



TUGAS AKHIR (MO 184804)

ANALISIS LOCAL BUCKLING PIPA BAWAH LAUT DENGAN
FREE SPAN PADA KRITERIA *ULTIMATE LIMIT STATE* (STUDI
KASUS: MELIWIS *SUBSEA PIPELINE*)

NOVIA CANDRA WAHYUNI

NRP. 0431154000067

Dosen Pembimbing

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

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

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2019



FINAL PROJECT (MO 184804)

LOCAL BUCKLING ANALYSIS OF SUBSEA PIPELINE WITH
FREE SPAN FOR ULTIMATE LIMIT STATE CRITERIA (STUDY
CASE: MELIWIS SUBSEA PIPELINE)

NOVIA CANDRA WAHYUNI

NRP. 0431154000067

Supervisors

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

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

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT

Marine Technology Faculty

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2019

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS LOCAL BUCKLING PIPA BAWAH LAUT DENGAN FREE SPAN
PADA KRITERIA ULTIMATE LIMIT STATE (STUDI KASUS: MELIWIS
SUBSEA PIPELINE)**

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

NOVIA CANDRA WAHYUNI

NRP. 0431154000067

Disetujui oleh Pembimbing dan Penguji Tugas Akhir :

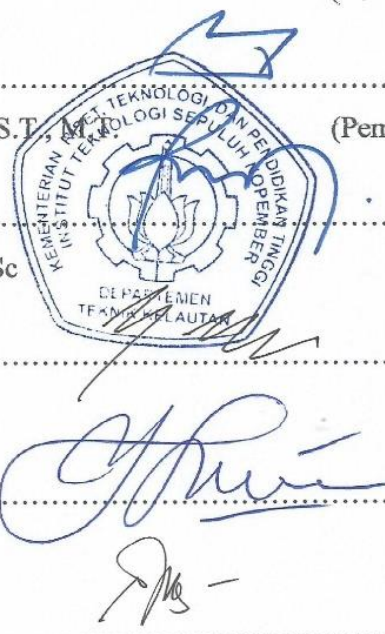
1. Ir. Imam Rochani, M.Sc. (Pembimbing 1)

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

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

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

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



SURABAYA, JULI 2019

**ANALISIS LOCAL BUCKLING PIPA BAWAH LAUT DENGAN FREE SPAN
PADA KRITERIA ULTIMATE LIMIT STATE (STUDI KASUS: MELIWIS
SUBSEA PIPELINE)**

Nama : Novia Candra Wahyuni
NRP : 04311540000067
Departemen : Teknik Kelautan
Dosen Pembimbing : Ir. Imam Rochani, M.Sc.
Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.

ABSTRAK

Meliwis Subsea Pipeline merupakan jalur pipa yang menghubungkan antara Meliwis WHP dan Maleo WHP dan berlokasi di Selat Madura. Jalur tersebut terbentang sejauh ± 11 km dengan diameter pipa 10 inch. Salah satu penyebab kegagalan pipa akibat adanya *free span* adalah *Local Buckling*. Kegagalan tersebut dapat dihindari dengan menentukan panjang *free span* maksimum yang diijinkan sesuai DNV RP F105 melalui *screening* frekuensi natural. Dari *screening* tersebut, didapatkan panjang *freespace* maksimum yang diijinkan yaitu sebesar 11 m. Kemudian dari hasil tersebut, dilakukan *screening* kembali dengan kriteria ULS sesuai DNV OS F101, yaitu *Local Buckling. Ultimate Limit State (ULS)* merupakan suatu kondisi yang harus dipenuhi untuk mencapai batas kekuatan pipa, sehingga mampu menahan gaya-gaya internal maupun eksternal. Selanjutnya, dengan panjang *free span* maksimum sebesar 11 m, maka didapatkan nilai tegangan *von mises* dari perhitungan manual dan *software* (AutoPIPE). Tegangan *von mises* dari hasil perhitungan manual adalah 95 MPa, sedangkan dari AutoPIPE adalah 97.96 MPa, dimana nilai keduanya tidak melebihi tegangan yang diijinkan, yaitu 403.34 Mpa. Batas tegangan ultimate struktur pipa (tegangan maksimum) sampai mengalami keruntuhan adalah 428 MPa.

Kata Kunci: *Free span, DNV, Local Buckling, ULS*

**LOCAL BUCKLING ANALYSIS OF SUBSEA PIPELINE WITH FREE SPAN
FOR ULTIMATE LIMIT STATE CRITERIA (STUDY CASE: MELIWIS
SUBSEA PIPELINE**

Name : **Novia Candra Wahyuni**
NRP : **04311540000067**
Departement : **Ocean Engineering**
Supervisors : **Ir. Imam Rochani, M.Sc.**
Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.

ABSTRACT

Meliwis Subsea Pipeline is a connecting pipeline between Meliwis WHP and Maleo WHP in the Madura Straits. The pipeline extends approximately 11 km length and 10in diameter. One cause of pipeline failure due to free span is Local Buckling. The failure avoided by determining the maximum allowable span based on DNV-RP-F105 by screening for natural frequency. The maximum allowable span from the screening process is 11 m. Then, the allowable free span length performed in the screening process of ULS criteria for local buckling acceptance criteria of DNV-OS-F101. Ultimate Limit State (ULS) is a condition that fulfilled to reach the limits strength of the pipeline, so as be able to restrain internal pressure and external pressure. From the maximum free span length of 11 m, the von mises stress of manual and software calculations (AutoPIPE) can be obtained. The value of von mises stress of the manual calculation is 95 MPa and from AutoPIPE is 97.96 MPa, where it does not exceed the allowable stress, i.e. 403.34 Mpa. Meanwhile, the limit of the ultimate stress (maximum stress) of the structure until the collapse is 428 MPa.

Keywords: *Free span, DNV, Local Buckling, ULS*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan nikmat-Nya, sehingga bisa menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “**Analisis *Local Buckling* Pipa Bawah Laut Dengan *Free Span* Pada Kriteria *Ultimate Limit State* (Studi Kasus: *Meliwis Subsea Pipeline*)**”. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Program Sarjana (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan didalam penyusunan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis mengharapkan saran dan masukan untuk perbaikan. Semoga Tugas Akhir ini, dapat bermanfaat bagi penulis maupun pembaca.

Surabaya, Juli 2019

Novia Candra Wahyuni

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan maupun bimbingan atas terselesainya Tugas Akhir ini kepada:

1. Orang tua penulis yang telah memberikan do'a, dukungan, dan motivasi sehingga penulis bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Ir. Imam Rochani, M.Sc. dan Bapak Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I dan II yang telah memberikan bimbingan, arahan serta petunjuk, sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan.
3. Bapak Nur Syahroni, S.T., M.T selaku Dosen Wali yang telah membantu serta mengarahkan penulis selama berkuliah di Departemen Teknik Kelautan.
4. Bapak Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. dan Bapak Dr. Ir. Hasan Ikhwan, M.Sc. selaku Ketua Departemen dan Ketua Prodi Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), ITS.
5. Seluruh Dosen, Staff dan Karyawan Departemen Teknik Kelautan FTK ITS yang telah memberikan ilmu, fasilitas serta membantu dalam hal administrasi terkait perkuliahan maupun Tugas Akhir.
6. Keluarga besar Tritonous P-55 L-33 yang telah memberi dukungan serta bantuan dari awal perkuliahan sampai terselesainya Tugas Akhir ini.
7. Semua pihak yang berpengaruh dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini.

Surabaya, Juli 2019

Novia Candra Wahyuni

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
UCAPAN TERIMA KASIH	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
DAFTAR NOTASI.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Manfaat.....	3
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Dasar Teori.....	5
2.2.1 Pipa Bawah Laut	5
2.2.1.1 Perhitungan Umum Pipa Bawah Laut.....	7

2.2.2	<i>Free Span</i>	11
2.2.2.1	Panjang <i>Free Span</i> Efektif	12
2.2.3	Kondisi dan Beban Lingkungan	13
2.2.3.1	Gelombang.....	13
2.2.3.2	Arus	19
2.2.4	<i>Vortex Induced Vibration (VIV)</i>	20
2.2.4.1	Parameter Hidrodinamika	21
2.2.4.2	<i>Safety Factor</i>	28
2.2.5	Frekuensi Natural Pipa.....	29
2.2.5.1	<i>Screening</i> Frekuensi Natural.....	30
2.2.5.2	<i>Concrete Stiffness Factor (CSF)</i>	30
2.2.5.3	<i>Effective Axial Force</i>	31
2.2.5.4	<i>Critical Local Buckling</i>	32
2.2.5.5	<i>Static Deflection</i>	33
2.2.6	<i>Limit State</i>	35
2.2.7	<i>Ultimate Limit State (ULS)</i>	36
2.2.7.1	<i>Local Buckling</i>	37
2.2.7.2	<i>Buckling Kritis</i>	38
2.2.7.3	Tegangan <i>Von Mises</i>	39
2.2.7.4	Tegangan <i>Hoop</i>	39
2.2.7.5	Tegangan Longitudinal.....	40
2.2.7.6	Batas Tegangan <i>Ultimate</i>	40
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		43
3.1	Diagram Alur	43
3.2	Prosedur Penelitian	46

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	51
4.1 Data Tugas Akhir	51
4.2 Data Design Pipa Bawah	51
4.2.1 Data Lingkungan.....	52
4.3 Perhitungan Umum Pipa Bawah Laut	55
4.3.1 Pipeline Properties	55
4.3.2 Berat Terendam Pipa.....	56
4.3.3 Tekanan Pada Pipa	57
4.3.4 Massa Efektif Pipa	57
4.4 Gelombang Dan Arus	58
4.4.1 Kecepatan Arus Pada Pipa.....	58
4.4.2 Kecepatan Partikel Gelombang Pada Pipa.....	59
4.5 Interaksi Pipa dengan Tanah	61
4.5.1 Kekakuan Tanah (<i>Soil Stiffness</i>).....	61
4.6 Parameter Hidrodinamika.....	62
4.6.1 Parameter Stabilitas	62
4.6.2 Current Flow Ratio	63
4.6.3 Keulegan-Carpenter number	64
4.6.4 Reduced Velocity	64
4.6.5 Gaya Drag	65
4.7 Analisis Struktural Pipa.....	66
4.7.1 Concrete Stiffness Factor (CSF)	66
4.7.2 Panjang Free Span Efektif.....	66
4.7.3 Gaya Aksial Efektif	69
4.7.4 Critical Buckling Load.....	70

4.7.5	Defleksi Statik (<i>Static Deflection</i>)	71
4.7.6	Frekuensi Natural <i>Free Span</i>	71
4.8	<i>Screening</i> Frekuensi Natural	74
4.9	<i>Bending Moment</i>	77
4.9.1	<i>Stress Range</i>	77
4.9.2	<i>Environmental Stress</i>	79
4.9.3	Perhitungan <i>Bending Moment</i>	81
4.10	Cek ULS (DNV OS F101)	83
4.10.1	<i>Denote Plastic Capacities</i>	83
4.10.2	Parameter pada Beban Kombinasi	84
4.10.3	Cek ULS (<i>Ultimate Limit State</i>)	85
4.11	Tegangan <i>Von Mises</i> dan Tegangan <i>Buckling Kritis</i>	86
4.11.1	Tegangan <i>Von Mises</i> pada Perhitungan Manual	86
4.11.2	Tegangan <i>Von Mises</i> pada <i>Software</i>	88
4.11.3	Tegangan <i>Buckling Kritis</i>	91
4.11.4	Cek Tegangan	92
4.11.5	Panjang <i>Free Span</i> yang Diijinkan	92
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		94
5.1	Kesimpulan	94
5.2	Saran	94
DAFTAR PUSTAKA		96

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Lokasi Meliwis Field	2
Gambar 2.1 Sistem Pipa Bawah Laut (Bai dan Bai, 2005)	6
Gambar 2.2 Tipe Span (Bai dan Bai, 2005)	11
Gambar 2.3 Grafik untuk mendapatkan Reduction Factor (DNV RP F105, 2006) ..	16
Gambar 2.4 Medan Aliran disekitar Pipa (Bai dan Bai, 2005).....	17
Gambar 2.5 Gaya Seret dan Gaya Inersia yang Bekerja pada Pipa	18
Gambar 2.7 Vortex Induced Oscillation pada Pipa (Mouselli, 1981)	21
Gambar 2.7 Amplitudo Respons In-line VIV terhadap V_R dan K_{sd}	24
Gambar 2.8 Respons Model Cross-flow (DNV RP F105, 2006)	26
Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian	43
Gambar 3.2 Diagram Alur Penelitian (Lanjutan)	44
Gambar 3.3 Diagram Alur Penelitian (Lanjutan)	45
Gambar 3.4 Diagram Alur Penelitian (Lanjutan)	46
Gambar 4.1 Hasil Tegangan Hoop	90
Gambar 4.2 Hasil Tegangan Longitudinal	91
Gambar 4.3 Hasil Tegangan Von Mises.....	91

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter Kekasaran Seabed	20
Tabel 2.2 Safety Factor untuk Kriteria Screening	28
Tabel 4.1 Data Properti Pipa Bawah Laut	51
Tabel 4.2 Data Corrosion Coating Pipa.....	52
Tabel 4.3 Data Concrete Coating Pipa	52
Tabel 4.4 Data Water Depth dan Tidal Range Pipa	52
Tabel 4.5 Data Arus dan Gelombang Pipa Periode 1-Tahunan.....	53
Tabel 4.6 Data Arus dan Gelombang Pipa Periode 100-Tahunan.....	54
Tabel 4.7 Data Tanah	54
Tabel 4.8 Data Marine Growth.....	55
Tabel 4.9 Data Properti Pipa	55
Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Umum Pipa.....	56
Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Berat Terendam Pipa beserta Parameternya.....	56
Tabel 4.12 Tekanan Pipa	57
Tabel 4.13 Koefisien Massa Tambah (Added Mass)	58
Tabel 4.14 Parameter Perhitungan Kecepatan Arus Pada Pipa.....	59
Tabel 4.15 Data Gelombang Pada Lokasi Pipa (Selat Madura).....	59
Tabel 4.16 Parameter-parameter Perhitungan Spektra JONSWAP	60
Tabel 4.17 Varian Spectral Moment	60
Tabel 4.18 Kecepatan Partikel Akibat Pengaruh Gelombang Signifikan pada Pipa..	61
Tabel 4.19 Parameter-parameter Perhitungan Kekakuan Tanah.....	61
Tabel 4.20 Kekakuan Tanah.....	62
Tabel 4.21 Parameter untuk Perhitungan Parameter Stailitas	63
Tabel 4.22 Current Flow Ratio.....	63
Tabel 4.23 Parameter dan Hasil Perhitungan Keulegan Carpenter Number	64
Tabel 4.24 Parameter dan Hasil Perhitungan Reduced Velocity Arah In Line dan Cross Flow	65
Tabel 4.25 Parameter Perhitungan Koefisien Gaya Drag	65
Tabel 4.26 Parameter dan Hasil Perhitungan Gaya Drag.....	66

Tabel 4.27 Parameter dan Hasil Perhitungan Concrete Stiffness Factor (CSF).....	66
Tabel 4.28 Parameter Perhitungan Panjang Free Span Efektif	67
Tabel 4.29 Panjang Free Span Efektif Arah In Line	67
Tabel 4.30 Panjang Free Span Efektif Arah Cross Flow.....	68
Tabel 4.31 Parameter dan Hasil Perhitungan Gaya Aksial Efektif	69
Tabel 4.32 Parameter Perhitungan Critical Buckling Load (P_{cr}).....	70
Tabel 4.33 Parameter Perhitungan Defleksi Statik.....	71
Tabel 4.34 Parameter Perhitungan Frekuensi Natural Free Span.....	72
Tabel 4.35 Hasil Perhitungan Critical Buckling Load, Defleksi Statis, dan Frekuensi Natural untuk Arah In-Line.....	72
Tabel 4.36 Hasil Perhitungan Critical Buckling Load, Defleksi Statis, dan Frekuensi Natural untuk Arah Cross-Flow	73
Tabel 4.37 Parameter Perhitungan Screening Frekuensi Natural Arah In-Line.....	74
Tabel 4.38 Screening Arah In-Line	75
Tabel 4.39 Parameter Perhitungan Screening Frekuensi Natural Arah Cross-Flow ..	76
Tabel 4.40 Screening Arah Cross-Flow	76
Tabel 4.41 Parameter dan Hasil Perhitungan Stress Amplitude.....	78
Tabel 4.42 Parameter dan Hasil Perhitungan Stress Range Arah In-Line	78
Tabel 4.43 Parameter dan Hasil Perhitungan Stress Range Arah Cross-Flow.....	79
Tabel 4.44 Parameter dan Hasil Perhitungan Moment Gaya Drag Aliran Air (M_w)..	80
Tabel 4.45 Parameter dan Hasil Perhitungan Environment Stress Akibat Beban Gelombang	80
Tabel 4.46 Parameter dan Hasil Perhitungan Environment Stress Arah.....	80
Tabel 4.47 Parameter dan Hasil Perhitungan Environment Stress Arah Cross-Flow	81
Tabel 4.48 Bending Moment akibat Beban Fungsional	81
Tabel 4.49 Bending Moment akibat Pengaruh Gerakan Cross-Flow.....	82
Tabel 4.50 Bending Moment akibat Gerakan In-Line.....	82
Tabel 4.51 Bending Moment Total	83
Tabel 4.52 Perhitungan Kekuatan Material.....	83
Tabel 4.53 Denote Plastic Capacities	84
Tabel 4.54 Parameter Aliran Tegangan.....	84

Tabel 4.55 Faktor Tekanan pada Beban Kombinasi	85
Tabel 4.56 Hasil Cek ULS sesuai DNV OS F101	85
Tabel 4.57 Tegangan Hoop	87
Tabel 4.58 Tegangan Thermal.....	87
Tabel 4.59 Poisson Stress.....	87
Tabel 4.60 Bending Stress.....	88
Tabel 4.61 Tegangan Longitudinal	88
Tabel 4.62 Tegangan Ekivalen (Von Mises).....	88
Tabel 4.63 Data Input Properti Pipa.....	89
Tabel 4.64 Data Input Pembebanan.....	90
Tabel 4.65 Tegangan dan Allowable Stress Hasil AutoPIPE	90
Tabel 4.66 Tegangan Buckling Kritis	91
Tabel 4.67 Cek Tegangan.....	92
Tabel 4.68 Panjang Free Span Maksimum Hasil Screening Frekuensi Natural dan Cek ULS	93

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A	PERHITUNGAN UMUM PIPA
LAMPIRAN B	ARUS DAN GELOMBANG
LAMPIRAN C	KEKAKUAN TANAH
LAMPIRAN D	PARAMETER HIDRODINAMIKA
LAMPIRAN E	ANALISIS STATIS STRUKTUR PIPA
LAMPIRAN F	<i>SCREENING</i> FREKUENSI NATURAL
LAMPIRAN G	BENDING MOMENT
LAMPIRAN H	CEK ULS (<i>ULTIMATE LIMIT STATE</i>)
LAMPIRAN I	TEGANGAN <i>VON MISES</i> DAN PANJANG SPAN YANG DIJINKAN
LAMPIRAN J	PEMODELAN DAN TEGANGAN <i>VON MISES</i> SOFTWARE

DAFTAR NOTASI

Latin

a_n	: percepatan partikel gelombang
A_{CF}	: <i>cross-flow</i> unit amplitude stress (Pa)
A_i	: <i>Internal cross section area</i> pipa
A_{IL}	: <i>in-line unit amplitude stress</i> (Pa)
A_s	: <i>Cross section area</i> pipa
b	: <i>buoyancy</i> per meter (N/m)
C_a	: koefisien massa tambah
C_D	: koefisien gaya <i>drag</i>
C_M	: koefisien inersia, (C_a+1)
CSF	: <i>Concrete Stiffness Factor</i>
D	: diameter luar pipa (termasuk <i>coating</i>) (m)
D_0	: diameter luar <i>steel</i> (m)
D_c	: Diameter <i>concrete</i>
D_t	: Diameter luar total pipa
D_{tm}	: Diameter total pipa tanpa marine growth
E	: <i>Young's modulus</i> untuk <i>steel</i> (N/m^2)
e	: <i>seabed gap</i> (m)
e/D	: rasio <i>span gap</i>
f_n	: frekuensi natural (Hz)
g	: percepatan gravitasi (m/s^2)
$G(\omega)$: fungsi transformasi frekuensi dari elevasi gelombang ke kecepatan aliran
h	: kedalaman air (m), jarak dari permukaan air rata-rata (<i>mean sea level</i>)
I_{steel}	: Moment inersia baja (<i>steel</i>)
k	: angka gelombang
K	: <i>relevant soil stiffness</i> (vertikal atau horizontal, statis atau dinamis)
k_w	: <i>normalisation constant</i> ,

L	: panjang aktual <i>free span</i> (m)
L_{eff}	: Panjang efektif <i>span</i> (m)
m_a	: massa tambah
M_w	: moment gaya drag
P_{cr}	: <i>critical buckling load</i> (N)
R_D	: faktor reduksi dari arah dan sebaran gelombang
s	: <i>spreading parameter</i>
S_{CF}	: stress range (<i>cross-flow</i>) (Pa)
S_{eff}	: <i>Effective axial forces</i> (N)
S_{IL}	: stress range (<i>in-line</i>) (Pa)
$S_{\eta\eta}$: spektra gelombang
t_2	: tebal dinding tebal pipa tanpa tambahan perlindungan korosi (<i>coating</i>)
t_c	: tebal <i>concrete coating</i> (m)
t_{corr}	: tebal <i>corrosion coating</i> (m)
t_{nom}	: tebal nominal dinding pipa (m)
t_{mar}	: tebal <i>marine growth</i> (m)
T_p	: periode puncak gelombang (s)
T_w	: periode gelombang (s)
U_c	: kecepatan arus dasar laut (m/s)
U_s	: kecepatan gelombang signifikan
U_{tot}	: kecepatan arus total (m/s)
U_w	: gelombang signifikan yang terinduksi kecepatan aliran normal pada pipa, dikoreksi untuk arah gelombang dan penyebarannya
$V_{(zr)}$: kecepatan arus berdasarkan perhitungan ketinggian dari outer zone
$w(\beta)$: fungsi sebaran energi gelombang,
W_{st}	: berat pipa baja (N/m)
W_c	: berat <i>concrete coating</i> (N/m)
W_{cont}	: berat isi pipa (N/m)
W_{st}	: berat pipa baja (kg/m)
W_{corr}	: berat lapisan <i>corrosion coating</i> (N/m)

z	: ketinggian di atas seabed hingga permukaan pipa (m)
z_r	: ketinggian yang dihitung dari permukaan air hingga ke permukaan <i>free span</i> (m)
z_0	: parameter kekasaran seabed (m)
g_D	: bagian gaya <i>drag</i>
g_c	: fungsi koreksi untuk arus <i>steady</i>
$V_{R,onset}^{CF}$: <i>reduce velocity cross flow</i>

Greek

α	: konstanta Generalised Phillips
β	: <i>relative soil stiffness parameter</i>
δ	: <i>static deflection</i> (m), Lihat Pers. (2.75)
γ	: parameter ketinggian atau <i>peakedness</i> parameter
λ_1	: <i>mode shape factor</i>
ϕ	: <i>mode shape</i>
$\psi_{proxy,onset}$: faktor koreksi untuk <i>cross flow</i> dekat <i>seabed</i>
$\psi_{trench,onset}$: <i>reduction factor</i> untuk <i>cross flow</i> karena pengaruh <i>trench</i>
$\psi_{on,CF}$: <i>safety factor</i> untuk <i>cross flow</i>
ρ_c	: massa jenis <i>concrete coating</i> (kg/m ³)
ρ_{cont}	: massa jenis fluida yang ada didalam pipa (kg/m ³)
ρ_{st}	: massa jenis baja (kg/m ³)
ρ_w	: massa jenis air laut (kg/m ³)
$\frac{\rho_s}{\rho}$: Specific mass ratio
σ	: lebar spektral
σ_E	: environmental stress (Pa)
$\sigma_{FM,max}$: <i>environmental stress due to direct wave loading</i> (Pa)
σ_u	: standard deviasi kecepatan aliran gelombang
θ_c	: arah aliran arus
ζ_T	: total modal <i>damping ratio</i>

Γ : fungsi gamma
 ω : frekuensi angular gelombang (rad/s)
 ω_p : frekuensi angular puncak gelombang (rad/s)

BAB I
PENDAHULUAN

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Offshore Pipelines atau *Subsea Pipelines* memiliki peran yang penting dalam proses transportasi minyak dan gas. Didalam proses tersebut, *Offshore Pipelines* atau *Subsea Pipelines* dipergunakan untuk mengalirkan fluida seperti minyak, gas atau air dari laut atau daerah lepas pantai dalam jumlah yang besar dan jarak yang jauh. *Offshore Pipelines* atau *Subsea Pipelines* harus dilakukan perancangan sedemikian rupa, sehingga dapat mengangkut produk hidrokarbon dari lapangan di lepas pantai (*offshore fields*) ke pemakai didarat dengan aman, cepat dan lancar (Soegiono, 2007).

Pada prakteknya, seringkali muncul permasalahan teknis pada jaringan pipa bawah laut. Permasalahan tersebut muncul akibat kondisi alam seperti perubahan kontur dasar laut, penggerusan, kondisi arus dan gelombang yang cukup besar atau permukaan *seabed* yang tidak rata. Aspek-aspek tersebut akan berpengaruh terhadap stabilitas pipa didasar laut, terutama kemungkinan terjadinya bentang bebas atau pipa dalam kondisi menggantung (*freespan*).

Adanya *free span* dapat menyebabkan beberapa kerusakan atau kegagalan pipa bawah laut, salah satunya adalah *local buckling*. *Local buckling* merupakan batas *ultimate* pipa karena adanya beban yang disebabkan oleh berbagai kondisi, seperti *subsidence*, gempa bumi, atau tanah longsor (Li dkk, 2017). Selain *local buckling*, *free span* juga dapat menyebabkan adanya vibrasi atau *Vortex Induced Vibration* (VIV). Menurut Koushan (2009) *free span* akan menyebabkan pipa berosilasi jika terkena beban dinamis. Beban dinamis tersebut bersumber dari *Vortex Induced Vibration* (VIV) yang disebabkan oleh aliran *steady*. Jika frekuensi pipa melebihi frekuensi naturalnya, maka akan terjadi resonansi sehingga pipa mengalami kegagalan (Guo dkk, 2005)

Meliwis Subsea Pipeline merupakan jalur pipa yang menghubungkan antara Meliwis WHP dan Maleo WHP. Meliwis field berlokasi di Selat Madura yaitu 46 km di selatan Pulau Madura dan 142 km di sebelah timur Surabaya. Jalur tersebut terbentang sejauh ± 11 km dengan diameter pipa 10 inch. *Ultimate Limit State* (ULS) merupakan suatu kondisi yang harus dipenuhi untuk mencapai batas kekuatan pipa, sehingga mampu menahan gaya internal maupun eksternal. Pada Tugas Akhir ini, dilakukan analisis mengenai *free span* pada pipa untuk mendapatkan panjang *free span* maksimum yang diizinkan pada kondisi operasi, sehingga dapat mencegah atau menghilangkan kerusakan karena *Local Buckling*.



Gambar 1.1 Lokasi Meliwis *Field*

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini antara lain:

- Berapakah panjang *Span* maksimum yang diizinkan supaya memenuhi *screening* frekuensi natural?
- Berapakah panjang *span* yang diizinkan agar memenuhi kriteria *Ultimate Limit State* (ULS) yaitu *Local Buckling*?

1.3 Tujuan

Dari permasalahan diatas, maka tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini adalah:

- a. Menentukan panjang *Span* maksimum yang diizinkan pada pipa bawah laut supaya memenuhi *screening* frekuensi natural.
- c. Menentukan panjang *span* yang diizinkan agar memenuhi kriteria *Ultimate Limit State* (ULS) yaitu *Local Buckling*.

1.4 Manfaat

Dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat diketahui panjang maksimum *span* yang diizinkan supaya memenuhi *screening* frekuensi natural dan panjang *span* yang diizinkan berdasarkan kriteria ULS (*Local Buckling*) sesuai dengan DNV RP F105: *Free Spanning Pipeline* (2006) dan DNV OS F101: *Submarine Pipeline System* (2012). Sehingga, hasil dari analisa Tugas Akhir ini dapat membantu meminimalisir terjadinya kegagalan yang dialami oleh pipa.

1.5 Batasan Masalah

Pembatasan masalah dilakukan untuk menghindari permasalahan semakin melebar, sehingga digunakan asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. Jaringan *Offshore Pipeline* yang dianalisa adalah jaringan pipa yang dikelola oleh Santos (Madura Offshore) Pty Ltd dan PC Madura Ltd dengan Studi Kasus: *Meliwis Subsea Pipeline*.
2. Tumpuan pada masing-masing ujung *free span* diasumsikan *pinned-pinned*.
3. Aliran fluida didalam pipa adalah *steady*.
4. Analisis kelelahan (*fatigue*) tidak dilakukan.
5. Pengaruh *scouring* dan *marine growth* diabaikan.
6. Jenis *span* yang ditinjau adalah *Span tunggal (single span)*.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan Tugas Akhir ini adalah:

1. BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan mengenai latar belakang penulis melakukan penelitian, perumasan masalah, tujuan yang hendak dicapai, manfaat yang akan diperoleh serta batasan-batasan masalah dalam pengerjaan Tugas Akhir.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab ini berisi tinjauan pustaka serta dasar-dasar teori yang menjadi pedoman atau pendukung dalam analisis Tugas Akhir ini. Referensi tersebut bersumber dari buku, jurnal, prosiding, standard (*code*), maupun report yang berkaitan dengan topik yang dibahas.

3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan mengenai langkah-langkah pengerjaan Tugas Akhir dalam menyelesaikan permasalahan yang menjadi topik bahasan. Alur pengerjaan dijelaskan dalam bentuk diagram alur (*flow chart*).

4. BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab analisa dan pembahasan, pengolahan data serta pembahasan dilakukan untuk menjawab permasalahan yang ada dari Tugas Akhir ini.

5. BAB V PENUTUP

Bab penutup merupakan bab yang berisikan kesimpulan yang didapat dari pengerjaan Tugas Akhir serta pada bab ini, penulis memberikan saran terkait penelitian lebih lanjut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

DAN DASAR TEORI

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian terkait *Ultimate Limit State* (ULS) pada *free span* pipa bawah laut telah dilakukan. Khanifudin (2015) telah melakukan analisis secara statis untuk mendapatkan panjang *free span* yang diijinkan serta melakukan pengecekan terhadap *buckling* secara global. Selain itu, Khanifudin (2015) juga mencari tegangan yang melebihi batas *ultimate* struktur pipa sesuai dengan aturan ABS 2005 menggunakan metode *Incremental Load*. Lomantoro (2018) melakukan analisis secara statis dan dinamis untuk mendapatkan panjang *free span* efektif dan panjang maksimal *freespan* yang diijinkan pada kondisi ULS melalui tahap *screening* kriteria kelelahan dan *screening* ULS. Tetapi pada penelitiannya, Lumantoro (2018) tidak menghitung kelelahan (*fatigue*).

Susetyo (2016) melakukan analisis mengenai *Local Buckling* pada *free span* di Sangatta, Kalimantan Timur. Analisis tersebut dilakukan untuk mengetahui panjang *free span* maksimal yang diijinkan dengan menggunakan metode perhitungan manual dan pemodelan dengan *software* FEM sebagai perbandingan dengan visualisasi tegangan *von-misses*. *Software* yang digunakan adalah ANSYS 16.0.

2.2 Dasar Teori

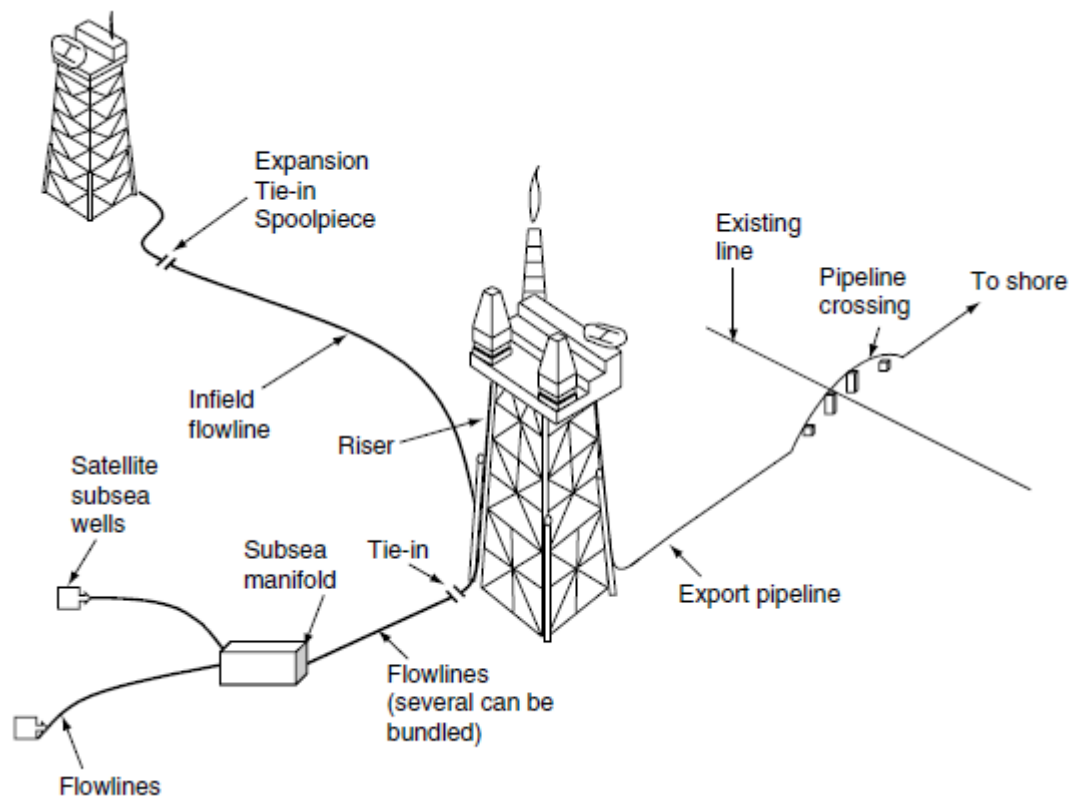
2.2.1 Pipa Bawah Laut

Didalam pengembangan sumber daya hidrokarbon di lepas pantai, *pipelines* memiliki peran yang cukup penting. Menurut Bai dan Bai (2005) *pipelines* digunakan untuk beberapa tujuan, diantaranya:

- Jalur transportasi
- *Flowlines* untuk mentransfer produk dari platform ke *export lines*.

- *Flowlines* untuk mentransfer produk antara platform, *subsea manifolds*, dan *satellite wells*.
- *Pipeline bundles*.

Sehingga, untuk mencapai tujuan tersebut diperlukan suatu perancangan yang mantap untuk meminimalisir terjadinya kegagalan dan sesuai dengan *code* dan *standards and specifications*. Menurut Soegiono (2007) pada proses perancangan *pipelines* terdapat beberapa analisis yang harus dilakukan, diantaranya pemilihan tebal dinding pipa, pemilihan grade dari material, penentuan rute pipa serta analisis tegangan pipa.



Gambar 2.1 Sistem Pipa Bawah Laut (Bai dan Bai, 2005)

Gambar 2.1 merupakan salah satu contoh rute pipa bawah laut. Kondisi pipa bawah laut yang tergeletak pada *seabed*, menuntut kemungkinan terjadinya resiko kerusakan. Tingkat kerusakan yang terjadi tergantung pada lokasi peletakan pipa (*pipeline-site*). Didalam penentuan rute (jalur) pipa, terdapat beberapa kriteria yang harus dipenuhi, diantaranya (Mouselli, 1981):

- Menghindari segala macam penghalang yang berada didasar laut (*bottom*) sepanjang rute pipa yang direncanakan.
- Menghindari *crossing* pipa.
- Menghindari *anchoring areas*.
- Meminimalkan panjang pipa pada dasar laut yang tidak stabil dan rute pipa pada area yang lebih stabil.
- Menghindari jalur pipa yang tidak tertumpu ketika diletakkan didasar laut (*free span*).

2.2.1.1 Perhitungan Umum Pipa Bawah Laut

Didalam melakukan analisis pipa bawah laut, pertama perlu dilakukan perhitungan-perhitungan umum. Perhitungan tersebut meliputi:

1. Properti pipa

Perhitungan property pipa perlu dilakukan, hal tersebut dikarenakan tidak semua dimensi pipa diketahui didalam data.

a. Tebal dinding pipa

Menurut Chakrabarti (2005), untuk menghitung tebal dinding pipa diperlukan penilaian terhadap 3 mode kegagalan, diantaranya:

- *Internal pressure containment (burst)* selama operasi dan *hydrotest*.
- *Collapse* karena tekanan eksternal.
- *Local Buckling* karena bending dan tekanan eksternal.

Berikut ini merupakan perhitungan unuk tebal dinding tebal pipa tanpa tambahan perlindungan korosi (*coating*).

$$t_2 = t_{\text{nom}} - t_{\text{corr}} \quad (2.1)$$

Dimana,

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

t_{corr} : tebal toleransi terhadap korosi (m)

b. Diameter pipa

Pemilihan diameter merupakan proses evaluasi dengan mempertimbangkan *capital expenditure (capex)* dan *operational expenditure (opex)* yang nantinya dapat meminimalkan total seluruh biaya proyek hingga mendapatkan design optimal (Chakrabarti, 2005).

- Diameter luar total pipa

$$D_t = D_0 + 2t_{\text{corr}} + 2t_c + 2t_{\text{mar}} \quad (2.2)$$

Dimana:

D_0 : diameter luar *steel* (m)

t_{corr} : tebal *corrosion coating* (m)

t_c : tebal *concrete coating* (m)

t_{mar} : tebal *marine growth* (m)

- Diameter total pipa tanpa *marine growth*

$$D_{\text{tm}} = D_0 + 2t_{\text{corr}} + 2t_c \quad (2.3)$$

- Diameter dalam pipa

$$D_i = D_0 - 2(t_2) \quad (2.4)$$

- Diameter *concrete*

$$D_c = D_0 + 2t_{\text{corr}} + 2t_c \quad (2.5)$$

- c. Moment inersia dari *steel* pipa

$$I_{\text{steel}} = \pi \frac{D_0^4 - (D_i)^4}{64} \quad (2.6)$$

- d. Moment inersia dari *concrete* pipa

$$I_{\text{conc}} = \pi \frac{D_c^4 - (D_c - 2t_c)^4}{64} \quad (2.7)$$

- e. *Internal cross section area* pipa

$$A_i = \frac{\pi}{4} (D_i)^2 \quad (2.8)$$

- f. *Cross section area* pipa

$$A_s = \frac{\pi}{4} [D_0^2 - (D_i)^2] \quad (2.9)$$

2. Massa Efektif Pipa

Massa efektif pipa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (Bai dan Bai, 2014):

$$m_e = W_{st} + W_{corr} + W_c + W_{cont} + m_a \quad (2.10)$$

Dimana,

W_{st} : berat pipa baja (N/m)

W_c : berat *concrete coating* (N/m)

$$W_c = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D_0 + t_{corr})^2] \rho_c \quad (2.11)$$

ρ_{cont} : massa jenis fluida yang ada didalam pipa (kg/m^3)

W_{cont} : berat isi pipa (N/m)

$$W_{cont} = \frac{\pi}{4} (D_i)^2 \rho_{cont} \quad (2.12)$$

m_a : massa tambah

$$m_a = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot \rho_w \cdot C_a \quad (2.13)$$

ρ_w : massa jenis air laut (kg/m^3)

C_a : koefisien massa tambah

$$C_a = \begin{cases} 0.68 + \frac{1.6}{(1+5 \cdot (e/D))} & \text{untuk } e/D < 0.8 \\ 1 & \text{untuk } e/D \geq 0.8 \end{cases} \quad (2.14a)$$

$$\quad \quad \quad \text{untuk } e/D \geq 0.8 \quad (2.14b)$$

e/D : rasio *span gap*

Berat struktur pipa merupakan penjumlahan dari berat pipa ditambah dengan berat lapisan *corrosion coating* dan berat lapisan *concrete coating*.

$$m_{str} = W_{st} + W_{corr} + W_c \quad (2.15)$$

Dimana,

W_{st} : berat pipa baja (kg/m)

$$W_{st} = \frac{\pi}{4} \rho_{st} (D_0^2 - D_i^2) g \quad (2.16)$$

ρ_{st} : massa jenis baja (kg/m³)

W_{corr} : berat lapisan *corrosion coating* (N/m)

$$W_{corr} = \frac{\pi}{4} [(D_0 + t_{corr})^2 - D_i^2] \rho_{corr} \quad (2.17)$$

ρ_c : massa jenis *concrete coating* (kg/m³)

3. Berat Terendam Pipa

Pipa memiliki berat yang berbeda ketika berada didalam air dan didarat. Hal tersebut dikarenakan pengaruh dari gaya gravitasi dan gaya *buoyancy* (gaya tekan keatas). Berikut merupakan persamaan untuk menghitung berat terendam pipa:

$$W_S = (W_{st} + W_{corr} + W_c + W_{cont}) \cdot g - b \quad (2.18)$$

Dimana,

b : *buoyancy* per meter (N/m)

$$b = \frac{\pi}{4} (D_t)^2 \cdot \rho_w \cdot g \quad (2.19)$$

ρ_w : massa jenis air laut (kg/m³)

4. Tekanan Internal dan Eksternal

Tekanan internal merupakan tekanan yang diakibatkan oleh gaya tekan aliran zat didalam pipa. Sedangkan, tekanan eksternal merupakan tekanan yang diakibatkan oleh gaya tekan zat diluar pipa yang berupa tekanan hidrostatis selama pipa terendam. Menurut DNV OS F101 (2012), tekanan intenal yang dimaksud merupakan tekanan design internal, yaitu tekanan maksimal selama operasi normal pipa yang diijinkan sesuai *Pipeline Control System* (PSC). Berikut merupakan persamaan untuk mencari tekanan eksternal pada pipa:

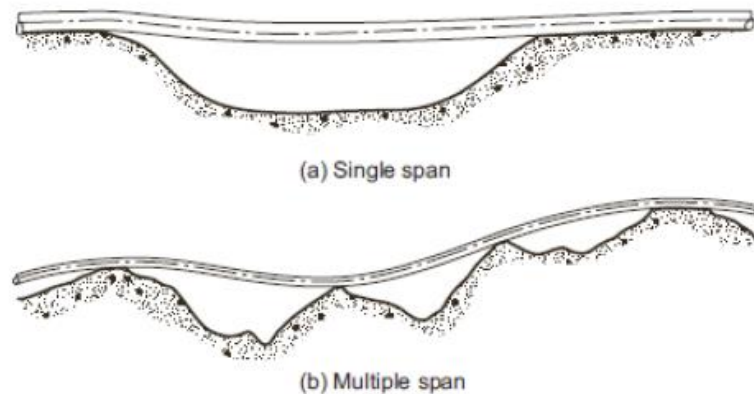
$$P_e = h \cdot g \cdot \rho \quad (2.20)$$

Dimana:

h : kedalaman air (m), jarak dari permukaan air rata-rata (*mean sea level*) ke pipa

2.2.2 *Free Span*

Free span merupakan suatu kondisi dimana pipa bawah laut tidak mempunyai tumpuan atau tidak tersangga, sehingga pipa dalam kondisi menggantung atau tidak menyentuh *seabed*. Hal tersebut dapat terjadi karena kondisi alam yang terus berubah-ubah, seperti adanya penggerusan atau karena *rough seabed*. Menurut DNV RP F105 (2006), *free span* dapat disebabkan oleh kondisi *seabed* yang tidak rata, topologi *seabed* yang berubah (misalnya, *scouring*), penumpu tambahan/*rock beams*, serta *strudel scours*.



Gambar 2.2 Tipe *Span* (Bai dan Bai, 2005)

Bila terjadi suatu *free span* pada suatu rute pipa, maka perlu dicek ulang kekuatan dan keandalan kerja pipa tersebut. Perhitungan dan persiapan antisipasi tersebut, perlu dilakukan mengingat keadaan pipa yang tidak tergeletak merata pada *seabed*. Besar defleksi, dampak gaya hidrodinamika, vibrasi, dan tegangan maksimum yang dapat terjadi harus dihitung untuk pengecekan kemungkinan keruntuhan pipa dengan pola statik (*Ultimate Limit State*). Sehingga, pada Tugas Akhir ini kriteria ULS merupakan parameter pengecekan.

2.2.2.1 Panjang *Free Span* Efektif

Panjang *span* didefinisikan sebagai panjang bentang pipa yang tidak tersangga, akibatnya terdapat *gap* secara berkelanjutan. *Gap* sendiri merupakan jarak antara pipa dan *seabed* (DNV RP F105, 2006). Menurut Chakrabarti (2005), penentuan panjang *span* yang diizinkan harus mempertimbangkan 5 kriteria sebagai berikut:

- Pengaruh *in-line* VIV.
- Pengaruh *cross-flow* VIV.
- Maximum allowable equivalent stress.
- Maximum allowable longitudinal stress.
- Umur kelelahan karena *in-line* VIV (optional criteria).

Empat kriteria pertama diatas, dipertimbangkan untuk menghitung panjang *span* maksimum yang diijinkan, evaluasi *bottom roughness*, atau evaluasi *crossing* pipa.

Menurut DNV RP F105 (2006), panjang efektif *free span* dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{L_{eff}}{L} = \begin{cases} \frac{4.73}{-0.066\beta^2 + 1.02\beta + 0.63} & \text{untuk } \beta \geq 2.7 \\ \frac{4.73}{0.36\beta^2 + 0.61\beta + 1} & \text{untuk } \beta < 2.7 \end{cases} \quad (2.21a)$$

$$\frac{L_{eff}}{L} = \begin{cases} \frac{4.73}{-0.066\beta^2 + 1.02\beta + 0.63} & \text{untuk } \beta \geq 2.7 \\ \frac{4.73}{0.36\beta^2 + 0.61\beta + 1} & \text{untuk } \beta < 2.7 \end{cases} \quad (2.21b)$$

Dengan,

$$\beta = \log_{10} \left(\frac{K \cdot L^4}{(1 + CSF)EI} \right) \quad (2.22)$$

Dimana,

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

L : panjang aktual *free span* (m)

β : *relative soil stiffness parameter*

K : *relevant soil stiffness* (vertikal atau horizontal, statis atau dinamis)

$$K_v = \frac{C_v}{1 - v} \left(\frac{2\rho_s}{3\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D} \quad (2.23)$$

$$K_L = C_L(1 + v) \left(\frac{2\rho_s}{3\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D} \quad (2.24)$$

$\frac{\rho_s}{\rho}$: Specific mass ratio

$$\frac{\rho_s}{\rho} = \frac{W_{sub} + F_b}{F_b} \quad (2.25)$$

CSF : faktor kekakuan *concrete*, lihat Pers (2.71)

E : *Young's modulus* untuk *steel* (N/m²)

I_{steel} : Moment inersia baja (*steel*)

2.2.3 Kondisi dan Beban Lingkungan

2.2.3.1 Gelombang

Gelombang merupakan aliran fluida cair atau fluida dinamis yang memiliki frekuensi dan periode serta pola khas berupa rambatan energi (Djatkiko, 2012). Gelombang dapat disebabkan oleh angin, gerakan kapal, gempa atau gaya gravitasi dari matahari dan bulan.

a. *Short-term wave conditions*

Berikut merupakan persamaan spektra JONSWAP:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \gamma^{\exp\left(-0.5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p}\right)^2\right)} \quad (2.26)$$

Dimana,

$S_{\eta\eta}$: spektra gelombang

ω : frekuensi angular gelombang (rad/s)

ω_p : frekuensi angular puncak gelombang (rad/s)

T_w : periode gelombang (s)

T_p : periode puncak gelombang (s)

α : konstanta Generalised Phillips

g : percepatan gravitasi (m/s²)

γ : parameter ketinggian atau *peakedness* parameter

σ : lebar spektral

Konstanta Generalised Philips'

$$\alpha = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega_p^4}{g^2} \cdot (1 - 0.287 \ln \gamma) \quad (2.27)$$

Parameter lebar *spectra*

$$\alpha = \begin{cases} 0.07 & \text{untuk } \omega \leq \omega_p \end{cases} \quad (2.28a)$$

$$\alpha = \begin{cases} 0.09 & \text{untuk yang lainnya} \end{cases} \quad (2.28b)$$

Peak-enhancement factor

$$\gamma = \begin{cases} 5 & \varphi \leq 3.6 \\ \exp(5.75 - 1.15\varphi) & 3.6 < \varphi < 5 \\ 1 & \varphi \geq 5 \end{cases} \quad (2.29a)$$

$$\gamma = \begin{cases} 5 & \varphi \leq 3.6 \\ \exp(5.75 - 1.15\varphi) & 3.6 < \varphi < 5 \\ 1 & \varphi \geq 5 \end{cases} \quad (2.29b)$$

$$(2.29c)$$

Dengan,

$$\varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \quad (2.30)$$

Wave-induced velocity spectrum pada pipa diperoleh melalui transformasi spektra gelombang di permukaan laut dengan menggunakan teori gelombang orde pertama (*first order wave theory*), seperti berikut:

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) \cdot S_{\eta\eta}(\omega) \quad (2.31)$$

Berikut $G^2(\omega)$ yang merupakan fungsi transfer frekuensi dari elevasi permukaan laut ke kecepatan aliran (arus) yang diinduksi gelombang pada level pipa:

$$G^2(\omega) = \frac{\omega \cdot \cosh(k \cdot (D + e))}{\sinh(k \cdot h)} \quad (2.32)$$

Dimana,

$G(\omega)$: fungsi transformasi frekuensi dari elevasi gelombang ke kecepatan aliran

D : diameter luar pipa (termasuk *coating*) (m)

e : *seabed gap* (m)

k : angka gelombang

h : kedalaman air

Angka gelombang diperoleh dari iterasi dengan menggunakan persamaan *transcendental* sebagai berikut:

$$kh = \frac{\omega^2 \cdot h}{g} \coth(k \cdot h) \quad (2.33)$$

Momen spektra pada orde ke-n didefinisikan sebagai:

$$M_n = \int_0^{\infty} \omega^n S_{UU}(\omega) d\omega \quad (2.34)$$

Berikut merupakan kecepatan aliran gelombang signifikan pada pipa:

$$U_s = 2\sqrt{m_0} \quad (2.35)$$

Mean zero up-crossing period aliran yang beresilasi pada pipa:

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2.36)$$

b. *Reduction function*

Efek dari arah dan sebaran gelombang adalah membentuk faktor reduksi (*reduction factor*) pada kecepatan aliran signifikan, misalnya kecepatan normal aliran yang mengenai pipa karena efek sebaran gelombang. Kecepatan tersebut dapat diformulasikan kedalam persamaan sebagai berikut (DNV RP F105, 2006):

$$U_w = U_s \cdot R_D \quad (2.37)$$

Dimana,

U_w : gelombang signifikan yang terinduksi kecepatan aliran normal pada pipa, dikoreksi untuk arah gelombang dan penyebarannya

U_s : kecepatan gelombang signifikan

R_D : faktor reduksi dari arah dan sebaran gelombang

Faktor reduksi dapat diformulasikan sebagai berikut, lihat **Gambar 2.3**.

$$R_D = \sqrt{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} w(\beta) \sin^2(\theta_{rel} - \beta) d\beta} \quad (2.38)$$

Dimana,

$w(\beta)$: fungsi sebaran energi gelombang,

$$w(\beta) = \begin{cases} k_w \cos^2(\beta) & \text{untuk } |\beta| < \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (2.39a)$$

$$w(\beta) = \begin{cases} k_w \cos^2(\beta) & \text{untuk } |\beta| < \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (2.39b)$$

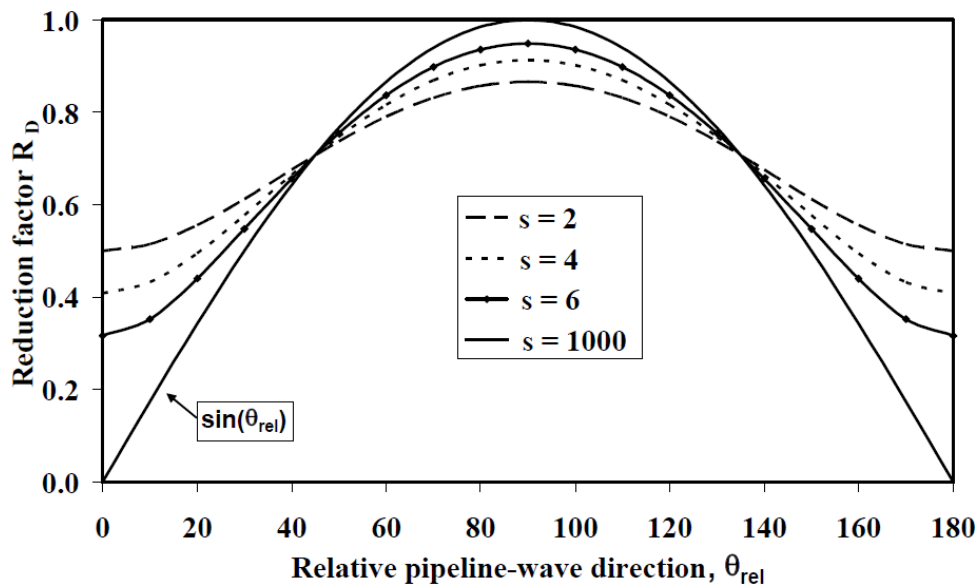
k_w : normalisation constant,

$$k_w = \sqrt{\frac{1}{\pi} \frac{\Gamma(1 + \frac{s}{2})}{\Gamma(\frac{1}{2} + \frac{s}{2})}} \quad (2.40)$$

Γ : fungsi gamma

s : spreading parameter

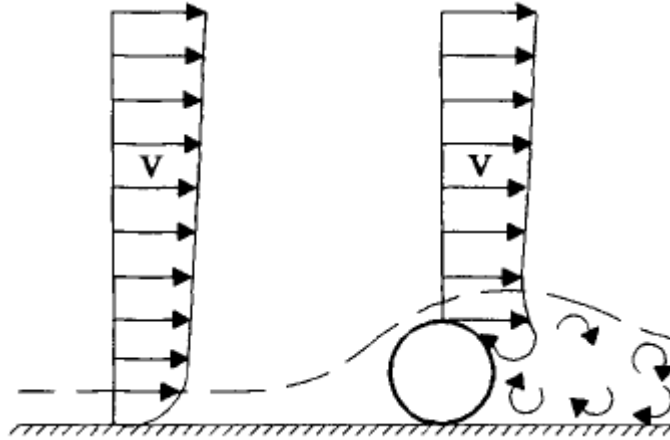
Berikut merupakan grafik untuk mendapatkan faktor reduksi.



Gambar 2.3 Grafik untuk mendapatkan *Reduction Factor* (DNV RP F105, 2006)

c. Teori Gaya Gelombang

Karena adanya efek gabungan dari peningkatan kecepatan dan pemisahan aliran permukaan pipa, maka section pipa terluar mengalami gaya hidrodinamik.



Gambar 2.4 Medan Aliran disekitar Pipa (Bai dan Bai, 2005)

- Gaya Seret (*Drag*)

Gelombang dan arus mempengaruhi Gaya *drag*, sehingga didepan pipa bertekanan tinggi sedangkan dibelakang pipa bertekanan rendah. Gelombang juga menimbulkan pusaran air dibelakang pipa. Berikut merupakan komponen persamaan gaya *drag* per satuan panjang (Bai dan Bai, 2005):

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D U_{tot}^2 \quad (2.41)$$

Dimana,

C_D : koefisien gaya *drag*

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

ρ : massa jenis air laut (kg/m^3)

D : diameter terluar pipa

- Gaya Inersia (*Inertia Force*)

Gelombang menghasilkan beban siklis melalui partikel air. Beban siklis tersebut akan mengurangi atau menambah kecepatan air.

Sehingga, pipa memberikan gaya untuk menolak perubahan kecepatan partikel air yang bekerja pada pipa. Berikut merupakan komponen perhitungan gaya *inertia* per satuan panjang (Bai dan Bai, 2005):

$$F_l = \frac{\pi}{2} \rho D^2 C_M a_n \quad (2.42)$$

Dimana,

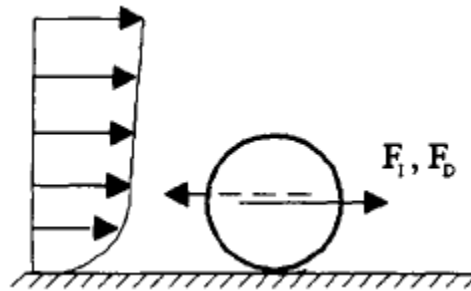
C_M : koefisien inersia, (C_a+1)

C_a : koefisien massa tambah

a_n : percepatan partikel gelombang

ρ : massa jenis air laut (kg/m^3)

D : diameter terluar pipa



Gambar 2.5 Gaya Seret dan Gaya Inersia yang Bekerja pada Pipa
(Bai dan Bai, 2005)

- Gaya Angkat (*Lift Force*)

Gaya angkat muncul karena terdapat aliran yang bekerja pada pipa. Keberadaan *seabed* di bawah pipa mengakibatkan perbedaan bentuk aliran air di atas dan dibawah pipa. Hal tersebut membuat aliran menjadi lambat/tidak ada di bagian bawah pipa (tekanan tinggi) dan aliran di atas pipa semakin cepat (tekanan rendah). Perbedaan tekanan di bagian bawah dan atas pipa akan menyebabkan pipa terangkat. Gaya angkat (*lift*) per satuan panjang dari pipa dapat dihitung berdasarkan (Bai dan Bai, 2005):

$$F_L = \frac{1}{2} \rho D C_L v_n^2 \quad (2.43)$$

Dimana,

C_L : koefisien gaya angkat pada pipa di permukaan

v_n : kecepatan partikel gelombang (m/s)

ρ : massa jenis air laut (kg/m³)

D : diameter terluar pipa

2.2.3.2 Arus

Berdasarkan DNV RP F105 (2006), jenis aliran arus dibagi menjadi 2, yaitu:

- **Outer Zone**, zona aliran yang terjadi pada elevasi yang jauh dari *seabed*, 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.
- **Inner zone**, zona aliran dimana rata-rata kecepatan arus dan turbulensi aliran menunjukkan variasi secara signifikan dalam arah horizontal. Kecepatan dan arah arus merupakan fungsi dari geometri lokal dasar laut. Pada *inner zone*, profil kecepatan arus dianggap logaritmik karena tidak terjadi pemisahan aliran.

Pada daerah *inner zone*, profil kecepatan arus dirumuskan sebagai berikut:

$$U_c = V(z_r) \frac{\ln(z + z_0) - \ln(z_0)}{\ln(z_r + z_0) - \ln(z_0)} \sin \theta_c \quad (2.44)$$

Dimana:

U_c : kecepatan arus dasar laut (m/s)

θ_c : arah aliran arus

$V(z_r)$: kecepatan arus berdasarkan perhitungan ketinggian dari outer zone (m/s)

z : ketinggian di atas *seabed* hingga permukaan pipa (m)

z_r : ketinggian yang dihitung dari permukaan air hingga ke permukaan free span (m)

z_0 : parameter kekasaran seabed (m)

Dengan diketahuinya besar kecepatan arus dan partikel gelombang, maka besar kecepatan arus total dapat diketahui. Berikut merupakan rasio antara kecepatan arus dan partikel gelombang:

$$\alpha = \frac{U_c}{U_c + U_w} \quad (2.45)$$

Tabel 2.1 Parameter Kekasaran *Seabed*

<i>Seabed</i>	<i>Roughness z_0 (m)</i>
Silt	$\approx 5.10^{-6}$
Fine sand	$\approx 1.10^{-5}$
Medium sand	$\approx 4.10^{-5}$
Coarse sand	$\approx 1.10^{-4}$
Gravel	$\approx 3.10^{-4}$
Pebble	$\approx 2.10^{-3}$
Cobble	$\approx 1.10^{-2}$
Boulder	$\approx 4.10^{-2}$

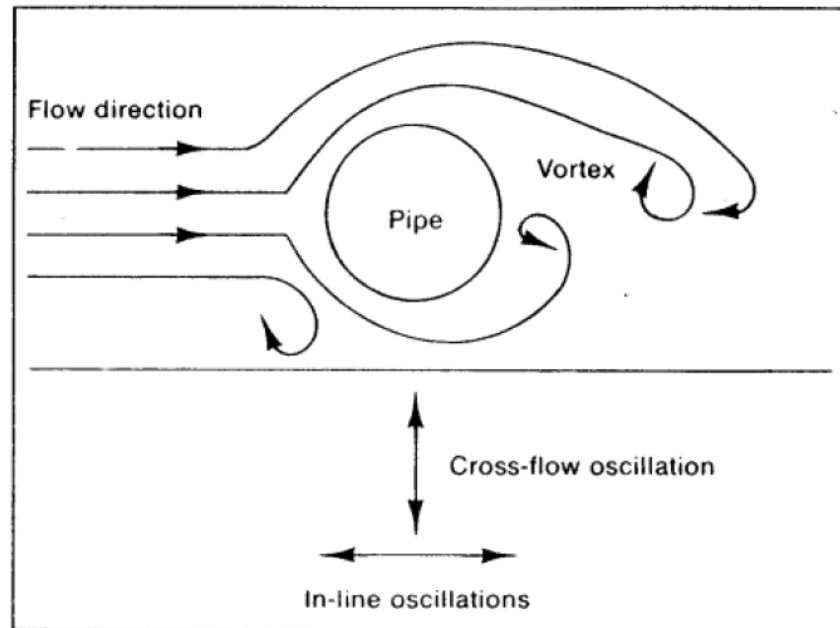
(Sumber: DNV RP F105, 2006)

Menurut DNV RP C205 (2007), terdapat 6 kategori arus, yaitu Arus dari angin, Arus pasang surut, Arus sirkulasi, *Loop* dan *eddy current*, Soliton current, dan *Longshore current*.

2.2.4 *Vortex Induced Vibration (VIV)*

Ketika arus air mengalir mengenai pipa, terbentuklah *vortices* (pusaran) di daerah pipa. Pusaran tersebut terbentuk karena turbulensi dan ketidakstabilan aliran dibelakang pipa. Terjadinya *vortex shedding* menyebabkan perubahan tekanan hidrodinamis pada pipa secara berkala, sehingga memungkinkan

terjadinya getaran pada pipa terutama pipa yang mengalami bentangan bebas. Getaran pada pipa terjadi pada arah *in-line* dan *cross-flow*, seperti pada Gambar 2.4 (Mouselli, 1981).



Gambar 2.6 *Vortex Induced Oscillation* pada Pipa (Mouselli, 1981)

2.2.4.1 Parameter Hidrodinamika

Berikut merupakan parameter hidrodinamika pada *Vortex Induced Vibration* (VIV) berdasarkan DNV RP F105 (2006):

a. *Reduced Velocity* (V_R)

$$V_R = \frac{U_c + U_w}{f_n D} \quad (2.46)$$

Dimana,

f_n : frekuensi natural (Hz)

U_c : kecepatan normal arus pada pipa (m/s)

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

D : diameter luar pipa (m)

b. *Keulegan-Carpenter number* (KC)

$$KC = \frac{U_w}{f_w D} \quad (2.47)$$

Dimana,

f_w : frekuensi gelombang signifikan (Hz)

c. *Current Flow Velocity Ratio* (α)

$$\alpha = \frac{U_{c,100\text{tahun}}}{U_{c,100\text{tahun}} + U_{w,1\text{tahun}}} \quad (2.48)$$

d. *Stability Parameter* (K_s)

$$K_s = \frac{4\pi m_e \zeta_T}{\rho D^2} \quad (2.49)$$

Dimana,

ρ : massa jenis air (kg/m^3)

ζ_T : total modal *damping ratio*

$$\zeta_T = \zeta_{str} + \zeta_{soil} + \zeta_h \quad (2.50)$$

m_e : massa efektif per satuan panjang (kg/m)

$$m_e = \left(\frac{\int_L m(s) \phi^2}{\int_L \phi^2(s) ds} \right) \quad (2.51)$$

$m(s)$: massa per satuan panjang termasuk massa structural, massa tambah dan massa internal fluida

ϕ : *mode shape*

Salah satu komponen penyusun didalam *stability parameter* (K_s) adalah total modal *damping ratio*. Berdasarkan DNV RP F105 (2006) total modal *damping ratio* terdiri dari:

a. *Structural damping*, ζ_{str}

Structural damping disebabkan oleh gaya gesek internal material pipa serta tergantung pada regangan dan defleksi. Jika *Structural damping* tidak diketahui, maka diasumsikan:

$$\zeta_{str} = 0.005 \quad (2.52)$$

b. *Soil damping, ζ_{soil}*

Apabila tujuan analisis untuk *screening*, maka *soil damping* diasumsikan 0.01 ($\zeta_{soil} = 0.01$).

c. *Hydrodynamic damping, ζ_h*

Untuk VIV pada *lock-in region*, besarnya *hydrodynamic modal damping ratio* diasumsikan nol, $\zeta_h = 0.00$. Berikut merupakan ratio *Hydrodynamic damping* (linier), ζ_h :

$$\zeta_h = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sigma_u g_D}{m_e f_n} g_c \left(\frac{u_c}{\sigma_u} \right) \lambda_1 \quad (2.53)$$

Dimana,

σ_u : standard deviasi kecepatan aliran gelombang

g_D : bagian gaya *drag*

f_n : frekuensi natural (Hz)

g_c : fungsi koreksi untuk arus *steady*

λ_1 : *mode shape factor*

Berdasarkan DNV RP F105 (2006), terdapat 2 kriteria response yang perlu dipertimbangkan didalam *Vortex Induced Vibration* (VIV) yaitu arah *in-line* dan arah *cross-flow*. Berikut penjelasannya.

a. *Arah In-line*

Respons *in-line* pada *pipeline span* dalam kondisi arus dominan berkaitan dengan *vortex shedding* bolak-balik atau simetris. Berikut merupakan persamaan untuk mencari *stress range, S_{IL}* pada *in-line* VIV:

$$S_{IL} = 2 \cdot A_{IL} \cdot (A_\gamma / D) \cdot \psi_{\alpha, IL} \cdot \gamma_s \quad (2.54)$$

Dimana:

S_{IL} : *stress range in-line* (Pa)

A_{IL} : *unit stress amplitude (in-line)* (Pa)

$$A_{IL/CF} = C_4(1 + CSF) \frac{D_t(D_0 - t) \cdot E}{L_{eff}^2} \quad (2.55)$$

$A_{IL/CF}$: maximum (unit diameter) stress amplitude

C_4 : boundary condition

D_0 : outside diameter (m)

t_{nom} : tebal dinding pipa (m)

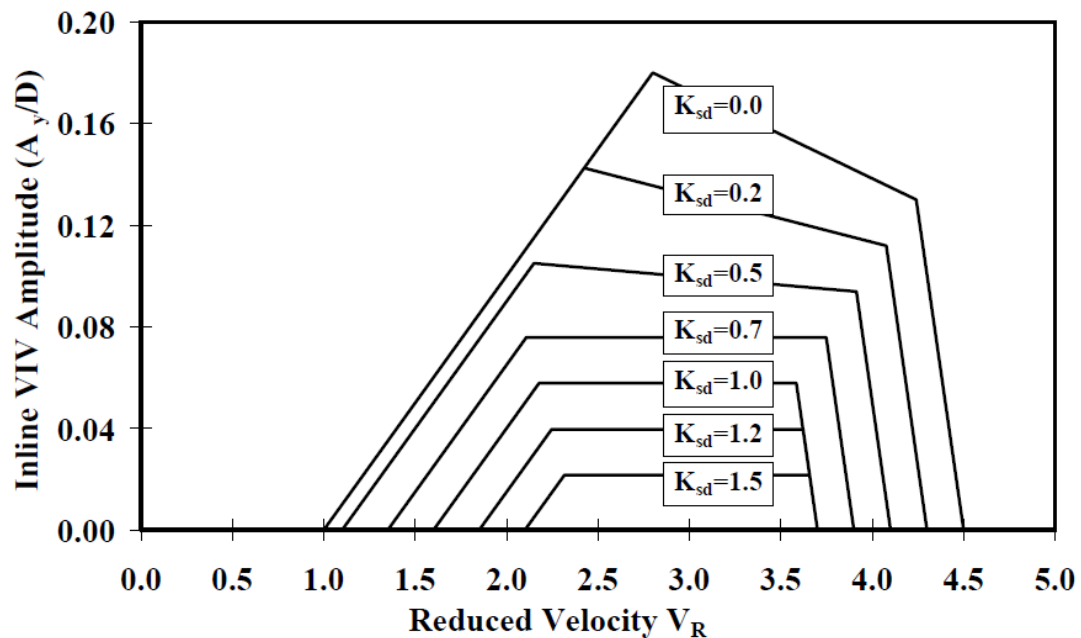
(A_γ/D) : amplitudo respons maksimum *in-line* VIV, lihat

Gambar 2.7

$\psi_{\alpha,IL}$: faktor koreksi dari rasio aliran arus α

γ_s : faktor keamanan untuk *stress range*, lihat **Tabel 2.3**

Berikut merupakan grafik untuk mendapatkan nilai (A_γ/D) yang merupakan fungsi antara V_R dan K_{sd} :



Gambar 2.7 Amplitudo Respons *In-line* VIV terhadap V_R dan K_{sd}
(DNV RP F105, 2006)

Faktor koreksi (*Reduction Factor*) $\psi_{\alpha,IL}$ dari rasio aliran arus, didapatkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\psi_{\alpha,IL} = \begin{cases} 0.0 & \text{untuk } \alpha < 0.5 \\ (\alpha - 0.5)/0.3 & \text{untuk } 0.5 < \alpha < 0.8 \\ 1.0 & \text{untuk } \alpha > 0.8 \end{cases} \quad (2.56a)$$

$$\psi_{\alpha,IL} = \begin{cases} 0.0 & \text{untuk } \alpha < 0.5 \\ (\alpha - 0.5)/0.3 & \text{untuk } 0.5 < \alpha < 0.8 \\ 1.0 & \text{untuk } \alpha > 0.8 \end{cases} \quad (2.56b)$$

$$(2.56c)$$

Jika $\alpha < 0.5$, *in-line* VIV diabaikan.

Berikut merupakan *Reduced Velocity* untuk arah *In-line*:

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \left(\frac{1.0}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{untuk } K_{sd} < 0.4 \\ \left(\frac{0.6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{untuk } 0.4 < K_{sd} < 1.6 \\ \left(\frac{2.2}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{untuk } K_{sd} < 1.6 \end{cases} \quad (2.57a)$$

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \left(\frac{1.0}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{untuk } K_{sd} < 0.4 \\ \left(\frac{0.6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{untuk } 0.4 < K_{sd} < 1.6 \\ \left(\frac{2.2}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{untuk } K_{sd} < 1.6 \end{cases} \quad (2.57b)$$

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \left(\frac{1.0}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{untuk } K_{sd} < 0.4 \\ \left(\frac{0.6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{untuk } 0.4 < K_{sd} < 1.6 \\ \left(\frac{2.2}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{untuk } K_{sd} < 1.6 \end{cases} \quad (2.57c)$$

Dimana:

$V_{R,onset}^{IL}$: *reduced velocity in-line*

$\gamma_{on,IL}$: *safety factor* untuk *in-line*. Lihat **Tabel 2.2**

K_{sd} : parameter stabilitas yang telah mempertimbangkan *safety factor*

b. Arah *Cross-flow*

Cross-flow VIV dipengaruhi oleh beberapa parameter, seperti *reduced velocity* V_R , *Keulegan-Carpenter* number K_C , rasio kecepatan laju aliran α , parameter stabilitas K_S , serta rasio *seabed gap* (e/D). Berikut merupakan persamaan untuk mencari *stress range*, S_{CF} pada *cross-flow* VIV:

$$S_{CF} = 2 \cdot A_{CF} \cdot (A_Z/D) \cdot R_k \cdot \gamma_S \quad (2.58)$$

Dimana:

S_{CF} : *stress range cross-flow* VIV (Pa)

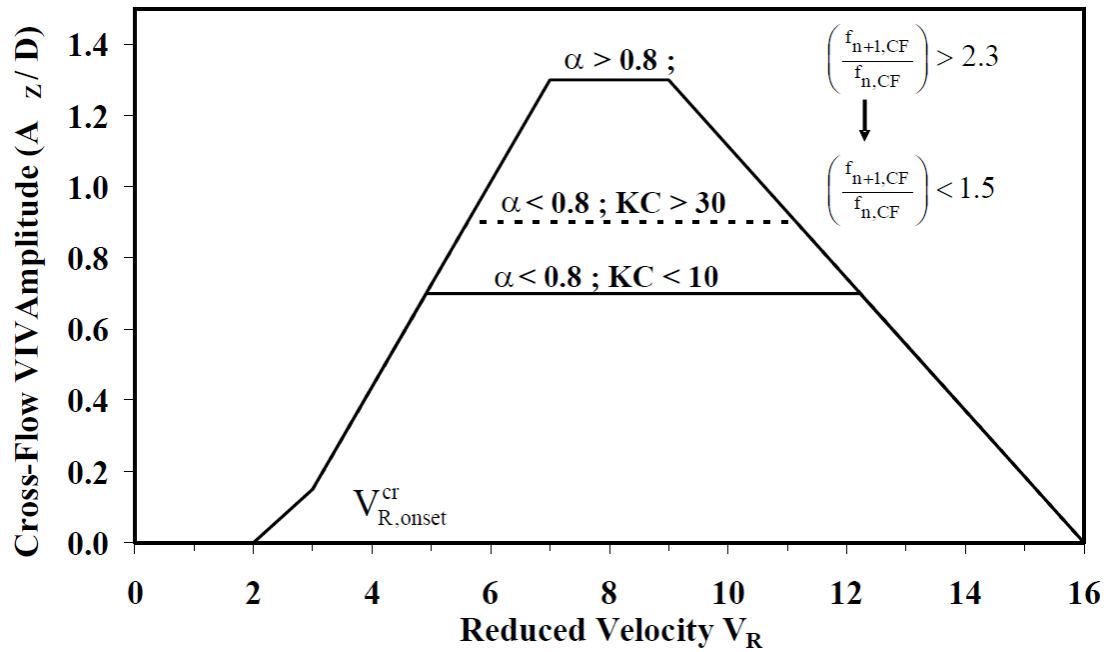
A_{CF} : *unit stress amplitude* (Pa)

(A_z/D) : amplitudo *cross-flow* VIV. lihat **Gambar 2.8**

R_k : amplitude *reduction factor* untuk damping

γ_s : faktor keamanan untuk *stress range*

Nilai amplitude *cross-flow* VIV, (A_z/D) dapat diperoleh melalui **Grafik 2.8** seperti dibawah ini:



Gambar 2.8 Respons Model *Cross-flow* (DNV RP F105, 2006)

Amplitude Reduction Factor untuk *damping* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R_k = \begin{cases} 1 - 0.15K_{sd} & \text{untuk } K_{sd} \leq 4 \\ 3.2K_{sd}^{-1.5} & \text{untuk } K_{sd} > 4 \end{cases} \quad (2.59a)$$

$$(2.59b)$$

Berikut persamaan untuk mendapatkan *Reduced Velocity* pada arah *cross-flow*:

$$V_{R,onset}^{CF} = \left(\frac{3 \cdot \psi_{proxy,onset} \cdot \psi_{trench,onset}}{\psi_{on,CF}} \right) \quad (2.60)$$

Dimana:

- $V_{R,onset}^{CF}$: *reduce velocity cross flow*
 $\psi_{proxy,onset}$: faktor koreksi untuk *cross flow* dekat *seabed*
 $\psi_{trench,onset}$: *reduction factor* untuk *cross flow* karena pengaruh *trench*
 $\psi_{on,CF}$: *safety factor* untuk *cross flow*, Lihat **Tabel 2.2**

Berikut merupakan perhitungan untuk faktor koreksi:

$$\psi_{proxy,onset} = \begin{cases} \frac{1}{5} \left(4 + 1.25 \frac{e}{D} \right) & \text{untuk } \frac{e}{D} < 0.8 \\ 1 & \text{untuk yang lainnya} \end{cases} \quad \begin{matrix} (2.61a) \\ (2.61b) \end{matrix}$$

Sedangkan, *reduction factor* karena *trench* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\psi_{trench,onset} = 1 + 0.5 \frac{\Delta}{D} \quad (2.61)$$

Dengan $1 \leq \frac{\Delta}{D} \leq 1$

Dimana:

$$\frac{\Delta}{D} = \frac{1.25 d_{trench} - e}{D_t} \quad (2.62)$$

$$\frac{\Delta}{D} = 0 \quad \text{jika } d_{trench} = 0$$

Sesuai dengan DNV RP F105 (2006), *maximum environmental bending moment* pada saat *in-line* dan *cross-flow* VIV dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$M_E = \sigma_E \frac{2 \cdot I}{D_s - t} \quad (2.63)$$

Maximum environmental stress, σ_E diberikan sebagai berikut masing-masing untuk arah *In-line* dan arah *Cross-flow*:

Arah *In-line*

$$\sigma_E = \frac{1}{2} \max \left\{ S_{IL}; 0.4 \cdot S_{CF} \frac{A_{IL}}{A_{CF}} \right\} + \sigma_{FM,max} \quad (2.64)$$

Arah *Cross-flow*

$$\sigma_E = \frac{1}{2} S_{CF} \quad (2.65)$$

Dimana:

σ_E : environmental stress (Pa)

S_{IL} : stress range (*in-line*) (Pa)

S_{CF} : stress range (*cross-flow*) (Pa)

A_{IL} : *in-line* unit amplitude stress (Pa)

A_{CF} : *cross-flow* unit amplitude stress (Pa)

$\sigma_{FM,max}$: *environmental stress due to direct wave loading* (Pa)

$$\sigma_{FM} = \frac{M_w \cdot (D_0 - t_2)}{2 \cdot I_{steel}} \quad (2.66)$$

M_w : moment gaya drag

$$M_w = C_5 \left(\frac{F_D \cdot L_{eff}}{1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}}} \right) \quad (2.67)$$

2.2.4.2 Safety Factor

Didalam suatu perancangan suatu struktur dibutuhkan faktor keamanan (*safety factor*) untuk menjamin supaya struktur tersebut tidak mengalami kegagalan. Sesuai dengan DNV RP F105 (2006), berikut merupakan *safety factor* yang dibutuhkan untuk beberapa persamaan sebelumnya.

Tabel 2.2 *Safety Factor* untuk Kriteria *Screening*

<i>Safety Factor</i>	<i>Safety Class</i>
γ_{IL}	1.4
γ_{CF}	1.4

(Sumber: DNV RP F105, 2006)

Tabel 2.3 *Safety Factor* untuk parameter *Vortex Induced Vibration (VIV)*

<i>Safety Factor</i>	<i>Safety Class</i>		
	<i>Low</i>	<i>Normal</i>	<i>High</i>
η	1.0	0.5	0.25
γ_k	1.0	1.15	1.30
γ_s	1.3		
$\gamma_{on, IL}$	1.1		
$\gamma_{on, CF}$	1.2		

(Sumber: DNV RP F105, 2006)

2.2.5 Frekuensi Natural Pipa

Free span memiliki frekuensi natural sebagai respon dinamik terhadap beban lingkungan dan operasi yang diterima. Setiap struktur memiliki frekuensi natural yang berbeda tergantung dari massa dan kekakuannya. Menurut DNV RP F105 (2006), besarnya frekuensi natural pipa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$f_n \approx C_1 \cdot \sqrt{1 + CSF} \sqrt{\frac{EI}{m_e L^4_{eff}} \cdot \left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}} + C_3 \left(\frac{\delta}{D} \right)^2 \right)} \quad (2.68)$$

Dimana:

$C_1 - C_3$: koefisien syarat batas

E : *Young's modulus* untuk *steel* (Pa)

I : momen inersia untuk *steel* (m⁴)

CSF : *Concrete Stiffness Factor*

m_e : massa efektif (kg/m), lihat Pers (2.10)

D : diameter luar pipa (m)

P_{cr} : *critical buckling load* (N), lihat Pers. (2.74)

δ : *static deflection* (m), Lihat Pers. (2.75)

S_{eff} : *Effective axial forces* (N), lihat Pers. (2.73)

2.2.5.1 Screening Frekuensi Natural

Pipa yang mengalami *free span* akan terjadi kegagalan jika tegangannya melebihi *yield* dan *fatigue*. Adanya aliran arus di sekitar *free span* pipa menyebabkan *vortex shedding* (pusaran). Jika frekuensi dari *vortex shedding* tersebut mendekati frekuensi natural pipa, maka dapat terjadi resonansi. Akibatnya, lapisan *concrete* pada pipa akan retak atau lepas (Bai dan Bai, 2005).

Berikut merupakan kriteria *screening* frekuensi natural untuk arah *in-line* dan *cross-flow* (DNV RP F105, 2005):

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{c,100\ year}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D} \cdot \left(1 - \frac{L/D}{250}\right) \frac{1}{\bar{\alpha}} \quad (2.69)$$

Dimana:

- $f_{n,IL}$: frekuensi natural *in-line* (Hz)
- γ_{IL} : *screening factor (in-line)*, lihat **Tabel (2.2)**
- $U_{c,100\ year}$: periode ulang 100 tahun untuk arus laut (m/s)
- $V_{R,onset}^{IL}$: *in-line onset value*
- L : panjang *free span* aktual (m)
- $\bar{\alpha}$: *current flow ratio*

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100\ year} + U_{w,1\ year}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D} \quad (2.70)$$

Dimana:

- γ_{CF} : *screening factor cross-flow* (Hz), lihat **Tabel (2.2)**
- $V_{R,onset}^{CF}$: *cross-flow onset value*

2.2.5.2 Concrete Stiffness Factor (CSF)

Concrete Stiffness Factor (CSF) menunjukkan kekakuan lapisan *concrete* relatif terhadap kekakuan pipa baja. Pemberian *coating* pada pipa memiliki pengaruh terhadapnya, seperti meningkatkan berat terendam, gaya

drag, massa tambah serta *buoyancy* pada pipa. Berikut merupakan persamaan untuk mendapatkan *Concrete Stiffness Factor* (CSF) sesuai dengan DNV-RP-F105 (2006):

$$CSF = k_c \left(\frac{E_{conc} I_{conc}}{EI_{steel}} \right)^{0.75} \quad (2.71)$$

Dimana,

k_c : *soil parameter* atau *empirical constant* untuk *concrete stiffness*

E_{conc} : *Young's modulus* untuk *concrete* (Pa)

$$E_{conc} = 10000 \cdot f_{cn}^{0.3} \quad (2.72)$$

f_{cn} : *kekuatan konstruksi concrete* (Pa)

E : *Young's modulus* untuk *steel* (Pa)

I_{conc} : *momen inersia concrete* (m⁴)

I_{steel} ; *momen inersa steel* (m⁴)

Parameter k_c merupakan perhitungan empiris untuk deformasi atau selip dalam *coating corrosion* dan retak pada *concrete coating*. Sesuai DNV-RP-F105 (2006), nilai k_c tergantung pada coating yang digunakan. Untuk asphalt nilai k_c adalah 0.33, sedangkan untuk PP (*polypropylene*)/PE (*polyethylene*) *coating* nilainya adalah 0.25.

Persamaan CSF diatas dianggap valid untuk semua diameter pipa yang relevan, asalkan untuk parameter D/t_{ratio} dan kekuatan *concrete*, f_{cn} , memenuhi syarat, diantaranya panjang sambungan pipa lebih dari 12 m, panjang *field joint* 0.5-1.0 m serta tebal *concrete coating* tidak melebihi 150 m.

2.2.5.3 *Effective Axial Force*

Ketika sebuah pipa bawah laut memiliki suatu penampang tertentu, nilai momen inersia dan kekakuan, maka pipa bawah laut dapat dikategorikan sebagai balok secara umum. Akan tetapi, pada *free span* pipa mengalami

regangan yang disebabkan oleh pemuaian material akibat *temperature content*, dan juga tekanan *content* tersebut.

Sebuah *free span* akan mengalami regangan pada kedua ujungnya, sehingga dapat disimpulkan terdapat gaya aksial yang bekerja pada pipa tersebut. Pada umumnya, perpanjangan tersebut menjadi suatu lendutan vertikal.

Berikut merupakan persamaan untuk mencari *Effective Axial Force*:

$$S_{eff} = H_{eff} - \Delta p_i A_i (1 - 2\nu) - A_s E \Delta T \alpha_e \quad (2.73)$$

Dimana:

H_{eff} : tension dari *pipelay barge* pada fase instalasi (*pipe laying*) (N/m)

Δp_i : perbedaan tegangan internal relatif terhadap fase instalasi ($P_i = 0$) (N/m)

A_s : luas penampang melintang pipa baja (m²)

A_i : luas penampang bagian dalam pipa (*internal cross section*) (m²)

ΔT : perbedaan temperatur relatif terhadap fase instalasi (°C)

α_e : koefisien ekspansi temperatur, diabaikan karena *temperature* dianggap konstan (°C)

2.2.5.4 *Critical Local Buckling*

Critical buckling load dipengaruhi oleh beberapa parameter, seperti kekakuan pipa, pengaruh kontak dengan tanah (*soil interaction*), serta berat terendam pipa. Berikut merupakan persamaan untuk menghitung *critical local buckling* berdasarkan DNV RP F105 (2006):

$$P_{cr} = (1 + CSF) C_2 \pi EI / L_{eff}^2 \quad (2.74)$$

Dimana:

C_2 : boundary condition coefficient, lihat **Tabel 2.4**
 I ; momen inersia pipa (m^4)

2.2.5.5 Static Deflection

Jika didalam survey atau pengukuran langsung, *static deflection* tidak diberikan, maka besarnya (δ) dapat diperkirakan dengan menggunakan persamaan (DNV RP F105, 2006):

$$\delta = C_6 \frac{q \cdot L_{eff}^4}{EI \cdot (1 + CSF)} \frac{1}{\left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}}\right)} \quad (2.75)$$

Dimana:

δ : static deflection (m)
 C_6 : koefisien syarat batas
 q : deflection load per unit length (N/m)
 S_{eff} : effective axial load (N)
 P_{cr} : critical buckling load (N)

2.2.5.6 Syarat Batas (Boundary Condition)

Didalam melakukan analisis *free span*, penentuan kondisi peletakan pada masing-masing ujungnya merupakan hal yang penting. Menurut DNV RP F105 terdapat 3 macam kondisi peletakan sesuai dengan teori pembebanan, yaitu *pinned-pinned*, *fixed-fixed* serta *single span on seabed* atau *pinned-fixed*. Berikut merupakan penjelasan singkat mengenai 3 syarat batas tersebut:

- *Pinned-pinned*

Syarat batas ini 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.

- *Fixed-fixed*

Digunakan untuk *span* yang masing-masing ujungnya tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-line* dan *cross-flow* terhadap arah aliran arus dan 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.

Berikut merupakan tabel dari koefisien-koefisien syarat batas untuk setiap kondisi peletakan berdasarkan DNV RP F105 (2006).

Tabel 2.4 Koefisien Syarat Batas

	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: 14.1 (L/L _{eff}) ² Mid-span: 8.6
C ₅	1/8	1/12	Shoulder: ⁴⁾ $\frac{1}{18 \left(\frac{L_{eff}}{L} \right)^2 - 6}$ Mid-span: 1/24
C ₆	5/384	1/384	1/384
1) Note that C ₃ = 0 is normally assumed for in-line if the steady current is not accounted for. 2) For pinned-pinned boundary condition L _{eff} is to be replaced by L in the above expressions also for P _{cr} . 3) For fixed-fixed boundary conditions, L _{eff} /L = 1 per definition.			

	Pinned-Pinned ²⁾	Fixed-Fixed ³⁾	Single span on seabed
4) C_5 shall be calculated using the static soil stiffness in the L_{eff}/L calculation.			

(Sumber: DNV RP F105, 2006)

2.2.6 *Limit State*

Limit State Design merupakan suatu kondisi yang membatasi operasi pipa sampai mencapai batas kemampuan dan keamanan struktur pipa tersebut. Respons yang terjadi pada pipa tidak boleh melebihi beban yang dapat diterima. *Limit State Design* mensyaratkan pipa untuk diperiksa pada semua mode kegagalan yang relevan. Mode kegagalan tersebut, bervariasi berdasarkan kekritisan dan dapat dibagi kedalam kategori limit state sebagai berikut:

a. *Ultimate Limit State (ULS)*

Keadaan ini dikaitkan dengan beban *overload*. Pipa dapat kehilangan integritas strukturnya jika melampaui batas kemampuannya.

- Meledak karena tekanan internal, gaya longitudinal dan lentur.
- Local Buckling atau Collapse karena tekanan, gaya longitudinal, dan tekukan.

b. *Serviceability limit state (SLS)*

Keadaan ini dapat mengurangi kemampuan operasional atau utilitas pipa. Jika *limit state* melampaui batas yang disyaratkan, pipa tidak akan memenuhi persyaratan fungsionalnya, seperti pemblokiran sebagian aliran atau *preventing pigs* di sepanjang pipa akibat *local ovalization*.

- Global buckling, yaitu *upheaval buckling* or *lateral buckling*.
- Keluar dari *roundness* untuk serviceability.

c. *Fatigue Limit State (FLS)*

Kondisi ULS yang memperhitungkan efek beban siklik.

- *Low-cycle fatigue* karena *cyclic lifetime thermal loading*.
- *High-cycle fatigue* dari *spanning pipeline* karena VIV.

- *Fracture.*
- d. *Accidental Limit State (ALS)*
- Suatu kondisi jika melampaui batas yang disyaratkan, maka struktur akan kehilangan integritasnya. Kondisi tersebut disebabkan oleh *accidental load*.
- Akumulasi regangan plastik karena tindakan abnormal.

2.2.7 *Ultimate Limit State (ULS)*

Analisis untuk kriteria *Ultimate Limit State (ULS)* merupakan pengecekan kondisi batas (limit) kekuatan pipa terhadap gaya internal maupun gaya eksternal yang bekerja pada pipa. *Ultimate Limit State (ULS)* didefinisikan sebagai kegagalan suatu struktur akibat adanya *yielding, buckling, bursting, collapse* atau karena hilangnya keseimbangan dari penampang pipa (Bai dan Bai, 2005). Berdasarkan DNV RP F105 (2006) terdapat beberapa efek beban yang harus diperhatikan didalam *Ultimate Limit State (ULS) checks*, yaitu arah vertikal dan arah horizontal. Untuk arah vertikal, efek beban yang harus diperhatikan meliputi bending statis (*self-weight*, profil *seabed*, dan lain-lain), *Cross-flow VIV* dan pengaruh pukot. Sedangkan, untuk arah horizontal meliputi *In-line VIV*, efek dari kombinasi beban, yaitu gelombang dan arus terhadap gaya *drag* dan inersia yang mengenai pipa secara langsung dan pengaruh pukot.

Keadaan lingkungan yang terjadi pada kriteria ULS merupakan kombinasi dari periode terjadinya peristiwa tersebut, misalnya gabungan antara tinggi gelombang signifikan 100 tahunan dan kecepatan arus 1 tahunan. Apabila tidak terdapat data pendukung, tumpuan pada *free span* harus diasumsikan *pinned-pinned*. Hal tersebut dikarenakan, pada kondisi syarat batas *pinned-pinned* terjadi beban defleksi yang cukup besar, sehingga cocok digunakan untuk menganalisis ULS. Karena pada dasarnya, *Ultimate Limit State* merupakan kondisi dimana struktur didesign untuk menahan gaya-gaya yang berasal dari luar maupun dari dalam struktur itu sendiri sampai struktur

mengalami kerusakan (*fracture*). Oleh karena itu, menurut DNV RP F105, kriteria yang harus dipertimbangkan didalam ULS adalah *Local Buckling*.

2.2.7.1 Local Buckling

Local buckling dapat terjadi jika terdapat kombinasi antara tekanan, *longitudinal force* dan bending. Menurut DNV OS F101 (2012), terdapat tiga kriteria yang harus dipenuhi, yaitu

- a. *System collapse* (hanya tekanan eksternal)
- b. *Propagation buckling* (hanya tekanan eksternal)
- c. *Combined loading criteria*, yaitu interaksi antara tekanan eksternal atau tekanan internal, gaya aksial dan momen lentur.

Pengecekan *local buckling* pada *free span* berdasarkan kriteria ULS harus memenuhi kombinasi beban dan kondisi *load controlled* yang sesuai kriteria didalam DNV OF F101 2012 (DNV RP F105, 2006). Pipa yang mengalami *bending moment*, *effective axial load*, dan *internal overpressure* harus dirancang memenuhi kriteria beban. Kondisi *Load Controlled* berdasarkan DNV OS F101 (2012) dapat dilihat seperti persamaan berikut ini:

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot S_{sd}(P_i)}{\alpha_c S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p \cdot \frac{p_i - p_e}{\alpha_c p_b(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (2.76)$$

$$\text{Untuk } 15 \leq D/t_2 \leq 45, P_i > P_e |S_{sd}|/S_p < 0.4$$

Dimana:

M_{sd} : resultan *bending moment*

$$M_{sd} = \sqrt{\left((M_F \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C) + (M_{E,CF} \cdot \gamma_E) \right)^2 + (M_{E,IL} \cdot \gamma_E)^2} \quad (2.77)$$

S_{sd} : *design effective axial force*

$$S_{sd} = S_{eff} \gamma_F \gamma_C \quad (2.78)$$

P_b : *burst pressure*

$$P_b(t) = \frac{2 \cdot t}{D - t} \cdot f_{cb} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (2.79)$$

γ_m : faktor tahanan material
 γ_{SC} : faktor keamanan *resistance*
 S_p : denote plastic axial forces (Nm)

$$S_p(t) = f_y \cdot \pi \cdot (D - t) \cdot t \quad (2.80)$$

M_p : denote plastic moment capacities (Nm)

$$M_p(t) = f_y \cdot (D - t)^2 \cdot t \quad (2.81)$$

f_y : karakteristik kekuatan material (Pa)

$$f_y = (SMYS - f_{y,temp}) \cdot \alpha_U \quad (2.82)$$

$$f_u = (SMYS - f_{u,temp}) \cdot \alpha_U \quad (2.83)$$

α_c : parameter aliran tegangan

$$\alpha_c = (1 - \beta) + \beta \cdot \frac{f_u}{f_y} \quad (2.84)$$

β : faktor kriteria kombinasi beban

$$\beta = \frac{60 - D_0/t}{90} \quad (2.85)$$

α_p : faktor tekanan pada beban kombinasi

$$\alpha_p = \begin{cases} 1 - \beta & \frac{P_i - P_e}{P_b} < \frac{2}{3} \\ 1 - 3\beta \left(1 - \frac{P_i - P_e}{P_b}\right) & \frac{P_i - P_e}{P_b} \geq \frac{2}{3} \end{cases} \quad (2.86a)$$

$$\frac{P_i - P_e}{P_b} \geq \frac{2}{3} \quad (2.86b)$$

$f_{y,temp}$: nilai *de-rating* pengaruh temperature dari *yield stress* (Pa)

$f_{u,temp}$: nilai *de-rating* pengaruh temperature dari *tensile strength* (Pa)

2.2.7.2 Buckling Kritis

Nilai tegangan *buckling* kritis didapat dengan menggunakan persamaan:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{steel}}{A_s L^2} \quad (2.87)$$

Dimana:

σ_{cr} : tegangan kritis *buckling* (Pa)

- E : *modulus young steel* (Pa)
- I_{steel} : momen inersia steel (m⁴)
- A_s : area dari *steel* pipa (m²)
- L : panjang *free span* aktual (m)

2.2.7.3 Tegangan *Von Mises*

Kombinasi dari beberapa beban akan dapat menghasilkan tegangan *von-mises*. Tegangan *von mises* juga disebut tegangan *von mises* (Bai dan Bai, 2005). Berikut merupakan persamaan Tegangan *Von Mises*:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_h^2 - \sigma_L \sigma_h + 3\tau^2} \quad (2.88)$$

Dimana:

- σ_{eq} : tegangan *equivalent* (Pa)
- σ_L : tegangan *longitudinal* (Pa)
- σ_h : tegangan *hoop* (Pa)
- τ : tegangan *tangential shear* (Pa)

2.2.7.4 Tegangan *Hoop*

Tegangan *Hoop* merupakan tegangan yang bekerja dalam arah tangensial. Besarnya *Hoop stress* tidak boleh melebihi *Specified Minimum Yield Stress* (SMYS). *Hoop stress* (σ_h) dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$\sigma_h = (p_i - p_e) \frac{D_0}{2t} \quad (2.89)$$

Dimana:

- p_i : *internal pressure* (Pa)
- p_e : *external pressure* (Pa)
- D_0 : diameter luar pipa (m)
- t : tebal dinding pipa (m)

2.2.7.5 Tegangan Longitudinal

Tegangan longitudinal merupakan tegangan aksial yang dialami oleh dinding pipa. Tegangan *Longitudinal* terdiri dari *bending stress*, *thermal stress*, dan *effect stress*, dan *poisson stress*. Berikut merupakan Persamaan *longitudinal*:

$$\sigma_L = \sigma_T + \sigma_p \pm \sigma_b \quad (2.90)$$

Dimana:

σ_T : tegangan thermal (Pa)

$$\sigma_T = -E\sigma_e\Delta T \quad (2.91)$$

σ_p : *poisson stress* (Pa)

$$\sigma_p = \nu\sigma_h \quad (2.92)$$

ν : *poisson's ratio steel*

σ_b : tegangan bending (Pa)

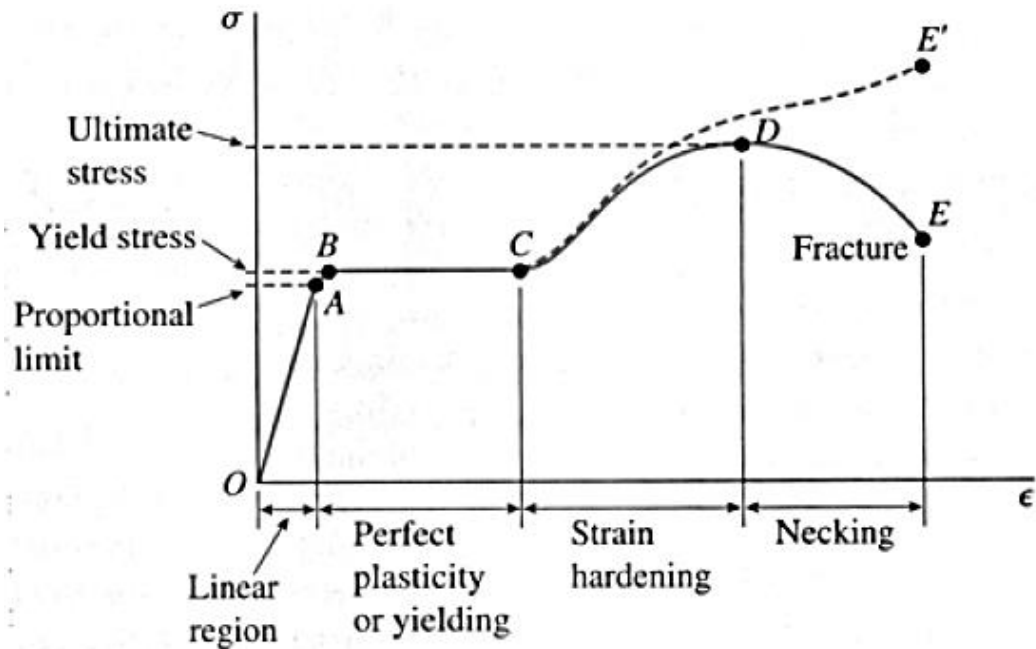
$$\sigma_b = \frac{M_{sd} \cdot D}{2I_{steel}} \quad (2.93)$$

M_{sd} : bending moment (Nm)

I_{steel} : momen inersia *steel* pipa (m⁴)

2.2.7.6 Batas Tegangan *Ultimate*

Bila suatu batang yang terbuat dari baja lunak ditarik oleh gaya aksial tertentu pada kondisi temperatur ruang, maka respon struktur baja tersebut dapat digambarkan pada suatu diagram yang menyatakan hubungan tegangan regangan yang dapat dilihat pada Gambar 2.9 di bawah ini:



Gambar 2.9 Kurva Tegangan-Regangan (IDC Technologies, 2009)

Daerah OA merupakan garis lurus yang merupakan daerah linier elastis. Kemiringan garis tersebut menyatakan besarnya modulus elastisitas atau yang biasa juga dikenal dengan *Modulus Young*. Titik A merupakan titik luluh bawah (*lower yield point*), sedangkan titik B merupakan titik luluh atas (*upper yield point*). Daerah BC merupakan daerah platis dimana regangan bertambah tetapi tegangan tetap. Sedangkan daerah CD merupakan daerah *strain hardening*. Pada daerah ini penambahan regangan akan diikuti dengan sedikit penambahan tegangan. Pada titik D, tegangan mencapai nilai maksimum atau dengan kata lain merupakan tegangan tarik ultimate (*Ultimate Tensile Strength*). Dan pada titik E, material akan putus.

Analisis batas tegangan *ultimate* merupakan analisis yang dilakukan untuk mengetahui batas tegangan maksimum suatu struktur untuk menahan beban. Sebelum melakukan analisis tersebut, perlu dilakukan terlebih dahulu perhitungan gaya-gaya yang bekerja pada struktur pipa bawah laut. Dalam tugas akhir ini, gaya yang diperhitungkan adalah *drag force* hingga *equivalent* atau *von mises stress*. Metode yang digunakan untuk melakukan analisis *ultimate* ini adalah dengan menggunakan metode Incremental Load dimana analisis dilakukan dengan meningkatkan kecepatan arus dan

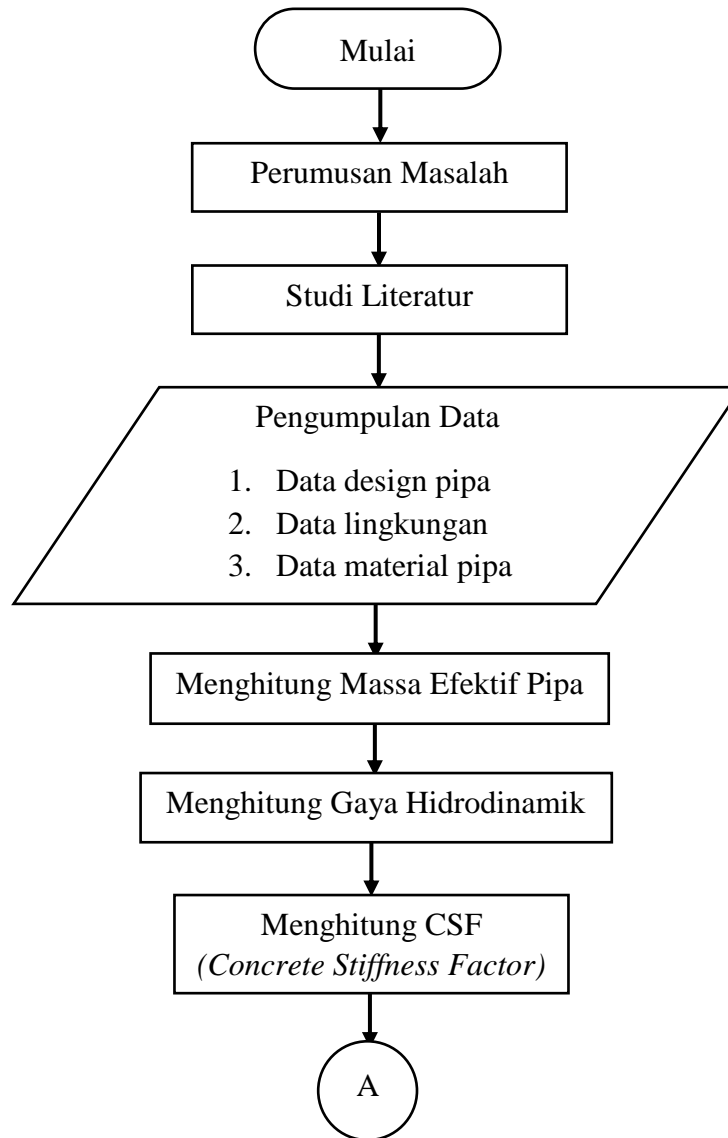
gelombang efektif secara bertahap sampai tegangan yang terjadi melebihi batas *ultimate*-nya.

Berdasarkan code *American Bureau of Shipping: Commentary on the Guide-Buckling and Ultimate Strength Assesment for Offshore Structures* tahun 2005, suatu struktur akan mengalami kegagalan pada saat tegangan yang terjadi pada struktur tersebut melebihi dari $0,8 \times$ Ultimate Tensile Strength (UTS).

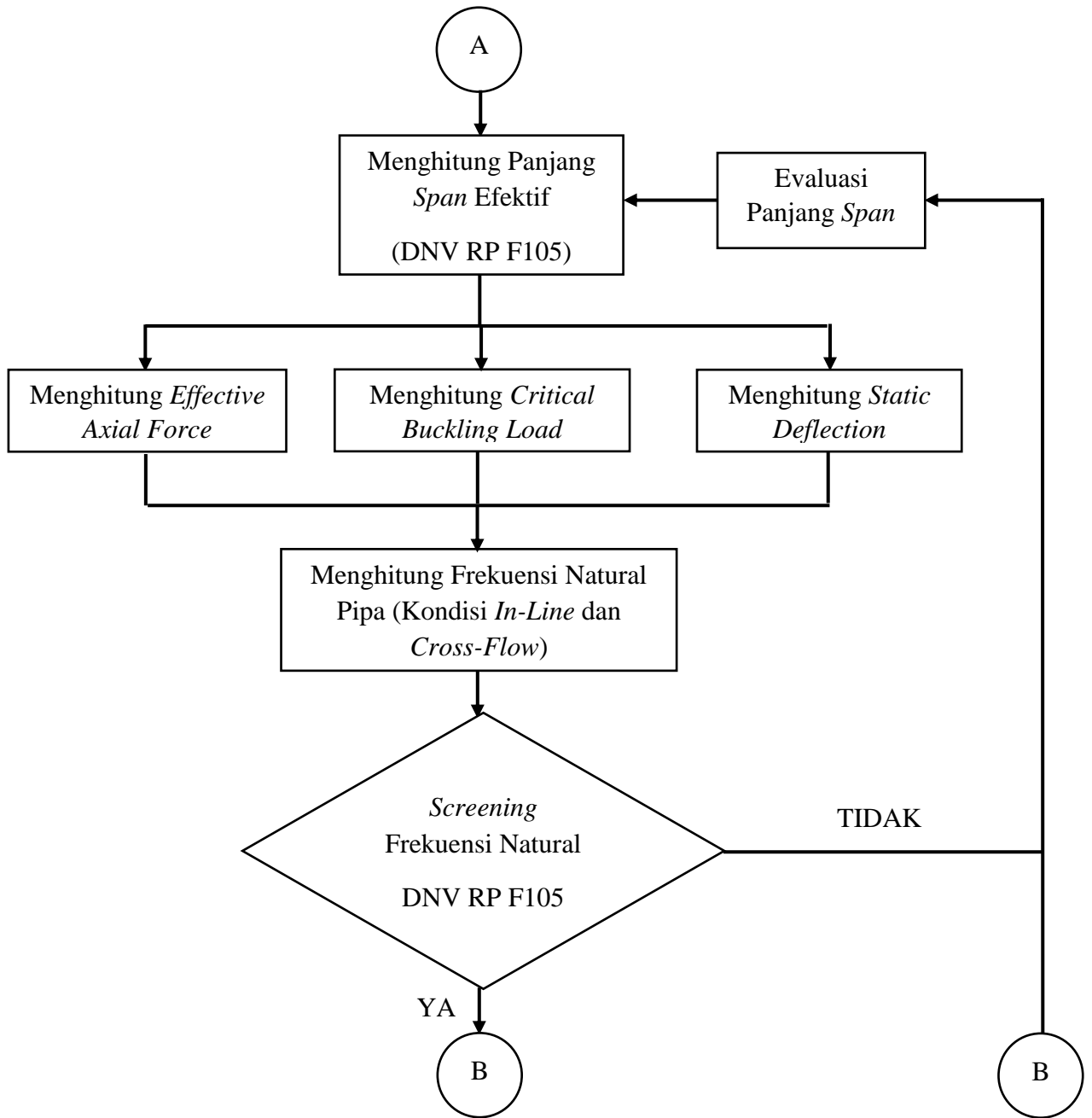
BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

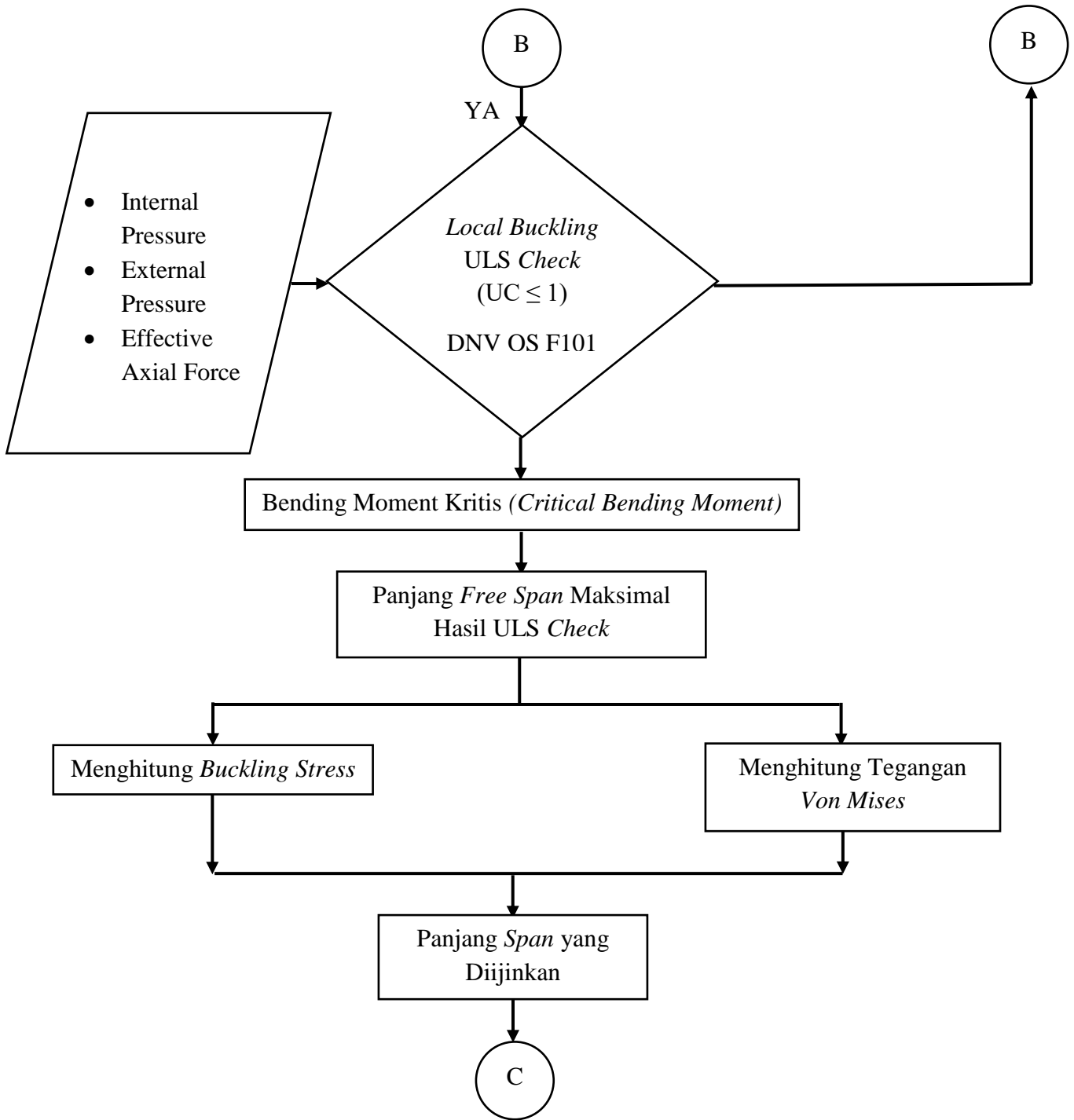
3.1 Diagram Alur



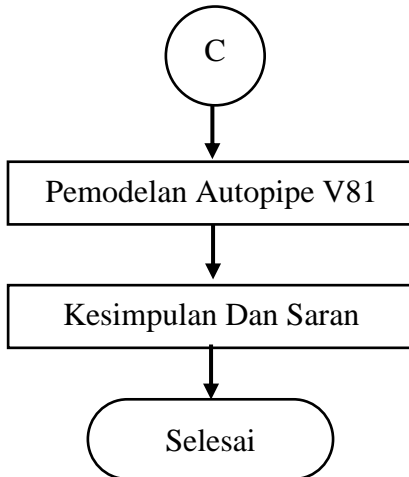
Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Alur Penelitian (Lanjutan)



Gambar 3.3 Diagram Alur Penelitian (Lanjutan)



Gambar 3.4 Diagram Alur Penelitian (Lanjutan)

3.2 Prosedur Penelitian

Tahapan-tahapan dalam melaksanakan penelitian atau analisis pada tugas akhir ini meliputi:

1. Perumusan Masalah

Pada tahap perumusan masalah penulis berdiskusi bersama dosen pembimbing Tugas Akhir.

2. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mencari, mempelajari, serta memahami jurnal, buku-buku, serta laporan Tugas Akhir alumni baik dari institusi sendiri maupun dari institusi lain yang berkaitan dengan rumusan masalah dalam tugas akhir ini. Literatur-literatur tersebut juga digunakan sebagai acuan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

3. Pengumpulan Data

Dalam tahapan ini, penulis menggunakan data sekunder yang didapatkan dari hasil pengukuran serta penelitian pihak lain. Data-data tersebut meliputi:

- a. Data properti pipa, merupakan data-data yang berhubungan dengan dimensi pipa dan properti-properti yang melekat pada pipa. Data-data tersebut

meliputi : panjang pipa, *outside diameter*, *inside diameter*, ketebalan pipa, tebal dan densitas coating, tebal dan densitas concrete.

- b. Data lingkungan, merupakan data-data lingkungan yang bersinggungan baik secara langsung ataupun tidak langsung dengan struktur pipa bawah laut. Data-data tersebut meliputi: data gelombang dan arus, *water depth* dan *tidal range*, data tanah, *marine growth*, suhu lingkungan, kedalaman pipa dari permukaan air laut, densitas air laut, viskositas kinematis air, percepatan gravitasi, tinggi gelombang, periode gelombang, panjang gelombang, tinggi gelombang kecepatan arus, ketinggian arus di atas seabed, tekanan eksternal, serta *seabed roughness factor*.
- c. Data material pipa, merupakan data-data sifat material baja penyusun yang digunakan pada pipa bawah laut. Data-data tersebut meliputi: densitas baja, *young modulus*, *poisson's ratio*, *Specified Minimum Yield Strength (SMYS)*, *Specified Minimum Tensile Strength (SMTS)*, serta koefisien ekspansi thermal.

4. Menghitung Panjang *Free Span* Efektif

Perhitungan panjang *free span* efektif berdasarkan DNV RP F105: *Free Spanning Pipelines* 2006. Berikut merupakan penjelasan dari metodologi perhitungannya:

- Nilai massa efektif pipa nantinya diperlukan untuk menghitung *fundamental natural frequency* dan beberapa parameter lainnya seperti menghitung berat terendam pipa (*Submerged Weight*)
- Setelah mendapatkan data lingkungan seperti data gelombang dan arus, dilakukan perhitungan terhadap gaya-gaya hidrodinamik dari *free span*. Adapun perhitungan gaya-gaya tersebut meliputi, *Renold Number (Re)*, *Keulegan-Carpenter Number (KC)*, rasio aliran (*flow rasio*), gaya geser (*drag force*), dan gaya angkat (*lift force*). Sedangkan untuk parameter hidrostatik dalam analisis ini adalah *total damping ratio*, *stability*

parameter, stability parameter factor, dan faktor koresksi seperti seabed correction factor, mass correction factor, dan current correction factor.

- CSF (*Concrete Stiffness Factor*) dan β (*relative soil stiffness parameter*) merupakan nilai yang harus dihitung sebelum menghitung panjang span efektif. CSF ini merupakan efek kekakuan yang dihasilkan dari pengaruh concrete coating pada pipeline. Sedangkan, β merupakan kekakuan dari pengaruh interaksi dengan tanah.

5. Menghitung Frekuensi Natural

Untuk menghitung Frekuensi Natural diperlukan analisis dinamis dengan menghitung terlebih dahulu nilai *effective axial load, critical bucling load, dan static deflection*. Frekuensi dihitung untuk arah *in-line* dan *cross-flow*. Hasil dari frekuensi natural tersebut digunakan untuk melakukan *screening* sesuai DNV RP F105: *Free Spanning Pipeline* 2006.

6. *Screening Criteria*

Untuk mengecek apakah panjang *free span* pipa perlu untuk dilakukan evaluasi atau tidak dari pengaruh terjadinya VIV *in-line* atau *cross flow*, diperlukan pengecekan terhadap frekuensi yang terjadi antara *pipeline free span* dan pengaruh VIV. Selain memerlukan nilai frekuensi natural, dalam persamaan ini juga dibutuhkan parameter lainnya seperti *reduce velocity* dan *current flow ratio* yang harus dihitung terlebih dulu. *Screening* ini sesuai dengan yang diberikan pada DNV RP F105. Jika memenuhinya maka tahapan selanjutnya dapat dikerjakan. Namun jika tidak, perlu untuk melakukan evaluasi panjang *free span* dan kembali di perhitungan panjang *span* efektif sebelumnya. Dalam analisis menggunakan *screening* frekuensi natural ini dapat menghasilkan panjang *free span* maksimal agar tidak perlu melakukan pengecekan kelelahan karena pengaruh VIV yaitu dengan menyeimbangkan kedua bagian persamaan *screening* tersebut.

7. Pengecekan ULS (*Local Buckling*) sesuai DNV OS F101

Pengecekan terhadap ULS dilakukan berdasarkan *standard codes* yaitu DNV OS F101: *Submarine Pipeline System* 2012. Terdapat beberapa parameter yang harus diketahui sebelum melakukan pengecekan tersebut, diantaranya *denote plastic capacities* yang harus diketahui terlebih dahulu kekuatan material dari pipa yang dihitung, *fuctional load* dan *environmental stress* kondisi *in-line* dan *cross-flow* untuk mengetahui bending moment akibat beban lingkungan, tegangan *equivalent* dan *buckling stress* sebagai nilai batas dan nilai kritis tegangan *equivalent*. Perhitungan *local buckling* pada analisa ini ditinjau berdasarkan beban kombinasi dari tekanan internal, tekanan eksternal *bending moment* serta *effective axial force*. Nilai kriteria local buckling (UC) harus kurang dari atau sama dengan 1 (DNV OS F101), jika lebih dari 1 akan dilakukan evaluasi panjang span dengan mengurangi panjang *free span* yaitu menambahkan suatu penumpu pada bawah pipeline. Panjang *free span* maksimal yang diizinkan dari hasil screening criteria untuk frekuensi natural harus dicek lagi menggunakan *local buckling check* ini. Jika hasilnya memenuhi maka panjang span maksimal tersebut dapat diterima dan dilanjutkan sampai batas *Ultimate* berapa pipa ini tidak mengalami kegagalan. Jika tidak memenuhi, maka dilakukan evaluasi panjang free span untuk mendapatkan panjang *free span* maksimal yang diizinkan dengan memenuhi *screening criteria* frekuensi natural (in line dan cross flow) dan kriteria *local buckling*.

8. Menghitung Bending Momen Kritis (*Critical Bending Momen*)

Dari persamaan ULS Check DNV OS F101, dapat diperoleh nilai *bending moment* yang menghasilkan nilai UC=1 atau mendekatinya. Bending moment tersebut dikatakan sebagai bending moment maksimal atau kritis yang masih diperbolehkan sesuai ULS check. Setelah mendapatkan nilainya, kemudian dapat dicari atau dihitung panjang free span yang dapat menghasilkan nilai bending moment kritis tersebut. Panjang free span tersebut dikatakan sebagai panjang free span maksimal hasil dari ULS check sesuai DNV-OS-F101.

9. Menghitung *Buckling Stress* dan Tegangan Ekuivalen

Buckling Stress dan Tegangan Ekuivalen saling terkait satu sama lain. *Buckling Stress* merupakan batas dari tegangan ekuivalen. Nilai panjang *span* yang digunakan merupakan panjang *span* maksimal yang diijinkan. Sedangkan, pada tegangan ekuivalen nilainya tidak boleh melebihi besarnya *buckling stress*. Tegangan ekuivalen sendiri dipengaruhi oleh tegangan *thermal*, *poisson's stress* dan tegangan bending.

10. Panjang *Span* yang Diijinkan

Panjang *span* maksimum yang diijinkan merupakan panjang terpendek dari beberapa hasil *screening* yang telah dilakukan, yaitu *screening* frekuensi natural dan ULS (*Local Buckling*).

11. Pemodelan Autopipe V81

Pemodelan pipa pada Autopipe V81 bertujuan untuk menggambarkan secara visual keadaan pipa bawah laut, serta memastikan tegangan yang dialami pipa tidak melebihi tegangan yang diijinkan sesuai *code* dan *standard*.

12. Kesimpulan dan Saran

Menarik kesimpulan dari hasil analisis yang telah dibuat yang selanjutnya dapat memberikan saran untuk penelitian lebih lanjut terkait *Ultimate Limit State* pada *free span* pipa bawah laut.

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

BAB IV
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Tugas Akhir

Data yang digunakan pada Tugas Akhir ini merupakan data pipa bawah laut milik Santos (Madura Offshore) Pty Ltd dan PC Madura Ltd yang beroperasi di Selat Madura, yaitu 46 km di selatan Pulau Madura dan 142 km di sebelah timur Surabaya. Pipa bawah laut tersebut menyalurkan gas hasil pengeboran dari Meliwis WHP menuju Maleo WHP sepanjang 11 km dengan diameter 10 inch.

4.2 Data Design Pipa Bawah

a. Data Properti Pipa

Tabel 4.1 Data Properti Pipa Bawah Laut

Parameters		Units	10" Subsea Pipeline from Meliwis to Maleo
Outside Diameter		mm	273.05 (10.75 inch)
Wall Thickness	Pipeline	mm	12.7 (0.5 inch)
	Riser	mm	12.7 (0.5 inch)
Approximate Pipeline Length		km	11
Internal Corrosion Allowance		mm	3
Design Flowrate		MMscfd	25
Design Life		years	15
ANSI Flange Rating		-	900#RTJ
Material ^(note 1)		-	API 5L Grade X65 NO/QO/MO PSL 2 CS
Line Pipe Type ^(note 3)		-	HFW
SMYS ^(note 2)		MPa	450
SMTS ^(note 2)		MPa	535
Young Modulus		MPa	2.07×10^5
Poison Ratio		-	0.3
Steel Density		kg/m ³	7850
Product Density ^(note 6)		kg/m ³	58.8
Coefficient of Thermal Expansion		/°C	1.17×10^{-5}
Pipeline Service		-	Gas

(Sumber: PT. Singgar Mulia, 2018)

b. Data *Corrosion Coating* Pipa

Tabel 4.2 Data *Corrosion Coating* Pipa

Data	Unit	Pipeline & Riser	Splash Zone
Material	-	3 LPE	Neoprene over FBE
Thickness	mm	3.5	12.7
Density	kg/m ³	940	1450
Cutback	mm	150	150

c. Data *Concrete Coating* Pipa

Tabel 4.3 Data *Concrete Coating* Pipa

Data	Unit	Pipeline
Material	-	Concrete
Thickness	mm	30
Density	kg/m ³	3040

4.2.1 Data Lingkungan

a. *Water Depth* dan *Tidal Range*

Tabel 4.4 Data *Water Depth* dan *Tidal Range* Pipa

Parameter	Units	Value	
Minimum Water Depth	m	58.2	
Maximum Water Depth	m	76.3	
Chart Datum (CD) is equal to LAT	m	0.0	
Storm Surge (Note 2)	1-yr return period	m	0.03
	100-yr return period	m	0.13
Mean Sea Level (MSL)	m	1.38	
Highest Astronomical Tide (HAT)	m	2.67	
Lowest Astronomical Tide (LAT)	m	0.0	

b. Data Gelombang dan Arus

Tabel 4.5 Data Arus dan Gelombang Pipa Periode 1-Tahunan

Parameter	Unit	Direction (to which)								
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Recurring Directional Maximum Waves										
Significant Wave	H _s	m	1.12	0.51	1.83	1.47	0.78	0.38	3.24	2.03
	T _s	s	5.23	3.50	6.73	6.01	4.35	3.01	9.01	7.09
	L _s	m	42.71	19.13	70.71	56.39	29.54	14.15	125.9	78.47
Individual Wave	H _{max}	m	2.02	0.92	3.29	2.65	1.40	0.68	5.83	3.65
	T _{max}	s	6.80	4.55	8.75	7.81	5.66	3.91	11.71	9.22
	L _{max}	m	72.19	32.32	119.0	95.13	50.02	23.87	202.1	131.6
Recurring Maximum Combined (Wind+Tide) Induced Current										
Depth from Sea Surface (meters)	0.0	m/s	0.56	0.54	0.61	0.57	0.62	0.55	0.59	0.57
	5.7	m/s	0.55	0.53	0.60	0.56	0.61	0.54	0.58	0.56
	11.4	m/s	0.55	0.53	0.60	0.56	0.60	0.54	0.58	0.56
	17.1	m/s	0.54	0.53	0.60	0.55	0.60	0.54	0.58	0.55
	22.8	m/s	0.54	0.53	0.59	0.55	0.59	0.53	0.58	0.55
	28.5	m/s	0.53	0.53	0.58	0.54	0.58	0.53	0.57	0.54
	34.2	m/s	0.53	0.52	0.58	0.54	0.57	0.52	0.56	0.54
	39.9	m/s	0.51	0.51	0.56	0.53	0.55	0.51	0.55	0.53
	45.6	m/s	0.50	0.50	0.55	0.51	0.53	0.50	0.54	0.51
	51.3	m/s	0.48	0.48	0.52	0.49	0.49	0.49	0.52	0.49
57.0	m/s	0.45	0.47	0.48	0.47	0.45	0.47	0.49	0.47	

Tabel 4.6 Data Arus dan Gelombang Pipa Periode 100-Tahunan

Parameter	Unit	Direction (to which)								
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Recurring Directional Maximum Waves										
Significant Wave	H _s	m	2.36	3.95	4.87	2.06	2.31	3.09	5.19	2.99
	T _s	s	7.66	9.97	11.10	7.15	7.58	8.79	11.46	8.65
	L _s	m	91.54	152.4	184.6	79.8	89.65	120.0	194.9	116.3
Individual Wave	H _{max}	m	4.25	7.11	8.77	3.71	4.16	5.56	9.34	5.38
	T _{max}	s	9.96	12.96	14.43	9.30	9.85	11.43	14.90	11.25
	L _{max}	m	152.1	237.7	278.8	133.8	149.0	194.1	291.8	188.9
Recurring Maximum Combined (Wind+Tide) Induced Current										
Depth from Sea Surface (meters)	0.0	m/s	0.67	0.78	0.70	.058	.070	1.03	0.63	0.62
	5.7	m/s	0.65	0.76	0.69	0.57	0.68	0.99	0.62	0.61
	11.4	m/s	0.65	0.75	0.68	0.57	0.68	0.98	0.62	0.60
	17.1	m/s	0.64	0.74	0.68	0.56	0.67	0.96	0.61	0.60
	22.8	m/s	0.63	0.73	0.67	0.56	0.66	0.94	0.61	0.59
	28.5	m/s	0.62	0.71	0.66	0.55	0.64	0.91	0.60	0.58
	34.2	m/s	0.60	0.69	0.64	0.54	0.63	0.87	0.59	0.57
	39.9	m/s	0.58	0.65	0.62	0.53	0.60	0.81	0.58	0.56
	45.6	m/s	0.55	0.61	0.59	0.52	0.56	0.73	0.56	0.54
	51.3	m/s	0.51	0.55	0.55	0.50	0.51	0.62	0.53	0.51
	57.0	m/s	0.45	0.47	0.49	0.47	0.45	0.47	0.49	0.47

c. Data Tanah

Tabel 4.7 Data Tanah

Parameter	Unit	Value
Soil Type	-	Clay
Undrained Shear Strength	kPa	2.0
Friction Angle	Deg	0.0

Tabel 4.7 Data Tanah (Lanjutan)

Parameter	Unit	Value
Submerged Weight	kN/m ³	3.5

d. *Marine Growth***Tabel 4.8** Data *Marine Growth*

Water Depth (m)	Marine Growth Thk. (mm)
MSL to (-) 16.75 m	75
(-)16.75 m to (-)35.00 m	100
(-)35.00 m to mudline	75

4.3 Perhitungan Umum Pipa Bawah Laut**4.3.1 Pipeline Properties**

Perhitungan properti pipa penting dilakukan, karena merupakan dasar yang digunakan untuk perhitungan-perhitungan selanjutnya. Berikut merupakan parameter-parameter yang diperlukan untuk mengitung perhitungan umum pipa.

Tabel 4.9 Data Properti Pipa

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Outside Diameter	D_0	0.27	m
Corrosion Coating Thickness	t_{corr}	0.0035	m
Concrete Coating Thickness	t_c	0.03	m
Content Density	ρ_{cont}	58.8	kg/m ³
Steel Density	ρ_{st}	7850	kg/m ³
Concrete Coating Dencity	ρ_c	3040	kg/m ³
Corrosion Coating Density	ρ_{corr}	940	kg/m ³
Massa Jenis Air Laut	ρ_w	1025	kg/m ³

Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4.10, tabel tersebut merupakan hasil perhitungan umum pipa. Perhitungan tersebut didasarkan pada persamaan-persamaan yang telah dijelaskan pada Bab 2.

Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Umum Pipa

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tebal Dinding Pipa	t_2	0.0127	m
Diameter Total Pipa (termasuk Semua Coating)	D	0.34	m
Diameter Dalam Pipa	D_i	0.25	m
Diameter <i>Concrete Coating</i>	D_c	0.34	m
Momen Inersia Baja (<i>Steel</i>)	I_{steel}	8.82E-05	m ⁴
Momen Inersia <i>Concrete Coating</i>	I_{conc}	3.54E-04	m ⁴
<i>Internal Cross Section Area</i>	A_i	0.05	m ²
<i>Cross Section Area</i> Pipa	A_s	0.01	m ²

4.3.2 Berat Terendam Pipa

Berat terendam pipa (W_s) merupakan selisih antara berat total pipa (*gravity*) termasuk lapisan beton, lapisan anti korosi dan fluida isi pipa dengan *buoyancy* pipa yang terjadi untuk setiap satuan panjangnya. Untuk mendapatkan berat terendam pipa (*Submerged Weight*) tersebut, langkah pertama yang harus dilakukan adalah menghitung berat pipa dengan semua bagiannya, seperti bagian steel, lapisan coating, concrete, serta isi pipa (khusus untuk kondisi operasi). Setelah didapatkan berat pipa kemudian mengurangnya dengan *buoyancy* yang terjadi.

Tabel 4.11 merupakan hasil perhitungan berat terendam pipa dan berbagai parameter-parameternya, seperti bagian pipa dan *buoyancy*.

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Berat Terendam Pipa beserta Parameternya

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Content Weight	W_{cont}	2.83	kg/m
Steel Weight	W_{st}	81.54	kg/m

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Berat Terendam Pipa beserta Parameternya
(Lanjutan)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Concrete Coating Weight	W_c	88.83	kg/m
Corrosion Coating Weight	W_{corr}	12.62	kg/m
Massa struktur	m_{str}	183.00	kg/m
Bouyancy	b	913.21	N/m
Massa Tambah	m_a	93.09	kg/m
Berat Terendam Pipa	W_S	909.79	N/m

4.3.3 Tekanan Pada Pipa

Tekanan pada pipa terdiri dari tekanan internal dan tekanan eksternal. Tekanan internal yang digunakan merupakan tekanan design pipa. Sedangkan, tekanan eksternal pipa didapatkan dengan menggunakan Pers. (2.19)

Tabel 4.12 Tekanan Pipa

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Water Depth	d	58.2	m
Kenaikan Muka Air Laut	T_{surge}	1.38	m
Kedalaman Perairan Total	h_t	80.316	m
Gaya Gravitasi	g	9.81	m/s^2
Massa Jenis Air Laut	ρ_w	1025	kg/m^3
Tekanan Internal	P_i	1.10E+07	Pa
Tekanan Eksternal	P_e	8.08E+05	Pa

Berdasarkan Tabel 4.12 tersebut, dapat dilihat bahwa tekanan internal bernilai lebih besar dari pada tekanan eksternal. Hasil tersebut nantinya akan berpengaruh pada persamaan yang digunakan untuk menghitung *local buckling* dengan kriteria beban kombinasi.

4.3.4 Massa Efektif Pipa

Massa efektif pipa merupakan hasil penjumlahan antara berat total pipa, seperti berat struktur pipa, berat lapisan beton, berat lapisan anti korosi, dan berat fluida yang mengalir atau didalam pipa serta massa tambah pipa. Untuk

mendapatkan massa tambah (*added mass*) tersebut diperlukan nilai koefisien massa tambah (*added mass*) terlebih dahulu. Koefisien *added mass* tersebut dapat diperoleh dengan menggunakan Pers. (2.13) yang sesuai dengan DNV RP F105 (2006). Tabel 4.13 merupakan hasil dari koefisien massa tambah (*added mass*).

Tabel 4.13 Koefisien Massa Tambah (*Added Mass*)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Seabed Gap</i>	e	1	m
Diameter Luar Pipa Total	D_t	0.34	m
<i>Seabed Gap Ratio</i>	e/D_t	2.94	($e/D_t \geq 0.8$)
Koefisien Massa Tambah	C_a	1	

Karena nilai $e/D_t \geq 0.8$ maka nilai C_a adalah 1. Persamaan yang digunakan untuk mendapat menghitung massa efektif pipa (m_e) adalah Pers. (2.10) dan hasil yang didapat adalah 278.92 kg/m.

4.4 Gelombang Dan Arus

Dari pengolahan data gelombang dan arus, dapat diperoleh kecepatan dan percepatan dari arus maupun gelombang. Pengaruh kecepatan dan percepatan arus serta gelombang tersebut akan menentukan gaya-gaya hidrodinamik yang bekerja pada pipa serta mempengaruhi stabilitas pipa didasar laut. Berikut merupakan penjabaran terkait hasil dan perhitungan beban lingkungan tersebut.

4.4.1 Kecepatan Arus Pada Pipa

Arus yang dianalisis merupakan arus yang arahnya tegak lurus dengan pipa (sudut $\theta_c = 90^0$), karena arah tersebut memiliki pengaruh beban arus yang paling besar dibandingkan dengan arah yang lain. Karena pipa berada didekat dasar laut, maka kekasaran dasar laut (z_0) berpengaruh pada aliran arus dan pada kondisi *free span*, gap (e) harus tetap dipertimbangkan. Nilai kekasaran seabed didapat pada Tabel 2.1 sesuai dengan jenis tanah dimana posisi pipa meletak. Kecepatan arus pada elevasi pipa didapat dengan menggunakan Pers. (2.40).

Tabel 4.14 Parameter Perhitungan Kecepatan Arus Pada Pipa

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Arah aliran arus	θ_c	90	°
Diameter Total Pipa	D	0.34	m
<i>Gap</i>	e	1	m
Arus permukaan referensi	$V(z_r)$	0.48	m/s
Elevasi diatas <i>seabed</i>	z	57.86	m
Tinggi permukaan referensi diatas <i>seabed</i>	z_r	5.82	m
Bottom roughness (<i>Silt</i>)	z_0	5.00E-06	m

Nilai kekasaran *seabed* (z_0) diatas didapatkan dari Tabel 2.1 sesuai dengan DNV RP F105 (2006). Berdasarkan parameter-parameter diatas, maka hasil perhitungan untuk kecepatan arus pada pipa (U_c) pada kondisi 1 tahunan dan 100 tahunan adalah 0.56 m/s..

4.4.2 Kecepatan Partikel Gelombang Pada Pipa

Kecepatan partikel akibat gelombang, dapat dicari dengan mengolah data gelombang menggunakan spektrum gelombang. Spektrum yang digunakan merupakan spektra JONSWAP. Formulasi spektra JONSWAP akhir-akhir ini sering dipakai dalam perancangan dan analisis bangunan lepas pantai yang dioperasikan di Indonesia. Hal tersebut dikarenakan, perairan Indonesia tempat dimana dioperasikannya bangunan laut tersebut merupakan perairan kepulauan atau perairan tertutup. Berikut merupakan data gelombang yang digunakan dalam perhitungan untuk mendapatkan kecepatan partikel gelombang.

Tabel 4.15 Data Gelombang Pada Lokasi Pipa (Selat Madura)

Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
Tinggi gelombang signifikan	H_s	3.24	5.19	m
Periode gelombang signifikan	T_s	9.01	11.46	s
Water Depth	h	58.2	58.2	m

Data tersebut kemudian diolah untuk mendapatkan parameter-parameter yang dibutuhkan untuk menghitung spektra JONSWAP, diantaranya periode puncak gelombang, frekuensi puncak gelombang, fungsi distribusi, *peak-enhancement factor* dan konstanta *generalized Philips*, seperti yang ditampilkan pada Tabel 4.16 berikut ini.

Tabel 4.16 Parameter-parameter Perhitungan Spektra JONSWAP

Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
Periode puncak gelombang	T_p	9.46	12.03	s
Frekuensi puncak gelombang	ω_p	0.66	0.52	rad/s
Fungsi distribusi	ϕ	5.26	5.28	
Peak-enhancement factor	γ	1	1	
Konstanta generalize philips	α	0.00663	0.00650	
Angka Gelombang	k	0.04542	0.02962	

Nilai fungsi distribusi (ϕ) tersebut digunakan untuk mendapatkan *Peak-enhancement factor* (γ) yang sesuai. Didalam Tugas Akhir ini, *Peak-enhancement factor* (γ) bernilai 1 karena nilai fungsi distribusi (ϕ) lebih dari 5. Setelah mendapatkan parameter-parameter yang dibutuhkan, selanjutnya menentukan angka gelombang. Angka gelombang merupakan salah satu variable yang didapat dari iterasi dan digunakan untuk mentransformasi gelombang permukaan ke gelombang di elevasi pipa.

Perhitungan spektra gelombang dan transformasi gelombang dilakukan didalam kondisi 1 tahunan dan 100 tahunan. Dari perhitungan tersebut, didapatkan spectral moment yang dapat dilihat pada Tabel 4.17. Perhitungan spectral moment menggunakan Metode Simpson 1.

Tabel 4.17 Varian *Spectral Moment*

Spectral Moment	Nilai	
	1 Tahun	100 Tahun
M_0	0.011	0.119
M_1	0.012	0.111
M_2	2.90E-04	3.23E-02
M_4	4.67E-07	9.32E-03

Setelah spectral moment didapatkan, maka kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa dapat ditentukan. Kecepatan arus akibat gelombang pada elevasi pipa (U_s) didapat dengan menggunakan persamaan yang mempertimbangkan efek arah datang arus dan sebaran gelombang. Karena pengaruh tersebut, maka kecepatan partikel air karena gelombang (U_w) perlu mempertimbangkan *Reduction Factor*. Dengan menggunakan grafik pada Gambar 2.3, didapatkan *Reduction Factor* sebesar 0.95, (untuk *spreading parameter*, $s = 6$). Tabel 4.18 merupakan hasil perhitungan kecepatan partikel gelombang signifikan sebelum dan sesudah adanya pengaruh *Reduction Factor*.

Tabel 4.18 Kecepatan Partikel Akibat Pengaruh Gelombang Signifikan pada Pipa

Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
Kecepatan arus akibat gelombang pada elevasi pipa	U_s	0.21	0.69	m/s
Mean zero-up crossing period	T_u	38.71	12.05	s
Reduction factor	R_D	0.95	0.95	
Kecepatan partikel akibat gelombang pada pipa	U_w	0.20	0.65	m/s

4.5 Interaksi Pipa dengan Tanah

4.5.1 Kekakuan Tanah (*Soil Stiffness*)

Berdasarkan data, jenis tanah yang dianalisis pada penelitian ini adalah *clay, very soft*. Dengan mengetahui jenis tanah, maka beberapa parameter yang diperlukan untuk menghitung kekakuan tanah dapat diketahui dengan mengacu pada DNV RP F105 (2006). Tabel 4.19 merupakan parameter yang diperlukan untuk mendapatkan kekakuan tanah dinamis baik vertical maupun lateral (horizontal).

Tabel 4.19 Parameter-parameter Perhitungan Kekakuan Tanah

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Berat terendam pipa	W_s	909.79	N/m
<i>bouyancy</i>	b	913.21	N/m

Tabel 4.19 Parameter-parameter Perhitungan Kekakuan Tanah (Lanjutan)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Vertical soil settlement</i>	v	0.45	
Diameter total pipa	D	0.34	m
<i>Specific mass ratio</i>	ρ_s/ρ	2.0	
Coefficient for Vertical Soil Stiffness	C_V	600	
Coefficient for Lateral Soil Stiffness	C_L	500	

Untuk penyederhanaan atau aproksimasi data yang kurang lengkap, maka DNV RP F105 (2006) menyarankan nilai-nilai parameter tanah seperti yang dijelaskan pada Tabel 4.19. *Specific mass ratio* merupakan perbandingan antara berat terendam pipa dan buoyancy dengan buoyancy pipa. Nilai *specific mass ratio* tersebut didapatkan dengan menggunakan Pers. (2.24). Dengan Pers. (2.22) dan Pers. (2.23), maka didapatkan kekakuan dinamis baik vertical maupun lateral (horizontal), seperti pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Kekakuan Tanah

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Vertical Dynamic Soil Stiffness	K_V	1.06E+06	N/m ²
Lateral (Horizontal) Dynamic Soil Stiffness	K_L	2.67E+05	N/m ²

4.6 Parameter Hidrodinamika

4.6.1 Parameter Stabilitas

Parameter stabilitas mempengaruhi *reduced velocity* terutama pada keadaan *in-line*. Parameter stabilitas dipengaruhi oleh massa efektif pipa (m_e) dan total modal damping ratio (ζ_T). Total modal damping ratio merupakan total atau penjumlahan dari *structural damping*, *hydrodynamic damping*, *soil damping*.

Parameter lain yang diperlukan untuk mendapatkan parameter stabilitas adalah *safety factor* (Lihat Tabel 2.3). Parameter-parameter untuk perhitungan parameter stabilitas disajikan didalam Tabel 4.21 berikut.

Tabel 4.21 Parameter untuk Perhitungan Parameter Stabilitas

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Structural damping	ζ_{str}	0.015	
Soil damping	ζ_{soil}	0.01	
Hydrodynamic damping	ζ_h	0.00	
Total modal damping ratio	ζ_T	0.025	m
Massa efektif pipa	m_e	278.92	kg/m
Massa jenis air laut	ρ_w	1025	kg/m ³
Diameter total pipa	D	0	m
<i>Safety factor</i> parameter stabilitas	γ_k	1.3	

Perhitungan parameter stabilitas (K_s) menggunakan Pers. (2.48). Untuk koreksi, maka hasil parameter stabilitas harus dibagi dengan *safety factor* (γ_k). Sehingga, besar parameter stabilitas karena pertimbangan *safety factor* tersebut adalah 0.57.

4.6.2 *Current Flow Ratio*

Current Flow Ratio dipengaruhi oleh kecepatan arus pada elevasi pipa periode ulang 100 tahun dan kecepatan signifikan partikel gelombang pada elevasi pipa periode ulang 1 tahun. *Current Flow Ratio* merupakan salah satu parameter yang diperlukan untuk melakukan *screening* frekuensi natural pipa. Berdasarkan DNV RP F105 (2006), *Current Flow Ratio* harus bernilai minimum 0.6. *Current Flow Ratio* dapat dihitung dengan menggunakan Pers. (2.47) dan hasilnya disajikan pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22 *Current Flow Ratio*

Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
Kecepatan arus pada elevasi pipa	U_c	0.56		m/s
Kecepatan signifikan partikel gelombang pada elevasi pipa	U_w	0.20	0.65	m/s
Current flow ratio	α	0.74		

4.6.3 *Keulegan-Carpenter number*

Bilangan keulegan carpenter merupakan parameter yang dapat menentukan perubahan jenis aliran partikel air (laminar/turbulen) pada silinder di bawah air, bersamaan dengan bilangan *Reynold* (Re). Parameter ini dapat ditentukan menggunakan Pers (2.46). Bilangan ini dipengaruhi oleh kecepatan partikel akibat gelombang, frekuensi gelombang dari diameter silinder atau pipa. Parameter dan hasil perhitungan *keulegan carpenter number* disajikan di dalam Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Parameter dan Hasil Perhitungan Keulegan Carpenter Number

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Kecepatan partikel akibat gelombang	U_w	0.69	m/s
Frekuensi gelombang	f_w	12.05	rad/s
Diameter total pipa	D	0.34	m
Keulegan Carpenter Number	KC	24.43	

4.6.4 *Reduced Velocity*

Nilai *reduced velocity* pada pipa bawah laut memiliki dua nilai untuk masing-masing arah *in-line* dan *cross-flow*. *Reduced velocity* pada arah *in line* dipengaruhi oleh parameter stabilitas. Dari perhitungan sebelumnya, nilai parameter stabilitas didapatkan 0.57 ($0.4 < K_{sd} < 1.6$), sehingga persamaan yang digunakan untuk menghitung *reduced velocity* arah *in line* adalah Pers. (2.45).

Pada arah *cross flow*, nilai *reduced velocity* dipengaruhi oleh perbandingan *gap* dengan diameter total pipa dan *trenching*. Karena nilai perbandingan *gap* dengan diameter total pipa lebih dari 0.8 yaitu 2.94, maka nilai faktor koreksi karena keberadaan pipa dekat dengan *seabed* adalah 1. Parameter dan hasil perhitungan *reduced velocity* arah *in line* dan arah *cross flow* disajikan didalam Tabel 4.24 berikut ini.

Tabel 4.24 Parameter dan Hasil Perhitungan *Reduced Velocity* Arah *In Line* dan *Cross Flow*

Parameter	Notasi	Nilai
Parameter Stabilitas	K_{sd}	0.57
Faktor koreksi pengaruh lokasi pipa di <i>seabed</i>	$\Psi_{proxy, onset}$	1
Faktor koreksi karena pengaruh <i>trenching</i>	$\Psi_{trench, onset}$	1
<i>Safety factor</i> arah <i>in line</i>	$\gamma_{on, IL}$	1.1
<i>Safety factor</i> arah <i>cross flow</i>	$\gamma_{on, CF}$	1.2
<i>Reduced velocity</i> arah <i>in line</i>	$V_{R,onset}^{IL}$	1.06
<i>Reduced velocity</i> arah <i>cross flow</i>	$V_{R,onset}^{CF}$	2.50

4.6.5 Gaya Drag

Gaya drag pada analisis *free span* mempengaruhi besarnya defleksi yang terjadi pada pipa. Sebelum gaya drag dihitung, koefisien drag harus diperoleh terlebih dahulu (Lihat Pers. 2.40). Berikut merupakan parameter yang diperlukan untuk menghitung koefisien gaya drag.

Tabel 4.25 Parameter Perhitungan Koefisien Gaya Drag

Koefisien Gaya Drag	Notasi	Nilai	Keterangan
Koefisien <i>drag</i> dasar	C_D^0	1.048	$k/D = 0.0098$
Koreksi karena KC	$\Psi_{KC,\alpha}^{CD}$	1.09	$\alpha = 6.50E-03$
Koreksi dekat dengan seabed	Ψ_{proxy}^{CD}	1	$e/D = 2.94$
Koreksi kaena <i>trench</i>	Ψ_{trench}^{CD}	1	$\Delta/D = 0$
Koreksi selama getaran <i>cross flow</i>	Ψ_{VIV}^{CD}	1.24	
Koefisien Drag	C_D	1.42083	

Setelah koefisien gaya drag dan parameter lain didalam perhitungan gaya drag didapatkan, maka gaya drag dapat dihitung menggunakan Pers. (2.40). Berikut pada Tabel 4.26 merupakan parameter dan hasil perhitungan gaya drag.

Tabel 4.26 Parameter dan Hasil Perhitungan Gaya Drag

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien Drag	C_D	1.42083	
Kecepatan Arus Total	U_{tot}	1.21	m/s
Total Diameter Luar Pipa	D	0.34005	m
Massa Jenis Air Laut	ρ_w	1025	kg/m ³
Gaya Drag	F_D	364.78	N/m

4.7 Analisis Struktural Pipa

4.7.1 Concrete Stiffness Factor (CSF)

Concrete Stiffness Factor (CSF) merupakan salah satu parameter yang dibutuhkan untuk menghitung frekuensi natural pipa dan *relative soil stiffness parameter* (β). Untuk menghitung *Concrete Stiffness Factor* (CSF) dapat menggunakan Pers (2.71). Parameter dan hasil perhitungan *Concrete Stiffness Factor* (CSF) disajikan didalam Tabel 4.27 berikut.

Tabel 4.27 Parameter dan Hasil Perhitungan *Concrete Stiffness Factor* (CSF)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Soil parameter	k_c	0.25	
Modulus elastis concrete	E_{conc}	24821	MPa
		2.48E+10	Pa
Momen inersia concrete coating	I_{conc}	3.54E-04	m ⁴
Momen inersia baja (<i>steel</i>)	I_{steel}	8.82E-05	m ⁴
Young's Modulus	E	207000	MPa
		2.07E+11	Pa
<i>Concrete Stiffness Factor</i>	CSF	0.145	

4.7.2 Panjang *Free Span* Efektif

Perhitungan panjang span efektif dilakukan menggunakan iterasi, karena panjang *free span* aktual dari hasil survei belum ada. Hal tersebut dikarenakan pipa yang dianalisa merupakan pipa baru dan masih didalam tahap

design. Jadi, perhitungan ini bertujuan untuk mencari panjang span yang diijinkan pada pipa sepanjang 11 km dan panjang span tersebut harus memenuhi kriteria *screening* frekuensi natural dan *Ultimate Limit State* (ULS).

Berikut Tabel 4.28 merupakan parameter yang digunakan didalam perhitungan panjang *free span* efektif.

Tabel 4.28 Parameter Perhitungan Panjang *Free Span* Efektif

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Kekakuan tanah vertikal	K_v	1.06E+06	N/m ²
Kekakuan tanah lateral (horizontal)	K_L	2.67E+05	N/m ²
Concrete Stiffness Factor	CSF	1.45E-01	
Young's Modulus	E	2.07E+11	Pa
Momen inersia baja (<i>steel</i>)	I_{steel}	8.82E-05	m ⁴

Perhitungan panjang *free span* efektif bergantung pada besarnya nilai *relative soil stiffness parameter* (β). Untuk menghitung parameter tersebut dapat digunakan Pers (2.21). Untuk arah *in line*, nilai β menggunakan kekakuan tanah lateral (horizontal). Sedangkan, nilai β pada arah *cross flow* menggunakan kekakuan tanah vertikal. Tabel 4.29 dan Tabel 4.30 merupakan tabel iterasi panjang *free span* efektif untuk masing-masing arah, yaitu *in line* dan *cross flow*.

Tabel 4.29 Panjang *Free Span* Efektif Arah *In Line*

L (m)	β	Leff/L	Leff (m)
3	0.0	4.69	14.06
3.5	0.3	4.03	14.09
4	0.5	3.57	14.30
4.5	0.7	3.25	14.61
5	0.9	2.99	14.97
5.5	1.1	2.80	15.37
6	1.2	2.63	15.79
6.5	1.4	2.50	16.23
7	1.5	2.38	16.67
7.5	1.6	2.28	17.11

Tabel 4.29 Panjang *Free Span* Efektif Arah *In Line* (Lanjutan)

L (m)	β	Leff/L	Leff (m)
8	1.7	2.20	17.56
8.5	1.8	2.12	18.01
9	1.9	2.05	18.46
9.5	2.0	1.99	18.91
10	2.1	1.94	19.35
10.5	2.2	1.89	19.79
11	2.3	1.84	20.23
11.5	2.3	1.80	20.67
12	2.4	1.76	21.11
12.5	2.5	1.72	21.54
13	2.6	1.69	21.97
13.5	2.6	1.66	22.40
14	2.7	1.63	22.86
14.5	2.8	1.61	23.35
15	2.8	1.59	23.85
15.5	2.9	1.57	24.34
16	2.9	1.55	24.84

Tabel 4.30 Panjang *Free Span* Efektif Arah *Cross Flow*

L (m)	β	Leff/L	Leff (m)
3	0.6	3.41	10.23
3.5	0.9	3.02	10.58
4	1.1	2.74	10.98
4.5	1.3	2.53	11.41
5	1.5	2.37	11.85
5.5	1.7	2.24	12.29
6	1.8	2.12	12.74
6.5	2.0	2.03	13.19
7	2.1	1.95	13.63
7.5	2.2	1.88	14.08
8	2.3	1.81	14.52
8.5	2.4	1.76	14.95
9	2.5	1.71	15.38
9.5	2.6	1.66	15.81
10	2.7	1.63	16.28

Tabel 4.30 Panjang *Free Span* Efektif Arah *Cross Flow* (Lanjutan)

L (m)	β	Leff/L	Leff (m)
10.5	2.8	1.60	16.77
11	2.9	1.57	17.26
11.5	2.9	1.54	17.76
12	3.0	1.52	18.26
12.5	3.1	1.50	18.75
13	3.2	1.48	19.25
13.5	3.2	1.46	19.75
14	3.3	1.45	20.25
14.5	3.4	1.43	20.74
15	3.4	1.42	21.24
15.5	3.5	1.40	21.74
16	3.5	1.39	22.24

4.7.3 Gaya Aksial Efektif

Gaya aksial efektif merupakan salah satu parameter yang mempengaruhi defleksi statik. Untuk menghitung gaya aksial efektif dapat menggunakan Pers (2.73). Nilai *effective lay tension* (H_{eff}) merupakan tension (tegangan) dari *pipelay barge* pada fase instalasi (*pipelaying*). Tetapi nilainya dianggap 0, karena tidak ada referensi yang sesuai dengan besarnya nilai tersebut pada data. Parameter dan hasil perhitungan gaya aksial efektif disajikan didalam Tabel 4.31 berikut.

Tabel 4.31 Parameter dan Hasil Perhitungan Gaya Aksial Efektif

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Effective lay tension	H_{eff}	0	
Perbedaan tegangan internal relative terhadap fase instalasi	Δp_i	1.10E+07	Pa
Internal Cross Section Area	A_i	0.05	m ²
Vertical soil settlement	v	0.3	
Cross Section Area Pipa	A_s	0.01	m ²
Young's Modulus	E	207000	MPa
		2.07E+11	Pa
Perbedaan temperatur	ΔT	17.3	°C

Tabel 4.31 Parameter dan Hasil Perhitungan Gaya Aksial Efektif
(Lanjutan)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Coefficient of Thermal Expansion	α_e	1.17E-05	/°C
Gaya Aksial Efektif	S_{eff}	-6.47E+05	N

Jika gaya aksial efektif bernilai negatif, maka mengakibatkan gaya tekan terhadap pipa dalam keadaan bentangan bebas. Jika hasilnya positif maka terjadi gaya Tarik. Hal tersebut sesuai dengan yang dituliskan didalam DNV-OS-F101 (2012).

4.7.4 Critical Buckling Load

Critical Buckling Load dapat dihitung dengan mengunakan Pers. (2.74). Beberapa parameter yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai *critical buckling load* disajikan didalam Tabel 4.32 berikut ini.

Tabel 4.32 Parameter Perhitungan *Critical Buckling Load* (P_{cr})

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Concrete Stiffness Factor	CSF	0.144558	
Koefisien Syarat Batas	C_2	1	
Young's Modulus	E	207000	MPa
		2.07E+11	Pa
Momen Inersia Steel	I_{steel}	8.82E-05	m ⁴

Nilai C_2 di atas merupakan koefisien yang didapatkan dari Tabel 2.4. pada analisis Tugas Akhir ini, *boundaru condition* diasumsikan *pinned-pinned*. Jadi nilai C_2 harus menyesuaikan dengan kondisi tersebut. Hasil perhitungan *critical buckling load* untuk arah *in-line* dan *cross-flow* disajikan didalam Tabel 4.36 dan Tabel 4.37. Nilai panjang efektif *free span* (L_{eff}) yang dimasukkan adalah nilai panjang *free span* (L) sesuai penjelasan dalam *boundary condition* pada DNV RP F105 (2006) untuk *pinned-pinned*.

4.7.5 Defleksi Statik (*Static Deflection*)

Defleksi statik merupakan lendutan yang terjadi pada *free span* akibat beban statik yang bekerja pada pipa, yaitu berat sendiri atau *self weight* dari pipa untuk arah *cross flow* (vertikal) dan gaya hidrodinamika horizontal total maksimum untuk arah *in line* (horizontal). Tabel 4.33 berikut ini merupakan parameter untuk perhitungan defleksi statis.

Tabel 4.33 Parameter Perhitungan Defleksi Statik

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien Syarat Batas	C_6	5/384	
Deflection load per unit length	q_{inline}	364.78	N/m
	$q_{crossflow}$	909.79	N/m
Young's Modulus	E	207000	MPa
		2.07E+11	Pa
Momen Inersia Steel	I	8.82E-05	m ⁴
Concrete Stiffness Factor	CSF	0.144558237	
Gaya aksial efektif	S_{eff}	-6.47E+05	N

Untuk nilai beban defleksi (q) arah *in line* merupakan gaya drag, sedangkan beban defleksi arah *cross flow* merupakan berat terendam pipa. Perhitungan defleksi statis dapat menggunakan Pers. (2.75). Hasil perhitungan defleksi statik untuk setiap panjang *span* disajikan pada Tabel 4.35 dan Tabel 4.36 untuk masing-masing arah *in line* dan *cross flow*.

4.7.6 Frekuensi Natural *Free Span*

Suatu *free span* memiliki frekuensi natural sebagai respon dinamikanya terhadap beban lingkungan dan operasi yang diterima. Besarnya frekuensi natural pada pipa bergantung pada jenis tanah, jenis perletakan ujung *free span*, beban yang diterima pipa, jenis material pipa, dan gaya yang bekerja pada pipa. Untuk mencari frekuensi natural pipa dapat menggunakan Pers (2.67). Tabel 4.35 merupakan parameter yang diperlukan untuk menghitung frekuensi natural arah *in line* dan *cross flow*.

Tabel 4.34 Parameter Perhitungan Frekuensi Natural *Free Span*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien Syarat Batas	C_1	1.57	
Concrete Stiffness Factor	CSF	0.144558	
Young's Modulus	E	207000	MPa
		2.07E+11	Pa
Momen Inersia Steel	I	8.82E-05	m ⁴
Massa Efektif Pipa	m_e	278.92	kg/m
Gaya aksial efektif	S_{eff}	-647244.8	N
Koefisien Syarat Batas	C_3	0.8	
Diameter total pipa	D	0.34	m

Hasil perhitungan frekuensi natural untuk arah *in line* dan arah *cross flow* disajikan pada Tabel 4.35 dan Tabel 4.36.

Tabel 4.35 Hasil Perhitungan *Critical Buckling Load*, Defleksi Statis, dan Frekuensi Natural untuk Arah *In-Line*

Panjang Span, L (m)	<i>Critical Buckling Load</i> , P_{cr} (N)	Defleksi Statik, δ (m)	Frekuensi Natural, f_n (Hz)
3	2.29E+07	1.89417E-05	47.075
3.5	1.68E+07	3.54641E-05	34.403
4	1.29E+07	6.12496E-05	26.178
4.5	1.02E+07	9.95E-05	20.539
5	8.25E+06	1.54E-04	16.503
5.5	6.82E+06	2.30E-04	13.517
6	5.73E+06	3.32E-04	11.244
6.5	4.88E+06	4.68E-04	9.474
7	4.21E+06	6.45E-04	8.069
7.5	3.67E+06	8.73E-04	6.934
8	3.22E+06	1.16E-03	6.003
8.5	2.86E+06	1.53E-03	5.231
9	2.55E+06	2.00E-03	4.582
9.5	2.29E+06	2.58E-03	4.032
10	2.06E+06	3.31E-03	3.561

Tabel 4.35 Hasil Perhitungan *Critical Buckling Load*, Defleksi Statis, dan Frekuensi Natural untuk Arah *In-Line* (Lanjutan)

Panjang Span, L (m)	Critical Buckling Load, P_{cr} (N)	Defleksi Statik, δ (m)	Frekuensi Natural, f_n (Hz)
10.5	1.87E+06	4.22E-03	3.153
11	1.70E+06	5.36E-03	2.798
11.5	1.56E+06	6.79E-03	2.486
12	1.43E+06	8.60E-03	2.211
12.5	1.32E+06	1.09E-02	1.965
13	1.22E+06	1.38E-02	1.745
13.5	1.13E+06	1.76E-02	1.547
14	1.05E+06	2.27E-02	1.367
14.5	9.81E+05	2.95E-02	1.203
15	9.17E+05	3.91E-02	1.054
15.5	8.59E+05	5.33E-02	0.922
16	8.06E+05	7.57E-02	0.816

Tabel 4.36 Hasil Perhitungan *Critical Buckling Load*, Defleksi Statis, dan Frekuensi Natural untuk Arah *Cross-Flow*

Panjang Span, L (m)	Critical Buckling Load, P_{cr} (N)	Defleksi Statik, δ (m)	Frekuensi Natural, f_n (Hz)
3	2.29E+07	4.72E-05	47.075
3.5	1.68E+07	8.84E-05	34.403
4	1.29E+07	1.53E-04	26.178
4.5	1.02E+07	2.48E-04	20.539
5	8.25E+06	3.84E-04	16.503
5.5	6.82E+06	5.73E-04	13.517
6	5.73E+06	8.28E-04	11.244
6.5	4.88E+06	1.17E-03	9.474
7	4.21E+06	1.61E-03	8.069
7.5	3.67E+06	2.18E-03	6.934
8	3.22E+06	2.90E-03	6.004
8.5	2.86E+06	3.83E-03	5.231
9	2.55E+06	4.99E-03	4.583
9.5	2.29E+06	6.44E-03	4.033
10	2.06E+06	8.26E-03	3.562

Tabel 4.36 Hasil Perhitungan *Critical Buckling Load*, Defleksi Statis, dan Frekuensi Natural untuk Arah *Cross-Flow* (Lanjutan)

Panjang Span, L (m)	Critical Buckling Load, P _{cr} (N)	Defleksi Statik, δ (m)	Frekuensi Natural, f _n (Hz)
10.5	1.87E+06	1.05E-02	3.155
11	1.70E+06	1.34E-02	2.800
11.5	1.56E+06	1.69E-02	2.490
12	1.43E+06	2.14E-02	2.216
12.5	1.32E+06	2.71E-02	1.974
13	1.22E+06	3.45E-02	1.758
13.5	1.13E+06	4.40E-02	1.567
14	1.05E+06	5.65E-02	1.399
14.5	9.81E+05	7.36E-02	1.256
15	9.17E+05	9.76E-02	1.146
15.5	8.59E+05	1.33E-01	1.086
16	8.06E+05	1.89E-01	1.118

4.8 Screening Frekuensi Natural

Screening frekuensi natural dilakukan dengan mengacu DNV RP F105 (2006). Screening dilakukan pada arah *in-line* maupun *cross-flow*.

- Arah *In-Line*

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{c,100 \text{ tahun}}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D_t} \cdot \left(1 - \frac{L/D_t}{250}\right) \cdot \frac{1}{\alpha}$$

Permisalan, $\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} = A$

$$\frac{U_{c,100 \text{ tahun}}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D_t} \cdot \left(1 - \frac{L/D_t}{250}\right) \cdot \frac{1}{\alpha} = B$$

Tabel 4.37 Parameter Perhitungan *Screening* Frekuensi Natural Arah *In-Line*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Safety Factor	γ_{IL}	1.4	
Kecepatan normal arus pada pipa	$U_{c,100 \text{ year}}$	0.56	m/s
Reduced velocity	$V_{R,onset}^{IL}$	1.06	

Tabel 4.38 Parameter Perhitungan *Screening* Frekuensi Natural Arah *In-Line*
(Lanjutan)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter total pipa (termasuk <i>coating</i>)	D	0.34	m
Ratio kecepatan arus	α	0.74	

Tabel 4.38 *Screening* Arah *In-Line*

L (m)	f_n	A	B	Keterangan
3	47.075	33.625	2.024	LOLOS
3.5	34.403	24.574	2.012	LOLOS
4	26.178	18.699	2.000	LOLOS
4.5	20.539	14.670	1.987	LOLOS
5	16.503	11.788	1.975	LOLOS
5.5	13.517	9.655	1.963	LOLOS
6	11.244	8.031	1.950	LOLOS
6.5	9.474	6.767	1.938	LOLOS
7	8.069	5.763	1.926	LOLOS
7.5	6.934	4.953	1.913	LOLOS
8	6.003	4.288	1.901	LOLOS
8.5	5.231	3.736	1.889	LOLOS
9	4.582	3.273	1.876	LOLOS
9.5	4.032	2.880	1.864	LOLOS
10	3.561	2.543	1.852	LOLOS
10.5	3.153	2.252	1.839	LOLOS
11	2.798	1.999	1.827	LOLOS
11.5	2.486	1.776	1.815	TIDAK LOLOS
12	2.211	1.579	1.802	TIDAK LOLOS
12.5	1.965	1.404	1.790	TIDAK LOLOS
13	1.745	1.247	1.778	TIDAK LOLOS
13.5	1.547	1.105	1.765	TIDAK LOLOS
14	1.367	0.976	1.753	TIDAK LOLOS
14.5	1.203	0.859	1.741	TIDAK LOLOS
15	1.054	0.753	1.728	TIDAK LOLOS
15.5	0.922	0.659	1.716	TIDAK LOLOS
16	0.816	0.583	1.704	TIDAK LOLOS

- Arah *Cross-Flow*

$$\frac{f_{n, CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c, 100 \text{ tahun}} + U_{w, 1 \text{ tahun}}}{V_{R, onset}^{CF} \cdot D_t}$$

Permisalan, $\frac{f_{n, CF}}{\gamma_{CF}} = X$

$$\frac{U_{c, 100 \text{ tahun}} + U_{w, 1 \text{ tahun}}}{V_{R, onset}^{CF} \cdot D_t} = Y$$

Tabel 4.39 Parameter Perhitungan *Screening* Frekuensi Natural Arah *Cross-Flow*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Safety Factor	γ_{CF}	1.4	
Kecepatan normal arus pada pipa	$U_{c, 100 \text{ year}}$	0.56	m/s
Kecepatan arus significant	$U_{w, 1 \text{ year}}$	0.20	m/s
Reduced velocity	$V_{R, onset}^{CF}$	2.50	
Diameter total pipa (termasuk <i>coating</i>)	D	0.34005	m

Tabel 4.40 *Screening* Arah *Cross-Flow*

L (m)	f_n	X	Y	Keterangan
3	47.075	33.625	0.892	LOLOS
3.5	34.403	24.574	0.892	LOLOS
4	26.178	18.699	0.892	LOLOS
4.5	20.539	14.670	0.892	LOLOS
5	16.503	11.788	0.892	LOLOS
5.5	13.517	9.655	0.892	LOLOS
6	11.244	8.031	0.892	LOLOS
6.5	9.474	6.767	0.892	LOLOS
7	8.069	5.763	0.892	LOLOS
7.5	6.934	4.953	0.892	LOLOS
8	6.004	4.288	0.892	LOLOS
8.5	5.231	3.737	0.892	LOLOS
9	4.583	3.274	0.892	LOLOS
9.5	4.033	2.881	0.892	LOLOS
10	3.562	2.544	0.892	LOLOS

Tabel 4.40 *Screening Arah Cross-Flow (Lanjutan)*

L (m)	f_n	X	Y	Keterangan
10.5	3.155	2.253	0.892	LOLOS
11	2.800	2.000	0.892	LOLOS
11.5	2.490	1.779	0.892	LOLOS
12	2.216	1.583	0.892	LOLOS
12.5	1.974	1.410	0.892	LOLOS
13	1.758	1.256	0.892	LOLOS
13.5	1.567	1.119	0.892	LOLOS
14	1.399	0.999	0.892	LOLOS
14.5	1.256	0.897	0.892	LOLOS
15	1.146	0.819	0.892	TIDAK LOLOS
15.5	1.086	0.776	0.892	TIDAK LOLOS
16	1.118	0.798	0.892	TIDAK LOLOS

Hasil akhir dari *screening* frekuensi natural adalah panjang *free span* maksimum yang diijinkan untuk arah *in-line* maupun *cross-flow* yaitu 11 m dan 14.5 m. Setelah panjang *free span* maksimum yang diijinkan untuk kedua arah tersebut diketahui, maka selanjutnya panjang *span* tersebut dibandingkan dan diambil salah satu untuk dijadikan batasan panjang bentangan pipa maksimal yang diizinkan dari hasil *screening* frekuensi natural. Panjang *span* maksimum yang diambil merupakan panjang *span* yang paling pendek. Sehingga, panjang maksimum bentangan yang diijinkan adalah 11 m.

4.9 Bending Moment

Bending moment merupakan salah satu parameter yang diperlukan di dalam persamaan *screening* untuk ULS atau *local buckling*. Bending moment pipa dalam kondisi *free span* terdapat dua tipe, yaitu momen akibat beban fungsional dan momen akibat beban lingkungan untuk gerakan pipa (*in-line* dan *cross-flow*) saat terkena arus laut.

4.9.1 Stress Range

Parameter yang harus diketahui terlebih dahulu didalam perhitungan *stress range* adalah *stress amplitude*. *Stress range* merupakan salah satu hal

yang menyebabkan terjadinya VIV (*Vortex Induced Vibration*). Untuk menghitung *stress amplitude* digunakan Pers. (2.55) dan nilai *stress amplitude* untuk arah *in line* dan *cross flow* adalah sama. Tabel 4.41 merupakan parameter dan hasil perhitungan untuk *stress amplitude* baik arah *in-line* maupun *cross-flow*.

Tabel 4.41 Parameter dan Hasil Perhitungan *Stress Amplitude*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien Syarat Batas	C_4	4.93	
Concrete Stiffness Factor	CSF	0.145	
Diameter Total	D	0.340	m
Outside Diameter	D_0	0.27	m
Tebal dinding pipa	t	0.0127	
Panjang <i>free span</i> efektif	L_{eff}	11	m
Young's Modulus	E	207000	MPa
		2.07E+11	Pa
Max Stress Amplitudo	A_{IL}	8.55E+08	Pa

Panjang *span* yang digunakan diatas merupakan panjang span yang didapatkan dari hasil *screening* rekuensi natural.

Dengan menggunakan Pers. (2.54), maka parameter dan besarnya *stress range* untuk arah *in-line* dapat dilihat pada Tabel 4.42 berikut ini.

Tabel 4.42 Parameter dan Hasil Perhitungan *Stress Range* Arah *In-Line*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Stress amplitude <i>in-Line</i>	A_{IL}	8.55E+08	Pa
Amplitude respon <i>in-line</i> VIV	A_γ/D	0	
Faktor koreksi dari rasio aliran arus	$\Psi_{\alpha, IL}$	0.79	
Safety factor stress amplitude	γ_s	1.3	
Stress Range <i>In-Line</i>	S_{IL}	0	Pa

Karena nilai ratio kecepatan aliran arus (α) adalah 0.74, maka untuk mendapatkan nilai faktor koreksi dari rasio aliran arus harus menggunakan Pers. (2.45). Amplitude respon *in-line* VIV bernilai 0, karena nilai *reduced velocity* adalah 1.06 dan nilai tersebut kurang dari nilai minimal grafik parameter

stabilitas, lihat Gambar 2.7. Sedangkan, untuk *safety factor* didapatkan dari Tabel 2.3.

Untuk menghitung *stress range* arah *cross-flow* dapat menggunakan Pers. (2.58). Parameter dan hasil perhitungan besarnya *stress range* arah *cross-flow* disajikan didalam Tabel 4.43 berikut ini.

Tabel 4.43 Parameter dan Hasil Perhitungan *Stress Range* Arah *Cross-Flow*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Stress amplitude <i>cross-flow</i>	A_{CF}	8.55E+08	Pa
Amplitude <i>cross flow</i> VIV	A_z/D	0.074	
Faktor reduksi dari damping	R_k	0.915	
Safety factor stress amplitude	γ_s	1.3	
Stress Range <i>Cross Flow</i>	S_{CF}	1.51E+08	Pa

4.9.2 *Envionmental Stress*

Environmental stress merupakan salah satu nilai yang diperlukan untuk menghitung bending moment untuk gerakan *in-line* dan *cross-flow*.

a. *In Line*

Untuk mendapatkan nilai *environment stress* arah *in-line*, terdapat beberapa parameter yang harus dicari, seperti *stress range*, *stress amplitude*, dan *environmental stress* selama terkena beban gelombang langsung. *Stress range* dan *stress amplitude* telah didapatkan nilainya didalam perhitungan sebelumnya, sehingga hanya perlu mencari nilai *environmental stress* selama terkena beban gelombang langsung.

Berikut merupakan Tabel 4.44 yang merupakan parameter dan hasil perhitungan *environmental stress* selama terkena beban gelombang langsung. Tetapi sebelum menghitung *environmental stress* selama terkena beban gelombang langsung, moment gaya drag dihitung terlebih dahulu dengan menggunakan Pers. (2.67).

Tabel 4.44 Parameter dan Hasil Perhitungan Moment Gaya Drag Aliran Air (M_w)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien Syarat Batas	C_5	0.125	
Gaya drag	F_D	364.78	N/m
Panjang Free Span	L_{eff}	11	m
Gaya aksial efektif	S_{eff}	-647244.79	N
Critical buckling load	P_{cr}	1559842.86	N
Moment gaya drag	M_w	857.31	Nm

Tabel 4.45 Parameter dan Hasil Perhitungan *Environment Stress* Akibat Beban Gelombang

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Moment gaya drag	M_w	857.31	Nm
Outside diameter	D_0	0.27	m
Tebal dinding pipa	t_2	0.0127	m
Momen Inersia Baja (<i>Steel</i>)	I_{steel}	8.82E-05	m^4
Tegangan akibat beban arus langsung	σ_{FM}	1265015.87	Pa

Dengan menggunakan Pers. (2.64), maka besarnya *environment stress* arah *in-line* dapat diketahui, seperti yang disajikan pada Tabel 4.46 berikut ini.

Tabel 4.46 Parameter dan Hasil Perhitungan *Environment Stress* Arah *In-Line*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Stress Range <i>In-Line</i>	S_{IL}	0	Pa
Stress Range <i>Cross Flow</i>	S_{CF}	1.51E+08	Pa
Stress amplitude <i>in-line</i> dan <i>cross-flow</i>	$A_{IL/CF}$	8.55E+08	Pa
Environment stress akibat beban gelombang	σ_{FM}	1.27E+06	Pa
Environment stress <i>in-line</i>	$\sigma_{E,IL}$	3.14E+07	Pa

b. *Cross-Flow*

Besarnya *environment stress* arah *cross-flow* merupakan setengah dari *stress range* arah *cross-flow*. Hal tersebut bisa dilihat pada Pers. (2.65). Sehingga, hasil *environmental stress* arah *cross-flow* dapat dilihat pada Tabel 4.47 berikut ini.

Tabel 4.47 Parameter dan Hasil Perhitungan *Environment Stress* Arah *Cross-Flow*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Stress Range <i>Cross Flow</i>	S _{CF}	1.51E+08	Pa
Environment stress <i>cross-flow</i>	σ _{E,CF}	7.53E+07	Pa

4.9.3 Perhitungan Bending Moment

Bending moment terjadi melalui dua arah, yaitu arah vertikal dan arah horizontal. Bending moment arah vertikal diakibatkan oleh beban fungsional, yaitu berat terendam pipa dan *environment stress* arah *cross-flow*. Perhitungan bending moment arah vertikal dihitung berdasarkan tumpuan yang digunakan. Berikut persamaan untuk bending moment akibat berat terendam pipa.

$$M_F = \frac{W_{sub}L^2}{8}$$

Hasil perhitungan bending moment akibat beban fungsional dan akibat gerakan *cross-flow* disajikan didalam Tabel 4.48 dan Tabel 4.49 berikut.

Tabel 4.48 Bending Moment akibat Beban Fungsional

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Beban defleksi yang diterma	q	909.79	N
Panjang <i>free span</i>	L	11	m
Bending moment akibat beban fungsional	M _F	13760.58	Nm

Besaran q diatas mempresentasikan beban pipa, yaitu berat pipa didalam air (*submerged weight*).

Tabel 4.49 Bending Moment akibat Pengaruh Gerakan *Cross-Flow*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Environmental stress cross flow	$\sigma_{E,CF}$	7.53E+07	Pa
Moment inersia baja (<i>steel</i>)	I	8.82E-05	m ⁴
Outside diameter	D ₀	0.27	m
Tebal dinding pipa	t	0.0127	m
Bending moment <i>cross flow</i>	M _{E,CF}	51060.38	Nm

Bending momen arah horizontal dipengaruhi oleh gerakan pipa ke arah *in-line* karena beban arus yang mengenai pipa tersebut. Untuk menghitung bending moment tersebut, dapat menggunakan Pers. (2.63). Di dalam persamaan tersebut terdapat beberapa parameter penyusun. Salah satu yang paling berpengaruh adalah *environmental stress* arah *in-line* yang sudah dihitung sebelumnya. Beberapa parameter tersebut ditunjukkan didalam Tabel 4.50 berikut beserta hasil perhitungan momen untuk arah *in-line*.

Tabel 4.50 Bending Moment akibat Gerakan *In-Line*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Environmental stress <i>in line</i>	$\sigma_{E,IL}$	3.14E+07	Pa
Moment inersia baja (<i>steel</i>)	I	8.82E-05	m ⁴
Outside diameter	D ₀	0.27	m
Tebal dinding pipa	t	0.0127	m
Bending moment <i>in line</i>	M _{E,IL}	21281.46	Nm

Setelah bending moment vertikal dan horizontal diketahui, maka bending moment total dapat diketahui. Untuk itu perlu untuk dilakukan penggabungan kedua arah tersebut dengan menghitung resultan dari kedua arah bending moment, dengan menggunakan Pers. (2.77). Sehingga, hasil untuk resultan bending moment dapat dilihat pada Tabel 4.51 berikut.

Tabel 4.51 Bending Moment Total

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Bending moment akibat beban fungsional	M_F	13760.58	Nm
Faktor pembebanan functional loads	γ_F	1.1	
Faktor pengaruh kondisi beban	γ_C	1.07	
Bending moment <i>cross flow</i>	$M_{E,CF}$	51060.38	Nm
Bending moment <i>in line</i>	$M_{E,IL}$	21281.46	Nm
Faktor pembebanan beban lingkungan	γ_E	1.3	
Resultan bending moment	M_{Sd}	87086.06	Nm

4.10 Cek ULS (DNV OS F101)

4.10.1 Denote Plastic Capacities

Denote Plastic Capacities yang dihitung merupakan *plastic moment axial force* dan *plastic moment resistance*. Kedua nilai tersebut merupakan parameter yang digunakan untuk mengecek *local buckling* (menggunakan *Load Controlled condition*), menggunakan Pers. (2.82) dan Pers. (2.83)

Berdasarkan DNV OS F101 (2012), untuk menghitung *denote plastic capacity* terlebih dahulu harus menghitung nilai karakteristik kekuatan material (*yield* dan *tensile*). Berikut merupakan parameter dan hasil perhitungan untuk nilai karakteristik kekuatan material dan *denote plastic capacity* yang disajikan didalam Tabel 4.52 dan Tabel 4.53.

Tabel 4.52 Perhitungan Kekuatan Material

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Faktor kekuatan material	α_U	1	
Specified Minimum Yield Stress	SMYS	450	MPa
		4.50E+08	Pa
Specified Minimum Tensile Strength	SMTS	535	MPa
		5.35E+08	Pa
Derating pada tegangan yield	$f_{y,temp}$	3.00E+07	Pa

Tabel 4.52 Perhitungan Kekuatan Material (Lanjutan)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Derating pada tegangan tarik	$f_{u,temp}$	3.00E+07	Pa
Tegangan yield	f_y	4.20E+08	Pa
Tegangan tarik	f_u	5.05E+08	Pa

Tabel 4.53 Denote Plastic Capacities

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter luar pipa	D_0	0.27	m
Tebal dinding pipa	t	0.0127	m
Plastic axial force resistance	S_p	4362751.4	N
Plastic moment resistance	M_p	361549.84	Nm

4.10.2 Parameter pada Beban Kombinasi

Parameter pada beban kombinasi meliputi parameter aliran tegangan dan faktor karena efek perbandingan antara diameter luar pipa dan tebal dinding pipa (faktor tekanan untuk beban kombinasi). Kedua nilai tersebut dipengaruhi oleh besarnya faktor kriteria kombinasi beban (β) dan parameter lain yang telah dihitung sebelumnya. Untuk menghitung parameter aliran tegangan digunakan Pers. (2.84). Berikut merupakan Tabel 4.54 yang merupakan hasil perhitungan parameter aliran tegangan.

Tabel 4.54 Parameter Aliran Tegangan

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Yield stress yang digunakan pada design	f_y	4.03E+08	Pa
Tensile strength yang digunakan pada design	f_u	4.85E+08	Pa
Faktor kriteria kombinasi beban	β	0.428	
Parameter aliran tegangan	α_c	1.087	

Nilai faktor tekanan untuk beban kombinasi juga dipengaruhi oleh tekanan *bursting*. Tekanan *bursting* dapat ditung menggunakan Pers. (2.79).

Nilai perbandingan antara tekanan internal dan tekanan eksternal dengan tekanan *bursting* kurang dari 2/3, maka digunakan Pers. (2.86a). Tabel 4.55 merupakan parameter dan hasil perhitungan dari faktor tekanan pada beban kombinasi.

Tabel 4.55 Faktor Tekanan pada Beban Kombinasi

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tekanan internal	P_i	1.10E+07	Pa
Tekanan eksternal	P_e	8.08E+05	Pa
Tekanan burst	P_b	4.54E+07	Pa
Faktor pada combined loading criteria	β	0.428	
Faktor tekanan pada beban kombinasi	α_p	0.572	

4.10.3 Cek ULS (*Ultimate Limit State*)

Setelah mendapatkan semua parameter yang dibutuhkan, selanjutnya adalah melakukan *screening* ULS sesuai DNV-OS-F101 (2012). Pengecekan tersebut dilakukan dengan memilih persamaan yang cocok berdasarkan kriteria yang telah disebutkan. Pada analisis ini digunakan Pers. (2.76), karena kondisi tekanan internal lebih besar dari tekanan eksternal.

Cek ULS dilakukan dengan panjang *span* maksimal yang lolos *screening* frekuensi natural, yang kemudian diiterasi untuk mendapatkan nilai maksimal *Unity Check* (UC) dengan catatan, panjang tersebut harus menghasilkan tegangan ekuivalen kurang dari tegangan *buckling* kritis.

Tabel 4.56 merupakan hasil *Unity Check* (UC) pada *free span* maksimal hasil *screening* frekuensi natural ($L=11$ m).

Tabel 4.56 Hasil Cek ULS sesuai DNV OS F101

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Faktor tahanan material	γ_m	1.15	
Faktor keamanan <i>resistance</i>	γ_{sc}	1.26	
Resultan bending moment	M_{sd}	8.71E+04	Nm
Parameter aliran tegangan	α_c	1.087	
Plastic moment resistance	M_p	3.62E+05	Nm

Tabel 4.56 Hasil Cek ULS sesuai DNV OS F101 (Lanjutan)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tebal dinding pipa	t_2	0.0127	m
Design effective axial force	S_{Sd}	-7.62E+05	N
Tekanan internal	P_i	1.10E+07	Pa
Plastic axial force resistance	S_p	4.36E+06	N
Faktor tekanan pada beban kombinasi	α_p	0.572	
Tekanan eksternal	P_e	8.08E+05	Pa
Tekanan bursting	P_b	4.73E+07	Pa
Unity Check	UC	0.141	≤ 1

Dari hasil di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa pipeline free span dengan panjang bentangan 11 m tidak mengalami *local buckling* sesuai dengan kriteria DNV-OS-F101 (2012) karena menghasilkan nilai UC kurang dari 1.

Panjang maksimal yang diijinkan untuk cek ULS didapatkan dengan melakukan iterasi panjang *free span* yang menghasilkan resultan bending moment maksimal atau kritis. Hasil panjang *free span* maksimal yang menghasilkan nilai UC mendekati 1 dan memenuhi kriteria lain, yaitu tegangan ekuivalen kurang dari tegangan *buckling* kritis adalah 12.5 m dengan resultan bending moment kritis sebesar 7.55E+04 Nm.

4.11 Tegangan *Von Mises* dan Tegangan Buckling Kritis

4.11.1 Tegangan *Von Mises* pada Perhitungan Manual

Tegangan *Von Mises* pada pipa yang mengalami *free span* merupakan kombinasi dari beberapa tegangan, yaitu beberapa tegangan yaitu tegangan *hoop*, longitudinal, dan *shear*. Untuk tegangan *shear* pada *free span* bernilai 0 atau diabaikan. Untuk perhitungan tegangan *hoop* dapat menggunakan Pers. (2.89). Sedangkan, untuk tegangan longitudinal menggunakan Pers. (2.90). Tegangan longitudinal sesuai persamaan tersebut merupakan kombinasi dari beberapa tegangan, yaitu tegangan *thermal*, *poisson*, dan *bending*.

Hasil dari tegangan *hoop* disajikan pada Tabel 4.57 berikut sesuai dengan Pers. (2.89).

Tabel 4.57 Tegangan *Hoop*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tekanan internal	P_i	1.10E+07	Pa
Tekanan eksternal	P_e	8.08E+05	Pa
Diameter luar pipa	D_0	0.27	m
Tebal dinding pipa	t	0.0127	m
Hoop Stress	σ_h	1.10E+08	Pa

Salah satu tegangan yang berpengaruh pada tegangan longitudinal adalah tegangan *thermal*. Dengan menggunakan Pers. (2.91) didapatkan nilai dari tegangan thermal yang disajikan pada Tabel 4.58 berikut.

Tabel 4.58 Tegangan *Thermal*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Young's Modulus	E	207000	MPa
		2.07E+11	Pa
Koefisien <i>temperature expansion</i>	σ_e	0.0000117	/°C
Perbedaan temperatur	ΔT	17.3	°C
Thermal stress	σ_T	-4.19E+07	Pa

Sedangkan untuk menghitung *poisson stress* digunakan Pers. (2.92), yang hasilnya disajikan dalam Tabel 4.59 berikut.

Tabel 4.59 *Poisson Stress*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Poisson's ratio	ν	0.3	
Hoop stress	σ_h	1.10E+08	Pa
Poisson stress	σ_p	3.14E+07	Pa

Tegangan lainnya yang mempengaruhi tegangan longitudinal adalah tegangan bending. Untuk mendapatkan tegangan tersebut dapat digunakan Pers. (2.93). Hasil untuk bending stress disajikan pada Tabel 4.60 berikut.

Tabel 4.60 Bending Stress

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Resultan bending moment	M_{Sd}	87086.06	Nm
Diameter luar pipa	D_0	0.27	m
Moment inersia baja	I_{steel}	8.82E-05	m ⁴
Bending stress	σ_b	1.28E+08	Pa

Setelah mendapatkan beberapa tegangan di atas, maka tegangan longitudinal bias dihitung dengan menggunakan Pers. (2.90). Hasil dari tegangan longitudinal disajikan pada Tabel 4.61 di bawah ini.

Tabel 4.61 Tegangan Longitudinal

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Thermal stress	σ_T	-4.19E+07	Pa
Poisson stress	σ_p	3.14E+07	Pa
Bending stress	σ_b	1.28E+08	Pa
Longitudinal stress	σ_L	1.10E+08	Pa

Setelah semua tegangan yang diperlukan untuk menghitung tegangan *von mises* didapat, maka tegangan tersebut bisa dicari dengan menggunakan Pers. (2.88). Hasil dari tegangan von-mises disajikan dalam Tabel 4.62 berikut ini.

Tabel 4.62 Tegangan Ekuivalen (Von Mises)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Longitudinal stress	σ_L	5.10E+07	Pa
Hoop Stress	σ_h	1.10E+08	Pa
Tangensial Shear Stress	τ	0	Pa
Von Mises Stress	σ_{eq}	9.50E+07	Pa

4.11.2 Tegangan Von Mises pada Software

Hasil (*output*) dari pemodelan menggunakan software AutoPIPE adalah tegangan hoop, tegangan longitudinal dan tegangan *von mises*. Hasil tersebut kemudian digunakan untuk mengecek hasil perhitungan manual atau perhitungan yang sesuai dengan *rules*. Tujuannya adalah untuk mengetahui apakah keduanya masih memenuhi terhadap tegangan yang diijinkan atau tidak, serta memvisualisasikan tegangan-tegangan yang terjadi baik itu tegangan

hoop, tegangan longitudinal ataupun tegangan *Von Mises*. Berikut merupakan langkah-langkah dalam memodelkan struktur pada *software* AutoPIPE:

1. Input Data Properti Pipa

Berikut merupakan data-data yang diperlukan untuk input properti pipa.

Tabel 4.63 Data Input Properti Pipa

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Wall thickness	t	12.7	mm
Outside Diameter	D ₀	273.05	mm
Steel Density	ρ _{st}	7850	kg/m ³
Corrosion allowed	CA	3	mm
Modulus Young	E	0.207	N/mm ²
Poisson's ratio	ν	0.3	
Specified Minimum Yield Stress	SMYS	450	Mpa

Selebihnya data yang diperlukan harus diolah terlebih dahulu, seperti:

- $$\text{Insul Thickness} = \frac{\text{concrete thickness} + \text{corrosion thickness}}{2}$$

$$= \frac{30 + 3.5}{2} = 16.75 \text{ mm}$$
- $$\text{Mill Tolerance} = 12.5 \% \times 12.7 = 1.5875 \text{ mm}$$
- $$\text{Specific Gravity of Contents} = \frac{\text{content density}}{\text{water density}} = \frac{58.8}{1000} = 0.0588$$

Untuk detail input pada *software* AutoPIPE dapat dilihat pada Lampiran .

2. Input pembebanan pada struktur model

Pembebanan bertujuan untuk mendapatkan tegangan yang bekerja pada struktur yang dianalisis. Pembebanan yang dilakukan meliputi buoyancy dan arus (*current*). Untuk pembebanan arus dilakukan dengan 4 arah pembebanan yang setiap arah dan disetiap kedalaman mempunyai kecepatan arus yang berbeda. Pembebanan dilakukan berdasarkan data dan hasil perhitungan sebelumnya. Berikut merupakan data yang diperlukan untuk input pembebanan:

Tabel 4.64 Data Input Pembebanan

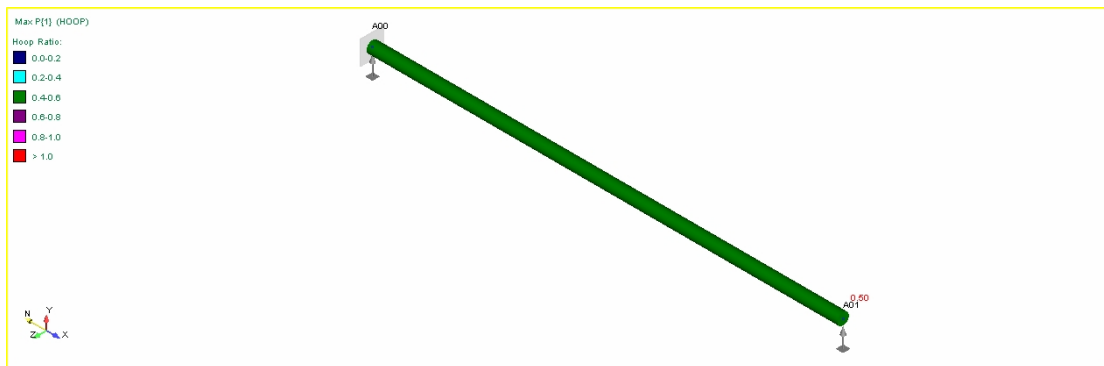
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Panjang span	L	11	m
Water Surface Elevation	d	58200	mm
Specific gravity water	SG	1.025	
Added mass coefficient	C _a	1	
Wave height significant	H _s	5190	mm/s
Peak Period	T _p	12.03	s
Coefficient Drag	C _D	1.42	
Coefficient Inertia	C _M	2.69	

3. Hasil Analisis

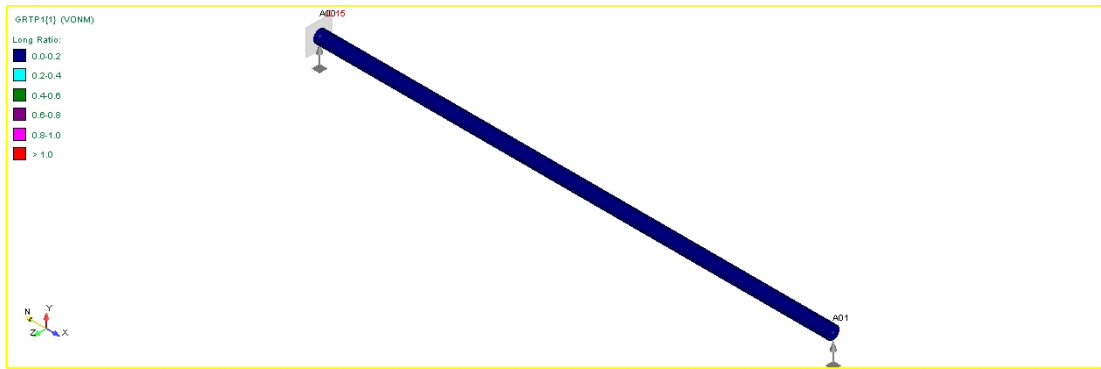
Analisis yang dilakukan pada *software* AutoPIPE merupakan analisis statis, dimana output yang dihasilkan adalah tegangan hoop, tegangan longitudinal, dan tegangan *von mises*. Berdasarkan analisis statis yang dilakukan *software* AutoPIPE, didapatkan nilai-nilai tegangan tersebut beserta tegangan yang diijinkan, seperti yang ditampilkan dalam Tabel 4.65.

Tabel 4.65 Tegangan dan Allowable Stress Hasil AutoPIPE

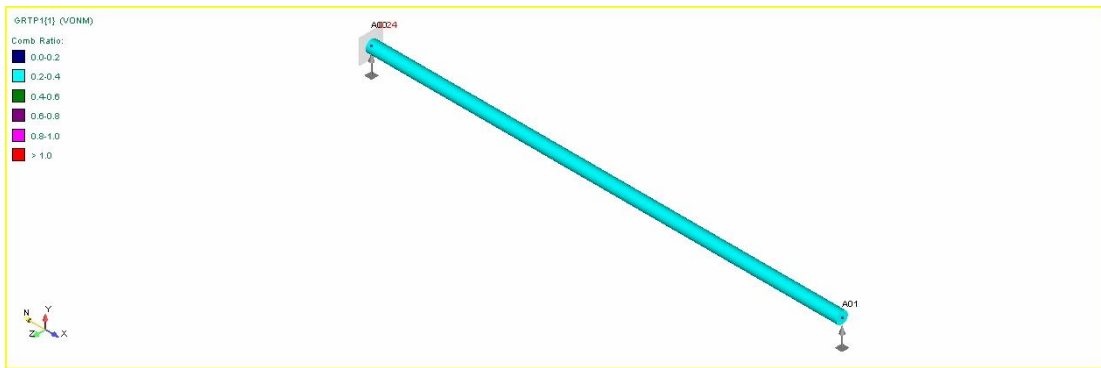
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		Tegangan	Allowable	
Tegangan Hoop	σ_h	112.79	224.08	N/mm ²
Tegangan Longitudinal	σ_L	51.02	358.53	N/mm ²
Tegangan <i>Von Mises</i>	σ_{eq}	97.96	403.34	N/mm ²



Gambar 4.1 Hasil Tegangan Hoop



Gambar 4.2 Hasil Tegangan Longitudinal



Gambar 4.3 Hasil Tegangan Von Mises

4.11.3 Tegangan *Buckling* Kritis

Tegangan *buckling* kritis merupakan nilai batas tegangan *von mises*. Hasil tegangan *buckling* kritis nantinya dibandingkan dengan hasil tegangan *von-mises* yang sudah dihitung sebelumnya. Jika *von-mises stress* melebihi tegangan *buckling* kritis, maka struktur mengalami *local buckling*, begitu juga sebaliknya. Tegangan *buckling* kritis didapatkan dengan menggunakan Pers. (2.87). Panjang *free span* (L) yang digunakan merupakan hasil *screening* frekuensi natural dan ULS, yaitu 11 m. Berikut adalah parameter dan hasil dari tegangan *buckling* kritis (Tabel 4.66).

Tabel 4.66 Tegangan *Buckling* Kritis

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Young's Modulus	E	207000	MPa
		2.07E+11	Pa
Moment inersia baja	I_{steel}	8.82E-05	m^4

Tabel 4.66 Tegangan *Buckling* Kritis (Lanjutan)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Cross Section Area</i> Pipa	A_s	0.01	m ²
Panjang <i>free span</i>	L	11	m
Tegangan <i>buckling</i> kritis	σ_{cr}	1.43E+08	Pa

4.11.4 Cek Tegangan

Pengecekan tegangan dilakukan adalah validasi tegangan *von mises* yang dihitung secara manual dan menggunakan software. Nilai tegangan *von mises* harus kurang dari tegangan *buckling* kritis. Jika lebih, maka struktur yang dianalisa mengalami *local buckling*.

Tabel 4.67 Cek Tegangan

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Panjang <i>free span</i>	L	11	m
Von Mises Stress	σ_{eq} (manual)	9.50E+07	Pa
	σ_{eq} (software)	9.80E+07	Pa
Tegangan <i>buckling</i> kritis	σ_{cr}	1.43E+08	Pa
Cek		Memenuhi	

Berdasarkan tabel diatas, dapat dilihat bahwa perhitungan tegangan *von mises* sudah tervalidasi karena hasil perhitungan manual dan pemodelan software memiliki error 3%, serta tegangan *von mises* tersebut kurang dari tegangan *buckling* kritis atau memenuhi kriteria ($\sigma_{eq} < \sigma_{cr}$). Sehingga, panjang *free span* sepanjang 11 m tersebut tidak mengalami *local buckling*.

4.11.5 Panjang *Free Span* yang Diijinkan

Setelah mendapatkan beberapa panjang *free span*, selanjutnya adalah membandingkan semua panjang *free span* tersebut dan memilih panjang maksimum yang lolos *screening* frekuensi natural dan pengecekan ULS.

Tabel 4.68 Panjang *Free Span* Maksimum Hasil *Screening* Frekuensi Natural dan Cek ULS

Parameter	Screening Frekuensi Natural		Cek ULS	Hasil
	<i>In-Line</i>	<i>Cross-Flow</i>		
L (m)	11	14.5	12.5	11

Berdasarkan tabel diatas, dapat disimpulkan bahwa panjang maksimum *free span* yang diijinkan adalah 12.5 m. Sedangkan, tegangan ekuivalen terbesar terjadi pada kondisi ULS ketika panjang *free span* 12.5 m dengan tegangan ekuivalen 109 MPa. Hasil tegangan ekuivalen tersebut kurang dari tegangan *buckling* kritis, yaitu 111 MPa.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berikut merupakan beberapa kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan rumusan masalah yang telah terjawab pada bab analisis dan pembahasan:

1. Panjang *span* maksimum yang diijinkan agar memenuhi kriteria sesuai dengan DNV-RP-F105 adalah 11 m.
2. Panjang *span* maksimum yang diijinkan agar memenuhi kriteria *Ultimate Limit State* (ULS) yaitu *Local Buckling* (DNV-OS-F101) adalah 12.5 m.

Dari beberapa panjang *free span* yang telah didapatkan dan dicek sesuai dengan kriteria, maka panjang yang dipilih merupakan panjang *free span* terpendek yaitu 11 m. Panjang tersebut kemudian dilakukan analisis tegangan von mises. Analisis tegangan kombinasi dilakukan secara perhitungan manual sesuai rules maupun software sesuai dengan standard ASME B31.8. Nilai tegangan *von mises* pada span tersebut tidak melebihi batas tegangan ijinnya yaitu 403.34 MPa. Sehingga, tegangan kombinasi pada pipeline telah memenuhi kriteria yang disyaratkan oleh ASME B31.8 dan telah dianggap aman. Sedangkan, batas tegangan *ultimate* (tegangan maksimum) struktur pipa sampai mengalami keruntuhan adalah 428 MPa.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Analisis dengan kondisi batas ujungnya adalah *fixed-fixed* atau *fixed-pinned*.
2. Analisis lebih lanjut terhadap Fatigue Limit State (FLS) dimana analisis tersebut merupakan analisis pipa bawah laut secara dinamis yang dipengaruhi oleh fenomena getaran yang muncul akibat gaya hidrodinamik yang mengenai struktur pipa bawah laut (VIV).

3. Analisis dengan tambahan beban lingkungan atau beban lain, seperti beban gempa atau *dropped object*.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- Bai, Yong dan Qiang Bai. 2005. *Subsea Pipelines and Risers*. UK: Elsevier
- Bai, Yong dan Qiang Bai. 2014. *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation*. UK: Elsevier
- Chakrabarti, Subrata K. *Handbook of Offshore Engineering Volume II*. UK: Elsevier
- Djarmiko, E.B. 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut diatas Gelombang Acak*. Surabaya: ITS Press
- DNV OS F101. 2012. *Submarine Pipeline System*. Norway: Det Norske Veritas
- DNV RP C205. 2007. *Environmental Conditions and Environmental Loads*. Norway: Det Norske Veritas
- DNV RP F105. 2006. *Free Spanning Pipelines*. Norway: Det Norske Veritas
- DNV RP F109. 2010. *On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines*. Norway: Det Norske Veritas
- Guo B. dkk. 2005. *Offshore Pipelines*. UK: Gulf Professional Publishing Elsevier
- IDC Technologies. 2009. *Fundamentals of Mechanical Engineering*. Australia
- Khanifudin, Ibnu. 2015. *Analisis Ultimate Limit State (ULS) pada Free Span (Studi Kasus: South West Java Gas Pipeline Project Phase II Labuhan Maringai-Muara Bekasi Offshore Pipeline)*. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- Koushan, Kamran. 2009. *Vortex Induced Vibration of Free Span Pipelines*. Thesis. Centre for Ships and Ocean Structures (CeSOS) Norwegian University of Science and Technology (NTNU)
- Li, Yan dkk. 2017. *Local Buckling Failure Analysis of High-Strength Pipelines*. Paper Pet. Sci. (2017) 14:549–559

Lumantoro, Nonnia DP. 2018. Analisis *Ultimate Limit State* (ULS) Pada Pipa Bawah Laut Yang Mengalami *Freespan*. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan. Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

Mouselli, A.H. 1981. *Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods*. United States of America: PennWell Publishing Company

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

Susetyo, Hikmah. 2016. Analisis *Local Bucleling Pada Free Span Pipa Bawah Laut 20"* Di Sangatta, Kalimantan Timur. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

LAMPIRAN A
PERHITUNGAN UMUM
PIPA

LAMPIRAN A
PERHITUNGAN UMUM PIPA

A.1 Perhitungan Properties Pipa

Tabel A.1 Data Perhitungan Properti Pipa

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tebal Dinding Pipa	t	0.0127	m
Outside Diameter	OD	0.27	m
Corrosion Coating Thickness	t _{corr}	0.0035	m
Concrete Coating Thickness	t _c	0.03	m
Content Density	ρ _{cont}	58.8	kg/m ³
Steel Density	ρ _{st}	7850	kg/m ³
Concrete Coating Dencity	ρ _c	3040	kg/m ³
Corrosion Coating Density	ρ _{corr}	940	kg/m ³
Massa Jenis Air Laut	ρ _w	1025	kg/m ³

Diameter Pipa Termasuk Semua Coating (m)	
D	= OD + 2t _{coating} + 2t _{concrete}
D	= 0.34005 m

Diameter Dalam Pipa (m)	
D _i	= OD - 2t _{st}
D _i	= 0.24765 m

Momen Inersia Baja (m⁴)	
I _{steel}	= $\pi \frac{D_o^4 - (D_i)^4}{64}$
I _{steel}	= 8.82E-05 m ⁴

Momen Inersia Concrete Coating (m⁴)	
I _{conc}	= $\pi \frac{D_c^4 - (D_c - 2t_c)^4}{64}$
I _{conc}	= 3.54E-04 m ⁴

Internal Cross Section Area (m ²)	
A_i	$= \frac{\pi}{4}(D_i)^2$
A_i	$= 0.05 \text{ m}^2$

Cross Section Area Pipa (m ²)	
A_s	$= \frac{\pi}{4}[D_o^2 - (D_i)^2]$
A_s	$= 0.01 \text{ m}^2$

A.2 Perhitungan Berat Terendam Pipa

Berat Pipa Di Udara (N/m)	
W_{st}	$= \frac{\pi}{4}\rho_{st}(D_o^2 - D_i^2)g$
W_{st}	$= 81.54 \text{ N/m}$

Berat Corrosion Coating Di Udara (N/m)	
W_{corr}	$= \frac{\pi}{4}[(D_o + t_{corr})^2 - D_i^2]\rho_{corr}$
W_{corr}	$= 12.62 \text{ N/m}$

Berat Concrete Coating Di Udara (N/m)	
W_c	$= \frac{\pi}{4}[D^2 - (D_o + t_{corr})^2]\rho_c$
W_c	$= 88.83 \text{ N/m}$

Berat Content Pipa, Condensate (N/m)	
W_{cont}	$= \frac{\pi}{4}(D_i)^2\rho_{cont}$
W_{cont}	$= 2.83 \text{ N/m}$

Buoyancy Pipa per Satuan Panjang (N/m)	
b	$= \frac{\pi}{4}D^2 \cdot \rho_w \cdot g$
b	$= 913.21 \text{ N/m}$

Sehingga, besarnya Berat Terendam Pipa (W_s) adalah:

$$W_s = (W_{st} + W_{corr} + W_c + W_{cont}) \cdot g - b$$

$$W_s = 909.79 \text{ N/m}$$

A.3 Perhitungan Massa Efektif Pipa

- a. Mencari Koefisien Massa Tambah

$$C_a = \begin{cases} 0.68 + \frac{1.6}{(1+5 \cdot (e/D))} & \text{untuk } e/D < 0.8 \\ 1 & \text{untuk } e/D \geq 0.8 \end{cases}$$

Diketahui:

$$e = 1 \text{ m}$$

$$D = 0.34 \text{ m}$$

$$e/D = 2.9$$

Sehingga, koefisien massa tambah (C_a) adalah 1, karena e/D lebih dari 0.8 ($e/D \geq 0.8$).

- b. Massa Tambah

$$m_a = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot \rho_w \cdot C_a$$

$$m_a = \frac{\pi}{4} (0.34)^2 (1000) (1)$$

$$m_a = 93.09 \text{ kg/m}$$

- c. Massa Efektif Pipa

$$m_e = W_{st} + W_{corr} + W_c + W_{cont} + m_a$$

$$m_e = 81.54 + 12.62 + 88.83 + 2.83 + 93.09$$

$$m_e = 278.92 \text{ kg/m}$$

A.4 Cek Stabilitas Pipa

- a. Vertical Stability

Vertical Stability tanpa pengaruh arus dan gelombang (hanya berat dari pipa):

$$\gamma_w \cdot \frac{b}{w_s + b} = \frac{\gamma_w}{s_g} \leq 1.00$$

$$0.55 \leq 1.00 \quad \text{(Stabil)}$$

b. Lateral Stability

Metode Absolute Stability memberikan syarat absolut statis sebagai perpindahan lateral pipa didasar laut berdasarkan penyamaan gaya. Penyamaan gaya tersebut digunakan untuk memastikan gaya tahanan pipa mencukupi untuk bertahan terhadap beban hidrodinamis maksimum. Desain kriteria untuk metode absolute stability adalah:

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

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

Sebelum masuk pada cek stabilitas lateral maka diperlukan F_y^* (horizontal hydrodynamic load) dan F_z^* (Vertical hydrodynamic load):

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

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

- Perhitungan Penetration Depth

Passive Resistance pada *Clay*

$$\frac{F_R}{F_C} = \frac{4.1 \cdot K_C}{G_C^{0.39}} \cdot \left(\frac{z_p}{D}\right)^{1.31}$$

Dimana, $G_C = \frac{s_u}{D \cdot \gamma_s}$ dan $K_C = \frac{s_u \cdot D}{w_s - F_z} = \frac{s_u \cdot D}{F_C}$

Diketahui:

Un-drained clay shear strength	s_u	2000	Pa
Diameter total	D	0.34	m
Dry unit soil weight	γ_s	18000	N/m ³
Soil (clay) strength parameter	G_C	0.32675	
Submerged weight	w_s	909.79	N/m

Mencari Horizontal hydrodynamic (drag and inertia) load, F_C

$$F_C = w_s - F_z = 909.79 - 0 = 909.79 \text{ N/m}$$

$$K_C = \frac{s_u \cdot D}{F_C} = \frac{2000 \cdot 0.34}{909.79} = 0.75$$

Total Penetration Depth

$$\frac{z_{pi}}{D} = 0.0071 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{K_c}\right)^{3.2} + 0.062 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{K_c}\right)^{0.7} = 0.07$$

$$z_p = z_{pi} = 0.02 \text{ m}$$

- Koefisien Reduksi

$$r_{pen,y} = 1.0 - 1.4 \cdot \frac{z_p}{D} \quad \text{dimana } r_{pen,y} \geq 0.3$$

$$r_{pen,z} = 1.0 - 1.3 \cdot \left(\frac{z_p}{D} - 0.1\right) \quad \text{dimana } r_{pen,z} \geq 0.0$$

Sehingga,

$$\Gamma_{tot,y} \quad \Gamma_{pen,y} \quad 0.91$$

$$\Gamma_{tot,z} \quad \Gamma_{pen,z} \quad 1.04$$

- Koefisien C_Y^* dan C_Z^*

Ratio antara periode single design oscillation dan design spectrum:

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

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

Jika, Peak-enhancement factor γ bernilai 1 maka, nilai $k_t = 1.25$.

Diketahui:

Water depth	d	58.2	m
Reference period	$T_n = \sqrt{\frac{d}{g}}$	2.44	s
Spectrally derived mean zero up-crossing period	T_u	12.05	s

Jika, $T_n/T_u = 0.2$, maka T^*/T_u adalah

$$\frac{T^*}{T_u} = k_t - 5 \cdot (k_t - 1) \cdot T_n/T_u = 1$$

Sehingga, $T^* = 12.02 \text{ s}$

Rasio antara amplitudo kecepatan osilasi desain tunggal dan design spectrum (k_U)

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

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Rasio antara amplitudo kecepatan osilasi desain tunggal dan design spectrum	$\tau = T/T_u$	896.15	
Oscillatory velocity amplitude for single design oscillation, perpendicular to pipeline	$k_U = U^*/U_s$	1.92	
Spectrally derived oscillatory velocity (significant amplitude) for design spectrum, perpendicular to pipeline	U_s	0.21	m/s
Oscillatory velocity amplitude for single design oscillation, perpendicular to pipeline	U^*	0.40	m/s

Keulegan-Carpenter Number untuk Osilasi Design Tunggal

$$K^* = \frac{U^* \cdot T^*}{D} = 14.2$$

Rasio kecepatan *steady* hingga berosilasi untuk osilasi design tunggal

$$M^* = \frac{V^*}{U^*} = 1.39$$

Tabel A.2 Peak Horizontal Load Coefficients

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

Tabel A.3 Peak Vertikal Load Coefficients

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

Interpolasi C_y^* dan C_z^*

untuk C_y^*	10	14.25	20
1	1.75	1.60	1.39
1.4		1.55	
2	1.45	1.47	1.49

untuk C_z^*	10	14.25	20
1	1.28	1.21	1.12
1.4		1.14	
2	1.05	1.03	1

- Peak Horizontal dan Vertical Load

$$F_y^* = r_{tot,y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_y^* \cdot (U^* + V^*)^2 = 226.32 \text{ N/m}$$

$$F_z^* = r_{tot,z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_z^* \cdot (U^* + V^*)^2 = 192.12 \text{ N/m}$$

Jika,

Coefficient of friction μ 0.2 (clay)

Safety Factor γ_{sc} 1

Maka, berikut merupakan pengecekan **Stabilitas Lateral**:

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

$$0.87 \leq 1 \text{ (Stabil)}$$

$$\gamma_{sc} \frac{F_z}{w_s} \leq 1.0$$

$$0.21 \leq 1 \text{ (Stabil)}$$

LAMPIRAN B
ARUS DAN GELOMBANG

LAMPIRAN B
ARUS DAN GELOMBANG

B.1 Arus Pada Kedalaman Pipa

a. Kekasaran Dasar Laut (*Seabed*)

Berdasarkan data, jenis tanah pada lokasi pipa berada adalah *very soft clay*, sehingga kekasaran *seabed* dipilih *silt*.

Tabel B.1 Kekasaran Dasar Laut (*Seabed*)

<i>Seabed</i>	<i>Roughness z₀ (m)</i>
Silt	$\approx 5 \cdot 10^{-6}$
Fine sand	$\approx 1 \cdot 10^{-5}$
Medium sand	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$
Coarse sand	$\approx 1 \cdot 10^{-4}$
Gravel	$\approx 3 \cdot 10^{-4}$
Pebble	$\approx 2 \cdot 10^{-3}$
Cobble	$\approx 1 \cdot 10^{-2}$
Boulder	$\approx 4 \cdot 10^{-2}$

b. Kecepatan Arus Dasar Laut

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

Diameter pipa	D	0.34	m
Bottom Roughness	z_0	5.00E-06	clay
Tinggi referensi diatas seabed	$z_r = d - (90\% \cdot d)$	5.82	m
Elevasi diatas seabed	$z = (d - D)$	57.86	m
Arus permukaan referensi	$V(z_r)$	0.48	m/s
Arus dasar laut	$V(z) = U_c = V^*$	0.56	m/s
	U_c		

B.2 Arus Akibat Gelombang

a. Parameter Spektra JONSWAP

- *Peak-enhancement factor*

$$\gamma = \begin{cases} 5 & \varphi \leq 3.6 \\ \exp(5.75 - 1.15\varphi) & 3.6 < \varphi < 5 \\ 1 & \varphi \geq 5 \end{cases}$$

Mencari Faktor Distribusi (φ)

$$\varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}$$

Tabel B.2 *Peak-enhancement Factor*

Parameter	Notasi	100 Tahunan	1 Tahunan	Satuan
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	5.19	3.24	m
Significant Period	T_s	11.46	9.01	s
Periode Puncak Gelombang	$T_p=1.05T_s$	12.03	9.46	s
Faktor Distribusi	φ	5.26	5.28	
<i>Peak-enhancement Factor</i>	γ	1	1	$\varphi \geq 5$

- Konstanta *Generalised Philips'*

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

Frekuensi Angular Puncak Gelombang (rad/s)	
$\omega_p =$	$2\pi/T_p$
$\omega_p =$	0.66 rad/s (1-tahunan)
$\omega_p =$	0.52 rad/s (100-tahunan)

Konstanta Generalized Philips'	
$\alpha =$	6.63E-03 1-tahunan
$\alpha =$	6.50E-03 100-tahunan

b. Transformasi Gelombang

1. Gelombang 1 Tahunan

- Menentukan Angka Gelombang

$$k = \frac{\omega^2}{\frac{g}{\tanh(k \cdot d)}}$$

Tabel B.3 Iterasi Angka Gelombang 1 Tahunan

k asumsi	h (m)	g (m/s ²)	ω_p (rad/s)	kh	tanh (kh)	coth (kh)	k	Error
0.04496	58.2	9.81	0.66	2.62	0.989	1.011	0.04545	1.061%
0.04545	58.2	9.81	0.66	2.64	0.990	1.010	0.04542	0.058%
0.04542	58.2	9.81	0.66	2.64	0.990	1.010	0.04542	0.0031%
0.04542	58.2	9.81	0.66	2.64	0.990	1.010	0.04542	0.0002%
0.04542	58.2	9.81	0.66	2.64	0.990	1.010	0.04542	0.0000%
0.04542	58.2	9.81	0.66	2.64	0.990	1.010	0.04542	0.0000%
0.04542	58.2	9.81	0.66	2.64	0.990	1.010	0.04542	0.0000%
0.04542	58.2	9.81	0.66	2.64	0.990	1.010	0.04542	0.0000%
0.04542	58.2	9.81	0.66	2.64	0.990	1.010	0.04542	0.0000%
0.04542	58.2	9.81	0.66	2.64	0.990	1.010	0.04542	0.0000%
0.04542	58.2	9.81	0.66	2.64	0.990	1.010	0.04542	0.0000%
0.04542	58.2	9.81	0.66	2.64	0.990	1.010	0.04542	0.0000%

- Spektra Gelombang

Selanjutnya, dilakukan perhitungan berdasarkan persamaan dibawah ini dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel B.6.

Spektra JONSWAP

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

Dimana:

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

$$G^2(\omega) = \frac{\omega \cdot \cosh(k \cdot (D + e))}{\sinh(k \cdot h)}$$

Tabel B.4 Perhitungan Spektra Gelombang

ω (rad/s)	ω_p (rad/s)	σ	$S_{\eta\eta}(\omega)$	$G(\omega)$	$G^2(\omega)$	$S_{uu}(\omega)$	FS	M_0	M_1	M_2	M_4
0	0.66	0.07	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0.05	0.66	0.07	0	0.00715	5.11E-05	0	4	0	0	0	0
0.1	0.66	0.07	0	0.01429	0.0002	0	2	0	0	0	0
0.15	0.66	0.07	1.94E-205	0.02144	0.0005	8.9E-209	4	3.6E-208	5.34E-209	0	0
0.2	0.66	0.07	1.93E-63	0.02859	0.0008	1.58E-66	2	3.16E-66	6.311E-67	1.99E-132	2E-263
0.25	0.66	0.07	5.97E-25	0.03574	0.0013	7.62E-28	4	3.05E-27	7.623E-28	2.32E-54	2.2E-107
0.3	0.66	0.07	2.40E-11	0.04288	0.0018	4.41E-14	2	8.81E-14	2.644E-14	2.33E-27	1.81E-53
0.35	0.66	0.07	1.11E-05	0.05003	0.0025	2.78E-08	4	1.11E-07	3.897E-08	4.34E-15	5.38E-29
0.4	0.66	0.07	0.005	0.05718	0.0033	1.53E-05	2	3.05E-05	1.22E-05	3.72E-10	3.46E-19
0.45	0.66	0.07	0.092	0.06433	0.0041	0.0004	4	0.0015	0.0007	1.04E-06	2.41E-12
0.5	0.66	0.07	0.417	0.07147	0.0051	0.0021	2	0.0043	0.0021	9.08E-06	1.65E-10
0.55	0.66	0.07	0.889	0.07862	0.0062	0.0055	4	0.0220	0.0121	0.000266	1.28E-07
0.6	0.66	0.07	1.257	0.08577	0.0074	0.0092	2	0.0185	0.0111	0.000205	7.01E-08
0.65	0.66	0.07	1.408	0.09292	0.0086	0.0122	4	0.0486	0.0316	0.001538	3.64E-06
0.7	0.66	0.09	1.379	0.10006	0.0100	0.0138	2	0.0276	0.0193	0.000534	4.07E-07
0.75	0.66	0.09	1.247	0.10721	0.0115	0.0143	4	0.0573	0.0430	0.002465	8.1E-06
0.8	0.66	0.09	1.076	0.11436	0.0131	0.0141	2	0.0281	0.0225	0.000633	5.01E-07
0.85	0.66	0.09	0.903	0.12151	0.0148	0.0133	4	0.0533	0.0453	0.002416	6.87E-06

ω (rad/s)	ω_p (rad/s)	σ	$S\eta\eta(\omega)$	$G(\omega)$	$G^2(\omega)$	$Suu(\omega)$	FS	M_0	M_1	M_2	M_4
0.9	0.66	0.09	0.746	0.12865	0.0166	0.0123	2	0.0247	0.0222	0.000549	3.35E-07
0.95	0.66	0.09	0.612	0.1358	0.0184	0.0113	4	0.0451	0.0429	0.001936	3.94E-06
1	0.66	0.09	0.500	0.14295	0.0204	0.0102	2	0.0205	0.0205	0.000418	1.75E-07
1.05	0.66	0.09	0.409	0.1501	0.0225	0.0092	4	0.0369	0.0387	0.001429	1.95E-06
1.1	0.66	0.09	0.336	0.15724	0.0247	0.0083	2	0.0166	0.0183	0.000303	8.35E-08
1.15	0.66	0.09	0.276	0.16439	0.0270	0.0075	4	0.0298	0.0343	0.001025	9.13E-07
1.2	0.66	0.09	0.228	0.17154	0.0294	0.0067	2	0.0134	0.0161	0.000216	3.9E-08
1.25	0.66	0.09	0.189	0.17868	0.0319	0.0060	4	0.0242	0.0302	0.000731	4.27E-07
1.3	0.66	0.09	0.158	0.18583	0.0345	0.0055	2	0.0109	0.0142	0.000155	1.84E-08
1.35	0.66	0.09	0.132	0.19298	0.0372	0.0049	4	0.0197	0.0266	0.000524	2.04E-07
1.4	0.66	0.09	0.111	0.20013	0.0401	0.0045	2	0.0089	0.0125	0.000111	8.88E-09
1.45	0.66	0.09	0.094	0.20727	0.0430	0.0040	4	0.0162	0.0235	0.00038	9.98E-08
1.5	0.66	0.09	0.080	0.21442	0.0460	0.0037	2	0.0074	0.0110	8.14E-05	4.42E-09
1.55	0.66	0.09	0.068	0.22157	0.0491	0.0034	4	0.0134	0.0208	0.00028	5.04E-08
1.6	0.66	0.09	0.059	0.22872	0.0523	0.0031	2	0.0061	0.0098	6.02E-05	2.27E-09
1.65	0.66	0.09	0.051	0.23586	0.0556	0.0028	4	0.0112	0.0185	0.000208	2.63E-08
1.7	0.66	0.09	0.044	0.24301	0.0591	0.0026	2	0.0052	0.0088	4.52E-05	1.2E-09
1.75	0.66	0.09	0.038	0.25016	0.0626	0.0024	4	0.0095	0.0166	0.000157	1.42E-08
1.8	0.66	0.09	0.033	0.25731	0.0662	0.0022	2	0.0044	0.0079	3.44E-05	6.57E-10
1.85	0.66	0.09	0.029	0.26445	0.0699	0.0020	4	0.0081	0.0149	0.00012	7.85E-09
1.9	0.66	0.09	0.025	0.2716	0.0738	0.0019	2	0.0037	0.0071	2.65E-05	3.69E-10
1.95	0.66	0.09	0.022	0.27875	0.0777	0.0017	4	0.0069	0.0135	9.33E-05	4.47E-09
2	0.66	0.09	0.020	0.2859	0.0817	0.0016	2	0.0032	0.0064	2.06E-05	2.13E-10

ω (rad/s)	ω_p (rad/s)	σ	$S\eta\eta(\omega)$	$G(\omega)$	$G^2(\omega)$	$Suu(\omega)$	FS	M_0	M_1	M_2	M_4
2.05	0.66	0.09	0.017	0.29304	0.0859	0.0015	4	0.0060	0.0122	7.31E-05	2.61E-09
2.1	0.66	0.09	0.015	0.30019	0.0901	0.0014	2	0.0028	0.0058	1.62E-05	1.26E-10
2.15	0.66	0.09	0.014	0.30734	0.0945	0.0013	4	0.0052	0.0112	5.79E-05	1.56E-09
2.2	0.66	0.09	0.012	0.31449	0.0989	0.0012	2	0.0024	0.0053	1.29E-05	7.6E-11
2.25	0.66	0.09	0.011	0.32163	0.1034	0.0011	4	0.0045	0.0102	4.63E-05	9.53E-10
2.3	0.66	0.09	0.010	0.32878	0.1081	0.0011	2	0.0021	0.0049	1.04E-05	4.69E-11
2.35	0.66	0.09	0.009	0.33593	0.1128	0.0010	4	0.0040	0.0094	3.74E-05	5.94E-10
2.4	0.66	0.09	0.008	0.34307	0.1177	0.0009	2	0.0019	0.0045	8.42E-06	2.95E-11
2.45	0.66	0.09	0.007	0.35022	0.1227	0.0009	4	0.0035	0.0086	3.04E-05	3.78E-10
2.5	0.66	0.09	0.006	0.35737	0.1277	0.0008	2	0.0017	0.0041	6.88E-06	1.89E-11
2.55	0.66	0.09	0.006	0.36452	0.1329	0.0008	4	0.0031	0.0080	2.5E-05	2.44E-10
2.6	0.66	0.09	0.005	0.37166	0.1381	0.0007	2	0.0015	0.0038	5.67E-06	1.23E-11
2.65	0.66	0.09	0.005	0.37881	0.1435	0.0007	4	0.0028	0.0074	2.06E-05	1.6E-10
2.7	0.66	0.09	0.004	0.38596	0.1490	0.0007	2	0.0013	0.0036	4.7E-06	8.18E-12
2.75	0.66	0.09	0.004	0.39311	0.1545	0.0006	4	0.0025	0.0069	1.72E-05	1.07E-10
2.8	0.66	0.09	0.004	0.40025	0.1602	0.0006	2	0.0012	0.0033	3.92E-06	5.49E-12
2.85	0.66	0.09	0.003	0.4074	0.1660	0.0006	4	0.0022	0.0064	1.44E-05	7.24E-11
2.9	0.66	0.09	0.003	0.41455	0.1719	0.0005	2	0.0011	0.0031	3.29E-06	3.74E-12
2.95	0.66	0.09	0.003	0.4217	0.1778	0.0005	4	0.0020	0.0060	1.21E-05	4.97E-11
3	0.66	0.09	0.003	0.42884	0.1839	0.0005	1	0.0005	0.0014	6.96E-07	1.61E-13
JUMLAH								\sum_0	\sum_1	\sum_2	\sum_4
								0.6597	0.7493	0.01738	2.8E-05

Spektra JONSWAP

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

Dimana:

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

$$G^2(\omega) = \frac{\omega \cdot \cosh(k \cdot (D + e))}{\sinh(k \cdot h)}$$

Tabel B.6 Iterasi Angka Gelombang 100 Tahunan

ω (rad/s)	ω_p (rad/s)	σ	$S_{\eta\eta}(\omega)$	$G(\omega)$	$G^2(\omega)$	$S_{uu}(\omega)$	FS	M_0	M_1	M_2	M_4
0	0.52	0.07	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0.05	0.52	0.07	0	0.018	0.000	0	4	0	0	0	0
0.1	0.52	0.07	0	0.037	0.001	0	2	0	0	0	0
0.15	0.52	0.07	1.58E-76	0.055	0.003	4.83E-79	4	1.93E-78	2.895E-79	5.6E-157	0
0.2	0.52	0.07	1.17E-22	0.074	0.005	6.35E-25	2	1.27E-24	2.541E-25	3.23E-49	5.22E-97
0.25	0.52	0.07	2.99E-08	0.092	0.008	2.54E-10	4	1.01E-09	2.535E-10	2.57E-19	2.64E-37
0.3	0.52	0.07	0.0027	0.111	0.012	3.28E-05	2	6.55E-05	1.966E-05	1.29E-09	5.54E-18
0.35	0.52	0.07	0.2436	0.129	0.017	0.004	4	0.016	0.006	9.19E-05	2.42E-08
0.4	0.52	0.07	1.6206	0.147	0.022	0.035	2	0.070	0.028	0.002	9.83E-06
0.45	0.52	0.07	3.5171	0.166	0.027	0.097	4	0.387	0.174	0.067	1.01E-02
0.5	0.52	0.07	4.5274	0.184	0.034	0.154	2	0.307	0.154	0.047	4.46E-03
0.55	0.52	0.09	4.5037	0.203	0.041	0.185	4	0.740	0.407	0.301	1.65E-01

ω (rad/s)	ω_p (rad/s)	σ	$S\eta\eta(\omega)$	$G(\omega)$	$G^2(\omega)$	$Suu(\omega)$	FS	M_0	M_1	M_2	M_4
0.6	0.52	0.09	3.9288	0.221	0.049	0.192	2	0.384	0.230	0.088	1.31E-02
0.65	0.52	0.09	3.2045	0.240	0.057	0.184	4	0.735	0.478	0.351	1.90E-01
0.7	0.52	0.09	2.5283	0.258	0.067	0.168	2	0.336	0.235	0.079	8.96E-03
0.75	0.52	0.09	1.9659	0.276	0.076	0.150	4	0.601	0.450	0.270	9.75E-02
0.8	0.52	0.09	1.5221	0.295	0.087	0.132	2	0.265	0.212	0.056	3.92E-03
0.85	0.52	0.09	1.1803	0.313	0.098	0.116	4	0.463	0.394	0.182	3.91E-02
0.9	0.52	0.09	0.9198	0.332	0.110	0.101	2	0.202	0.182	0.037	1.51E-03
0.95	0.52	0.09	0.7215	0.350	0.123	0.088	4	0.354	0.336	0.119	1.49E-02
1	0.52	0.09	0.5702	0.368	0.136	0.077	2	0.155	0.155	0.024	5.75E-04
1.05	0.52	0.09	0.4542	0.387	0.150	0.068	4	0.272	0.286	0.078	5.74E-03
1.1	0.52	0.09	0.3647	0.405	0.164	0.060	2	0.120	0.132	0.016	2.27E-04
1.15	0.52	0.09	0.2950	0.424	0.180	0.053	4	0.212	0.244	0.052	2.32E-03
1.2	0.52	0.09	0.2405	0.442	0.196	0.047	2	0.094	0.113	0.011	9.38E-05
1.25	0.52	0.09	0.1974	0.461	0.212	0.042	4	0.167	0.209	0.035	9.84E-04
1.3	0.52	0.09	0.1631	0.479	0.229	0.037	2	0.075	0.097	0.007	4.08E-05
1.35	0.52	0.09	0.1357	0.497	0.247	0.034	4	0.134	0.181	0.024	4.39E-04
1.4	0.52	0.09	0.1136	0.516	0.266	0.030	2	0.060	0.085	0.005	1.87E-05
1.45	0.52	0.09	0.0956	0.534	0.285	0.027	4	0.109	0.158	0.017	2.06E-04
1.5	0.52	0.09	0.0809	0.553	0.305	0.025	2	0.049	0.074	0.004	8.95E-06
1.55	0.52	0.09	0.0688	0.571	0.326	0.022	4	0.090	0.139	0.012	1.01E-04
1.6	0.52	0.09	0.0588	0.590	0.348	0.020	2	0.041	0.065	0.003	4.48E-06
1.65	0.52	0.09	0.0505	0.608	0.370	0.019	4	0.075	0.123	0.009	5.14E-05
1.7	0.52	0.09	0.0436	0.626	0.392	0.017	2	0.034	0.058	0.002	2.33E-06

ω (rad/s)	ω_p (rad/s)	σ	$S\eta\eta(\omega)$	$G(\omega)$	$G^2(\omega)$	$Suu(\omega)$	FS	M_0	M_1	M_2	M_4
1.75	0.52	0.09	0.0377	0.645	0.416	0.016	4	0.063	0.110	0.007	2.72E-05
1.8	0.52	0.09	0.0328	0.663	0.440	0.014	2	0.029	0.052	0.002	1.25E-06
1.85	0.52	0.09	0.0286	0.682	0.465	0.013	4	0.053	0.099	0.005	1.49E-05
1.9	0.52	0.09	0.0251	0.700	0.490	0.012	2	0.025	0.047	0.001	6.95E-07
1.95	0.52	0.09	0.0221	0.719	0.516	0.011	4	0.046	0.089	0.004	8.38E-06
2	0.52	0.09	0.0194	0.737	0.543	0.011	2	0.021	0.042	0.001	3.98E-07
2.05	0.52	0.09	0.0172	0.755	0.571	0.010	4	0.039	0.080	0.003	4.86E-06
2.1	0.52	0.09	0.0152	0.774	0.599	0.009	2	0.018	0.038	0.001	2.33E-07
2.15	0.52	0.09	0.0136	0.792	0.628	0.009	4	0.034	0.073	0.002	2.89E-06
2.2	0.52	0.09	0.0121	0.811	0.657	0.008	2	0.016	0.035	0.001	1.40E-07
2.25	0.52	0.09	0.0108	0.829	0.687	0.007	4	0.030	0.067	0.002	1.76E-06
2.3	0.52	0.09	0.0097	0.847	0.718	0.007	2	0.014	0.032	0.000	8.63E-08
2.35	0.52	0.09	0.0087	0.866	0.750	0.007	4	0.026	0.061	0.002	1.09E-06
2.4	0.52	0.09	0.0078	0.884	0.782	0.006	2	0.012	0.029	0.000	5.42E-08
2.45	0.52	0.09	0.0071	0.903	0.815	0.006	4	0.023	0.056	0.001	6.91E-07
2.5	0.52	0.09	0.0064	0.921	0.849	0.005	2	0.011	0.027	0.000	3.46E-08
2.55	0.52	0.09	0.0058	0.940	0.883	0.005	4	0.020	0.052	0.001	4.46E-07
2.6	0.52	0.09	0.0053	0.958	0.918	0.005	2	0.010	0.025	0.000	2.25E-08
2.65	0.52	0.09	0.0048	0.976	0.953	0.005	4	0.018	0.048	0.001	2.92E-07
2.7	0.52	0.09	0.0044	0.995	0.990	0.004	2	0.009	0.023	0.000	1.49E-08
2.75	0.52	0.09	0.0040	1.013	1.027	0.004	4	0.016	0.045	0.001	1.95E-07
2.8	0.52	0.09	0.0036	1.032	1.064	0.004	2	0.008	0.022	0.000	9.99E-09
2.85	0.52	0.09	0.0033	1.050	1.103	0.004	4	0.015	0.042	0.001	1.32E-07

ω (rad/s)	ω_p (rad/s)	σ	$S_{\eta\eta}(\omega)$	$G(\omega)$	$G^2(\omega)$	$S_{uu}(\omega)$	FS	M_0	M_1	M_2	M_4
2.9	0.52	0.09	0.0030	1.069	1.142	0.003	2	0.007	0.020	0.000	6.80E-09
2.95	0.52	0.09	0.0028	1.087	1.182	0.003	4	0.013	0.039	0.001	9.01E-08
3	0.52	0.09	0.0026	1.105	1.222	0.003	1	0.003	0.009	0.000	2.93E-10
JUMLAH								Σ_0	Σ_1	Σ_2	Σ_4
								7.127	6.670	1.937	0.559

- Spektral Moment

1-Tahunan

$$\begin{aligned} M_0 &= 1/3 \times \Delta\omega \times \Sigma M_0 \\ &= 0.011 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_1 &= 1/3 \times \Delta\omega \times \Sigma M_1 \\ &= 0.012 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_2 &= 1/3 \times \Delta\omega \times \Sigma M_2 \\ &= 2.90E-04 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_4 &= 1/3 \times \Delta\omega \times \Sigma M_4 \\ &= 4.67E-07 \end{aligned}$$

100-Tahunan

$$\begin{aligned} M_0 &= 1/3 \times \Delta\omega \times \Sigma M_0 \\ &= 0.119 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_1 &= 1/3 \times \Delta\omega \times \Sigma M_1 \\ &= 0.111 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_2 &= 1/3 \times \Delta\omega \times \Sigma M_2 \\ &= 3.23E-02 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_4 &= 1/3 \times \Delta\omega \times \Sigma M_4 \\ &= 9.32E-03 \end{aligned}$$

c. Perhitungan Arus Akibat Gelombang Pada Lokasi Pipa

- Significant flow velocity amplitudo at pipe level

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

- Mean zero-up crossing period

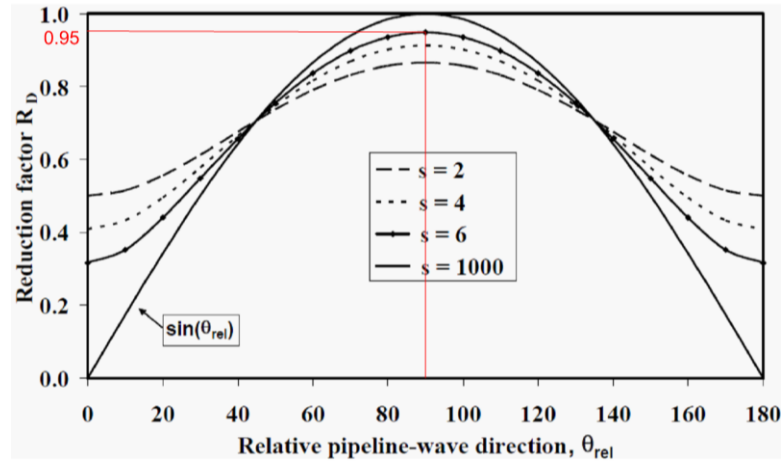
$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}}$$

Kondisi	U_s	T_u
1 Tahun	0.20971	3.87E+01
100 Tahun	0.68928	1.21E+01

Akibat pengaruh arah dan sebaran gelombang, maka untuk mendapatkan kecepatan arus atau partikel akibat gelombang perlu memperhitungkan *Reduction Factor*.

$$U_w = U_s \cdot R_D$$

- Menentukan *Reduction Factor*



Berikut merupakan hasil perhitungan kecepatan arus akibat gelombang pada kondisi 1-Tahunan dan 100-Tahunan:

Kondisi	U_s (m/s)	s	R_D	U_w (m/s)	T_u (s)
1 Tahun	0.21	6	0.95	0.20	38.71
100 Tahun	0.69	6	0.95	0.65	12.05

- Kecepatan Arus Total

Besarnya kecepatan arus total didapatkan dengan menjumlahkan kecepatan arus di dasar laut dan kecepatan arus akibat gelombang pada lokasi pipa berada.

Berikut dapat dilihat hasilnya:

Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
Kecepatan Arus di Dasar Laut	U_c	0.56	0.56	m/s
Kecepatan Arus Akibat Gelombang	U_w	0.20	0.65	m/s
Kecepatan Arus Total	U_{tot}	0.76	1.21	m/s

LAMPIRAN C
KEKAKUAN TANAH

LAMPIRAN C
KEKAKUAN TANAH

C.1 Perhitungan Kekakuan Tanah

Tabel C.1 Menentukan Poisson's Ratio Tanah

Soil type	s_u [kN/m ²]	γ_{soil}' [kN/m ³]	ν	e_s
Very soft	< 12.5	4 – 7	0.45	1.0 – 3.0
Soft	12.5 – 25	5 – 8	0.45	0.8 – 2.5
Firm	25 – 50	6 – 11	0.45	0.5 – 2.0
Stiff	50 – 100	7 – 12	0.45	0.4 – 1.7
Very stiff	100 – 200	10 – 13	0.45	0.3 – 0.9
Hard	> 200	10 – 13	0.45	0.3 – 0.9

Tabel C.2 Faktor Kekakuan Statis dan Dinamis untuk Tanah Clay

Table 7-6 Dynamic stiffness factor and static stiffness for pipe-soil interaction in clay with OCR = 1			
Clay type	C_V (kN/m ^{5/2})	C_L (kN/m ^{5/2})	$K_{V,S}$ (kN/m/m)
Very soft	600	500	50-100
Soft	1400	1200	160-260
Firm	3000	2600	500-800
Stiff	4500	3900	1000-1600
Very stiff	11000	9500	2000-3000
Hard	12000	10500	2600-4200

- Menghitung Kekakuan Dinamis Vertikal dan Lateral

Berikut merupakan persamaan untuk menghitung kekakuan tanah dinamis vertikal dan lateral:

$$\text{Vertical Dynamic Soil Stiffness } K_v = \frac{C_v}{1-\nu} \left(\frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D}$$

$$\text{Lateral Dynamic Soil Stiffness } K_L = C_L (1 + \nu) \left(\frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D}$$

$$\text{Specific Mass Ratio } \frac{\rho_s}{\rho} = \frac{W_{sub} + F_b}{F_b} \text{ dimana } 1.2 < \frac{\rho_s}{\rho} < 2.0$$

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Berat terendam pipa	W_s	909.79	N/m
<i>bouyancy</i>	b	913.21	N/m
<i>Vertical soil settlement</i>	v	0.45	
Diameter total pipa	D	0.34	m
<i>Specific mass ratio</i>	ρ_s/ρ	2.0	
Koefisien kekakuan tanah vertikal	C_v	600	
Koefisien kekakuan tanah lateral	C_L	500	
Kekakuan tanah vertikal	K_v	1.06E+06	N/m ²
Kekakuan tanah lateral (horizontal)	K_L	2.67E+05	N/m ²

LAMPIRAN D
PARAMETER
HIDRODINAMIKA

LAMPIRAN D PARAMETER HIDRODINAMIKA

D.1 Parameter Stabilitas

a. Perhitungan Damping Ratio

$$\text{Damping Ratio Total} \quad \zeta_T = \zeta_{str} + \zeta_{soil} + \zeta_h$$

- Structural Damping

Menurut DNV RP F105 (2006), jika nilai damping struktur tidak diketahui atau tidak ada detail informasi, maka nilainya dapat diasumsikan sebagai berikut:

$$\zeta_{str} = 0.005$$

Tetapi, jika terdapat concrete maka damping meningkat sebesar 0.01-0.02, sehingga

$$\zeta_{str} = 0.0015$$

- Soil Damping

Tujuan analisis untuk screening, maka nilai damping tanah diasumsikan 0.01 (DNV RP F105, 2006)

$$\zeta_{soil} = 0.01$$

- Hydrodynamic Damping

$$\zeta_h = 0.00$$

Sehingga, besarnya Damping Ratio Total:

$$\zeta_T = \zeta_{str} + \zeta_{soil} + \zeta_h$$

$$\zeta_T = 0.0015 + 0.01 + 0.00$$

$$\zeta_T = 0.025$$

b. Perhitungan Parameter Stabilitas

$$\text{Parameter Stabilitas} \quad K_S = \frac{4\pi m_e \zeta_T}{\rho D^2}$$

Diketahui:

Structural damping	ζ_{str}	=	0.015	
Soil damping	ζ_{soil}	=	0.01	
Hydrodynamic damping	ζ_h	=	0.00	
Total modal damping ratio	ζ_T	=	0.025	m
Massa efektif pipa	m_e	=	278.92	kg/m
Massa jenis air laut	ρ_w	=	1025	kg/m ³
Diameter total pipa	D	=	0.34	m
<i>Safety factor</i> parameter stabilitas	γ_k	=	1.3	

Sehingga, besarnya parameter stabilitas adalah:

$$K_s = \frac{4\pi(278.92)(0.025)}{1025(0.34)^2}$$

$$K_s = 0.74$$

Dengan memperhatikan Safety Factor, sehingga

$$K_{sd} = \frac{K_s}{\gamma_k} = \frac{0.74}{1.3} = 0.57$$

D.2 Current Flow Ratio

$$\text{Persamaan Current Flow Ratio } \alpha = \frac{U_{c,100 \text{ year}}}{U_{w,1 \text{ year}} + U_{c,100 \text{ year}}}$$

Kondisi	U_c (m/s)	U_w (m/s)
1 Tahun	0.56	0.20
100 Tahun	0.56	0.65

$$\alpha = \frac{0.56}{0.2 + 0.65} = 0.74$$

Sehingga, nilai $\alpha = 0.74$

D.3 Keulegan-Carpenter Number

$$\text{Persamaan Keulegan-Carpenter Number } KC = \frac{U_w}{f_w D}$$

Diketahui:

	U_w	0.69	m/s
	f_w	12.05	rad/s
Diameter total pipa	D	0.34	m

Sehingga, $KC = 24.43$

D.4 Reduced Velocity

a. Safety Factor

Tabel D.1 Penentuan *Safety Factor* Arah *In-Line* dan *Cross-Flow*

<i>Safety Factor</i>	<i>Safety Class</i>		
	<i>Low</i>	<i>Normal</i>	<i>High</i>
η	1.0	0.5	0.25
γ_k	1.0	1.15	1.30
γ_s	1.3		
$\gamma_{on, IL}$	1.1		
$\gamma_{on, CF}$	1.2		

b. Perhitungan *Reduced Velocity*

- Arah *In-Line*

Persamaan *Reduced Velocity* untuk arah *In-Line*

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \left(\frac{1.0}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{untuk } K_{sd} < 0.4 \\ \left(\frac{0.6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{untuk } 0.4 < K_{sd} < 1.6 \\ \left(\frac{2.2}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{untuk } K_{sd} < 1.6 \end{cases}$$

Nilai parameter stabilitas, $K_{sd} = 0.57$ ($0.4 < K_{sd} < 1.6$), sehingga

$$V_{R,onset}^{IL} = \frac{0.6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} = 1.06$$

- Arah *Cross-Flow*

$$V_{R,onset}^{CF} = \left(\frac{3 \cdot \psi_{proxy,onset} \cdot \psi_{trench,onset}}{\psi_{on,CF}} \right)$$

Dimana,
$$\psi_{proxy,onset} = \begin{cases} \frac{1}{5} \left(4 + 1.25 \frac{e}{D} \right) & \text{untuk } \frac{e}{D} < 0.8 \\ 1 & \text{untuk yang lainnya} \end{cases}$$

Nilai *span gap ratio* (perbandingan antara gap dan diameter total pipa) e/D adalah 2.94 (≥ 0.8), sehingga nilai faktor koreksi untuk arah *cross-flow* karena letak pipa dekat dengan *seabed* adalah 1 ($\psi_{proxy,onset} = 1$).

Persamaan *Reduction Factor* karena *Trench* $\psi_{trench,onset} = 1 + 0.5 \frac{\Delta}{D}$

Dimana, $\frac{\Delta}{D} = \frac{1.25 d_{trench} - e}{D_t}$ (dengan $1 \leq \frac{\Delta}{D} \leq 1$)

Diketahui:

Kedalaman <i>trench</i>	d	0
<i>Seabed gap</i>	e	1
Diameter total	D	0.34 m

Sehingga, $\frac{\Delta}{D} = 0$

Maka, nilai *Reduction Factor* untuk arah *cross-flow* adalah

$$V_{R,onset}^{CF} = \left(\frac{3 \cdot \psi_{proxy,onset} \cdot \psi_{trench,onset}}{\psi_{on,CF}} \right) = 2.50$$

D.5 Gaya Drag

1. Menentukan Koefisien Gaya Drag

Berdasarkan Tabel di bawah maka didapatkan nilai kekasaran permukaan pipa (k), yaitu:

$$k = 1/300 \text{ m}$$

Tabel D.2 Nilai Kekasaran Permukaan Pipa

<i>Pipe Surface</i>	<i>k [meters]</i>
Steel, painted	10^{-6}
Steel, un-coated (not rusted)	10^{-5}
Concrete	1/300
Marine growth	1/200 → 1/20

Perbandingan kekasaran permukaan pipa, k/D adalah $9.80E-03$ ($10^{-4}k/D > 10^{-2}$).

$$C_D^0(k/D) = \begin{cases} 0.65 & ; k/D < 10^{-4} \text{ (smooth)} \\ 0.65 \cdot \left(\frac{29}{13} + \frac{4}{13} \log_{10}(k/D) \right) & ; 10^{-4} < \frac{k}{D} < 10^{-2} \\ 1.05 & ; k/D > 10^{-2} \text{ (rough)} \end{cases}$$

Sehingga, $C_D^0(k/D) = 1.048$

a. Faktor Koreksi untuk Aliran Tidak *Steady*

$$\psi_{KC,\alpha}^{CD} = \begin{cases} 0.85 + \frac{6}{KC} - \frac{\alpha}{2} & \alpha \leq 0.5 \\ 0.6 + \frac{6}{KC} & \alpha > 0.5 \end{cases} \quad 5 < KC < 40$$

Sebelumnya, telah didapatkan nilai Keulegan-Carpenter (KC) number yaitu sebesar **24.43** ($5 < KC < 40$) dan nilai ratio aliran (α) adalah **0.0065** ($\alpha \leq 0.5$), sehingga besarnya faktor koreksi untuk aliran tidak steady adalah

$$\psi_{KC,\alpha}^{CD} = 0.85 + \frac{6}{KC} - \frac{\alpha}{2} = 1.09$$

b. Faktor Koreksi Pengaruh Dasar Laut

$$\psi_{KC,\alpha}^{CD} = \begin{cases} 0.9 + \frac{0.5}{1 + 5 \cdot (e/D)} & \text{untuk } e/D < 0.8 \\ 1 & \text{yang lainnya} \end{cases}$$

Ratio antara gap dan diameter total pipa (e/D) adalah 2.94 ($e/D \geq 0.8$). Maka, faktor koreksi untuk pengaruh dasar laut adalah

$$\psi_{KC,\alpha}^{CD} = 1$$

c. Faktor koreksi keberadaan *trench*

$$\psi_{trench}^{CD} = 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{\Delta}{D} \right)$$

Dimana, $\Delta/D = 0$ (karena $d_{trench} = 0$)

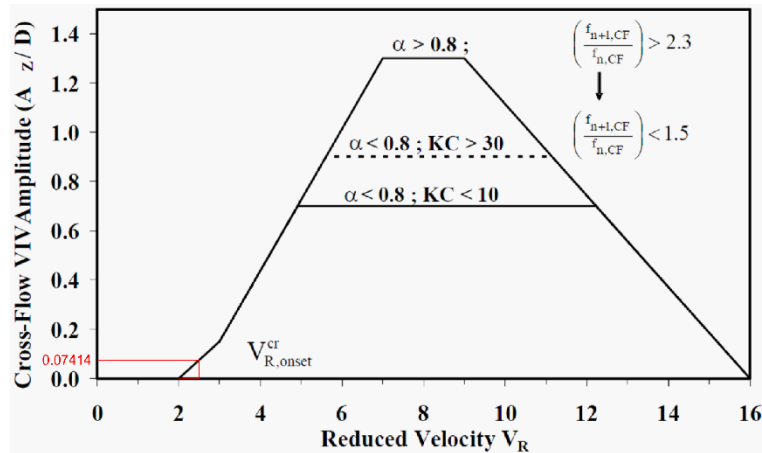
Sehingga, $\psi_{trench}^{CD} = 1$

d. Faktor koreksi pengaruh gerakan *cross-flow*

$$\psi_{VIV}^{CD} = 1 + 1.043 \left(\sqrt{2} \frac{A_z}{D} \right)^{0.65}$$

Jika, Reduced Velocity (V_R) = 2.50, maka besarnya amplitude VIV arah *cross-flow* (A_z/D) diperoleh dari grafik dibawah ini, yaitu sebesar 0.074. Sehingga, nilai faktor koreksi untuk pengaruh gerakan *cross-flow* adalah

$$\psi_{VIV}^{CD} = 1.24$$



Gambar D.1 Faktor Koreksi untuk Pengaruh Gerakan *Cross-Flow*

Berdasarkan parameter-parameter yang telah didapatkan dari perhitungan sebelumnya, maka besarnya koefisien drag adalah

$$C_D = C_D^0(k/D) \cdot \psi_{KC,\alpha}^{CD} \cdot \psi_{proxi}^{CD} \cdot \psi_{trench}^{CD} \cdot \psi_{VIV}^{CD} = 1.42$$

2. Menghitung Gaya Drag

Berikut ini merupakan persamaan untuk menghitung gaya drag:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D U_{tot}^2$$

Tabel D.3 Gaya Drag

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien Drag	C_D	1.42083	
Kecepatan Arus Total	U_{tot}	1.21	m/s
Total Diameter Luar Pipa	D	0.34005	m
Massa Jenis Air Laut	ρ_w	1025	kg/m ³
Gaya Drag	F_D	364.78	N/m

LAMPIRAN E
ANALISIS STATIS
STRUKTUR PIPA

LAMPIRAN E
ANALISIS STATIS STRUKTUR PIPA

E.1 Concrete Stiffness Factor (CSF)

Persamaan untuk menghitung faktor kekakuan *concrete*:

$$CSF = k_c \left(\frac{E_{conc} I_{conc}}{EI_{steel}} \right)^{0.75}$$

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Soil parameter	k_c	0.25	
Modulus elastis concrete	E_{conc}	24821	MPa
		2.48E+10	Pa
Momen inersia concrete coating	I_{conc}	3.54E-04	m ⁴
Momen inersia baja (<i>steel</i>)	I_{steel}	8.82E-05	m ⁴
Young's Modulus	E	207000	MPa
		2.07E+11	Pa

Sehingga, besarnya *Concrete Stiffness Factor* adalah:

$$CSF = 0.145$$

E.2 Panjang *Free Span* Efektif

$$\frac{L_{eff}}{L} = \begin{cases} \frac{4.73}{-0.066\beta^2 + 1.02\beta + 0.63} & \text{untuk } \beta \geq 2.7 \\ \frac{4.73}{0.36\beta^2 + 0.61\beta + 1} & \text{untuk } \beta < 2.7 \end{cases}$$

Dengan $\beta = \log_{10} \left(\frac{K \cdot L^4}{(1+CSF)EI} \right)$

Berdasarkan persamaan diatas, maka terdapat beberapa parameter yang diperlukan untuk mendapatkan panjang *free span* efektif, yaitu:

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Kekakuan tanah vertikal	K_v	1.06E+06	N/m ²
Kekakuan tanah lateral (horizontal)	K_L	2.67E+05	N/m ²
Concrete Stiffness Factor	CSF	1.45E-01	

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Young's Modulus	E	2.07E+11	Pa
Momen inersia baja (<i>steel</i>)	I_{steel}	8.82E-05	m ⁴

Berikut merupakan iterasi untuk mendapatkan panjang *free span* efektif pada arah *In-Line* dan *Cross-Flow*:

L (m)	Arah <i>In-Line</i>			Arah <i>Cross-Flow</i>		
	β	Leff/L	Leff (m)	β	Leff/L	Leff (m)
3	0.0	4.69	14.06	0.6	3.41	10.23
3.5	0.3	4.03	14.09	0.9	3.02	10.58
4	0.5	3.57	14.30	1.1	2.74	10.98
4.5	0.7	3.25	14.61	1.3	2.53	11.41
5	0.9	2.99	14.97	1.5	2.37	11.85
5.5	1.1	2.80	15.37	1.7	2.24	12.29
6	1.2	2.63	15.79	1.8	2.12	12.74
6.5	1.4	2.50	16.23	2.0	2.03	13.19
7	1.5	2.38	16.67	2.1	1.95	13.63
7.5	1.6	2.28	17.11	2.2	1.88	14.08
8	1.7	2.20	17.56	2.3	1.81	14.52
8.5	1.8	2.12	18.01	2.4	1.76	14.95
9	1.9	2.05	18.46	2.5	1.71	15.38
9.5	2.0	1.99	18.91	2.6	1.66	15.81
10	2.1	1.94	19.35	2.7	1.63	16.28
10.5	2.2	1.89	19.79	2.8	1.60	16.77
11	2.3	1.84	20.23	2.9	1.57	17.26
11.5	2.3	1.80	20.67	2.9	1.54	17.76
12	2.4	1.76	21.11	3.0	1.52	18.26
12.5	2.5	1.72	21.54	3.1	1.50	18.75
13	2.6	1.69	21.97	3.2	1.48	19.25
13.5	2.6	1.66	22.40	3.2	1.46	19.75
14	2.7	1.63	22.86	3.3	1.45	20.25
14.5	2.8	1.61	23.35	3.4	1.43	20.74
15	2.8	1.59	23.85	3.4	1.42	21.24
15.5	2.9	1.57	24.34	3.5	1.40	21.74
16	2.9	1.55	24.84	3.5	1.39	22.24

E.3 Gaya Aksial Efektif

Persamaan Gaya Aksial Efektif:

$$S_{\text{eff}} = H_{\text{eff}} - \Delta p_i A_i (1 - 2\nu) - A_s E \Delta T \alpha_e$$

Berikut merupakan beberapa parameter yang diperlukan untuk menghitung gaya aksial efektif:

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Effective lay tension	H_{eff}	0	
Perbedaan tegangan internal relative terhadap fase instalasi	Δp_i	1.10E+07	Pa
Internal Cross Section Area	A_i	0.05	m ²
Vertical soil settlement	ν	0.3	
Cross Section Area Pipa	A_s	0.01	m ²
Young's Modulus	E	207000	MPa
		2.07E+11	Pa
Perbedaan temperatur	ΔT	17.3	°C
Coefficient of Thermal Expansion	α_e	1.17E-05	/°C

Sehingga, besarnya gaya aksial efektif adalah

$$S_{\text{eff}} = -6.47E + 05 \text{ N}$$

E.4 Critical Buckling Load

$$\text{Critical Buckling Load } P_{\text{cr}} = (1 + \text{CSF}) C_2 \pi EI / L_{\text{eff}}^2$$

Berikut merupakan beberapa parameter yang diperlukan untuk menghitung *Critical Buckling Load*:

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Concrete Stiffness Factor	CSF	0.144558	
Koefisien Syarat Batas	C_2	1	
Young's Modulus	E	207000	MPa
		2.07E+11	Pa
Momen Inersia Steel	I_{steel}	8.82E-05	m ⁴

E.5 Defleksi Statik (*Static Deflection*)

Persamaan untuk menghitung *Static Deflection*:

$$\delta = C_6 \frac{q \cdot L^4_{eff}}{EI \cdot (1 + CSF)} \frac{1}{\left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}}\right)}$$

Berikut merupakan beberapa parameter yang diperlukan untuk menghitung defleksi statik:

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien Syarat Batas	C ₆	5/384	
Deflection load per unit length	q _{inline}	364.78	N/m
	q _{crossflow}	909.79	N/m
Young's Modulus	E	207000	MPa
		2.07E+11	Pa
Momen Inersia Steel	I	8.82E-05	m ⁴
Concrete Stiffness Factor	CSF	0.144558237	
Gaya aksial efektif	S _{eff}	-6.47E+05	N

E.6 Frekuensi Natural *Free Span*

Persamaan untuk menghitung Frekuensi Natural *Free Span*:

$$f_n \approx C_1 \cdot \sqrt{1 + CSF} \sqrt{\frac{EI}{m_e L^4_{eff}} \cdot \left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}} + C_3 \left(\frac{\delta}{D}\right)^2\right)}$$

Parameter-parameter yang diperlukan untuk mendapatkan frekuensi natural *free span*:

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien Syarat Batas	C ₁	1.57	
Concrete Stiffness Factor	CSF	0.144558	
Young's Modulus	E	207000	MPa
		2.07E+11	Pa
Momen Inersia Steel	I	8.82E-05	m ⁴
Massa Efektif Pipa	m _e	278.92	kg/m
Gaya aksial efektif	S _{eff}	-647244.8	N
Koefisien Syarat Batas	C ₃	0.8	
Diameter total pipa	D	0.34	m

Berikut merupakan hasil perhitungan untuk *Critical Buckling Load*, Defleksi Statik, dan Frekuensi Natural pada arah *In-Line* dan *Cross-Flow* berdasarkan parameter-parameter yang telah disajikan diatas:

L (m)	Arah <i>In-Line</i>			Arah <i>Cross-Flow</i>		
	P_{cr} (N)	δ (m)	f_n (Hz)	P_{cr} (N)	δ (m)	f_n (Hz)
3	2.29E+07	1.89E-05	47.075	2.29E+07	4.72E-05	47.075
3.5	1.68E+07	3.55E-05	34.403	1.68E+07	8.84E-05	34.403
4	1.29E+07	6.12E-05	26.178	1.29E+07	1.53E-04	26.178
4.5	1.02E+07	9.95E-05	20.539	1.02E+07	2.48E-04	20.539
5	8.25E+06	1.54E-04	16.503	8.25E+06	3.84E-04	16.503
5.5	6.82E+06	2.30E-04	13.517	6.82E+06	5.73E-04	13.517
6	5.73E+06	3.32E-04	11.244	5.73E+06	8.28E-04	11.244
6.5	4.88E+06	4.68E-04	9.474	4.88E+06	1.17E-03	9.474
7	4.21E+06	6.45E-04	8.069	4.21E+06	1.61E-03	8.069
7.5	3.67E+06	8.73E-04	6.934	3.67E+06	2.18E-03	6.934
8	3.22E+06	1.16E-03	6.003	3.22E+06	2.90E-03	6.004
8.5	2.86E+06	1.53E-03	5.231	2.86E+06	3.83E-03	5.231
9	2.55E+06	2.00E-03	4.582	2.55E+06	4.99E-03	4.583
9.5	2.29E+06	2.58E-03	4.032	2.29E+06	6.44E-03	4.033
10	2.06E+06	3.31E-03	3.561	2.06E+06	8.26E-03	3.562
10.5	1.87E+06	4.22E-03	3.153	1.87E+06	1.05E-02	3.155
11	1.70E+06	5.36E-03	2.798	1.70E+06	1.34E-02	2.800
11.5	1.56E+06	6.79E-03	2.486	1.56E+06	1.69E-02	2.490
12	1.43E+06	8.60E-03	2.211	1.43E+06	2.14E-02	2.216
12.5	1.32E+06	1.09E-02	1.965	1.32E+06	2.71E-02	1.974
13	1.22E+06	1.38E-02	1.745	1.22E+06	3.45E-02	1.758
13.5	1.13E+06	1.76E-02	1.547	1.13E+06	4.40E-02	1.567
14	1.05E+06	2.27E-02	1.367	1.05E+06	5.65E-02	1.399
14.5	9.81E+05	2.95E-02	1.203	9.81E+05	7.36E-02	1.256
15	9.17E+05	3.91E-02	1.054	9.17E+05	9.76E-02	1.146
15.5	8.59E+05	5.33E-02	0.922	8.59E+05	1.33E-01	1.086
16	8.06E+05	7.57E-02	0.816	8.06E+05	1.89E-01	1.118

LAMPIRAN F
***SCREENING* FREKUENSI**
NATURAL

LAMPIRAN F
SCREENING FREKUENSI NATURAL

F.1 Screening Frekuensi Natural Arah In-Line

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{c,100\text{ year}}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D} \cdot \left(1 - \frac{L/D}{250}\right) \frac{1}{\bar{\alpha}}$$

Misalkan,

$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}}$	A
$\frac{U_{c,100\text{ year}}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D} \cdot \left(1 - \frac{L/D}{250}\right) \frac{1}{\bar{\alpha}}$	B

Parameter untuk melakukan screening *In-Line*:

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Safety Factor	γ_{IL}	1.4	
Kecepatan normal arus pada pipa	$U_{c, 100\text{ year}}$	0.56	m/s
Reduced velocity	$V_{R,onset}^{IL}$	1.06	
Diameter total pipa (termasuk <i>coating</i>)	D	0.34	m
Ratio kecepatan arus	α	0.74	

Berikut merupakan hasil *screening* frekuensi natural arah *In-Line*:

L (m)	f_n	A	B	Keterangan
3	47.07	33.62	2.02	LOLOS
3.5	34.40	24.57	2.01	LOLOS
4	26.18	18.70	2.00	LOLOS
4.5	20.54	14.67	1.99	LOLOS
5	16.50	11.79	1.98	LOLOS
5.5	13.52	9.65	1.96	LOLOS
6	11.24	8.03	1.95	LOLOS
6.5	9.47	6.77	1.94	LOLOS
7	8.07	5.76	1.93	LOLOS
7.5	6.93	4.95	1.91	LOLOS
8	6.00	4.29	1.90	LOLOS
8.5	5.23	3.74	1.89	LOLOS

L (m)	f _n	A	B	Keterangan
9	4.58	3.27	1.88	LOLOS
9.5	4.03	2.88	1.86	LOLOS
10	3.56	2.54	1.85	LOLOS
10.5	3.15	2.25	1.84	LOLOS
11	2.80	2.00	1.83	LOLOS
11.5	2.49	1.78	1.81	TIDAK LOLOS
12	2.21	1.58	1.80	TIDAK LOLOS
12.5	1.97	1.40	1.79	TIDAK LOLOS
13	1.75	1.25	1.78	TIDAK LOLOS
13.5	1.55	1.10	1.77	TIDAK LOLOS
14	1.37	0.98	1.75	TIDAK LOLOS
14.5	1.20	0.86	1.74	TIDAK LOLOS
15	1.05	0.75	1.73	TIDAK LOLOS
15.5	0.92	0.66	1.72	TIDAK LOLOS
16	0.82	0.58	1.70	TIDAK LOLOS

F.2 Screening Frekuensi Natural Ar ah Cross-Flow

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100\text{ year}} + U_{w,1\text{ year}}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D}$$

Misalkan,

$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}}$	X
$\frac{U_{c,100\text{ year}} + U_{w,1\text{ year}}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D}$	Y

Parameter untuk melakukan screening *In-Line*:

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Safety Factor	γ_{CF}	1.4	
Kecepatan normal arus pada pipa	$U_{c, 100\text{ year}}$	0.56	m/s
Kecepatan arus Signifikan	$U_{w, 1\text{ year}}$	0.20	m/s
Reduced velocity	$V_{R,onset}^{CF}$	2.50	
Diameter total pipa (termasuk <i>coating</i>)	D	0.34	m

Berikut merupakan hasil *screening* frekuensi natural arah *Cross-Flow*:

L (m)	f_n	X	Y	Keterangan
3	47.07	33.62	0.89	LOLOS
3.5	34.40	24.57	0.89	LOLOS
4	26.18	18.70	0.89	LOLOS
4.5	20.54	14.67	0.89	LOLOS
5	16.50	11.79	0.89	LOLOS
5.5	13.52	9.65	0.89	LOLOS
6	11.24	8.03	0.89	LOLOS
6.5	9.47	6.77	0.89	LOLOS
7	8.07	5.76	0.89	LOLOS
7.5	6.93	4.95	0.89	LOLOS
8	6.00	4.29	0.89	LOLOS
8.5	5.23	3.74	0.89	LOLOS
9	4.58	3.27	0.89	LOLOS
9.5	4.03	2.88	0.89	LOLOS
10	3.56	2.54	0.89	LOLOS
10.5	3.15	2.25	0.89	LOLOS
11	2.80	2.00	0.89	LOLOS
11.5	2.49	1.78	0.89	LOLOS
12	2.22	1.58	0.89	LOLOS
12.5	1.97	1.41	0.89	LOLOS
13	1.76	1.26	0.89	LOLOS
13.5	1.57	1.12	0.89	LOLOS
14	1.40	1.00	0.89	LOLOS
14.5	1.26	0.90	0.89	LOLOS
15	1.15	0.82	0.89	TIDAK LOLOS
15.5	1.09	0.78	0.89	TIDAK LOLOS
16	1.12	0.80	0.89	TIDAK LOLOS

Dari *screening* frekuensi natural arah *in-line* dan *cross-flow*, maka panjang *free span* maksimum yang diijinkan adalah

Parameter	Screening Frekuensi Natural	
	<i>In-Line</i>	<i>Cross-Flow</i>
L (m)	11	14.5

LAMPIRAN G
BENDING MOMENT

LAMPIRAN G

BENDING MOMENT

G.1 Stress Range

a. Menghitung *Stress Amplitude*

Berikut merupakan Persamaan untuk menghitung amplitude tegangan pada arah *in-line* maupun *cross-flow*:

$$A_{IL/CF} = C_4(1 + CSF) \frac{D(D_0 - t) \cdot E}{L_{eff}^2}$$

Berikut parameter-parameter yang dibutuhkan untuk menghitung *Stress Amplitude*:

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien Syarat Batas	C ₄	4.93	
Concrete Stiffness Factor	CSF	0.145	
Diameter Total	D	0.34	m
Outside Diameter	D ₀	0.27	m
Tebal dinding pipa	t	0.0127	
Panjang <i>free span</i> efektif	L _{eff}	11	m
Young's Modulus	E	207000	MPa
		2.07E+11	Pa

Sehingga, $A_{IL/CF} = 8.55E + 08$ Pa

b. Stress Range Arah *In-Line*

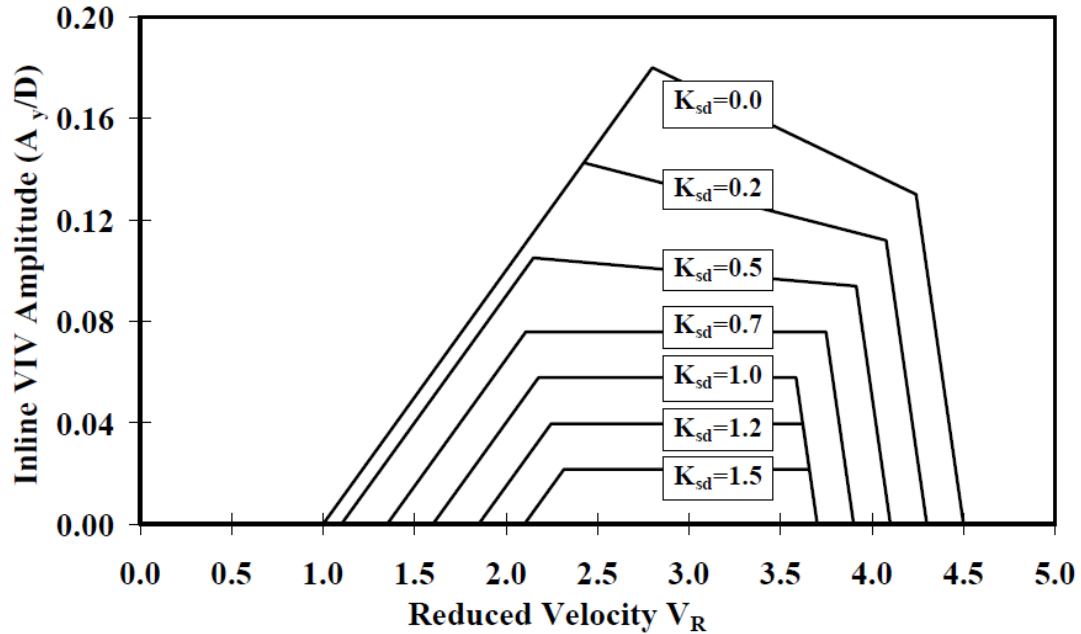
Persamaan Stress Range Arah *In-Line* $S_{IL} = 2 \cdot A_{IL} \cdot (A_\gamma/D) \cdot \psi_{\alpha,IL} \cdot \gamma_s$

$$\text{Dengan, } \psi_{\alpha,IL} = \begin{cases} 0.0 & \text{untuk } \alpha < 0.5 \\ (\alpha - 0.5)/0.3 & \text{untuk } 0.5 < \alpha < 0.8 \\ 1.0 & \text{untuk } \alpha > 0.8 \end{cases}$$

Jika $\alpha = 0.74$ ($0.5 < \alpha < 0.8$), maka besarnya faktor koreksi dari rasio aliran arus adalah:

$$\psi_{\alpha,IL} = (\alpha - 0.5)/0.3 = 0.79$$

- Mencari nilai Amplitude VIV Arah *In-Line*



Gambar G.1 Amplitudo Respons In-line VIV terhadap V_R dan K_{sd}

Berdasarkan grafik diatas, jika *Reduced Velocity* pada arah *In-Line* $V_R = 1.06$ dan parameter stabilitas $K_{sd} = 0.57$ maka besarnya amplitude VIV pada arah *In-Line* (A_γ/D) adalah 0.

Berikut adalah parameter-parameter yang diperlukan untuk menghitung *Stress Range* arah *In-Line*.

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Stress amplitude <i>in-Line</i>	A_{IL}	8.55E+08	Pa
Amplitudo VIV <i>in-line</i>	A_γ/D	0	
Faktor koreksi dari rasio aliran arus	$\psi_{\alpha,IL}$	0.79	
Safety factor stress amplitude	γ_s	1.3	

Sehingga, besarnya *Stress Range* arah *In-Line* adalah

$$S_{IL} = 0 \text{ Pa}$$

c. *Stress Range* Arah *Cross-Flow*

Persamaan *Stress Range* Arah *In-Line* $S_{CF} = 2 \cdot A_{CF} \cdot (A_z/D) \cdot R_k \cdot \gamma_s$

Nilai amplitude *cross-flow* VIV telah dihitung pada perhitungan parameter gaya drag (A_z/D) = 0.074. Sedangkan, besarnya parameter stabilitas (K_{sd}) adalah 0.57. Sehingga, dari nilai tersebut dapat dihitung faktor reduksi dari damping (R_k)

- Faktor reduksi dari Damping

$$R_k = 1 - 0.15K_{sd} = 1 - 0.15(0.57) = 0.91$$

Berikut merupakan parameter-parameter yang diperlukan untuk menghitung *Stress Range* arah *Cross-Flow*.

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Stress amplitude <i>cross-flow</i>	A_{CF}	8.55E+08	Pa
Amplitude <i>cross flow</i> VIV	A_Z/D	0.07	
Faktor reduksi dari damping	R_k	0.91	
Safety factor stress amplitude	γ_s	1.3	

Sehingga, besarnya *Stress Range* arah *Cross-Flow*

$$S_{CF} = 1.51E + 08 \text{ Pa}$$

G.2 Environmental Stress

- Arah *In-Line*

Persamaan *Environmental Stress* Arah *In-Line*

$$\sigma_E = \frac{1}{2} \max \left\{ S_{IL}; 0.4 \cdot S_{CF} \frac{A_{IL}}{A_{CF}} \right\} + \sigma_{FM,max}$$

Untuk menghitung environmental stress, terdapat parameter-parameter yang harus dipenuhi. Untuk mengetahuinya, berikut merupakan cara serta parameter yang diperlukan tersebut.

- Momen Gaya Drag

Persamaan untuk menghitung Gaya Drag

$$M_w = C_5 \left(\frac{F_D \cdot L_{eff}}{1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}}} \right)$$

Berikut merupakan parameter-parameter yang dibutuhkan untuk menghitung momen gaya drag dan hasil perhitungannya.

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien Syarat Batas	C ₅	0.125	
Gaya drag	F _D	364.78	N/m
Panjang Free Span	L _{eff}	11	m
Gaya aksial efektif	S _{eff}	-647244.79	N
Critical buckling load	P _{cr}	1559842.86	N
Moment gaya drag	M _w	857.31	Nm

- Tegangan Akibat Beban Arus Langsung

Berikut merupakan Persamaan untuk menghitung tegangan akibat beban arus langsung.

$$\sigma_{FM} = \frac{M_w \cdot (D_0 - t_2)}{2 \cdot I_{steel}}$$

Berikut merupakan parameter-parameter yang dibutuhkan untuk menghitung tegangan akibat beban arus langsung dan hasil perhitungannya.

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Moment gaya drag	M _w	857.308109	Nm
Outside diameter	D ₀	0.27	m
Tebal dinding pipa	t ₂	0.0127	m
Momen Inersia Baja (<i>Steel</i>)	I _{steel}	8.82E-05	m ⁴

- Environmental Stress

Berikut merupakan parameter-parameter yang diperlukan untuk menghitung environmental stress.

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Stress Range <i>In-Line</i>	S _{IL}	0	Pa
Stress Range <i>Cross Flow</i>	S _{CF}	1.51E+08	Pa
Stress amplitude <i>in-line</i> dan <i>cross-flow</i>	A _{IL/CF}	8.55E+08	Pa
Environment stress akibat beban gelombang	σ _{FM}	1.27E+06	Pa
Environment stress <i>in-line</i>	σ _{E, IL}	3.14E+07	Pa

Sehingga, besarnya *Environmental Stress* adalah

$$\sigma_{E,IL} = 3.14E + 07 \text{ Pa}$$

b. Arah *Cross-Flow*

Persamaan *Environmental Stress* Arah *Cross-Flow*

$$\sigma_E = \frac{1}{2} S_{CF}$$

Karena nilai *stress range* arah *cross-flow* (S_{CF}) adalah $1.51E+08$ Pa, maka besarnya *environmental stress* arah *cross-flow* adalah

$$\sigma_{E,CF} = 7.53E + 07 \text{ Pa}$$

G.3 Bending Moment

1. Bending Moment Akibat Beban Fungsional

$$M_F = \frac{W_{sub} L^2}{8}$$

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Beban defleksi yang diterima	q (W_{sub})	909.79	N
Panjang <i>free span</i>	L	11	m
Bending moment akibat beban fungsional	M_F	13760.58	Nm

2. Bending Moment Gerakan Vertikal dan Horizontal

a. Bending Moment Gerakan Vertikal (*Cross Flow*)

$$M_{E,CF} = \sigma_E \frac{2I_{steel}}{D_0 - t}$$

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Environmental stress cross flow	$\sigma_{E,CF}$	$7.53E+07$	Pa
Moment inersia baja (<i>steel</i>)	I	$8.82E-05$	m ⁴
Outside diameter	D_0	0.27	m
Tebal dinding pipa	t	0.0127	m
Bending moment <i>cross flow</i>	$M_{E,CF}$	51060.38	Nm

b. Bending Moment Arah Horizontal (*In-Line*)

$$M_{E,IL} = \sigma_E \frac{2I_{steel}}{D_0 - t}$$

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Environmental stress <i>in line</i>	$\sigma_{E,IL}$	3.14E+07	Pa
Moment inersia baja (<i>steel</i>)	I	8.82E-05	m ⁴
Outside diameter	D ₀	0.27	m
Tebal dinding pipa	t	0.0127	m
Bending moment <i>in line</i>	M _{E,IL}	21281.46	Nm

3. Bending Moment Total

a. Faktor-faktor akibat beban kombinasi

Tabel G.1 Faktor Kondisi Beban

Condition	γ_c
Pipeline resting on uneven seabed	1.07
Reeling on and J-tube pull-in	0.82
System pressure test	0.93
Otherwise	1.00

Tabel G.2 Faktor pembebanan untuk kombinasi beban

Limit State / Load combination	Load effect combination		Functional loads ¹⁾	Environmental load	Interference loads	Accidental loads
			γ_F	γ_E	γ_F	γ_A
ULS	a	System check ²⁾	1.2	0.7		
	b	Local check	1.1	1.3	1.1	
FLS	c		1.0	1.0	1.0	
ALS	d		1.0	1.0	1.0	1.0

1) If the functional load effect reduces the combined load effects, γ_F shall be taken as 1/1.1.
2) This load effect factor combination shall only be checked when system effects are present, i.e. when the major part of the pipeline is exposed to the same functional load. This will typically only apply to pipeline installation.

b. Design Effective Axial Force

$$S_{Sd} = S_{eff} \gamma_F \gamma_C$$

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Gaya aksial efektif	S _{eff}	-6.47E+05	N
Faktor pembebanan functional loads	γ_F	1.1	
Faktor pengaruh kondisi beban	γ_C	1.07	
Design efektif axial force	S _{Sd}	-761807.12	N

c. Resultan Bending Moment

$$M_{Sd} = \sqrt{\left((M_F \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C) + (M_{E,CF} \cdot \gamma_E) \right)^2 + (M_{E,IL} \cdot \gamma_E)^2}$$

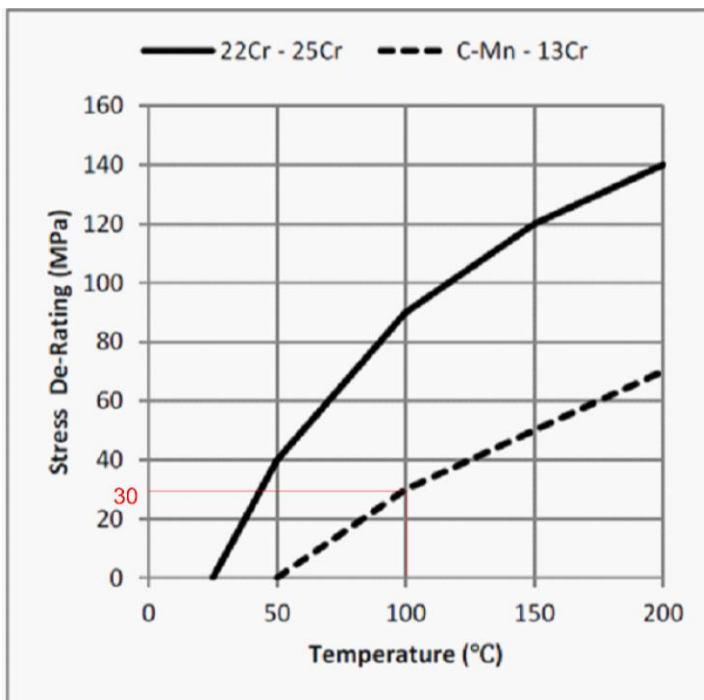
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Bending moment akibat beban fungsional	M_F	13760.58	Nm
Faktor pembebanan functional loads	γ_F	1.1	
Faktor pengaruh kondisi beban	γ_C	1.07	
Bending moment <i>cross flow</i>	$M_{E,CF}$	51060.38	Nm
Bending moment <i>in line</i>	$M_{E,IL}$	21281.46	Nm
Faktor pembebanan beban lingkungan	γ_E	1.3	
Resultan bending moment	M_{Sd}	87086.06	Nm

LAMPIRAN H
CEK ULS
(ULTIMATE LIMIT STATE)

LAMPIRAN H
CEK ULS (*ULTIMATE LIMIT STATE*)

H.1 Denote Plastic Capacities

Untuk mendapatkan nilai de-rating tegangan *yield* dan tarik, maka temperatur yang digunakan adalah temperature kekuatan pipa yaitu 100°C.



Gambar H.1 Grafik Nilai De-Rating *Yield* dan *Ultimate*

Berikut merupakan persamaan serta parameter dan hasil perhitungan tegangan *yield* dan tegangan *ultimate*.

$$f_y = (SMYS - f_{y,temp})\alpha_U$$

$$f_u = (SMTS - f_{u,temp})\alpha_U$$

Tabel G.1 Faktor Kekuatan Material

<i>Factor</i>	<i>Normally</i>	<i>Supplementary requirememnt U</i>
α_U	0.96	1.00

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Faktor kekuatan material	α_U	1	
Specified Minimum Yield Stress	SMYS	450	MPa
		4.50E+08	Pa
Specified Minimum Tensile Strength	SMTS	535	MPa
		5.35E+08	Pa
Derating pada tegangan yield	$f_{y,temp}$	3.00E+07	Pa
Derating pada tegangan tarik	$f_{u,temp}$	3.00E+07	Pa
Tegangan yield	f_y	4.20E+08	Pa
Tegangan tarik	f_u	5.05E+08	Pa

Sehingga, besarnya denote plastic capacities adalah:

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

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

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter luar pipa	D_0	0.27	m
Tebal dinding pipa	t	0.0127	m
Plastic axial force resistance	S_p	4362751.4	N
Plastic moment resistance	M_p	361549.84	Nm

H.2 Parameter Pada Beban Kombinasi (*Load Controlled Condition*)

a. Parameter aliran tegangan

$$\alpha_c = (1 - \beta) + \beta \cdot \frac{f_u}{f_y}$$

Dimana
$$\beta = \frac{60 - D/t_2}{90}$$

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Yield stress yang digunakan pada design	f_y	4.20E+08	Pa
Tensile strength yang digunakan pada design	f_u	5.05E+08	Pa
Faktor kriteria kombinasi beban	β	0.428	
Parameter aliran tegangan	α_c	1.087	

b. Faktor tekanan pada beban kombinasi

$$\alpha_p = \begin{cases} 1 - \beta & \frac{p_i - p_e}{p_b} < \frac{2}{3} \\ 1 - 3\beta \left(1 - \frac{p_i - p_e}{p_b}\right) & \frac{p_i - p_e}{p_b} \geq \frac{2}{3} \end{cases}$$

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tekanan internal	P_i	1.10E+07	Pa
Tekanan eksternal	P_e	8.08E+05	Pa
Tekanan burst	P_b	4.73E+07	Pa
Faktor pada combined loading criteria	β	0.428	
Faktor tekanan pada beban kombinasi	α_p	0.572	

Jika $\frac{p_i - p_e}{p_b} = 0.216$ ($\frac{p_i - p_e}{p_b} < \frac{2}{3}$), maka

$$\alpha_p = 1 - \beta = 0.572$$

H.3 Cek ULS (*Ultimate Limit State*)

Tabel H.2 Faktor Tahanan Material

<i>Limit state category</i> ¹⁾	<i>SLS/ULS/ALS</i>	<i>FLS</i>
γ_m	1.15	1.00
1) The limit states (SLS, ULS, ALS and FLS) are defined in D.		

Tabel H.3 Faktor Keamanan *Resistance*

<i>Safety class</i>	γ_{sc}		
	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>
Pressure containment ¹⁾	1.046 ^{2),3)}	1.138	1.308 ⁴⁾
Other	1.04	1.14	1.26
1) The number of significant digits is given in order to comply with the ISO usage factors. 2) Safety class low will be governed by the system pressure test which is required to be 3% above the incidental pressure. Hence, for operation in safety class low, the resistance factor will effectively be minimum 3% higher. 3) For system pressure test, α_T shall be equal to 1.00, which gives an allowable hoop stress of 96% of SMYS both for materials fulfilling supplementary requirement U and those not. 4) For parts of pipelines in location class 1, resistance safety class medium may be applied (1.138).			

Berikut merupakan persamaan untuk mengecek kriteria ULS:

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{Sd}(P_i)}{\alpha_c S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p \cdot \frac{p_i - p_e}{\alpha_c p_b(t_2)} \right)^2 \leq 1$$

Persamaan tersebut digunakan jika $15 \leq D/t_2 \leq 45$, $P_i > P_e$, $|S_{Sd}|/S_p < 0.4$

Berikut merupakan parameter serta hasil perhitungan untuk mengecek *Local Buckling* telah memenuhi kriteria ULS atau tidak.

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Faktor tahanan material	γ_m	1.15	
Faktor keamanan <i>resistance</i>	γ_{SC}	1.26	
Resultan bending moment	M_{Sd}	8.71E+04	Nm
Parameter aliran tegangan	α_c	1.087	
Plastic moment resistance	M_p	3.62E+05	Nm
Tebal dinding pipa	t_2	0.0127	m
Design efective axial force	S_{Sd}	-7.62E+05	N
Tekanan internal	P_i	1.10E+07	Pa
Plastic axial force resistance	S_p	4.36E+06	N
Faktor tekanan pada beban kombinasi	α_p	0.572	
Tekanan eksternal	P_e	8.08E+05	Pa
Tekanan bursting	P_b	4.73E+07	Pa
Unity Check	UC	0.141	≤ 1

LAMPIRAN I

TEGANGAN *VON MISES* DAN

PANJANG SPAN YANG DIJINKAN

LAMPIRAN I
TEGANGAN VON MISES DAN PANJANG SPAN YANG DIJINKAN

I.1 Tegangan Von Mises

a. Hoop Stress

$$\sigma_h = (p_i - p_e) \frac{D_0}{2t}$$

Tabel I.1 Hoop Stress

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tekanan internal	P _i	1.10E+07	Pa
Tekanan eksternal	P _e	8.08E+05	Pa
Diameter luar pipa	D ₀	0.27	m
Tebal dinding pipa	t	0.0127	m
Hoop Stress	σ _h	1.10E+08	Pa

b. Longitudinal Stress

$$\sigma_L = \frac{PD_0}{4t}$$

Tabel I.2 Longitudinal Stress

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Design Pressure	P	1.10E+07	Pa
Diameter luar pipa	D ₀	0.27	m
Tebal dinding pipa	t	0.0127	m
Longitudinal Stress	σ _L	5.10E+07	Pa

c. Von Mises Stress

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_h^2 - \sigma_L \sigma_h + 3\tau^2}$$

Tabel I.3 Von Mises Stress

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Longitudinal stress	σ _L	5.10E+07	Pa
Hoop Stress	σ _h	1.10E+08	Pa
Tangensial Shear Stress	τ	0	Pa
Von Mises Stress	σ _{eq}	9.50E+07	Pa

I.2 Tegangan *Buckling* Kritis

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{steel}}{A_s L^2}$$

Tabel I.4 Tegangan *Buckling* Kritis

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Young's Modulus	E	207000	MPa
		2.07E+11	Pa
Moment inersia baja	I_{steel}	8.82E-05	m ⁴
<i>Cross Section Area</i> Pipa	A_s	0.01	m ²
Panjang <i>free span</i>	L	11	m
Tegangan <i>buckling</i> kritis	σ_{cr}	1.43E+08	Pa

I.3 Perbandingan Tegangan *Von Mises* dengan *Buckling* Kritis

Tabel I.5 Perbandingan Tegangan *Von Mises* dengan *Buckling* Kritis

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Panjang <i>free span</i>	L	11	m
Von Mises Stress	σ_{eq} (manual)	9.50E+07	Pa
	σ_{eq} (software)	9.80E+07	Pa
Tegangan <i>buckling</i> kritis	σ_{cr}	1.43E+08	Pa
Cek		Memenuhi	

I.4 Panjang *Span* yang Diijinkan

Panjang *span* maksimum yang diijinkan didapatkan dengan membandingkan hasil *screening* frekuensi natural pipa dan cek ULS yang telah disertai dengan pengecekan tegangan. Untuk pengecekan yang hasilnya “MEMENUHI” merupakan panjang *span* yang memiliki nilai UC (*Unity Check*) kurang dari 1 dan nilai tegangan ekuivalen kurang dari nilai tegangan *buckling* kritis.

Tabel I.6 Panjang *Span* Maksimum Kondisi ULS

Panjang <i>Span</i>	UC	σ_{eq} (Pa)	σ_{cr} (Pa)	Cek
11	0.141	9.50E+07	1.43E+08	MEMENUHI
11.5	0.129	1.14E+08	1.31E+08	MEMENUHI
12	0.119	1.11E+08	1.20E+08	MEMENUHI

Panjang Span	UC	σ_{eq} (Pa)	σ_{cr} (Pa)	Cek
12.5	0.111	1.09E+08	1.11E+08	MEMENUHI
13	0.105	1.07E+08	1.03E+08	TIDAK MEMENUHI
13.5	0.100	9.52E+07	1.06E+08	TIDAK MEMENUHI
14	0.097	1.05E+08	8.85E+07	TIDAK MEMENUHI
14.5	0.094	1.04E+08	8.25E+07	TIDAK MEMENUHI

Panjang span maksimum yang diijinkan merupakan panjang span yang terpendek.

Tabel I.7 merupakan perbandingan dari panjang span maksimum yang diijinkan.

Tabel I.8 Panjang *Span* Maksimum Yang Diijinkan

Parameter	Screening Frekuensi Natural		Cek ULS	Hasil
	<i>In-Line</i>	<i>Cross-Flow</i>		
L (m)	11	14.5	12.5	11

LAMPIRAN J

PEMODELAN DAN TEGANGAN
***VON MISES* SOFTWARE**

LAMPIRAN J

PEMODELAN DAN TEGANGAN VON MISES SOFTWARE

J.1 Input Data

a. General Model Options

The screenshot shows the 'General Model Options' dialog box. The 'Project ID' is 'FREESPAN'. 'Prepared by' is 'NOVIA'. 'Piping Code' is 'B31.8 Offshore' and 'Edition' is '2016'. 'Use Appendix P (B31.3)' is unchecked. 'Lifetime (hrs)' is empty. 'SIF basis for General piping' is empty. 'Units file name - Input' and 'Output' are both 'SI'. 'Vertical axis direction' is 'Y-axis'. 'Number of thermal/pressure cases' is '1' and 'Ambient temperature' is '22.5'. 'Libraries - Component' is 'AUTOPIPE' and 'Material' is 'B318-16'. Buttons for 'OK', 'Cancel', and 'Help' are at the bottom right.

b. Pipe Properties

The screenshot shows the 'Pipe Properties' dialog box. 'Pipe Identifier' is '10\"STD'. 'Nominal Diameter' is '250', 'Actual O.D.' is '273.0500', 'Corrosion Allow' is '3.000', 'Insul thickness' is '16.75', 'Clad thickness' is '0.00', 'Lining thickness' is '0.00'. 'Schedule' is 'NS', 'Wall thickness' is '12.700', 'Mill tolerance' is '1.587', 'Insul material' is 'Other', 'Insul density' is '0.00', 'Clad material' is empty, 'Clad density' is empty, 'Lining density' is empty. 'Line Class' is empty. 'Specific gravity of contents' is '0.059' and 'Suppress low temp warnings' is unchecked. 'Pipe Material' is 'NS', 'Composition' is empty. 'Long weld fac ZL' is empty, 'Circ weld fac ZC' is empty. 'Long modulus' is '0.20330', 'Hoop modulus' is '0.20330', 'Shear modulus' is '0.07820', 'Minimum yield' is '448.16', 'Density' is '7833.0', and 'Poisson's ratio' is '0.3000'. Buttons for 'OK', 'Cancel', and 'Help' are at the bottom right.

c. Operating Pressure & Temperature

Operating Pressure & Temperature

Current point : A00

Select cases: 1 to 1

Case number - Auto 1 Auto Auto Auto Auto

Pressure : 11.0040

Temperature : 13.00

Expansion : 0.000

Hot modulus : 0.20700

Apply only blue changes :

OK Cancel Help

d. Anchor

Anchor

Point Name : A00

Tag No. : 001

Anchor type : Rigid

Trans. stiff. - X: Rigid Y: Rigid Z: Rigid

Rot. stiff. - X: Rigid Y: Rigid Z: Rigid

Release for hanger selection - X: Y: Z:
RX: RY: RZ:

Thermal anchor movements:

Select cases: 1 to 1

	DX	DY	DZ	RX	RY	RZ
T1 :	132.640	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Report Anchor Results to AutoPIPE Nozzle/AutoPIPE Vessel:

OK Cancel Help

e. Support

Support

Support ID : A00 1

Tag No. :

Attachment ID :

Point Name : A00 Connected to : Ground

Support type : V-stop

Component Weight : 0.00

Bi-Direction : Rod Hanger : Shoe :

Gap below pipe : 0.000

Gap above pipe : 1000.000

Friction coefficient : 0.200

Gaps setting : Weightless

OK Cancel Help

J.2 Pembebanan

a. Bouyancy

Bouyancy ? X

Water surface elevation :

Specific gravity of water :

Added mass coeff (Ca) :

Wind exposure factor :

Apply buoyancy to all segments :

OK Cancel Help

b. Current

Wave Load ? X

Wave data name :

Wave type : Load case :

Water - Elev. : Depth :

Water density : Phase :

Wave - Height : Period :

Coef. - Drag : Inertia :

Direction - DX: DY: DZ:

Water Depth	Current Velocity	Marine Growth
<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="670.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
<input type="text" value="11400.00"/>	<input type="text" value="650.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
<input type="text" value="28500.00"/>	<input type="text" value="620.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
<input type="text" value="45600.00"/>	<input type="text" value="550.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
<input type="text" value="57000.00"/>	<input type="text" value="450.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>

OK Cancel Help

Wave Load ? X

Wave data name :

Wave type : Load case :

Water - Elev. : Depth :

Water density : Phase :

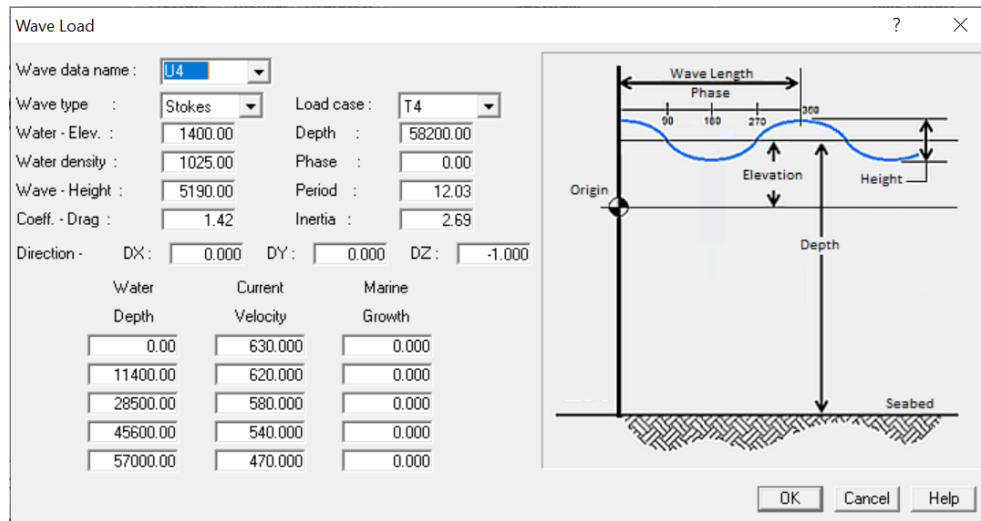
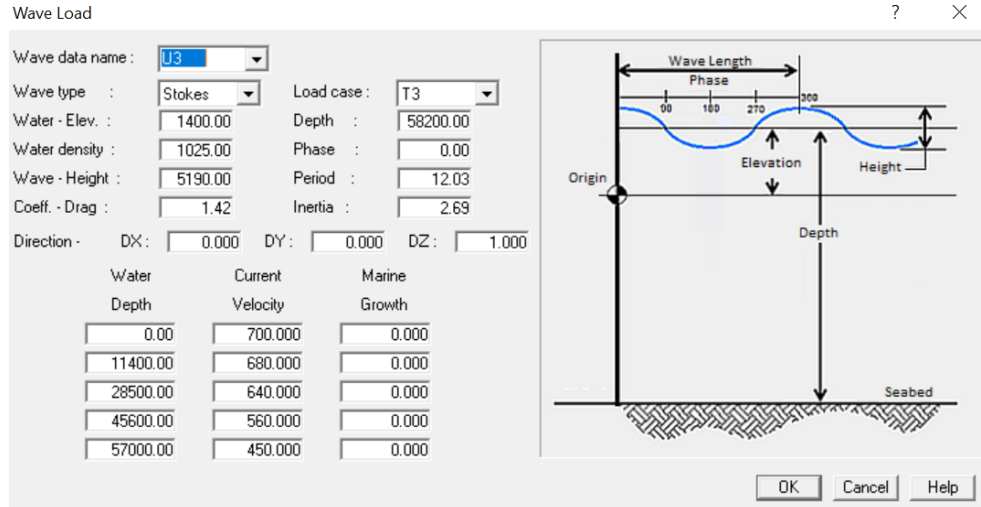
Wave - Height : Period :

Coef. - Drag : Inertia :

Direction - DX: DY: DZ:

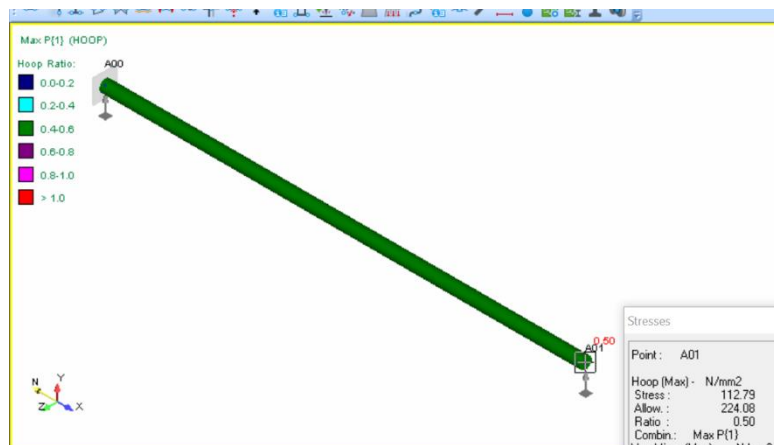
Water Depth	Current Velocity	Marine Growth
<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="700.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
<input type="text" value="11400.00"/>	<input type="text" value="680.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
<input type="text" value="28500.00"/>	<input type="text" value="660.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
<input type="text" value="45600.00"/>	<input type="text" value="590.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
<input type="text" value="57000.00"/>	<input type="text" value="490.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>

OK Cancel Help

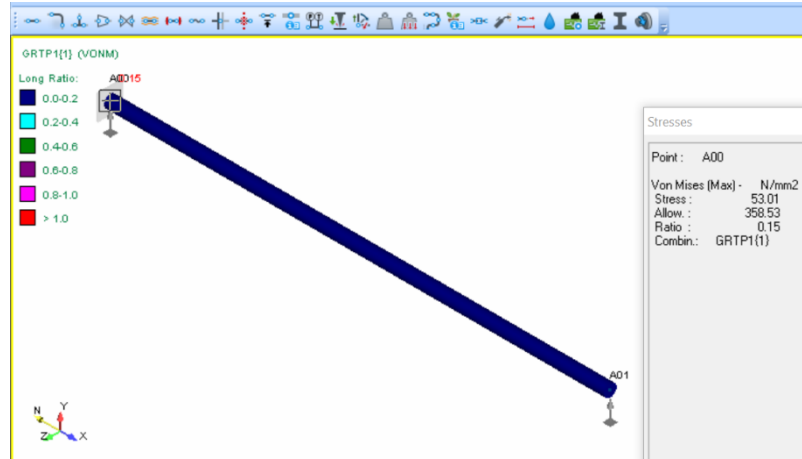


J.3 Analisis Hasil

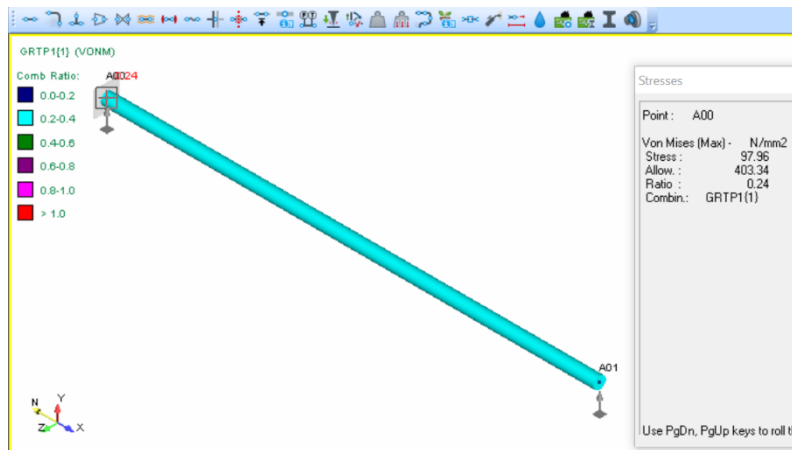
a. Tegangan Hoop



b. Tegangan Longitudinal



c. Tegangan Von Mises



J.3 Hasil Running

```

-----
Freespan
07/22/2019 FREESPAN
06:11 PM
Advanced 11.01.00.17
BENTLEY
AutoPIPE
-----

```

```

*
***
** **
*****
** **
*****
** **
*****
**
**
*****
**
**
*****
**

```

Pipe Stress Analysis and Design Program

Version: 11.01.00.17

Edition: Advanced
Developed and Maintained by
BENTLEY SYSTEMS, INCORPORATED
1600 Riviera Ave., Suite 300
Walnut Creek, CA 94596

Freespan
07/22/2019 FREESPAN
06:11 PM
Advanced 11.01.00.17

BENTLEY
AutoPIPE

**
** AUTOPIPE SYSTEM INFORMATION **
**

SYSTEM NAME : Freespan

PROJECT ID : FREESPAN

PREPARED BY : _____
NOVIA

CHECKED BY : _____

1ST APPROVER : _____

2ND APPROVER : _____

PIPING CODE : B31.8 Offshore
YEAR : 2016
VERTICAL AXIS : Y
AMBIENT TEMPERATURE : 22.5 deg C
COMPONENT LIBRARY : AUTOPIPE
MATERIAL LIBRARY : B318-16
MODEL REVISION NUMBER : 21

Freespan
07/22/2019 FREESPAN
06:11 PM
Advanced 11.01.00.17

BENTLEY
AutoPIPE

TABLE OF CONTENTS

Analysis Summary.....	1
General Stress.....	6
Code Compliance.....	7
Result Summary.....	8

Freespan
07/22/2019 FREESPAN

BENTLEY

 A N A L Y S I S S U M M A R Y

Current model revision number : 21

Constant values used

Acceleration due to gravity..... 9814.55985 mm/s2
 Density of water for specific gravity Cal.. 999.552 kg/m3
 Density of sea water..... 999.552 kg/m3
 Density of ground water 999.552 kg/m3

Static - Analysis set number 1
 Date and Time of analysis Jul 22, 2019 6:00 PM
 Model Revision Number 21
 Number of load cases 3
 Load cases analyzed GR T1 P1
 Description Analysis Set No.1
 Gaps/Friction/Soil considered Yes
 Tolerance - Force, Displacement 44.48 N 0.0254 mm
 Friction - Scale Factor, Tolerance ... 1.00 0.10
 Ignore friction for cases E1,E2,E3 Yes
 Ignore friction for gravity case Yes
 Hanger design run No
 Cut short included No
 Thermal bowing included No
 Include Bourdon rotational effect No
 Pipe radius for Bourdon calculation ... Mean
 Occasional load analysis type Nonlinear
 Non-linear analysis summary file Freespan.LOG
 Use default load sequence Yes
 Base load cases for nonlinear analysis

GR = None
 T1 = GR
 P1 = T1

Weight of contents included Yes
 Fluid density factor for contents 1.00
 Pressure stiffening case None
 Hot modulus case None
 Pressure Extension..... Yes
 Water elevation for buoyancy loads ... 58200.00 mm
 Specific gravity of water 1.025
 Apply buoyancy to all segments Yes
 Use corroded thickness in analysis ... No
 Rigid stiffness factor 1000.0
 Support rigid stiffness (translation) . 0.175100E+10 N/mm
 Support rigid stiffness (rotation) ... 0.135582E+11 N.m/deg
 Anchor rigid stiffness (translation) .. 0.175100E+10 N/mm
 Anchor rigid stiffness (rotation) 0.135582E+11 N.m/deg
 Remove Lift-Off Supports No

 CODE COMPLIANCE COMBINATIONS

<Description> Allowable Combination (N/mm2) D/A/P/C	Category	Method	Case/Combination	Factor M/S	K-Factor
Max P{1} Automatic Y Y Y Y	Hoop	Sum	Max Hoop	1.00	
GRTP1{1} Automatic Y N Y Y	Von Mises	Sum	Max Long	1.00	
			Max Hoop GR[1]	1.00 1.00	

T1[1] 1.00
P1[1] 1.00

Notes:

D/A/P/C: [D]efault/[A]uto-Update/[P]rint options/[C]onsistent (Y=Yes, N=No)

Freespan
07/22/2019 FREESPAN
06:11 PM
RESULT PAGE 3
BENTLEY
AutoPIPE Advanced 11.01.00.17

NON-CODE COMBINATIONS

<Description> Combination	Method	Case/Combination	Factor	D/A/P/C
Gravity{1}	Sum	GR[1]	1.00	Y Y Y Y
<13.00 deg C> Thermal 1{1}	Sum	T1[1]	1.00	Y Y Y N
Pressure 1{1}	Sum	P1[1]	1.00	Y Y Y N
GT1{1}	Sum	GR[1] T1[1]	1.00 1.00	Y Y Y Y
GT1P1{1}	Sum	GR[1] T1[1] P1[1]	1.00 1.00 1.00	Y Y Y Y

Notes:

D/A/P/C: [D]efault/[A]uto-Update/[P]rint options/[C]onsistent (Y=Yes, N=No)

Freespan
07/22/2019 FREESPAN
06:11 PM
RESULT PAGE 4
BENTLEY
AutoPIPE Advanced 11.01.00.17

CODE COMPLIANCE

Y - Factor 0.00
Weld efficiency factor Ej..... 1.00
Range reduction factor 1.00
Design Pressure Factor 1.00
Hoop stress design factor - F1.... 0.50
Longitudinal design factor - F2.... 0.80
Combined stress design factor - F3.... 0.90
Minimum stress ratio used in reports... 0.00
Number of stress points per span 0
Include corrosion in stress calcs. N
Include axial force in code stress Y
Set sustained SIF=1 no bends N
Set sustained/occasional SIF = 1 N
Set sustained/occasional SIF = 0.75i .. N
Apply cold/hot modulus ratio N
Disable auto code combinations N
Disable auto non-code combinations N
No. of thermal ranges to report 0
Include Max Range combination N
Total stress Maximum shear
Direct shear None
Longitudinal pressure calculation AxF/area

Freespan
07/22/2019 FREESPAN
BENTLEY

WAVE LOAD : U1

Wave Type : Stokes Load case : Thermal 1

Depth (d) : 58200.00000 mm
 Height (H) : 5190.00000 mm
 Period (T) : 12.03000 s
 Length (L) : 213301.125 mm

Plot parameters for wave theory regions (Shore Protection Manual,1977)
 X= d/(g*T**2) : 0.04098 (0.0155 < Transitional water < 0.0792)
 Y= H/(g*T**2) : 0.00365
 H/d : 0.08918 (Breaking limit: H/d=0.78)
 L**2*H/d**3 : 1.19780 (Max=26 for Airy and Stokes)

GENERAL PIPE STRESS REPORT
 (Stress in N/mm2)

Point name	Load combination	Hoop	Longitudinal		Shear Stress	Principal		Total Stress	Loc
		Stress	Max	Min		Max	Min		
*** Segment A begin ***									
A00	SIFI= 1.00 SIFO= 1.00								
	Gravity{1}	0.00	1.97	-1.97	0.00	1.97	-1.97	0.98	0
	Thermal 1{1}	0.00	0.01	-0.03	0.00	0.01	-0.03	0.01	180
	Pressure 1{1}	118.29	51.03	51.03	0.00	118.29	51.03	59.15	270
	GT1{1}	0.00	1.98	-2.00	0.00	1.98	-2.00	1.00	180
	GT1P1{1}	118.29	53.01	49.03	0.00	118.29	49.03	59.15	0
A01	SIFI= 1.00 SIFO= 1.00								
	Gravity{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	270
	Thermal 1{1}	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.01	0.00	270
	Pressure 1{1}	118.29	51.03	51.03	0.00	118.29	51.03	59.15	270
	GT1{1}	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.01	0.00	270
	GT1P1{1}	118.29	51.02	51.02	0.00	118.29	51.02	59.15	270
*** Segment A end ***									

B31.8 Offshore (2016) CODE COMPLIANCE
 (Moments in N.m) (Stress in N/mm2)

Point name	Load combination	In-Pl.	Out-Pl.	Shear Stress	CODE COMPLIANCE		Code Stress	Code Allow.
		Moment	Moment		Axial Stress	Bending Stress Type		
A00	SIFI= 1.00 SIFO= 1.00							
	Max P{1}						HOOP	112.79 224.08
	GRTPl{1}	1285.07	0.00	0.00	51.02	1.99	COMB	97.96 403.34
					51.02	1.99	LONG	53.01 358.53
A01	SIFI= 1.00 SIFO= 1.00							
	Max P{1}						HOOP	112.79 224.08
	GRTPl{1}	0.00	0.00	0.00	51.02	0.00	COMB	97.83 403.34
					51.02	0.00	LONG	51.02 358.53

*** NOTE: Combined stress is based on reduced thickness as per ***
*** Table A842.22 of ASME B31.8 piping code. ***

Freespan
07/22/2019 FREESPAN
06:11 PM
RESULT PAGE 8

BENTLEY
AutoPIPE Advanced 11.01.00.17

R E S U L T S U M M A R Y

Maximum Hoop stress

Point : A00
Stress N/mm2 : 112.79
Allowable N/mm2 : 224.08
Ratio : 0.50
Load combination : Max P{1}

Maximum Longitudinal stress

Point : A00
Stress N/mm2 : 53.01
Allowable N/mm2 : 358.53
Ratio : 0.15
Load combination : GRTP1{1}

Maximum Combined stress

Point : A00
Stress N/mm2 : 97.96
Allowable N/mm2 : 403.34
Ratio : 0.24
Load combination : GRTP1{1}

Freespan
07/22/2019 FREESPAN
06:11 PM
RESULT PAGE 9

BENTLEY
AutoPIPE Advanced 11.01.00.17

R E S U L T S U M M A R Y

Maximum Hoop stress ratio

Point : A00
Stress N/mm2 : 112.79
Allowable N/mm2 : 224.08
Ratio : 0.50
Load combination : Max P{1}

Maximum Longitudinal stress ratio

Point : A00
Stress N/mm2 : 53.01
Allowable N/mm2 : 358.53
Ratio : 0.15
Load combination : GRTP1{1}

Maximum Combined stress ratio

Point : A00
Stress N/mm2 : 97.96
Allowable N/mm2 : 403.34
Ratio : 0.24
Load combination : GRTP1{1}

* * * The system satisfies B31.8 Offshore (2016) code requirements * * *
* * * for the selected options

BIODATA PENULIS



Novia Candra Wahyuni dilahirkan di Banyuwangi, 26 April 1996, merupakan anak pertama dari satu bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Dharmawanita Temurejo-Bangorejo, SDN 2 Temurejo, SMPN 1 Purwoharjo dan SMAN 1 Purwoharjo. Setelah lulus dari SMAN tahun 2015, Penulis mengikuti SNMPTN dan diterima di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya pada tahun 2015 dan terdaftar dengan NRP.

04311540000067. Selama empat tahun menjadi mahasiswa, penulis banyak mengikuti kegiatan kemahasiswaan. Pada tahun kedua penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan sebagai Staff Departemen Inovasi Karya dan aktif di Lembaga Dakwah Jurusan sebagai Staff di Departemen Kemuslimahan. Pada tahun ketiga, penulis menjadi panitia *Big Event* Departemen Teknik Kelautan yaitu OCEANO serta Penulis aktif di Lembaga Dakwah Jurusan sebagai Staff Ahli di Departemen Kaderisasi. Pada tahun ketiga, penulis pernah melakukan kerja praktek di PT. RINA Indonesia periode Juni-Agustus 2018 yang berlokasi di Jakarta Pusat. Selama kerja praktek di PT RINA Indonesia, penulis belajar mengenai klasifikasi dan pengecekan struktur kapal. Pada tahun keempat penulis memilih fokus untuk mengerjakan Tugas Akhir mengenai kekuatan struktur *free span* pipa bawah laut. Untuk detail informasi mengenai Tugas Akhir tersebut dapat menghubungi penulis melalui kontak dibawah ini.

Kontak Penulis

E-mail : noviacandra1@gmail.com