	63,16	GAGAL STATIS
37,00	0,5	64,91	GAGAL STATIS

1. Perhitungan Kriteria Screening Fatigue

a. In-Line

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{c,100\ tahun}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D_t} \cdot \left(1 - \frac{L/Dt}{250}\right) \cdot \frac{1}{\bar{\alpha}}$$

Tabel F.2 Perhitungan Kriteria *Screening Fatigue In-line*

In-Line							
L	**$f_{n,IL}$**	**$f_{n,IL} / \gamma f$**	**$V_R^{IL}{}_{onset}$**	**Uc 100 year**	*r*	**Ruas Kanan**	**Kriteria**
m	**Hz**			**m/s**			
44,00	0,838	0,762	0,957	0,946	0,993	1,690	TIDAK LOLOS
39,00	1,075	0,977	0,962	0,951	0,993	1,777	TIDAK LOLOS
40,00	1,020	0,927	0,957	0,946	0,993	1,759	TIDAK LOLOS
42,00	0,922	0,839	0,897	0,878	0,993	1,709	TIDAK LOLOS
36,00	1,240	1,128	0,873	0,852	0,992	1,805	TIDAK LOLOS
36,00	1,240	1,128	0,873	0,852	0,992	1,805	TIDAK LOLOS
37,00	1,190	1,082	0,886	0,866	0,992	1,791	TIDAK LOLOS
38,00	1,133	1,030	0,902	0,884	0,993	1,779	TIDAK LOLOS
39,00	1,061	0,965	0,880	0,859	0,992	1,756	TIDAK LOLOS
37,00	1,197	1,088	0,911	0,894	0,993	1,798	TIDAK LOLOS
43,00	0,878	0,798	0,891	0,872	0,992	1,691	TIDAK LOLOS
42,00	0,922	0,839	0,922	0,907	0,993	1,716	TIDAK LOLOS
39,00	1,061	0,965	0,989	0,982	0,993	1,783	TIDAK LOLOS
40,00	1,007	0,916	0,989	0,982	0,993	1,766	TIDAK LOLOS
36,00	1,240	1,128	0,983	0,975	0,993	1,834	TIDAK LOLOS
38,00	1,099	0,999	0,976	0,967	0,993	1,798	TIDAK LOLOS
37,00	1,197	1,088	1,011	1,007	0,993	1,823	TIDAK LOLOS
36,00	1,259	1,144	0,995	0,989	0,993	1,837	TIDAK LOLOS
36,00	1,266	1,150	1,001	0,996	0,993	1,838	TIDAK LOLOS
36,00	1,266	1,151	1,006	1,001	0,993	1,839	TIDAK LOLOS
39,00	1,075	0,977	1,006	1,001	0,993	1,787	TIDAK LOLOS
37,00	1,197	1,088	1,071	1,075	0,994	1,835	TIDAK LOLOS
36,00	1,240	1,128	0,983	0,975	0,993	1,834	TIDAK LOLOS
37,00	1,197	1,088	1,058	1,059	0,994	1,833	TIDAK LOLOS

b. Cross-Flow

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100\,tahun} + U_{w,1\,tahun}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D_t}$$

Dengan nilai reduced velocity onset adalah dengan persamaan berikut:

$$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3 \cdot \Psi_{proxi,onset} \cdot \Psi_{trench,onset}}{\gamma_{on,CF}}$$

Tabel F.3 Perhitungan Kriteria *Screening Fatigue In-line*

Cross-Flow							
L	**$f_{n,CF}$**	**$f_{n,CF}$ / γf**	**$V_{Rcfonset}$**	**Uc 100 year**	**Uw 1 year**	**Ruas Kanan**	**Kriteria**
m	**Hz**			**m/s**	**m/s**		
44,00	0,843	0,703	2,500	0,946	0,85	1,762	TIDAK LOLOS
39,00	1,077	0,898	2,500	0,951	0,85	1,772	TIDAK LOLOS
40,00	1,023	0,853	2,500	0,946	0,85	1,762	TIDAK LOLOS
42,00	0,927	0,772	2,500	0,878	0,79	1,636	TIDAK LOLOS
36,00	1,242	1,035	2,286	0,852	0,76	1,736	TIDAK LOLOS
36,00	1,242	1,035	2,286	0,852	0,76	1,736	TIDAK LOLOS
37,00	1,192	0,993	2,423	0,866	0,78	1,665	TIDAK LOLOS
38,00	1,136	0,946	2,500	0,884	0,79	1,646	TIDAK LOLOS
39,00	1,064	0,886	2,355	0,859	0,77	1,700	TIDAK LOLOS
37,00	1,199	0,999	2,500	0,894	0,80	1,665	TIDAK LOLOS
43,00	0,883	0,736	2,492	0,872	0,78	1,631	TIDAK LOLOS
42,00	0,927	0,772	2,500	0,907	0,81	1,690	TIDAK LOLOS
39,00	1,064	0,886	2,355	0,982	0,88	1,943	TIDAK LOLOS
40,00	1,010	0,842	2,355	0,982	0,88	1,943	TIDAK LOLOS
36,00	1,242	1,035	2,286	0,975	0,87	1,986	TIDAK LOLOS
38,00	1,101	0,918	2,218	0,967	0,87	2,031	TIDAK LOLOS
37,00	1,199	0,999	2,500	1,007	0,90	1,875	TIDAK LOLOS
36,00	1,260	1,050	2,423	0,989	0,89	1,901	TIDAK LOLOS
36,00	1,267	1,056	2,492	0,996	0,89	1,860	TIDAK LOLOS
36,00	1,268	1,057	2,500	1,001	0,90	1,865	TIDAK LOLOS
39,00	1,077	0,898	2,500	1,001	0,90	1,865	TIDAK LOLOS
37,00	1,199	0,999	2,500	1,075	0,96	2,001	TIDAK LOLOS
36,00	1,242	1,035	2,286	0,975	0,87	1,986	TIDAK LOLOS
37,00	1,199	0,999	2,500	1,059	0,95	1,972	TIDAK LOLOS

LAMPIRAN G

PERHITUNGAN *RESPONSE MODEL*

LAMPIRAN G

G.1 *In-Line Response Model*

1. Perhitungan nilai reduced Velocity Onset

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \dfrac{1}{\gamma_{on,IL}} & ;untuk\ K_{sd} < 0{,}4 \\ (\dfrac{0{,}6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}}) & ;untuk\ K_{sd}\ 0{,}4 < K_{sd} < 1{,}6 \\ \dfrac{2{,}2}{\gamma_{on,IL}} & ;untuk\ K_{sd} > 1{,}6 \end{cases}$$

γ ;

2. Perhitungan nilai Reduced Velocity 1

$$V_{R,1}^{IL} = 10 \cdot \left(\frac{A_{Y,1}}{D}\right) + V_{R,onset}^{IL}$$

3. Perhitungan nilai Reduced Velocity 2

$$V_{R,2}^{IL} = V_{R,end}^{IL} - 2 \cdot \left(\frac{A_{Y,2}}{D}\right)$$

4. Perhitungan nilai Reduced Velocity End

$$V_{R,end}^{IL} = \begin{cases} 4.5 - 0.8 K_{sd} & \text{for } K_{sd} < 1.0 \\ 3.7 & \text{for } K_{sd} \geq 1.0 \end{cases}$$

5. Perhitungan nilai stress amplitude ratio 1

$$\left(\frac{A_{Y,1}}{D}\right) = \max\left(0.18 \cdot \left(1 - \frac{K_{sd}}{1.2}\right) \cdot R_{I\theta,1}; \left(\frac{A_{Y,2}}{D}\right)\right)$$

6. Perhitungan nilai stress amplitude ratio 2

$$\left(\frac{A_{Y,2}}{D}\right) = 0.13 \cdot \left(1 - \frac{K_{sd}}{1.8}\right) \cdot R_{I\theta,2}$$

7. Perhitungan nilai reduction 1

$$R_{I\theta,1} = 1 - \pi^2 \left(\frac{\pi}{2} - \sqrt{2} \cdot \theta_{rel}\right)(I_c - 0.03) \qquad 0 \leq R_{I\theta,1} \leq 1$$

8. Perhitungan nilai reduction 2

$$R_{I\theta,2} = 1.0 - \frac{(\bar{I}_c - 0.03)}{0.17} \qquad 0 \leq R_{I\theta,2} \leq 1$$

Tabel G.1 Hasil Perhitungan *Response Model*

Parameter *Response Model*	
Parameter	**Nilai**
$\frac{A_{y,1}}{D}$	0.049
$\frac{A_{y,2}}{D}$	0.049
$V_{r,onset}^{IL}$	0,90
$V_{r,1}^{IL}$	1.98
$V_{r,2}^{IL}$	4.11
$V_{r,end}^{IL}$	4.20

G.2 *Cross Flow Response Model*

1. Perhitungan nilai reduced Velocity Onset

$$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3 \cdot \psi_{proxi,onset} \cdot \psi_{mass,onset} \cdot \psi_{\alpha,onset} \cdot \psi_{trench,onset}}{\gamma_{on}}$$

a. $\psi_{proxi,onset}$ adalah perhitungan faktor koreksi untuk jarak dasar laut, dimana :

$$\psi_{proxi,onset} = \begin{cases} \frac{1}{4}(3 + 1.25\frac{e}{D}) & \text{for } \frac{e}{D} < 0.8 \\ 1 & \text{else} \end{cases}$$

b. $\psi_{mass,onset}$ adalah perhitungan faktor koreksi untuk *spesific gravity* dari pipa, dimana :

$$\psi_{mass,onset} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{3}\frac{\rho_s}{\rho} & \text{for } \frac{\rho_s}{\rho} < 1.5 \\ 1 & \text{else} \end{cases}$$

c. $\psi_{\alpha,onset}$ adalah perhitungan faktor koreksi untuk *current wave ratio*, dimana :

$$\psi_{\alpha,onset} = \begin{cases} 1 + \frac{\alpha}{3} & \text{for } \alpha < 0.5 \\ 1.167 & \text{else} \end{cases}$$

d. $\psi_{trench,onset}$ adalah perhitungan faktor koreksi untuk *current wave ratio*, dimana :

$$\psi_{trench,onset} = 1 + 0.5\frac{\Delta}{D}, \quad \frac{\Delta}{D} = \frac{1.25d - e}{D}$$

2. Perhitungan nilai Reduced Velocity 1

$$V_{R,1}^{CF} = 5$$

3.Perhitungan nilai Reduced Velocity 2

$$V_{R,2}^{CF} = V_{R,end}^{CF} - \left(\frac{9}{1.3}\right)\cdot\left(\frac{A_{Z,1}}{D}\right)$$

4.Perhitungan nilai Reduced Velocity End

$$V_{R,end}^{CF} = 16$$

5.Perhitungan nilai stress amplitude ratio 1

$$\left(\frac{A_{Z,1}}{D}\right) = \begin{cases} 1.3 & \alpha > 0.8 \quad \text{allKC} \\ 0.7 & KC < 10 \\ 0.7 + 0.01\cdot(KC - 10) & \alpha \le 0.8 \quad 10 \le KC \le 30 \\ 0.9 & KC > 30 \end{cases}$$

6.Perhitungan nilai stress amplitude ratio 2

$$\left(\frac{A_{Z,2}}{D}\right) = \left(\frac{A_{Z,1}}{D}\right)$$

Tabel G.2 Hasil Perhitungan *Response Model*

Parameter *Response Model*	
Parameter	**Nilai**
$\frac{A_{z,1}}{D}$	0.9
$\frac{A_{z,2}}{D}$	0.9
$V_{r,onset}^{CF}$	2,5
$V_{r,1}^{CF}$	5,4
$V_{r,2}^{CF}$	11.15
$V_{r,end}^{CF}$	16

LAMPIRAN H

PERHITUNGAN *UNIT STRESS AMPLITUDE* DAN *STRESS RANGE*

LAMPIRAN H

H.1 Unit Stress Amplitude

1. Data Awal Parameter Perhitungan *Unit Stress Amplitude*

Tabel H.1 Parameter Perhitungan *Unit Stress Amplitude*

Perhitungan Unit Stress Amplitude		
Parameter	Notasi	Nilai
C4	C4	14.1
Diameter total	Dt	0,565
Diameter pipa	OD	0,46
modulus young baja	E	2.07E+11
wall thickness	t	0.02
Concrete Stiffness Factor	CSF	0.28

2. Perhitungan Unit Stress Amplitude

a. Safety Factor

Safety Factor	Safety Class		
	Low	Normal	High
η	1.0	0.5	0.25
γ_s	$1.05^{1)}$ (1.0)		
γ_f	$1.20^{1)}$ (1.15)		
γ_k	1.30		
γ_{on}	1.10		

b. Unit Stress Amplitude

$$A_{IL/CF} = C_4(1+CSF)\frac{D\cdot(D_s-t)\cdot E}{L_{eff}^2}$$

Tabel H.2 Perhitungan Unit Stress Amplitude

In-Line		
L aktual	L kritis	AIL
44	23,675	1,60E+09
39	26,811	1,25E+09
40	26,122	1,32E+09
42	24,841	1,46E+09
36	28,511	1,11E+09
36	28,511	1,11E+09
37	28,129	1,14E+09
38	27,536	1,19E+09
39	26,476	1,28E+09
37	28,299	1,12E+09
43	24,230	1,53E+09
42	24,841	1,46E+09
39	26,476	1,28E+09

Cross Flow		
L aktual	L kritis	ACF
44	23,753	1,59,E+09
39	26,843	1,25,E+09
40	26,161	1,31,E+09
42	24,897	1,45,E+09
36	28,529	1,10,E+09
36	28,529	1,10,E+09
37	28,151	1,13,E+09
38	27,562	1,18,E+09
39	26,508	1,28,E+09
37	28,321	1,12,E+09
43	24,297	1,52,E+09
42	24,897	1,45,E+09
39	26,508	1,28,E+09

Tabel H.2 Perhiutgan Unit Stress Amplitude (Lanjutan)

37	28,299	1,12E+09
43	24,230	1,53E+09
42	24,841	1,46E+09
39	26,476	1,28E+09
40	25,796	1,35E+09
36	28,512	1,11E+09
38	26,706	1,26E+09
37	28,299	1,12E+09
36	28,929	1,07E+09
36	29,087	1,06E+09
36	29,105	1,06E+09
39	26,811	1,25E+09
37	28,300	1,12E+09
36	28,512	1,11E+09
37	28,300	1,12E+09

37	28,321	1,12,E+09
43	24,297	1,52,E+09
42	24,897	1,45,E+09
39	26,508	1,28,E+09
40	25,834	1,35,E+09
36	28,529	1,10,E+09
38	26,732	1,26,E+09
37	28,321	1,12,E+09
36	28,947	1,07,E+09
36	29,105	1,06,E+09
36	29,122	1,06,E+09
39	26,843	1,25,E+09
37	28,321	1,12,E+09
36	28,529	1,10,E+09
37	28,321	1,12,E+09

H.2 Stress Range

$$S_{CF} = 2 \cdot A_{CF} \cdot (A_Z/D) \cdot R_k \cdot \gamma_s \qquad S_{IL} = 2 \cdot A_{IL} \cdot (A_Y/D) \cdot \psi_{a,IL} \cdot \gamma_s$$

Tabel H.3 Perhitungan Stress Range *(In-line)*

In-Line							
L aktual	L effektif	AIL	Ay/D	**r**	ΨIL	SIL	SIL (Mpa)
44	23,675	1,60E+09	0,0486	0,99	1	2,03E+08	202,55
39	26,811	1,25E+09	0,0486	0,99	1	1,58E+08	157,95
40	26,122	1,32E+09	0,0486	0,99	1	1,66E+08	166,39
42	24,841	1,46E+09	0,0486	0,99	1	1,84E+08	184,00
36	28,511	1,11E+09	0,0480	0,99	1	1,38E+08	138,16
36	28,511	1,11E+09	0,0480	0,99	1	1,38E+08	138,16
37	28,129	1,14E+09	0,0484	0,99	1	1,43E+08	143,05
38	27,536	1,19E+09	0,0486	0,99	1	1,50E+08	149,75
39	26,476	1,28E+09	0,0483	0,99	1	1,61E+08	160,91
37	28,299	1,12E+09	0,0486	0,99	1	1,42E+08	141,77
43	24,230	1,53E+09	0,0486	0,99	1	1,93E+08	193,33
42	24,841	1,46E+09	0,0486	0,99	1	1,84E+08	183,99
39	26,476	1,28E+09	0,0483	0,99	1	1,61E+08	160,90
40	25,796	1,35E+09	0,0483	0,99	1	1,70E+08	169,50
36	28,512	1,11E+09	0,0480	0,99	1	1,38E+08	138,15
38	26,706	1,26E+09	0,0478	0,99	1	1,57E+08	156,60
37	28,299	1,12E+09	0,0486	0,99	1	1,42E+08	141,77
36	28,929	1,07E+09	0,0484	0,99	1	1,35E+08	135,24
36	29,087	1,06E+09	0,0486	0,99	1	1,34E+08	134,15
36	29,105	1,06E+09	0,0486	0,99	1	1,34E+08	134,03
39	26,811	1,25E+09	0,0486	0,99	1	1,58E+08	157,94
37	28,300	1,12E+09	0,0486	0,99	1	1,42E+08	141,77
36	28,512	1,11E+09	0,0480	0,99	1	1,38E+08	138,15
37	28,300	1,12E+09	0,0486	0,99	1	1,42E+08	141,77

Tabel H.4 Perhitungan Stress Range (*Crossflow)*

Cross Flow							
L aktual	L effektif	ACF	Az/D	Ksd	Rk	SCF	SCF (Mpa)
44	23,753	1,59E+09	0,0800	0,37	0,816	2,70E+08	270,26
39	26,843	1,25E+09	0,0800	0,37	0,816	2,12E+08	211,63
40	26,161	1,31E+09	0,0800	0,37	0,816	2,23E+08	222,81
42	24,897	1,45E+09	0,0800	0,37	0,816	2,46E+08	246,01
36	28,529	1,10E+09	0,0600	0,38	0,808	1,39E+08	139,18
36	28,529	1,10E+09	0,0600	0,38	0,808	1,39E+08	139,18
37	28,151	1,13E+09	0,0700	0,37	0,813	1,68E+08	167,91
38	27,562	1,18E+09	0,0800	0,37	0,816	2,01E+08	200,73
39	26,508	1,28E+09	0,0700	0,38	0,811	1,89E+08	188,80
37	28,321	1,12E+09	0,0800	0,37	0,816	1,90E+08	190,12
43	24,297	1,52E+09	0,0800	0,37	0,815	2,58E+08	258,25
42	24,897	1,45E+09	0,0800	0,37	0,816	2,46E+08	246,01
39	26,508	1,28E+09	0,0700	0,38	0,811	1,89E+08	188,80
40	25,834	1,35E+09	0,0700	0,38	0,811	1,99E+08	198,78
36	28,529	1,10E+09	0,0600	0,38	0,808	1,39E+08	139,18
38	26,732	1,26E+09	0,0500	0,39	0,804	1,31E+08	131,47
37	28,321	1,12E+09	0,0800	0,37	0,816	1,90E+08	190,12
36	28,947	1,07E+09	0,0700	0,37	0,813	1,59E+08	158,80
36	29,105	1,06E+09	0,0800	0,37	0,815	1,80E+08	179,96
36	29,122	1,06E+09	0,0800	0,37	0,816	1,80E+08	179,80
39	26,843	1,25E+09	0,0800	0,37	0,816	2,12E+08	211,63
37	28,321	1,12E+09	0,0800	0,37	0,816	1,90E+08	190,12
36	28,529	1,10E+09	0,0600	0,38	0,808	1,39E+08	139,18
37	28,321	1,12E+09	0,0700	0,37	0,816	1,66E+08	166,35

LAMPIRAN I

PERHITUNGAN *FATIGUE LIFE*

LAMPIRAN I

I.1 Menentukan Nilai Siklus (n_i) VIV pada Pipa

1. Perhitungan Frekuensi *vortex Shedding*

$$S_t = \left(\frac{0.2}{(C_D)^{3/4}}\right)$$

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

2. Akumulasi Siklus VIV pada Pipa

$$n_i = f_s(P_i)$$

Tabel I.1 Frekuensi Siklus VIV *(in-line)*

Panjang Span	Strouhal Number	Frekuensi *Vortex Shedding*	Jumlah Siklus (n)
44,00	0,261	0,389	7,60E+04
39,00	0,261	0,391	7,64E+04
40,00	0,261	0,389	7,60E+04
42,00	0,261	0,361	7,06E+04
36,00	0,261	0,350	6,85E+04
36,00	0,261	0,350	6,85E+04
37,00	0,261	0,356	6,96E+04
38,00	0,261	0,363	7,10E+04
39,00	0,261	0,353	6,91E+04
37,00	0,261	0,367	7,18E+04
43,00	0,261	0,359	7,01E+04
42,00	0,261	0,373	7,29E+04
39,00	0,261	0,403	7,89E+04
40,00	0,261	0,403	7,89E+04
36,00	0,261	0,400	7,83E+04
38,00	0,261	0,397	7,77E+04
37,00	0,261	0,413	8,08E+04
36,00	0,261	0,406	7,94E+04
36,00	0,261	0,409	7,99E+04
36,00	0,261	0,411	8,04E+04
39,00	0,261	0,411	8,04E+04
37,00	0,261	0,441	8,62E+04
36,00	0,261	0,400	7,83E+04
37,00	0,261	0,435	8,50E+04

Tabel I.2 Frekuensi Siklus VIV (*Crossflow)*

Panjang Span	Strouhal Number	Frekuensi *Vortex Shedding*	Jumlah Siklus (n)
44,00	0,261	0,389	7,60E+04
39,00	0,261	0,391	7,64E+04
40,00	0,261	0,389	7,60E+04
42,00	0,261	0,361	7,06E+04
36,00	0,261	0,350	6,85E+04
36,00	0,261	0,350	6,85E+04
37,00	0,261	0,356	6,96E+04
38,00	0,261	0,363	7,10E+04
39,00	0,261	0,353	6,91E+04
37,00	0,261	0,367	7,18E+04
43,00	0,261	0,359	7,01E+04
42,00	0,261	0,373	7,29E+04
39,00	0,261	0,403	7,89E+04
40,00	0,261	0,403	7,89E+04
36,00	0,261	0,400	7,83E+04
38,00	0,261	0,397	7,77E+04
37,00	0,261	0,413	8,08E+04
36,00	0,261	0,406	7,94E+04
36,00	0,261	0,409	7,99E+04
36,00	0,261	0,411	8,04E+04
39,00	0,261	0,411	8,04E+04
37,00	0,261	0,441	8,62E+04
36,00	0,261	0,400	7,83E+04
37,00	0,261	0,435	8,50E+04

I.2 Menentukan Nilai Siklus Tegangan (N_i) VIV pada Pipa

Tabel I.3 Parameter nilai Siklus Tegangan (DNV RP C 203)

Parameter	Notasi	Nilai
Eksponen S-N Curve	m	3
S-N Curve Jenis Pipa	-	D
Log A	-	11,764
A	-	5.1×10^{10}

Perhitungan nilai siklus tegangan adalah sebagai berikut:

$$N_i = A.Si^{-m}$$

$$= 5.1 \times 10^{10} . S_i^{-3}$$

Tabel I.4 Perhitungan Nilai Siklus Tegangan (*In-Line*)

Panjang Span (m)	Tegangan Si	n	A Log A	m	Ni
44,00	202,55	7,60E+04	5,08E+10	3	6,11E+03
39,00	157,95	7,64E+04	5,08E+10	3	1,29E+04
40,00	166,39	7,60E+04	5,08E+10	3	1,10E+04
42,00	184,00	7,06E+04	5,08E+10	3	8,15E+03
36,00	138,16	6,85E+04	5,08E+10	3	1,92E+04
36,00	138,16	6,85E+04	5,08E+10	3	1,92E+04
37,00	143,05	6,96E+04	5,08E+10	3	1,73E+04
38,00	149,75	7,10E+04	5,08E+10	3	1,51E+04
39,00	160,91	6,91E+04	5,08E+10	3	1,22E+04
37,00	141,77	7,18E+04	5,08E+10	3	1,78E+04
43,00	193,33	7,01E+04	5,08E+10	3	7,03E+03
42,00	183,99	7,29E+04	5,08E+10	3	8,15E+03
39,00	160,90	7,89E+04	5,08E+10	3	1,22E+04
40,00	169,50	7,89E+04	5,08E+10	3	1,04E+04
36,00	138,15	7,83E+04	5,08E+10	3	1,93E+04
38,00	156,60	7,77E+04	5,08E+10	3	1,32E+04
37,00	141,77	8,08E+04	5,08E+10	3	1,78E+04
36,00	135,24	7,94E+04	5,08E+10	3	2,05E+04
36,00	134,15	7,99E+04	5,08E+10	3	2,10E+04
36,00	134,03	8,04E+04	5,08E+10	3	2,11E+04
39,00	157,94	8,04E+04	5,08E+10	3	1,29E+04
37,00	141,77	8,62E+04	5,08E+10	3	1,78E+04
36,00	138,15	7,83E+04	5,08E+10	3	1,93E+04
37,00	141,77	8,50E+04	5,08E+10	3	1,78E+04

Tabel I.5 Perhitungan nilai Siklus Tegangan (*cross-flow*)

Panjang Span (m)	Tegangan Scf	n	A Log A	m	Ni
44,00	270,26	7,60E+04	5,08E+10	3	2,57E+03
39,00	211,63	7,64E+04	5,08E+10	3	5,36E+03
40,00	222,81	7,60E+04	5,08E+10	3	4,59E+03
42,00	246,01	7,06E+04	5,08E+10	3	3,41E+03
36,00	139,18	6,85E+04	5,08E+10	3	1,88E+04
36,00	139,18	6,85E+04	5,08E+10	3	1,88E+04
37,00	167,91	6,96E+04	5,08E+10	3	1,07E+04
38,00	200,73	7,10E+04	5,08E+10	3	6,28E+03
39,00	188,80	6,91E+04	5,08E+10	3	7,54E+03
37,00	190,12	7,18E+04	5,08E+10	3	7,39E+03

43,00	258,25	7,01E+04	5,08E+10	3	2,95E+03

Tabel I.5 Perhitungan Nilai Siklus Tegangan (*Crossflow)* Lanjutan

Panjang Span (m)	Tegangan Scf	n	A Log A	m	Ni
42,00	246,01	7,29E+04	5,08E+10	3	3,41E+03
39,00	188,80	7,89E+04	5,08E+10	3	7,54E+03
40,00	198,78	7,89E+04	5,08E+10	3	6,46E+03
36,00	139,18	7,83E+04	5,08E+10	3	1,88E+04
38,00	131,47	7,77E+04	5,08E+10	3	2,23E+04
37,00	190,12	8,08E+04	5,08E+10	3	7,39E+03
36,00	158,80	7,94E+04	5,08E+10	3	1,27E+04
36,00	179,96	7,99E+04	5,08E+10	3	8,71E+03
36,00	179,80	8,04E+04	5,08E+10	3	8,73E+03
39,00	211,63	8,04E+04	5,08E+10	3	5,36E+03
37,00	190,12	8,62E+04	5,08E+10	3	7,39E+03
36,00	139,18	7,83E+04	5,08E+10	3	1,88E+04
37,00	166,35	8,50E+04	5,08E+10	3	1,10E+04

I.3 Menentukan Nilai *Fatigue Damage*

Fatigue Damage (DNV RP C-203)

$$D_{exposure} = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

I.4 Menentukan *Fatigue Life*

$$T_{life} = \sum \quad \frac{T_{exposure} \cdot \eta}{D_{fat}}$$

Tabel I.6 Perhiutgan Nilai *Fatigue Damage* dan *Fatigue Life* (*In-Line)*

Panjang Span	n	Ni	Fatigue Damage	Fatigue Life
				Tahun
44,00	7,60E+04	6,11E+03	12,4	1,6
39,00	7,64E+04	1,29E+04	5,9	3,4
40,00	7,60E+04	1,10E+04	6,9	2,9
42,00	7,06E+04	8,15E+03	8,7	2,3
36,00	6,85E+04	1,92E+04	3,6	5,6
36,00	6,85E+04	1,92E+04	3,6	5,6
37,00	6,96E+04	1,73E+04	4,0	5,0
38,00	7,10E+04	1,51E+04	4,7	4,3
39,00	6,91E+04	1,22E+04	5,7	3,5
37,00	7,18E+04	1,78E+04	4,0	5,0
43,00	7,01E+04	7,03E+03	10,0	2,0
42,00	7,29E+04	8,15E+03	8,9	2,2
39,00	7,89E+04	1,22E+04	6,5	3,1
40,00	7,89E+04	1,04E+04	7,6	2,6
36,00	7,83E+04	1,93E+04	4,1	4,9
38,00	7,77E+04	1,32E+04	5,9	3,4
37,00	8,08E+04	1,78E+04	4,5	4,4
36,00	7,94E+04	2,05E+04	3,9	5,2
36,00	7,99E+04	2,10E+04	3,8	5,3
36,00	8,04E+04	2,11E+04	3,8	5,2
39,00	8,04E+04	1,29E+04	6,2	3,2
37,00	8,62E+04	1,78E+04	4,8	4,1
36,00	7,83E+04	1,93E+04	4,1	4,9
37,00	8,50E+04	1,78E+04	4,8	4,2

Tabel I.6 Perhitungan nilai *fatigue damage* dan *fatigue life* (*Cross-flow*)

Panjang Span (m)	n	Ni	Fatigue Damage	Fatigue Life
				Tahun
44,00	7,60E+04	2,57E+03	29,6	0,68
39,00	7,64E+04	5,36E+03	14,3	1,40
40,00	7,60E+04	4,59E+03	16,6	1,21
42,00	7,06E+04	3,41E+03	20,7	0,97
36,00	6,85E+04	1,88E+04	3,6	5,50
36,00	6,85E+04	1,88E+04	3,6	5,50

Tabel I.6 Perhitungan nilai *fatigue damage* dan *fatigue life* (*Cross-flow*) lanjutan

Panjang Span (m)	n	Ni	Fatigue Damage	Fatigue Life
				Tahun
37,00	6,96E+04	1,07E+04	6,5	3,08
38,00	7,10E+04	6,28E+03	11,3	1,77
39,00	6,91E+04	7,54E+03	9,2	2,18
37,00	7,18E+04	7,39E+03	9,7	2,06
43,00	7,01E+04	2,95E+03	23,8	0,84
42,00	7,29E+04	3,41E+03	21,4	0,94
39,00	7,89E+04	7,54E+03	10,5	1,91
40,00	7,89E+04	6,46E+03	12,2	1,64
36,00	7,83E+04	1,88E+04	4,2	4,81
38,00	7,77E+04	2,23E+04	3,5	5,75
37,00	8,08E+04	7,39E+03	10,9	1,83
36,00	7,94E+04	1,27E+04	6,3	3,19
36,00	7,99E+04	8,71E+03	9,2	2,18
36,00	8,04E+04	8,73E+03	9,2	2,17
39,00	8,04E+04	5,36E+03	15,0	1,33
37,00	8,62E+04	7,39E+03	11,7	1,71
36,00	7,83E+04	1,88E+04	4,2	4,81
37,00	8,50E+04	1,10E+04	7,7	2,59

LAMPIRAN J

PERHITUNGAN *VON MISES STRESS*

LAMPIRAN J

J.1 Tegangan *Hoop*

1. Perhitungan Tegangan *Hoop*

$$\sigma_h = \begin{cases} (p_i - p_e)\dfrac{D_0}{2t} & untuk \quad \dfrac{D}{t} \geq 30 \\ (p_i - p_e)\dfrac{D_0 - t}{2t} & untuk \ \dfrac{D}{t} < 30 \end{cases}$$

Tabel J.1 Parameter Perhitungan *Hoop Stress*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter luar pipa baja	D_0	0,57	m
Tebal nominal dinding pipa	t_{nom}	0,02	m
Mill Tolerance	t_{mill}	0.003	m
Tebal dinding pipa	t	0.0145	m
Tekanan eksternal	P_e	9,08 x 10^5	Pa
Tekanan internal	P_i	9.75 x 10^6	Pa

Tabel J.2 Perhitungan *Hoop Stress*

TEGANGAN HOOP			
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Tegangan hoop	σ_h	125932665,25	Pa
		125,93	MPa

Tabel J.3 Cek ASME B31.8

CEK ASME B31.8			
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**
Tegangan hoop	σ_h	125,93	MPa
Specified minimum yield strength	SMYS	448	MPa
	σ_h	0.72 SMYS	
	125,93	322,56	
	OK		

J.2 Tegangan *Longitudinal*

1. Perhitungan Tegangan *Longitudinal*

$\sigma_L = \sigma_a + \sigma_b \; atau \; \sigma_a$ í σ_b

Dimana,

σ_L = tegangan *longitudinal* (MPa)

σ_a = tekanan aksial kombinasi (MPa)

σ_b = tekanan bending (MPa)

2. Tegangan Aksial Kombinasi

$$F_r = (F_p + W_{sub})^{1/2}$$

Tabel J.4 Parameter Tegangan Aksial

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tebal dinding pipa	t	0.00145	m
Diameter luar pipa baja	D_0	0.57	m
Diameter dalam pipa	D_i	0.541	m
Luas penampang pipa	A_{st}	0.025	m
Tekanan internal	P_i	9,75E+05	Pa
Gaya tekanan internal	Fp	2,47E+05	N
Berat terendam pipa	W_{sub}	2309,04	N/m

$$\sigma_a = \frac{F_a}{A} + v_{st}\sigma_h + E_{st}\alpha_e(T_1 - T_2)$$

TEGANGAN *THERMAL*					
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**	**Nilai**	**Satuan**
Tegangan *thermal*	σ_t	11625120	Pa	11,63	MPa
TEGANGAN *POISSON*					
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**	**Nilai**	**Satuan**
Tegangan *poisson*	σ_{ps}	37779799,57	Pa	37,78	MPa
TEGANGAN *AKSIAL KOMBINASI*					
Parameter	**Notasi**	**Nilai**	**Satuan**		
Tegangan aksial kombinasi	σ_a	59,15	MPa		

4. Tegangan Bending

$$\sigma_b = \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{Z_a}$$

Tabel J.5 Perhitungan Tegangan *Bending*

TEGANGAN *BENDING*						
Panjang Bentangan Bebas Aktual	Gaya Drag	Momen Maksimum			Tegangan *Bending*	
		M. Vertikal	M. Horizontal	Resultan		
m	N/m	N.m	N.m	N.m	Pa	MPa
44,000	237,306586	372525,629	38285,463	374487,811	109271439,724	109,271
39,000	239,5726099	292671,220	30365,828	294242,292	85856676,529	85,857
40,000	237,306586	307872,421	31640,878	309494,059	90306974,979	90,307
42,000	208,2788921	339429,344	30616,997	340807,394	99443863,046	99,444
36,000	197,592784	249376,661	21340,021	250288,065	73031314,657	73,031
36,000	197,592784	249376,661	21340,021	250288,065	73031314,657	73,031
37,000	203,2936772	263423,340	23192,420	264442,327	77161373,291	77,161
38,000	210,5570789	277854,860	25337,035	279007,685	81411385,156	81,411
39,000	200,5458885	292671,220	25419,191	293773,005	85719743,574	85,720
37,000	214,7615074	263423,340	24500,709	264560,278	77195790,087	77,196
43,000	205,8638786	355785,066	31720,193	357196,282	104225960,930	104,226
42,000	220,3532889	339429,344	32391,933	340971,431	99491727,197	99,492
39,000	253,5500547	292671,220	32137,469	294430,399	85911564,070	85,912
40,000	253,5500547	307872,421	33806,674	309722,971	90373768,910	90,374
36,000	250,2281898	249376,661	27024,644	250836,701	73191400,537	73,191
38,000	246,6329806	277854,860	29678,169	279435,353	81536174,059	81,536
37,000	264,7915769	263423,340	30208,306	265149,765	77367795,839	77,368
36,000	256,6385347	249376,661	27716,962	250912,233	73213440,213	73,213
36,000	259,5253309	249376,661	28028,736	250946,865	73223545,262	73,224
36,000	262,2360271	249376,661	28321,491	250979,732	73233135,492	73,233
39,000	262,2360271	292671,220	33238,416	294552,602	85947221,515	85,947
37,000	297,2164239	263423,340	33907,440	265596,631	77498186,583	77,498
36,000	250,2281898	249376,661	27024,644	250836,701	73191400,537	73,191
37,000	289,7598067	263423,340	33056,765	265489,37	77466888,993	77,467

Tabel J.6 Perhitungan Tegangan Longitudinal

Longitudinal maksimum	0.8 SMYS	Cek ASME B31.8
Mpa	MPa	
217,83	358,40	OK
194,41	358,40	OK
198,86	358,40	OK
208,00	358,40	OK
181,59	358,40	OK
181,59	358,40	OK
185,72	358,40	OK
189,97	358,40	OK
194,28	358,40	OK
185,75	358,40	OK
212,78	358,40	OK
208,05	358,40	OK
194,47	358,40	OK
198,93	358,40	OK
181,75	358,40	OK
190,09	358,40	OK
185,92	358,40	OK
181,77	358,40	OK
181,78	358,40	OK
181,79	358,40	OK
194,50	358,40	OK
186,05	358,40	OK
181,75	358,40	OK
186,02	358,40	OK

J.3 Tegangan *Von Mises* (Ekivalen)

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2 - \sigma_L \sigma_h + 3\tau^2}$$

Tabel J.7 Perhitungan Tegangan Ekivalen (Von Mises)

TEGANGAN VON MISES						
Panjang Bentangan Bebas	**TEGANGAN**			**0.9 SMYS**	**Cek ASME B31.8**	**RASIO**
	Hoop	**Longitudinal**	***Von Mises***			
m	**MPa**	**Mpa**	**MPa**			**MPa**
44,000	125,93	217,83	189,41	403,20	OK	0,47
39,000	125,93	194,41	170,80	403,20	OK	0,42
40,000	125,93	198,86	174,25	403,20	OK	0,43
42,000	125,93	208,00	181,46	403,20	OK	0,45
36,000	125,93	181,59	161,14	403,20	OK	0,40
36,000	125,93	181,59	161,14	403,20	OK	0,40
37,000	125,93	185,72	164,20	403,20	OK	0,41
38,000	125,93	189,97	167,40	403,20	OK	0,42
39,000	125,93	194,28	170,69	403,20	OK	0,42
37,000	125,93	185,75	164,23	403,20	OK	0,41
43,000	125,93	212,78	185,31	403,20	OK	0,46
42,000	125,93	208,05	181,50	403,20	OK	0,45
39,000	125,93	194,47	170,84	403,20	OK	0,42
40,000	125,93	198,93	174,30	403,20	OK	0,43
36,000	125,93	181,75	161,25	403,20	OK	0,40
38,000	125,93	190,09	167,50	403,20	OK	0,42
37,000	125,93	185,92	164,36	403,20	OK	0,41
36,000	125,93	181,77	161,27	403,20	OK	0,40
36,000	125,93	181,78	161,28	403,20	OK	0,40
36,000	125,93	181,79	161,29	403,20	OK	0,40
39,000	125,93	194,50	170,87	403,20	OK	0,42
37,000	125,93	186,05	164,45	403,20	OK	0,41
36,000	125,93	181,75	161,25	403,20	OK	0,40
37,000	125,93	186,02	164,43	403,20	OK	0,41

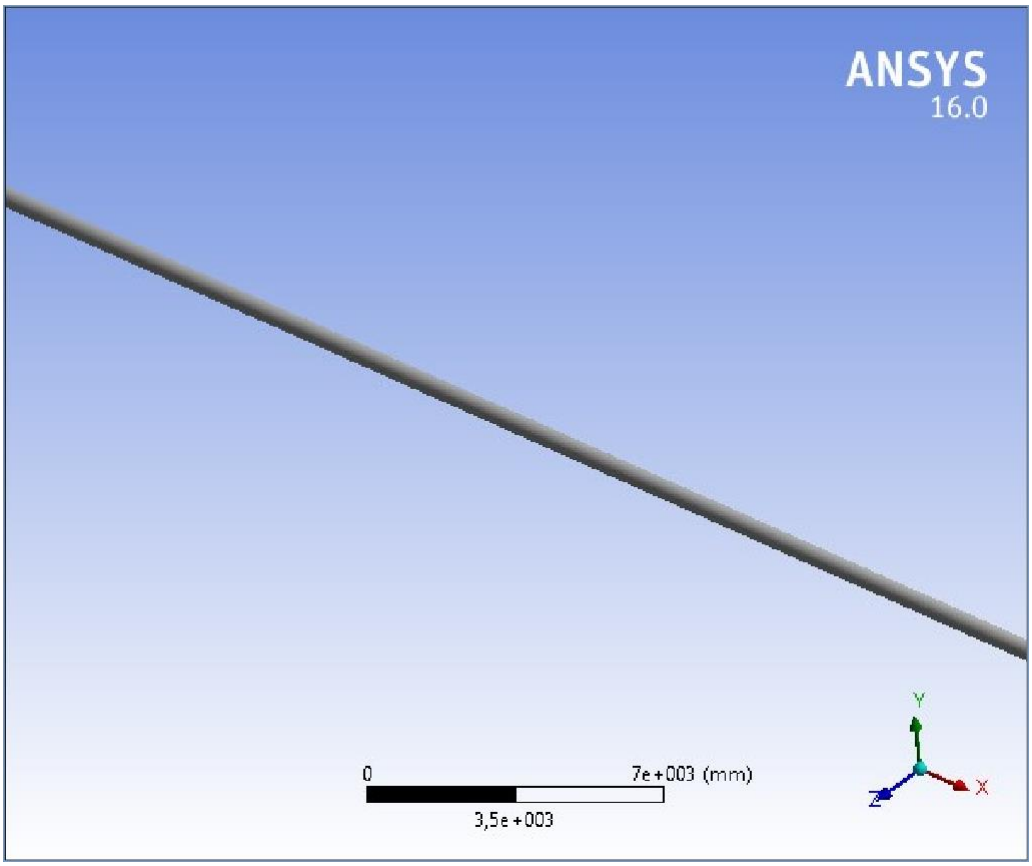
LAMPIRAN K

ANSYS STATIC STRUCTURAL DAN

ANSYS CFX

Project

First Saved	Tuesday, July 14, 2020
Last Saved	Wednesday, July 15, 2020
Product Version	16.0 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



Contents

- Units

- Model (A4)
  - Geometry
    - Solid
  - Coordinate Systems
  - Connections
    - Contacts
  - Mesh
    - Body Sizing
    - Named Selections
  - Static Structural (A5)
    - Analysis Settings
    - Loads
    - Solution (A6)
      - Solution Information
      - Equivalent Stress
      - Stress Probe

- Material Data
  - Structural Steel

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Model (A4)

Geometry

TABLE 2
Model (A4) > Geometry

Object Name	*Geometry*
State	Fully Defined
Definition	
Source	D:\DATA-DATA FERDY\KELAUTAN (H)\TUGAS AKHIR FERDY\FILE TUGAS AKHIR\ANSYS\stativ ferdy_files\dp0\SYS\DM\SYS.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Length X	44000 mm
Length Y	460, mm
Length Z	460, mm
Properties	
Volume	1,2163e+009 mm³
Mass	9548, kg
Scale Factor Value	1,
Statistics	
Bodies	1
Active Bodies	1
Nodes	214158
Elements	31142
Mesh Metric	None
Basic Geometry Options	
Parameters	Yes
Parameter Key	DS

Attributes	No
Named Selections	No
Material Properties	No
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	No
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	No
Compare Parts On Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\DELL\AppData\Local\Temp
Analysis Type	3-D
Decompose Disjoint Geometry	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (A4) > Geometry > Parts

Object Name	*Solid*
State	Meshed
Graphics Properties	
Visible	Yes
Transparency	1
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Length X	44000 mm
Length Y	460, mm
Length Z	460, mm
Properties	
Volume	1,2163e+009 mm³
Mass	9548, kg
Centroid X	36923 mm
Centroid Y	5650,1 mm
Centroid Z	-6,7234e-002 mm
Moment of Inertia Ip1	4,5897e+008 kg·mm²
Moment of Inertia Ip2	1,5337e+012 kg·mm²
Moment of Inertia Ip3	1,5337e+012 kg·mm²
Statistics	
Nodes	214158
Elements	31142
Mesh Metric	None

Coordinate Systems

TABLE 4
Model (A4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	*Global Coordinate System*	*Coordinate System*
State	Fully Defined	
Definition		
Type	Cartesian	
Coordinate System ID	0,	
Coordinate System		Program Controlled
Suppressed		No
Origin		
Origin X	0, mm	36923 mm
Origin Y	0, mm	5420,2 mm

Origin Z	0, mm	-3,2405e-003 mm
Define By		Named Selection
Named Selection		Selection
Directional Vectors		
X Axis Data	[1, 0, 0,]	
Y Axis Data	[0, 1, 0,]	
Z Axis Data	[0, 0, 1,]	
Principal Axis		
Axis		X
Define By		Global X Axis
Orientation About Principal Axis		
Axis		Y
Define By		Default
Transformations		
Base Configuration		Absolute
Transformed Configuration		[36923 5420,2 -3,2405e-003]

Connections

TABLE 5
Model (A4) > Connections

Object Name	*Connections*
State	Fully Defined
Auto Detection	
Generate Automatic Connection On Refresh	Yes
Transparency	
Enabled	Yes

TABLE 6
Model (A4) > Connections > Contacts

Object Name	*Contacts*
State	Fully Defined
Definition	
Connection Type	Contact
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Auto Detection	
Tolerance Type	Slider
Tolerance Slider	0,
Tolerance Value	110,01 mm
Use Range	No
Face/Face	No
Face/Edge	No
Edge/Edge	No
Priority	Include All
Group By	Bodies
Search Across	Bodies
Statistics	
Connections	0
Active Connections	0

Mesh

TABLE 7
Model (A4) > Mesh

Object Name	*Mesh*
State	Solved
Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Coarse

Element Size	65,0 mm
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	361,280 mm
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Patch Independent Options	
Topology Checking	No
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default
Statistics	
Nodes	214158
Elements	31142
Mesh Metric	None

TABLE 8
Model (A4) > Mesh > Mesh Controls

Object Name	*Body Sizing*
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	65, mm
Behavior	Soft

Named Selections

TABLE 9
Model (A4) > Named Selections > Named Selections

Object Name	*Selection*
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
Definition	
Send to Solver	Yes
Visible	Yes
Program Controlled Inflation	Exclude
Statistics	
Type	Manual
Total Selection	2 Faces

Suppressed	0
Used by Mesh Worksheet	No

Static Structural (A5)

TABLE 10
Model (A4) > Analysis

Object Name	*Static Structural (A5)*
State	Solved
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Environment Temperature	22, °C
Generate Input Only	No

TABLE 11
Model (A4) > Static Structural (A5) > Analysis Settings

Object Name	*Analysis Settings*
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	No
Nonlinear Controls	
Newton-Raphson Option	Program Controlled
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	No
Contact Miscellaneous	No
General Miscellaneous	No
Store Results At	All Time Points
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	D:\DATA-DATA FERDY\KELAUTAN (H)\TUGAS AKHIR FERDY\FILE TUGAS AKHIR\ANSYS\stativ ferdy_files\dp0\SYS\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No
Solver Units	Active System
Solver Unit System	nmm

TABLE 12
Model (A4) > Static Structural (A5) > Loads

Object Name	*Fixed Support*	*Support 2*	*DRAG FORCE*	*LIFT FORCE*	*EXTERNAL PRESSURE*	*INTERNAL PRESSURE*	*AXIAL FORCE*	*SUBMERGE WEIGHT*	*VORTEX PRESSURE*
State	Fully Defined								
Scope									
Scoping Method	Geometry Selection								
Geometry	1 Face								
Definition									
Type	Fixed Support		Force		Pressure		Force		Pressure
Suppressed	No								
Define By			Vector		Normal To		Vector		Normal To
Magnitude			237,7 N (ramped)		1,38 MPa (ramped)	3,59 MPa (ramped)	-2,2896e+005 N (ramped)	1,016e+005 N (ramped)	0,2 MPa (ramped)
Direction			Defined				Defined		

FIGURE 1
Model (A4) > Static Structural (A5) > DRAG FORCE

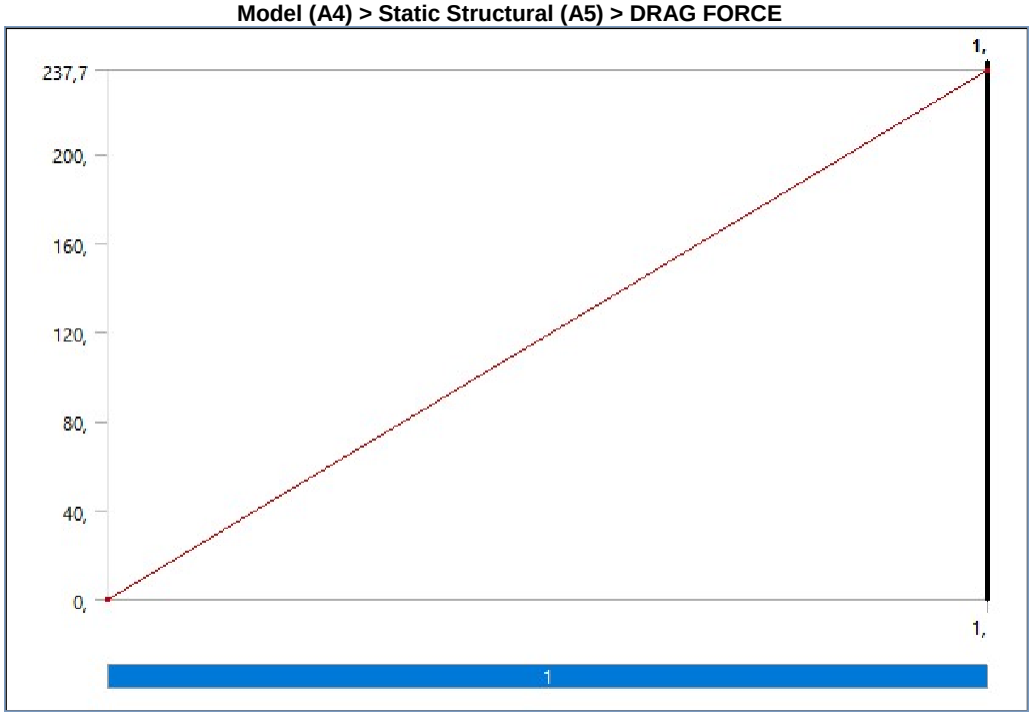


FIGURE 2
Model (A4) > Static Structural (A5) > LIFT FORCE

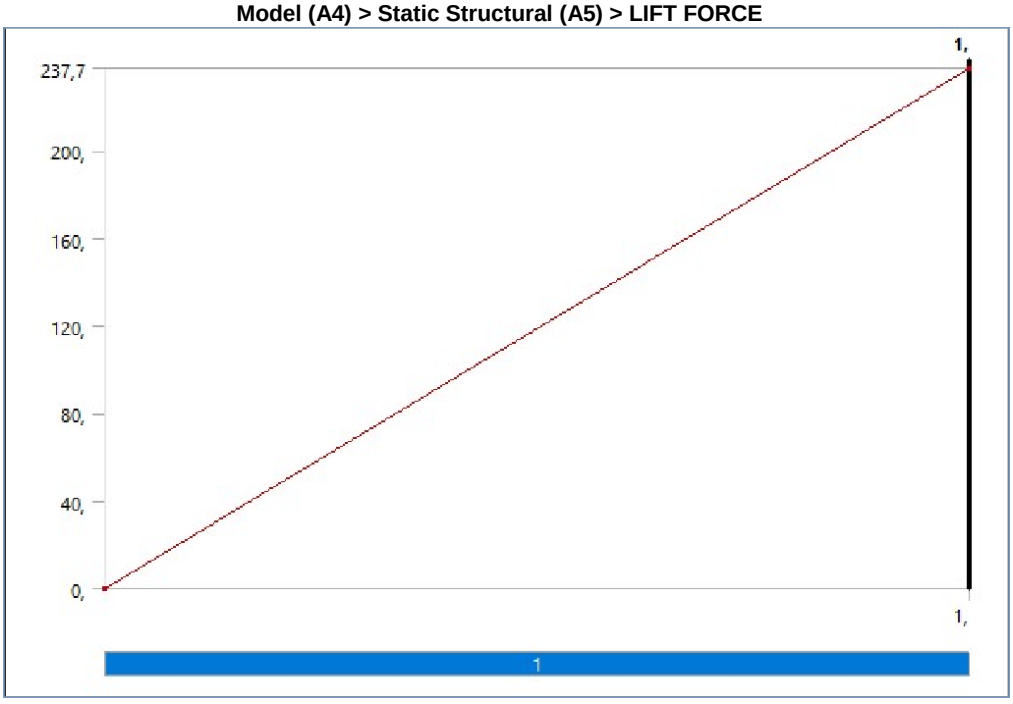


FIGURE 3
Model (A4) > Static Structural (A5) > EXTERNAL PRESSURE

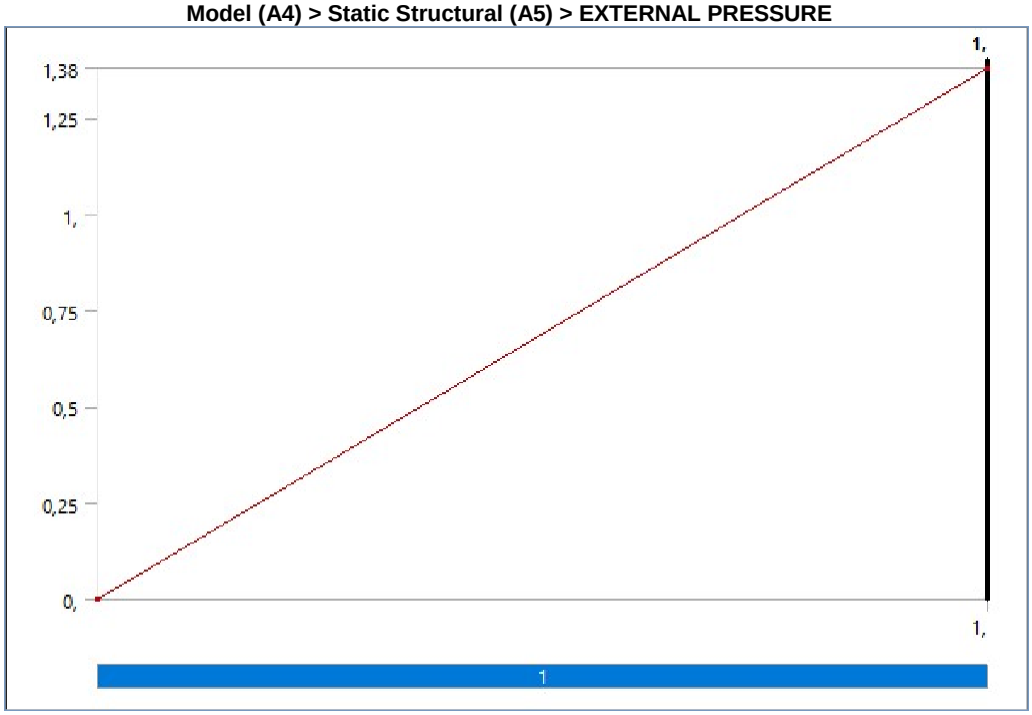


FIGURE 4
Model (A4) > Static Structural (A5) > INTERNAL PRESSURE

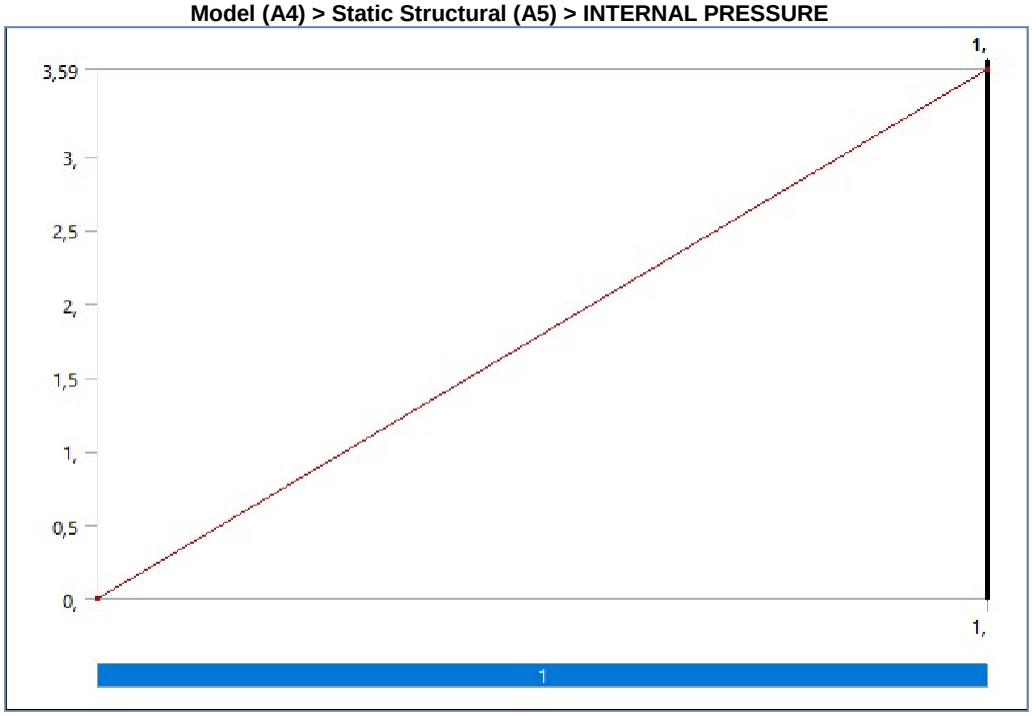


FIGURE 5
Model (A4) > Static Structural (A5) > EFFECTIVE AXIAL FORCE

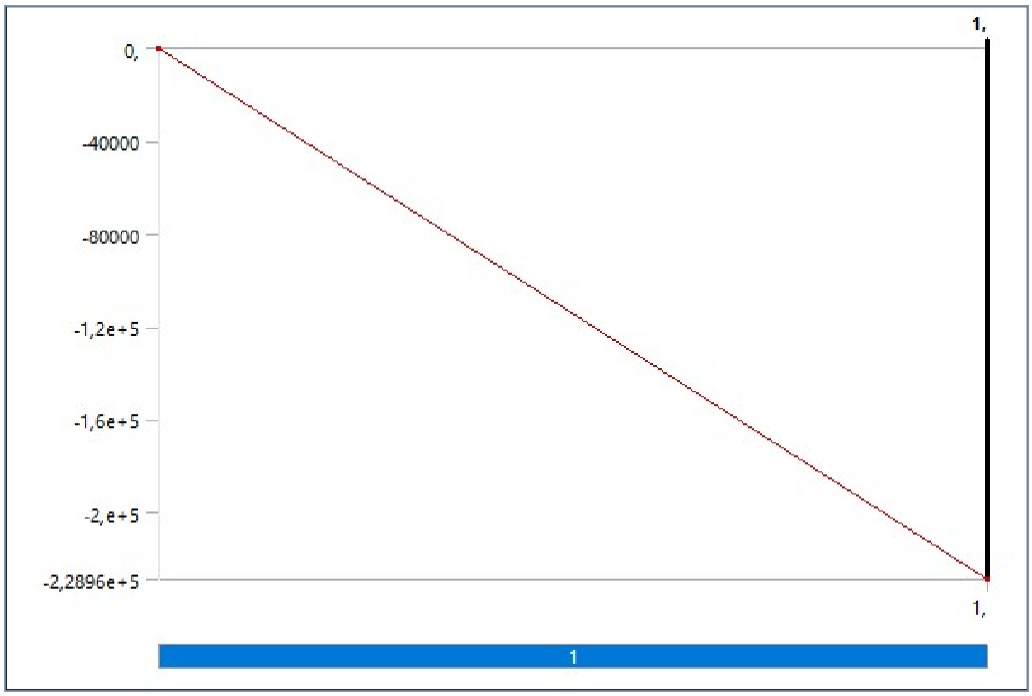


FIGURE 6
Model (A4) > Static Structural (A5) > SUBMERGE WEIGHT

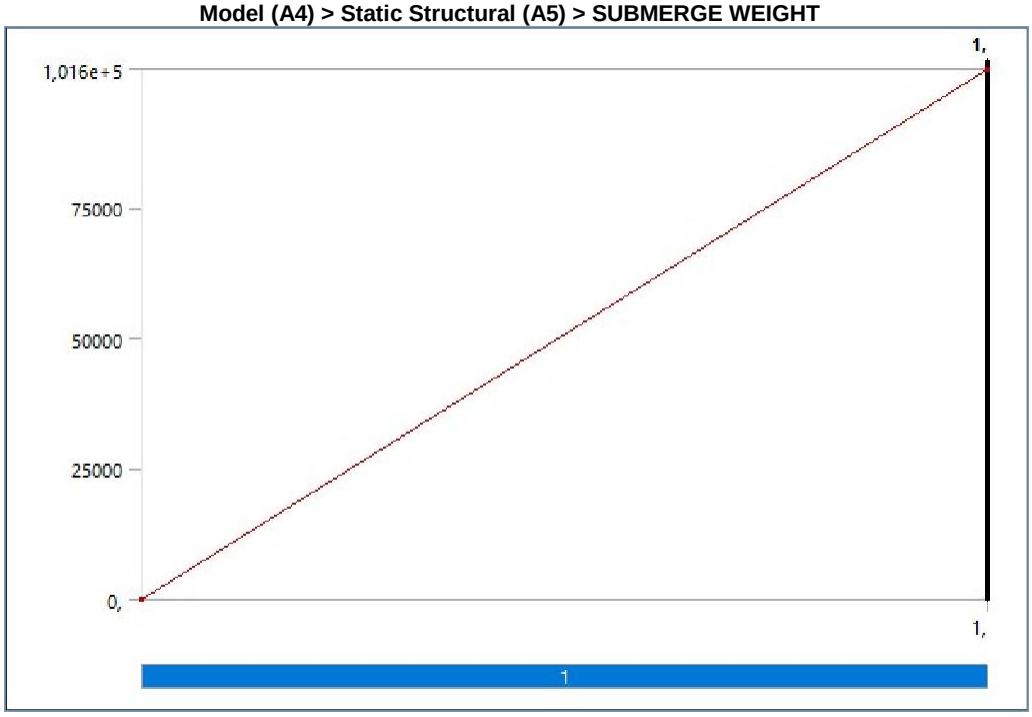
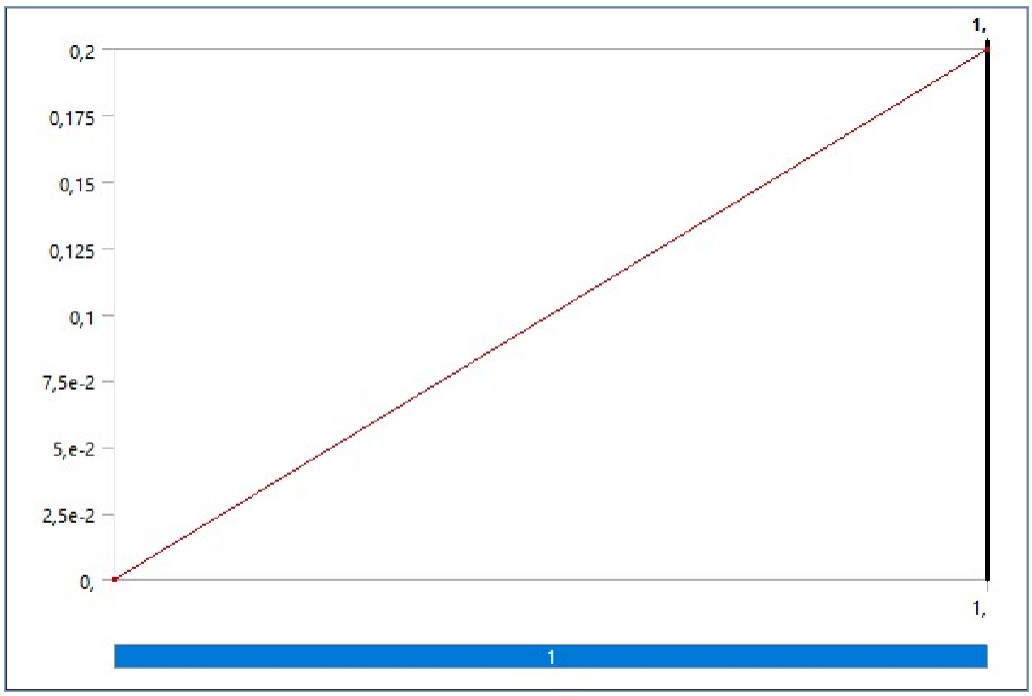


FIGURE 7
Model (A4) > Static Structural (A5) > VORTEX PRESSURE



Solution (A6)

TABLE 13
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution

Object Name	*Solution (A6)*
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
Information	
Status	Done
Post Processing	
Calculate Beam Section Results	No

TABLE 14
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information

Object Name	*Solution Information*
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	4
Update Interval	2,5 s
Display Points	All
FE Connection Visibility	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

TABLE 15
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results

Object Name	*Equivalent Stress*
State	Solved
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time

Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
Results	
Minimum	9,2755 MPa
Maximum	181,27 MPa
Information	
Time	1, s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

FIGURE 8
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress

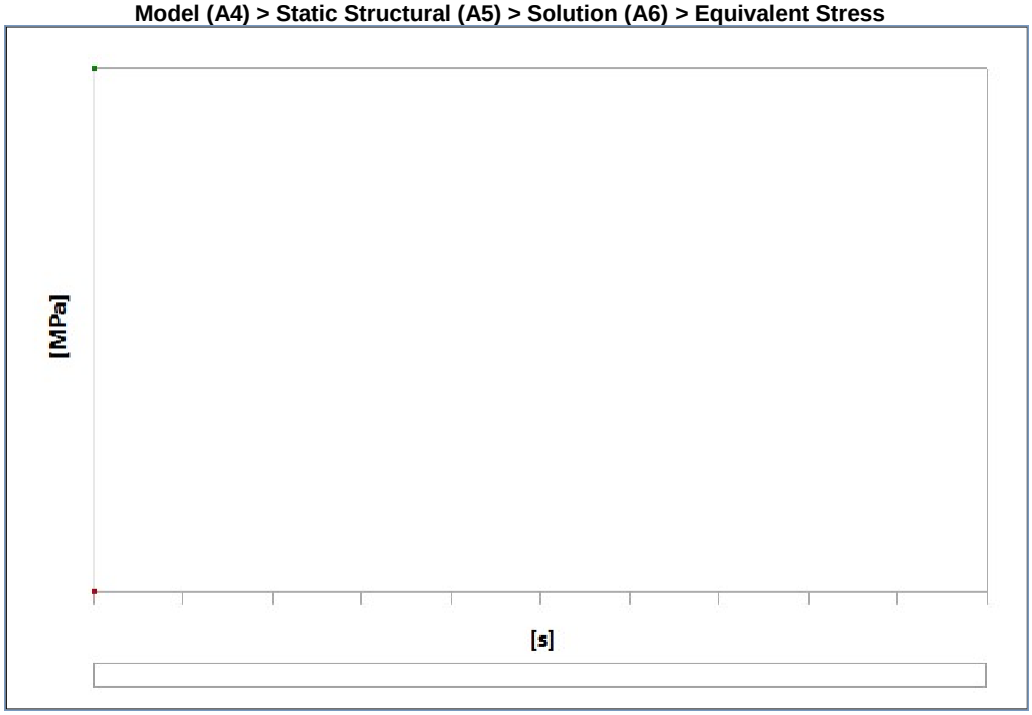


TABLE 16
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
1,	9,2755	181,27

TABLE 17
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Probes

Object Name	*Stress Probe*
State	Solved
Definition	
Type	Stress
Location Method	Coordinate System
Orientation	Coordinate System
Location	Coordinate System
X Coordinate	36923 mm
Y Coordinate	5420,2 mm
Z Coordinate	-3,2405e-003 mm
Suppressed	No
Options	
Result Selection	All
Display Time	End Time
Results	
Normal - X Axis	84,986 MPa
Normal - Y Axis	-1,5935 MPa

Normal - Z Axis	18,605 MPa
XY Shear	3,0936e-006 MPa
YZ Shear	-5,9618e-004 MPa
XZ Shear	-8,7306e-008 MPa
Equivalent (von-Mises)	78,455 MPa
Maximum Principal	84,986 MPa
Middle Principal	18,605 MPa
Minimum Principal	-1,5935 MPa
Intensity	86,579 MPa
Maximum Value Over Time	
Normal - X Axis	84,986 MPa
Normal - Y Axis	-1,5935 MPa
Normal - Z Axis	18,605 MPa
XY Shear	3,0936e-006 MPa
YZ Shear	-5,9618e-004 MPa
XZ Shear	-8,7306e-008 MPa
Equivalent (von-Mises)	78,455 MPa
Maximum Principal	84,986 MPa
Middle Principal	18,605 MPa
Minimum Principal	-1,5935 MPa
Intensity	86,579 MPa
Minimum Value Over Time	
Normal - X Axis	84,986 MPa
Normal - Y Axis	-1,5935 MPa
Normal - Z Axis	18,605 MPa
XY Shear	3,0936e-006 MPa
YZ Shear	-5,9618e-004 MPa
XZ Shear	-8,7306e-008 MPa
Equivalent (von-Mises)	78,455 MPa
Maximum Principal	84,986 MPa
Middle Principal	18,605 MPa
Minimum Principal	-1,5935 MPa
Intensity	86,579 MPa
Information	
Time	1, s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

FIGURE 9
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Stress Probe

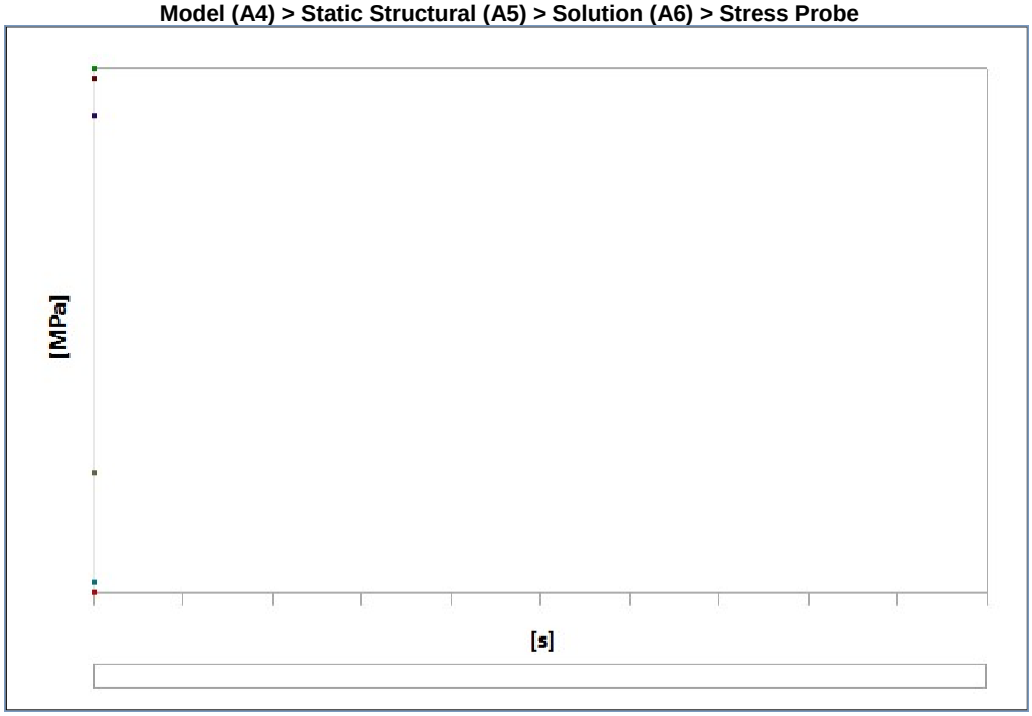


TABLE 18Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Stress Probe

Time [s]	Stress Probe (NormX) [MPa]	Stress Probe (NormY) [MPa]	Stress Probe (NormZ) [MPa]	Stress Probe (ShearXY) [MPa]	Stress Probe (ShearYZ) [MPa]	Stress Probe (ShearXZ) [MPa]	Stress Probe (Equivalent (von-Mises)) [MPa]	Stress Probe (Maximum Principal) [MPa]	Stress Probe (Middle Principal) [MPa]	Stress Probe (Minimum Principal) [MPa]	Stress Probe (Intensity) [MPa]
1,	84,986	-1,5935	18,605	3,0936e-006	-5,9618e-004	-8,7306e-008	78,455	84,986	18,605	-1,5935	86,579

Material Data

Structural Steel

TABLE 19
Structural Steel > Constants

Density	7,85e-006 kg mm^-3
Coefficient of Thermal Expansion	1,2e-005 C^-1
Specific Heat	4,34e+005 mJ kg^-1 C^-1
Thermal Conductivity	6,05e-002 W mm^-1 C^-1
Resistivity	1,7e-004 ohm mm

TABLE 20
Structural Steel > Compressive Ultimate Strength

TABLE 21
Structural Steel > Compressive Yield Strength

TABLE 22
Structural Steel > Tensile Yield Strength

TABLE 23
Structural Steel > Tensile Ultimate Strength

TABLE 24
Structural Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

TABLE 25
Structural Steel > Alternating Stress Mean Stress

Alternating Stress MPa	Cycles	Mean Stress MPa
3999,	10,	0,
2827,	20,	0,
1896,	50,	0,
1413,	100,	0,
1069,	200,	0,
441,	2000,	0,
262,	10000	0,
214,	20000	0,
138,	1,e+005	0,
114,	2,e+005	0,
86,2	1,e+006	0,

TABLE 26
Structural Steel > Strain-Life Parameters

Strength Coefficient MPa	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient MPa	Cyclic Strain Hardening Exponent
920,	-0,106	0,213	-0,47	1000,	0,2

TABLE 27
Structural Steel > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa
	2,e+005	0,3	1,6667e+005	76923

TABLE 28
Structural Steel > Isotropic Relative Permeability

[redacted]

Title

Generic Report

Author

Ferdy Adityawan

Date

2020/08/03 09:51:28

Contents

1. File Report
   Table 1 File Information for CFX
2. Mesh Report
   Table 2 Mesh Information for CFX
   Table 3 Mesh Statistics for CFX
3. Physics Report
   Table 4 Domain Physics for CFX
   Table 5 Boundary Physics for CFX
4. Solution Report
   Table 6 Boundary Flows for CFX
   Table 7 Forces and Torques for CFX
5. Pictures
   Figure 1 Iso View of Wireframe

---

1. File Report

Table 1. File Information for CFX

Case	CFX
File Path	D:\DATA-DATA FERDY\KELAUTAN (H)\TUGAS AKHIR FERDY\FILE TUGAS AKHIR\ANSYS\pipa 44 meter_files\dp0\CFX\CFX\Fluid Flow CFX_005.res
File Date	03 July 2020
File Time	10:07:28 PM
File Type	CFX5
File Version	16.0

2. Mesh Report

Table 2. Mesh Information for CFX

Domain	Nodes	Elements	Tetrahedra	Wedges	Pyramids	Hexahedra	Polyhedra
Solid	24654	13478	0	2344	0	11134	0
fluid	157025	839811	839811	0	0	0	0
All Domains	181679	853289	839811	2344	0	11134	0

Table 3. Mesh Statistics for CFX

Domain	Minimum Face Angle	Maximum Face Angle	Maximum Edge Length Ratio	Maximum Element Volume Ratio	Connectivity Range	
Solid	20.3628 [degree]	164.949 [degree]	3.77368	2.38708	2	6
fluid	15.9777 [degree]	126.101 [degree]	3.62753	16.8861	4	42
All Domains	15.9777 [degree]	164.949 [degree]	3.77368	16.8861	2	42

3. Physics Report

Table 4. Domain Physics for CFX

Domain - Solid	
Type	Solid
Location	B14
Settings	
Domain Motion	Rotating
Angular Velocity	2.5000e-01 [radian s^-1]
Axis Definition	Coordinate Axis
Rotation Axis	Coord 0.1
Domain - fluid	
Type	Fluid
Location	B54
Materials	
Water	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
Settings	
Buoyancy Model	Non Buoyant
Domain Motion	Stationary
Reference Pressure	3.0000e+00 [atm]
Heat Transfer Model	Isothermal
Fluid Temperature	3.0000e+01 [C]
Turbulence Model	k epsilon
Turbulent Wall Functions	Scalable
Domain Interface - Default Fluid SolidInterface	
Boundary List1	Default Fluid Solid Interface Side 1
Boundary List2	Default Fluid Solid Interface Side 2
Interface Type	Fluid Solid
Settings	
Interface Models	General Connection
Mesh Connection	Automatic

Table 5. Boundary Physics for CFX

Domain	**Boundaries**	
Solid	**Boundary - Default Fluid Solid Interface Side1**	
	Type	INTERFACE
	Location	F15.14, F16.14, F17.14, F18.14
	Settings	
	Heat Transfer	Adiabatic

fluid		
	Boundary - inlet	
	Type	INLET
	Location	F56.54
	Settings	
	Flow Regime	Subsonic
	Mass And Momentum	Normal Speed
	Normal Speed	5.0000e-01 [m s^-1]
	Turbulence	Intensity and Eddy Viscosity Ratio
	Eddy Viscosity Ratio	1.0000e+01
	Fractional Intensity	5.0000e-02
	Boundary - Default Fluid Solid Interface Side2	
	Type	INTERFACE
	Location	F61.54, F62.54, F63.54, F64.54
	Settings	
	Mass And Momentum	No Slip Wall
	Wall Roughness	Smooth Wall
	Boundary - outlet	
	Type	OUTLET
	Location	F60.54
	Settings	
	Flow Regime	Subsonic
	Mass And Momentum	Average Static Pressure
	Pressure Profile Blend	5.0000e-02
	Relative Pressure	2.0000e+04 [Pa]
	Pressure Averaging	Average Over Whole Outlet
	Boundary - wall	
	Type	WALL
	Location	F55.54, F57.54, F58.54
	Settings	
	Mass And Momentum	No Slip Wall
	Wall Roughness	Smooth Wall
	Boundary - wall1	
	Type	WALL
	Location	F59.54
	Settings	
	Mass And Momentum	Free Slip Wall

4. Solution Report

Table 6. Boundary Flows for CFX

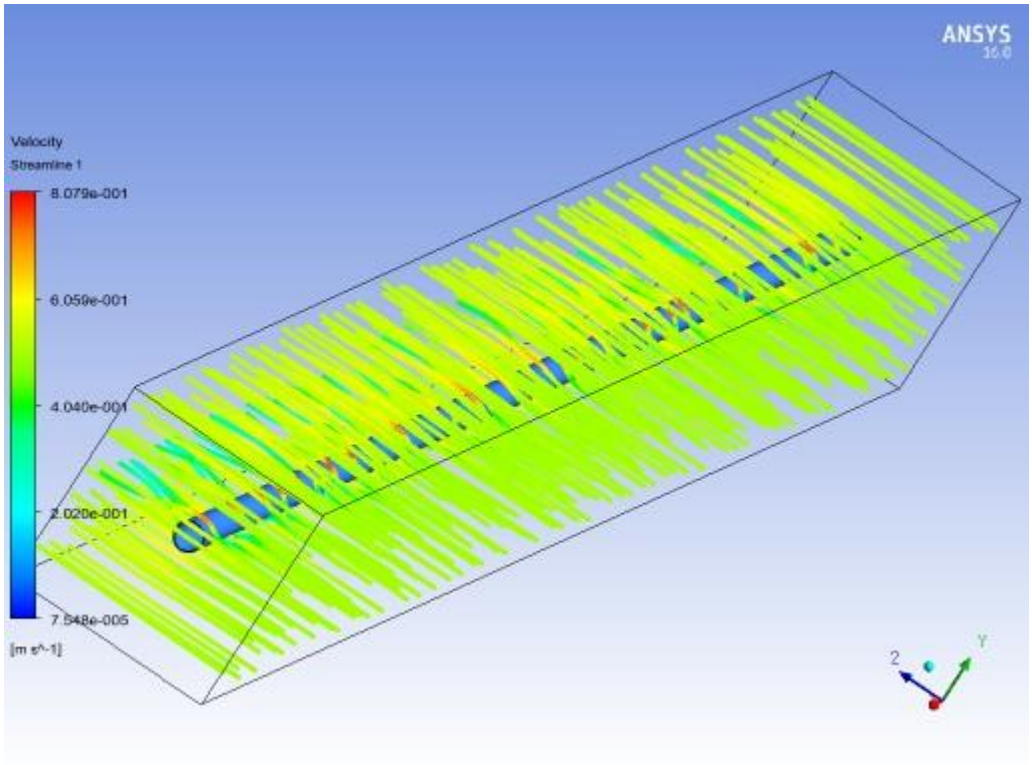
Location	Type	Mass Flow	Momentum		
			X	Y	Z
Default Fluid Solid Interface Side 2 (fluid)	Boundary	0.0000e+00	7.6835e-03	-4.3081e+02	-2.1332e+03
inlet (fluid)	Boundary	7.6055e+04	3.4266e-06	-5.2161e-05	3.0921e+06
outlet (fluid)	Boundary	-7.6055e+04	4.7162e+00	2.5191e+02	-3.0899e+06
wall1 (fluid)	Boundary	0.0000e+00	0.0000e+00	3.0512e+06	0.0000e+00
wall (fluid)	Boundary	0.0000e+00	-4.6719e+00	-3.0511e+06	-7.1018e+01

Table 7. Forces and Torques for CFX

Location	Type	X	Y	Z
Default Fluid Solid InterfaceSide 1	Pressure Force	Undefined	Undefined	Undefined
	Viscous Force	Undefined	Undefined	Undefined
	Total Force	Undefined	Undefined	Undefined
	Pressure Torque	Undefined	Undefined	Undefined
	Viscous Torque	Undefined	Undefined	Undefined
	Total Torque	Undefined	Undefined	Undefined
Default Fluid Solid InterfaceSide 2	Pressure Force	-2.0339e-02	4.3199e+02	2.1149e+03
	Viscous Force	1.1012e-02	-1.4021e-02	1.8361e+01
	Total Force	-9.3265e-03	4.3198e+02	2.1333e+03
	Pressure Torque	1.1949e+04	-7.8194e+04	1.6365e+04
	Viscous Torque	1.0417e+02	-6.7927e+02	-1.0167e+00
	Total Torque	1.2053e+04	-7.8873e+04	1.6364e+04
wall	Pressure Force	4.7656e+00	3.0511e+06	0.0000e+00
	Viscous Force	-5.5020e-03	4.9917e-03	7.1018e+01
	Total Force	4.7601e+00	3.0511e+06	7.1018e+01
	Pressure Torque	8.9696e+02	-2.8755e+00	1.1265e+08
	Viscous Torque	5.0372e+02	-2.6236e+03	1.9093e-01
	Total Torque	1.4007e+03	-2.6265e+03	1.1265e+08
wall1	Pressure Force	0.0000e+00	-3.0512e+06	0.0000e+00
	Viscous Force	0.0000e+00	-4.1272e-03	0.0000e+00
	Total Force	0.0000e+00	-3.0512e+06	0.0000e+00
	Pressure Torque	-1.0497e+03	0.0000e+00	-1.1266e+08
	Viscous Torque	-1.1466e-02	0.0000e+00	-1.6320e-01
	Total Torque	-1.0497e+03	0.0000e+00	-1.1266e+08

5. Pictures

Figure 1. Iso View of Wireframe



BIODATA PENULIS

Ferdy Adityawan lahir di Jakarta pada tanggal 16 OKtober 1998. Penulis menjaladi SD selama 6 Tahun di SDN IKIP Rawamangun dan melnajutkan pendidikan di SMP Islam Al-Azhar Rawamangun 12. Selesai pendidikan SMP penulis menlanjutkan ke jenjang SMA, yaitu di SMA Labschool Jakarta. Penulis terpilih menjadi mahasiswa Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember lewat jalur SBMPTN. Dalam perkuliahaan penulis aktif berorganisasi di dalam jurusan maupun di luar jurusan. Untuk di dalam jurusan penulis mengikuti organisasi himpunan sedangkan di luar jurusan penulis mengikuti organisasasi seperti *Society of Petroleum Engineer* (SPE). Pada Tahun ke 4 penulis telah menyelesaikan tugasnya sebagai wakil ketua acara OCEANO yaitu acara terbesar dari Jurusan Teknik Kelautan FTK-ITS. Selain aktif berorganisasi penulis juga beberapa kali mengikuti komeptitisi *Oil Rig Deisgn Comepetition* (ORDC) untuk taraf nasional maupun internasional. Penghargaan terbesar penulis adalah sebagai 4 besar dalam kompetitisi (ORDC). Penulis dalam masa kuliah mendaptkan kesempatan untuk bisa Kerja Praktek di Kangean Energi Indonesia Ltd. Dalam Kerja Praktek penulis melakukan pembelajaran untuk membuat suatu proyek *subsea facility* yang dimulai dari tahap perencanaan sampai tahap instalasi.

Narahubung:

Email : ferdy.adityawan@gmail.com