



TUGAS AKHIR - MO184804

**PENGARUH *FREESPAN* TERHADAP *ON-BOTTOM STABILITY* PIPA
BAWAH LAUT. STUDI KASUS : *PIPELINE BE-BA* PERTAMINA HULU
MAHAKAM, LAPANGAN BEKAPAI**

Adam Rangga Driyastomo

NRP. 04311640000086

Dosen Pembimbing :

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

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

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknolgi Sepuluh Nopember

Surabaya

2020



FINAL PROJECT (MO 184804)

The Influence of Free Span On On-Bottom Stability

Subsea Pipelines. Case Study : BE-BA Pipeline Pertamina

Hulu Mahakam, Bekapai Field

ADAM RANGGA DRIYASTOMO

NRP. 0431164000086

SUPERVISORS :

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

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

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY

SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY

SURABAYA

2020

LEMBAR PENGESAHAN
**PENGARUH FREE SPAN TERHADAP ON-BOTTOM STABILITY. STUDI
KASUS : PIPELINE BE-BA PERTAMINA HULU MAHAKAM,
LAPANGAN BEKAPAI**

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 Surabaya

Oleh:

ADAM RANGGA DRIYASTOMO

NRP. 04311640000086

Disetujui Oleh:

1. Ir. Imam Rochani, M.Sc

(Pembimbing 1)



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

(Pembimbing 2)



3. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D

(Penguji 1)



4. Dr. Dendy Satrio, S. ST.

(Penguji 2)



SURABAYA, JULY 2020

**PENGARUH *FREE SPAN* TERHADAP *ON-BOTTOM STABILITY* PIPA BAWAH
LAUT. STUDI KASUS : *PIPELINE* BE-BA PERTAMINA HULU MAHAKAM,
LAPANGAN BEKAPAI**

Nama Mahasiswa : Adam Rangga Driyastomo
NRP : 04311640000086
Departemen : Teknik Kelautan FTK ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Imam Rochani, M. Sc
Nur Syahroni, S. T., M. T., Ph. D.

ABSTRAK

Sistem perpipaan bawah laut memiliki salah satu masalah yang sangat dihindarkan, ialah *free span*. *Free span* dapat menjadi sangat rentan, bahkan salah satu penyebab kerusakan struktur pada sistem perpipaan itu sendiri. Kegagalan tersebut bisa disebabkan oleh *vortex induced vibration* (VIV). VIV sendiri disebabkan oleh beban lingkungan yang utamanya ialah gelombang dan arus. Dalam tugas akhir ini, analisis *pipeline* yang mengalami *free span* dimulai dari stabilitas lateral dan stabilitas vertical pada *pipeline* itu sendiri yang mana mengacu kepada DNV RP F 109, *screening criteria* VIV dan *screening criteria ultimate limit state*, sampai dengan analisis tegangan kombinasi pada *pipeline* tersebut yang mengalami *free span*. Dalam tugas akhir ini, selain menganalisis stabilitas *free span*, diharapkan juga mendapatkan hasil yang sesuai tentang analisis dinamis dan *ultimate limit state*. Berdasarkan perhitungan-perhitungan tersebut tugas akhir ini diharapkan akan mendapatkan hasil akhir dari tegangan-tegangan, seperti tegangan *hoop*, tegangan *longitudinal*, sampai tegangan kombinasi. Hasil dari tegangan-tegangan tersebut harus sesuai dengan *standart* ASME B 31.8. Adapun acuan selain DNV RP F 109 dan ASME B31.8, yaitu DNV OS F 101 dan juga DNV RP F 105 dalam melakukan analisis tugas akhir ini.

Kata Kunci : *Subsea Pipeline, On-Bottom Stability, Free span, Vortex Induced Vibration, VIV,*

The Influence of Free Span On On-Bottom Stability Subsea Pipelines. Case Study : BE-BA Pipeline Pertamina Hulu Mahakam, Bekapai Field

Name : Adam Rangga Driyastomo
Reg. : 0431164000086
Departement : Teknik Kelautan FTK ITS
Supervisors : Ir. Imam Rochani, M. Sc
Nur Syahroni, S. T., M. T., Ph. D.

ABSTRACT

Subsea Pipeline system has one problem that is very much avoided, which is free span. Free span can be very vulnerable, even one of the causes of structural damage to the pipeline system itself. This failure can be caused by vortex induced vibration (VIV). VIV itself is caused by environmental loads, mainly waves and currents. In this final project, analysis of pipelines that experience free span starts from lateral stability and vertical stability of the pipeline itself which refers to DNV RP F 109, screening criteria for VIV and screening criteria for ultimate limit state, up to the combined stress analysis on the pipeline which experience free span. In this final project, apart from analyzing the stability of the free span, it is also expected to obtain appropriate results regarding dynamic analysis and ultimate limit state. Based on these calculations, it is hoped that this final project will get the final results of stresses, such as hoop stresses, longitudinal stresses, and combined stresses. The results of these stresses must be in accordance with the ASME B 31.8 standard. As for the references besides DNV RP F 109 and ASME B31.8, namely DNV OS F 101 and also DNV RP F 105 in conducting the analysis of this final project.

Kata Kunci : *Subsea Pipeline, On-Bottom Stability, Free span, Vortex Induced Vibration, VIV,*

KATA PENGANTAR

Puji syukur dipanjatkan oleh penulis kepada Allah SWT karena-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan penelitian tugas akhir dengan sebaik-baiknya

Penulis ingin mengucapkan banyak sekali terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam bentuk tenaga maupun doa karna dalam penyusunannya penulis banyak mendapat bantuan serta pengarahan terutama kepada Bapak Ir Imam Rochani, M.Sc. sebagai dosen pembimbing pertama dan Bapak Nur Syahroni, S.T.,M.T.,Ph.D sebagai dosen pembimbing kedua. Selain itu masih banyak pihak-pihak yang membantu penulis sehingga dapat menyelesaikan laporan ini.

Penulis sendiri menyadari masih ada kesalahan-kesalahan dan kekurangan dalam menyusun laporan penelitian tugas akhir ini. Penulis berharap kritik dan saran yang membangun yang dapat bermanfaat kedepannya agar penulis dapat melakukan pekerjaan yang jauh lebih baik kedepannya dan agar pembaca juga senang dan mudah mengertinya.

Surabaya, July 2020

Adam Ranga Driyastomo

0431164000086

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian Tugas Akhir ini dapat penulis selesaikan karena dukungan serta bantuan dalam bentuk apapun dari banyak pihak yang terkait. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada banyak pihak terkait yang membantu dalam penyelesaian tugas penelitian tugas akhir ini kepada :

1. Allah SWT karena berkah, rahmat, dan anugerah-Nya yang telah memberikan nikmatnya berupa kesehatan jasmani dan rohani sehingga penulis bisa menyelesaikan penelitian tugas akhir dengan baik
2. Orang tua penulis, Hendri Ristanto dan Tiyas Utami serta adik saya Damar Afdhalash yang selalu ada dalam memberikan dukungan berupa dukungan moral dan materi, serta memberi dukungan saat sedang di rumah maupun saat jauh dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Ir Imam Rochani, M.Sc., dan Bapak Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen pembimbing pertama dan dosen pembimbing kedua saya yang selalu memberikan *insight* baru berupa ilmu tentang topik penelitian tugas akhir ini serta bimbingannya selama ini.
4. Seluruh Dosen Karyawan, Tim Tata Usaha dan Administrasi Departemen Teknik Kelautan FTK ITS, yang telah memberikan ilmu, bantuan dan fasilitas kepada penulis sealama menjalani masa perkuliahan di Departemen Teknik Kelautan serta menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Dr. Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc selaku dosen wali yang telah membantu penulis memberikan arahan-arahan selama masa kuliah di Departemen Teknik Kelautan FTK ITS selama ini.
6. Alm. Darta Marina C, S.T, M.T selaku dosen wali dari awal perkuliahan di Departemen Teknik Kelautan
7. Raihan, Abiyyu, Aghi, Dito, Ekky, Ibrahim, Jonathan, Rizqy Jafa, Nugik, Pipo, Ridho, Wimar selaku teman-teman yang dekat dengan penulis jaman kuliah di Surabaya yang senantiasa men-support dalam keadaan apapun dan proses apapun.
8. Teman-teman Arek-arek angkatan 2014, 2015, dan 2017 yang selalu menjadi tempat *sharing* sekaligus tempat menghabiskan waktu bersama dengan aktivitas-aktivitasnya yang kami lakukan selama berkuliah di ITS ini.
9. Kepada teman-teman Pull Tea, Andra, Bogem, Omey, Adhi, Ical, Adam M, Rombeng, Radit, Berry, Cumi, Rory yang selama ini menjadi tempat *sharing* juga dan sebagai tempat bercengkerama di Jakarta selama ini.

10. Kepada teman-teman Borden 8 Jakarta yang senantiasa menjadi salah satu tempat *sharing* selama di rumah dari jaman kecil sampai sekarang.
11. Keluarga besar Adhiwamastya P-56 L-33 yang sudah saling mengenal dan men-*support* dari awal kehadiran penulis di ITS ini.
12. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per-satu yang telah turut berperan dalam penyelesaian tugas akhir ini

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

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR NOTASI.....	xvi
BAB 1	xviii
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	3
1.5 Batasan Masalah	3
BAB II.....	4
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	4
2.1 Tinjauan Pustaka.....	4
2.2 Dasar Teori.....	4
2.2.1 Free Span	4
2.2.2 Dimensi Pipa	5
2.2.3 Berat Pipa Terendam.....	6
2.2.4Kondisi Pembebanan	6
2.2.4.1 Instalasi	6
2.2.5 Beban Lingkungan.....	7

2.2.5.1 Kombinasi beban lingkungan	7
2.2.5.2 Beban Gelombang.....	8
2.2.5.3 Beban Arus.....	8
2.2.6 Spektra JONSWAP	9
2.2.7 Transformasi spectra gelombang	10
2.2.8Kecepatan Arus	11
2.2.9Gaya Hidrodinamis	12
2.2.9.1 Drag Force	12
2.2.9.2 Gaya Lift	13
2.2.9.3 Inertia Force	13
2.2.10 On-Bottom Stability	14
2.2.10.1Stabilitas Vertikal dan Stabilitas Absolut Lateral	14
2.2.11 Massa Efektif	19
2.2.12 Vortex Induced Vibration (VIV)	20
2.2.13 Vortex Shedding Frequency	22
2.2.14.1 Frekuensi Natural Pipa.....	24
2.2.14.2 Panjang Effective Span	27
2.2.19 Tegangan-tegangan pada pipeline.....	37
BAB 3	41
METODE PENELITIAN.....	42
3.1 Skema Diagram Alir	42
3.2 Langkah-Langkah Pengerjaan	44
BAB 4	46
ANALISIS DAN PEMBAHASAN	46
4.1 Analisis Data.....	46
4.1.1 Data Pipeline	47

4.1.2 Data Lingkungan.....	48
4.1.3 Data Tanah.....	49
4.2 Pembahasan.....	50
4.2.1 Analisis Gelombang dan Arus	50
4.2.1.1 Spektra Jonswap.....	50
4.2.1.2 Kecepatan Arus Partikel	56
4.2.2 Perhitungan Berat Terendam dan Massa Efektif pada Pipa.....	57
4.2.3 Kriteria On-Bottom Stability	58
4.2.4 Parameter Vortex Induced Vibration	60
4.2.4.1 Reynold Number	60
4.2.4.2 Parameter Stabilitas	61
4.2.5 Analisa Dinamis Freespan	63
4.2.5.1 Concrete Stiffness Factor (CSF)	64
4.2.5.2 Panjang Span Efektif (L_{eff}).....	65
4.2.5.3 Effective Axial Force (S_{eff}).....	66
4.2.5.4 Critical Buckling (P_{cr}).....	67
4.2.5.5 Defleksi.....	68
4.2.5.6 Frekuensi Vortex Shedding & Frekuensi Natural.....	71
4.2.5.7 Panjang Span Maximum.....	73
4.2.5.8 Kriteria Screening	74
4.2.6 Mitigasi	78
4.2.6.1 Critical Buckling Setelah Mitigasi.....	79
4.2.6.2 Defleksi Setelah Mitigasi.....	79
4.2.6.3 Frekuensi Natural Setelah Mitigasi.....	80
4.2.6.4 Panjang Maksimum Setelah Mitigasi	81
4.2.6.5 Kriteria Screening Setelah Mitigasi	82

4.2.7 Local Buckling.....	88
4.2.8 Tegangan pada Pipeline	89
BAB 5	92
KESIMPULAN DAN SARAN.....	93
5.1 Kesimpulan	93
5.2 Saran	94
DAFTAR PUSTAKA	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Ilustrasi Free Span	4
Gambar 2. 2 <i>Reduced Velocity</i> untuk <i>Osilasi inline</i> (Guo, 2005)	17
Gambar 2. 3 <i>Reduced Velocity</i> untuk <i>Osilasi crossflow</i> (Guo, 2005)	17
Gambar 2. 4 Bentuk Aliran pada Struktur.....	18
Gambar 2. 5 Ilustrasi Vortex Induced Vibration.....	20
Gambar 2. 6 Arah Aliran.....	21
Gambar 2. 7 Hoop Stress.....	37
Gambar 4 .1 Grafik Spektrum Energi JONSWAP	51
Gambar 4 ..2 Grafik Spektrum Kecepatan Partikel.....	55
Gambar 4 .3 Nilai C_y^*	59
Gambar 4 .4 Nilai C_z^*	59
Gambar 4 .5 Bentuk Aliran	61
Gambar 4 .6 Ilustrasi Free Span	63
Gambar 4 .7 Hasil Defleksi FS-02 Dengan Panjang Span 20,2 m.....	69
Gambar 4 .8 Hasil Defleksi FS-03 Dengan Panjang Span 19,5 m.....	69
Gambar 4 .9 Hasil Defleksi FS-07 Dengan Panjang Span 18,0 m.....	70

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kondisi Beban Lingkungan (DNV RP F109, 2010)	8
Tabel 2. 2 Seabed roughness (DNV RP F109, 2010).....	12
Tabel 2. 3 Koefisien Beban Vertikal (DNV RP F109, 2010)	16
Tabel 2. 4 Koefisien Beban Horizontal (DNV RP F109, 2010)	16
Tabel 2. 5 Koefisien Batas (DNV RP F105, 2017).....	25
Tabel 2. 6 Screening Factor (DNV RP F105, 2017).....	30
Tabel 2. 7 General Safety Factor (DNV RP F105, 2017)	30
Tabel 2. 8 Faktor Mitigasi Pada Span Kritis	31
Tabel 2. 9 Faktor Fabrikasi Maksimum (DNV OS F101, 2000).....	33
Tabel 2. 10 Faktor Ketahanan Material (DNV OS F101,2000).....	33
Tabel 2. 11 Pemilihan Safety Class (DNV OS F101, 2000).....	34
Tabel 2. 12 Faktor Safety Class (DNV OS F101, 2000).....	34
Tabel 2. 13 ASME B31.8	37
Tabel 2. 14 Faktor Desain Pipa (ASME B31.8, 2012).....	38
Tabel 4. 1 Properti Pipa	47
Tabel 4. 2 Data External Coating	47
Tabel 4. 3 Data Water Depth dan Tidal Range	48
Tabel 4. 4 Data Properti Air Laut.....	48
Tabel 4. 5 Data Gelombang dan Arus	49
Tabel 4. 6 Data Tanah	49
Tabel 4. 7 Data Parameter JONSWAP.....	50
Tabel 4. 8 Spektrum Gelombang JONSWAP	52
Tabel 4. 9 Nilai Fungsi G	53
Tabel 4. 10 Nilai Spektrum Kecepatan Partikel	54
Tabel 4. 11 Nilai Momen Spektra Gelombang	55
Tabel 4. 12 Kecepatan Partikel Arus Akibat Gelombang	55
Tabel 4. 13 Kecepatan Partikel Arus Akibat Gelombang Kondisi Badai	56
Tabel 4. 14 Kecepatan Arus Partikel.....	57
Tabel 4. 15 <i>Submerged Weight</i>	57
Tabel 4. 16 Massa Efektif	58
Tabel 4. 17 Nilai Beban Maksimum Horizontal dan Vertikal	59

Tabel 4. 18 Kriteria Stabilitas Vertikal dan Absolut Lateral.....	59
Tabel 4. 19 Nilai <i>Reynold Number</i> (RE).....	60
Tabel 4. 20 Parameter Stabilitas (Ks).....	61
Tabel 4. 21 Nilai Ur.....	62
Tabel 4. 22 Parameter Concrete Stiffness Factor.....	64
Tabel 4. 23 Nilai Concrete Stiffness Factor (CSF).....	64
Tabel 4. 24 Panjang Span Efektif (L_{eff}).....	65
Tabel 4. 25 Parameter Effective Axial Force (S_{eff}).....	66
Tabel 4. 26 Hasil Analisa Effective Axial Force.....	66
Tabel 4. 27 Parameter Critical Buckling (P_{cr}).....	67
Tabel 4. 28 Boundary Condition fixed-fixed.....	67
Tabel 4. 29 Hasil Analisa Critical Buckling (P_{cr}).....	68
Tabel 4. 30 Hasil Analisa Defleksi.....	68
Tabel 4. 31 Hasil Analisa Vortex Shedding & Frekuensi Natural.....	72
Tabel 4. 32 Hasil Analisa Panjang Span Maksimum.....	73
Tabel 4. 33 Hasil Screening Vortex Induced Vibration Arah Cross Flow.....	74
Tabel 4. 34 Hasil Screening Vortex Induced Vibration Arah In-Line.....	74
Tabel 4. 35 Hasil Screening Osilasi.....	75
Tabel 4. 36 Hasil Screening Panjang Maksimum.....	76
Tabel 4. 37 Hasil Screening Critical Buckling (P_{cr}).....	76
Tabel 4. 38 Hasil Screening Defleksi.....	77
Tabel 4. 39 Hasil Screening Gap.....	77
Tabel 4. 40 Konfigurasi Peletakkan Support.....	78
Tabel 4. 41 Hasil Critical Buckling Setelah Mitigasi.....	79
Tabel 4. 42 Hasil Defleksi Setelah Mitigasi.....	79
Tabel 4. 43 Hasil Frekuensi Natural Setelah Mitigasi.....	80
Tabel 4. 44 Hasil Panjang Maksimum Setelah Mitigasi.....	81
Tabel 4. 45 Screening Vortex Induced Vibration Setelah Mitigasi.....	82
Tabel 4. 46 Hasil Screening Osilasi Setelah Mitigasi.....	83
Tabel 4. 47 Hasil Screening Panjang Maksimum Setelah Mitigasi.....	84
Tabel 4. 48 Hasil Screening Critical Buckling Setelah Mitigasi.....	85
Tabel 4. 49 Hasil Screening Defleksi Setelah Mitigasi.....	86
Tabel 4. 50 Hasil Screening Gap Setelah Mitigasi.....	87
Tabel 4. 51 Hasil Analisa Kriteria Tekanan Pengaman.....	88

Tabel 4. 52 Hasil Analisa Kriteria Tekanan Collapse	89
Tabel 4. 53 Parameter Tegangan Hoop	89
Tabel 4. 54 Hasil Analisis Tegangan Hoop.....	90
Tabel 4. 55 Parameter Tegangan Longitudinal	90
Tabel 4. 56 Hasil Analisis Tegangan Longitudinal.....	91
Tabel 4. 57 Hasil Analisa Tegangan Kombinasi.....	91

DAFTAR NOTASI

$S_{\eta\eta}(\omega)$	= Spektrum JONSWAP	
α	= Konstanta <i>Generalized Phillips</i>	
g	= Percepatan gravitasi	(m/s ²)
ω	= Frekuensi gelombang	(rad/s)
ω_p	= Frekuensi puncak gelombang	(rad/s)
γ	= Parameter ketinggian	
σ	= Parameter lebar spektra	
U_w	= Kecepatan arus akibat gelombang normal terhadap pipa	(m/s)
U_c	= Kecepatan arus steady normal tegak lurus terhadap pipa	(m/s)
D	= Diameter luar pipa	(m)
ID	= Diameter dalam pipa	(m)
t_{coat}	= Tebal coating	(m)
$t_{concrete}$	= Tebal concrete	(m)
T	=Ketebalan pipa	(m)
A_{pipa}	=Luas penampang melintang pipa	(m ²)
A_i	= Luas penampang bagian dalam pipa (<i>internal cross section</i>)	(m ²)
I_{conc}	=Momen inersia lapisan beton	(m ⁴)
I_{steel}	=Momen inersia pipa baja	(m ⁴)
E_{conc}	=Modulus elastisitas lapisan beton	(N/m ²)
E_{steel}	=Modulus elastisitas pipa baja	(N/m ²)
L_{eff}	=Panjang span efektif	(m)
m_p	=Massa pipa termasuk <i>coating</i> per satuan panjang	(kg/m)
m_k	=Massa fluida dalam pipa per satuan panjang	(kg/m)
m_a	=Massa yang di tambahkan per satuan panjang	(kg/m)
$M_{struktur}$	=Massa total struktur pipa	(kg/m)
$M_{concrete}$	=Parameter kekasaran <i>seabed</i>	(kg/m)
m_e	=Massa efektif pipa per satuan panjang	(kg/m)

P	=Massa jenis fluida	(kg/m ³)
C_a	=Koefisien massa yang ditambahkan	(m/s)
K_s	= <i>Stability parameter</i>	
C	=Koefisien kondisi batas	
CSF	= <i>Concrete stiffness enhancement factor</i>	
S_{eff}	=Gaya aksial efektif per satuan panjang	(N/m)
P_{cr}	=Critical Buckling Load	(N/m)
Δ	=Defleksi statis	(m)
Q	=Beban berupa berat terendam pipa atau gaya hidrodinamis	(N/m)
V_R	= <i>Reduced velocity</i>	
KC	= <i>Bilangan Keulegan Carpenter</i>	

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Dengan luasnya lautan Indonesia dan sumber daya mineral yang melimpah, terlebih di lautan menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara penghasil minyak bumi dan gas. Eksplorasi minyak dan gas bumi dilakukan karena adanya sumber daya itu sendiri yang salah satunya terletak di lautan luas Indonesia. Kegiatan eksplorasi bertujuan untuk menemukan sumber daya mineral berupa minyak dan gas, baru setelah itu kegiatan eksploitasi dilakukan untuk mengambil sumber daya minyak dan gas bumi yang berasal dari dalam bumi. Eksploitasi hidrokarbon diambilnya hidrokarbon dari dalam bumi ke tempat pemrosesan yang berada di laut maupun fasilitas pemrosesan di darat. Untuk mempermudah proses distribusi hidrokarbon dibutuhkan inovasi yang cukup untuk membuat efektif dan efisien, setelah ditemukannya inovasi-inovasi pada bagian seperti, *platform*, pengeboran, dan bagian lainnya untuk industri minyak dan gas dibutuhkan inovasi untuk bagian eksploitasi terlebih untuk distribusi hidrokarbon. Pembangunan pipa bawah laut merupakan salah satu langkah yang efektif dalam mengurangi biaya operasional selama pendistribusian minyak dan gas. Saluran pipa bawah laut telah menjadi sarana transportasi pengiriman minyak dan gas bumi yang paling aman dan paling dipercaya sebagai bagian dari struktur lepas pantai dan berperan sebagai pendukung perkembangan teknologi kelautan.

Salah satu inovasi untuk distribusi hidrokarbon dari dalam bumi ialah *pipeline*, menurut Basir (2015) keuntungan distribusi menggunakan sistem perpipaan ialah minyak dan gas hasil dari pengeboran tidak perlu memerlukan pengolahan, selain itu membutuhkan biaya relative kecil daripada menggunakan kapal untuk distribusi, tetapi mempunyai kerugian dari sistem perpipaan yang hanya mampu mendistribusikan dalam jarak yang relatif terbatas. Selain itu membutuhkan pemeliharaan yang relatif sering. Dalam pekerjaannya sistem perpipaan harus bekerja selama 24 jam dikarenakan distribusi harus tetap terkendali agar dapat sampai fasilitas pemrosesan.

Kegagalan dalam operasi perpipaan bawah laut salah satunya ialah *buckling*. *Buckling* pada pipa bawah laut akan sangat membahayakan apabila tidak diantisipasi dari awal pada saat mendesain dan memperhitungkan pipa. Selain *buckling* terdapat kelelahan pada pipa yang membuat kegagalan dalam sistem perpipaan bawah laut.

Faktor lingkungan merupakan kondisi dari *bathymetry* dari laut yang akan dipasang pipa bawah laut untuk distribusi hidrokarbon ke fasilitas pemrosesan. Perancang membuat jalur bawah laut untuk menghindari terjadinya *free span* pada *seabed*. Dengan adanya *free span* dimungkinkan akan terjadinya defleksi yang akan mengakibatkan gerak osilasi jika nilai frekuensi *vortex shedding* melebihi frekuensi natural pipa (Pratomo, 2015). *Free span* harus dihindari karena apabila *free span* terlalu Panjang dan melebihi batas yang diizinkan, maka akan beresiko mengalami kegagalan struktur pada pipa (Khanifudin, 2015). Kegagalan struktur yang disebabkan oleh *free span* dapat mengakibatkan *buckling* yang dapat berdampak besar pada lingkungan apabila saat distribusi, lingkungan dapat tercemar apabila pipa terdapat lubang yang dikarenakan karena *free span*. Selain *buckling*, *bending* juga dapat terjadi yang dikarenakan oleh *free span*.

Dalam kondisi *free span pipeline* juga harus dianalisis stabilitasnya agar *pipeline* tersebut dapat dipastikan aman saat beroperasi. Dalam stabilitas dihitung gaya-gaya hidrodinamis yang berpengaruh terhadap *pipeline* dalam kondisi *free span* tersebut, gaya hidrodinamis tersebut dapat menyebabkan *Vortex Induced Vibratiion* pada *pipeline* apabila nilai frekuensi *vortex shedding* pada *pipeline* sama atau lebih besar 0,7 kali dari frekuensi natural pada *pipeline*. Selain gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja di sekitar *pipeline* masih banyak faktor-faktor yang berpengaruh dalam Analisa stabilitas *pipeline* di dasar laut tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh gaya hidrodinamis pada *pipeline* ditinjau dari stabilitas *on-bottom* vertikal dan absolut lateral DNV RP F 109
2. Apakah stabilitas pada *pipeline* telah sesuai dengan kriteria analisis dinamis berdasar pada DNV RP F 105
3. Apakah tegangan pada *pipeline* yang mengalami *free span* telah memenuhi kriteria tegangan kombinasi dan sesuai dengan standar ASME 31.8

1.3 Tujuan

1. Mengetahui pengaruh gaya hidrodinamis pada *pipeline* ditinjau dari *on-bottom stability* vertikal dan absolut lateral
2. Mengetahui apakah stabilitas pada *pipeline* yang mengalami *free span* telah memenuhi kriteria dari Analisa dinamis
3. Mengetahui apakah tegangan pada *pipeline* yang terkena *free span* telah memenuhi kriteria tegangan kombinasi

1.4 Manfaat

2. Penulis mampu menunjukkan analisis *on bottom stability* vertikal dan juga *on bottom stability absolut* lateral
3. Penulis mampu memperlihatkan stabilitas *pipeline* yang terkena *free span* telah memenuhi kriteria Analisa dinamis
4. Penulis mampu membuktikan tegangan-tegangan pada *pipeline* telah memenuhi kriteria tegangan kombinasi berdasarkan ASME B31.8

1.5 Batasan Masalah

1. Analisa kondisi tegangan pipa pada saat operasi
2. Aliran fluida yang mengenai pipa ialah tegak lurus.
3. Aliran fluida dalam pipa diasumsikan *steady*
4. Tumpuan pada *pipeline fixed-fixed*
5. *Code & Rules* yang dipakai, antara lain DNV RP F 109, DNV RP F 105, DNV OS F101, dan ASME B31.8
6. *Scouring, residual tension, marine growth*, dan tegangan torsi diabaikan.
7. Data desain dan operasional dari *pipeline* ialah milik PT. Pertamina Hulu Mahakam pada Lapangan Bekapai
8. Data tanah dan data operasional berdasarkan lokasi Pertamina Hulu Mahakam
9. Analisa hanya analisa stabilitas dalam kondisi *free-span*

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pada analisis yang dilakukan pada tugas akhir ini memanfaatkan beberapa analisis-analisis sebidang dengan yang akan dilakukan ini, seputar masalah-masalah pada operasi pipa bawah laut untuk proses produksi minyak dan gas yang diakibatkan oleh *free span* pada *pipeline* tersebut

Free span pada *pipeline* sendiri dapat menyebabkan terjadinya *Vortex Induced Vibration*. Pada analisis ini terkait dengan analisis yang dilakukan pada Syahrani (2019) terkait dengan analisisnya tentang stabilitas yang dikarenakan oleh *free span* dan *vortex induced vibration* dan juga mengacu kepada Analisa dari Bimo Pratomo (2015) tentang Analisa stabilitas pada *pipeline* akibat dampak dari bentangan bebas

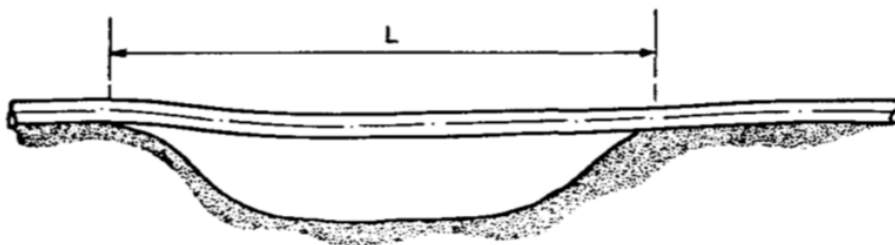
Salah satu efek dari terjadinya *Vortex Induced Vibration* pada *pipeline* ialah terjadinya defleksi pada bagian-bagian *pipeline* dan dari defleksi dapat terjadi osilasi yang akan menyebabkan *pipeline* tidak stabil dan *pipeline* akan mendapatkan tegangan yang berlebih

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Free Span

Free span adalah kondisi dimana ketidakrataan *seabed* yang membuat pipa bertumpu hanya kepada dua tumpuan dan membuat kondisi pipa menjadi menggantung. Terdapat beberapa faktor yang dapat menyebabkan terjadinya *free span* :

1. Permukaan *seabed* tidak merata
2. Perubahan kontur dasar laut
3. *Support* buatan



Gambar 2. 1 Ilustrasi *Free Span*

Jika terjadinya *free span* maka harus dicek kembali keandalan dari sistem pipa bawah laut nya pada saat operasi dan juga kekuatan dari sistem perpipaan bawah laut tersebut, karena tidak adanya tumpuan. Beban yang terjadi pada pipa mempunyai beberapa gaya yang menjadi sebab untuk pipa itu sendiri, gaya dinamik dan juga beban lingkungan (gelombang dan arus).

2.2.2 Dimensi Pipa

Offshore pipelines terdiri dari beberapa lapisan yaitu, pipa baja, *anti-corrosion coating*, lapisan pemberat (*concrete*). Pipa dalam schedule NPS hanya terdiri lapisan baja, tidak dengan anti-corrosion coating dan concrete. Pipa yang di analisa harus menggunakan diameter total dan dimensi pipa yang lain. Parameter-parameter dimensi pipa dirumuskan dalam persamaan sebagai berikut:

- ***External pipe diameter***

$$D = ID + (2 \times t_{coat}) + (2 \times t_{concrete}) \quad (2.1)$$

dengan,

D = Diameter luar pipa (m)

IDE = Diameter dalam pipa (m)

t_{coat} = Tebal coating (m)

$t_{concrete}$ = Tebal concrete (m)

- ***Internal cross section area***

$$A_i = \frac{\pi}{4} \times (D - (2 \times t_{pipa}))^2 \quad (2.2)$$

- ***Steel pipe cross section area***

$$A = \frac{\pi}{4} \times D^2 - A_i \quad (2.3)$$

- ***Coating layer cross section area***

$$A_{coat} = \frac{\pi}{4} \times (D + (2 \times t_{coat}))^2 - A_i - A_{pipa} \quad (2.4)$$

- ***Concrete cross section area***

$$A_{concrete} = \frac{\pi}{4} \times (D + (2 \times t_{coat}) + (2 \times t_{concrete}))^2 - A_i - A_{pipa} - A_{coat} \quad (2.5)$$

2.2.3 Berat Pipa Terendam

Analisa *submerged weight* pipa ini diperlukan untuk mengetahui beban lateral yang timbul akibat berat pipa itu sendiri. Berat pipa yang dihitung adalah berat material (baja), berat muatan pipa (dalam kondisi operasi), berat *coating*, berat *concrete*, berat akibat *bouyancy*.

- **Berat pipa dihitung sebagai berikut:**

$$W_{pipa} = M_{pipa} \times 9,8067 \quad (2.6)$$

- **Berat *coating* dihitung sebagai berikut:**

$$W_{coating} = M_{coating} \times 9,8067 \quad (2.7)$$

- **Berat *concrete* dihitung sebagai berikut:**

$$W_{concrete} = M_{concrete} \times 9,8067 \quad (2.8)$$

- **Berat muatan dihitung sebagai berikut:**

$$W_{fluida} = M_{fluida} \times 9,8067 \quad (2.9)$$

- ***Submerged weight* pipa dihitung sebagai berikut:**

$$Q = W_{pipa} + W_{coating} + W_{concrete} + W_{fluida} - W_{buoy} \quad (2.10)$$

2.2.4 Kondisi Pembebanan

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

2.2.4.1 Instalasi

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

2.2.4.2 Kondisi Water Filled

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

2.2.4.3 Hydrotest

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

2.2.4.4 Operasi

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

2.2.5 Beban Lingkungan

Pada bagian sebelumnya, telah dijelaskan secara singkat mengenai beban lingkungan yang bekerja pada pipa. Beban ini bekerja pada pipa akibat adanya kondisi lingkungan yang terjadi. Untuk beban pada pipa bawah laut, tentunya yang mempengaruhi adalah beban gelombang dan beban arus. Penjabaran lebih jelas mengenai beban gelombang dan beban arus sebagai berikut.

2.2.5.1 Kombinasi beban lingkungan

Kondisi beban lingkungan harus merefleksikan respon-respon eksterim yang terjadi pada perencanaan periode desain. Kondisi pembebanan untuk *on-bottom stability* terdapat pada table di bawah ini.

Tabel 2. 1 Kondisi Beban Lingkungan (DNV RP F109, 2010)

Description	Load condition
Installation	
Wave Dominant	Combined 10year wave and 1 year current loading
Current Dominant	Combined 1 year wave and 10 year current loading
Operation	
Wave Dominant	Combined 100 year wave and 10year current loading
Current Dominant	Combined 10 year wave and 100 year current loading

2.2.5.2 Beban Gelombang

Menurut Djatmiko (2012), gelombang laut mempunyai pola acak dalam elevasi dan propagasinya, yang tidak akan berulang urutan kejadiannya terutama di lokasi yang sama. Dengan demikian teori gelombang reguler tidak dapat dipakai secara langsung dalam menjelaskan gelombang acak.

Gelombang yang mengakibatkan kondisi aliran berosilasi dapat dihitung dengan menggunakan teori numerik atau analisis gelombang. Teori gelombang harus dapat mendeskripsikan kondisi di lokasi pipa. Untuk kasus yang praktis, teori gelombang linear dapat diterapkan. Kondisi laut yang acak, stasioner, dan kurun waktu pendek dapat digunakan dengan spektrum gelombang. Spektrum gelombang yang sering digunakan adalah JONSWAP.

2.2.5.3 Beban Arus

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

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

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

- **Outer zone**

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

- **Inner zone**

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

2.2.6 Spektra JONSWAP

Jonswap adalah singkatan dari Joint North Sea Wave Project yaitu proyek yang dilakukan secara bersama sama oleh sejumlah negara untuk melakukan penelitian tentang gelombang di laut atau perairan utara (Djatkiko,2012). Persamaan spektra JONSWAP diberikan sebagai berikut:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \gamma^{\exp\left(-0.5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right)} \quad (2.11)$$

- Konstanta *Generalized Phillips* diberikan sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega_p^4}{g^2} (1 - 0.287 \ln \gamma) \quad (2.12)$$

- Parameter lebar spektra:

$$\begin{aligned} \sigma &= 0.07 & \text{if } \omega \leq \omega_p \\ \sigma &= 0.09 & \text{else} \end{aligned} \quad (2.13)$$

- *Peak enhancement factor*

$$\gamma = \begin{cases} 5.0 & \varphi \leq 3.6 \\ \exp(5.75 - 1.15\varphi) & 3.6 < \varphi < 5.0; \\ 1.0 & \varphi \geq 5.0 \end{cases} \quad \varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \quad (2.14)$$

Keterangan :

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \text{Spektrum JONSWAP}$$

α	= Konstanta <i>Generalized Phillips</i>	
g	= Percepatan gravitasi	(m/s ²)
ω	= Frekuensi gelombang	(rad/s)
ωp	= Frekuensi puncak gelombang	(rad/s)
γ	= Parameter ketinggian	
σ	= Parameter lebar spektra	

2.2.7 Transformasi spectra gelombang

Wave induced velocity pada pipa dasar laut $S_{\eta\eta}(\omega)$ ditentukan dengan transformasi spektra gelombang pada permukaan menggunakan teori gelombang orde 1:

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) S_{\eta\eta}(\omega) \quad (2.15)$$

$G^2(\omega)$ merupakan fungsi transformasi frekuensi dari elevasi gelombang menjadi kecepatan arus karena gelombang pada level pipa di dasar laut, diberikan sebagai berikut:

$$G(\omega) = \frac{\omega}{\sinh(k d)} \quad (2.16)$$

Dimana d adalah kedalaman laut dan k adalah angka gelombang yang ditentukan dengan iterasi persamaan *transcendental* yaitu:

$$\frac{\omega^2}{g} = k \tanh(k d) \quad (2.17)$$

Momen spektra pada orde ke – n diberikan sebagai berikut:

$$M_n = \int_0^\infty \omega^n S_{UU}(\omega) d\omega \quad (2.18)$$

Kecepatan aliran gelombang signifikan pada pipa diberikan pada persamaan berikut:

$$U_s = 2\sqrt{M_0} \quad (2.19)$$

Mean zero up-crossing period dari osilasi aliran pada pipa adalah:

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \quad (2.20)$$

Pengaruh dari arah gelombang dan sebaran gelombang akan membentuk *reduction factor* dalam kecepatan signifikan aliran. Kecepatan normal untuk pipa dan pengaruh dari sebaran gelombang adalah sebagai berikut:

$$U_w = R_D U_{w\theta} \quad (2.21)$$

Setelah mendapatkan beberapa factor dari transformasi gelombang permukaan menjadi partikel gelombang, akan dilanjutkan untuk mencari beberapa nilai, seperti gaya arah vertical,

horizontal, maupun kecepatan arus pada ketinggian tertentu, dirumuskan:

$$U^* = U_s \times \frac{1}{2} \times \left(\sqrt{2 \cdot \ln \tau} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln \tau}} \right) \quad (2.22)$$

$$\tau = \frac{T_{storm}}{T_u} \quad (2.23)$$

$$k_T = \frac{T^*}{T_u} = k_t - 5 \cdot (k_t - 1) \cdot T_n / T_u \quad \text{untuk } T_n / T_u \leq 0,2$$

$$= 1 \quad \text{untuk } T_n / T_u > 0,2$$

Keterangan :

U^* = Kecepatan partikel gelombang akibat transformasi (m/s)

τ = Angka osilasi pada desain spektra

T^* = Periode untuk desain osilasi (s)

k_T = Rasio antara periode gelombang ekstrim dengan periode gelombang rata-rata zero-up

Untuk menghitung reduction factor dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$R_D = \sqrt{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} D_w \theta d\theta} \quad (2.24)$$

Beban hidrodinamika dapat ter reduksi dikarenakan:

- Dasar laut yang *permeable*
- Pipa yang ter penetrasi ke dasar laut
- Trenching

Maka total beban yang ter reduksi adalah:

$$r_{tot,i} = r_{perm,i} \cdot r_{pen,i} \cdot r_{tr,i} \quad (2.25)$$

2.2.8 Kecepatan Arus

Aliran stabil pada pipa dapat memiliki komponen dari arus pasang, arus yang disebabkan oleh angin, *storm surge* yang dipicu oleh arus dan densitas yang di picu oleh arus. Kecepatan arus dapat di reduksi untuk memperhitungkan efek dari *bottom boundary layer* dan arahnya:

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

Tabel 2. 2 Seabed roughness (DNV RP F109, 2010)

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

2.2.9 Gaya Hidrodinamis

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

2.2.9.1 Drag Force

Gaya *drag* adalah gaya yang berkaitan dengan kecepatan akibat arus *steady* yang dibangkitkan oleh gelombang. Kecepatan arus total (kecepatan arus akibat gelombang dan kecepatan arus pada elevasi pipa) mempengaruhi nilai dari gaya *drag*. Besar gaya *drag* dapat diperoleh menggunakan Persamaan di bawah :

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D_t \cdot C_D \cdot (U_w + U_C)^2 \quad (2.27)$$

Di mana,

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

2.2.9.2 Gaya Lift

Gaya lift adalah gaya dalam arah tegak lurus aliran/rambatan gelombang. Gaya angkat terjadi bila terdapat perbedaan konsentrasi *streamline*. Jika terdapat konsentrasi *streamline* di atas silinder akan mengakibatkan gaya angkat. Jika terdapat celah sempit diantara silinder dan *seabed*, konsentrasi *streamline* bawah silinder akan mengakibatkan gaya angkat negatif ke arah bawah (Anastasio, 2007).

Besarnya gaya *lift* dapat diperoleh melalui persamaan :

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_{\text{fluida}} C_L D U_e^2 \quad (2.28)$$

dengan,

ρ_{fluida} = massa jenis fluida (kg/m³)

C_L = Koefisien lift

D = Diameter luar pipa (m)

U_e = Kecepatan efektif Partikel (m/sec)

2.2.9.3 Inertia Force

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

$$F_I = \frac{\pi}{4} \cdot \rho_w \cdot D_t \cdot C_M \cdot a_n \quad (2.29)$$

Di mana,

F_I = Gaya Inersia (N/m)

C_M = Koefisien gaya inersia

a_n = percepatan partikel air (m/s²)

2.2.10 On-Bottom Stability

Subsea pipeline dikatakan stabil jika *pipeline* tersebut memiliki berat yang cukup, sehingga tahanan lateral tanah mencukupi untuk menghindari pergerakan *pipeline* secara lateral karena beban lingkungan yang ada. Meningkatkan ketebalan *concrete coating* merupakan salah satu cara untuk mencapai kestabilan yang umum dipakai.

2.2.10.1 Stabilitas Vertikal dan Stabilitas Absolut Lateral

Untuk menghindari pipa mengapung di air, maka berat pipa yang terendam harus memenuhi kriteria stabilitas vertical sesuai DNV RP F109. Analisa stabilitas vertikal dilakukan untuk mengetahui apakah berat *pipeline* di udara mampu melawan gaya apung *pipeline* ketika di dalam air, adapun kriteria kestabilan vertikal menurut DNV RP F 109 dengan persamaan berikut:

$$\gamma_w \frac{b}{b + w_s} \leq 1 \quad (2.30)$$

Dimana:

- γ_w = Safety factor = 1,1 (DNV RP F109)
- B = *Bouyancy* pipa
- W_s = Berat pipa terendam

Metode Absolute Lateral Static Stability memberikan syarat absolut statis untuk perpindahan lateral pipa didasar laut berdasarkan penyamaan gaya yang memastikan gaya tahanan pipa mencukupi untuk bertahan terhadap beban hidrodinamis maksimum. Apabila gaya-gaya tersebut cukup besar untuk mengalahkan gesekan seabed, maka gerakan perpindahan lateral mungkin terjadi. Desain kriteria untuk metode *absolute lateral stability* adalah:

(2.31)

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

Dan

$$\gamma_{SC} \frac{F_z^*}{w_s} \leq 1.0 \quad (2.32)$$

Dimana:

γ_{SC} = *safety factor*

F_y^* = Beban hidrodinamis horizontal (gaya *drag* dan *inertia*)

μ = Koefisien friksi

F_z^* = Beban hidrodinamis vertikal (gaya angkat)

w_s = Berat terendam pipa

Beban horizontal dan vertikal maksimal diperoleh dengan persamaan berikut:

$$F_y^* = r_{tot,y} \cdot \frac{1}{2} \rho_w \cdot D \cdot C_y^* (U^* + V^*)^2 \quad (2.33)$$

$$F_z^* = r_{tot,z} \cdot \frac{1}{2} \rho_w \cdot D \cdot C_z^* (U^* + V^*)^2 \quad (2.34)$$

Dimana:

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

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

ρ_w = densitas air

D = diameter pipa

C_y^* = koefisien beban horizontal

C_z^* = koefisien beban vertikal

Koefisien C_y^* dan C_z^* terdapat pada tabel berikut:

Tabel 2. 3 Koefisien Beban Vertikal (DNV RP F109, 2010)

CY^*		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 2. 4 Koefisien Beban Horizontal (DNV RP F109, 2010)

CZ^*		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

2.2.11 Parameter Kestabilan

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

$$K_s = \frac{4\pi m_e \zeta_T}{\rho D^2} \quad (2.35)$$

Dimana :

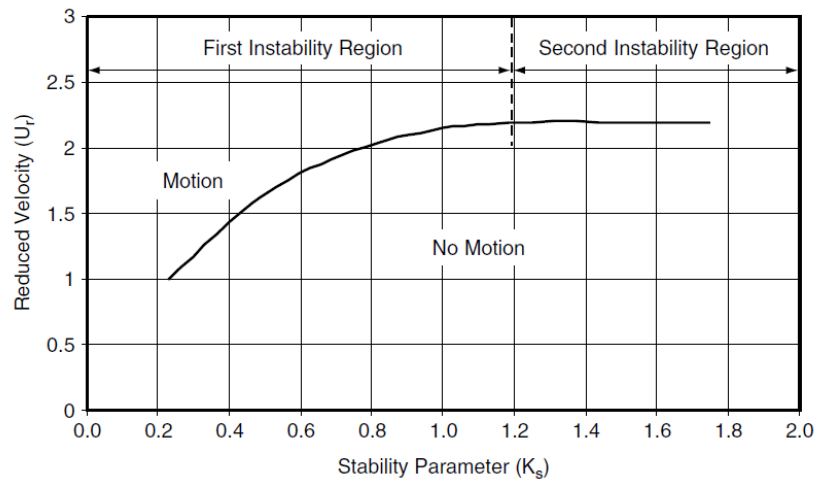
- K_s = Parameter Stability
- M_e = Massa efektif pipa (kg/m)
- ζ_T = Damping ratio
- ρ = density air laut (kg/m³)
- D = diameter luar pipa (m)

Getaran *inline* dan *crossflow* akan terjadi jika memenuhi syarat yang diterapkan oleh DNV RP F105 yaitu :

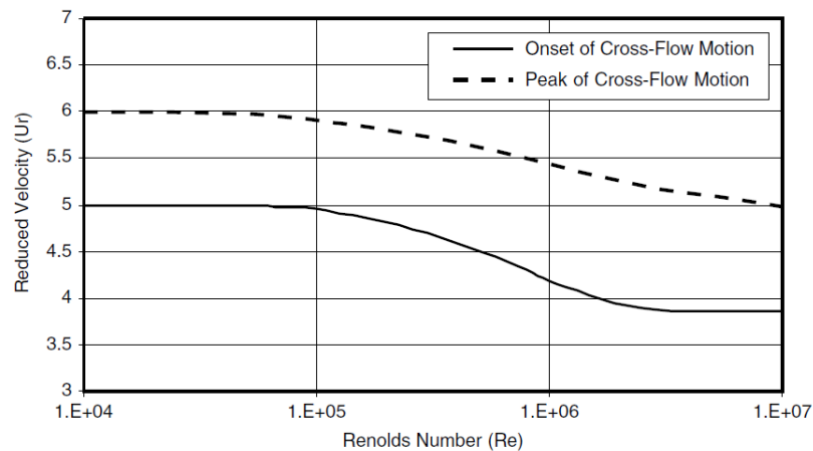
Inline : $K_s < 12$, $1.2 < U_r < 3.5$

Crossflow : $K_s < 16$, $3.5 < U_r < 10$

Untuk mendapatkan *reduced velocity* (U_r) pada *inline*, dapat menggunakan nilai *stability parameter* (K_s). Sementara untuk mendapatkan *reduced velocity* (U_r) pada *crossflow*, dapat menggunakan Reynolds Number (Re). Untuk mendapatkan nilainya, dapat menggunakan grafik berikut :



Gambar 2. 2 Reduced Velocity untuk Osilasi inline (Guo, 2005)



Gambar 2. 3 Reduced Velocity untuk Osilasi crossflow (Guo, 2005)

Pada grafik diatas, Reynolds Number merupakan parameter tidak berdimensi yang merasiokan antara gaya inersia dengan gaya *viscous*. Untuk mencari Reynold Number dapat di tuliskan sebagai berikut :

$$Re = \frac{UcD}{\nu k} \quad (2.36)$$

dengan ,

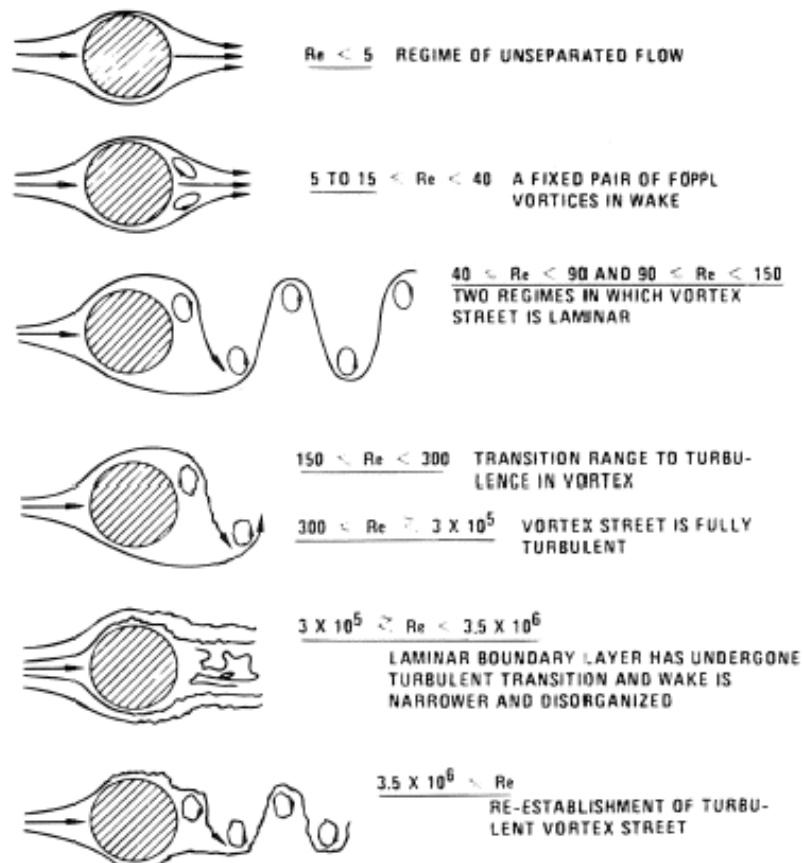
Re = bilangan Reynolds

νk = viskositas kinematis fluida untuk air laut ($1.2 \times 10^{-5} \text{ ft}^2$)

D = diameter luar pipa (m)

Uc = kecepatan arus (m/ sec)

Selain itu, dari hasil perhitungan bilangan Reynolds dapat mempresentasikan aliran yang terjadi di belakang struktur *pipeline*. *Reynolds number* sendiri berpengaruh terhadap jenis aliran yang akan terjadi di belakang struktur *pipeline*, seperti jenis aliran laminer, turbulen, dan jenis aliran transisi. Bentuk aliran yang dihasilkan berbeda-beda, tergantung pada nilai Re yang didapat.



Gambar 2. 4 Bentuk Aliran pada Struktur (Lienhard, 1966)

1. Untuk $Re < 5$ (daerah aliran tak terpisahkan)
2. $5 - 15 < Re < 40$ (sepasang vortex dalam aliran gelombang)
3. $40 < Re < 90$ dan $90 < Re < 150$ (dua vortex dengan aliran turbulen)
4. $150 < Re < 300$ (rentang terjadinya perubahan aliran menjadi turbulen), $300 < Re < 3 \times 10^5$ (aliran vortex sepenuhnya turbulen)
5. $3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$ (terdapat sedikit aliran turbulen dan lamniner, serta aliran gelombang lebih sempit dan tidak teratur)
6. $Re > 3.5 \times 10^6$ (pembentukan kembali aliran vortex turbulen)

2.2.11 Massa Efektif

Massa efektif pipa adalah total dari masa pipa termasuk coating, massa fluida dalam pipa dan massa air laut yang dipindahkan oleh pipa. Menurut (Guo dkk, 2005), persamaan massa efektif pipa adalah sebagai berikut:

$$M_e = M_{str} + M_c + M_A \quad (2.36)$$

Dimana,

M_e = Massa efektif

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

M_c = Massa Konten (kg/m)

M_A = Massa tambah = $0.25 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot \rho \cdot C_A$

C_A = Koefisien massa tambah

Maka, dianggap bahwa seluruh span mengalami osilasi dan vortex shedding, sehingga massa efektif dapat memiliki massa tambah.

Pada masa struktur ini tidak hanya massa struktur pipa saja yang menjadi parameter perhitunganm tetapi massa pipa, massa *concrete*, dan massa *coating* juga menjadi

$$M_{str} = \text{Massa Pipa} + \text{Massa Concrete} + \text{Massa Coating} \quad (2.37)$$

Untuk mendapatkan masing-masing variabel-variabel yang terdapat pada massa struktur, dapat menggunakan

$$\text{Massa Pipa} = \frac{\pi}{4} \cdot [D_2 - (D - 2t)^2] \cdot \rho_{\text{pipa}} \quad (2.38)$$

$$\text{Massa Concrete} = \frac{\pi}{4} \cdot [(D + 2t_{cc})^2 - D_2] \cdot \rho_{\text{concrete}} \quad (2.39)$$

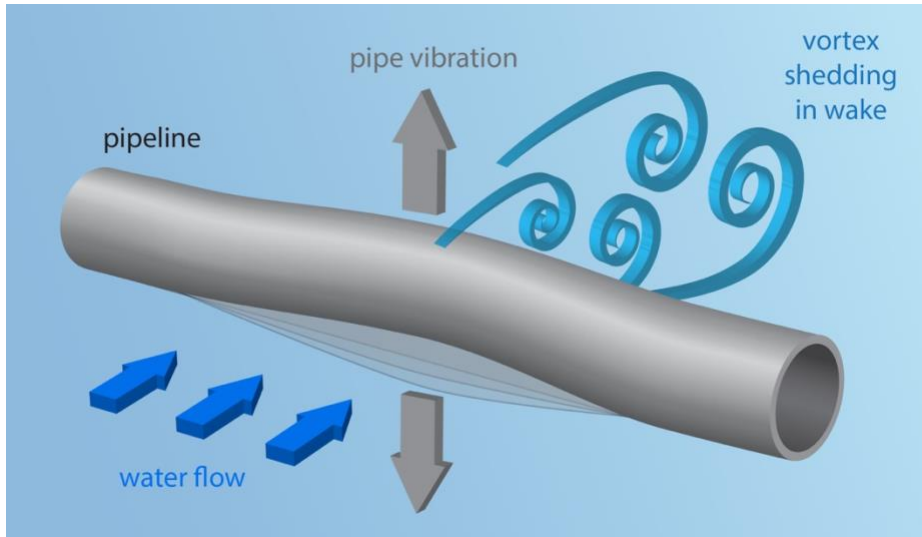
$$\text{Massa Anti Korosi} = \frac{\pi}{4} \cdot [(D + 2t_{cc} + 2t_{\text{corr}})^2 - (D + 2t_{cc})^2] \cdot \rho_{\text{corrosion}} \quad (2.40)$$

$$\text{Massa Tambah} = \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot \rho \cdot C_a \quad (2.41)$$

$$\text{Massa Fluida} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_i - 2t)^2 \cdot \rho_f \quad (2.42)$$

2.2.12 Vortex Induced Vibration (VIV)

Pembebanan pada pipa akan menimbulkan getaran yang cukup besar pada pipa. Getaran yang terjadi menghasilkan frekuensi pada pipa. Peristiwa yang terjadi akibat getaran tersebut disebut *Vortex Induced Vibration*(VIV).



Gambar 2. 5 Ilustrasi *Vortex Induced Vibration*

Vortex Induced Vibration (VIV) terjadi adanya resonansi pada *pipeline*, terjadinya resonansi disebabkan karena nilai frekuensi natural struktur sama dengan atau mendekati dari nilai frekuensi *vortex shedding*. Aliran yang telah melalui *pipeline* itu sendiri menyebabkan aliran tersebut tidak stabil dan menyebabkan *pipeline* berosilasi. Osilasi pada pipa terdapat 2 jenis, yaitu:

- **Osilasi *In-Flow***

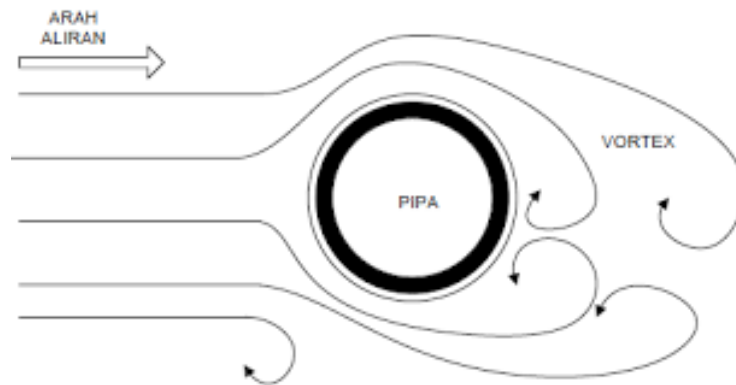
Menurut (Guo dkk, 2005), *In-Line* osilasi terjadi karena kecepatan aliran lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan gerakan *cross flow*. Beberapa parameter digunakan untuk menghitung potensi-potensi terjadinya getaran. Termasuk, *reduced velocity* (U_r) dan *Stability Parameter* (K_s).

Ketidakstabilan *In-Line* dihubungkan dengan simetrisnya vortex shedding dan memiliki respon puncak pada *reduced velocity* (U_r). Untuk menghindari respon dari *in-line flow* terhadap eksitasi *vortex shedding*, disarankan memiliki stability parameter (K_s) lebih besar dari 1.8 (Wootton, 1991). Menurut (DNV,1981) , resonansi *in-line vortex shedding* yang menyebabkan osilasi dapat terjadi ketika $1.0 < U_r < 2.2$, *shedding* akan simetris; dan

untuk $Ur > 2.2$, shedding akan bergantian.

- **Osilasi Cross Flow**

Eksitasi di arah *cross flow* dapat memiliki efek yang lebih besar dibandingkan dengan osilasi *in-line* karena amplitude respon jauh lebih besar dibandingkan pada *in-line*. Dan juga, osilasi ini dapat menyebabkan kecepatan yang lebih besar dibandingkan dengan osilasi *in-line*. Menurut (DNV, 1981), untuk osilasi *cross flow* harus memiliki nilai parameter kestabilan $K_s < 16$. Serta, untuk nilai reduced velocity $3.5 < Ur < 10$.



Gambar 2. 6 Arah Aliran

Berdasarkan (Bai and Bai, 2015), bahwa kriteria *vortex induced vibration* pada kondisi *in-line* dan untuk kondisi *cross flow* sebagai berikut :

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

Terdapat beberapa parameter *vortex induced vibration* dari *free span* itu sendiri, seperti nilai *Reynold Number* (RE) , nilai *Keulegan Carpenter Number* (KC), dan nilai dari *reduced velocity*

2.2.13 Vortex Shedding Frequency

Apabila aliran melewati pipa, maka aliran yang terbentuk setelah melewati pipa tidak stabil, sehingga menyebabkan pipa beresonansi. Ketika aliran melewati pipa maka akan terjadi *flow separation* dan terbentuk vorteks di belakang pipa. *Vortex* tersebut akan menyebabkan perubahan tekanan hidrodinamis pada pipa. Frekuensi *Vortex* bergantung pada kecepatan aliran dan diameter pipa. *Freespan* mulai beresonansi ketika frekuensi dari *vortex shedding* sebesar 1/3 dari frekuensi natural dan vibrasi bentangan pipa. Sehingga untuk tujuan mendesain pipa, perbandingan frekuensi *vortex shedding* harus lebih kecil dari 0,7 kali frekuensi naturalnya agar tidak terjadi osilasi. Pendekatan *vortex shedding* yang mendekati frekuensi natural pipa, secara teoritis ini dapat mengakibatkan adanya resonansi yang terjadi pada *freespan*. Maka dari itu, adanya bentangan dari frekuensi *vortex shedding* yang akan mempercepat *stress* pada pipa dan berdampak lebih cepat terhadap kegagalan pada pipa. Jika frekuensi *vortex* mendekati sama dengan frekuensi *freespan* pipa, maka akan terjadi resonansi. Hal ini dapat menimbulkan kegagalan akibat kelelahan pada pipa. Kegagalan pada struktur pipa dapat dicegah dengan menjauhkan nilai frekuensi *vortex-shedding* dengan frekuensi alami pipa, sehingga osilasi yang terjadi dapat diminimalkan.

Dalam Guo dkk. (2005), frekuensi *vortex shedding* adalah frekuensi dimana terjadi pusaran pada pipa. Persamaan frekuensinya adalah sebagai berikut:

(2.43)

$$f_s = \frac{SU_c}{D}$$

Dengan,

F = *Vortex shedding frequency*, Hz

S = *Strouhal Number*

U_c = Kecepatan arus efektif, m/s

D = diameter luar pipa, m

Dalam Guo (2005), *Strouhal Number* adalah frekuensi yang tak berdimensi (*dimensionless*) yang merupakan fungsi dari *reynold numbers* (Re). Dalam Mouselli (1981), nilai *strouhal number* dapat dicari melalui persamaan :

$$S_t = \frac{0.21}{C_D^{0.75}} \quad (2.44)$$

dimana,

C_D = Koefisien Drag

Pola setiap aliran fluida berbeda untuk setiap nilai Reynolds Number yang berbeda. Reynold number dapat digunakan untuk mengetahui kondisi aliran di sekitar struktur tersebut.

2.2.14 Analisis Dinamik

Pipeline yang mengalami bentangan bebas di bawah laut, tepatnya di dasar laut akan terkena gaya-gaya yang ditimbulkan dari gaya hidrodinamis dari arus itu sendiri maupun dari gelombang yang akan menimbulkan getaran pada *pipeline* yang terbentang bebas di dasar laut. Getaran pada *pipeline* ini lah yang dapat menyebabkan umur pada *pipeline* tersebut berkurang. Getaran pada *pipeline* itu sendiri bergerak sejajar (*in-line*) ataupun tegak lurus (*crossflow*) aliran.

Getaran yang sejajar dengan aliran maupun getaran yang bergerak tegak lurus dengan aliran harus dianalisis agar dapat diketahui apakah *pipeline* telah aman dalam operasi atau tidak. Untuk dapat mengetahui apakah *pipeline* aman atau tidak, dilakukan perhitungan frekuensi natural *in -line* dan *crossflow* sebagai respon dinamik terhadap beban lingkungan dan operasi.

2.2.14.1 Frekuensi Natural Pipa

Frekuensi natural merupakan jumlah getaran alami sebuah benda yang dihasilkan tiap detik yang dimiliki tiap-tiap struktur. Benda tersebut akan senantiasa bergetar tetapi tidak dalam nilai yang besar. Setiap stuktur memiliki frekuensi natural yang berbeda tergantung dari massa dan kekakuannya. Frekuensi natural dari sebuah struktur dapat ditentukan dengan mengabaikan pemicu dari gaya luar dan redaman dari struktur (*Undamped Free Vibration*). Frekuensi natural di dalam DNV-GL RP F105 (2017) dijelaskan di dalam persamaan di bawah ini

$$f_1 = C_1 \sqrt{1 + CSF} \sqrt{\frac{E_{st} I_{st}}{m_e L_{eff}^4} \left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}} + C_3 \left(\frac{\delta}{D_t}\right)^2\right)} \quad (2.45)$$

Di mana,

- f_1 = *fundamental natural frequency* (Hz)
- C_1, C_3 = *boundary condition coefficient*
- CSF = *concrete stiffness factor*
- E_{st} = *Young's modulus* pipa baja (N/m²)
- I_{st} = *Momen inersia* pipa baja (m⁴)
- L_{eff} = *Panjang Freespan efektif* (m)
- S_{eff} = *effective axial force* (N)
- P_{cr} = *critical buckling load* (N)
- δ = *static deflection* (m)

Tabel di bawah menjelaskan kondisi-kondisi batas yang dipengaruhi oleh tumpuan *span*. Kondisi-kondisi batas pada masing-masing tumpuan dijelaskan dalam DNV RP F 105 :

Tabel 2. 5 Koefisien Batas (DNV RP F105, 2017)

	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⁾ $\frac{1}{18(L_{\text{eff}} / L)^2 - 6}$ Mid-span: 1/24
C ₆	5/384	1/384	1/384

Kemudian terdapat parameter-parameter persamaan frekuensi natural dasar, seperti yang akan dijelaskan lebih lanjut di bawah ini:

- **Concrete Stiffness Factor (CSF)**

Concrete stiffness factor mempunyai fungsi untuk menambah berat pada *pipeline* itu sendiri agar dapat menambah kestabilan *pipeline* dan dapat mempengaruhi kekakuan *pipeline* tersebut. Persamaan CSF dijelaskan pada Persamaan di bawah ini :

$$CSF = k_c \left(\frac{EI_{conc}}{EI_{steel}} \right)^{0,75} \quad (2.46)$$

Di mana,

- k_c = konstanta empiris
= 0.33 untuk AE dan 0.25 untuk PP/PE *coating*
- EI_{conc} = *bending stiffness* selimut beton
- EI_{steel} = *bending stiffness* pipa baja

- **Critical Buckling Load**

Critical buckling load dipengaruhi oleh kekakuan pipa, berat terendam pipa dan pengaruh kontak pipa dengan tanah (Bai dan Bai, 2014). .Beban euler adalah beban terkecil dimana keseimbangan netral masih dapat terjadi. Beban euler dapat diperoleh dari perhitungan dengan rumus sebagai berikut :

$$P_{cr} = (1 + CSF) C_2 \pi^2 \frac{E_{st} I_{st}}{L_{eff}^2} \quad (2.48)$$

Dimana :

- C_2 = Koefisien kondisi batas
- CSF = *Concrete stiffness enhancement factor*
- E = Modulus young untuk pipa (N/m²)
- I = Momen inersia pipa (m⁴)
- L_{eff} = Panjang span efektif (m)

- **Static Deflection**

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

$$\delta = C_6 \pi^2 \frac{q \cdot L_{eff}^4}{E_{st} I_{st} \cdot (1 + CSF)} \cdot \frac{1}{(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}})} \quad (2.49)$$

Di mana,

- C_6 = *boundary condition coefficient*
- q = *deflection load unit per length* (N/m)
- P_{cr} = *critical buckling load* (N)
- I_{st} = Momen inersia pipa baja (m⁴)
- S_{eff} = *effective axial force* (N)

- **Effective Axial Force**

Pada dasarnya, ketika sebuah pipa bawah laut memiliki suatu penampang tertentu, memiliki nilai momen inersia dan kekakuan. Pipa bawah laut memiliki gaya pada poros-porosnya pipanya, gaya Tarik maupun gaya tekan pada ujung-ujungnya. *Effective axial force* merupakan gaya yang bekerja sejajar pada poros pipa bawah laut. Parameter *effective axial force* dijelaskan dalam Persamaan di bawah :

$$S = H - (1 - 2\nu) \cdot P \cdot (D)^2 - \alpha \cdot \Delta T \cdot A \quad (2.50)$$

Dimana :

- N_{tr} = Gaya axial pada dinding pipa (N)
- A_i = Luasan melintang pipa terdalam (m²)
- A_o = Luasan melintang pipa terluar (m²)
- A_s = Pipe steel cross section area (m²)
- ΔT = Temperature difference, (Temperature operasi – temperature di dasar laut) (°C)
- α_e = Temperature expansion coefficient (°C)

2.2.14.2 Panjang Effective Span

Analisa *free span* sudah diatur dalam DNV RP F 105 untuk digunakan sebagai acuan. Salah satu parameternya ialah Panjang efektif *span*. Panjang efektif *span* merupakan Panjang ideal span atau bentangan. Dalam studi kasus ini, Panjang actual *span* diasumsikan pada kondisi *fixed-fixed* dan untuk perhitungannya dijelaskan dalam persamaan di bawah ini

$$\frac{L_{eff}}{L} = \begin{cases} \frac{4,73}{-0,066\beta^2 + 1,02\beta + 0,63} & , \text{ untuk } \beta \geq 2,7 \\ \frac{4,73}{0,036\beta^2 + 0,6\beta + 1,0} & , \text{ untuk } \beta < 2,7 \end{cases} \quad (2.51)$$

Dengan,

$$\beta = \log_{10} \left(\frac{K \cdot L^4}{(1 + CSF) E_{st} I_{st}} \dots \right) \quad (2.52)$$

Di mana,

- L_{eff} = Panjang efektif *span* (m)
- L = Panjang actual *free span* (m)
- β = *Relative soil stiffness parameter*

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

CSF = Concrete stiffness factor

E_{st} = Young's modulus pipa baja (N/m²)

I_{st} = Momen inersia pipa baja (m⁴)

2.2.14.3 Panjang Maksimum Span

Pada *pipeline* yang mengalami kondisi *free span* terdapat Panjang maksimum yang diijinkan (*Allowable span length*). Panjang *span* maksimum pada kondisi *in-line* dan *cross-flow*. Dapat dihitung, perbedaan yang menjadi dasar kedua panjang span tersebut adalah pada frekuensi *natural* dan *reduced velocity*. Berdasarkan Guo dkk.(2005), untuk panjang *span* maksimum pada kondisi *crossflow* dapat ditentukan dengan persamaan seperti di bawah ini

$$L_c = \sqrt{\frac{C_e U_r D}{2\pi U_c} \sqrt{\frac{E I}{M_e}}} \quad (2.53)$$

Di mana,

L_C = panjang kritis *free span* (m)

f_n = reduced velocity

E_{pipa} = Modulus Young pipa (N/m²)

D = Diameter luar pipa (m)

I_{pipa} = Momen inersia pipa (m⁴)

M_e = Massa efektif pipa dalam air (Kg/m)

U_C = kecepatan arus efektif (m/sec)

Sementara untuk arah inline adalah :

$$L_c = \sqrt{\frac{C_e f_n}{2\pi} \sqrt{\frac{E I}{M_e}}} \quad (2.54)$$

Di mana,

L_C = panjang kritis *free span* (m)

f_n = frekuensi *natural* (Hz)

E_{pipa} = Modulus Young pipa (N/m²)

I_{pipa} = Momen Inertia pipa (m⁴)

M_e = Massa efektif pipa dalam air (Kg/m)

C_e = Konstanta ujung span

2.2.15 Kriteria Screening

Setelah mendapatkan nilai frekuensi natural pada arah inline maupun arah crossflow, langkah selanjutnya yang harus dilakukan adalah melakukan screening hasil dari frekuensi natural pipa tersebut pada arah *inline* maupun *crossflow* sesuai dengan standar DNV RP F105. Apabila kriteria screening tidak terpenuhi, maka . Untuk natural frekuensi arah *inline* , nilainya harus memenuhi kriteria sebagai berikut :

$$f_{n,IL} > \frac{U_{extreme} \times \gamma_{IL}}{VR, onset \times D} \quad (2.55)$$

Dimana :

- $f_{n,IL}$ = Frekuensi natural *in line*
- γ_{IL} = Screening factor untuk *inline*
- $U_{extreme}$ = Kecepatan arus ekstrim
- $V_{R,onset}^{IL}$ = Nilai onset inline untuk *reduced velocity*
- D_t = Diameter total pipa (m)
- L = Panjang aktual *freespan* pipa (m)
- $\bar{\alpha}$ = *Current flow ratio*

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

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \left(\frac{1}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{Untuk } K_{sd} < 0.4 \\ \left(\frac{0.6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{Untuk } 0.4 < K_{sd} \\ \left(\frac{2.2}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{Untuk } K_{sd} > 1.6 \end{cases} \quad (2.56)$$

Dimana :

- $\gamma_{on,IL}$ = Safety factor pada onset *inline*
- K_{sd} = Parameter stabilitas untuk perancangan (= K_s / γ_k)
- γ_k = Safety factor pada parameter stabilitas

Sedangkan untuk arah *crossflow* harus memenuhi kriteria di bawah,:

$$f_{n,CF} > \frac{U_{extreme} \times \gamma_{CF}}{2D} \quad (2.57)$$

Di mana,

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

γ_{CF} = *Safety Factor (cross-flow)*

Tabel 2. 6 Screening Factor (DNV RP F105, 2017)

γ_{IL}	1.4
γ_{CF}	1.4

Tabel 2. 7 General Safety Factor (DNV RP F105, 2017)

Safety factor	Safety class		
	Low	Normal	High
H	1	0.5	0.25
γ_k	1	1.15	1.3
γ_s	1.3		
$\gamma_{on, IL}$	1.1		
$\gamma_{on, CF}$	1.2		

2.2.16 Mitigasi (Penambahan *Support*)

Ketika pipa terbentang bebas di dasar laut, gaya hidrodinamis dari arus dan gelombang yang mengenai bentangan pipa bisa saja menimbulkan *vortex shedding*. *Vortex shedding* dapat menyebabkan kegagalan pada struktur apabila frekuensinya mendekati frekuensi natural dari struktur. Maka mitigasi perlu dilakukan untuk menghindari kegagalan pada struktur pipa. Salah satu solusi dalam mitigasi pada *pipeline* yang mengalami kondisi *free span*, ialah *matresses*. Peletakkan *matresses* sendiri berguna untuk mengurangi jarak *free span* antar *pipeline* yang semula terjadi *free span* yang lebih Panjang. Jarak yang diperbolehkan untuk *free span* sendiri sudah diatur dalam DNV RP F 105.

Dalam mitigasi pada *pipeline* itu sendiri terdapat beberapa faktor-faktor penting yang harus diperhatikan dalam melakukannya, faktor-faktor tersebut sudah diatur dalam DNV RP F 105 seperti pada table di bawah :

Tabel 2. 8 Faktor Mitigasi Pada *Span Kritis*

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

2.2.17 Kriteria Ultimate Limit State

Buckling dapat disebabkan karna gaya-gaya yang terjadi seperti gaya axial, *bending*, dan tekanan dari dalam maupun luar. Diperlukan Analisis untuk memastikan apakah *pipeline* memenuhi kriteria dari *ultimate limit state* yang mengacu kepada DNV OS F 101. Dalam kriteria ULS ini, da 4 kriteria moda kegagalan yang harus dipenuhi sesuai persyaratan DNV OS F101 agar pipa dapat dikatakan aman dari kegagalan buckling, yaitu :

a. Perhitungan tekanan pengaman

$$P_b = \min(P_{b,s}, P_{b,u}) \quad (2.58)$$

$$P_{b,s} = \frac{2 \cdot t_1}{D - t_1} \cdot f_y \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (2.59)$$

$$P_{b,u} = \frac{2 \cdot t_1}{D - t_1} \cdot \frac{f_u}{1.15} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (2.60)$$

Dimana :

- $P_{b,s}$ = Yielding limit state
- $P_{b,u}$ = Bursting limit state
- f_y = Characteristic specified minimum yield strength (SMYS)
- f_u = Characteristic specified minimum tensile strength (SMTS)
- D = Nilai diameter terluar (m)
- t_1 = Ketebalan minimum, ($t_1 = t - t_{fab} - t_{corr}$)
- t_{fab} = Nilai toleransi ketebalan fabrikasi
- t_{corr} = Nilai ketebalan korosi

Tekanan yang mengalami perbedaan harus dianalisis untuk mengurangi terjadinya *buckling* pada pipeline. Perlu dilakukan *control system* pada tekanan yang bertujuan untuk melindungi tekanan dalam *pipeline* agar tidak berlebihan dari yang diijinkan. Tujuan dari perlindungan ini juga untuk melindungi system selama beroperasi dimana harga maksimum *incidental pressure* yang diijinkan sama dengan *incidental pressure* dikurang dengan toleransi kemanan tekanan system. Perbandingan dari rasio *incidental pressure* dan *design pressure* pada keadaan normal ialah sebesar 1.1, merupakan nilai maksimum dari yang diijinkan, sehingga kriteria untuk tekanan bursting ialah

$$P_{li} - P_e \leq \frac{P_b}{\gamma_m \cdot \gamma_{sc,pc}} \quad (2.61)$$

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

$$P_{li} = P_{inc} + \rho_{cont} \cdot g \cdot h \quad (2.62)$$

Dimana,

- P_{inc} = $P_d \cdot \gamma_{inc}$
- ρ_{cont} = Massa jenis fluida dalam pipa (kg/m³)
- h = Jarak vertical dari point referensi ke permukaan laut.
- P_d = Design Pressure

b. Kriteria beban berlebih kombinasi dari tekanan internal dan eksternal

Collapse pressure atau tekanan keruntuhan adalah tekanan yang diperlukan suatu pipa untuk mengalami perubahan bentuk (buckling). Nilai dari *collapse pressure* dapat ditemukan dengan persamaan berikut :

$$(P_c - P_{el}).(P_{c2} - P_{p2}) = P_c . P_{el} . P_p . f_o . \frac{D}{t} \quad (2.63)$$

Dimana,

$$P_{el} = \frac{2.E.(\frac{t}{D})^3}{1 - \nu^2} \quad (2.64)$$

$$P_p = 2 . f_y . \alpha_{fab} . \frac{t}{D} \quad (2.65)$$

$$f_o = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} \text{ (tidak kurang dari 0.005 atau 0.5%)} \quad (2.66)$$

Keterangan :

P_{el} = Elastic collapse pressure (N/m²)

P_p = Plastic collapse pressure (N/m²)

f_o = Ovality

D = Diameter terluar pipa (m)

t = Ketebalan pipa (m)

α_{fab} = Faktor fabrikasi

γ_m = Faktor daya tahan material

γ_{sc} = Faktor kelas keamanan

Tabel 2. 9 Faktor Fabrikasi Maksimum (DNV OS F101, 2000)

Pipe	Seamless	UO & TRB & ERW	UOE
α_{fab}	1.00	0.93	0.85

Tabel 2. 10 Faktor Ketahanan Material (DNV OS F101,2000)

Faktor ketahanan material	SLS/ULS/ALS	FLS
γ_m	1.15	1.00

Pemilihan faktor dalam kelas keamanan berdasarkan pada fluida yang dialirkan di dalam *pipeline* dan dampak langsung dan tidak langsung yang diakibatkan kepada manusia, lingkungan, dan yang lainnya. Berikut klasifikasi factor kelas keamanan berdasarkan DNV OS F101 :

Tabel 2. 11 Pemilihan Safety Class (DNV OS F101, 2000)

Safety class	Definition
Low	Dampak dari kegagalan yang ditimbulkan sangat kecil bagi manusia dan lingkungan. Digunakan untuk fase instalasi
Normal	Dampak dari kegagalan yang ditimbulkan cukup berpengaruh bagi manusia, lingkungan, ekonomi dan politik. Digunakan pada operasi diluar platform area
High	Dampak dari kegagalan sangat berpengaruh besar bagi manusia, lingkungan, ekonomi, dan politik. Digunakan pada keadaan dekat dengan pemukiman penduduk (± 500 m)

Tabel 2. 12 Faktor *Safety Class* (DNV OS F101, 2000)

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

Selanjutnya dengan memastikan tekanan eksternal tersebut aman atau tidak mengalami keruntuhan, di bawah merupakan kriteria yang harus terpenuhi.

$$P_e \leq \frac{P_c(t1)}{\gamma_m \gamma_{SC}} \quad (2.67)$$

Dimana :

- P_e = Tekanan eksternal maksimum (N/m²)
- P_c = Tekanan karakteristik keruntuhan (N/m²)
- C = Beban kombinasi lokal

2.2.18 Buckle Arrestor

Pada saat kondisi terjadinya perambatan *buckling* yang terjadi pada *pipeline* leih kecil nilainya jika dibandingkan dengan tegangan eksternal, maka *pipeline* harus dimitigasi sebagai langkah pertamanya. Pada kasus terjadinya perambatan *buckling*, *buckle arrestor* menjadi salah satu solusi pada permasalahan terkait. Ada beberapa jenis *buckle arrestor* yang digunakan untuk menghentikan perambatan buckling :

1. Heavy walled cylinder
2. Free ring arrestor
3. Welded ring arrestor

Dari tiga jenis *buckle arrestor* diatas, yang paling mudah dan umum untuk digunakan adalah jenis free ring arrestor. Buckle arrestor jenis ini memiliki beberapa keunggulan yaitu:

1. Mudah pengaplikasiannya
2. Tidak memerlukan proses pengelasan
3. *Lebih* banyak variative dalam pemilihan *grade*-nya karena tidak melalui proses pengelasan
4. Tidak ada konsentrasi tegangan yang berpengaruh pada penambahan kekakuan *pipeline*

Setelah itu diperlukan perhitungan desain *buckle arrestor*, berikut adalah persamaannya :

$$P_e \leq \frac{P_x}{1.1 \gamma_m \gamma_{SC}} \quad (2.68)$$

Dimana tekanan silang berlebihnya (P_x) adalah

$$P_x = P_{pr} + (P_{pr,BA} - P_{pr}) \left[1 - \exp\left(\frac{-20 t_2 L_{BA}}{D^2}\right) \right] \quad (2.69)$$

Dimana :

$P_{pr,BA}$ = kapasitas perambatan tekuk dari sebuah arrestor tidak terbatas

L_{BA} = panjang buckle arrestor (m)

Pada saat pemilihan jumlah dan jarak pemasangan dari *buckle arrestor* untuk dipasang guna menghentikan perambatan buckling disesuaikan dengan faktor-faktor terkait dan yang terpenting ialah dampaknya.

2.2.19 Tegangan-tegangan pada *pipeline*

Analisis yang dilakukan untuk tegangan pipa, menggunakan ketentuan yang harus divalidasi terhadap *code* pada desain pipa yang akan digunakan. Kombinasi tegangan yang bekerja pada dinding pipa akan menyebabkan regangan atau defleksi

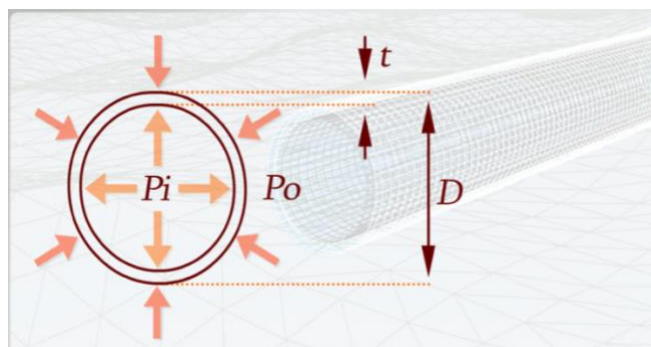
ASME B31.8 memberikan Batasan pada tegangan pipa yang terjadi pada pipa penyalur dengan menggunakan konsep *allowable stress*. Di bawah tegangan yang diizinkan oleh ASME B31.8

Tabel 2. 13 ASME B31.8

<i>Design Calculation</i>	<i>Allowable Stress</i>		
	<i>Hoop Stress</i>	<i>Longitudinal Stress</i>	<i>Combined Stress</i>
<i>Operation</i>	72% SMYS	80% SMYS	90% SMYS
<i>Hydrotest</i>	90% SMYS	72% SMYS	96% SMYS
<i>Installation</i>	72% SMYS	80% SMYS	90% SMYS

A. *Hoop Stress*

Tegangan *hoop* merupakan tegangan yang bekerja pada dinding pipa akibat adanya pengaruh tekanan dari sisi luar dan dalam pipa. Tegangan ini bekerja pada arah *tangensial* atau *circumferential* (Guo dkk., 2014). Ilustrasi tegangan *hoop* terdapat pada gambar di bawah :



Gambar 2. 7 Hoop Stress

ASME B31.8 merumuskan persamaan tegangan *hoop* yang dapat dilihat di bawah:

$$S_H = (P_i - P_e) \frac{D}{2 \cdot t} \leq F_1 \cdot SMYS. \quad (2.70)$$

Dimana:

- S_H = Hoop stress, psi (MPa)
- P_i = Tekanan internal (N/m²)
- P_e = Tekanan eksternal (N/m²)
- D = Diameter nominal luar pipa (N/m²)
- F_1 = Faktor desain dari *hoop stress*
- t = Ketebalan pipa
- S_y = Specified minimum yield strength, psi (MPa)

Tabel 2. 14 Faktor Desain Pipa (ASME B31.8, 2012)

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

B. Longitudinal Stress

Menurut Bai dan Bai, 2014, tegangan longitudinal merupakan tegangan aksial yang berkerja pada dinding pipa. Persamaan tegangan longitudinal dijelaskan dalam Persamaan di bawah ini :

$$S_L = S_a + S_b + S_p + S_t \quad (2.71)$$

Dimana :

- S_a = Tegangan aksial [tarik + atau tekan -] (Pa)
- $S_a = F_a / A$
- F_a = gaya aksial (N)
- A = Cross sectional area dari material pipa (m²)
- S_b = Maksimum resultant bending stress (Pa)

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

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

$$S_b = \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{z} \quad (2.72)$$

Di mana :

Z = Section modulus pipa (m³)

i_i = Faktor tekanan intensifikasi in-plane

i_o = Faktor tekanan intensifikasi out-plane

M_i = Bending moment in-plane

M_o = Bending moment out-plane

S_p = Tegangan longitudinal akibat tekanan internal (Pa) = 0.3 x S_H

S_t = Tegangan ekspansi thermal (Pa) = E.α.(T₁ - T₂)

T₁ = Temperatur saat instalasi (°C)

T₂ = Temperatur saat operasi (°C)

Nilai dari tegangan longitudinal harus memenuhi persyaratan berikut :

$$|S_L| \leq F_2 S_y$$

Dimana :

S_L = maximum longitudinal stress, psi [tarik + atau tekan -] (MPa)

F₂ = Desain factor *longitudinal stress*

C. Tegangan Kombinasi

Tegangan *von misses* atau tegangan kombinasi merupakan resultan dari tegangan-
tegangan yang terjadi pada pipa. Tegangan *von misses* dapat ditemukan setelah mendapatkan nilai tegangan hoop dan tegangan longitudinal. Persamaannya sebagai berikut :

$$S_v = \sqrt{S_h^2 + S_L^2 + S_h S_L} \quad (2.73)$$

dimana

S_v = *von misses stress*, psi (MPa)

S_h = *hoop stress*, psi (MPa)

$S_L = \text{Longitudinal stress, psi (MPa)}$

Nilai dari tegangan von mises harus memenuhi persamaan berikut :

$$|S_v| \leq F_3 S_y \quad (2.74)$$

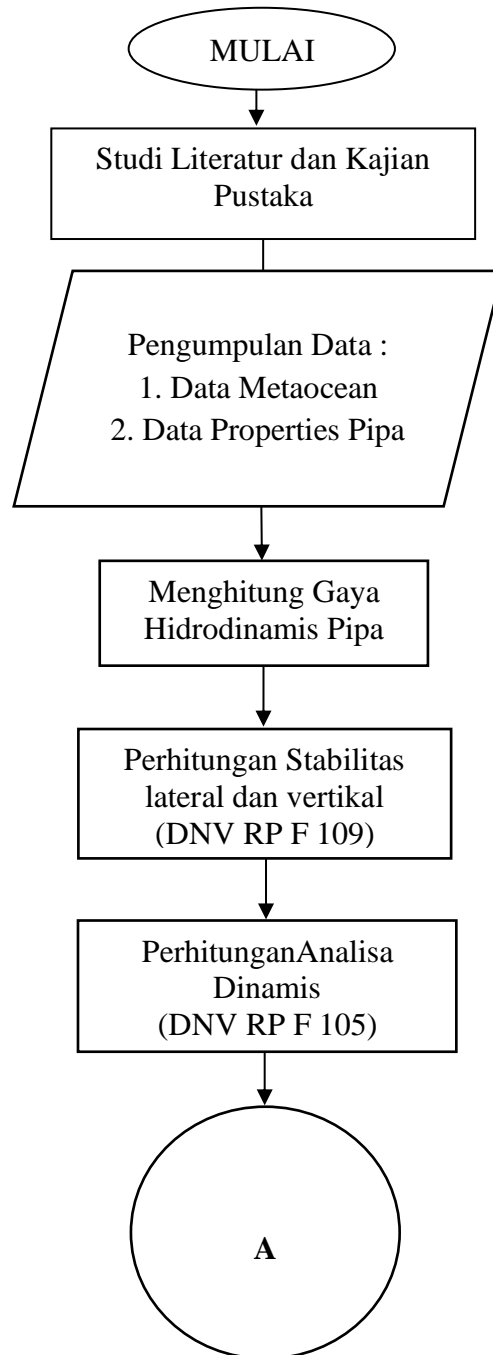
Dimana :

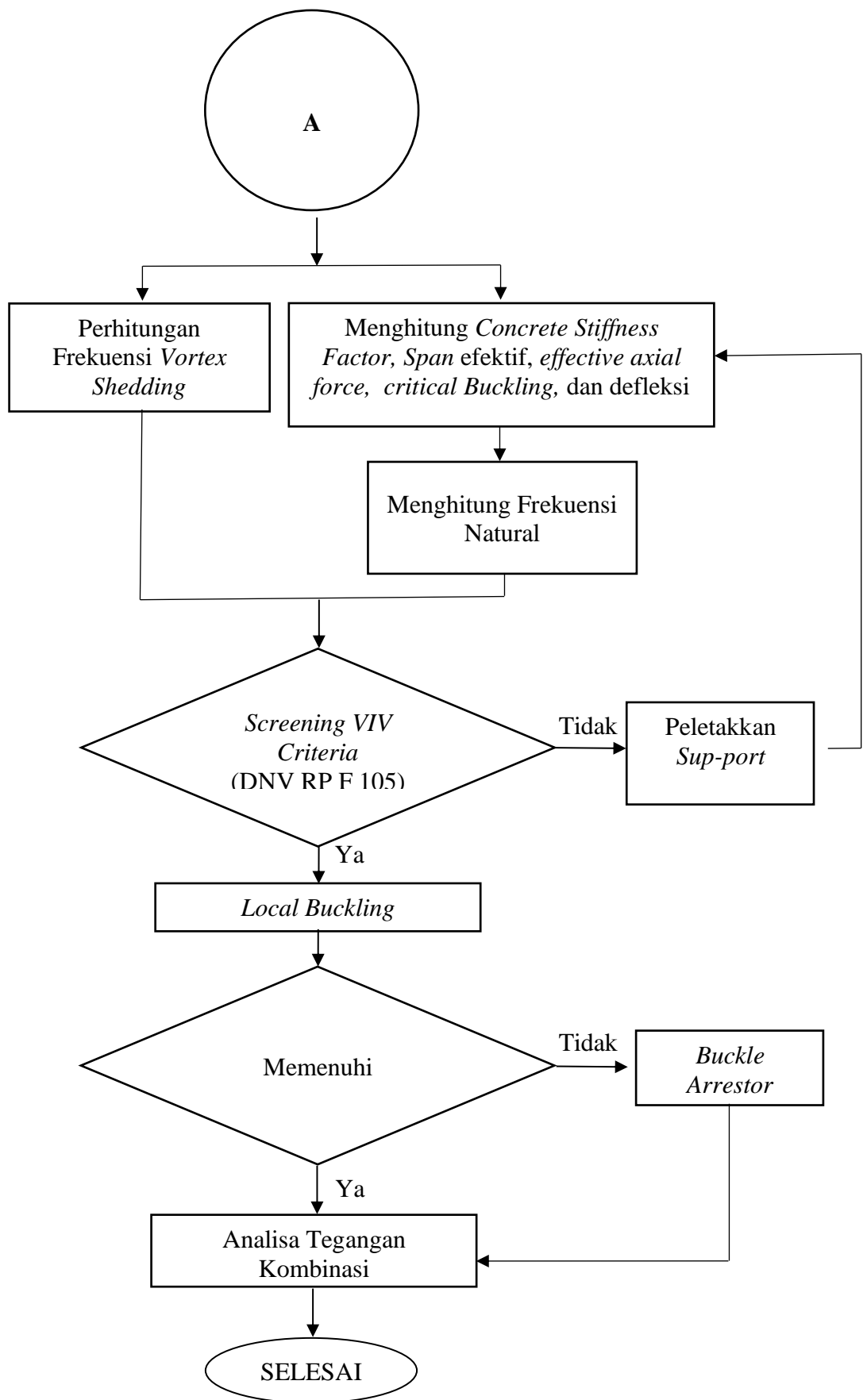
$F_3 = \text{desain factor } \textit{combined stress}$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3
METODE PENELITIAN

3.1 Skema Diagram Alir





3.2 Langkah-Langkah Pengerjaan

Penjabaran diagram diatas akan dijelaskan dalam langkah-langkah dibawah ini :

1. Studi literatur, buku, jurnal, penelitian ilmiah

Hal pertama yang dilakukan dalam mengerjakan tugas akhir ini ialah mempelajari studi literatur berupa jurnal, tugas akhir tahun sebelumnya, penelitian ilmiah dengan topik yang menyerupai, serta *codes & standart* yang diakui untuk digunakan menyelesaikan permasalahan yang terdapat dalam tugas akhir ini. literatur yang digunakan dalam mengerjakan tugas akhir ini mempunyai keterkaitan dengan pipa bawah lautm *on-bottom stability*, dan yang pasti tentang *free span*.

2. Pengumpulan data: data pipa, data lingkungan

Data *pipeline* yang akan digunakan dalam penyelesaian tugas akhir ini adalah data *pipeline* yang berupa data *pipeline* properties, data lingkungan, serta yang pasti data *free span* yang terjadi pada *pipeline* tersebut, dan juga data-data penunjang yang digunakan dalam tugas akhir tersebut.

3. Perhitungan gaya hidrodinamis di sekitar pipa

Melakukan perhitungan hidrodinamis dari gaya-gaya yang bekerja karna adanya interaksi antara *pipeline* dengan aliran laut yang berada di sekitar pipa dan gaya-gaya tersebut dapat mempengaruhi kestabilan dari *pipeline* tersebut. Gaya-gaya hidrodinamis tersebut ialah gaya *drag*, gaya *lift*, gaya inersia.

4. Perhitungan Stabilitas Absolut Lateral dan Stabilitas Vertikal

Mengacu kepada DNV RP F 109 *On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines*, dimana keadaan *pipeline* harus memenuhi kriteria stabilitas lateral dan kriteria stabilitas vertikal yang mempunyai tujuan agar pipa tidak mengalami pengapungan saat diletakkan di bawah air dan pada saat operasi

5. Analisa Dinamis Span

Pada tahap ini dilakukan analisis dinamis mengacu pada kode DNV RP F 105. Dikarenakan pipa terbentang bebas , gaya hidrodinamis yang bekerja dapat menyebabkan *vortex shedding* pada pipa. Oleh karena itu, perlu dilakukan screening VIV apakah sesuai pada arah in line maupun cross flow. Apabila setelah dilakukan screening tidak memenuhi persyaratan, maka diperlukan mitigasi berupa pemasangan *mattresses*.

6. Analisa Statik Span

Mengacu kepada DNV RP F 105 dilakukannya analisis static pada span dimana kondisi *local buckling* harus memenuhi kriteria yang telah ditetapkan dalam Analisa statik span yang mengacu ke DNV RP F 105

7. Analisa Tegangan

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui tegangan-tegangan yang terjadi pada *pipeline* yang terkena *free span* pada kondisi operasi. Analisis tegangan-tegangan yang terjadi meliputi perhitungan tegangan *hoop*, tegangan longitudinal dan juga tegangan *von mises*. Setelah mendapatkan nilai dari tegangan-tegangan tersebut nilainya harus divalidasi sesuai dengan standar ASME B31.8 dengan kriteria *allowable stress design*

BAB 4

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

Lapangan Bekapai yang dikelola oleh PT. Pertamina Hulu Mahakam berada pada delta sungai mahakam, berada sekitar 60 KM dari Balikpapan. Pada lapangan bekapai ini terdapat beberapa *platform* untuk produksi minyak itu sendiri, pada kasus ini merujuk kepada *pipeline* penghubung antara *platform* BE-BA. *Pipeline* BE-BA menyalurkan hasil dari *platform* BE ke *platform* BA. *Pipeline* penyalur dari *platform* BE ke *platform* BA berjarak 1,9 KM dengan diameter 6 in. Setelah dari *platform* BA, produk disalurkan lagi ke *production platform* setelahnya dan kemudian dibawa ke terminal senipah.

Analisa yang akan dilakukan pada tugas akhir ini ialah analisis dari *on-bottom stability* pada *pipeline* BE-BA yang mengalami bentangan bebas dan juga analisis tegangan-tegangan yang bekerja pada *pipeline* yang mengalami bentangan bebas tersebut. Terdapat 9 titik bentangan bebas yang terjadi sepanjang *pipeline* BE-BA. Setelah dilakukan analisis didapatkan bahwa terdapat beberapa titik yang dianggap kritis. Di bawah ini merupakan data hasil analisis *survey freespan* dari FS-1 sampai FS-9

4.1.1 Data Pipeline

Tabel 4. 1 Properti Pipa

Parameter	Unit	Value
Outer Diameter (OD)	mm/inch	168,3/6,625
Wall Thickness (WT)	mm/inch	9,52/0,375
Corrosion Allowance	mm	1,63
Material Grade	-	API 5L X42
SMYS	Mpa	290
SMTS	Mpa	413
Density	kg/m ³	7850
Modulus of Elasticity	Gpa	199,25
Poissons's Ratio	-	0,3
Thermal Expansion Coefficient	/°C	4,17 x 10 ⁻⁵
Internal Diameter	mm/inch	158,78/6,25
Nominal Diameter	inch	6
Pipeline Length	km	1,9

Tabel 4. 2 Data *External Coating*

Description	Unit	Value
External anti-corrosion coating type	-	Ashpalt Enamel
External anti-corrosion coating thickness	mm	5,5
External anti-corrosion coating density	kg/m ³	1240
Concrete Coating Thickness	mm	25
Concrete Coating Density	kg/m ³	2240
Concrete Coating Cut Back Length	mm	350
Field Joint Infill Density	kg/m ³	1300

4.1.2 Data Lingkungan

Selain dari data properti pipa, terdapat data penunjang lainnya berupa data lingkungan dimana lokasi pipa tersebut ditempatkan, berikut adalah data lingkungan pipa di daerah delta mahakam.

Tabel 4. 3 Data *Water Depth* dan *Tidal Range*

Parameter	Water Level (m)
Highest Astronomical Tide (HAT)	2,60
Water Depth	29,5 - 33,5
Mean Sea Level (MSL)	1,1
Storm Surge 1-year RP	0,2
Storm Surge 10-year RP	0,4
Storm Surge 100-year RP	0.84

Tabel 4. 4 Data Properti Air Laut

Parameter	Unit	Value
Seawater Density	kg/m ³	1,025
Maximum Bottom Temperature	(°C)	28,6
Minimum Bottom Temperature	(°C)	26,8
Kinematic Viscosity of Seawater	m ² /s	1,05 x 10 ⁻⁶
Seawater Temperature	Surface (min/max)	(°C) 27,3/29,2
	Bottom (min/max)	(°C) 26,8/28,6
Seawater Salinity	Surface (min/max)	psu 32,1/34,2
	Bottom (min/max)	psu 33,3/34,3
Wind Temperature - min	(°C)	20
Wind Temperature - max	(°C)	33

Tabel 4. 5 Data Gelombang dan Arus

Description	Unit	Return Period (Year)		
		1	10	100
Significant Wave Height, Hs	m	1,8	2,7	3,4
Spectral Peak Period, Tp	s	6,5	7,5	8,2
Maximum Wave Height, Hmax	m	3,3	5,0	6,2
Period of Maximum Height, Tmax	s	6,9	7,9	8,6
U surface	m/s	0,9	1,1	1,35
U mid depth	m/s	0,65	0,75	0,9
U +1m asb	m/s	0,55	0,65	0,75

4.1.3 Data Tanah

Berikut data tanah tempat *pipeline* ditempatkan

Tabel 4. 6 Data Tanah

Description	Unit	Value
<i>Soil Type</i>	-	<i>Very Soft Clay</i>
<i>Seabed Rougness (Clay)</i>	m	5×10^{-6}
<i>Undrained Shear Strength</i>	kPa	0,6 - 2,4
<i>Soil Submerged Weight</i>	kPa	4,2
<i>Unit Weight</i>	γ (kN/m ³)	14,25

4.2 Pembahasan

Setelah semua data dikumpulkan, langkah selanjutnya ialah data-data tersebut akan diolah dan akan dilakukan analisis selanjutnya untuk menjawab permasalahan-permasalahan yang dikhususkan dalam tugas akhir ini.

4.2.1 Analisis Gelombang dan Arus

4.2.1.1 Spektra Jonswap

Spektrum gelombang digunakan untuk mencari kecepatan arus akibat gelombang dengan mengolah data dari gelombang. Berdasarkan DNV RP F109 mencari transformasi kecepatan gelombang menjadi kecepatan partikel di sekitar dasar laut dapat menggunakan spektrum JONSWAP.

Menurut DNV OS F101 data lingkungan yang dipakai dalam kondisi operasi ialah kombinasi antara data gelombang 10 tahunan dan arus 100 tahunan ataupun sebaliknya. Berdasarkan data-data gelombang yang sudah diberikan, dimana data gelombang 10 tahunan, nilai gelombangnya (H) adalah 2,70 m dengan periode (T) 7,50 s serta kedalaman (d) sebesar 33,5 m. Kemudian untuk data 100 tahunannya, nilai gelombangnya (H) sebesar 3,4 m dengan periode (T) 8,2 s dan kedalaman (d) sebesar 33,5. Dari data gelombang yang telah diberikan, diolah untuk mencari parameter-parameter perhitungan spektrum JONSWAP pada Tabel di bawah

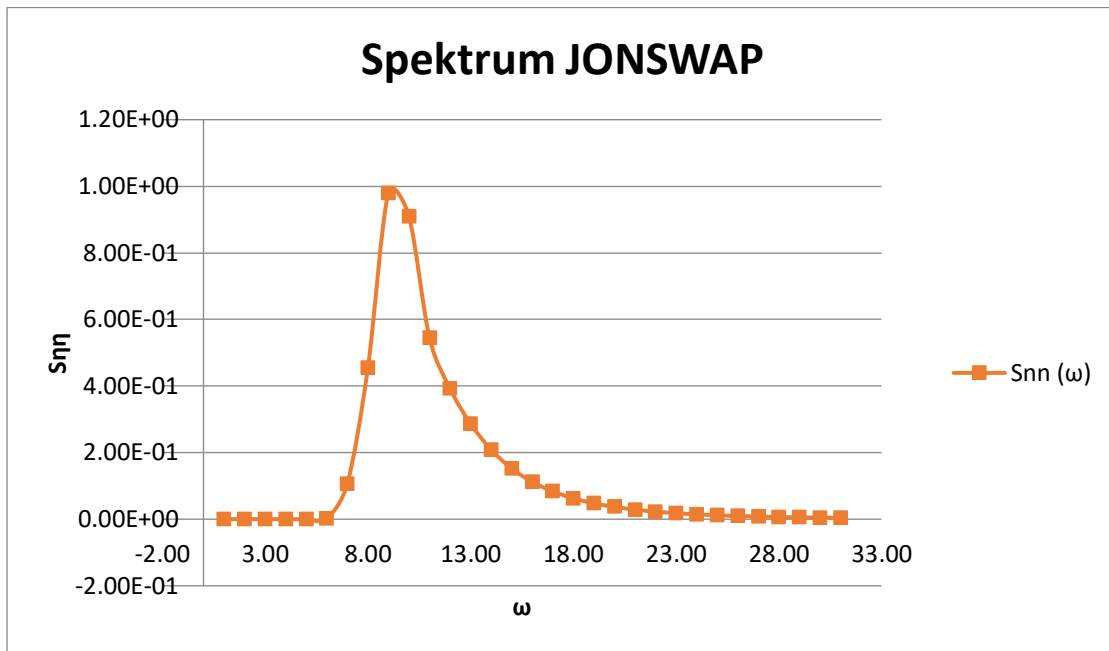
Tabel 4. 7 Data Parameter JONSWAP

Parameter JONSWAP				
Parameter	Notasi	Nilai (10 Tahun)	Nilai (100 Tahun)	Satuan
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	2,7	3,4	m
Periode Gelombang Signifikan	T_p	7,5	8,2	s
Frekuensi Gelombang Signifikan	ω_s	0,84	0,77	rad/s
Percepatan Gravitasi	g	9,8	9,8	m/s
Periode Gelombang Maksimum	T_{max}	7,9	8,6	s
Frekuensi Puncak Gelombang	ω_p	0,84	0,77	rad/s
Fungsi Distribusi	φ	4,56	4,45	
Peakedness Parameter	γ	1,6503579	1,8886541	
Konstanta Generalized Philips	α	0,00998	0,01058	
LN Peakedness Parameter	$LN(\gamma)$	0,50099	0,63586	

Setelah mendapatkan parameter tersebut, parameter tersebut digunakan untuk menghitung spektrum energi dengan menggunakan persamaan spektrum energi JONSWAP dengan persamaan seperti di bawah

$$S_{jn}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-4}\right] \gamma \exp\left[-0,5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \cdot \omega_p}\right)^2\right]$$

Setelah digunakannya spektrum energi JONSWAP, maka didapatkan hasil seperti pada Tabel 4.8 di bawah. Hasil tersebut kemdian di *plot* ke dalam grafik



Gambar 4.1 Grafik Spektrum Energi JONSWAP

Setelah mendapatkan nilai dari spektra gelombang JONSWAP yang ditampilkan pada tabel di atas maka dilanjutkan dengan mencari nilai angka gelombang (K). Angka gelombang merupakan salah satu variabel yang digunakan untuk mentransformasikan gelombang permukaan ke gelombang di elevasi pipa. Di dapatkan nilai angka gelombang (K) sebesar **0,072584** setelah dilakukannya iterasi.

Tabel 4. 8 Spektrum Gelombang JONSWAP

ω	σ	Snn (ω)
0,00	0,07	0,00E+00
0,10	0,07	0,00E+00
0,20	0,07	2,23E-164
0,30	0,07	3,84E-31
0,40	0,07	3,36E-09
0,50	0,07	1,62E-03
0,60	0,07	1,07E-01
0,70	0,07	4,54E-01
0,80	0,07	9,80E-01
0,90	0,09	9,09E-01
1,00	0,09	5,45E-01
1,10	0,09	3,92E-01
1,20	0,09	2,87E-01
1,30	0,09	2,09E-01
1,40	0,09	1,52E-01
1,50	0,09	1,12E-01

ω	σ	Snn (ω)
1,60	0,09	8,34E-02
1,70	0,09	6,29E-02
1,80	0,09	4,80E-02
1,90	0,09	3,70E-02
2,00	0,09	2,89E-02
2,10	0,09	2,28E-02
2,20	0,09	1,82E-02
2,30	0,09	1,46E-02
2,40	0,09	1,18E-02
2,50	0,09	9,68E-03
2,60	0,09	7,98E-03
2,70	0,09	6,62E-03
2,80	0,09	5,53E-03
2,90	0,09	4,64E-03
3,00	0,09	3,92E-03

Selanjutnya nilai K dimasukkan ke dalam *transfer function* G, dengan menggunakan formula pada 2.16 dan didapat nilai *transfer function* G pada Tabel 4.9 di bawah

Tabel 4. 9 Nilai Fungsi G

W	sinh(k.d)	g(w)
0	5,65755102	0,0000
0,1	5,65755102	0,0177
0,2	5,65755102	0,0354
0,3	5,65755102	0,0530
0,4	5,65755102	0,0707
0,5	5,65755102	0,0884
0,6	5,65755102	0,1061
0,7	5,65755102	0,1237
0,8	5,65755102	0,1414
0,9	5,65755102	0,1591
1	5,65755102	0,1768
1,1	5,65755102	0,1944
1,2	5,65755102	0,2121
1,3	5,65755102	0,2298
1,4	5,65755102	0,2475
1,5	5,65755102	0,2651

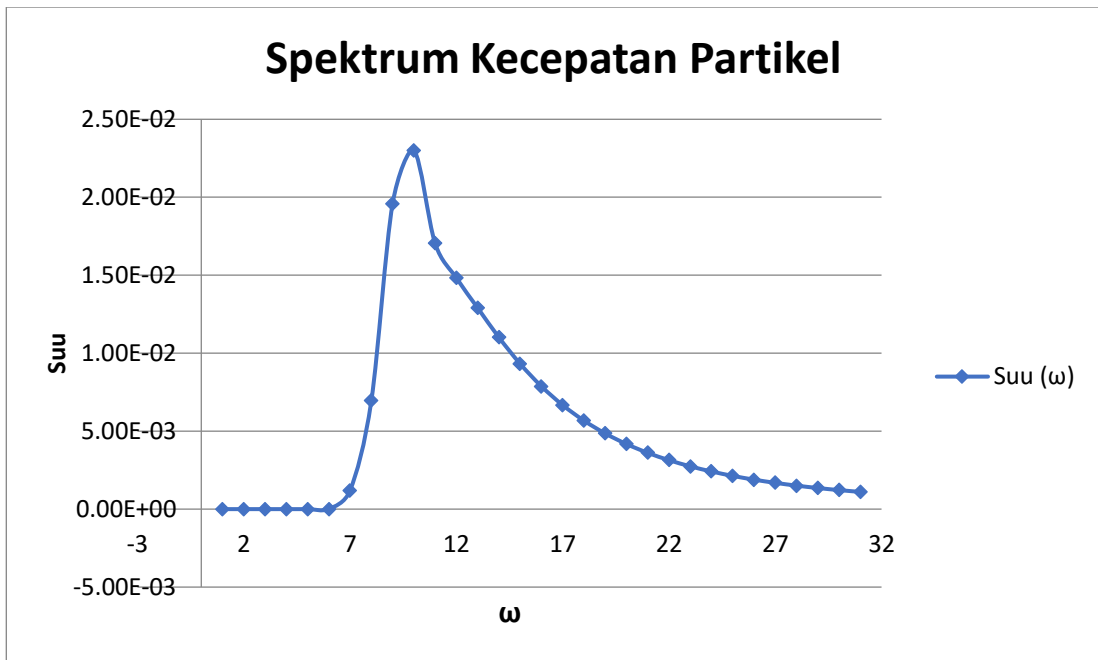
w	sinh(k.d)	g(w)
1,6	5,65755102	0,2828
1,7	5,65755102	0,3005
1,8	5,65755102	0,3182
1,9	5,65755102	0,3358
2	5,65755102	0,3535
2,1	5,65755102	0,3712
2,2	5,65755102	0,3889
2,3	5,65755102	0,4065
2,4	5,65755102	0,4242
2,5	5,65755102	0,4419
2,6	5,65755102	0,4596
2,7	5,65755102	0,4772
2,8	5,65755102	0,4949
2,9	5,65755102	0,5126
3	5,65755102	0,5303

Spektrum energi dan *transfer function* G diperoleh, selanjutnya nilainya akan digunakan untuk mencari nilai spektrum kecepatan partikel air di dasar laut akibat gelombang di permukaan laut menggunakan persamaan 2.15 dan ditampilkan pada Tabel 4.10 di bawah

Tabel 4. 10 Nilai Spektrum Kecepatan Partikel

ω	σ	Snn (ω)	G(ω)	Y	G(ω) ²	Suu (ω)	FS	M0	M1	M2	M4
0,00	0,07	0,00000	0,00000	1,65	0,00000	0,00000	1	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,10	0,07	0,00000	0,01768	1,65	0,00031	0,00000	4	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,20	0,07	0,00000	0,03535	1,65	0,00125	0,00000	2	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,30	0,07	0,00000	0,05303	1,65	0,00281	0,00000	4	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,40	0,07	0,00000	0,07070	1,65	0,00500	0,00000	2	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,50	0,07	0,00162	0,08838	1,65	0,00781	0,00001	4	0,00005	0,00003	0,00001	0,00000
0,60	0,07	0,10681	0,10605	1,65	0,01125	0,00120	2	0,00240	0,00144	0,00086	0,00031
0,70	0,07	0,45415	0,12373	1,65	0,01531	0,00695	4	0,02781	0,01947	0,01363	0,00668
0,80	0,07	0,97990	0,14140	1,65	0,02000	0,01959	2	0,03919	0,03135	0,02508	0,01605
0,90	0,09	0,90910	0,15908	1,65	0,02531	0,02301	4	0,09202	0,08282	0,07454	0,06038
1,00	0,09	0,54541	0,17675	1,65	0,03124	0,01704	2	0,03408	0,03408	0,03408	0,03408
1,10	0,09	0,39224	0,19443	1,65	0,03780	0,01483	4	0,05931	0,06524	0,07177	0,08684
1,20	0,09	0,28693	0,21211	1,65	0,04499	0,01291	2	0,02582	0,03098	0,03718	0,05354
1,30	0,09	0,20859	0,22978	1,65	0,05280	0,01101	4	0,04405	0,05727	0,07445	0,12582
1,40	0,09	0,15219	0,24746	1,65	0,06123	0,00932	2	0,01864	0,02609	0,03653	0,07160
1,50	0,09	0,11204	0,26513	1,65	0,07030	0,00788	4	0,03150	0,04725	0,07088	0,15948
1,60	0,09	0,08341	0,28281	1,65	0,07998	0,00667	2	0,01334	0,02135	0,03416	0,08744
1,70	0,09	0,06286	0,30048	1,65	0,09029	0,00568	4	0,02270	0,03859	0,06561	0,18962
1,80	0,09	0,04795	0,31816	1,65	0,10123	0,00485	2	0,00971	0,01747	0,03145	0,10191
1,90	0,09	0,03701	0,33583	1,65	0,11278	0,00417	4	0,01670	0,03173	0,06028	0,21761
2,00	0,09	0,02889	0,35351	1,65	0,12497	0,00361	2	0,00722	0,01444	0,02888	0,11554
2,10	0,09	0,02279	0,37119	1,65	0,13778	0,00314	4	0,01256	0,02638	0,05540	0,24429
2,20	0,09	0,01816	0,38886	1,65	0,15121	0,00275	2	0,00549	0,01208	0,02658	0,12865
2,30	0,09	0,01460	0,40654	1,65	0,16527	0,00241	4	0,00965	0,02220	0,05107	0,27016
2,40	0,09	0,01184	0,42421	1,65	0,17996	0,00213	2	0,00426	0,01023	0,02456	0,14144
2,50	0,09	0,00968	0,44189	1,65	0,19526	0,00189	4	0,00756	0,01891	0,04728	0,29549
2,60	0,09	0,00798	0,45956	1,65	0,21120	0,00169	2	0,00337	0,00876	0,02278	0,15400
2,70	0,09	0,00662	0,47724	1,65	0,22776	0,00151	4	0,00603	0,01628	0,04396	0,32046
2,80	0,09	0,00553	0,49491	1,65	0,24494	0,00135	2	0,00271	0,00758	0,02123	0,16643
2,90	0,09	0,00464	0,51259	1,65	0,26275	0,00122	4	0,00488	0,01415	0,04105	0,34519
3,00	0,09	0,00392	0,53026	1,65	0,28118	0,00110	1	0,00110	0,00331	0,00993	0,08937

Hasil perhitungan dari momen spektra akan digunakan untuk mencari nilai kecepatan yang signifikan, periode gelombang, kecepatan, dan periode saat kondisi ekstrem (badai) kecepatan partikel, dan juga untuk menghitung kecepatan arus. Nilai-nilai dari parameter lain momen spektra dilihat di Tabel 4.11 di bawah



Gambar 4.2 Grafik Spektrum Kecepatan Partikel

Tabel 4. 11 Nilai Momen Spektra Gelombang

Momen Spektra Gelombang	
$M_0 = 1/3 \times \Delta\omega \times \Sigma M_0$	8,4E-03
$M_1 = 1/3 \times \Delta\omega \times \Sigma M_1$	1,1E-02
$M_2 = 1/3 \times \Delta\omega \times \Sigma M_2$	1,7E-02
$M_4 = 1/3 \times \Delta\omega \times \Sigma M_4$	5,8E-02

Setelah mendapatkan nilai-nilai dari momen spektra gelombang, akan dapat ditemukan nilai-nilai dari kecepatan signifikan, periode gelombang, serta kecepatan partikel gelombang dengan persamaannya masing-masing

Tabel 4. 12 Kecepatan Partikel Arus Akibat Gelombang

Kecepatan Arus Akibat Gelombang 10 Tahun			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Kec. Arus Signifikan pada Elevasi Pipa	U_s	0,183	m/s
Mean Zero-Up Crossing Period	T_u	4,445	s
Reduction Factor	R_D	1	-
Kecepatan Arus Partikel Akibat Gelombang	U_w	0,174	m/s

Sementara, untuk kecepatan partikel arus akibat gelombang pada kondisi badai disajikan pada Tabel 4.13 di bawah ini :

Tabel 4. 13 Kecepatan Partikel Arus Akibat Gelombang Kondisi Badai

Kecepatan Arus Akibat Gelombang Kondisi Badai 10 Tahun			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Mean Zero-Up Crossing Period	T_u	4,443	s
Periode Gelombang Badai	T_{storm}^*	10800	s
Angka Osilasi pada Desain Spektra	τ	2430,716	-
Kecepatan Partikel Arus Akibat Gelombang Kondisi Badai	U_w^*	0,375	m/s

4.2.1.2 Kecepatan Arus Partikel

Kecepatan arus yang bekerja pada *pipeline* akan transformasikan menjadi kecepatan arus partikel. Kecepatan arus partikel dapat tereduksi karna adanya efek dari dasar laut dan arah arus sendiri, sehingga kecepatan arus partikel dapat dihitung menggunakan persamaan 2.26 dengan menggunakan sudut datang paling kritis, yaitu 90°. Nilai kecepatan arus tiap titik span disajikan pada Tabel 4.14 di bawah, perlu diingat bahwa kecepatan yang dihitung adalah kecepatan arus 100 tahunan, berdasarkan kepada DNV OS F101 untuk fase operasi.

Tabel 4. 14 Kecepatan Arus Partikel

No. Free Span	Gap (e) [m]	Kec. Arus pada Ketinggian 1 m di atas seabed 100 Tahun (V(zr)) [m/s]	Elevasi di Atas Dasar Laut (z) [m]	Kec. Arus Efektif 100 tahun [m/s]
FS-1	0,2	0,75	0,330	0,682
FS-2	0,3	0,75	0,430	0,698
FS-3	0,2	0,75	0,330	0,682
FS-4	0,3	0,75	0,430	0,698
FS-5	0,3	0,75	0,430	0,698
FS-6	0,2	0,75	0,330	0,684
FS-7	0,3	0,75	0,430	0,700
FS-8	0,2	0,75	0,330	0,684
FS-9	0,5	0,75	0,630	0,724

4.2.2 Perhitungan Berat Terendam dan Massa Efektif pada Pipa

Selanjutnya analisa yang akan dihitung ialah menghitung *submerged weight* dari *pipeline* yang akan digunakan untuk perhitungan selanjutnya, ialah perhitungan *on-bottom stability* pada *pipeline* ketika fase operasi. Dalam kasus ini yang akan dianalisa ialah *pipeline* BE-BA milik PT. Pertamina Hulu Mahakam Lapangan Bekapai.

Untuk mendapatkan nilai dari *submerged weight* dari *pipeline* tersebut didapatkan dari akumulasi berat pipa, berat *coating*, berat *concrete*, dan berat *fluida*/produk yang mengalir di dalam *pipeline* BE-BA tersebut kemudian dikurangi dengan *bouyancy* dari *pipeline* itu sendiri. Di bawah merupakan hasil dari perhitungan *submerged weight*.

Tabel 4. 15 *Submerged Weight*

No.	Deskripsi	Notasi	Nilai	Satuan
1	Massa Konten Pipa	M_{fluida}	2,28	N/m
2	Massa Pipa Baja	M_{st}	19,15	N/m
3	Massa Lapisan Anti Korosi	M_{corr}	5,44	N/m
4	Massa Lapisan Concrete	M_{ccc}	58,60	N/m
5	Massa Struktur Pipa	M_{str}	83,19	N/m
6	Massa Displacement	M_{disp}	54,15	N/m
7	Gaya Apung	F_b	2829,26	N/m
8	Berat Terendam Pipa	W_{sub}	337,24	N/m

Selanjutnya perhitungan massa efektif diperhitungkan dengan menjumlahkan berat pipa, berat *concrete*, dan berat *coating* dengan massa tambah (pada persamaan 2.36). Massa tambah didapatkan dari persamaan 2.41, sebelum nantinya massa efektif akan dibutuhkan untuk menghitung frekuensi natural pada pipa. Hasil analisis massa efektif dapat dilihat pada tabel di bawah ini

Tabel 4. 16 Massa Efektif

No. Free Span	Massa Struktur Pipa [Kg/m]	Massa Bouyancy [kg/m]	Massa Tambah [kg/m]	Massa Efektif [kg/m]
FS-1	83,19	54,149	69,277	154,750
FS-2	83,19	54,149	54,149	139,622
FS-3	83,19	54,149	54,149	139,622
FS-4	83,19	54,149	54,149	139,622
FS-5	83,19	54,149	54,149	139,622
FS-6	83,19	54,149	54,149	139,622
FS-7	83,19	54,149	54,149	139,622
FS-8	83,19	54,149	54,149	139,622
FS-9	83,19	54,149	53,568	139,040

4.2.3 Kriteria On-Bottom Stability

Berdasarkan DNV RP F109 untuk menghindari terjadinya pengapungan *pipeline* pada saat beroperasi di dalam air, *pipeline* harus memenuhi kriteria stabilitas *vertical* dan juga *pipeline* harus memenuhi kriteria absolut statis untuk perpindahan *pipeline* secara lateral berdasarkan penyamaan gaya yang memastikan gaya tahanan *pipeline* cukup untuk bertahan terhadap beban hidrodinamis maksimum yang bekerja di sekitar *pipeline*. Beban secara vertikal dan horizontal harus dihitung terlebih dahulu sebelum menghitung kriteria *on-bottom stability*

Nilai untuk *peak horizontal load coefficient* (C_y^*) dan *peak vertical load coefficient* (C_z^*) didapat dari DNV RP F109 dan ditampilkan di bawah. Setelah dilakukannya interpolasi maka akan didapat nilai C_y^* dan juga nilai C_z^*

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

Gambar 4.3 Nilai C_Y^*

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

Gambar 4.4 Nilai C_Z

Di dapatkan nilai-nilai C_Y^* , C_Z^* berdasarkan tabel di atas dan nilai F_y dan F_z menggunakan persamaan 2.33 dan 2.34. Hasilnya tertera pada Tabel 4.17 di bawah ini :

Tabel 4. 17 Nilai Beban Maksimum Horizontal dan Vertikal

C_Y^*	C_Z^*	F_y^*	F_z^*
1,07	0,93	149,229	148,178

Sehingga dapat menggunakan persamaan 2.30, 2.31, dan persamaan 2.3. Nilai kriteria desain stabilitas vertikal dan absolut lateral pada *on-bottom stability* pada *pipeline* menjadi

Tabel 4. 18 Kriteria Stabilitas Vertikal dan Absolut Lateral

Stabilitas	Nilai	Batas	Kondisi
Vertikal	0,562	≤ 1	OK !
Absolut Lateral	0,557		
	0,435		

Berdasarkan perhitungan di atas, didapatkan nilai dari stabilitas vertikal, sebesar 0,983. Dari nilai tersebut dapat disimpulkan bahwa *pipeline* tidak mengalami pengapungan ketika berada di dasar laut karena telah memenuhi kriteria dari stabilitas vertikal, yaitu ≤ 1.0 .

Untuk stabilitas absolut lateral, nilai faktor keamanan yang digunakan pada saat badai di North Sea, sebesar 1,5. Maka didapat hasilnya sebesar 0,80 untuk pergerakan stabilitas kearah vertikalnya dan untuk pergerakan stabilitas kearah horizontalnya sebesar 0,615 dimana telah memenuhi dari kriteria stabilitas absolut lateral, yaitu ≤ 1.0 yang mana keduanya telah memenuhi *code* DNV RP F 109

4.2.4 Parameter Vortex Induced Vibration

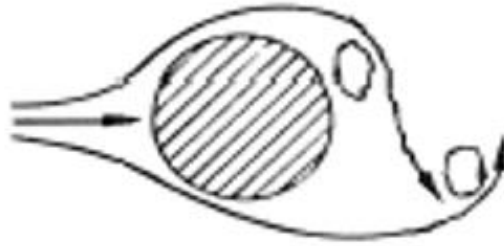
Tahap selanjutnya menganalisa respon dinamik dari *pipeline*, sebelum tahap tersebut harus menganalisa parameter *vortex induced vibration* terlebih dahulu untuk mengetahui bentuk aliran yang terjadi di sekitar *pipeline*. Terdapat tiga parameter *vortex induced vibration*, yaitu parameter stabilitas (K_s), *reduced velocity* (U_r), dan *Reynold Number* (RE)

4.2.4.1 Reynold Number

Pada analisis ini menghitung harga *Reynold Number* (RE) dengan menggunakan persamaan 2.36. Hasil dari perhitungan *Reynold Number* (RE) akan digunakan untuk menggambarkan aliran yang terjadi di belakang struktur *pipeline*. Berikut adalah hasil dari perhitungan *Reynold Number*,

Tabel 4. 19 Nilai *Reynold Number* (RE)

No. Free Span	<i>Reynold Number</i> (RE)
FS-1	169740,45
FS-2	173808,24
FS-3	169740,45
FS-4	173808,24
FS-5	173808,24
FS-6	170372,14
FS-7	174439,93
FS-8	170372,14
FS-9	180308,02



Gambar 4.5 Ilustrasi Bentuk Aliran (Lienhard, 1966)

Dari hasil perhitungan *Reynold Number* di atas, akan diketahui ilustrasi bentuk aliran yang terbentuk di belakang struktur *pipeline fully turbulent* dikarenakan hasil dari perhitungan *Reynold Number* berkisar di rentang $300 < RE < 3 \times 10^5$. Dari analisis hasil *reynold number* tersebut dapat diketahui bahwa fenomena terbentuknya *vortex* di belakang silinder yang membentuk atau memisahkan aliran sehingga terlihat aliran sepenuhnya menjadi *turbulent* atau tidak teratur.

4.2.4.2 Parameter Stabilitas

Parameter stabilitas mempunyai kriteria VIV yang akan terjadi pada *pipeline* apabila nilai Parameter Stabilitas dan nilai *Reduced Velocity* memenuhi kriteria di bawah :

Inline : $K_s < 12$, $1.2 < U_r < 3.5$

Crossflow : $K_s < 16$, $3.5 < U_r < 10$

Maka dengan persamaan 2.35 nilai parameter stabilitas (K_s) menjadi

Tabel 4. 20 Parameter Stabilitas (K_s)

No Free Span	K_s
FS-1	0,51
FS-2	0,51
FS-3	0,51
FS-4	0,51
FS-5	0,51
FS-6	0,51
FS-7	0,51
FS-8	0,51
FS-9	0,47

Sementara untuk nilai *Reduced Velocity* didapatkan dari nilai grafik 2.2 dan grafik 2.3 dengan memasukkan nilai dari Parameter Stabilitas (K_s) dan *Reynold Number* (RE)

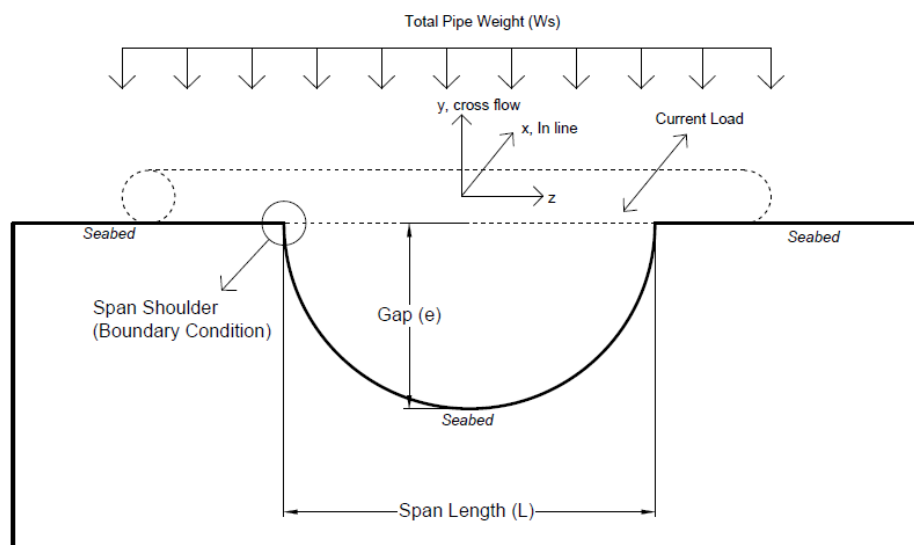
Tabel 4. 21 Nilai Ur

Ur In line	Ur Crossflow
1,60	5,90

Dari hasil kedua parameter di atas yang disajikan dalam Tabel 4.20 dan Tabel 4.21, dapat disimpulkan bahwa *pipeline* akan mengalami *Vortex Induced Vibration* karena angka dari hasil tersebut telah memenuhi kriteria yang menjadi syarat terjadinya *Vortex Induced Vibration* (VIV)

4.2.5 Analisa Dinamis *Freespan*

Frekuensi natural dan perhitungan *Vortex Shedding* menjadi hal utama yang akan dianalisis dalam analisa dinamis ini. Nilai dari Frekuensi natural dan *Vortex Shedding* akan di *screening* sesuai dengan kriteria DNV RP1 F105 untuk menentukan apakah diperlukan mitigasi pada titik span yang dianggap kritis. Diperlukan beberapa variabel pendukung yang nantinya digunakan untuk menghitung Frekuensi natural dari *pipeline*, yaitu *Concrete Stiffness Factor* (CSF), Panjang Span Efektif (L_{eff}), *Effective Axial Force* (S_{eff}) *Critical Buckling* (P_{cr}), dan Defleksi.



Gambar 4.6 Ilustrasi *Free Span*

4.2.5.1 Concrete Stiffness Factor (CSF)

Hasil perhitungan *concrete stiffness factor* akan menunjukkan kekakuan dari lapisan *concrete relative* terhadap kekakuan pipa baja. Dalam perhitungan *concrete stiffness factor* terdapat beberapa variabel yang diperlukan untuk menghitungnya.

Tabel 4. 22 Parameter Concrete Stiffness Factor

Parameter Concrete Stiffness Factor			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Konstanta Empiris (Asphalt)	k_c	0,330	-
Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	0,000	m ⁴
Momen Inersia Selimut Beton	I_{conc}	0,000	m ⁴
Young's Modulus Pipa Baja	E_{st}	207000	Mpa
Young's Modulus Selimut Beton	E_{conc}	30242,521	Mpa
Kekuatan Material Selimut Beton	f_{cn}	40	Mpa

Di dapatkan nilai perhitungan *concrete stiffness factor* menggunakan persamaan 2.46 dimana hasil perhitungan *concrete stiffness factor* sebagai berikut

Tabel 4. 23 Nilai Concrete Stiffness Factor (CSF)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Concrete Stiffness Factor	CSF	0,783	-

4.2.5.2 Panjang Span Efektif (Leff)

Panjang dari bentangan bebas pipa sendiri merupakan salah satu dari parameter perhitungan analisis dinamis pada pipa tersebut, karena panjang span efektif dapat mempengaruhi frekuensi natural itu sendiri. Pada tugas akhir ini tumpuan pada ujung-ujung pipa diasumsikan dengan tumpuan *fixed-fixed*.

Tabel 4. 24 Panjang Span Efektif (Leff)

No. Free Span	Panjang Span (L) [m]	β Crossflow	β Inline	Leff Cross Flow [m]	Leff In-Line [m]
FS-1	16,20	0,99	0,90	16,200	16,200
FS-2	20,20	1,37	1,28	20,200	20,200
FS-3	19,50	1,31	1,22	19,500	19,500
FS-4	16,30	1,00	0,91	16,300	16,300
FS-5	8,60	-0,11	-0,20	8,600	8,600
FS-6	9,10	-0,02	-0,10	9,100	9,100
FS-7	18,00	1,17	1,08	18,000	18,000
FS-8	6,50	-0,60	-0,69	6,500	6,500
FS-9	8,20	-0,20	-0,29	8,200	8,200

Panjang span efektif ini sendiri ditinjau berdasarkan arah in-line dan juga pada arah cross flow. DNV RP F105 telah men-state bahwa panjang span efektif sama dengan panjang span actual pada tumpuan fixed-fixed. Pada Tabel 4.24 merupakan hasil perhitungan dari panjang span efektif dalam tugas akhir ini pada arah in-line dan arah cross flow.

4.2.5.3 Effective Axial Force (Seff)

Effective axial force dapat mempengaruhi besar dari frekuensi pipa bawah laut. *Effective axial force* juga merupakan salah satu parameter untuk perhitungan analisis dinamis pada pipa bawah laut dalam tugas akhir ini. Pada tabel di bawah merupakan parameter-parameter yang diperlukan untuk perhitungan *effective axial force*

Tabel 4. 25 Parameter Effective Axial Force (Seff)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas Air Laut	Pw	1025	
Kedalaman Air Laut	h	33,5	
Percepatan Gravitasi	g	9,81	
Tekanan Internal Desain	Pi	5500000	
Tekanan Eksternal	Pe	3,E+05	
Perbedaan Tekanan		5163149,125	
parameter perhitungan effective axial force			
parameter	notasi	nilai	satuan
perbedaan tekanan		5,E+06	
poisson ratio baja	v	0,3	
diameter dalam pipa	Di	0,1587	
luas penampang internal pipa baja	Ai	0,045355253	
luas penampang pipa baja	Ast	0,007473418	
koefisien thermal expansion	Ae	0,0000117	
temperatur operasi	T1	84,7	
temperatur air laut	T0	28,6	
modulus young pipa baja	Est	1,98E+11	

Dari parameter-parameter di atas didapatkan hasil *effective axial force* sebesar - 1.06E+05 N menggunakan formula pada 2.50 dan disajikan pada Tabel 4.26

Tabel 4. 26 Hasil Analisa Effective Axial Force

Effective axial force (Seff)	
Nilai	Satuan
-1066544	N

4.2.5.4 Critical Buckling (Pcr)

Pipa bawah laut memiliki batas kekuatan tahanan terhadap beban yang mengenai struktur dari pipa bawah laut sebelum pipa bawah laut mengalami *buckling*. Perhitungan ini untuk menentukan berapa besar gaya untuk terjadinya *buckling* dari pipa bawah laut berdasarkan span yang ditinjau. Di bawah merupakan parameter-parameter lain selain span yang digunakan untuk menghitung *critical buckling*

Tabel 4. 27 Parameter Critical Buckling (Pcr)

Parameter	Notasi	Nilai	Ket
Modulus Young	E	2,E+11	Pa
Momen Inersia Pipa	I	0,000015	m ⁴
End Condition	Ce	3,56	Fixed-fixed

Tabel 4. 28 Boundary Condition fixed-fixed

Boundary Condition (Fixed-fixed)	
C1	3,56
C2	4
C3	0,2
C4	14,1
C5	0,083333333
C6	0,003

Berdasarkan asumsi yang digunakan dalam tugas akhir ini ialah menggunakan asumsi *fixed-fixed*, yaitu jepit yang merupakan tumpuan paling kaku diantara tumpuan yang lainnya. Untuk tumpuan *fixed-fixed* membatasi dalam gerakan translasi dan rotasi.

Tabel 4.29 di bawah merupakan hasil perhitungan *critical buckling load* pada arah *in-line* dan juga arah *crossflow*. *Critical buckling load* juga dapat mempengaruhi dari frekuensi natural dari pipa bawah laut sendiri.

Tabel 4. 29 Hasil Analisa Critical Buckling (Pcr)

No. Free Span	Panjang Span (L) [m]	Pcr Crossflow [N/m]	Pcr Inline [N/m]
FS-1	16,20	692847,16	692847,16
FS-2	20,20	445620,06	445620,06
FS-3	19,50	478187,53	478187,53
FS-4	16,30	684372,04	684372,04
FS-5	8,60	2458502,00	2458502,00
FS-6	9,10	2195759,07	2195759,07
FS-7	18,00	561206,20	561206,20
FS-8	6,50	4303687,77	4303687,77
FS-9	8,20	2704205,95	2704205,95

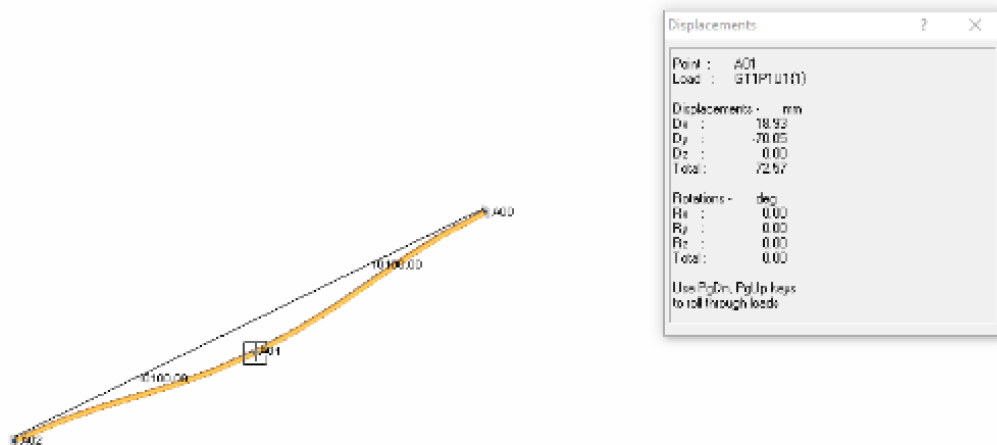
4.2.5.5 Defleksi

Pipa bawah laut yang mengalami bentangan bebas akan mengalami defleksi dari salah satunya beban yang bekerja pada bentangan bebas tersebut, selain itu terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi terjadinya defleksi pada pipa yang mengalami bentangan bebas, menggunakan formula 2.49 didapatkan hasil defleksi pada Tabel 4.30 di bawah. Perhitungan defleksi juga dianalisa pada arah *in-line* dan *crossflow*

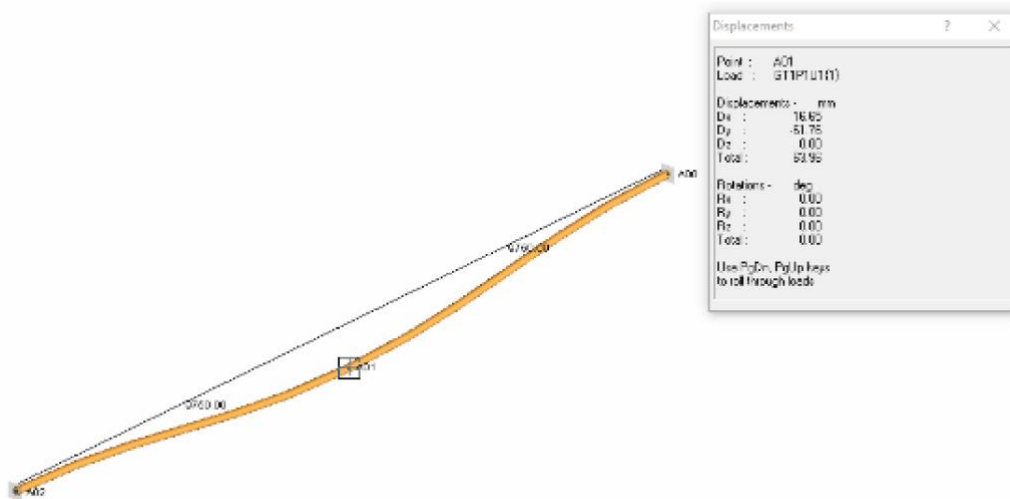
Tabel 4. 30 Hasil Analisa Defleksi

No. Freespan	Panjang Span (L) [m]	Defleksi <i>Cross Flow</i> (δ) [m]	Defleksi <i>In line</i> (δ) [m]
FS-1	16,20	0,0277	0,0106
FS-2	20,20	0,0867	0,0264
FS-3	19,50	0,0713	0,0222
FS-4	16,30	0,0286	0,0112
FS-5	8,60	0,0017	0,0009
FS-6	9,10	0,0022	0,0011
FS-7	18,00	0,0468	0,0167
FS-8	6,50	0,0005	0,0003
FS-9	8,20	0,0014	0,0008

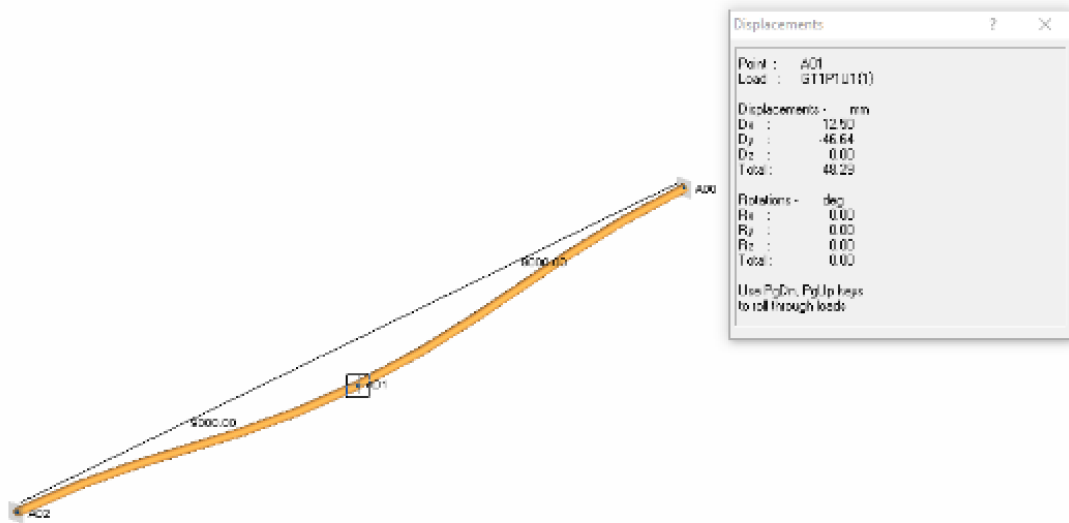
Analisis menggunakan *software* AUTOPIPE juga didapatkan hasil pemodelan defleksi dari *pipeline* yang mengalami *free span*. Berikut hasil permodelan defleksi menggunakan *software* AUTOPIPE, dengan mengambil 3 titik *span* terpanjang



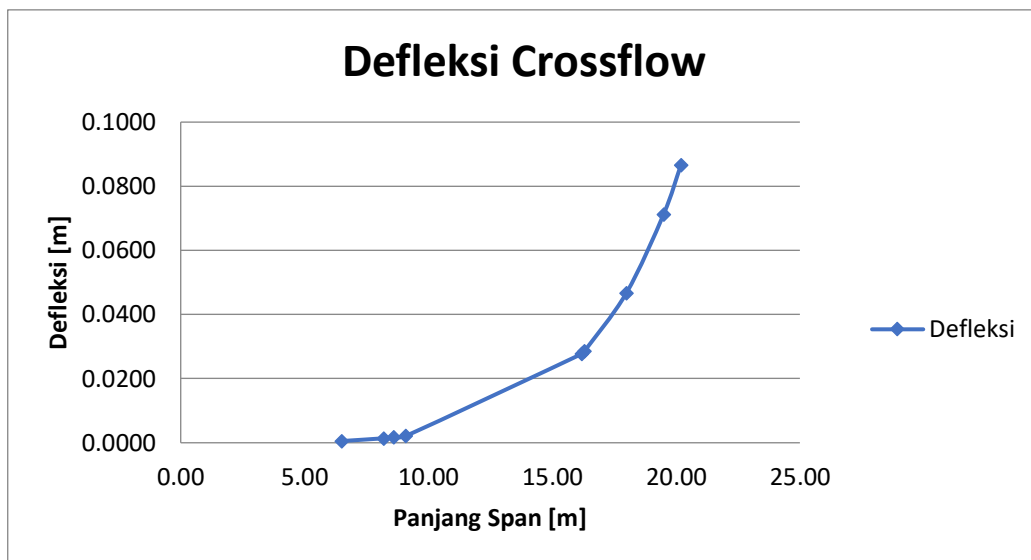
Gambar 4.7 Hasil Defleksi FS-02 Dengan Panjang Span 20,2 m



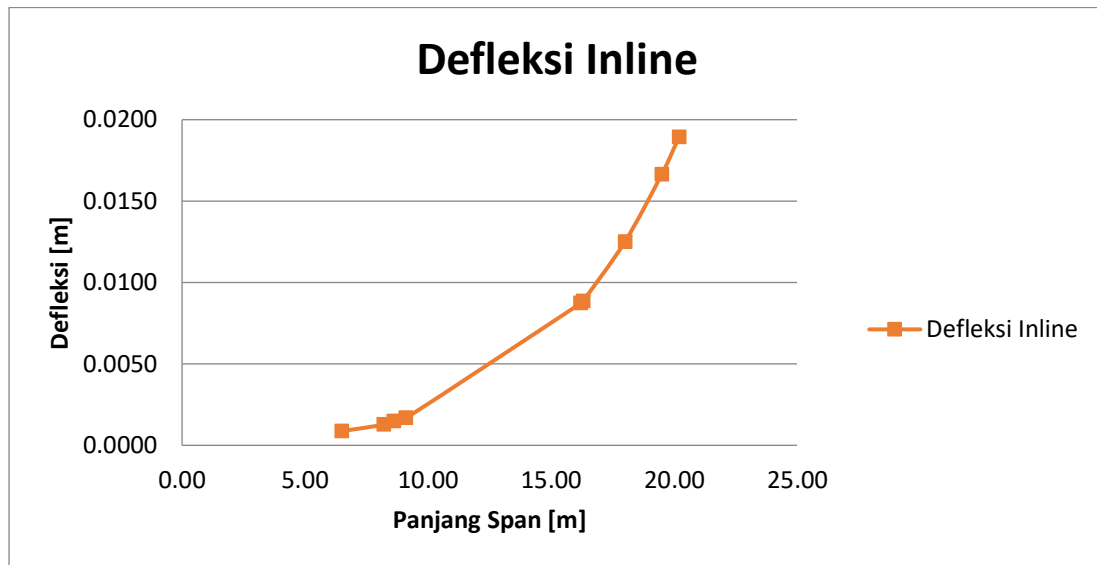
Gambar 4.8 Hasil Defleksi FS-03 Dengan Panjang Span 19,5 m



Gambar 4.9 Hasil Defleksi FS-07 Dengan Panjang Span 18,0 m



Gambar 4.10 Grafik Hubungan Defleksi Arah Cross Flow Dengan Panjang Span



Gambar 4.11 Grafik Hubungan Defleksi Arah In-Line Dengan Panjang Span

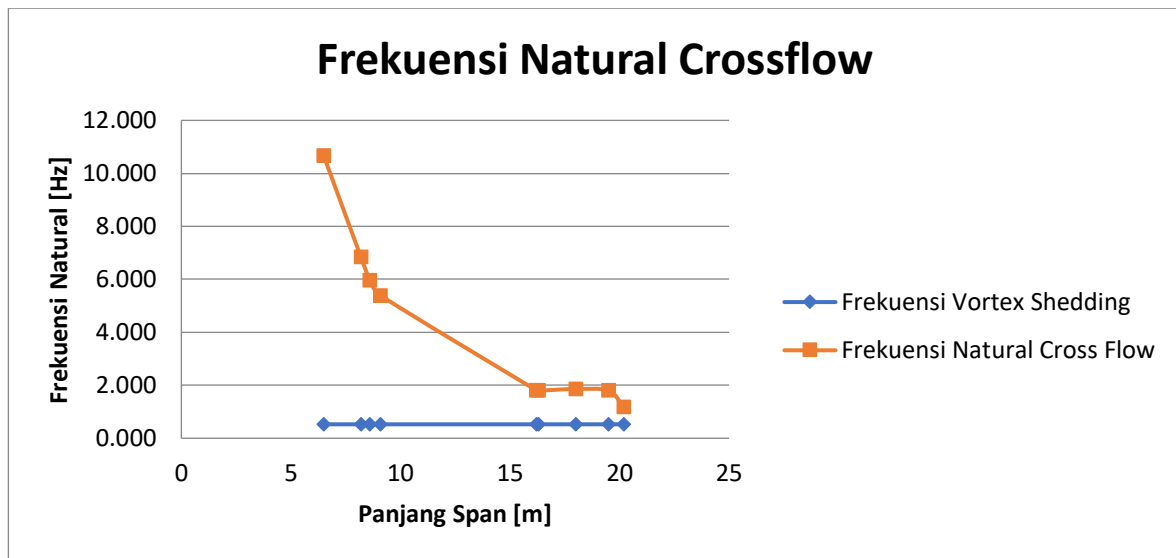
Dari grafik hubungan antara defleksi untuk arah *cross flow* dan *in-line* dengan panjang span didapatkan hasil *plotting* bahwa semakin panjang span aktual yang terjadi maka nilai defleksi cenderung bertambah dikarenakan panjang span aktualnya tersebut.

4.2.5.6 Frekuensi *Vortex Shedding* & Frekuensi Natural

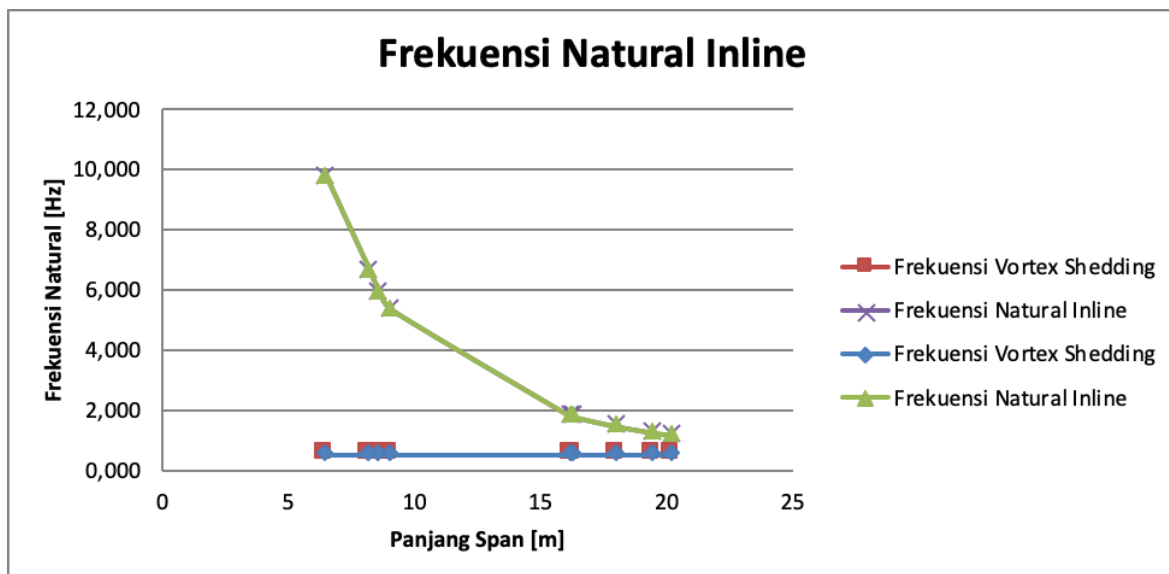
Frekuensi natural dari berbagai macam struktur berbeda-beda nilainya, seperti pipa bawah laut. Frekuensi natural perlu dilakukan analisa karena frekuensi natural dapat beresonansi dengan frekuensi *vortex shedding*, karena resonansi dapat menyebabkan kegagalan dalam pipa bawah laut. Analisa frekuensi natural dilakukan pada arah *in-line* dan juga pada arah *crossflow*. Jika nilai dari 0.7 frekuensi natural lebih kecil dari nilai frekuensi *vortex shedding*, dapat menyebabkan osilasi pada pipa bawah laut. Hasil analisa frekuensi *vortex shedding* dan juga analisa frekuensi natural arah *in-line* dan arah *crossflow* terdapat pada Tabel 4.31

Tabel 4. 31 Hasil Analisa Vortex Shedding & Frekuensi Natural

No. Free Span	Panjang Span (L) [m]	Frekuensi Vortex Shedding (fs) [Hz]	Frekuensi Natural Cross Flow (fn cf) [Hz]	Frekuensi Natural In-Line (fn il) [Hz]
FS-1	16,20	0,526	1,962	1,957
FS-2	20,20	0,526	1,127	1,110
FS-3	19,50	0,526	1,237	1,223
FS-4	16,30	0,526	1,936	1,931
FS-5	8,60	0,526	7,908	7,907
FS-6	9,10	0,526	7,025	7,025
FS-7	18,00	0,526	1,519	1,510
FS-8	6,50	0,526	14,104	14,104
FS-9	8,20	0,526	9,001	9,000



Gambar 4.12 Grafik Hubungan Antara Frekuensi Natural arah *cross flow*, Frekuensi Vortex Shedding, l Dengan Panjang Span



Gambar 4.13 Grafik Hubungan Antara Frekuensi Natural arah *in-line*, Frekuensi *Vortex Shedding*, l Dengan Panjang Span

4.2.5.7 Panjang Span Maximum

Analisa dari panjang span maksimum bentangan bebas dihitung untuk menghindari kegagalan pada operasi pipa bawah laut. Panjang span aktual tidak boleh melebihi dari panjang span maksimum yang diijinkan pada arah *in-line* dan arah *crossflow*. Hasil perhitungan dari panjang span maksimum d

Tabel 4. 32 Hasil Analisa Panjang Span Maksimum

No. Free Span	Panjang Span (L) [m]	Frekuensi Vortex Shedding (fs) [Hz]	Frekuensi Natural Cross Flow (fn cf) [Hz]	Frekuensi Natural In-Line (fn il) [Hz]
FS-1	16,20	0,526	1,962	1,957
FS-2	20,20	0,526	1,127	1,110
FS-3	19,50	0,526	1,237	1,223
FS-4	16,30	0,526	1,936	1,931
FS-5	8,60	0,526	7,908	7,907
FS-6	9,10	0,526	7,025	7,025
FS-7	18,00	0,526	1,519	1,510
FS-8	6,50	0,526	14,104	14,104
FS-9	8,20	0,526	9,001	9,000

4.2.5.8 Kriteria Screening

Setelah mendapatkan hasil analisa panjang span yang diijinkan, selanjutnya ialah analisa kriteria *screening* VIV. *Screening* bertujuan untuk mengetahui apakah pada pipa yang mengalami bentangan bebas akan mengalami VIV atau tidak. Berdasarkan DNV RP F105 dapat dihitung menggunakan persamaan 2.58 pada arah *in-line* dan persamaan 2.60 pada arah *cross flow*. *Screening* VIV dihitung pada arah *in-line* dan arah *crossflow*. Analisa ini akan dipergunakan untuk apakah perlu dilakukan mitigasi pada *pipeline* atau tidak melakukan mitigasi.

Tabel 4. 33 Hasil Screening Vortex Induced Vibration Arah Cross Flow

Screening VIV Criteria Crossflow				
No. Free Span	Panjang Span (L) [m]	Nilai Kriteria	Frekuensi Natural Cross Flow (fn cf) [Hz]	KONDISI
FS-1	16,2	2,375	1,962	TERJADI VIV
FS-2	20,2	2,356	1,127	TERJADI VIV
FS-3	19,5	2,312	1,237	TERJADI VIV
FS-4	16,3	2,356	1,936	TERJADI VIV
FS-5	8,6	2,356	7,908	TIDAK TERJADI VIV
FS-6	9,1	2,319	7,025	TIDAK TERJADI VIV
FS-7	18,0	2,363	1,519	TERJADI VIV
FS-8	6,5	2,319	14,104	TIDAK TERJADI VIV
FS-9	8,2	2,427	9,001	TIDAK TERJADI VIV

Tabel 4. 34 Hasil Screening Vortex Induced Vibration Arah In-Line

Screening Kriteria VIV Inline				
No. Free Span	Panjang Span (L) [m]	Nilai Kriteria	Frekuensi Natural In-Line (fn il) [Hz]	KONDISI
FS-1	1,000	4,750	1,957	TERJADI VIV
FS-2	0,999	4,719	1,110	TERJADI VIV
FS-3	0,999	4,631	1,223	TERJADI VIV
FS-4	0,999	4,719	1,931	TERJADI VIV
FS-5	0,999	4,719	7,907	TIDAK TERJADI VIV
FS-6	0,999	4,644	7,025	TIDAK TERJADI VIV
FS-7	0,999	4,733	1,510	TERJADI VIV
FS-8	0,999	4,644	14,104	TIDAK TERJADI VIV
FS-9	0,972	4,993	9,000	TIDAK TERJADI VIV

Di atas merupakan hasil *screening* kriteria terjadinya *vortex induced vibration*, pada titik-titik tertentu mengalami *vortex induced vibration*. Dari terjadinya *vortex induced vibration* pada beberapa titik di *pipeline*, perlu dilakukan *screening* beberapa kriteria lagi untuk memastikan titik-titik pada *pipeline* perlu dilakukan mitigasi atau tidak. Menurut Guo,dkk (2005) terdapat beberapa faktor yang perlu dianalisa dalam melakukan mitigasi pada *pipeline* yang mengalami *free span*. Terdapat 5 faktor yang harus dianalisa, yaitu osilasi, panjang span maksimum, *critical buckling*, defleksi dan *screening gap*. 5 faktor tersebut disajikan dalam beberapa tabel di bawah,

Tabel 4. 35 Hasil Screening Osilasi

Screening Osilasi					
No. Free Span	Vortex Shedding (fs)	0.7 fn cf	0.7 fn il	Kondisi Crossflow	Kondisi Inline
FS-1	0,526	1,373	1,370	AMAN	AMAN
FS-2	0,526	0,789	0,777	AMAN	AMAN
FS-3	0,526	0,866	0,856	AMAN	AMAN
FS-4	0,526	1,356	1,352	AMAN	AMAN
FS-5	0,526	5,536	5,535	AMAN	AMAN
FS-6	0,526	4,918	4,917	AMAN	AMAN
FS-7	0,526	1,063	1,057	AMAN	AMAN
FS-8	0,526	9,873	9,872	AMAN	AMAN
FS-9	0,526	6,301	6,300	AMAN	AMAN

Pada *screening* osilasi, kondisi frekuensi *vortex shedding* tidak boleh lebih dari nilai 0,7 kalinya dari frekuensi natural pada arah *crossflow* dan pada arah *in-line*. Dari hasil *screening* Tabel 4.35 dapat dilihat bahwa kondisi titik span aman dari osilasi yang mana tidak terjadinya resonansi pada *pipeline*.

Tabel 4. 36 Hasil Screening Panjang Maksimum

Screening Panjang Maksimum					
No. Free Span	Panjang Span (L) [m]	Panjang Span Maksimum Crossflow (Lc) [m]	Panjang Span Maksimum Inline (Lc) [m]	Kondisi Crossflow	Kondisi Inline
FS-1	16,20	9,39	12,49	KRITIS	KRITIS
FS-2	20,20	9,36	9,41	KRITIS	KRITIS
FS-3	19,50	9,40	9,88	KRITIS	KRITIS
FS-4	16,30	9,36	12,41	KRITIS	KRITIS
FS-5	8,60	9,36	25,12	AMAN	AMAN
FS-6	9,10	9,39	23,67	AMAN	AMAN
FS-7	18,00	9,36	12,98	KRITIS	KRITIS
FS-8	6,50	9,39	33,54	AMAN	AMAN
FS-9	8,20	9,45	27,20	AMAN	AMAN

Tabel 4.36 di atas merupakan hasil dari analisis *screening* panjang maksimum dari titik-titik *span* tersebut. *Screening* sama dengan sebelumnya, yaitu *screening* dilakukan pada arah *in-line* dan pada arah *crossflow* juga. *Screening* dilakukan pada arah *in-line* dan arah *crossflow* karena kedua arah tersebut memiliki respon struktur yang berbeda. Hasil *screening* didapat 5 titik *span* yang kondisinya melebihi panjang maksimumnya.

Tabel 4. 37 Hasil Screening Critical Buckling (Pcr)

Screening Nilai Pcr						
No. Free Span	Panjang Span (L) [m]	Seff/Pcr Crossflow	Seff/Pcr Inline	Nilai Batas	Kondisi Crossflow	Kondisi Inline
FS-1	16,20	-0,29	-0,29	-0,5	AMAN	AMAN
FS-2	20,20	-0,45	-0,45	-0,5	AMAN	AMAN
FS-3	19,50	-0,42	-0,42	-0,5	AMAN	AMAN
FS-4	16,30	-0,29	-0,29	-0,5	AMAN	AMAN
FS-5	8,60	-0,08	-0,08	-0,5	AMAN	AMAN
FS-6	9,10	-0,09	-0,09	-0,5	AMAN	AMAN
FS-7	18,00	-0,36	-0,36	-0,5	AMAN	AMAN
FS-8	6,50	-0,05	-0,05	-0,5	AMAN	AMAN
FS-9	8,20	-0,07	-0,07	-0,5	AMAN	AMAN

Tabel 4. 38 Hasil Screening Defleksi

Screening Defleksi							
No. Free Span	Panjang Span (L) [m]	Defleksi Crossflow (δ)	Defleksi Inline (δ)	δ Crossflow/D	δ Inline/D	Kondisi Crossflow	Kondisi Inline
FS-1	16,20	0,0277	0,0106	0,11	0,04	AMAN	AMAN
FS-2	20,20	0,0867	0,0264	0,33	0,10	AMAN	AMAN
FS-3	19,50	0,0713	0,0222	0,28	0,09	AMAN	AMAN
FS-4	16,30	0,0286	0,0112	0,11	0,04	AMAN	AMAN
FS-5	8,60	0,0017	0,0009	0,01	0,00	AMAN	AMAN
FS-6	9,10	0,0022	0,0011	0,01	0,00	AMAN	AMAN
FS-7	18,00	0,0468	0,0167	0,18	0,06	AMAN	AMAN
FS-8	6,50	0,0005	0,0003	0,00	0,00	AMAN	AMAN
FS-9	8,20	0,0014	0,0008	0,01	0,00	AMAN	AMAN

Tabel 4. 39 Hasil Screening Gap

Screening Gap			
No. Free Span	Gap (e) [m]	5D	Kondisi
FS-1	0,2	1,295	AMAN
FS-2	0,3	1,295	AMAN
FS-3	0,2	1,295	AMAN
FS-4	0,3	1,295	AMAN
FS-5	0,3	1,295	AMAN
FS-6	0,2	1,295	AMAN
FS-7	0,3	1,295	AMAN
FS-8	0,2	1,295	AMAN
FS-9	0,5	1,295	AMAN

4.2.6 Mitigasi

Dalam tugas akhir ini terdapat beberapa titik span yang melebihi dari batas toleransinya, salah satu cara mitigasinya ialah penambahan *support* pada titik-titik span yang melebihi batas toleransinya. Dalam DNV RP F105, batas minimum dari peletakkan *support* ialah 0,5 dari panjang span. Dalam tugas akhir ini jarak peletakkan *support* sebesar 6 m dilihat dari panjang span yang terjadi pada proyek tersebut. Peletakkan *support* pada tugas akhir ini berdasarkan pada panjang maksimum dari span pada arah *in-line* dan pada arah *crossflow*.

Tabel 4. 40 Konfigurasi Peletakkan Support

Panjang Span dengan Jarak Support 6m					
No. Free Span	Panjang Span (L)	Panjang Span setelah di support [m]	Panjang Span setelah di support [m]	Panjang Span setelah di support [m]	Panjang Span setelah di support [m]
FS-1	16,20	6	6	4,2	-
FS-2	20,20	6	6	6	2,2
FS-3	19,50	6	6	6	1,5
FS-4	16,30	6	6	4,3	-
FS-7	18,00	6	6	6	-

Setelah panjang span telah ditambahkan *support*, langkah selanjutnya ialah menghitung ulang dari analisis dinamis dengan menggunakan langkah-langkah yang sama demi memastikan panjang span yang telah diletakkan *support* dalam keadaan aman pada saat operasi

4.2.6.1 Critical Buckling Setelah Mitigasi

Tabel 4. 41 Hasil Critical Buckling Setelah Mitigasi

No. Free Span	Pcr Crossflow [N/m]	Pcr Inline [N/m]
FS-1	3193039,91	3193039,905
FS-1.1	3193039,91	3193039,905
FS-1.2	6516407,97	6516407,97
FS-2	3193039,91	3193039,905
FS-2.1	3193039,91	3193039,905
FS-2.2	3193039,91	3193039,905
FS-2.3	23749883,59	23749883,59
FS-3	3193039,91	3193039,905
FS-3.1	3193039,91	3193039,905
FS-3.2	3193039,91	3193039,905
FS-3.3	51088638,49	51088638,49
FS-4	3193039,91	3193039,905
FS-4.1	3193039,91	3193039,905
FS-4.2	6216843,51	6216843,515
FS-5	3193039,91	3193039,905
FS-5.1	17004354,53	17004354,53
FS-6	3193039,91	3193039,905
FS-6.1	11961439,81	11961439,81
FS-7	3193039,91	3193039,905
FS-7.1	3193039,91	3193039,905
FS-7.2	3193039,91	3193039,905

4.2.6.2 Defleksi Setelah Mitigasi

Tabel 4. 42 Hasil Defleksi Setelah Mitigasi

Screening Defleksi			
No. Free Span	Panjang Span (L) [m]	defleksi (δ) Crossflow	defleksi (δ) Inline
FS-1	6,00	0,0004	0,0002
FS-1.1	6,00	0,0004	0,0002
FS-1.2	4,20	0,0004	0,0002
FS-2	6,00	0,0004	0,0002
FS-2.1	6,00	0,0004	0,0002
FS-2.2	6,00	0,0004	0,0002
FS-2.3	2,20	0,0004	0,0002
FS-3	6,00	0,0004	0,0002
FS-3.1	6,00	0,0004	0,0002
FS-3.2	6,00	0,0004	0,0002
FS-3.3	1,50	0,0004	0,0002

FS-4	6,00	0,0004	0,0002
FS-4.1	6,00	0,0004	0,0002
FS-4.2	4,30	0,0004	0,0002
FS-7	6,00	0,0004	0,0002
FS-7.1	6,00	0,0004	0,0002
FS-7.2	6,00	0,0004	0,0000

4.2.6.3 Frekuensi Natural Setelah Mitigasi

Tabel 4. 43 Hasil Frekuensi Natural Setelah Mitigasi

No. Free Span	Frekuensi Natural Cross Flow (fn cf) [Hz]	Frekuensi Natural In-Line (fn il) [Hz]
FS-1	16,59	16,59
FS-1.1	16,59	16,59
FS-1.2	34,20	34,20
FS-2	16,61	16,61
FS-2.1	16,61	16,61
FS-2.2	16,61	16,61
FS-2.3	125,75	125,75
FS-3	16,61	16,61
FS-3.1	16,61	16,61
FS-3.2	16,61	16,61
FS-3.3	270,90	270,90
FS-4	16,61	16,61
FS-4.1	16,61	16,61
FS-4.2	32,67	32,67
FS-7	16,61	16,61
FS-7.1	16,61	16,61
FS-7.2	16,61	16,61

4.2.6.4 Panjang Maksimum Setelah Mitigasi

Tabel 4. 44 Hasil Panjang Maksimum Setelah Mitigasi

Screening Panjang Maksimum			
No. Free Span	Panjang Span (L) [m]	Panjang Span Maksimum Crossflow (Ls) [m]	Panjang Span Maksimum Inline(Ls) [m]
FS-1	6,00	9,39	36,35
FS-1.1	6,00	9,39	36,35
FS-1.2	4,20	9,39	52,20
FS-2	6,00	9,36	36,40
FS-2.1	6,00	9,36	36,40
FS-2.2	6,00	9,36	36,40
FS-2.3	2,20	9,36	100,16
FS-3	6,00	9,40	36,40
FS-3.1	6,00	9,40	36,40
FS-3.2	6,00	9,40	36,40
FS-3.3	1,50	9,40	147,01
FS-4	6,00	9,36	36,40
FS-4.1	6,00	9,36	36,40
FS-4.2	4,30	9,36	51,05
FS-7	6,00	9,36	36,40
FS-7.1	6,00	9,36	36,40
FS-7.2	6,00	9,357	36,40

4.2.6.5 Kriteria *Screening* Setelah Mitigasi

Tabel 4. 45 Screening Vortex Induced Vibration Setelah Mitigasi

Screening Kriteria VIV Setelah Mitigasi					
No. Free Span	fn cf [Hz]	fn il [Hz]	Nilai Kriteria Crossflow	Nilai Kriteria Inline	Kondisi
FS-1	16,59	16,59	2,312	1,588	AMAN
FS-1.1	16,59	16,59	2,312	1,588	AMAN
FS-1.2	34,20	34,20	2,312	1,588	AMAN
FS-2	16,61	16,61	2,356	1,592	AMAN
FS-2.1	16,61	16,61	2,356	1,592	AMAN
FS-2.2	16,61	16,61	2,356	1,592	AMAN
FS-2.3	125,75	125,75	2,356	1,592	AMAN
FS-3	16,61	16,61	2,312	1,588	AMAN
FS-3.1	16,61	16,61	2,312	1,588	AMAN
FS-3.2	16,61	16,61	2,312	1,588	AMAN
FS-3.3	270,90	270,90	2,312	1,588	AMAN
FS-4	16,61	16,61	2,356	1,592	AMAN
FS-4.1	16,61	16,61	2,356	1,592	AMAN
FS-4.2	32,67	32,67	2,356	1,592	AMAN
FS-7	16,61	16,61	2,363	1,592	AMAN
FS-7.1	16,61	16,61	2,363	1,592	AMAN
FS-7.2	16,61	16,61	2,363	1,592	AMAN

Tabel 4. 46 Hasil Screening Osilasi Setelah Mitigasi

Screening Osilasi						
No. Free Span	Panjang Span (L) [m]	Vortex Shedding (fs)	0.7 x fn cf	0.7 x fn il	Kondisi Crossflow	Kondisi Inline
FS-1	6,00	0,526	11,610	11,610	AMAN	AMAN
FS-1.1	6,00	0,526	11,610	11,610	AMAN	AMAN
FS-1.2	4,20	0,526	23,943	23,943	AMAN	AMAN
FS-2	6,00	0,526	11,628	11,628	AMAN	AMAN
FS-2.1	6,00	0,526	11,628	11,628	AMAN	AMAN
FS-2.2	6,00	0,526	11,628	11,628	AMAN	AMAN
FS-2.3	2,20	0,526	88,028	88,028	AMAN	AMAN
FS-3	6,00	0,526	11,628	11,628	AMAN	AMAN
FS-3.1	6,00	0,526	11,628	11,628	AMAN	AMAN
FS-3.2	6,00	0,526	11,628	11,628	AMAN	AMAN
FS-3.3	1,50	0,526	189,629	189,629	AMAN	AMAN
FS-4	6,00	0,526	11,628	11,628	AMAN	AMAN
FS-4.1	6,00	0,526	11,628	11,628	AMAN	AMAN
FS-4.2	4,30	0,526	22,867	22,867	AMAN	AMAN
FS-7	6,00	0,526	11,628	11,628	AMAN	AMAN
FS-7.1	6,00	0,526	11,628	11,628	AMAN	AMAN
FS-7.2	6,00	0,526	11,628	11,628	AMAN	AMAN

Tabel 4. 47 Hasil Screening Panjang Maksimum Setelah Mitigasi

Screening Panjang Maksimum					
No. Free Span	Panjang Span (L) [m]	Panjang Span Maksimum Crossflow (Ls) [m]	Panjang Span Maksimum Inline(Ls) [m]	Kondisi Crossflow	Kondisi Inline
FS-1	6,00	9,39	36,35	AMAN	AMAN
FS-1.1	6,00	9,39	36,35	AMAN	AMAN
FS-1.2	4,20	9,39	52,20	AMAN	AMAN
FS-2	6,00	9,36	36,40	AMAN	AMAN
FS-2.1	6,00	9,36	36,40	AMAN	AMAN
FS-2.2	6,00	9,36	36,40	AMAN	AMAN
FS-2.3	2,20	9,36	100,16	AMAN	AMAN
FS-3	6,00	9,40	36,40	AMAN	AMAN
FS-3.1	6,00	9,40	36,40	AMAN	AMAN
FS-3.2	6,00	9,40	36,40	AMAN	AMAN
FS-3.3	1,50	9,40	147,01	AMAN	AMAN
FS-4	6,00	9,36	36,40	AMAN	AMAN
FS-4.1	6,00	9,36	36,40	AMAN	AMAN
FS-4.2	4,30	9,36	51,05	AMAN	AMAN
FS-7	6,00	9,36	36,40	AMAN	AMAN
FS-7.1	6,00	9,36	36,40	AMAN	AMAN
FS-7.2	6,00	9,357	36,40	AMAN	AMAN

Tabel 4. 48 Hasil Screening Critical Buckling Setelah Mitigasi

Screening Nilai Pcr						
No. Free Span	Panjang Span (L) [m]	Seff/Pcr Crossflow	Seff/Pcr Inline	Nilai Batas	Kondisi Crossflow	Kondisi Inline
FS-1	6,00	-0,04	-0,04	-0,5	AMAN	AMAN
FS-1.1	6,00	-0,04	-0,04	-0,5	AMAN	AMAN
FS-1.2	4,20	-0,02	-0,02	-0,5	AMAN	AMAN
FS-2	6,00	-0,04	-0,04	-0,5	AMAN	AMAN
FS-2.1	6,00	-0,04	-0,04	-0,5	AMAN	AMAN
FS-2.2	6,00	-0,04	-0,04	-0,5	AMAN	AMAN
FS-2.3	2,20	-0,01	-0,01	-0,5	AMAN	AMAN
FS-3	6,00	-0,04	-0,04	-0,5	AMAN	AMAN
FS-3.1	6,00	-0,04	-0,04	-0,5	AMAN	AMAN
FS-3.2	6,00	-0,04	-0,04	-0,5	AMAN	AMAN
FS-3.3	1,50	0,00	0,00	-0,5	AMAN	AMAN
FS-4	6,00	-0,04	-0,04	-0,5	AMAN	AMAN
FS-4.1	6,00	-0,04	-0,04	-0,5	AMAN	AMAN
FS-4.2	4,30	-0,02	-0,02	-0,5	AMAN	AMAN
FS-7	6,00	-0,04	-0,04	-0,5	AMAN	AMAN
FS-7.1	6,00	-0,04	-0,04	-0,5	AMAN	AMAN
FS-7.2	6,00	-0,04	-0,04	-0,5	AMAN	AMAN

Tabel 4. 49 Hasil Screening Defleksi Setelah Mitigasi

Screening Defleksi							
No. Free Span	Panjang Span (L) [m]	defleksi (δ) Crossflow	defleksi (δ) Inline	δ Crossflow/D	δ Inline/D	Kondisi Crossflow	Kondisi Inline
FS-1	6,00	0,0004	0,0002	0,0006	0,0003	AMAN	AMAN
FS-1.1	6,00	0,0004	0,0002	0,0006	0,0003	AMAN	AMAN
FS-1.2	4,20	0,0004	0,0002	0,0006	0,0003	AMAN	AMAN
FS-2	6,00	0,0004	0,0002	0,0006	0,0003	AMAN	AMAN
FS-2.1	6,00	0,0004	0,0002	0,0006	0,0004	AMAN	AMAN
FS-2.2	6,00	0,0004	0,0002	0,0006	0,0004	AMAN	AMAN
FS-2.3	2,20	0,0004	0,0002	0,0006	0,0003	AMAN	AMAN
FS-3	6,00	0,0004	0,0002	0,0006	0,0004	AMAN	AMAN
FS-3.1	6,00	0,0004	0,0002	0,0006	0,0003	AMAN	AMAN
FS-3.2	6,00	0,0004	0,0002	0,0006	0,0003	AMAN	AMAN
FS-3.3	1,50	0,0004	0,0002	0,0006	0,0003	AMAN	AMAN
FS-4	6,00	0,0004	0,0002	0,0006	0,0004	AMAN	AMAN
FS-4.1	6,00	0,0004	0,0002	0,0006	0,0004	AMAN	AMAN
FS-4.2	4,30	0,0004	0,0002	0,0006	0,0004	AMAN	AMAN
FS-7	6,00	0,0004	0,0002	0,0006	0,0004	AMAN	AMAN
FS-7.1	6,00	0,0004	0,0002	0,0006	0,0004	AMAN	AMAN
FS-7.2	6,00	0,0004	0,0000	0,0006	0,0000	AMAN	AMAN

Tabel 4. 50 Hasil Screening Gap Setelah Mitigasi

Screening Gap			
No. Free Span	Gap	5D	Kondisi
FS-1	0,2	1,295	AMAN
FS-1.1	0,2	1,295	AMAN
FS-1.2	0,2	1,295	AMAN
FS-2	0,3	1,295	AMAN
FS-2.1	0,3	1,295	AMAN
FS-2.2	0,3	1,295	AMAN
FS-2.3	0,3	1,295	AMAN
FS-3	0,2	1,295	AMAN
FS-3.1	0,2	1,295	AMAN
FS-3.2	0,2	1,295	AMAN
FS-3.3	0,2	1,295	AMAN
FS-4	0,3	1,295	AMAN
FS-4.1	0,3	1,295	AMAN
FS-4.2	0,3	1,295	AMAN
FS-7	0,3	1,295	AMAN
FS-7.1	0,3	1,295	AMAN
FS-7.2	0,3	1,295	AMAN

4.2.7 Local Buckling

Dalam tugas akhir ini, analisa statik dilakukan untuk memastikan apakah akan terjadi *buckling* pada *pipeline* dalam kondisi operasi atau tidak. Analisa statik ini meliputi tekanan *bursting* dan tekanan *collapse* yang mana telah ditetapkan juga kriterianya oleh DNV OS 101.

Tabel di bawah merupakan hasil perhitungan analisis kriteria tekanan pengaman, dengan tujuan sebagai sistem *control pipeline* agar tekanan internal yang bekerja tidak melebihi kekuatan maksimum tekanan internal, dalam hal ini kekuatan maksimum *pipeline* terhadap tekanan internal ialah tekanan *bursting*. Pada kriteria tekanan pengaman ini, DNV OS F101 telah menetapkan syarat (lihat persamaan 2.61) bahwa tekanan lokal incidental (tekanan maksimum internal pipeline pada kondisi operasi ekstrim) dikurangi dengan nilai minimum tekanan eksternal, harus lebih kecil dari tekanan *bursting* dibagi dengan safety factornya. Dari hasil analisis yang dilakukan (lihat Tabel 4.51), pipeline telah memenuhi syarat tekanan *bursting*.

Tabel 4. 51 Hasil Analisa Kriteria Tekanan Pengaman

Kriteria Tekanan Bursting			
Syarat		$P_{li} - P_e \leq P_b(t1) / \gamma_m \cdot \gamma_{sc,pc}$	
Deskripsi	Nilai	Satuan	Kondisi
$P_{li} - P_e$	6022774,69	Pa	AMAN
P_b	16663636,77	Pa	
$P_b(t1) / \gamma_m \cdot \gamma_{sc,pc}$	16489755,35	Pa	

Pada analisis kriteria yang kedua (Tabel 4.58), melakukan pengecekan ketahanan pipa terhadap tekanan eksternal, dimana DNV OS F101 mensyaratkan tekanan eksternal maksimum dikurangi dengan tekanan internal minimum (= 0) yang bekerja pada pipeline, tidak boleh melebihi kapasitas tekanan maksimum eksternal yang dapat diterima oleh pipeline, dimana kapasitas tekanan maksimum pipeline ditandai dengan nilai tekanan *collapsenya*. Sehingga dari hasil analisis, pipeline aman dari tekanan eksternal yang bekerja (lihat Tabel 4.52).

Tabel 4. 52 Hasil Analisa Kriteria Tekanan Collapse

Kriteria Tekanan Collapse			
Syarat		Pe - Pmin ≤ Pc (t) / γm.γsc.pc	
Deskripsi	Nilai	Satuan	Kondisi
Pe - Pmin	3,E+05	Pa	OK !
Pc	2,E+07	Pa	
Pc(t) / γm.γsc	2,E+07	Pa	

Dari 2 kriteria tersebut, tidak ditemukan tanda-tanda terjadinya *buckling* karena setelah dilakukan analisa *buckling* akan terjadi pada kedalaman yang sangat dalam pada kondisi tugas akhir ini, tepatnya *buckling* akan terjadi pada kedalaman 2261,74 di bawah permukaan laut. Sedangkan pada tugas akhir ini kedalaman terdalam dalam kasus tugas akhir ini ialah 33,5 m di bawah permukaan laut.

4.2.8 Tegangan pada Pipeline

Sesuai dengan ASME B31.8 tegangan pada *pipeline* tidak boleh melebihi dari tegangan ijin yang telah diatur oleh *standard* tersebut. Tegangan-tegangan tersebut meliputi tegangan *hoop*, tegangan *longitudinal* dan tegangan kombinasi.

Sebelum melakukan analisis tegangan *hoop* terdapat beberapa parameter untuk menghitung tegangan *hoop* tersebut.

Tabel 4. 53 Parameter Tegangan Hoop

Parameter Tegangan Hoop			
Parameter	Notasi	Nilai	Unit
<i>Design Pressure</i>	Pd	5500000	Pa
<i>External Pressure</i>	Pe	296629,9	Pa
<i>Internal Pressure</i>	Pi	5527059,8	Pa
<i>Diameter Total</i>	D _{tot}	0,259	m
<i>Wall Thickness</i>	t	0,00952	m

Dengan menggunakan persamaan 2.78 dan juga mengacu kepada ASME B31.8 dengan toleransi tegangan ijinnya akan didapat hasil analisis tegangan *hoop* sebesar

Tabel 4. 54 Hasil Analisis Tegangan Hoop

HOOP STRESS			
Deskripsi	Nilai	Satuan	Kondisi
Tegangan Hoop [Mpa]	45,52	MPa	AMAN
Tegangan Ijin [Mpa]	176,3998422	MPa	

Tegangan longitudinal didapat dari penjumlahan tegangan aksial kombinasi dan tegangan *bending*. Hasil dari tegangan longitudinal juga harus dicek menggunakan kriteria *allowable stress* pada ASME B31.8. Untuk perhitungannya sendiri, tegangan longitudinal membutuhkan parameter-parameter seperti pada Tabel 4.55 berikut ta

Tabel 4. 55 Parameter Tegangan Longitudinal

Parameter	Notasi	Nilai	Unit
Design Pressure	P	5500000	Pa
Design Temp	T ₁	90	C
Design Pressure	Pd	5500000	Pa
Operating Pressure	P	4200000	Pa
Operating Temp	T	84,7	C
Eksternal Pressure	Pe	296629,9	Pa
Internal Pressure	Pi	5527059,8	Pa
Diameter Tot	Dtot	0,259	m
Tebal Dinding	t	0,00952	m
Koef. Ekspansi Thermal		1,E-05	
Temp Ruangan	T ₂	25	C
Modulus Young	E	198330	Mpa
SMYS		35534,2	psia
Axial Force	Fa	41307,35	N
Cross Sectional Pipa	As	0,007	
Momen Inersia Pipa	Ist	0,00001	m ⁴
Section Modulus	Z	0,0001	

Setelah didapat parameter-parameter untuk analisa tegangan longitudinal, dilakukan analisa tegangan longitudinal menggunakan rumus 2.79. Nilai dari tegangan longitudinal kemudian dicek masing-masing dengan batas yang diijinkan sebesar 0.8 x SMYS sesuai dengan yang telah ditetapkan oleh ASME B31.8. Hasil analisa dari tegangan longitudinal disajikan pada Tabel 4.56 berikut

Tabel 4. 56 Hasil Analisis Tegangan Longitudinal

No. Free Span	Panjang Span [m]	Tegangan Longitudinal (SI) [MPa]	Tegangan Ijin [MPa]
FS-1	16,20	-50,05	195,999825
FS-2	20,20	-10,13	195,999825
FS-3	19,50	-18,42	195,999825
FS-4	16,30	-48,64	195,999825
FS-5	8,60	-100,50	195,999825
FS-6	9,10	-98,25	195,999825
FS-7	18,00	-22,76	195,999825
FS-8	6,50	-99,15	195,999825
FS-9	8,20	-102,09	195,999825

Setelah mendapatkan nilai dari tegangan *hoop* dan tegangan *longitudinal*, selanjutnya dilakukan analisa untuk mendapatkan nilai tegangan kombinasi. Nilai dari analisa tegangan kombinasi sesuai dengan syarat yang telah ditetapkan oleh ASME B31.8 terdapat pada Tabel 4.57 berikut :

Tabel 4. 57 Hasil Analisa Tegangan Kombinasi

No. Free Span	Panjang Span [m]	Tegangan Kombinasi [MPa]	Tegangan Ijin [MPa]	Kondisi
FS-1	16,20	51,07	220,4998027	AMAN
FS-2	20,20	47,78	220,4998027	AMAN
FS-3	19,50	45,70	220,4998027	AMAN
FS-4	16,30	50,42	220,4998027	AMAN
FS-5	8,60	87,05	220,4998027	AMAN
FS-6	9,10	85,13	220,4998027	AMAN
FS-7	18,00	45,56	220,4998027	AMAN
FS-8	6,50	94,56	220,4998027	AMAN
FS-9	8,20	88,41	220,4998027	AMAN

Dari hasil analisis tegangan-tegangan yang bekerja pada *pipeline* dapat dilihat bahwa semua tegangan yang bekerja pada *pipeline* telah memenuhi kriteria ASME B31.8

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Hasil analisis *on-bottom stability* pada PT. Pertamina Hulu Mahakam Lapangan Bekapai terfokus pada *pipeline* BE-BA telah memenuhi 2 kriteria yang telah ditetapkan oleh DNV RP F09, yaitu kriteria *vertical stability* dan kriteria *absolute lateral stability*. Untuk hasil analisa dari *vertical stability*, hasil yang didapat sebesar 0,562 yang mana hasil tersebut telah memenuhi kriteria batas ≤ 1 . Hasil dari kriteria *absolute lateral stability* ialah sebesar 0,557 pada gaya *drag* dan 0,435 pada kriteria gaya inersianya dimana kedua parameter tersebut telah memenuhi kriteria yang telah ditetapkan oleh DNV RP F109 dengan batas ≤ 1 . Dari kedua hasil tersebut, *pipeline* BE-BA milik PT. Pertamina Hulu Mahakam Lapangan Bekapai tidak perlu menambahkan berat untuk menghindari pengapungan, seperti *concrete*, dikarenakan berat *pipeline* yang beroperasi telah memenuhi persyaratan DNV RP F109.

2. Untuk analisis dinamis, setelah dilakukan *screening* terdapat 5 titik *freespan* yang belum memenuhi kriteria DNV RP F105. Titik titik *freespan* yang belum memenuhi kriteria pada *pipeline* BE-BA PT. Pertamina Hulu Mahakam Lapangan Bekapai, yaitu FS-1, FS-2, FS-3, FS-4, dan FS-7. 5 titik tersebut merupakan titik yang belum memenuhi kriteria *vortex induced vibration*, sehingga memungkinkan terjadinya kegagalan pada *pipeline* pada saat beroperasi. DNV RP F105 merekomendasikan untuk melakukan mitigasi berupa penambahan *support* kepada titik titik *freespan* yang belum memenuhi kriteria. *Support* yang diletakkan berjarak 6 m kepada 5 titik yang belum memenuhi kriteria.

3. ASME B31.8 mengenai *Gas Transmission and Distributing Piping* telah menetapkan bahwa nilai tegangan kombinasi pada masing-masing *span* tidak melebihi batas dari tegangan yang diijinkan yaitu sebesar 220,4. Dari tegangan ijin tersebut telah didapatkan bahwa tegangan ijin pada *pipeline* telah memenuhi kriteria yang diisyaratkan oleh ASME B31.8

5.2 Saran

Di dalam pengerjaan tugas akhir ini, terdapat beberapa hal yang harus di-*improve* untuk penelitian selanjutnya. Adapun saran-saran yang diberikan sebagai masukan dalam penelitian lanjutan kedepannya

1. Perlu dilakukannya perhitungan untuk dimensi *support* untuk tiap *span* yang belum memenuhi kriteria DNV RP F105
2. Perlu adanya analisis *fatigue limit state* (FLS) dan analisis umur kelelahan dalam penelitian selanjutnya, untuk mengetahui *span life* dari *pipeline* yang mengalami *freespan* pada kondisi operasi
3. Dilakukannya analisis lingkungan yang lebih komprehensif seperti analisis gempa dan *dropped object*
4. Melakukan analisis dengan *boundary condition pin-fixed* dan juga dapat melakukan analisis pada kondisi *pinned-pinned* dan juga karena terdapat perbedaan pada *stiffness support* dan frekuensi natural

DAFTAR PUSTAKA

- Affadi, Ari. 2019. *Analisis Tegangan dan Kelelahan Akibat Pengaruh Vortex Induced Vibration (VIV) Yang Terjadi Pada Lokasi Crossing Pipeline Studi Kasus : Platform BIC-Kcom Milik Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Bai, Y. dan Qiang, B. 2001. *Subsea Pipelines and Risers*. New York: Elsevier.
- Guo, B. Song, S. J, Chako. J, Galambhor. 2005. *Offshore Pipeline*. New York: Elsevier.
- Kenny, J. P. 1993. *Structural Analysis of Pipelines Spans*. USA: HSE Books
- Khanifudin, I. 2015. *Analisis Ultimate Limit State (ULS) Pada Free Span (Studi Kasus : South Sumatera West Java Gas Pipeline Project Phase II Labuhan Maringgai-Muara Bekasi Offshore Pipeline)*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Lienhard, J. H. 1966. *Synopsis of Lift, Drag, and Vortex Frequency Data for Rigid Circular Cylinders*. Technical Extension Service, Washington State University
- Mouselli, A. H. 1981. *Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods*. Tulsa: PennWell Books.
- Naditya, Wiraksini. 2014. *Analisa On-Bottom Stability Offshore Pipeline : Studi Kasus Kb-Kcom Platform PT. Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Palmer, A. C. 1990. *Design of Submarine Pipelines Against Upheaval Buckling*. Offshore Technology Conference. Texas.
- Pratomo, U. H. B. 2015 *Analisa Stabilitas Pada Pipeline Akibat Dampak Dari Bentangan Bebas*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Rostyani, Hafifa 2017. *Analisis Local Buckling Tie-In Spool Pada Plem Iguana Menuju Bison Wellhead Di Laut Natuna*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Shidqi, M. A. 2020. *Analisis On-Bottom Stabiliti Dan Local Buckling Pipa Bawah Laut Pada Kondisi Operasi Di Blok MDA Dan MBH Selat Madura*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Soegiono. 2007. *Pipa Bawah Laut*. Surabaya: Airlangga University Press
- Susetyo, H . 2016. *Analisis Local Buckling Pada Free Span Pipa Bawah Laut 20" Di Sanggata, Kalimantan Timur*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Syahrani, Fadhil. 2019. *Analisis Stabilitas Subsea Pipeline Akibat Free Span Dan Vortex Induced Vibration Studi Kasus : Production Gas Pipeline Di Selat Madura*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

(Halaman sengaja dikosongka

Lampiran I
Perhitungan Umum Pipa

1. Data Properti Pipa

Description	Unit	Value	Value2
Density	kg/m ³	7850	-
Modulus of Elasticity	MPa (GPa)	199250	199,25
Poisson's Ratio	-	0,3	-
Outside Diameter	mm (m)	168,3	0,17
Inside Diameter	mm (m)	149,3	0,15
Wall Thickness	mm (m)	9,5	0,010
Density of Concrete	kg/m ³	2240	2,24
Concrete Coating	mm (m)	40	0,04
Anti-Corrosion Coating Thickness	mm (m)	5,5	0,01
Anti-Corrosion Coating Density	kg/m ³	1240	1,24
Steel Coefficient of Thermal Expansion	m/m/K	1,E-05	0,00
SMYS	psia (Mpa)	42060	42,06
SMTS	psia (Mpa)	59900	59,90
Joint Length	m	350000,000	350,00
Pipe Density	kg/m ³	7850	7,85

2. Perhitungan *Submerged Weight* Pipa

No.	Description	Simbol	Nilai	Satuan
1	Tebal Dinding Pipa	t_2	0,0095	m
2	Diameter Total Pipa	D_t	0,2593	m
3	Diameter Dalam Pipa	D_i	0,1493	m
4	Diameter Luar Pipa	D	0,1683	
4	Diameter Lapisan Anti Korosi	D_{cc}	0,1793	m
5	Diameter Lapisan Concrete	D_{conc}	0,2593	m
6	Luas Penampang Internal Pipa Baja	A_i	0,0453	m ²
7	Luas Penampang Pipa Baja	A_{st}	0,0075	m ²
8	Luas Penampang Lapisan Anti Korosi	A_{cc}	0,0046	m ²
9	Luas Penampang Lapisan Concrete	A_{conc}	0,0390	m ²
10	Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	1,50114E-05	m ⁴
11	Momen Inersia Concrete	I_{conc}	0,0002	m ⁴

3. Perhitungan *Submerged Weight*

ANALISA SUBMERGED WEIGHT			
Deskripsi	Unit	Nilai (m)	Value(mm)
Berat Material Pipa (Ws)	N/m	365,14	365138,92
Berat Anti Korosi Coating (Wcorr)	N/m	53,26	53263,75
Berat Fluida (Wc)	N/m	14,11	
Berat Concrete (Wcc)	N/m	604,65	604647,64
Berat Fluida	N/m	14,11	14112,16
Berat Bouyancy (b)	N/m	530,72	530722,58
Submerged Weight	N/m	506,44	506439,89

4. Perhitungan Massa Efektif Pipa

MASSA EFEKTIF							
No. Free Span	Panjang Span Aktual	Gap (e)	Rasio (e/Dt)	Ca	Massa Bouyancy	Massa Tambah	Massa Efektif
FS-1	16,200	0,2	0,772	1,009	54,15	54,645	157,38
FS-2	20,200	0,3	1,158	1,000	54,15	54,149	156,89
FS-3	19,500	0,2	0,772	1,000	54,15	54,149	156,89
FS-4	16,300	0,3	1,158	1,000	54,15	54,149	156,89
FS-5	8,600	0,3	1,158	1,000	54,15	54,149	156,89
FS-6	9,100	0,2	0,772	1,000	54,15	54,149	156,89
FS-7	18,000	0,3	1,158	1,000	54,15	54,149	156,89
FS-8	6,500	0,2	0,772	1,000	54,15	54,149	156,89
FS-9	8,200	0,5	1,931	0,830	54,15	44,955	147,69

(Halaman sengaja dikosongkan)

Lampiran II

Perhitungan Arus dan Gelombang

1. Parameter JONSWAP

Parameter	Notasi	Nilai (10 Tahun)	Nilai (100 Tahun)	Satuan
Kedalaman	h	33,5	33,5	m
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	2,7	3,4	m
Periode Puncak Gelombang	T_p	7,5	8,2	s

Parameter JONSWAP				
Parameter	Notasi	Nilai (10 Tahun)	Nilai (100 Tahun)	Satuan
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	2,7	3,4	m
Periode Gelombang Signifikan	T_p	7,5	8,2	s
Frekuensi Gelombang Signifikan	ω_s	0,84	0,77	rad/s
Percepatan Gravitasi	g	9,8	9,8	m/s
Periode Gelombang Maksimum	T_{max}	7,9	8,6	s
Frekuensi Puncak Gelombang	ω_p	0,84	0,77	rad/s
Fungsi Distribusi	φ	4,56	4,45	
Peakedness Parameter	γ	1,6503579	1,8886541	
Konstanta Generalized Philips	α	0,00998	0,01058	
LN Peakedness Parameter	$LN(\gamma)$	0,50099	0,63586	
Parameter Spektral	σ	0,09	0,09	

3. Perhitungan Kecepatan Arus Akibat Gelombang

Momen Spektra Gelombang	
$M0 = 1/3 \times \Delta w \times \Sigma M0$	8,4E-03
$M1 = 1/3 \times \Delta w \times \Sigma M1$	1,1E-02
$M2 = 1/3 \times \Delta w \times \Sigma M2$	1,7E-02
$M4 = 1/3 \times \Delta w \times \Sigma M4$	5,8E-02

Kecepatan Arus Akibat Gelombang 10 Tahun			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Kec. Arus Signifikan pada Elevasi Pipa	U_s	0,183	m/s
Mean Zero-Up Crossing Period	T_u	4,445	s
Reduction Factor	R_D	1	-
Kecepatan Arus Partikel Akibat Gelombang	U_w	0,174	m/s

Kecepatan Arus Akibat Gelombang Kondisi Badai			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Mean Zero-Up Crossing Period	T_u	4,443	s
Periode Gelombang Badai	T_{storm}^*	10800	s
Angka Osilasi pada Desain Spektra	τ	2430,716	-
Kecepatan Partikel Arus Akibat Gelombang Kondisi Badai	U_w^*	0,375	m/s

4. Perhitungan Kecepatan Arus Efektif

Perhitungan Kecepatan Arus pada Elevasi Pipa													
No. Free Span	Panjang Span Aktual	Gap	Kec. Arus pada Ketinggian Referensi 10 Tahun U(zr)	Kec. Arus pada Ketinggian Referensi 100 Tahun U(zr)	Faktor Reduksi	Elevasi di Atas Dasar Laut (z)	Parameter Kekasaran Dasar Laut	Tinggi Referensi (zr)	Kec. Arus Efektif 10 tahun V(z) [m/s]	Kec. Arus Efektif 100 tahun V(z) [m/s]	Ln (z)	Ln (zr)	Ln (z0)
FS-1	16,20	0,2	0,65	0,75	1	0,330	0,000005	1,000	0,591	0,682	-1,110	0,000	- 12,165
FS-2	20,20	0,3	0,65	0,75	1	0,430	0,000005	1,000	0,605	0,698	-0,845	0,000	- 12,165
FS-3	19,50	0,2	0,65	0,75	1	0,330	0,000005	1,000	0,591	0,682	-1,110	0,000	- 12,165
FS-4	16,30	0,3	0,65	0,75	1	0,430	0,000005	1,000	0,605	0,698	-0,845	0,000	- 12,165
FS-5	8,60	0,3	0,65	0,75	1	0,430	0,000005	1,000	0,605	0,698	-0,845	0,000	- 12,165
FS-6	9,10	0,2	0,65	0,75	1	0,330	0,000005	1,000	0,593	0,684	-1,110	0,000	- 12,206
FS-7	18,00	0,3	0,65	0,75	1	0,430	0,000005	1,000	0,607	0,700	-0,845	0,000	- 12,206
FS-8	6,50	0,2	0,65	0,75	1	0,330	0,000005	1,000	0,593	0,684	-1,110	0,000	- 12,206
FS-9	8,20	0,5	0,65	0,75	1	0,630	0,000005	1,000	0,627	0,724	-0,463	0,000	- 12,206

Lampiran III
Analisa On-Bottom Stability

1. Perhitungan *On-Bottom Stability*

Data			
Deskripsi	Notasi	Nilai	Satuan
Clay shear strength	S_u	2000	Pa
Diameter pipa	D	0,259	m
Dry unit soil weight	γ_s	14000	N/m ³
Submerged weight	W_s	506,440	N/m
Penetration depth	Z_p	0,015	m
Penetration depth dibagi Diameter Pipa	Z_p/D	0,058	m
Koefisien friksi	μ	0,2	-
Safety factor lateral stability	γ_{sc}	1,4	-
Safety factor vertical stability	γ_w	1,1	-
Load Reduction Factor due to Penetration (Vertikal)	$r_{tot,y}$	0,919	
Load Reduction Factor due to Penetration (horizontal)	$r_{tot,z}$	1,055	

Deskripsi	Notasi	Nilai	Satuan
Mean Zero Upcrossing Period	T^*	4,443	s
Kecepatan Arus Partikel Akibat Gelombang	U_w^*	0,375	m/s
Kecepatan Arus Efektif	V^*	0,724	m/s
Diameter pipa	D	0,259	m
Keulegan Carpenter	K^*	6,427	-
Rasio Kecepatan Arus dan Gelombang	M^*	4,165	-

Stabilitas	Nilai	Batas	Kondisi
Vertikal	0,562	≤ 1	STABIL
Absolut Lateral	0,557		
	0,435		

(Halaman sengaja dikosongkan)

Lampiran IV
Analisa Dinamis, *Local Buckling*, dan Tegangan

1. Perhitungan *Stability Parameter & Reynolds Number*

Deskripsi	Notasi	Nilai	Satuan
Structural Damping	ζ_{tot}	0,02	-
Densitas Air Laut	ρ_w	1025	kg/m ³
Diameter Total Pipa	D_I	0,259	m
Massa Efektif	Me	157,38	kg/m ³
Viskositas Kinematis Air Laut	V_k	0,000001	m ² /s
Kecepatan Arus	U	0,72	m/s

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas Air Laut	ρ_w	1025	kg/m ³
Stability Parameter Safety Factor	γ_k	1,15	-
Soil Damping	ζ_{soil}	0,01	-
Hydrodynamic Damping	ζ_h	0	-
Structural Damping	ζ_{str}	0,01	-
Kekasaran Permukaan Pipa	ζ_{tot}	0,02	
Diameter Total Pipa	D_I	0,259	m
Rasio k/D_I	K/D_I	0,012	-
Frek. Gelombang Signifikan (10 Tahun)	ω_s	0,84	rad/s
Frek. Gelombang Signifikan (100 Tahun)	ω_s	0,77	rad/s
Viskositas Kinematis Air Laut	V_k	0,000001	m ² /s

L	No. Free Span	Gap (e)	Me	Uc (10 Tahun)	Uc (100 Tahun)	Uw (10 Tahun)	Uw (100 Tahun)	K*(10 Tahun)	K*(100 Tahun)	α	Re (10 Tahun)	Re (100 Tahun)	Ksd	Ks
16,20	FS-1	0,2	157,38	0,59	0,68	0,18	0,30	6,43	1,26	0,01	147108,39	169740,45	0,50	0,57
20,20	FS-2	0,3	156,89	0,60	0,70	0,18	0,30	6,43	1,26	0,01	150633,81	173808,24	0,50	0,57
19,50	FS-3	0,2	156,89	0,59	0,68	0,18	0,30	6,43	1,26	0,01	147108,39	169740,45	0,50	0,57
16,30	FS-4	0,3	156,89	0,60	0,70	0,18	0,30	6,43	1,26	0,01	150633,81	173808,24	0,50	0,57
8,60	FS-5	0,3	156,89	0,60	0,70	0,18	0,30	6,43	1,26	0,01	150633,81	173808,24	0,50	0,57
9,10	FS-6	0,2	156,89	0,59	0,68	0,18	0,30	6,43	1,26	0,01	147655,86	170372,14	0,50	0,57
18,00	FS-7	0,3	156,89	0,61	0,70	0,18	0,30	6,43	1,26	0,01	151181,27	174439,93	0,50	0,57
6,50	FS-8	0,2	156,89	0,59	0,68	0,18	0,30	6,43	1,26	0,01	147655,86	170372,14	0,50	0,57
8,20	FS-9	0,5	147,69	0,63	0,72	0,18	0,30	6,43	1,26	0,01	156266,95	180308,02	0,47	0,54

2. Perhitungan Gaya Hidrodinamis

No. Free Span	L	e	FD	F _t	FI	FL	F _{tot}	U _{to} t	Tu	KC	ΨK C	Ψpr oxi	e/D	Ψtre nch	ΨV IV	CD 0	CD	C M	CL	Kc2	CD TAB EL
FS-1	16,20	0,20	271,60	101,29	108,44	110,78	382,377	0,985	7,500	28,518	1,000	1,003	0,772	1,000	1,963	1,07	2,11	2,01	0,90	31,18	2,40
FS-2	20,20	0,30	280,68	101,29	107,95	113,40	394,084	1,001	7,500	28,991	1,000	1,000	1,158	1,000	1,963	1,07	2,10	2,00	0,90	31,70	2,39
FS-3	19,50	0,20	271,60	101,29	107,95	110,78	382,377	0,985	7,500	28,518	1,000	1,000	0,772	1,000	1,963	1,07	2,10	2,00	0,90	31,18	2,38
FS-4	16,30	0,30	280,68	101,29	107,95	113,40	394,084	1,001	7,500	28,991	1,000	1,000	1,158	1,000	1,963	1,07	2,10	2,00	0,90	31,70	2,39
FS-5	8,60	0,30	280,68	101,29	107,95	113,40	394,084	1,001	7,500	28,991	1,000	1,000	1,158	1,000	1,963	1,07	2,10	2,00	0,90	31,70	2,39
FS-6	9,10	0,20	273,00	101,29	107,95	111,19	384,186	0,987	7,500	28,591	1,000	1,000	0,772	1,000	1,963	1,07	2,10	2,00	0,90	31,26	2,39
FS-7	18,00	0,30	282,11	101,29	107,95	113,81	395,914	1,004	7,500	29,064	1,000	1,000	1,158	1,000	1,963	1,07	2,10	2,00	0,90	31,78	2,39
FS-8	6,50	0,20	273,00	101,29	107,95	111,19	384,186	0,987	7,500	28,591	1,000	1,000	0,772	1,000	1,963	1,07	2,10	2,00	0,90	31,26	2,39
FS-9	8,20	0,50	295,51	101,29	98,79	117,57	413,078	1,027	7,500	29,746	1,000	0,947	1,931	1,000	1,963	1,07	1,99	1,83	0,90	32,52	2,41

4. Perhitungan *Concrete Stiffness Factor*

Parameter Concrete Stiffness Factor			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Konstanta Empiris (Asphalt)	k_c	0,330	-
Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	0,000	m ⁴
Momen Inersia Selimut Beton	I_{conc}	0,000	m ⁴
Young's Modulus Pipa Baja	E_{st}	207000	Mpa
Young's Modulus Selimut Beton	E_{conc}	30242,521	Mpa
Kekuatan Material Selimut Beton	f_{cn}	40	Mpa

Concrete Stiffness Factor			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Concrete Stiffness Factor	CSF	0,484	-

5. Perhitungan *Span Efektif (Cross Flow)*

No. Free Span	L	e	K_v		β	Leff/L	Leff
FS-1	16,20	0,20	648,70	9,69	0,99	1,00	16,20
FS-2	20,20	0,30	648,70	23,43	1,37	1,00	20,20
FS-3	19,50	0,20	648,70	20,34	1,31	1,00	19,50
FS-4	16,30	0,30	648,70	9,93	1,00	1,00	16,30
FS-5	8,60	0,30	648,70	0,77	-0,11	1,00	8,60
FS-6	9,10	0,20	648,70	0,96	-0,02	1,00	9,10
FS-7	18,00	0,30	648,70	14,77	1,17	1,00	18,00
FS-8	6,50	0,20	648,70	0,25	-0,60	1,00	6,50
FS-9	8,20	0,50	648,70	0,64	-0,20	1,00	8,20

6. Perhitungan *Span Efektif (In-Line)*

No. Free Span	L	e	K_L	A	$\beta (= \log A)$	Leff/L	Leff
FS-1	16,20	0,20	528,68	7,90	0,90	1,00	16,20
FS-2	20,20	0,30	528,68	19,09	1,28	1,00	20,20
FS-3	19,50	0,20	528,68	16,58	1,22	1,00	19,50
FS-4	16,30	0,30	528,68	8,09	0,91	1,00	16,30
FS-5	8,60	0,30	528,68	0,63	-0,20	1,00	8,60
FS-6	9,10	0,20	528,68	0,79	-0,10	1,00	9,10
FS-7	18,00	0,30	528,68	12,04	1,08	1,00	18,00
FS-8	6,50	0,20	528,68	0,20	-0,69	1,00	6,50
FS-9	8,20	0,50	528,68	0,52	-0,29	1,00	8,20

7. Perhitungan Gaya Aksial Efektif

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas Air Laut	Pw	1025	kg/m ⁴
Kedalaman Air Laut	h	33,5	m
Percepatan Gravitasi	g	9,81	
Tekanan Internal Desain	Pi	5500000	Pa
Tekanan Eksternal	Pe	3,E+05	Pa
Perbedaan Tekanan		5163149,125	Pa
parameter perhitungan effective axial force			
parameter	notasi	nilai	satuan
perbedaan tekanan		5,E+06	Pa
poisson ratio baja	v	0,3	-
diameter dalam pipa	Di	0,14926	m ₂
luas penampang internal pipa baja	Ai	0,045314021	m ₂
luas penampang pipa baja	Ast	0,007466624	m ₂
koefisien thermal expansion	Ae	0,0000117	
temperatur operasi	T1	84,7	°C
temperatur air laut	T0	26,8	°C
modulus young pipa baja	Est	2,07E+11	

8. Analisa Defleksi *Cross Flow*

Defleksi Crossflow						
No. Freespan	q [N/m]	Leff [m]	Seff	Pcr	CSF	defleksi (δ) [m]
FS-1	506,44	16,20	-1140614,99	692847,2	0,484	0,028
FS-2	506,44	20,20	-1140614,99	445620,1	0,484	0,087
FS-3	506,44	19,50	-1140614,99	478187,5	0,484	0,071
FS-4	506,44	16,30	-1140614,99	684372,0	0,484	0,029
FS-5	506,44	8,60	-1140614,99	2458502,0	0,484	0,002
FS-6	506,44	9,10	-1140614,99	2195759,1	0,484	0,002
FS-7	506,44	18,00	-1140614,99	561206,2	0,484	0,047
FS-8	506,44	6,50	-1140614,99	4303687,8	0,484	0,001
FS-9	506,44	8,20	-1140614,99	2704206,0	0,484	0,001

9. Analisa Defleksi *In-Line*

Defleksi Inline						
No. Freespan	q [N/m]	Leff [m]	Seff	Pcr	CSF	defleksi (δ) [m]
FS-1	271,60	16,20	-1140614,99	692847,16	0,484	0,0106
FS-2	280,68	20,20	-1140614,99	445620,06	0,484	0,0264
FS-3	271,60	19,50	-1140614,99	478187,53	0,484	0,0222
FS-4	280,68	16,30	-1140614,99	684372,04	0,484	0,0112
FS-5	280,68	8,60	-1140614,99	2458502,0	0,484	0,0009
FS-6	273,00	9,10	-1140614,99	2195759,0	0,484	0,0011
FS-7	282,11	18,00	-1140614,99	561206,20	0,484	0,0167
FS-8	273,00	6,50	-1140614,99	4303687,7	0,484	0,0003
FS-9	295,51	8,20	-1140614,99	2704205,9	0,484	0,0008

10. Analisa Panjang *Span* Maksimum

No. Freesspan	Panjang Span	Massa Efektif (Me)	Frekuensi Natural Crossflow(fn)	Frekuensi Natural Inline (fn)	Reduced Velocity (Ur)	Panjang Span Crossflow (Ls) [m]	Panjang Span Inline(Ls) [m]
FS-1	16,20	157,38	1,962	1,957	2,91	9,39	12,49
FS-2	20,20	156,89	1,127	1,110	2,96	9,36	9,41
FS-3	19,50	156,89	1,237	1,223	2,91	9,40	9,88
FS-4	16,30	156,89	1,936	1,931	2,96	9,36	12,41
FS-5	8,60	156,89	7,908	7,907	2,96	9,36	25,12
FS-6	9,10	156,89	7,025	7,025	2,92	9,39	23,67
FS-7	18,00	156,89	1,519	1,510	2,97	9,36	10,98
FS-8	6,50	156,89	14,104	14,104	2,92	9,39	33,54
FS-9	8,20	147,69	9,001	9,000	3,04	9,45	27,20

11. Kriteria *Screening Cross Flow*

Screening VIV Criteria Crossflow				
No. Free Span	Uextreme CF	Nilai Kriteria	Frekuensi Natural Cross Flow (fn cf) [Hz]	KONDISI
FS-1	0,879	2,375	1,962	TERJADI VIV
FS-2	0,872	2,356	1,127	TERJADI VIV
FS-3	0,855	2,312	1,237	TERJADI VIV
FS-4	0,872	2,356	1,936	TERJADI VIV
FS-5	0,872	2,356	7,908	TIDAK TERJADI VIV
FS-6	0,858	2,319	7,025	TIDAK TERJADI VIV
FS-7	0,874	2,363	1,519	TERJADI VIV
FS-8	0,858	2,319	14,104	TIDAK TERJADI VIV
FS-9	0,898	2,427	9,001	TIDAK TERJADI VIV

12. Kriteria Screening In-Line

Screening Kriteria VIV Inline				
No. Free Span	Vr onset	Nilai Kriteria	Frekuensi Natural In-Line (fn il) [Hz]	KONDISI
FS-1	1,000	4,750	1,957	TERJADI VIV
FS-2	0,999	4,719	1,110	TERJADI VIV
FS-3	0,999	4,631	1,223	TERJADI VIV
FS-4	0,999	4,719	1,931	TERJADI VIV
FS-5	0,999	4,719	7,907	TIDAK TERJADI VIV
FS-6	0,999	4,644	7,025	TIDAK TERJADI VIV
FS-7	0,999	4,733	1,510	TERJADI VIV
FS-8	0,999	4,644	14,104	TIDAK TERJADI VIV
FS-9	0,972	4,993	9,000	TIDAK TERJADI VIV

13. Defleksi Cross Flow setelah Mitigasi

Defleksi Cross Flow setelah Mitigasi					
No. Freespan	q [N/m]	Leff [m]	Pcr	CSF	defleksi (δ) [m]
FS-1	506,44	6,000	-0,040	0,484	0,0004
FS-1.1	506,44	6,000	-0,040	0,484	0,0004
FS-1.2	506,44	4,200	-0,019	0,484	0,0004
FS-2	506,44	6,000	-0,040	0,484	0,0004
FS-2.1	506,44	6,000	-0,040	0,484	0,0004
FS-2.2	506,44	6,000	-0,040	0,484	0,0004
FS-2.3	506,44	2,200	-0,005	0,484	0,0004
FS-3	506,44	6,000	-0,040	0,484	0,0004
FS-3.1	506,44	6,000	-0,040	0,484	0,0004
FS-3.2	506,44	6,000	-0,040	0,484	0,0004
FS-3.3	506,44	1,500	-0,002	0,484	0,0004
FS-4	506,44	6,000	-0,040	0,484	0,0004
FS-4.1	506,44	6,000	-0,040	0,484	0,0004
FS-4.2	506,44	4,300	-0,020	0,484	0,0004
FS-7	506,44	6,000	-0,040	0,484	0,0004
FS-7.1	506,44	6,000	-0,040	0,484	0,0004
FS-7.2	506,44	6,000	-0,040	0,484	0,0004

14. Defleksi *In-Line* setelah Mitigasi

Defleksi Inline setelah Mitigasi					
No. Freespan	q [N/m]	Leff [m]	Pcr	CSF	defleksi (δ) [m]
FS-1	271,60	6,00	-0,040	0,484	0,0002
FS-1.1	271,60	6,00	-0,040	0,484	0,0002
FS-1.2	271,60	4,20	-0,019	0,484	0,0002
FS-2	271,60	6,00	-0,040	0,484	0,0002
FS-2.1	271,60	6,00	-0,040	0,484	0,0002
FS-2.2	271,60	6,00	-0,040	0,484	0,0002
FS-2.3	271,60	2,20	-0,005	0,484	0,0002
FS-3	271,60	6,00	-0,040	0,484	0,0002
FS-3.1	271,60	6,00	-0,040	0,484	0,0002
FS-3.2	271,60	6,00	-0,040	0,484	0,0002
FS-3.3	271,60	1,50	-0,002	0,484	0,0002
FS-4	271,60	6,00	-0,040	0,484	0,0002
FS-4.1	271,60	6,00	-0,040	0,484	0,0002
FS-4.2	271,60	4,30	-0,020	0,484	0,0002
FS-7	271,60	6,00	-0,040	0,484	0,0002
FS-7.1	271,60	6,00	-0,040	0,484	0,0002
FS-7.2	271,60	6,00	-0,040	0,484	0,0002

15. Frekuensi Natural setelah Mitigasi

No. Free Span	Panjang Span (L) [m]	Massa Efektif (Me) [kg/m]	Vortex Shedding (fs) [Hz]	Frekuensi Natural Cross Flow (fn cf) [Hz]	Frekuensi Natural In-Line (fn il) [Hz]
FS-1	6,00	157,38	0,53	16,59	16,59
FS-1.1	6,00	157,38	0,53	16,59	16,59
FS-1.2	4,20	157,38	0,53	34,20	34,20
FS-2	6,00	156,89	0,53	16,61	16,61
FS-2.1	6,00	156,89	0,53	16,61	16,61
FS-2.2	6,00	156,89	0,53	16,61	16,61
FS-2.3	2,20	156,89	0,53	125,75	125,75
FS-3	6,00	156,89	0,53	16,61	16,61
FS-3.1	6,00	156,89	0,53	16,61	16,61
FS-3.2	6,00	156,89	0,53	16,61	16,61
FS-3.3	1,50	156,89	0,53	270,90	270,90
FS-4	6,00	156,89	0,53	16,61	16,61
FS-4.1	6,00	156,89	0,53	16,61	16,61
FS-4.2	4,30	156,89	0,53	32,67	32,67
FS-7	6,00	156,89	0,53	16,61	16,61
FS-7.1	6,00	156,89	0,53	16,61	16,61
FS-7.2	6,00	156,89	0,53	16,61	16,61

16. Parameter Analisis *Local Buckling*

PARAMETER		
Notasi	Nilai	Satuan
E	207000	MPa
γ_m (SLS)	1,15	-
$\gamma_{sc,pc}$	1,138	
$\gamma_{sc,lb}$	1,14	-
γ_{inc}	1,1	-
α_{fab}	0,93	-
SMYS	245	MPa
SMTS	413	MPa
f_y temp	21	MPa
f_y (Karakteristik tegangan luluh)	224	MPa
f_u (Karakteristik tegangan tarik)	392	MPa
F0	0,015	
D/t	27,21	m
t_{fab}	1,43	mm
t1	8,09	mm
t2	9,52	mm

Notasi		Nilai	Satuan
Incidental Pressure	Pinc	6,05	MPa
		6050000	Pa
Local Incidental Pressure	Pli	6,08	MPa
		6077225,31	Pa
Tekanan internal	Pi	0,3365075	
		336507,50	Pa
Tekanan Eksternal	Pe	0,30	MPa
		296327,50	Pa
	Pli - Pe	5,78	MPa
		5780897,809	Pa
Elastic Collapse Pressure	Pel (t)	22,59	MPa
		22592823,09	Pa
Plastic Collapse Pressure	Pp (t)	16,47	MPa
		16467027,03	Pa

17. Analisa Tekanan *Bursting*

Kriteria Tekanan <i>Bursting</i>			
Syarat		$P_i - P_e \leq P_b(t_1) / \gamma_m \cdot \gamma_{sc,pc}$	
Deskripsi	Nilai	Satuan	Kondisi
$P_i - P_e$	6077225,31	Pa	AMAN
P_b	16663636,77	Pa	
$P_b(t_1) / \gamma_m \cdot \gamma_{sc,pc}$	16489755,35	Pa	

18. Analisa Tekanan *Collapse*

Kriteria Tekanan <i>Collapse</i>			
Syarat		$P_e - P_{min} \leq P_c(t) / \gamma_m \cdot \gamma_{sc,pc}$	
Deskripsi	Nilai	Satuan	Kondisi
$P_e - P_{min}$	3,E+05	Pa	AMAN
P_c	2,E+07	Pa	
$P_c(t) / \gamma_m \cdot \gamma_{sc}$	2,E+07	Pa	

19. Parameter dan Hasil Tegangan *Hoop*

Parameter	Notasi	Nilai	Unit
Design Pressure	P	5500000	Pa
Design Temp	T	90	C
Design Pressure	P_d	5500000	Pa
Operating Pressure	P	4200000	Pa
Operating Temp	T	84,7	C
Eksternal Pressure	P_e	296629,9	Pa
Internal Pressure	P_i	4115000,0	Pa
Diameter Tot	D_{tot}	0,259	m
Tebal Dinding	t	0,00952	m
Koef. Ekspansi Thermal		1,E-05	
Temp Ruangan		26,8	C
Modulus Young	E	207000	Mpa
SMYS		35534,2	psia
Axial Force	F_a	30729,33	N
Cross Sectional Pipa	A_s	0,007	
Momen Inersia Pipa	I_{st}	0,00002	
Section Modulus	Z	0,0002	

HOOP STRESS		
Deskripsi	Nilai	Satuan
Tegangan Hoop (Sh) [Mpa]	52,03	MPa
Tegangan Ijin [Mpa]	176,3998422	MPa

21. Analisa Tegangan *Longitudinal*

NO FS	Moment Inplane (N.m)	Moment Outplane (N.m)
FS-1	4654	1294
FS-2	7236	2003
FS-3	6743	1866
FS-4	4711	1304
FS-5	1311	363
FS-6	1468	406
FS-7	5745	1590
FS-8	749	207
FS-9	1192	313

22. Analisa Tegangan Kombinasi

(Halaman sengaja dikosongkan)

Lampiran V
Software Autopipe

1. Output Software FS-1

FS 1

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:08 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 1

D I S P L A C E M E N T S

Point) name Z	Load combination	TRANSLATIONS (mm)			ROTATIONS (deg)	
		X	Y	Z	X	Y

*** Segment A begin ***

A00 0.00	Gravity{1}	0.00	-8.46	0.15	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	-5.98	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	-0.30	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	1.73	0.90	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-8.46	-5.84	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-8.46	-6.14	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	1.73	-7.56	-6.14	0.00	0.00
A01 0.00	Gravity{1}	0.00	-36.54	0.00	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	8.72	3.88	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-36.54	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-36.54	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	8.72	-32.67	0.00	0.00	0.00
A02 0.00	Gravity{1}	0.00	-8.46	-0.15	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	5.98	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	1.73	0.90	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-8.46	5.84	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-8.46	6.14	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	1.73	-7.56	6.14	0.00	0.00

*** Segment A end ***

FS 1

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:08 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 2

GLOBAL FORCES & MOMENTS

Point) name Z	Load combination Result	FORCES (N)				MOMENTS (N.m)	
		X	Y	Z	Result	X	Y
*** Segment A begin ***							
A00	Gravity{1}	0	3856	-82	3857	-10411	0
0	10411						
	Thermal 1{1}	0	0	3308	3308	0	0
0	0						
	Pressure 1{1}	0	0	166	166	0	0
0	0						
	User 1{1}	-959	-409	0	1042	1104	-2589
0	2814						
	GT1{1}	0	3856	3226	5027	-10411	0
0	10411						
	GT1P1{1}	0	3856	3392	5136	-10411	0
0	10411						
	GT1P1U1{1}	-959	3447	3392	4930	-9307	-2589
0	9661						
A01	- Gravity{1}	0	0	-82	82	5206	0
0	5206						
	Thermal 1{1}	0	0	3308	3308	0	0
0	0						
	Pressure 1{1}	0	0	166	166	0	0
0	0						
	User 1{1}	0	0	0	0	-552	1294
0	1407						
	GT1{1}	0	0	3226	3226	5206	0
0	5206						
	GT1P1{1}	0	0	3392	3392	5206	0
0	5206						
	GT1P1U1{1}	0	0	3392	3392	4654	1294
0	4830						
A01	+ Gravity{1}	0	0	-82	82	5206	0
0	5206						
	Thermal 1{1}	0	0	3308	3308	0	0
0	0						
	Pressure 1{1}	0	0	166	166	0	0
0	0						
	User 1{1}	0	0	0	0	-552	1294
0	1407						
	GT1{1}	0	0	3226	3226	5206	0

0	5206							
		GT1P1{1}	0	0	3392	3392	5206	0
0	5206							
		GT1P1U1{1}	0	0	3392	3392	4654	1294
0	4830							
A02		Gravity{1}	0	-3856	-82	3857	-10411	0
0	10411							
		Thermal 1{1}	0	0	3308	3308	0	0
0	0							
		Pressure 1{1}	0	0	166	166	0	0
0	0							
		User 1{1}	959	409	0	1042	1104	-2589
0	2814							
		GT1{1}	0	-3856	3226	5027	-10411	0
0	10411							
		GT1P1{1}	0	-3856	3392	5136	-10411	0
0	10411							
		GT1P1U1{1}	959	-3447	3392	4930	-9307	-2589
0	9661							
*** Segment A end ***								

FS 1

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:08 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 3

GENERAL PIPE STRESS REPORT

(Stress in N/mm2)

Point Total name Stress	Load combination Loc	Hoop Stress	Longitudinal		Shear Stress	Principal		
			Max	Min		Max	Min	
*** Segment A begin ***								
A00 REST 29.19	SIFI= 1.00 Gravity{1} 0	SIFO= 1.00	0.00	58.37	-58.34	0.00	58.37	-58.34
0.35	270 Thermal 1{1}	0.00	-0.70	-0.70	0.00	0.00	-0.70	
22.76	270 Pressure 1{1}	45.52	18.94	18.94	0.00	45.52	18.94	
7.89	113 User 1{1}	0.00	15.77	-15.77	0.00	15.77	-15.77	
29.52	180 GT1{1}	0.00	57.67	-59.03	0.00	57.67	-59.03	
42.81	180 GT1P1{1}	45.52	76.61	-40.10	0.00	76.61	-40.10	
40.70	196 GT1P1U1{1}	45.52	72.40	-35.89	0.00	72.40	-35.89	
A01 SIFI= 1.00 SIFO= 1.00								
REST 14.60	Gravity{1} 180	0.00	29.19	-29.16	0.00	29.19	-29.16	
0.35	270 Thermal 1{1}	0.00	-0.70	-0.70	0.00	0.00	-0.70	
22.76	270 Pressure 1{1}	45.52	18.94	18.94	0.00	45.52	18.94	
3.94	293 User 1{1}	0.00	7.89	-7.89	0.00	7.89	-7.89	
14.93	0 GT1{1}	0.00	28.50	-29.86	0.00	28.50	-29.86	
28.22	0 GT1P1{1}	45.52	47.43	-10.92	0.00	47.43	-10.92	
27.16	16 GT1P1U1{1}	45.52	45.33	-8.81	0.00	45.52	-8.81	
A02 SIFI= 1.00 SIFO= 1.00								
REST 29.19	Gravity{1} 0	0.00	58.37	-58.34	0.00	58.37	-58.34	
0.35	270 Thermal 1{1}	0.00	-0.70	-0.70	0.00	0.00	-0.70	
22.76	270 Pressure 1{1}	45.52	18.94	18.94	0.00	45.52	18.94	
7.89	113 User 1{1}	0.00	15.77	-15.77	0.00	15.77	-15.77	
29.52	180 GT1{1}	0.00	57.67	-59.03	0.00	57.67	-59.03	
42.81	180 GT1P1{1}	45.52	76.61	-40.10	0.00	76.61	-40.10	
40.70	196 GT1P1U1{1}	45.52	72.40	-35.89	0.00	72.40	-35.89	
*** Segment A end ***								

FS 1

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:08 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 4

R E S U L T S U M M A R Y

Maximum displacements (mm)

Maximum X :	8.72	Point : A01	Load Comb.: User 1{1}
Maximum Y :	-36.54	Point : A01	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Z :	-6.14	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}
Max. total:	36.54	Point : A01	Load Comb.: Gravity{1}

Maximum rotations (deg)

Maximum X :	0.00	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Y :	0.00	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Max. total:	0.00	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}

Maximum pipe forces (N)

Maximum X :	-959	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Maximum Y :	3856	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Z :	3392	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}
Max. total:	5136	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}

Maximum pipe moments (N.m)

Maximum X :	-10411	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Y :	-2589	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}

Max. total:	10411	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
-------------	-------	-------------	------------------------

2. Output Software FS-2

FS 2

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:08 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 1

D I S P L A C E M E N T S

Point) name Z	Load combination	TRANSLATIONS (mm)			ROTATIONS (deg)	
		X	Y	Z	X	Y
*** Segment A begin ***						
A00 0.00	Gravity{1}	0.00	-10.55	0.19	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	-7.45	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	-0.38	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	2.15	1.12	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-10.55	-7.27	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-10.55	-7.64	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	2.15	-9.43	-7.64	0.00	0.00
A01 0.00	Gravity{1}	0.00	-78.36	0.00	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	18.93	8.31	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-78.36	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-78.36	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	18.93	-70.05	0.00	0.00	0.00
A02 0.00	Gravity{1}	0.00	-10.55	-0.19	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	7.45	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	2.15	1.12	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-10.55	7.27	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-10.55	7.64	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	2.15	-9.43	7.64	0.00	0.00
*** Segment A end ***						

FS 2

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:08 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 2

G L O B A L F O R C E S & M O M E N T S

Point) name Z	Load combination Result	FORCES (N)				MOMENTS (N.m)	
		X	Y	Z	Result	X	Y

*** Segment A begin ***

A00	Gravity{1}	0	4808	-102	4809	-16188	0
0	16188						
	Thermal 1{1}	0	0	4120	4120	0	0
0	0						
	Pressure 1{1}	0	0	207	207	0	0
0	0						
	User 1{1}	-1190	-510	0	1294	1717	-4006
0	4358						
	GT1{1}	0	4808	4018	6266	-16188	0
0	16188						
	GT1P1{1}	0	4808	4225	6401	-16188	0
0	16188						
	GT1P1U1{1}	-1190	4298	4225	6143	-14471	-4006
0	15015						
A01	- Gravity{1}	0	0	-102	102	8094	0
0	8094						
	Thermal 1{1}	0	0	4120	4120	0	0
0	0						
	Pressure 1{1}	0	0	207	207	0	0
0	0						
	User 1{1}	0	0	0	0	-858	2003
0	2179						
	GT1{1}	0	0	4018	4018	8094	0
0	8094						
	GT1P1{1}	0	0	4225	4225	8094	0
0	8094						
	GT1P1U1{1}	0	0	4225	4225	7236	2003
0	7508						
A01	+ Gravity{1}	0	0	-102	102	8094	0
0	8094						
	Thermal 1{1}	0	0	4120	4120	0	0
0	0						
	Pressure 1{1}	0	0	207	207	0	0
0	0						
	User 1{1}	0	0	0	0	-858	2003
0	2179						
	GT1{1}	0	0	4018	4018	8094	0

0	8094							
		GT1P1{1}	0	0	4225	4225	8094	0
0	8094							
		GT1P1U1{1}	0	0	4225	4225	7236	2003
0	7508							
A02		Gravity{1}	0	-4808	-102	4809	-16188	0
0	16188							
		Thermal 1{1}	0	0	4120	4120	0	0
0	0							
		Pressure 1{1}	0	0	207	207	0	0
0	0							
		User 1{1}	1190	510	0	1294	1717	-4006
0	4358							
		GT1{1}	0	-4808	4018	6266	-16188	0
0	16188							
		GT1P1{1}	0	-4808	4225	6401	-16188	0
0	16188							
		GT1P1U1{1}	1190	-4298	4225	6143	-14471	-4006
0	15015							
*** Segment A end ***								

FS 2

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:08 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 3

GENERAL PIPE STRESS REPORT

(Stress in N/mm2)

Point Total name Stress	Load combination Loc	Hoop Stress	Longitudinal		Shear Stress	Principal		
			Max	Min		Max	Min	
*** Segment A begin ***								
A00	SIFI= 1.00 SIF0= 1.00							
REST	Gravity{1}	0.00	90.75	-90.71	0.00	90.75	-90.71	
45.37	0							
	Thermal 1{1}	0.00	-0.87	-0.87	0.00	0.00	-0.87	
0.43	270							
	Pressure 1{1}	45.52	18.93	18.93	0.00	45.52	18.93	
22.76	270							
	User 1{1}	0.00	24.43	-24.43	0.00	24.43	-24.43	
12.21	113							
	GT1{1}	0.00	89.88	-91.57	0.00	89.88	-91.57	
45.79	180							
	GT1P1{1}	45.52	108.81	-72.64	0.00	108.81	-72.64	
59.08	180							
	GT1P1U1{1}	45.52	102.24	-66.07	0.00	102.24	-66.07	
55.79	195							
A01	SIFI= 1.00 SIF0= 1.00							
REST	Gravity{1}	0.00	45.39	-45.34	0.00	45.39	-45.34	
22.69	180							
	Thermal 1{1}	0.00	-0.87	-0.87	0.00	0.00	-0.87	
0.43	270							
	Pressure 1{1}	45.52	18.93	18.93	0.00	45.52	18.93	
22.76	270							
	User 1{1}	0.00	12.21	-12.21	0.00	12.21	-12.21	
6.11	293							
	GT1{1}	0.00	44.52	-46.21	0.00	44.52	-46.21	
23.10	0							
	GT1P1{1}	45.52	63.45	-27.28	0.00	63.45	-27.28	
36.40	0							
	GT1P1U1{1}	45.52	60.16	-24.00	0.00	60.16	-24.00	
34.76	15							
A02	SIFI= 1.00 SIF0= 1.00							
REST	Gravity{1}	0.00	90.75	-90.71	0.00	90.75	-90.71	
45.37	0							
	Thermal 1{1}	0.00	-0.87	-0.87	0.00	0.00	-0.87	
0.43	270							
	Pressure 1{1}	45.52	18.93	18.93	0.00	45.52	18.93	
22.76	270							
	User 1{1}	0.00	24.43	-24.43	0.00	24.43	-24.43	
12.21	113							
	GT1{1}	0.00	89.88	-91.57	0.00	89.88	-91.57	
45.79	180							
	GT1P1{1}	45.52	108.81	-72.64	0.00	108.81	-72.64	
59.08	180							
	GT1P1U1{1}	45.52	102.24	-66.07	0.00	102.24	-66.07	
55.79	195							

*** Segment A end ***

FS 2

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:08 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 1

D I S P L A C E M E N T S

Point) name Z	Load combination	TRANSLATIONS (mm)			ROTATIONS (deg)	
		X	Y	Z	X	Y
*** Segment A begin ***						
A00 0.00	Gravity{1}	0.00	-10.55	0.19	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	-7.45	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	-0.38	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	2.15	1.12	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-10.55	-7.27	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-10.55	-7.64	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	2.15	-9.43	-7.64	0.00	0.00
A01 0.00	Gravity{1}	0.00	-78.36	0.00	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	18.93	8.31	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-78.36	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-78.36	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	18.93	-70.05	0.00	0.00	0.00
A02 0.00	Gravity{1}	0.00	-10.55	-0.19	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	7.45	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	2.15	1.12	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-10.55	7.27	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-10.55	7.64	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	2.15	-9.43	7.64	0.00	0.00
*** Segment A end ***						

3. Output Software FS-3

 FS-3

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:09 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 1

D I S P L A C E M E N T S

Point) name Z	Load combination	TRANSLATIONS (mm)			ROTATIONS (deg)	
		X	Y	Z	X	Y

*** Segment A begin ***

A00 0.00	Gravity{1}	0.00	-10.18	0.18	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	-7.20	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	-0.36	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	2.08	1.08	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-10.18	-7.02	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-10.18	-7.38	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	2.08	-9.10	-7.38	0.00	0.00
A01 0.00	Gravity{1}	0.00	-69.08	0.00	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	16.65	7.33	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-69.08	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-69.08	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	16.65	-61.76	0.00	0.00	0.00
A02 0.00	Gravity{1}	0.00	-10.18	-0.18	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	7.20	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	2.08	1.08	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-10.18	7.02	0.00	0.00

0.00	GT1P1{1}	0.00	-10.18	7.38	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	2.08	-9.10	7.38	0.00	0.00

*** Segment A end ***

FS-3

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:09 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 2

G L O B A L F O R C E S & M O M E N T S

Point) name Z	Load combination Result	FORCES (N)				MOMENTS (N.m)	
		X	Y	Z	Result	X	Y
*** Segment A begin ***							
A00	Gravity{1}	0	4642	-99	4643	-15085	0
0	15085						
0	0	0	0	3978	3978	0	0
0	0	0	0	200	200	0	0
0	0	-1149	-492	0	1250	1600	-3733
0	4061						
0	0	0	4642	3879	6049	-15085	0
0	15085						
0	0	0	4642	4079	6180	-15085	0
0	15085						
0	0	-1149	4149	4079	5931	-13485	-3733
0	13993						
A01	- Gravity{1}	0	0	-99	99	7543	0
0	7543						
0	0	0	0	3978	3978	0	0
0	0	0	0	200	200	0	0
0	0	0	0	0	0	-800	1866
0	2031						
0	0	0	0	3879	3879	7543	0
0	7543						
0	0	0	0	4079	4079	7543	0
0	7543						
0	0	0	0	4079	4079	6743	1866
0	6996						
A01	+ Gravity{1}	0	0	-99	99	7543	0
0	7543						
0	0	0	0	3978	3978	0	0
0	0	0	0	200	200	0	0
0	0	0	0	0	0	-800	1866
0	2031						
0	0	0	0	3879	3879	7543	0

0	7543							
		GT1P1{1}	0	0	4079	4079	7543	0
0	7543							
		GT1P1U1{1}	0	0	4079	4079	6743	1866
0	6996							
A02		Gravity{1}	0	-4642	-99	4643	-15085	0
0	15085							
		Thermal 1{1}	0	0	3978	3978	0	0
0	0							
		Pressure 1{1}	0	0	200	200	0	0
0	0							
		User 1{1}	1149	492	0	1250	1600	-3733
0	4061							
		GT1{1}	0	-4642	3879	6049	-15085	0
0	15085							
		GT1P1{1}	0	-4642	4079	6180	-15085	0
0	15085							
		GT1P1U1{1}	1149	-4149	4079	5931	-13485	-3733
0	13993							
*** Segment A end ***								

FS-3

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:09 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 3

GENERAL PIPE STRESS REPORT

(Stress in N/mm2)

Point Total name Stress	Load combination Loc	Hoop Stress	Longitudinal Max	Min	Shear Stress	Principal Max	Min
*** Segment A begin ***							
A00 REST 42.28	SIFI= 1.00 SIF0= 1.00 Gravity{1} 0	0.00	84.57	-84.53	0.00	84.57	-84.53
0.42	270 Thermal 1{1}	0.00	-0.84	-0.84	0.00	0.00	-0.84
22.76	270 Pressure 1{1}	45.52	18.93	18.93	0.00	45.52	18.93
11.38	113 User 1{1}	0.00	22.76	-22.76	0.00	22.76	-22.76
42.68	180 GT1{1}	0.00	83.73	-85.36	0.00	83.73	-85.36
55.98	180 GT1P1{1}	45.52	102.66	-66.43	0.00	102.66	-66.43
52.91	195 GT1P1U1{1}	45.52	96.54	-60.31	0.00	96.54	-60.31
A01 SIFI= 1.00 SIF0= 1.00							
21.15	REST 180 Gravity{1}	0.00	42.29	-42.25	0.00	42.29	-42.25
0.42	270 Thermal 1{1}	0.00	-0.84	-0.84	0.00	0.00	-0.84
22.76	270 Pressure 1{1}	45.52	18.93	18.93	0.00	45.52	18.93
5.69	293 User 1{1}	0.00	11.38	-11.38	0.00	11.38	-11.38
21.55	0 GT1{1}	0.00	41.46	-43.09	0.00	41.46	-43.09
34.84	0 GT1P1{1}	45.52	60.39	-24.16	0.00	60.39	-24.16
33.31	15 GT1P1U1{1}	45.52	57.33	-21.10	0.00	57.33	-21.10
A02 SIFI= 1.00 SIF0= 1.00							
42.28	REST 0 Gravity{1}	0.00	84.57	-84.53	0.00	84.57	-84.53
0.42	270 Thermal 1{1}	0.00	-0.84	-0.84	0.00	0.00	-0.84
22.76	270 Pressure 1{1}	45.52	18.93	18.93	0.00	45.52	18.93
11.38	113 User 1{1}	0.00	22.76	-22.76	0.00	22.76	-22.76
42.68	180 GT1{1}	0.00	83.73	-85.36	0.00	83.73	-85.36
55.98	180 GT1P1{1}	45.52	102.66	-66.43	0.00	102.66	-66.43
52.91	195 GT1P1U1{1}	45.52	96.54	-60.31	0.00	96.54	-60.31

*** Segment A end ***

FS-3

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:09 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 4

R E S U L T S U M M A R Y

Maximum displacements (mm)

Maximum X :	16.65	Point : A01	Load Comb.: User 1{1}
Maximum Y :	-69.08	Point : A01	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Z :	-7.38	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}
Max. total:	69.08	Point : A01	Load Comb.: Gravity{1}

Maximum rotations (deg)

Maximum X :	0.00	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Y :	0.00	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Max. total:	0.00	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}

Maximum pipe forces (N)

Maximum X :	-1149	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Maximum Y :	4642	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Z :	4079	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}
Max. total:	6180	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}

Maximum pipe moments (N.m)

Maximum X :	-15085	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Y :	-3733	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}

Max. total:	15085	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
-------------	-------	-------------	------------------------

4. Output Software FS-4

Max. total: 10540 Point : A00 Load Comb.: Gravity{1}

 FS-4

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:09 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 4

RESULT SUMMARY

Maximum displacements (mm)

Maximum X :	8.86	Point : A01	Load Comb.: User 1{1}
Maximum Y :	-37.29	Point : A01	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Z :	-6.17	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}
Max. total:	37.29	Point : A01	Load Comb.: Gravity{1}

Maximum rotations (deg)

Maximum X :	0.00	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Y :	0.00	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Max. total:	0.00	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}

Maximum pipe forces (N)

Maximum X :	-960	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Maximum Y :	3880	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Z :	3413	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}
Max. total:	5168	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}

Maximum pipe moments (N.m)

Maximum X :	-10540	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Y :	-2608	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}

7.95	113	User 1{1}	0.00	15.90	-15.90	0.00	15.90	-15.90
29.88	180	GT1{1}	0.00	58.39	-59.76	0.00	58.39	-59.76
43.17	180	GT1P1{1}	45.52	77.33	-40.82	0.00	77.33	-40.82
41.03	195	GT1P1U1{1}	45.52	73.05	-36.54	0.00	73.05	-36.54

*** Segment A end ***

FS-4

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:09 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 3

GENERAL PIPE STRESS REPORT

(Stress in N/mm2)

Point Total name Stress	Load combination Loc	Hoop Stress	Longitudinal Max Min	Shear Stress	Principal Max Min
----------------------------------	----------------------------	----------------	----------------------------	-----------------	-------------------------

*** Segment A begin ***

A00	SIFI= 1.00	SIFO= 1.00						
REST	Gravity{1}		0.00	59.09	-59.06	0.00	59.09	-59.06
29.55	0							
0.35	270	Thermal 1{1}	0.00	-0.70	-0.70	0.00	0.00	-0.70
22.76	270	Pressure 1{1}	45.52	18.94	18.94	0.00	45.52	18.94
7.95	113	User 1{1}	0.00	15.90	-15.90	0.00	15.90	-15.90
29.88	180	GT1{1}	0.00	58.39	-59.76	0.00	58.39	-59.76
43.17	180	GT1P1{1}	45.52	77.33	-40.82	0.00	77.33	-40.82
41.03	195	GT1P1U1{1}	45.52	73.05	-36.54	0.00	73.05	-36.54
A01	SIFI= 1.00	SIFO= 1.00						
REST	Gravity{1}		0.00	29.56	-29.52	0.00	29.56	-29.52
14.78	180	Thermal 1{1}	0.00	-0.70	-0.70	0.00	0.00	-0.70
0.35	270	Pressure 1{1}	45.52	18.94	18.94	0.00	45.52	18.94
22.76	270	User 1{1}	0.00	7.95	-7.95	0.00	7.95	-7.95
3.98	293	GT1{1}	0.00	28.85	-30.22	0.00	28.85	-30.22
15.11	0	GT1P1{1}	45.52	47.79	-11.28	0.00	47.79	-11.28
28.40	0	GT1P1U1{1}	45.52	45.65	-9.14	0.00	45.65	-9.14
27.33	15							
A02	SIFI= 1.00	SIFO= 1.00						
REST	Gravity{1}		0.00	59.09	-59.06	0.00	59.09	-59.06
29.55	0	Thermal 1{1}	0.00	-0.70	-0.70	0.00	0.00	-0.70
0.35	270	Pressure 1{1}	45.52	18.94	18.94	0.00	45.52	18.94
22.76	270							

0	5270						
		GT1P1{1}	0	0	3413	3413	5270
0	5270						
		GT1P1U1{1}	0	0	3413	3413	4711
0	4888						1304
A02		Gravity{1}	0	-3880	-83	3881	-10540
0	10540						0
		Thermal 1{1}	0	0	3328	3328	0
0	0						0
		Pressure 1{1}	0	0	168	168	0
0	0						0
		User 1{1}	960	411	0	1045	1118
0	2838						-2608
		GT1{1}	0	-3880	3246	5058	-10540
0	10540						0
		GT1P1{1}	0	-3880	3413	5168	-10540
0	10540						0
		GT1P1U1{1}	960	-3468	3413	4960	-9423
0	9777						-2608
*** Segment A end ***							

FS-4

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:09 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 2

G L O B A L F O R C E S & M O M E N T S

Point) name Z	Load combination Result	FORCES (N)				MOMENTS (N.m)	
		X	Y	Z	Result	X	Y
*** Segment A begin ***							
A00	Gravity{1}	0	3880	-83	3881	-10540	0
0	10540						
0	0	0	0	3328	3328	0	0
0	0	0	0	168	168	0	0
0	0	0	0	168	168	0	0
0	User 1{1}	-960	-411	0	1045	1118	-2608
0	2838						
0	GT1{1}	0	3880	3246	5058	-10540	0
0	10540						
0	GT1P1{1}	0	3880	3413	5168	-10540	0
0	10540						
0	GT1P1U1{1}	-960	3468	3413	4960	-9423	-2608
0	9777						
A01	- Gravity{1}	0	0	-83	83	5270	0
0	5270						
0	0	0	0	3328	3328	0	0
0	0	0	0	168	168	0	0
0	0	0	0	168	168	0	0
0	User 1{1}	0	0	0	0	-559	1304
0	1419						
0	GT1{1}	0	0	3246	3246	5270	0
0	5270						
0	GT1P1{1}	0	0	3413	3413	5270	0
0	5270						
0	GT1P1U1{1}	0	0	3413	3413	4711	1304
0	4888						
A01	+ Gravity{1}	0	0	-83	83	5270	0
0	5270						
0	0	0	0	3328	3328	0	0
0	0	0	0	168	168	0	0
0	0	0	0	168	168	0	0
0	User 1{1}	0	0	0	0	-559	1304
0	1419						
0	GT1{1}	0	0	3246	3246	5270	0
0.00	GT1P1{1}	0.00	-8.51	6.17	6.17	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	1.74	-7.61	6.17	6.17	0.00	0.00
0.00							
*** Segment A end ***							

FS-4

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:09 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 1

D I S P L A C E M E N T S

Point) name Z	Load combination	TRANSLATIONS (mm)			ROTATIONS (deg)	
		X	Y	Z	X	Y

*** Segment A begin ***

A00 0.00	Gravity{1}	0.00	-8.51	0.15	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	-6.02	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	-0.30	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	1.74	0.90	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-8.51	-5.87	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-8.51	-6.17	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	1.74	-7.61	-6.17	0.00	0.00
0.00						
A01 0.00	Gravity{1}	0.00	-37.29	0.00	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	8.86	3.95	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-37.29	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-37.29	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	8.86	-33.34	0.00	0.00	0.00
0.00						
A02 0.00	Gravity{1}	0.00	-8.51	-0.15	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	6.02	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	1.74	0.90	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-8.51	5.87	0.00	0.00
0.00						

5. Output Software FS-5

FS-5

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:09 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 2

GLOBAL FORCES & MOMENTS

Point) Z	Load name combination Result	FORCES (N)				MOMENTS (N.m)	
		X	Y	Z	Result	X	Y
*** Segment A begin ***							
A00	Gravity{1}	0	2047	-44	2048	-2934	0
0	2934						
0	Thermal 1{1}	0	0	1760	1760	0	0
0	0						
0	Pressure 1{1}	0	0	89	89	0	0
0	0						
0	User 1{1}	-507	-217	0	551	311	-726
0	790						
0	GT1{1}	0	2047	1716	2671	-2934	0
0	2934						
0	GT1P1{1}	0	2047	1805	2729	-2934	0
0	2934						
0	GT1P1U1{1}	-507	1830	1805	2620	-2623	-726
0	2722						
A01	- Gravity{1}	0	0	-44	44	1467	0
0	1467						
0	Thermal 1{1}	0	0	1760	1760	0	0
0	0						
0	Pressure 1{1}	0	0	89	89	0	0
0	0						
0	User 1{1}	0	0	0	0	-156	363
0	395						
0	GT1{1}	0	0	1716	1716	1467	0
0	1467						
0	GT1P1{1}	0	0	1805	1805	1467	0
0	1467						
0	GT1P1U1{1}	0	0	1805	1805	1311	363
0	1361						
A01	+ Gravity{1}	0	0	-44	44	1467	0
0	1467						
0	Thermal 1{1}	0	0	1760	1760	0	0
0	0						
0	Pressure 1{1}	0	0	89	89	0	0
0	0						
0	User 1{1}	0	0	0	0	-156	363
0	395						
0	GT1{1}	0	0	1716	1716	1467	0

0	1467						
		GT1P1{1}	0	0	1805	1805	1467
0	1467						
		GT1P1U1{1}	0	0	1805	1805	1311
0	1361						363
A02		Gravity{1}	0	-2047	-44	2048	-2934
0	2934						0
		Thermal 1{1}	0	0	1760	1760	0
0	0						0
		Pressure 1{1}	0	0	89	89	0
0	0						0
		User 1{1}	507	217	0	551	311
0	790						-726
		GT1{1}	0	-2047	1716	2671	-2934
0	2934						0
		GT1P1{1}	0	-2047	1805	2729	-2934
0	2934						0
		GT1P1U1{1}	507	-1830	1805	2620	-2623
0	2722						-726
*** Segment A end ***							

FS-5

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:09 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 3

GENERAL PIPE STRESS REPORT

(Stress in N/mm2)

Point Total name Stress	Load combination Loc	Hoop Stress	Longitudinal		Shear Stress	Principal	
			Max	Min		Max	Min
*** Segment A begin ***							
A00 REST 8.23	SIFI= 1.00 SIFO= 1.00 Gravity{1} 0	0.00	16.45	-16.44	0.00	16.45	-16.44
0.19	270 Thermal 1{1}	0.00	-0.37	-0.37	0.00	0.00	-0.37
22.76	270 Pressure 1{1}	45.52	18.95	18.95	0.00	45.52	18.95
2.21	113 User 1{1}	0.00	4.43	-4.43	0.00	4.43	-4.43
8.40	180 GT1{1}	0.00	16.08	-16.81	0.00	16.08	-16.81
22.76	0 GT1P1{1}	45.52	35.04	2.15	0.00	45.52	2.15
22.76	15 GT1P1U1{1}	45.52	33.85	3.34	0.00	45.52	3.34
A01 SIFI= 1.00 SIFO= 1.00							
4.12	180 Gravity{1}	0.00	8.23	-8.21	0.00	8.23	-8.21
0.19	270 Thermal 1{1}	0.00	-0.37	-0.37	0.00	0.00	-0.37
22.76	270 Pressure 1{1}	45.52	18.95	18.95	0.00	45.52	18.95
1.11	293 User 1{1}	0.00	2.21	-2.21	0.00	2.21	-2.21
4.29	0 GT1{1}	0.00	7.86	-8.58	0.00	7.86	-8.58
22.76	180 GT1P1{1}	45.52	26.81	10.37	0.00	45.52	10.37
22.76	195 GT1P1U1{1}	45.52	26.22	10.97	0.00	45.52	10.97
A02 SIFI= 1.00 SIFO= 1.00							
8.23	0 Gravity{1}	0.00	16.45	-16.44	0.00	16.45	-16.44
0.19	270 Thermal 1{1}	0.00	-0.37	-0.37	0.00	0.00	-0.37
22.76	270 Pressure 1{1}	45.52	18.95	18.95	0.00	45.52	18.95
2.21	113 User 1{1}	0.00	4.43	-4.43	0.00	4.43	-4.43
8.40	180 GT1{1}	0.00	16.08	-16.81	0.00	16.08	-16.81
22.76	0 GT1P1{1}	45.52	35.04	2.15	0.00	45.52	2.15
22.76	15 GT1P1U1{1}	45.52	33.85	3.34	0.00	45.52	3.34
*** Segment A end ***							

FS-5

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:09 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 4

R E S U L T S U M M A R Y

Maximum displacements (mm)

Maximum X :	1.47	Point : A01	Load Comb.: User 1{1}
Maximum Y :	-6.74	Point : A01	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Z :	-3.27	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}
Max. total:	6.74	Point : A01	Load Comb.: Gravity{1}

Maximum rotations (deg)

Maximum X :	0.00	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Y :	0.00	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Max. total:	0.00	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}

Maximum pipe forces (N)

Maximum X :	-507	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Maximum Y :	2047	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Z :	1805	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}
Max. total:	2729	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}

Maximum pipe moments (N.m)

Maximum X :	-2934	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Y :	-726	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Max. total:	2934	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}

6. Output Software FS-6

```

-----
FS-6
06/30/2020 TUGAS AKHIR
11:10 AM
Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 1
-----

```

D I S P L A C E M E N T S

Point) name Z	Load combination	TRANSLATIONS (mm)			ROTATIONS (deg)	
		X	Y	Z	X	Y
*** Segment A begin ***						
A00 0.00	Gravity{1}	0.00	-4.75	0.08	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	-3.37	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	-0.17	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	0.97	0.50	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-4.75	-3.28	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-4.75	-3.45	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	0.97	-4.25	-3.45	0.00	0.00
A01 0.00	Gravity{1}	0.00	-7.57	0.00	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	1.67	0.80	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-7.57	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-7.57	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	1.67	-6.76	0.00	0.00	0.00
A02 0.00	Gravity{1}	0.00	-4.75	-0.08	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	3.37	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	0.97	0.50	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-4.75	3.28	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-4.75	3.45	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	0.97	-4.25	3.45	0.00	0.00
*** Segment A end ***						

FS-6

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:10 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 2

G L O B A L F O R C E S & M O M E N T S

Point) Z	Load combination Result	FORCES (N)				MOMENTS (N.m)	
		X	Y	Z	Result	X	Y
*** Segment A begin ***							
A00	Gravity{1}	0	2166	-46	2167	-3285	0
0	3285						
	Thermal 1{1}	0	0	1862	1862	0	0
0	0						
	Pressure 1{1}	0	0	94	94	0	0
0	0						
	User 1{1}	-536	-230	0	583	348	-813
0	884						
	GT1{1}	0	2166	1816	2826	-3285	0
0	3285						
	GT1P1{1}	0	2166	1909	2888	-3285	0
0	3285						
	GT1P1U1{1}	-536	1936	1909	2772	-2937	-813
0	3047						
A01	- Gravity{1}	0	0	-46	46	1643	0
0	1643						
	Thermal 1{1}	0	0	1862	1862	0	0
0	0						
	Pressure 1{1}	0	0	94	94	0	0
0	0						
	User 1{1}	0	0	0	0	-174	406
0	442						
	GT1{1}	0	0	1816	1816	1643	0
0	1643						
	GT1P1{1}	0	0	1909	1909	1643	0
0	1643						
	GT1P1U1{1}	0	0	1909	1909	1468	406
0	1524						
A01	+ Gravity{1}	0	0	-46	46	1643	0
0	1643						
	Thermal 1{1}	0	0	1862	1862	0	0
0	0						
	Pressure 1{1}	0	0	94	94	0	0
0	0						
	User 1{1}	0	0	0	0	-174	406
0	442						
	GT1{1}	0	0	1816	1816	1643	0

0	1643						
		GT1P1{1}	0	0	1909	1909	1643
0	1643						
		GT1P1U1{1}	0	0	1909	1909	1468
0	1524						
A02		Gravity{1}	0	-2166	-46	2167	-3285
0	3285						
		Thermal 1{1}	0	0	1862	1862	0
0	0						
		Pressure 1{1}	0	0	94	94	0
0	0						
		User 1{1}	536	230	0	583	348
0	884						
		GT1{1}	0	-2166	1816	2826	-3285
0	3285						
		GT1P1{1}	0	-2166	1909	2888	-3285
0	3285						
		GT1P1U1{1}	536	-1936	1909	2772	-2937
0	3047						

*** Segment A end ***

FS-6

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:10 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 3

GENERAL PIPE STRESS REPORT

(Stress in N/mm2)

Point Total name Stress	Load combination Loc	Hoop Stress	Longitudinal Max Min	Shear Stress	Principal Max Min
----------------------------------	----------------------------	----------------	----------------------------	-----------------	-------------------------

*** Segment A begin ***

A00	SIFI= 1.00	SIFO= 1.00						
REST	Gravity{1}		0.00	18.42	-18.40	0.00	18.42	-18.40
9.21	0							
	Thermal 1{1}		0.00	-0.39	-0.39	0.00	0.00	-0.39
0.20	270							
	Pressure 1{1}		45.52	18.95	18.95	0.00	45.52	18.95
22.76	270							
	User 1{1}		0.00	4.96	-4.96	0.00	4.96	-4.96
2.48	113							
	GT1{1}		0.00	18.03	-18.80	0.00	18.03	-18.80
9.40	180							
	GT1P1{1}		45.52	36.98	0.16	0.00	45.52	0.16
22.76	0							
	GT1P1U1{1}		45.52	35.65	1.49	0.00	45.52	1.49
22.76	15							

A01	SIFI= 1.00	SIFO= 1.00						
REST	Gravity{1}		0.00	9.22	-9.20	0.00	9.22	-9.20
4.61	180							
	Thermal 1{1}		0.00	-0.39	-0.39	0.00	0.00	-0.39
0.20	270							
	Pressure 1{1}		45.52	18.95	18.95	0.00	45.52	18.95
22.76	270							
	User 1{1}		0.00	2.48	-2.48	0.00	2.48	-2.48
1.24	293							
	GT1{1}		0.00	8.82	-9.59	0.00	8.82	-9.59
4.79	0							
	GT1P1{1}		45.52	27.78	9.36	0.00	45.52	9.36
22.76	180							
	GT1P1U1{1}		45.52	27.11	10.03	0.00	45.52	10.03
22.76	195							

A02	SIFI= 1.00	SIFO= 1.00						
REST	Gravity{1}		0.00	18.42	-18.40	0.00	18.42	-18.40
9.21	0							
	Thermal 1{1}		0.00	-0.39	-0.39	0.00	0.00	-0.39
0.20	270							
	Pressure 1{1}		45.52	18.95	18.95	0.00	45.52	18.95
22.76	270							
	User 1{1}		0.00	4.96	-4.96	0.00	4.96	-4.96
2.48	113							
	GT1{1}		0.00	18.03	-18.80	0.00	18.03	-18.80
9.40	180							
	GT1P1{1}		45.52	36.98	0.16	0.00	45.52	0.16
22.76	0							
	GT1P1U1{1}		45.52	35.65	1.49	0.00	45.52	1.49
22.76	15							

*** Segment A end ***

FS-6

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:10 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 4

R E S U L T S U M M A R Y

Maximum displacements (mm)

Maximum X :	1.67	Point : A01	Load Comb.: User 1{1}
Maximum Y :	-7.57	Point : A01	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Z :	-3.45	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}
Max. total:	7.57	Point : A01	Load Comb.: Gravity{1}

Maximum rotations (deg)

Maximum X :	0.00	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Y :	0.00	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Max. total:	0.00	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}

Maximum pipe forces (N)

Maximum X :	-536	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Maximum Y :	2166	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Z :	1909	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}
Max. total:	2888	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}

Maximum pipe moments (N.m)

Maximum X :	-3285	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Y :	-813	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Max. total:	3285	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}

7. Output Software FS-7

FS-7

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:10 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 1

D I S P L A C E M E N T S

Point) name Z	Load combination	TRANSLATIONS (mm)			ROTATIONS (deg)	
		X	Y	Z	X	Y
*** Segment A begin ***						
A00 0.00	Gravity{1}	0.00	-9.40	0.17	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	-6.65	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	-0.33	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	1.92	1.00	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-9.40	-6.48	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-9.40	-6.82	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	1.92	-8.40	-6.82	0.00	0.00
A01 0.00	Gravity{1}	0.00	-52.18	0.00	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	12.50	5.53	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-52.18	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-52.18	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	12.50	-46.64	0.00	0.00	0.00
A02 0.00	Gravity{1}	0.00	-9.40	-0.17	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	6.65	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	1.92	1.00	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-9.40	6.48	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-9.40	6.82	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	1.92	-8.40	6.82	0.00	0.00
*** Segment A end ***						

FS-7

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:10 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 2

G L O B A L F O R C E S & M O M E N T S

Point) name Z	Load combination Result	FORCES (N)				MOMENTS (N.m)	
		X	Y	Z	Result	X	Y
*** Segment A begin ***							
A00	Gravity{1}	0	4285	-91	4286	-12854	0
0	12854						
	Thermal 1{1}	0	0	3674	3674	0	0
0	0						
	Pressure 1{1}	0	0	185	185	0	0
0	0						
	User 1{1}	-1060	-454	0	1153	1363	-3181
0	3460						
	GT1{1}	0	4285	3582	5585	-12854	0
0	12854						
	GT1P1{1}	0	4285	3767	5705	-12854	0
0	12854						
	GT1P1U1{1}	-1060	3830	3767	5476	-11491	-3181
0	11923						
A01	- Gravity{1}	0	0	-91	91	6427	0
0	6427						
	Thermal 1{1}	0	0	3674	3674	0	0
0	0						
	Pressure 1{1}	0	0	185	185	0	0
0	0						
	User 1{1}	0	0	0	0	-682	1590
0	1730						
	GT1{1}	0	0	3582	3582	6427	0
0	6427						
	GT1P1{1}	0	0	3767	3767	6427	0
0	6427						
	GT1P1U1{1}	0	0	3767	3767	5745	1590
0	5961						
A01	+ Gravity{1}	0	0	-91	91	6427	0
0	6427						
	Thermal 1{1}	0	0	3674	3674	0	0
0	0						
	Pressure 1{1}	0	0	185	185	0	0
0	0						
	User 1{1}	0	0	0	0	-682	1590
0	1730						
	GT1{1}	0	0	3582	3582	6427	0

0	6427							
		GT1P1{1}	0	0	3767	3767	6427	0
0	6427							
		GT1P1U1{1}	0	0	3767	3767	5745	1590
0	5961							
A02		Gravity{1}	0	-4285	-91	4286	-12854	0
0	12854							
		Thermal 1{1}	0	0	3674	3674	0	0
0	0							
		Pressure 1{1}	0	0	185	185	0	0
0	0							
		User 1{1}	1060	454	0	1153	1363	-3181
0	3460							
		GT1{1}	0	-4285	3582	5585	-12854	0
0	12854							
		GT1P1{1}	0	-4285	3767	5705	-12854	0
0	12854							
		GT1P1U1{1}	1060	-3830	3767	5476	-11491	-3181
0	11923							
*** Segment A end ***								

FS-7

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:10 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 3

GENERAL PIPE STRESS REPORT

(Stress in N/mm2)

Point Total name Stress	Load combination Loc	Hoop Stress	Longitudinal Max Min	Shear Stress	Principal Max Min
*** Segment A begin ***					
A00 REST 36.03	SIFI= 1.00 SIF0= 1.00 Gravity{1} 0	0.00	72.06 -72.02	0.00	72.06 -72.02
0.39	270 Thermal 1{1}	0.00	-0.77 -0.77	0.00	0.00 -0.77
22.76	270 Pressure 1{1}	45.52	18.93 18.93	0.00	45.52 18.93
9.70	113 User 1{1}	0.00	19.39 -19.39	0.00	19.39 -19.39
36.40	180 GT1{1}	0.00	71.29 -72.80	0.00	71.29 -72.80
49.69	180 GT1P1{1}	45.52	90.22 -53.86	0.00	90.22 -53.86
47.08	195 GT1P1U1{1}	45.52	85.00 -48.64	0.00	85.00 -48.64
A01 REST 18.02	SIFI= 1.00 SIF0= 1.00 Gravity{1} 180	0.00	36.04 -36.00	0.00	36.04 -36.00
0.39	270 Thermal 1{1}	0.00	-0.77 -0.77	0.00	0.00 -0.77
22.76	270 Pressure 1{1}	45.52	18.93 18.93	0.00	45.52 18.93
4.85	293 User 1{1}	0.00	9.70 -9.70	0.00	9.70 -9.70
18.39	0 GT1{1}	0.00	35.27 -36.77	0.00	35.27 -36.77
31.68	0 GT1P1{1}	45.52	54.20 -17.84	0.00	54.20 -17.84
30.37	15 GT1P1U1{1}	45.52	51.59 -15.23	0.00	51.59 -15.23
A02 REST 36.03	SIFI= 1.00 SIF0= 1.00 Gravity{1} 0	0.00	72.06 -72.02	0.00	72.06 -72.02
0.39	270 Thermal 1{1}	0.00	-0.77 -0.77	0.00	0.00 -0.77
22.76	270 Pressure 1{1}	45.52	18.93 18.93	0.00	45.52 18.93
9.70	113 User 1{1}	0.00	19.39 -19.39	0.00	19.39 -19.39
36.40	180 GT1{1}	0.00	71.29 -72.80	0.00	71.29 -72.80
49.69	180 GT1P1{1}	45.52	90.22 -53.86	0.00	90.22 -53.86
47.08	195 GT1P1U1{1}	45.52	85.00 -48.64	0.00	85.00 -48.64
*** Segment A end ***					

FS-7

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:10 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 4

R E S U L T S U M M A R Y

Maximum displacements (mm)

Maximum X :	12.50	Point : A01	Load Comb.: User 1{1}
Maximum Y :	-52.18	Point : A01	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Z :	-6.82	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}
Max. total:	52.18	Point : A01	Load Comb.: Gravity{1}

Maximum rotations (deg)

Maximum X :	0.00	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Y :	0.00	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Max. total:	0.00	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}

Maximum pipe forces (N)

Maximum X :	-1060	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Maximum Y :	4285	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Z :	3767	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}
Max. total:	5705	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}

Maximum pipe moments (N.m)

Maximum X :	-12854	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Y :	-3181	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}

Max. total:	12854	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
-------------	-------	-------------	------------------------

8. Output Software FS-8

 FS-8

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:10 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 1

D I S P L A C E M E N T S

Point) name Z	Load combination	TRANSLATIONS (mm)			ROTATIONS (deg)	
		X	Y	Z	X	Y

*** Segment A begin ***

A00 0.00	Gravity{1}	0.00	-3.39	0.06	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	-2.41	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	-0.12	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	0.69	0.36	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-3.39	-2.35	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-3.39	-2.47	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	0.69	-3.03	-2.47	0.00	0.00
A01 0.00	Gravity{1}	0.00	-4.13	0.00	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	0.88	0.44	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-4.13	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-4.13	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	0.88	-3.69	0.00	0.00	0.00
A02 0.00	Gravity{1}	0.00	-3.39	-0.06	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	2.41	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	0.69	0.36	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-3.39	2.35	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-3.39	2.47	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	0.69	-3.03	2.47	0.00	0.00

*** Segment A end ***

FS-8

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:10 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 2

G L O B A L F O R C E S & M O M E N T S

Point name Z	Load combination Result	FORCES (N)				MOMENTS (N.m)	
		X	Y	Z	Result	X	Y

*** Segment A begin ***

A00	Gravity{1}	0	1547	-33	1548	-1676	0
0	1676						
0	Thermal 1{1}	0	0	1331	1331	0	0
0	0						
0	Pressure 1{1}	0	0	67	67	0	0
0	0						
0	User 1{1}	-383	-164	0	417	178	-415
0	451						
0	GT1{1}	0	1547	1298	2019	-1676	0
0	1676						
0	GT1P1{1}	0	1547	1365	2063	-1676	0
0	1676						
0	GT1P1U1{1}	-383	1383	1365	1981	-1498	-415
0	1555						
A01	- Gravity{1}	0	0	-33	33	838	0
0	838						
0	Thermal 1{1}	0	0	1331	1331	0	0
0	0						
0	Pressure 1{1}	0	0	67	67	0	0
0	0						
0	User 1{1}	0	0	0	0	-89	207
0	226						
0	GT1{1}	0	0	1298	1298	838	0
0	838						
0	GT1P1{1}	0	0	1365	1365	838	0
0	838						
0	GT1P1U1{1}	0	0	1365	1365	749	207
0	777						
A01	+ Gravity{1}	0	0	-33	33	838	0
0	838						
0	Thermal 1{1}	0	0	1331	1331	0	0
0	0						
0	Pressure 1{1}	0	0	67	67	0	0
0	0						
0	User 1{1}	0	0	0	0	-89	207
0	226						
0	GT1{1}	0	0	1298	1298	838	0

0	838							
		GT1P1{1}	0	0	1365	1365	838	0
0	838							
		GT1P1U1{1}	0	0	1365	1365	749	207
0	777							
A02		Gravity{1}	0	-1547	-33	1548	-1676	0
0	1676							
		Thermal 1{1}	0	0	1331	1331	0	0
0	0							
		Pressure 1{1}	0	0	67	67	0	0
0	0							
		User 1{1}	383	164	0	417	178	-415
0	451							
		GT1{1}	0	-1547	1298	2019	-1676	0
0	1676							
		GT1P1{1}	0	-1547	1365	2063	-1676	0
0	1676							
		GT1P1U1{1}	383	-1383	1365	1981	-1498	-415
0	1555							

*** Segment A end ***

FS-8

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:10 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 3

GENERAL PIPE STRESS REPORT

(Stress in N/mm2)

Point Total name Stress	Load combination Loc	Hoop Stress	Longitudinal		Shear Stress	Principal	
			Max	Min		Max	Min

*** Segment A begin ***

A00	SIFI= 1.00	SIF0= 1.00						
REST	Gravity{1}		0.00	9.40	-9.39	0.00	9.40	-9.39
4.70	0							
	Thermal 1{1}		0.00	-0.28	-0.28	0.00	0.00	-0.28
0.14	270							
	Pressure 1{1}		45.52	18.96	18.96	0.00	45.52	18.96
22.76	270							
	User 1{1}		0.00	2.53	-2.53	0.00	2.53	-2.53
1.26	113							
	GT1{1}		0.00	9.12	-9.67	0.00	9.12	-9.67
4.83	180							
	GT1P1{1}		45.52	28.08	9.29	0.00	45.52	9.29
22.76	0							
	GT1P1U1{1}		45.52	27.40	9.97	0.00	45.52	9.97
22.76	15							

A01	SIFI= 1.00	SIF0= 1.00						
REST	Gravity{1}		0.00	4.70	-4.69	0.00	4.70	-4.69
2.35	180							
	Thermal 1{1}		0.00	-0.28	-0.28	0.00	0.00	-0.28
0.14	270							
	Pressure 1{1}		45.52	18.96	18.96	0.00	45.52	18.96
22.76	270							
	User 1{1}		0.00	1.26	-1.26	0.00	1.26	-1.26
0.63	293							
	GT1{1}		0.00	4.42	-4.97	0.00	4.42	-4.97
2.49	0							
	GT1P1{1}		45.52	23.38	13.99	0.00	45.52	13.99
22.76	180							
	GT1P1U1{1}		45.52	23.04	14.33	0.00	45.52	14.33
22.76	195							

A02	SIFI= 1.00	SIF0= 1.00						
REST	Gravity{1}		0.00	9.40	-9.39	0.00	9.40	-9.39
4.70	0							
	Thermal 1{1}		0.00	-0.28	-0.28	0.00	0.00	-0.28
0.14	270							
	Pressure 1{1}		45.52	18.96	18.96	0.00	45.52	18.96
22.76	270							

	User 1{1}		0.00	2.53	-2.53	0.00	2.53	-2.53
1.26	113							
	GT1{1}		0.00	9.12	-9.67	0.00	9.12	-9.67
4.83	180							
	GT1P1{1}		45.52	28.08	9.29	0.00	45.52	9.29
22.76	0							
	GT1P1U1{1}		45.52	27.40	9.97	0.00	45.52	9.97
22.76	15							

*** Segment A end ***

FS-8

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:10 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 4

R E S U L T S U M M A R Y

Maximum displacements (mm)

Maximum X :	0.88	Point : A01	Load Comb.: User 1{1}
Maximum Y :	-4.13	Point : A01	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Z :	-2.47	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}
Max. total:	4.20	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}

Maximum rotations (deg)

Maximum X :	0.00	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Y :	0.00	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Max. total:	0.00	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}

Maximum pipe forces (N)

Maximum X :	-383	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Maximum Y :	1547	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Z :	1365	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}
Max. total:	2063	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}

Maximum pipe moments (N.m)

Maximum X :	-1676	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Y :	-415	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}

Max. total:	1676	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
-------------	------	-------------	------------------------

9. Output Software FS-9

 FS-9

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:11 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 1

D I S P L A C E M E N T S

Point) name Z	Load combination	TRANSLATIONS (mm)			ROTATIONS (deg)	
		X	Y	Z	X	Y

*** Segment A begin ***

A00	Gravity{1}	0.00	-4.28	0.08	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	-3.04	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	-0.15	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	0.83	0.45	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-4.28	-2.96	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-4.28	-3.11	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	0.83	-3.83	-3.11	0.00	0.00
0.00						
A01	Gravity{1}	0.00	-6.14	0.00	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	1.26	0.65	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-6.14	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1{1}	0.00	-6.14	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	1.26	-5.49	0.00	0.00	0.00
0.00						
A02	Gravity{1}	0.00	-4.28	-0.08	0.00	0.00
0.00	Thermal 1{1}	0.00	0.00	3.04	0.00	0.00
0.00	Pressure 1{1}	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00
0.00	User 1{1}	0.83	0.45	0.00	0.00	0.00
0.00	GT1{1}	0.00	-4.28	2.96	0.00	0.00
0.00						
0.00	GT1P1{1}	0.00	-4.28	3.11	0.00	0.00
0.00	GT1P1U1{1}	0.83	-3.83	3.11	0.00	0.00

*** Segment A end ***

FS-9

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:11 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 2

G L O B A L F O R C E S & M O M E N T S

Point) Z	Load combination Result	FORCES (N)				MOMENTS (N.m)	
		X	Y	Z	Result	X	Y
*** Segment A begin ***							
A00 0	Gravity{1}	0	1952	-42	1952	-2668	0
0	2668						
0	Thermal 1{1}	0	0	1678	1678	0	0
0	0						
0	Pressure 1{1}	0	0	84	84	0	0
0	0						
0	User 1{1}	-458	-207	0	502	283	-626
0	687						
0	GT1{1}	0	1952	1637	2547	-2668	0
0	2668						
0	GT1P1{1}	0	1952	1721	2602	-2668	0
0	2668						
0	GT1P1U1{1}	-458	1745	1721	2493	-2385	-626
0	2465						
A01 0	- Gravity{1}	0	0	-42	42	1334	0
0	1334						
0	Thermal 1{1}	0	0	1678	1678	0	0
0	0						
0	Pressure 1{1}	0	0	84	84	0	0
0	0						
0	User 1{1}	0	0	0	0	-141	313
0	343						
0	GT1{1}	0	0	1637	1637	1334	0
0	1334						
0	GT1P1{1}	0	0	1721	1721	1334	0
0	1334						
0	GT1P1U1{1}	0	0	1721	1721	1192	313
0	1233						
A01 0	+ Gravity{1}	0	0	-42	42	1334	0
0	1334						
0	Thermal 1{1}	0	0	1678	1678	0	0
0	0						
0	Pressure 1{1}	0	0	84	84	0	0
0	0						
0	User 1{1}	0	0	0	0	-141	313
0	343						
0	GT1{1}	0	0	1637	1637	1334	0

0	1334						
		GT1P1{1}	0	0	1721	1721	1334
0	1334						
		GT1P1U1{1}	0	0	1721	1721	1192
0	1233						313
A02		Gravity{1}	0	-1952	-42	1952	-2668
0	2668						0
		Thermal 1{1}	0	0	1678	1678	0
0	0						0
		Pressure 1{1}	0	0	84	84	0
0	0						0
		User 1{1}	458	207	0	502	283
0	687						-626
		GT1{1}	0	-1952	1637	2547	-2668
0	2668						0
		GT1P1{1}	0	-1952	1721	2602	-2668
0	2668						0
		GT1P1U1{1}	458	-1745	1721	2493	-2385
0	2465						-626

*** Segment A end ***

FS-9

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:11 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 3

GENERAL PIPE STRESS REPORT

(Stress in N/mm2)

Point Total name Stress	Load combination Loc	Hoop Stress	Longitudinal Max	Min	Shear Stress	Principal Max	Min
*** Segment A begin ***							
A00 REST 7.48	SIFI= 1.00 SIF0= 1.00 Gravity{1} 0	0.00	14.96	-14.94	0.00	14.96	-14.94
0.18	270 Thermal 1{1}	0.00	-0.35	-0.35	0.00	0.00	-0.35
22.76	270 Pressure 1{1}	45.52	18.95	18.95	0.00	45.52	18.95
1.92	114 User 1{1}	0.00	3.85	-3.85	0.00	3.85	-3.85
7.65	180 GT1{1}	0.00	14.61	-15.30	0.00	14.61	-15.30
22.76	0 GT1P1{1}	45.52	33.56	3.66	0.00	45.52	3.66
22.76	15 GT1P1U1{1}	45.52	32.43	4.79	0.00	45.52	4.79
A01 REST 3.74	SIFI= 1.00 SIF0= 1.00 Gravity{1} 180	0.00	7.48	-7.47	0.00	7.48	-7.47
0.18	270 Thermal 1{1}	0.00	-0.35	-0.35	0.00	0.00	-0.35
22.76	270 Pressure 1{1}	45.52	18.95	18.95	0.00	45.52	18.95
0.96	294 User 1{1}	0.00	1.92	-1.92	0.00	1.92	-1.92
3.91	0 GT1{1}	0.00	7.13	-7.82	0.00	7.13	-7.82
22.76	180 GT1P1{1}	45.52	26.09	11.13	0.00	45.52	11.13
22.76	195 GT1P1U1{1}	45.52	25.52	11.70	0.00	45.52	11.70
A02 REST 7.48	SIFI= 1.00 SIF0= 1.00 Gravity{1} 0	0.00	14.96	-14.94	0.00	14.96	-14.94
0.18	270 Thermal 1{1}	0.00	-0.35	-0.35	0.00	0.00	-0.35
22.76	270 Pressure 1{1}	45.52	18.95	18.95	0.00	45.52	18.95
1.92	114 User 1{1}	0.00	3.85	-3.85	0.00	3.85	-3.85
7.65	180 GT1{1}	0.00	14.61	-15.30	0.00	14.61	-15.30
22.76	0 GT1P1{1}	45.52	33.56	3.66	0.00	45.52	3.66
22.76	15 GT1P1U1{1}	45.52	32.43	4.79	0.00	45.52	4.79
*** Segment A end ***							

FS-9

06/30/2020 TUGAS AKHIR

BENTLEY

11:11 AM

AutoPIPE

Advanced 11.01.00.17 RESULT PAGE 4

R E S U L T S U M M A R Y

Maximum displacements (mm)

Maximum X :	1.26	Point : A01	Load Comb.: User 1{1}
Maximum Y :	-6.14	Point : A01	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Z :	-3.11	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}
Max. total:	6.14	Point : A01	Load Comb.: Gravity{1}

Maximum rotations (deg)

Maximum X :	0.00	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Y :	0.00	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Max. total:	0.00	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}

Maximum pipe forces (N)

Maximum X :	-458	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}
Maximum Y :	1952	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Z :	1721	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}
Max. total:	2602	Point : A00	Load Comb.: GT1P1{1}

Maximum pipe moments (N.m)

Maximum X :	-2668	Point : A00	Load Comb.: Gravity{1}
Maximum Y :	-626	Point : A00	Load Comb.: User 1{1}

BIODATA PENULIS



Adam Rangga Driyastomo lahir di Jakarta pada tanggal 1 Desember 1996. Penulis menjalani pendidikan formal SD 6 tahun di SDS Bakti Ibu dan lulus tahun 2008 kemudian melanjutkan ke jenjang SMP di SMP Negeri 12 Jakarta dan SMA Negeri 6 Jakarta lulus pada tahun 2014. Penulis sempat mengenyam pendidikan perguruan tinggi di Universitas Bina Nusantara Jurusan Arsitektur sebelum akhirnya diterima di Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2016 melalui jalur Seleksi Masuk Mandiri ITS. Selama masa perkuliahan mulai dari tahun 2016 penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan sebagai *staff* Departemen Keprofesian pada masa jabatan 2017/2018 dan juga sebagai *staff Delegate Resources Management Society of Petroleum Engineers ITS Student Chapter* pada periode 2017/2018 sebelum akhirnya menjadi *Board of Director Delegate Resource Management Society of Petroleum Engineers ITS SC* pada periode 2018/2019. Selain aktif organisasi penulis juga aktif dalam *event* seperti *Petroleum Integrated Days (PETROLIDA)* pada tahun 2018 dan juga pada tahun 2019 sebagai *staff* dan *volunteer* selain itu penulis juga sempat aktif dalam *event* Departemen Teknik Kelautan, yaitu *Ocean Engineering Exhibition and Competition (OCEANO)* mulai tahun 2017, 2018 sebagai *volunteer* dan *staff* dan yang terakhir sebagai *Head Coordinator Event Competition Ocean Engineering Exhibition and Competition (OCEANO) 2019*. Selain aktif organisasi dan *event* penulis sempat mengikuti beberapa lomba *Oil Rig Design Competition* antara lain pada *event DERRICK 2018* yang diselenggarakan oleh STEM AKAMIGAS Cepu, *Indo Ocean Expo 2019* yang diselenggarakan oleh Teknik Kelautan ITB, dan yang terakhir *PETROFEST 2019* yang diselenggarakan di Universitas Indonesia. Penulis juga berkesempatan untuk bisa melakukan Kerja Praktek di PT. Kangean *Energy Indonesia* sebagai *Project Engineer*.

Narahubung

Email : Rangga_ad@yahoo.com.au