



TUGAS AKHIR - MO 184804

**ANALISIS TEGANGAN DAN KELELAHAN AKIBAT PENGARUH
VORTEX INDUCED VIBRATION (VIV) YANG TERJADI PADA
LOKASI *CROSSING PIPELINES***

**STUDI KASUS : *PLATFORM B1C-KCOM* MILIK PERTAMINA HULU
ENERGI *OFFSHORE NORTH WEST JAVA***

ARI AFFANDI

NRP. 0431154000011

Dosen Pembimbing :

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

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

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2019



FINAL PROJECT - MO 184804

**STRESS AND FATIGUE ANALYSIS CAUSED BY THE EFFECT OF
VORTEX INDUCED VIBRATION (VIV) ON CROSSING PIPELINES
STUDY CASE : PLATFORM B1C-KCOM PERTAMINA HULU
ENERGI OFFSHORE NORTH WEST JAVA**

ARI AFFANDI

REG. 04311540000011

Supervisors :

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

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

DEPARTEMENT OF OCEAN ENGINEERING

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY

SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY

SURABAYA

2019

LEMBAR PENGESAHAN
ANALISIS TEGANGAN DAN KELELAHAN AKIBAT
PENGARUH *VORTEX INDUCED VIBRATION* (VIV) YANG
TERJADI PADA LOKASI *CROSSING PIPELINES*
STUDI KASUS : *PLATFORM BIC-KCOM* MILIK
PERTAMINA HULU ENERGI *OFFSHORE NORTH WEST*
JAVA

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:

ARI AFFANDI NRP. 0431154000011

Disetujui oleh:

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

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

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

.....
4. Sholihin, S.T., M.T. (Penguji 2)

SURABAYA, Juli 2019

**ANALISIS TEGANGAN DAN KELELAHAN AKIBAT PENGARUH
VORTEX INDUCED VIBRATION (VIV) YANG TERJADI PADA LOKASI
CROSSING PIPELINES**

**STUDI KASUS : PLATFORM B1C-KCOM MILIK PERTAMINA HULU
ENERGI OFFSHORE NORTH WEST JAVA**

Nama Mahasiswa : Ari Affandi
NRP : 0431154000011
Departemen : Teknik Kelautan FTK-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Imam Rochani, M.Sc.
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Dalam sistem perpipaan bawah laut, salah satu permasalahan utama yang sangat dihindari adalah *free span*. *Free span* tersebut rentan mengalami kegagalan struktur, seperti kelelahan, yang disebabkan oleh vibrasi yang terjadi oleh *vortex shedding* atau biasa disebut fenomena *vortex induced vibration* (VIV). Fenomena ini disebabkan oleh beban lingkungan terutama gelombang dan arus laut, hingga rasio *gap seabed* (e/D) dan kekasaran dari pipa (k/D). Dalam tugas akhir ini, analisis *free span* yang dilakukan terdiri dari analisis tegangan dari *pipelines*, analisis panjang *allowable span* untuk kondisi statis, analisis dinamis *free span*, serta analisis kelelahan. Berdasarkan hasil perhitungan tegangan, didapatkan tegangan ekuivalen sebesar 82.15 MPa dan masih memenuhi *allowable stress* dari ASME B31.8. Dan panjang *allowable span* untuk kondisi statis sebesar 16.07 m. Untuk hasil perhitungan analisis dinamis, panjang efektif *span* yang didapatkan untuk actual span 12 m sebesar 12 m dan untuk actual span 16.07 m sebesar 16.07 m. Dalam analisa *fatigue*, kondisi yang dianalisa hanya pada kondisi *in-line* saja dikarenakan kondisi *cross-flow* sudah memenuhi *criteria fatigue* dari DNV RP F105. *Fatigue life* (T_{life}) yang didapatkan yaitu 23 tahun, dengan jumlah kerusakan (D_{fat}) yang terjadi sebesar 0.92. Adapun acuan validasi yang digunakan dalam analisis dinamis dan kelelahan dari *free span* adalah DNV RP F105 mengenai *Free Spanning Pipelines*.

Kata kunci : *free span*, tegangan, *von-Mises stress*, *in-line*, *cross-flow*, VIV, *allowable span*, *fatigue life*.

STRESS AND FATIGUE ANALYSIS CAUSED BY THE EFFECT OF VORTEX INDUCED VIBRATION (VIV) ON CROSSING PIPELINES

STUDY CASE : PLATFORM B1C-KCOM PERTAMINA HULU ENERGI OFFSHORE NORTH WEST JAVA

Name : Ari Affandi
Reg. : 0431154000011
Departement : Teknik Kelautan FTK-ITS
Supervisors : Ir. Imam Rochani, M.Sc.
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

In the subsea pipeline system, one of the most problems that very avoided is free span. Free Span is prone to structural failure, such as fatigue, caused by vibrations that occur by vortex shedding or commonly called the phenomenon of vortex induced vibration (VIV). This phenomenon caused by environmental loads, especially waves and ocean currents, or the effect from seabed gap ratio (e/D) and roughness of pipe (k/D). In this thesis, the free span analysis that we performed consists of the pipelines stress analysis, allowable span length for static condition, dynamic analysis, and fatigue analysis of free span. Based on the results of stress calculations, we obtain the output of the equivalent stress is 82.15 MPa and still include in value which is determined of the allowable stress by ASME B31.8. And allowable span length for static condition is 16.07 m. For the calculations of free span dynamic analysis, the resulting output is the effective span length of free span for actual span 12 m is 12 m and for actual span 16.07 m is 16.07 m. For the fatigue analysis, analyzed only on in-line direction because cross-flow direction has fulfilled the criteria fatigue of DNV RP F105. The value of the fatigue life is 23 years, with the total of damage that occurred is about 0.92. And the reference of validation that used in dynamic and fatigue analysis of the free span is DNV RP F105 about Free Spanning Pipelines.

Keywords : free span, stress, von-Mises stress, in-line, cross-flow, VIV, allowable span, fatigue life.

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT tuhan semesta alam atas berkah, rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan serangkaian kegiatan penelitian dan penulisan laporan Tugas Akhir ini dengan baik dan lancar. Adapun judul dari Tugas Akhir ini adalah “**Analisis Tegangan dan Kelelahan Akibat Pengaruh *Vortex Induced Vibration* (VIV) yang Terjadi pada Lokasi *Crossing Pipelines*.**

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

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

Surabaya, Juli 2019

Ari Affandi

UCAPAN TERIMA KASIH

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

1. Rasa syukur saya panjatkan ke Allah SWT., karena atas berkah, rahmat, dan anugerah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
2. Orang tua terbaik dan luar biasa yang pernah ada, Ayahku, Afrizon dan Ibuku, Marwilis, terima kasih atas segala doa, kasih sayang, perhatian, dukungan, kepercayaan, kesabaran, dan cinta yang telah kalian berikan selama ini.
3. Ketiga kakak saya yang sangat saya banggakan, Walid Rahmatullah, Heru Setiawan dan Afina Zahrah, untuk apa yang telah kalian berikan selama ini. Kalian adalah motivasi terbesar bersama Ibu dan Ayah selama ini
4. Kedua Dosen Pembimbing Tugas Akhir saya, yaitu Bapak Ir. Imam Rochani, M.Sc., dan Bapak Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D., saya berterima kasih sebesar- besarnya atas pengetahuan dan bimbingannya selama ini.
5. Seluruh Dosen, Karyawan, Tim Tata Usaha dan Administrasi Departemen Teknik Kelautan FTK ITS, yang telah memberikan ilmu, bantuan dan fasilitas kepada penulis selama menjalani masa perkuliahan dan menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Bapak Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, Ph.D. selaku dosen wali yang telah membantu, mengarahkan serta memberikan nasihat selama saya berkuliah di Teknik Kelautan FTK ITS.
7. Terima kasih untuk teman-teman satu bimbingan seperjuanganku, yang telah menjadi teman *sharing* dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
8. Keluarga besar Tritonous P-55 L-33, yang selalu mendukung penulis hingga selesainya Tugas Akhir ini. Terima kasih telah menjadi keluarga baru dari awal kehadiran penulis di ITS ini.

9. Teman-Teman RA dan Arek-Arek yang telah menjadi tempat *sharing* selama masa perkuliahan penulis di ITS ini.
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per-satu yang telah turut berperan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

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

Surabaya, Juli 2019

Ari Affandi

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR NOTASI	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan	4
1.4 Manfaat	4
1.5 Batasan Masalah	5
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Dasar Teori	8
2.2.1 Bentangan Bebas (<i>Free Span</i>)	8
2.2.2 Kondisi Pembebanan	9
2.2.3 Tegangan Ekuivalen (<i>von Mises Stress</i>)	10
2.2.4 Dimensi Pipa	12
2.2.5 Massa Efektif Pipa	15
2.2.6 Berat Terendam Pipa	16
2.2.7 Beban Lingkungan	17
2.2.8 Kriteria Aliran	22
2.2.9 Gaya Hidrodinamis	23
2.2.10 <i>Allowable Span</i> Statik	25
2.2.11 <i>Vortex Induced Vibration (VIV)</i>	26
2.2.12 Panjang <i>Effective Span</i>	33
2.2.13 Frekuensi Natural Pipa	35

2.2.14	<i>Screening Criteria Fatigue</i>	39
2.2.15	Umur Kelelahan Pipa.....	41
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	49
3.1.	Diagram Alir	49
3.2	Prosedur Penelitian	51
BAB IV	ANALISIS DAN PEMBAHASAN	57
4.1	Analisis Data.....	57
4.2	Pengumpulan Data.....	58
4.2.1	Data <i>Pipeline</i>	58
4.2.2	Data Lingkungan	59
4.2.3	Data Lokasi <i>Crossing</i> Pipa	60
4.3	Analisis Dimensi Pipa.....	61
4.3.1	Perhitungan Dimensi Pipa	61
4.3.2	Perhitungan Massa Efektif Pipa	62
4.3.3	Perhitungan Berat Terendam Pipa.....	62
4.4	Analisis Kecepatan Partikel Air.....	63
4.4.1	Perhitungan Kecepatan Arus Akibat Gelombang.....	63
4.4.2	Perhitungan Kecepatan Arus pada Pipa.....	64
4.5	Analisis Gaya Hidrodinamis	66
4.5.1	Perhitungan Gaya <i>Drag</i>	66
4.5.2	Perhitungan Gaya <i>Lift</i>	66
4.5.3	Perhitungan Gaya Hidrodinamis	66
4.6	Perhitungan Tegangan Ekuivalen (<i>von Mises</i>)	67
4.6.1	Perhitungan <i>Hoop Stress</i>	67
4.6.2	Perhitungan <i>Longitudinal Stress</i>	68
4.6.3	Perhitungan <i>von Mises Stress</i>	69
4.7	Pemodelan Bentangan Bebas di ANSYS.....	69
4.7.1	Pemodelan Aliran pada ANSYS CFX.....	70
4.7.2	Hasil Pemodelan ANSYS CFX	73
4.7.3	Pemodelan Tegangan pada ANSYS <i>Structural</i>	74
4.7.4	<i>Meshing Sensitivity</i>	76
4.7.5	Hasil Pemodelan Tegangan	77
4.7.6	Validasi nilai Tegangan <i>von Mises</i>	78
4.8	Perhitungan Panjang <i>Allowable Span</i> Statik.....	78

4.9	Penentuan Kriteria Aliran.....	79
4.10	Perhitungan <i>Vortex Induced Vibration</i> (VIV)	80
4.11	Perhitungan Panjang <i>Effective Span</i>	81
4.11.1	<i>Boundary Condition</i>	81
4.11.2	Perhitungan <i>Concrete Stiffness Factor</i>	82
4.11.3	Perhitungan <i>Dynamic Soil Stiffness</i>	82
4.11.4	Perhitungan Panjang <i>Effective Span (actual span 12 m)</i>	83
4.12	Perhitungan Frekuensi Natural	84
4.12.1	Perhitungan <i>Correction Factor</i>	84
4.12.2	Perhitungan <i>Effective Axial Force</i>	84
4.12.3	Perhitungan <i>Critical Buckling Load</i>	85
4.12.4	Perhitungan <i>Static Deflection</i>	86
4.12.5	Perhitungan Frekuensi Natural.....	86
4.13	<i>Screening Check Criteria (actual span 12 m)</i>	87
4.14	Kondisi <i>actual span 16.07 m</i>	89
4.14.1	Perhitungan Panjang <i>Effective Span (actual span 16.07 m)</i>	89
4.14.2	Perhitungan Frekuensi Natural (<i>actual span 16.07 m</i>)	89
4.14.2	<i>Screening Check Criteria (actual span 16.07 m)</i>	90
4.15	Perhitungan Umur Kelelahan Pipa	91
4.15.1	Perhitungan <i>Response Model</i>	92
4.15.2	Perhitungan <i>Stress Range</i>	94
4.15.3	Perhitungan Siklus VIV dan Tegangan.....	95
4.15.4	Perhitungan <i>Fatigue Life</i>	97
BAB V PENUTUP		99
5.1	Kesimpulan.....	99
5.2	Saran.....	100
DAFTAR PUSTAKA		101
LAMPIRAN		
BIODATA PENULIS		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Jaringan Pipa Bawah Laut (Soegiono, 2007)	7
Gambar 2. 2 Tipe Umum Free Span Pipa Bawah Laut (Pratama, 2007).....	9
Gambar 2. 3 Reduction Factor Akibat Sebaran Gelombang (DNV RP F105)	20
Gambar 2. 4 Zona Aliran Arus (DNV RP F105, 2017)	21
Gambar 2. 5 Ilustrasi Konsetrasi Streamline yang Melewati Pipa (Pratama, 2007)	24
Gambar 2. 6 Ilustrasi <i>Vortex Induced Vibration</i> (VIV) pada Pipa (Mouselli, 1981)	27
Gambar 2. 7 Regime Aliran Fluida pada Silinder Halus (Lienhard, 1966)	28
Gambar 2. 8 Klasifikasi Morfologi Interaksi Free Span (DNV F105, 2017)	32
Gambar 2. 9 <i>Plotting Stress S-N Curve</i> di <i>Seawater</i> (DNV RP C203, 2005)	43
Gambar 2. 10 Respon Amplitudo In-Line VIV (DNV RP F105, 2017).....	45
Gambar 2. 11 Response Amplitude Cross-Flow VIV (DNV RP F105, 2017)	47
Gambar 3. 1 Diagram Alir Tugas Akhir	51
Gambar 4. 1 Lokasi Crossing Pipelines antara Existing Pipelines KCOM-NGLB dengan Proposed Pipelines B1C-KCOM (Pertamina Hulu Energy, 2012).....	57
Gambar 4. 2 Tampak Samping Lokasi Crossing Pipelines (Pertamina Hulu Energi, 2012).....	61
Gambar 4. 3 Pemodelan Bentang Bebas pada ANSYS CFX	71
Gambar 4. 4 Model Aliran Arus pada Bentang Bebas.....	71
Gambar 4. 5 Bentuk Meshing pada Pemodelan.....	72
Gambar 4. 6 Setup untuk Pemodelan ANSYS CFX	73
Gambar 4. 7 Output Kecepatan Arus setelah melewati Pipa	73
Gambar 4. 8 Hasil Vortex Pressure dari ANSYS CFX.....	74
Gambar 4. 9 Arah pembebanan untuk ANSYS Static Structural	75
Gambar 4. 10 Letak <i>Probe Coordinate</i> pada Pipa.....	76
Gambar 4. 11 Grafik Meshing Sensitivity	76
Gambar 4. 12 Meshing pada Pipa	77

Gambar 4. 13 Output Tegangan von-Mises dari Pemodelan.....	77
Gambar 4. 14 Tampak Samping Crossing Pipelines dengan Actual Span 16.07	92
Gambar 4. 15 Grafik Hubungan Intensitas Turbulensi (I_c) dengan sudut aliran	92
Gambar 4. 16 Prinsip Umum Response Model In-Line	93
Gambar 4. 17 Prinsip Umum Response Model Cross-Flow	94

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tegangan Izin pada Pipa Menurut ASME B31.8 (ASME B31.8, 2012)	10
Tabel 2. 2 Parameter Kekasaran Dasar Laut (DNV RP F105, 2017)	22
Tabel 2. 3 Kriteria Respon Pipa terhadap Rasio Aliran (DNV RP F105, 2017) ..	22
Tabel 2. 4 Rekomendasi Koefisien Hidrodinamika untuk Aliran Steady (Mouselli, 1981).....	25
Tabel 2. 5 Klasifikasi Respon Free Span (DNV RP F105, 2017).....	33
Tabel 2. 6 Koefisien Dynamic Soil Stiffness untuk Jenis Tanah Clay (DNV RP F105, 2017).....	35
Tabel 2. 7 Faktor Keamanan Screening Criteria (DNV RP F105, 2017)	36
Tabel 2. 8 Faktor Keamanan Screening Fatigue (DNV RP F105, 2017)	36
Tabel 2. 9 Koefisien Boundary Condition (DNV RP F105, 2017).....	39
Tabel 2. 10 Tabel <i>S-N Curve</i> di <i>Seawater</i> dengan <i>Cathodic Protection</i> (DNV RP C203, 2005)	43
Tabel 4. 1 Data Properti Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012)	58
Tabel 4. 2 Data Fungsional Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012)	58
Tabel 4. 3 Data Coating Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012).....	59
Tabel 4. 4 Data Concrete Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012).....	59
Tabel 4. 5 Data Water Depth di sekitar Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012).....	59
Tabel 4. 6 Data Tidal Range di sekitar Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012).....	59
Tabel 4. 7 Data Seawater Properties di lokasi Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012)	59
Tabel 4. 8 Data Wave Parameters di sekitar Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012)	60
Tabel 4. 9 Data Arus di lokasi Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012).....	60
Tabel 4. 10 Data koefisien hidrodinamika (Pertamina Hulu Energi, 2012)	60
Tabel 4. 11 Data Soil Parameter di lokasi Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012) ..	60
Tabel 4. 12 Data lokasi crossing pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012).....	61
Tabel 4. 13 Data Span Pipa.....	61

Tabel 4. 14	Perhitungan Dimensi Pipa	62
Tabel 4. 15	Perhitungan Massa	62
Tabel 4. 16	Perhitungan Berat Pipa	63
Tabel 4. 17	Parameter JONSWAP	63
Tabel 4. 18	Perhitungan Hasil Kecepatan Arus akibat Gelombang	64
Tabel 4. 19	Perhitungan Kecepatan Arus Outer Zone	65
Tabel 4. 20	Perhitungan Kecepatan Arus Inner Zone	65
Tabel 4. 21	Perhitungan Gaya Drag	66
Tabel 4. 22	Perhitungan Gaya Lift	66
Tabel 4. 23	Perhitungan Gaya Hidrodinamis Total.....	66
Tabel 4. 24	Parameter untuk Perhitungan Tegangan Hoop.....	67
Tabel 4. 25	Perhitungan Tegangan Hoop	67
Tabel 4. 26	Perhitungan Cek Batas Izin Hoop Stress.....	67
Tabel 4. 27	Parameter untuk Perhitungan Longitudinal Stress	68
Tabel 4. 28	Perhitungan Longitudinal Stress	68
Tabel 4. 29	Perhitungan von Mises Stress.....	69
Tabel 4. 30	Input untuk ANSYS Static Structural	75
Tabel 4. 31	Validasi Equivalent Stress.....	78
Tabel 4. 32	Perhitungan Panjang Allowable Span Statik.....	78
Tabel 4. 33	Klasifikasi Respon Free Span.....	79
Tabel 4. 34	Klasifikasi Respon Pipa terhadap Aliran Arus.....	80
Tabel 4. 35	Parameter Awal perhitungan Parameter VIV.....	80
Tabel 4. 36	Perhitungan Parameter VIV	81
Tabel 4. 37	Boundary Condition	82
Tabel 4. 38	Perhitungan Concrete Stiffness Factor	82
Tabel 4. 39	Parameter Dynamic Soil Stiffness.....	83
Tabel 4. 40	Perhitungan Dynamic Soil Stiffness.....	83
Tabel 4. 41	Perhitungan Panjang Effective Span	83
Tabel 4. 42	Perhitungan Correction Factor	84
Tabel 4. 43	Parameter Perhitungan Effective Axial Force	84

Tabel 4. 44	Perhitungan Perbedaan Tekanan.....	85
Tabel 4. 45	Parameter Perhitungan Critical Buckling Load	85
Tabel 4. 46	Nilai Critical Buckling Load.....	85
Tabel 4. 47	Parameter Perhitungan Static Deflection	86
Tabel 4. 48	Nilai Static Deflection kondisi In-Line.....	86
Tabel 4. 49	Nilai Static Deflection kondisi Cross-Flow	86
Tabel 4. 50	Parameter Perhitungan Frekuensi Natural Pipa	87
Tabel 4. 51	Nilai Frekuensi Natural kondisi In-Line	87
Tabel 4. 52	Nilai Frekuensi Natural kondisi Cross-Flow	87
Tabel 4. 53	Parameter Screening Fatigue	88
Tabel 4. 54	Perhitungan Screening Fatigue kondisi In-Line	88
Tabel 4. 55	Perhitungan Screening Fatigue kondisi Cross-Flow	88
Tabel 4. 56	Rangkuman Hasil Screening Check Criteria Fatigue	88
Tabel 4. 57	Perhitungan Panjang Effective Span dengan actual span 16.07 m	87
Tabel 4. 58	Nilai Frekuensi Natural In-Line.....	91
Tabel 4. 59	Nilai Frekuensi Natural Cross-Flow	881
Tabel 4. 60	Perhitungan Screening Fatigue kondisi In-Line	881
Tabel 4. 61	Perhitungan Screening Fatigue kondisi Cross-Flow	881
Tabel 4. 62	Rangkuman Hasil Screening Check Criteria Fatigue	882
Tabel 4. 63	Parameter Perhitungan Response Model	92
Tabel 4. 64	Parameter Response Model In-Line	93
Tabel 4. 65	Parameter Response Model Cross-Flow	94
Tabel 4. 66	Parameter Perhitungan Stress Range	95
Tabel 4. 67	Perhitungan Stress Range	95
Tabel 4. 68	Data Peluang Kejadian dari Siklus Arus PHE ONWJ.....	96
Tabel 4. 69	Jumlah Kejadian dari Kecepatan Arus.....	96
Tabel 4. 70	Parameter S-N Curve	97
Tabel 4. 71	Hasil Perhitungan Fatigue Life dari Crossing Pipeline.	98

DAFTAR NOTASI

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

K	= <i>soil stiffness</i>
KL	= <i>lateral (horizontal) dynamic soil stiffness</i>
KV	= <i>vertical dynamic soil stiffness</i>
(k/D)	= <i>pipe roughness</i>
KC	= <i>Keulegan Carpenter number</i>
K _S	= <i>Stability parameter</i>
L	= <i>panjang bentang bebas</i>
L _a	= <i>panjang span adjacent</i>
L _{eff}	= <i>panjang bentangan efektif</i>
L _{sh}	= <i>length of span shoulder</i>
m _e	= <i>massa efektif</i>
m	= <i>fatigue exponent</i>
M _{static}	= <i>static bending moment</i>
M _n	= <i>spectral moments of order n</i>
n _i	= <i>jumlah stress cycles untuk tegangan</i>
N _i	= <i>jumlah siklus kegagalan untuk tegangan</i>
N _c	= <i>soil bearing capacity parameter</i>
N _q	= <i>soil bearing capacity parameter</i>
N _γ	= <i>soil bearing capacity parameter</i>
P _e	= <i>Tekanan eksternal</i>
P _i	= <i>Tekanan internal</i>
q	= <i>beban defleksi</i>
P _{cr}	= <i>critical buckling load</i>
R _c	= <i>current reduction factor</i>
R _D	= <i>reduction factor gelombang</i>
R _{Iθ}	= <i>reduction factor from turbulence and flow direction</i>
R _k	= <i>reduction factor from damping</i>
R _e	= <i>Reynolds Number</i>
S	= <i>stress range</i>
S _{eff}	= <i>effective axial force</i>
S _{η η}	= <i>wave spectral density</i>
S _{UU}	= <i>spectra kecepatan gelombang pada pipa</i>

S_u	= <i>undrained shear strength</i>
S_t	= <i>Strouhal number</i>
t	= <i>pipe wall thickness</i>
T_{exposure}	= beban waktu terjadinya siklus
T_{life}	= umur desain operasi
T_p	= <i>peak period</i>
T_u	= <i>mean zero up-crossing period</i>
T_w	= <i>wave period</i>
U	= kecepatan arus
U_c	= kecepatan arus terhadap pipa
U_s	= kecepatan gelombang signifikan
U_w	= Kecepatan arus akibat gelombang
v	= vertical soil settlement (pipe embedment)
V_R	= <i>reduced velocity</i>
V_{Rd}	= <i>reduced velocity (design value) with safety factor</i>
z	= height above seabed or in-line pipe displacement
z_0	= sea-bottom roughness
z_r	= reference (measurement) height

1.14.2 Greek

α	= current flow velocity ratio, generalised Phillips' constant
α_e	= temperature expansion coefficient
α_{fat}	= Allowable fatigue damage ratio according to DNV OS-F101
α_T	= parameter to determine wave period
β	= Weibull shape parameter and relative soil stiffness parameter
Δ/D	= relative trench depth
Δp_i	= internal pressure difference relative to laying
ΔT	= temperature difference relative to laying or storm duration
δ	= pipe deflection or statistical skewness
ε	= band-width parameter
Γ	= gamma function
γ	= peak-enhancement factor for JONSWAP spectrum parameter
γ_{soil}	= total unit weight of soil
$\gamma_{\text{soil}'}$	= submerged unit weight of soil
γ_{water}	= unit weight of water

γ_s	= safety factor on stress amplitude
γ_f	= safety factor on natural frequency
γ_{CF}	= safety factor for cross-flow screening criterion
γ_{IL}	= safety factor for in-line screening criterion
γ_k	= safety factor on stability parameter
$\gamma_{on,IL}$	= safety factor on onset value for in-line VR
$\gamma_{on,CF}$	= safety factor on onset value for cross-flow VR
κ	= curvature
λ_1	= mode shape factor
λ_{max}	= equivalent stress factor
η	= usage factor
μ	= mean value
μ_a	= axial friction coefficient
μ_L	= lateral friction coefficient
ν	= Poisson's ratio or kinematic viscosity ($\approx 1.5 \cdot 10^{-6}$ [m ² /s])
φ	= mode shape
ϕ_{CM}^s	= angle of friction, cohesionless soils
ψ_{CM}^k	= correction factor for CM due to pipe roughness
ψ_{CM}^{trench}	= correction factor for CM due to effect of pipe in trench
ψ_{CD}^{proxi}	= reduction factor for CD due to seabed proximity
$\psi_{KC,\alpha}^{proxy}$	= correction factor for CD due to Keulegan-Carpenter number and current flow ratio.
ψ_{CD}^{trench}	= correction factor for CD due to effect of pipe in trench
ψ_{CD}^{VIV}	= amplification factor for CD due to cross-flow vibrations
ϕ_{proxy}	= reduction factor for CD due to seabed proximity
$\phi_{proxy,onset}$	= correction factor for onset cross-flow due to seabed proximity
$\phi_{trench,onset}$	= reduction factor for onset cross-flow due to the effect of a trench
$\phi_{\alpha,IL}$	= correction factor for onset of in-line due wave
ρ	= density of water
ρ_s / ρ	= specific mass ratio between the pipe mass (not including added mass) and the displaced water.
σ	= stress, spectral width parameter or standard deviation
θ_{rel}	= relative angle between flow and pipeline direction flow direction
ζ_T	= total modal damping ratio
ζ_{soil}	= soil modal damping ratio
ζ_{str}	= structural modal damping ratio
ζ_h	= hydrodynamic modal damping ratio
ω_n	= angular natural frequency
ω_p	= angular spectral peak wave frequency

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	Perhitungan Dimensi, Massa dan Berat Terendam Pipa
Lampiran B	Perhitungan Kecepatan Partikel Air pada Pipa Akibat Arus dan Gelombang
Lampiran C	Perhitungan Gaya Hidrodinamis
Lampiran D	Perhitungan Tegangan dan <i>Allowable Span</i> kondisi Statis
Lampiran E	Perhitungan <i>Vortex Induced Vibration</i>
Lampiran F	Perhitungan Panjang <i>Effective Span</i>
Lampiran G	Perhitungan Frekuensi Natural
Lampiran H	<i>Screening Criteria Fatigue</i>
Lampiran I	Perhitungan <i>Response Model</i>
Lampiran J	Perhitungan <i>Unit Stress Amplitude</i> dan <i>Stress Range</i>
Lampiran K	Perhitungan Siklus dan <i>Fatigue</i>
Lampiran L	Pemodelan Ansys <i>CFX</i> dan Ansys <i>Static Structural</i>
Lampiran M	<i>Pipeline Crossing Detail</i> dan <i>Pipeline Alignment Sheet</i>

BAB I PENDAHULUAN

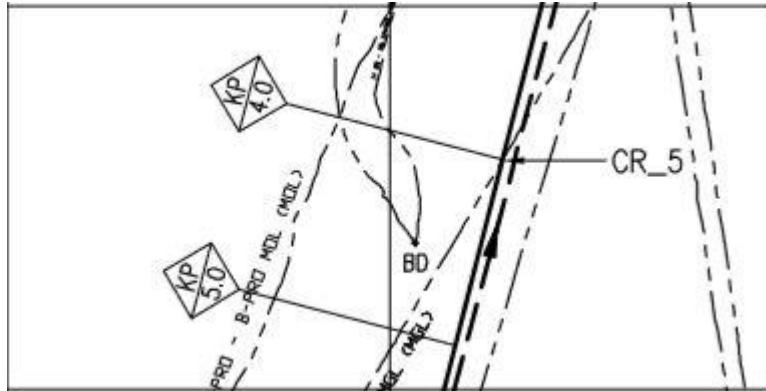
1.1 Latar Belakang

Pesatnya pertumbuhan industri minyak dan gas lepas pantai menjadikan jaringan pipa sebagai alternatif sarana transportasi fluida. *Pipeline* digunakan dalam berbagai macam tujuan salah satu di antaranya adalah sebagai *trunk line* yakni mengangkut minyak dan/atau gas dari fasilitas produksi menuju daratan (Mousselli, 1981). Kebutuhan industri migas akan mendorong semakin banyaknya penggunaan jaringan pipa sebagai sarana transportasi fluida karena dirasa lebih ekonomis dan efisien.

Perlu diketahui bahwa dalam melakukan distribusi hasil pengeboran gas dan minyak lepas pantai dapat menggunakan kapal dan sistem perpipaan. Pemanfaatan jaringan pipa digunakan untuk mengalirkan minyak dan gas dianggap lebih praktis dan efektif dibandingkan dengan cara curah (Soegiono, 2007). Kelebihan *subsea pipeline* ini yaitu dapat memenuhi transportasi hasil produksi lebih cepat dibandingkan dengan menggunakan bentuk unit penyimpanan minyak atau gas yang bersifat sementara (Q. Bai *et al*, 2014).

Seiring dengan berkembangnya sektor ini, telah banyak proyek eksploitasi yang telah dilakukan di Indonesia. Sebagian besar dari proyek-proyek tersebut menggunakan pipa bawah laut sebagai media penyalur hasil eksploitasi. Namun berbagai fenomena yang terjadi pada saat pengoperasian jaringan perpipaan, seperti kelelahan karena bentangan bebas (*fatigue*), korosi, maupun retak (*crack*) yang menyebabkan kegagalan pipa dan harus dilakukan inspeksi secara berkala untuk meningkatkan keandalan dari pipa (Bai *et al*, 2014).

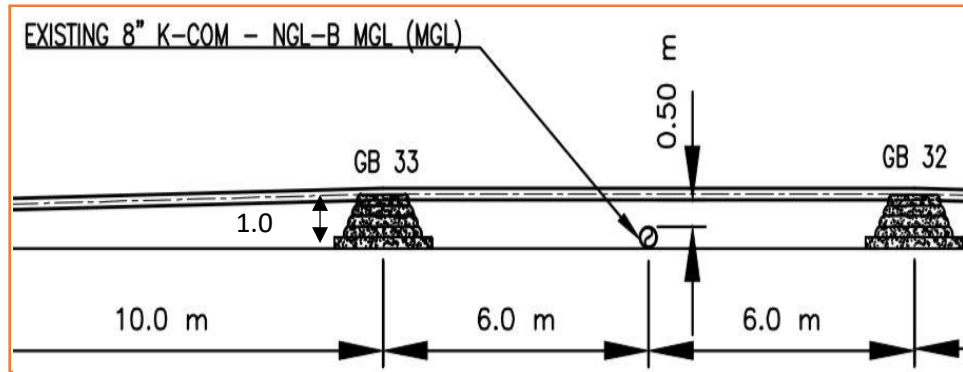
Pada proses perencanaan jalur pipa tersebut, sering ditemukan masalah dimana suatu rute pipa bawah laut yang akan dikonstruksi bertemu dengan rute pipa bawah laut yang telah dikonstruksi dari proyek berbeda sebelumnya (*pipeline existing*). Kondisi semacam ini disebut *crossing* (Musya, 2013). Gambar 1.1 merupakan titik *crossing* yang akan ditinjau.



Gambar 1.1 Tampak Atas Letak *Crossing* (CR5) antara *Proposed* 8” B1C-KCOM *Gas Lift Pipeline* dan *Existing Pipeline* 8” KCOM-NGLB (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Crossing (persilangan) pada *pipeline* merupakan kondisi dimana terdapat lebih dari satu jalur pipa yang saling bersilangan dan berdekatan secara vertikal. Kondisi persilangan tersebut secara otomatis akan menghasilkan bentangan pipa (*free span*). Ketika terjadi *free span*, pipa secara statik akan mengalami defleksi akibat beban pada pipa itu sendiri, yang apabila tegangan pada pipa itu melebihi batas tegangan lelehnya maka akan menyebabkan keruntuhan leleh. Selain itu, tegangan leleh dari pipa tersebut dapat melebihi jika panjang *free span* jauh melebihi kriteria tegangan lelehnya pada kondisi statik yang membuat beban bagi bentangan yang terjadi lebih berat (Pratama, 2007).

Untuk dampak dari segi dinamis, *free span* yang terjadi akan mengalami vibrasi akibat gaya hidrodinamika yang bekerja pada daerah tersebut atau biasa disebut fenomena *Vortex Induced Vibration* (VIV). Fenomena VIV terjadi akibat terbentuknya *vortex* di belakang pipa yang membelakangi arah aliran arus yang membentur pipa sehingga berdampak pada tekanan di area belakang pipa menjadi lebih kecil dibandingkan di area depan pipa sehingga menyebabkan terjadinya vibrasi. Vibrasi yang terbentuk ini akan menyebabkan terjadinya kelelahan (*fatigue*) pada pipa (Prayoga, 2013). Dan apabila frekuensi *vortex shedding* yang disebabkan oleh aliran normal mencapai ke frekuensi alami pipa, pipa mulai bergetar dan terjadi *Vortex Induced Vibration* (VIV) yang pada akhirnya menyebabkan kelelahan pada pipa (B.M. Summer, 2006). Untuk lebih jelasnya perhatikan Gambar 1.2



Gambar 1.2 Tampak Samping Letak *Crossing* (CR5) antara *Proposed 8" B1C-KCOM Gas Lift Pipeline* dan *Existing Pipeline 8" KCOM-NGLB* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Berdasarkan penjelasan di atas, dapat kita lihat bahwa *free span* merupakan salah satu ancaman yang sangat dihindari dalam membuat suatu sistem jaringan perpipaan (*pipelines*) terkhusus pada jaringan pipa bawah laut.

Dalam Tugas Akhir ini, analisis yang dilakukan berhubungan dengan perhitungan tegangan pipa secara keseluruhan sehingga menghasilkan panjang *allowable span* untuk kondisi statik. Dalam perhitungan tersebut, akan diketahui apakah pipa tersebut dalam kondisi aman (tidak mengalami *excessive yielding*) atau tidak aman. Kemudian tugas akhir ini dilanjutkan dengan analisis dari segi beban dinamis (*dynamic analysis*) pada lokasi persilangan (*crossing*) yang akan menghasilkan panjang *effective span* dari segi beban dinamis serta dapat mengetahui apakah terjadi VIV atau tidak, dan analisis kelelahan (*fatigue analysis*) yang akan menghasilkan umur kelelahan dari *free span* yang terbentuk sampai mengalami kegagalan.

Adapun perhitungan dari keseluruhan analisis mengacu pada beberapa code yang telah ada. Untuk analisis tegangan, penulis menggunakan acuan dari ASME (*American Society of Mechanical Engineering*) B 31.8.2000 mengenai *Gas Transmission and Distributing Piping System*. Sedangkan untuk analisis beban dinamis dan kelelahan menggunakan acuan dari DNV-RP-F105 tahun 2002 mengenai *Free Spanning Pipelines*.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa nilai tegangan ekuivalen (*von Mises*) pipa yang berada di lokasi *crossing*?
2. Berapa panjang *effective span* pada daerah *crossing* dengan panjang *actual span* 12 m untuk kondisi dinamis?
3. Berapa umur kelelahan *free span* yang terdapat pada lokasi *crossing*?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui nilai tegangan ekuivalen (*von Mises*) pada lokasi *crossing*.
2. Mengetahui panjang *effective span* pada daerah *crossing* untuk kondisi dinamis.
3. Mengetahui umur kelelahan *free span* yang terdapat pada lokasi *crossing*.

1.4 Manfaat

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

1. Dari segi analisis tegangan ekuivalen (*von Mises*), penulis diharapkan mampu menunjukkan perhitungan analisis tegangan sesuai dengan code ASME B31.8.2000 mengenai *Gas Transmission and Distributing Piping System* dan menunjukkan perhitungan tegangan pada pipa yang ditinjau masih berada dalam batas aman yang ditentukan serta menunjukkan perhitungan *free span* statik sehingga mengetahui apakah panjang *actual span* pipa tidak melebihi panjang *allowable span* statik.
2. Sedangkan dari segi analisis dinamis dan kelelahan dari *free span*, penulis dapat membuktikan analisis *free span* yang (untuk arah *in-line* maupun arah *cross-flow*) mendapatkan pengaruh VIV (*vortex induced vibration*) sehingga terjadi vibrasi dan menyebabkan kelelahan atau tidak berdasarkan *screening* yang telah ditetapkan (sesuai dengan code DNV-RP-F105 mengenai *Free Spanning Pipelines*), dan menunjukkan langkah yang sesuai dalam mencari umur kelelahan apabila salah satu arah yang dianalisis mengalami kegagalan.

3. Selain itu, penulis juga diharapkan mampu memperlihatkan seberapa besar panjang *allowable span* yang terbentuk pada lokasi *crossing*, baik yang didapatkan berdasarkan analisis untuk kondisi statis maupun dinamis, serta melihat apakah *allowable span* yang didapatkan masih memenuhi batas ketentuan yang telah ditetapkan sebelumnya atau tidak.

1.5 Batasan Masalah

Batasan Masalah dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Analisis tegangan pipa, statis dan dinamis *free span* dilakukan hanya pada kondisi operasi saja;
2. Analisis stabilitas dari pipa dan *free span* diabaikan;
3. Pengaruh *scouring* dan *marine growth* diabaikan;
4. Aliran yang mengenai pipa adalah tegak lurus dengan pipa;
5. Aliran fluida dalam pipa diasumsikan aliran *steady*;
6. Tumpuan pada kedua ujung pipa diasumsikan *fixed-fixed*;
7. Perhitungan *dynamic analysis* dan *fatigue analysis* hanya dilakukan pada lokasi *crossing*;
8. Tanah diasumsikan berjenis *very soft clay* dan homogen di sepanjang pipa;

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan. Bab ini berisi tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah yang menjadi dasar penelitian, tujuan penelitian, manfaat yang diperoleh setelah dilakukan penelitian, batasan masalah penelitian yang meliputi batasan-batasan yang digunakan dan penggunaan asumsi yang diperlukan agar penelitian ini lebih fokus, serta sistematika penulisan laporan tugas akhir.

Bab II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori. Pada bab ini berisi tentang teori-teori yang digunakan sebagai dasar yang kuat dalam melakukan penelitian ini. Selain itu, pembahasan teori tersebut bertujuan sebagai sarana untuk mempermudah pembaca dalam memahami konsep yang digunakan dalam penelitian. Teori-teori yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini bersumber dari berbagai literatur, penelitian sebelumnya, jurnal, dan artikel. Selain itu, dipaparkan pula tentang persamaan yang berkaitan dengan

penelitian ini, antara lain persamaan *free span* secara statik dan dinamis serta kelelahan.

Bab III Metodologi Penelitian. Menjelaskan tentang alur pengerjaan tugas akhir. Tahapan-tahapan tersebut yaitu mulai dari latar belakang dan perumusan masalah, pengumpulan data, analisa data, pengolahan data, validasi hasil perhitungan serta penentuan kesimpulan dan saran.

Bab IV Analisa dan Pembahasan. Bab ini memuat tentang gambaran umum objek penelitian secara keseluruhan, pengumpulan data properties pipa dan data lingkungan, analisa tegangan, panjang *allowable span* secara statik, analisis *free span* secara dinamis dan kelelahan pada *free span*. Serta validasi hasil perhitungan tersebut dengan *codes*.

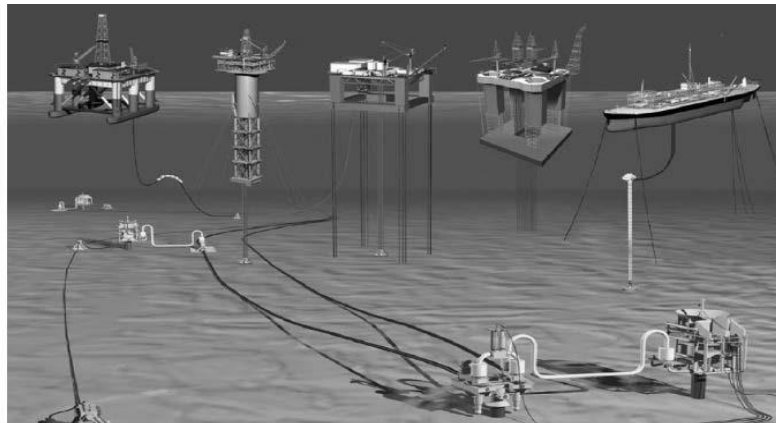
Bab V Kesimpulan dan Saran. Membahas kesimpulan dari hasil analisa yang telah selesai dilakukan, dan pemberian saran untuk penelitian selanjutnya.

Daftar Pustaka. Berisi referensi yang digunakan untuk meyelesaikan permasalahan pada tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Minyak dan gas merupakan sumber energi yang paling banyak digunakan oleh manusia. Dikarenakan hal tersebut, maka usaha pencarian dan eksplorasi migas semakin intensif baik di darat, daerah lepas pantai maupun laut dalam. Untuk mengakomodasi penyaluran minyak dan gas bumi dari sumur minyak di lepas pantai dan di laut dalam, maka digunakan jaringan pipa bawah laut sebagai alternatif yang paling mudah, aman, dan efisien. Untuk lebih jelasnya perhatikan Gambar 2.1 mengenai jaringan pipa bawah laut.



Gambar 2. 1 Jaringan Pipa Bawah Laut (Soegiono, 2007)

Pada Turdjail (2008) dalam tugas akhirnya membuktikan bahwa selain beban lingkungan seperti gelombang dan arus laut yang menyebabkan terjadinya vibrasi terhadap struktur, terdapat fenomena sekunder yang juga dapat menyebabkan vibrasi pada *pipelines*. Fenomena tersebut adalah pelepasan vortex (*vortex shedding*). Pengaruh *vortex shedding* dan pembebanan gelombang langsung menyebabkan respon dinamis pada jaringan pipa yang mana secara umum menganalisis dengan pendekatan *fatigue limit states* (Blevins, 1990).

Dalam buku *offshore pipeline* (Guo, 2005) mengatakan bahwa resiko kerusakan pada *free span* pipa dapat terjadi dalam dua mekanisme yang terpisah, yang pertama adalah akibat *bending* yang berlebih karena beban hidrodinamis dan berat pipa itu sendiri, atau kerusakan akibat *fatigue*.

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

Dari keseluruhan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, masih sedikit yang melakukan penelitian *free span* mengenai pengaruh kondisi *crossing* terhadap *vortex induced vibration* (VIV). Maka dari itu, penulis mencoba melakukan penelitian mengenai pengaruh kondisi *crossing* tersebut terhadap analisis dinamis dan kelelahan dari *free span* yang terbentuk pada suatu *pipelines*.

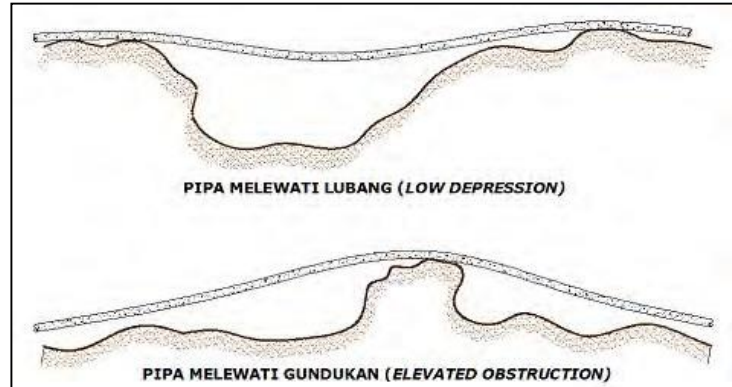
2.2 Dasar Teori

2.2.1 Bentangan Bebas (*Free Span*)

Secara definisi, *free span* pada pipa bawah laut dapat terjadi ketika kontak antara pipa dan *seabed* hilang dan memiliki jarak pada permukaan *seabed* (Guo *et.al*, 2005). *Free span* pada pipa dapat terjadi karena (DNV-RP-F105, 2017):

1. Permukaan *seabed* yang tidak merata.
2. Perubahan kontur dasar laut (akibat *scouring*, *sand waves*)/
3. *Support* buatan.

Adanya *free span* pada suatu rute pipa, maka perlu dicek ulang kekuatan serta keandalan kerja pipa tersebut. Perhitungan dan persiapan antisipasi ini perlu dilakukan mengingat keadaan pipa yang sudah tidak tergeletak merata pada *seabed*. Besar defleksi, dampak gaya hidrodinamika, vibrasi dan tegangan maksimum yang dapat terjadi harus dihitung untuk pengecekan kemungkinan keruntuhan pipa dengan pola statik (*Ultimate Limit State*) atau kelelahan/*fatigue* (*Fatigue Limit State*). Dari Gambar 2.2 dapat dilihat tipikal-tipikal dari *free span* yang ada di dasar laut.



Gambar 2. 2 Tipe Umum *Free Span* Pipa Bawah Laut (Pratama, 2007)

2.2.2 Kondisi Pembebanan

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

a. 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.

b. 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.

c. Hydrotest

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

d. Operasi

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

2.2.3 Tegangan Ekuivalen (*von Mises Stress*)

Untuk mengetahui kondisi batas dari pipa, maka diperlukan analisis tegangan pipa. Pada perhitungan ini, menggunakan ketentuan yang divalidasi terhadap aturan yang ada dalam *code* desain pipa yang digunakan.

Beban yang bekerja pada pipa bawah laut (*offshore pipeline*) akan menyebabkan timbulnya tegangan di dinding pipa. Kombinasi tegangan-tegangan yang bekerja pada dinding pipa menyebabkan regangan atau defleksi.

Berdasarkan ASME B31.8 (*Gas Transmission and Distributing Piping System*) memberikan batasan-batasan pada tegangan yang terjadi pada pipa penyalur gas dengan menggunakan konsep *allowable stress design*. Berdasarkan kode ini, tegangan yang diizinkan terjadi pada pipa penyalur gas ditampilkan pada Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2. 1 Tegangan Izin pada Pipa Menurut ASME B31.8 (ASME B31.8, 2012)

<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

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

A. *Hoop Stress*

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

ASME B31.8 merumuskan persamaan tegangan *hoop* yang dapat dilihat pada Persamaan 2.1 berikut:

$$\sigma_h = \begin{cases} (p_i - p_e) \frac{D_0}{2t} & \text{untuk } \frac{D}{t} \geq 30 \\ (p_i - p_e) \frac{D_0 - t}{2t} & \text{untuk } \frac{D}{t} < 30 \end{cases} \dots\dots\dots (2.1)$$

Di mana,

- σ_h = tegangan *hoop* (MPa)
- p_i = tekanan desain internal pipa (MPa)
- p_e = tekanan eksternal (MPa)
- D_0 = Diameter luar pipa (m)
- t = ketebalan pipa (m)

B. Longitudinal Stress

Menurut Bai dan Bai, 2014, tegangan longitudinal merupakan tegangan aksial yang berkerja pada dinding pipa. Menurut ASME B31.8 komponen utama tegangan longitudinal adalah tegangan aksial kombinasi dan tegangan *bending*. Persamaan tegangan longitudinal dijelaskan dalam Persamaan 2.2 berikut.

$$\sigma_L = \sigma_a + \sigma_b \text{ atau } \sigma_a - \sigma_b \dots\dots\dots(2.2)$$

Di mana,

- σ_L = tegangan *longitudinal* (MPa)
- σ_a = tekanan aksial kombinasi (MPa)
- σ_b = tekanan *bending* (MPa)

Untuk pipa yang mengalami bentangan bebas, pipa dapat dianggap dalam kondisi *restrained* karena terdapat asumsi tumpuan pada bentangan bebas. Tumpuan pipa dapat menahan gerakan aksial, gerakan lateral maupun rotasi pipa yang dapat mempengaruhi tegangan pipa akibat tekanan dan temperatur pipa. Menurut ASME B31.8, tegangan aksial kombinasi dijelaskan di dalam Persamaan 2.3 dan 2.4 berikut:

$$\sigma_a = \sigma_{a0} + v_{st}\sigma_h + \sigma_t \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\sigma_a = \frac{F_a}{A} + v_{st}\sigma_h + E_{st}\alpha_e(T_1 - T_2) \dots\dots\dots(2.4)$$

Di mana,

σ_{a0} = tegangan aksial (MPa)

F_a = gaya aksial (N)

σ_t = tegangan *thermal* ($^{\circ}\text{C}$)

T_1 = temperatur pipa saat instalasi ($^{\circ}\text{C}$)

T_2 = temperatur pipa saat operasi ($^{\circ}\text{C}$)

ν_{st} = *poisson ratio* pipa baja

Tegangan *bending* diakibatkan oleh momen yang terjadi pada bentangan bebas karena beban struktur pipa dan beban hidrodinamis. Persamaan tegangan *bending* dijelaskan pada Persamaan 2.5 berikut:

$$\sigma_b = \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{z_a} \dots \dots \dots (2.5)$$

Di mana,

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

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

i_i = *in-plane stress intensification factor*

i_o = *out-plane stress intensification factor*

z_a = modulus penampang pipa (m^3)

C. Ekuivalen Stress (*von Mises Stress*)

Tegangan ekuivalen atau *von mises* merupakan resultan dari seluruh tegangan yang terjadi pada pipa. Persamaan tegangan ekuivalen (*von mises*) ditampilkan pada Persamaan 2.6 berikut:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2 - \sigma_L \sigma_h + 3\tau^2} \dots \dots \dots (2.6)$$

Di mana,

τ = tegangan torsional (MPa)

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

2.2.4 Dimensi Pipa

Pipa bawah laut memiliki beberapa lapisan yaitu pipa baja, lapisan anti korosi (*corrosion coating*) dan selimut beton (*concrete coating*). Dimensi dari

seluruh lapisan pipa ini harus dihitung dalam analisis pipa bawah laut. Persamaan untuk menghitung dimensi pipa diuraikan pada Persamaan 2.7–2.15 sebagai berikut:

a. Tebal Dinding Pipa

Tebal dinding pipa yang dimaksud adalah ketebalan pipa tanpa ada tambahan perlindungan korosi, Persamaan tebal dinding pipa (DNV OS F101, 2013) dirumuskan pada Persamaan 2.7 sebagai berikut:

$$t_2 = t_{nom} - t_{corr} \dots\dots\dots (2.7)$$

di mana,

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

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

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

b. Diameter Total Pipa

Diameter total pipa merupakan diameter pipa secara keseluruhan termasuk diameter pipa baja, lapisan anti korosi, selimut beton (*concrete coating*). Diameter total pipa dirumuskan pada Persamaan 2.8 sebagai berikut:

$$D_t = D_0 + 2t_{cc} + 2t_{conc} \dots\dots\dots (2.8)$$

Di mana,

D_t = Diameter total pipa (m)

D_0 = Diameter luar pipa baja (m)

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

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

c. Diameter Dalam Pipa

Diameter dalam pipa adalah diameter maksimal yang dapat dilewati oleh fluida yang dialirkan di dalamnya. Ditampilkan pada Persamaan 2.9 berikut:

$$D_i = D_0 - 2 \times t_{nom} \dots\dots\dots (2.9)$$

Di mana,

$$D_i = \text{Diameter dalam pipa} \quad (\text{m})$$

d. Diameter *Concrete Coating*

Concrete coating memiliki fungsi sebagai pemberat untuk meningkatkan stabilitas pipa di dasar laut (Soegiono, 2007). Di dalam DNV OS F101, ketebalan minimal *concrete coating* adalah 40 mm. Diameter *concrete coating* dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.10 berikut :

$$D_{wc} = D_0 + 2(t_{cc} + t_{conc}) \dots\dots\dots (2.10)$$

Di mana,

$$D_{wc} = \text{Diameter Selimut Beton} \quad (\text{m})$$

$$t_{conc} = \text{Tebal } \textit{Concrete Coating} \quad (\text{m})$$

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

$$D_{cc} = D_0 + 2.t_{cc} \dots\dots\dots (2.11)$$

Di mana,

$$D_{cc} = \text{Diameter } \textit{corrosion coating} \quad (\text{m})$$

f. Momen Inersia Pipa Baja

$$I_{st} = \pi \frac{(D_o^4 + D_i^4)}{64} \dots\dots\dots (2.12)$$

Di mana,

$$I_{st} = \text{Momen Inersia Pipa Baja} \quad (\text{m}^4)$$

g. Momen Inersia Selimut Beton

$$I_{conc} = \pi \frac{(Dt^4 + D_{conc}^4)}{64} \dots\dots\dots (2.13)$$

Di mana,

$$I_{conc} = \text{Momen Inersia Selimut Beton} \quad (\text{m}^4)$$

h. Luas Penampang Internal Pipa Baja

$$A_i = \pi \frac{(D_i^2)}{4} \dots\dots\dots (2.14)$$

Di mana,

$$A_i = \text{Luas Penampang Internal Pipa Baja} \quad (\text{m}^2)$$

i. Luas Penampang Pipa Baja

$$A_{st} = \pi \frac{(D_0^2 - D_i^2)}{4} \dots\dots\dots(2.15)$$

Di mana,

$$A_{st} = \text{Luas Penampang Pipa Baja} \quad (\text{m}^2)$$

2.2.5 Massa Efektif Pipa

Massa efektif pipa merupakan penjumlahan massa pipa, massa konten pipa, massa tambah dan massa selimut beton pipa (*concrete*). Menurut Bai dan Bai (2005), persamaan massa efektif pipa dijelaskan pada Persamaan 2.16 sebagai berikut,

$$m_e = m_{str} + m_c + m_a \dots\dots\dots(2.16)$$

di mana,

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

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

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

a. Massa Struktur Pipa

Massa struktur pipa merupakan penjumlahan massa pipa ditambah dengan massa lapisan anti korosi dan selimut beton (*concrete*). Persamaan untuk mendapatkan massa struktur pada pipa dijelaskan pada Persamaan 2.17 – 2.20 berikut.

$$m_{str} = m_{st} + m_{cc} + m_{conc} \dots\dots\dots (2.17)$$

$$m_{st} = A_{st} \times \rho_{st} \dots\dots\dots (2.18)$$

$$m_{cc} = \pi \frac{(D_{cc}^2 - D_0^2)}{4} \rho_{cc} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$m_{conc} = \pi \frac{(D_{wc}^2 - D_0^2)}{4} \rho_{conc} \dots\dots\dots (2.20)$$

di mana,

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

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

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

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

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

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

ρ_{conc} = Massa jenis selimut beton (kg/m³)

b. Massa Konten Pipa

$$m_c = A_i + \rho_c \dots \dots \dots (2.21)$$

di mana,

ρ_c = Massa jenis konten pipa (kg/m³)

c. Massa Tambah Pipa

$$m_a = \frac{\pi}{4} D_t^2 \cdot \rho_w \cdot C_a \dots \dots \dots (2.22)$$

di mana,

ρ_w = Massa jenis air laut (kg/m³)

C_a = Koefisien massa tambah

Menurut DNV RP F105, koefisien massa tambah dapat ditentukan dengan Persamaan 2.23 sebagai berikut :

$$C_a = \begin{cases} 0.68 + \frac{1.6}{1+5(\frac{e}{Dt})} & \text{untuk } (\frac{e}{Dt}) < 0.8 \\ 1 & \text{untuk } (\frac{e}{Dt}) > 0.8 \end{cases} \dots \dots \dots (2.23)$$

Di mana,

e/Dt = Rasio *gap span*

e = jarak antara *seabed* dan pipa

2.2.6 Berat Terendam Pipa

Berat pipa yang tercelup di bawah air akan memiliki berat yang berbeda dibandingkan saat di daratan. Berat pipa yang berada dibawah air akan lebih ringan dibandingkan dengan di daratan karena adanya gaya *bouyancy* (gaya apung). Persamaan untuk menghitung berat terendam pipa ditampilkan pada Persamaan 2.24 berikut :

$$W_{sub} = (m_{st} + m_{cc} + m_c + m_{wc}).g - F_b \dots \dots \dots (2.24)$$

Di mana,

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

Gaya apung dijelaskan pada Persamaan 2.25 dan 2.26 berikut :

$$F_b = m_{disp} \cdot g \dots \dots \dots (2.25)$$

$$M_{bouy} = \frac{\pi}{4} D_t^2 \cdot \rho_w \dots \dots \dots (2.26)$$

Di mana,

$$m_{bouy} = \text{Massa air yang dipindahkan} \quad (\text{kg/m})$$

2.2.7 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.

A. Gelombang

Perhitungan gaya-gaya hidrodinamika yang bekerja pada suatu struktur lepas pantai ataupun pipa bawah laut belum dapat dihitung secara eksak, baik dengan penurunan secara percobaan maupun teoritis. Oleh karena itu, digunakan metode penyederhanaan untuk mendekati perhitungan gaya hidrodinamik pada struktur laut tersebut. Pada kasus suatu gaya hidrodinamika mengenai suatu struktur pipa bawah laut, maka diasumsikan diameter terluar dari pipa tersebut masih jauh lebih kecil dari panjang gelombang laut, sehingga gelombang tersebut melewati struktur tanpa gangguan yang berarti. Gelombang yang bergerak melewati struktur tersebut tidak terganggu, akan tetapi pengaruh terhadap struktur terjadi akibat adanya *vortex (wake formation)* yang terbentuk di belakang struktur dan *flow separation*.

Untuk gelombang acak kurun waktu pendek (*short term wave condition*) dapat dijelaskan menggunakan spectra gelombang. Menurut DNV RP F105 (2017), spektra yang sesuai digunakan untuk menjelaskan gelombang acak adalah spectra JONSWAP. JONSWAP sendiri merupakan singkatan dari *Joint North Sea Wave Project*, yaitu proyek yang dilakukan secara bersama – sama oleh sejumlah negara untuk melakukan penelitian gelombang di perairan utara. Spektra JONSWAP cukup cocok digunakan di Indonesia karena perairan Indonesia termasuk perairan tertutup atau kepulauan. Berikut Persamaan 2.27 mengenai spektra JONSWAP.

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \cdot \gamma \cdot \exp\left(-0,5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma \cdot \omega_p}\right)^2\right) \quad (2.27)$$

dengan,

- $S_{\eta\eta}$ = Spektra Gelombang
- α = Konstanta *Generalized Phillips*
- ω = Frekuensi Gelombang (rad/s)
- γ = *Peak-enhancement factor*
- ω_p = Frekuensi puncak gelombang (rad/s)
- g = Percepatan gravitasi (m/s²)
- σ = Parameter lebar spektra

Persamaan 2.28 mengenai konstanta *Generalized Phillips* yaitu,

$$\alpha = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega_p^4}{g^2} (1 - 0,287 \cdot \ln \gamma) \dots \dots \dots (2.28)$$

di mana,

- H_s = Tinggi gelombang signifikan (m)

Parameter lebar spektra

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{jika } \omega > \omega_p \end{cases} \dots \dots \dots (2.29)$$

Peak-enhancement factor yang digunakan yaitu:

$$\gamma = \begin{cases} 5,0 & \varphi < 3,6 \\ \exp(5,75 - 1,15\varphi), & 3,6 < \varphi < 5,0; \varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \dots \dots \dots (2.30) \\ 1,0 & \varphi \geq 5,0 \end{cases}$$

Setelah itu, spektrum kecepatan yang diinduksi gelombang (*wave induced velocity spectrum*) di seabed $S_{UU}(\omega)$ bisa ditentukan melalui transformasi spektra gelombang pada permukaan laut menggunakan teori gelombang orde pertama ditampilkan pada Persamaan 2.31:

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

Di mana,

- G = *Transfer Function*
- $S_{\eta\eta}$ = Spektrum JONSWAP

Fungsi transfer G mentransformasi elevasi permukaan laut menjadi kecepatan aliran yang diinduksi gelombang di dasar laut, yakni pada Persamaan 2.32 berikut ini:

$$G^2(\omega) = \frac{\omega \cosh(k.(D+e))}{\sinh(k.d)} \dots\dots\dots(2.32)$$

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

$$\frac{\omega^2}{g} = k. \tanh(k.d) \dots\dots\dots(2.33)$$

Di mana,

- ω = Frekuensi gelombang (rad/s)
- g = percepatan gravitasi (9,81) (m/s²)
- k = Angka gelombang
- d = kedalaman perairan (m)

Kecepatan aliran gelombang signifikan pada elevasi pipa (U_s) dan mean zero-up crossing dari osilasi aliran pipa (T_u) dijelaskan pada Persamaan 2.34 dan 2.35.

$$U_s = 2\sqrt{M_0} \dots\dots\dots(2.34)$$

Di mana,

M_0 = Momen spektra orde pertama

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \dots\dots\dots(2.35)$$

Di mana,

M_2 = Momen spektra orde ke-2

M_0 dan M_2 dapat ditentukan dengan mengintegrasikan persamaan momen spektra pada orde ke-n sesuai persamaan 2.36:

$$M_n = \int_0^\infty \omega_n^2 S_{UU}(\omega) d(\omega) \dots\dots\dots(2.36)$$

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

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

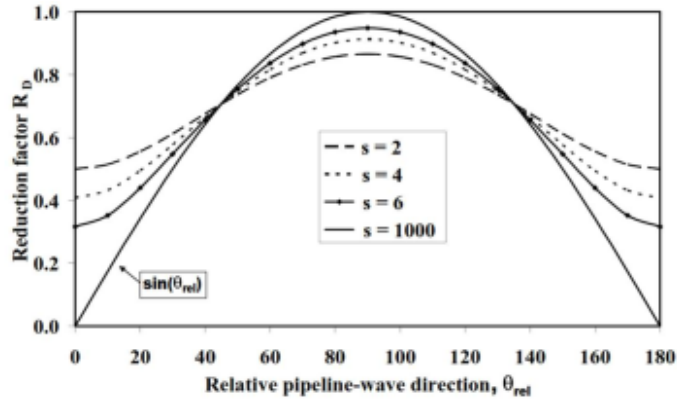
Di mana,

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

U_w = Kecepatan arus akibat gelombang (m/s)

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

Nilai R_D dapat ditentukan dengan menggunakan grafik pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Reduction Factor Akibat Sebaran Gelombang (DNV RP F105)

B. Arus

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

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

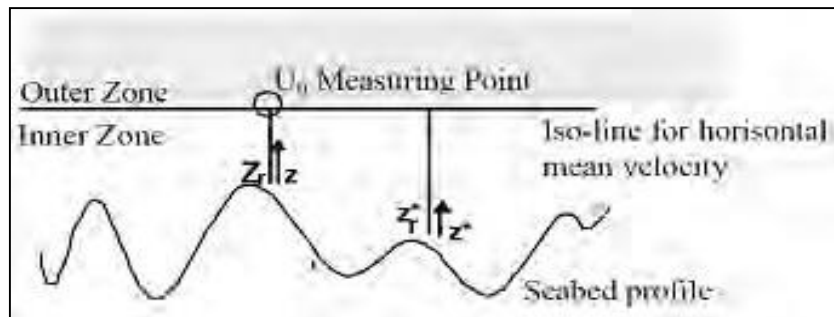
Untuk perairan dengan kedalaman lebih dari 100 m, arus memiliki dua karakteristik berbeda, sebagai *driving agent* dan *steering agent*. *Driving agent* adalah arus pasang surut, dimana gradien tekanan disebabkan oleh elevasi permukaan atau perubahan tekanan, angin dan gaya *storm surge*. *Steering agent*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

a. *Outer zone*

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

b. *Inner zone*

Merupakan zona aliran dimana rata-rata kecepatan arus dan turbulensi aliran menunjukkan variasi secara signifikan dalam arah horizontal. Kecepatan dan arah arus adalah fungsi dari geometri lokal dasar laut. Pada *inner zone*, profil kecepatan arus dianggap logaritmik karena tidak terjadi pemisahan aliran. Untuk lebih jelasnya perhatikan Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2. 4 Zona Aliran Arus (DNV RP F105, 2017)

Di dalam DNV RP F105, kecepatan arus pada level pipa dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.38 berikut :

$$U_c = R_c \cdot U(z_r) \frac{(\ln(z) - \ln(z_0))}{(\ln(z_r) - \ln(z_0))} \dots \dots \dots (2.38)$$

Di mana,

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

$U(z_r)$ = Kecepatan arus pada ketinggian referensi (m/s)

R_c = Faktor reduksi kecepatan arus

$$R_c = \sin(\theta_{rel}) \dots \dots \dots (2.39)$$

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

z = Elevasi diatas dasar laut (m)

$$z = e + \frac{Dt}{2} \dots \dots \dots (2.40)$$

z_r = Elevasi referensi (m)

z_0 = Parameter kekasaran bawah laut (Tabel 2.2)

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

Seabed	Roughness z_0 (m)
Silt	$\approx 5 \times 10^{-6}$
Fine sand	$\approx 1 \times 10^{-5}$
Medium sand	$\approx 4 \times 10^{-5}$
Coarse sand	$\approx 1 \times 10^{-4}$
Gravel	$\approx 3 \times 10^{-4}$
Pebble	$\approx 2 \times 10^{-3}$
Cobble	$\approx 1 \times 10^{-2}$
Boulder	$\approx 4 \times 10^{-2}$

2.2.8 Kriteria Aliran

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

$$\alpha = \frac{Uc}{Uw+Uc} \dots\dots\dots(2.41)$$

Di mana,

Uc = Kecepatan arus (m/s)

Uw = Kecepatan Gelombang (m/s)

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

Tabel 2. 3 Kriteria Respon Pipa terhadap Rasio Aliran (DNV RP F105, 2017)

$\alpha < 0.5$	Gelombang Dominan ($Uw > Uc$)
	<u>Arah In-Line:</u> Pembebanan arah <i>In-line</i> dihitung berdasarkan persamaan Morrison. <i>In-line</i> VIV akibat <i>vortex shedding</i> diabaikan.

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

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).

A. Gaya Seret (*Drag Force*)

Gaya *drag* adalah gaya yang berkaitan dengan kecepatan akibat arus *steady* yang dibangkitkan oleh gelombang. Kecepatan arus total (kecepatan arus akibat gelombang dan kecepatan arus pada elevasi pipa) mempengaruhi nilai dari gaya *drag*. Besar gaya *drag* dapat diperoleh menggunakan Persamaan 2.42:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D_t \cdot C_D \cdot (U_w + U_c)^2 \dots\dots\dots(2.42)$$

Di mana,

F_D = gaya *drag* (N/m)

C_D = koefisien *drag*

U_w = kecepatan partikel air akibat gelombang (m/s²)

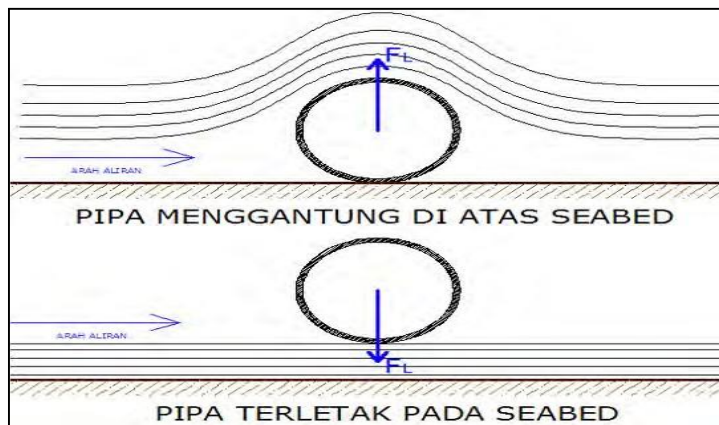
U_c = kecepatan arus laut (m/s²)

ρ_w = Massa jenis air laut (kg/m³)

D_t = Diameter total pipa (kg/m³)

B. Gaya Angkat (*Lift Force*)

Gaya *Lift* atau angkat pada pipa muncul karena adanya aliran yang bekerja pada pipa. Ketika kecepatan aliran air di atas pipa lebih cepat dibandingkan kecepatan aliran air di bawah pipa, tekanan aliran yang muncul di atas pipa akan lebih kecil di bandingkan tekanan aliran di bawah pipa. Perbedaan tekanan ini akan mengakibatkan pipa terangkat. Perhatikan Gambar 2.5 mengenai konsentrasi *streamline* pada pipa.



Gambar 2. 5 Ilustrasi Konsetrasi *Streamline* yang Melewati Pipa (Pratama, 2007)

Besar gaya angkat dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 2.43:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D_t \cdot C_L \cdot (U_w + U_c)^2 \dots\dots\dots(2.43)$$

Di mana,

F_L = Gaya *Lift* (N/m)

ρ_w = Massa jenis air laut (kg/m³)

C_L = Koefisien gaya *lift*

U_w = kecepatan partikel air akibat gelombang (m/s²)

$$U_c = \text{kecepatan arus laut} \quad (\text{m/s}^2)$$

$$D_t = \text{Diameter total pipa} \quad (\text{kg/m}^3)$$

C. Gaya Inersia (*Inertia Force*)

Pipa bawah laut yang berinteraksi dengan fluida yang dipercepat akan mengalami gaya yang proporsional dengan percepatan dari fluida tersebut (Bai, 2014). Beban siklis akibat gelombang akan mengurangi atau menambah kecepatan air. Pipa akan memberikan gaya untuk mengolah perubahan kecepatan partikel air yang bekerja pada pipa. Besar gaya inersia dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 2.44:

$$F_I = \frac{\pi}{4} \cdot \rho_w \cdot D_t \cdot C_M \cdot a_n \dots\dots\dots(2.44)$$

Di mana,

$$F_I = \text{Gaya Inersia} \quad (\text{N/m})$$

$$C_M = \text{Koefisien gaya inersia}$$

$$a_n = \text{percepatan partikel air} \quad (\text{m/s}^2)$$

D. Koefisien Hidrodinamika

Koefisien-koefisien C_D , C_L , dan C_M dalam penentuannya digunakan *Reynolds Number* untuk pipa terekspos pada aliran *steady*. Dalam Tabel 2.4 dibawah dapat diketahui rekomendasi koefisien hidrodinamika untuk aliran *steady*.

Tabel 2. 4 Rekomendasi Koefisien Hidrodinamika untuk Aliran *Steady* (Mouselli, 1981)

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

2.2.10 Allowable Span Statik

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, analisis terhadap *free span* pada pipa bawah laut dilakukan terhadap dua kriteria utama, yaitu *Fatigue Limit State* dan *Ultimate Limit State*. Analisis dikerjakan pada dua kondisi berbeda, yaitu kondisi statik dan dinamik. Pada suatu pipa bawah laut, di bentang bebas tersebut terjadi tegangan dengan besar tertentu akibat massa pipa yang

tidak tertumpu oleh *seabed*. Bentang bebas yang terlalu panjang dapat menyebabkan tegangan berlebihan (*excessive yielding*) pada pipa. Dengan asumsi kedua ujung pipa pada bentang bebas bertumpu pada perletakan sederhana, maka panjang *allowable span* statik dapat ditentukan berdasarkan Persamaan 2.45 berikut.

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

Di mana,

- L_{st} = panjang *allowable span* statik yang diijinkan (m)
- C = konstanta ujung peletakan
- I = *momen inertia* penampang pipa (m⁴)
- σ_e = tegangan ekuivalen (*von mises stress*) (N/m²)
- W_t = berat pipa terdistribusi merata per satuan panjang (N/m)
- D_{tot} = diameter total terluar pipa (m)

Untuk nilai W_t , dapat dirumuskan dalam Persamaan 2.46 berikut :

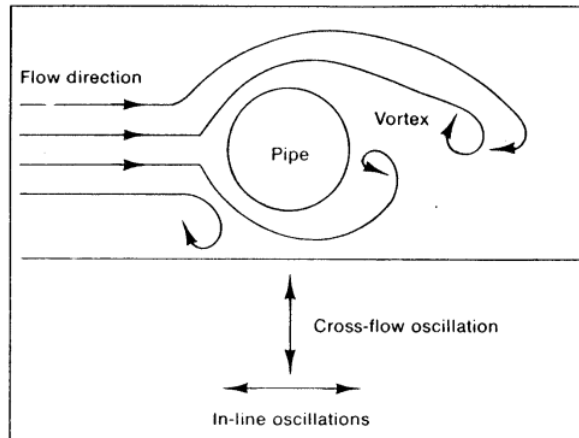
$$W_t = \sqrt{W_{sub}^2 + (F_D + F_I)^2} \quad \dots \dots \dots (2.46)$$

Di mana,

- W_{sub} = berat pipa terendam dalam air per satuan panjang (*submerged weight*) (N/m)
- F_D = gaya *drag* per satuan panjang (N/m)
- F_I = gaya *inertia* per satuan panjang (N/m)

2.2.11 Vortex Induced Vibration (VIV)

Ketika partikel air mengalir melalui pipa bawah laut, *vortices* (pusaran) akan terbentuk di daerah pipa (gambar). Pusaran ini terbentuk karena turbulensi dan ketidakstabilan aliran di belakang pipa. Pelepasan pusaran (*vortex shedding*) ini perubahan terhadap tekanan hidrodinamis pada pipa secara periodik. Perubahan tekanan hidrodinamis ini dapat menyebabkan pipa bergetar, terutama pipa yang mengalami *free span* (Mouselli, 1981). Berikut permodelan *vortex induced vibration* ditampilkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Ilustrasi *Vortex Induced Vibration* (VIV) pada Pipa
(Mouselli, 1981)

VIV dari *free span* tidak diperbolehkan terjadi selama masa desain *pipeline*. Dalam beberapa tahun terakhir pendekatan perhitungan VIV yang mempengaruhi *freespace* menjadi diterima dengan beberapa kriteria yang telah ditentukan, di mana parameter VIV yang diizinkan terbukti tidak menyebabkan kelelahan.

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

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

A. Frekuensi *Vortex Shedding*

Frekuensi *vortex shedding* sangat berhubungan dengan diameter pipa dan kecepatan aliran. Jika frekuensi *vortex shedding* mendekati frekuensi natural bentangan bebas pipa, maka resonansi akan terjadi dan pipa mengalami getaran. Pipa dapat mengalami kegagalan akibat *vortex induced vibration*. Kegagalan pipa ini dapat dicegah jika frekuensi *vortex shedding* memiliki perbedaan cukup besar dengan frekuensi natural pipa (Mouselli, 1981). Persamaan frekuensi *vortex shedding* dapat dilihat pada Persamaan 2.47 berikut:

$$f_s = S_t \left(\frac{U_{tot}}{Dt} \right) \dots \dots \dots (2.47)$$

Di mana,

S_t = Strouhal Number (0.2 untuk silinder bulat)

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

B. Reynolds Number

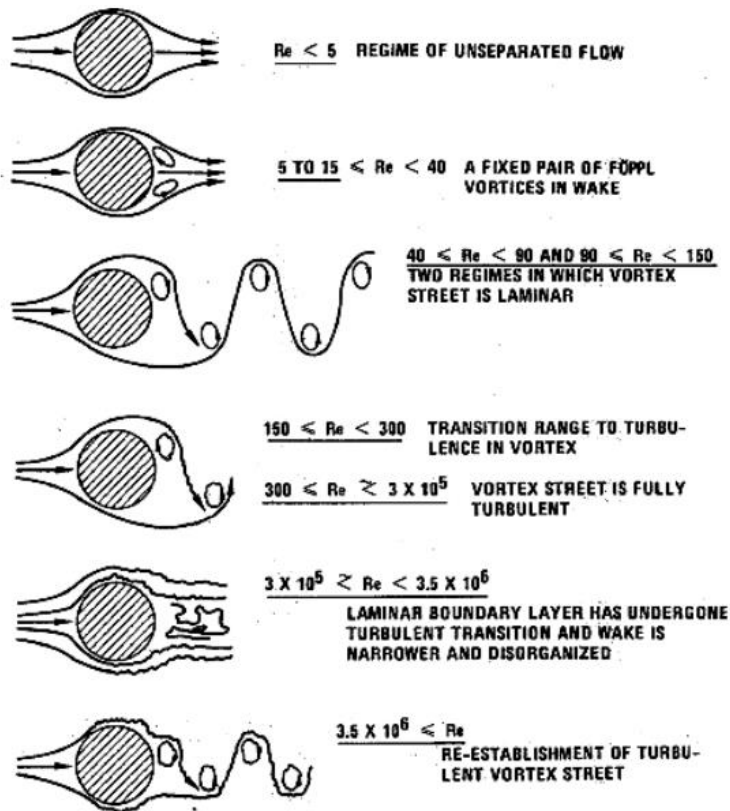
Persaman 2.48 berikut merupakan persamaan *reynolds number*:

$$Re = \left(\frac{U_{tot} \cdot Dt}{\nu} \right) \dots \dots \dots (2.48)$$

Di mana,

ν = Viskositas kinematik air laut ($1.148 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

Bentuk-bentuk aliran fluida berbeda-beda untuk setiap *range* harga *Reynolds Number* yang berbeda. Hal ini dapat digunakan untuk mengetahui kondisi aliran di daerah tersebut seperti dijelaskan oleh Gambar 2.7



Gambar 2. 7 Regime Aliran Fluida pada Silinder Halus (Lienhard, 1966)

Berdasarkan gambar 2.7 dapat diketahui fenomena terbentuknya *vortex* di belakang silinder yaitu:

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

C. Stability Parameter

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

$$K_S = \frac{4 \cdot \pi \cdot m_e \cdot \zeta_T}{\rho_w \cdot D t^2} \dots \dots \dots (2.49)$$

Di mana,

m_e = massa efektif pipa (kg/m)

ζ_T = Total modal *damping ratio*

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

- *Structural Damping* (ζ_{str}), merupakan *damping* yang diakibatkan oleh gaya gesekan internal material pipa. Jika tidak tersedia data yang detail, *structural damping* dapat diasumsikan sebesar 0.05. Jika terdapat *concrete*, maka geser pada permukaan selimut beton dan *corrossion coating* dapat meningkatkan *damping* menjadi 0.01-0.02
- *Hydrodynamic Damping* (ζ_h) untuk VIV yang terletak di daerah *lockin* nilainya dapat dianggap 0
- *Soil damping* (ζ_{soil}), untuk tujuan screening bernilai 0.01
- Di dalam DNV RP F105, *stability parameter* ini dibagi dengan *safety factor* untuk meningkatkan keamanan, sesuai Persamaan 2.50.

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

D. Reduced Velocity

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

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

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

$$V_R = \frac{U_c + U_w}{f_n \cdot D_t} \dots\dots\dots(2.51)$$

Di mana,

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

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

f_n = frekuensi natural pipa (Hz)

D_t = Diameter total pipa (m)

E. Keulegan-Carpenter Number

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

$$KC = \frac{U_w}{f_w \cdot D_t} \dots \dots \dots (2.52)$$

Di mana,

f_w = frekuensi gelombang signifikan (1/Tu)

F. Current Flow Ratio

Perhitungan rasio aliran arus, ditunjukkan dalam Persamaan 2.53

$$\alpha = \frac{U_{c100 \text{ tahun}}}{U_{c100 \text{ tahun}} \cdot U_{w1 \text{ tahun}}} \dots \dots \dots (2.53)$$

Di mana,

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

$U_{w,1 \text{ tahun}}$ = Kecepatan aliran gelombang signifikan pada pipa.

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

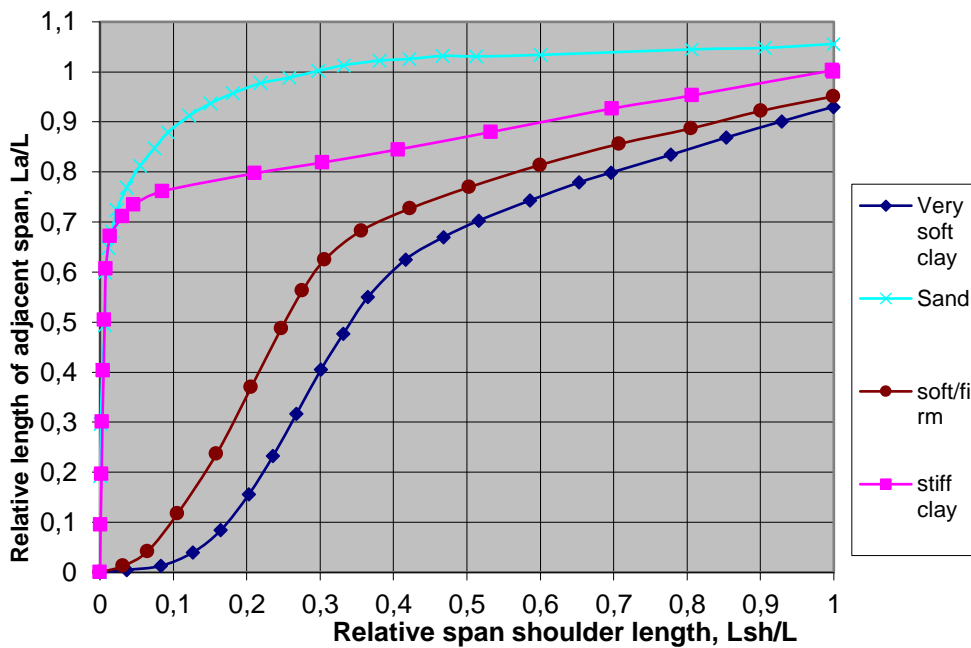
G. Klasifikasi Morfologi Seabed

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

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

Gambar 2.8 berikut mengklasifikasikan *span* dari jenis tanah *seabednya*.

Classification of Free Spans



Gambar 2. 8 Klasifikasi Morfologi Interaksi *Free Span* (DNV F105, 2017)

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

H. Klasifikasi Respon Pipa pada *Free Span*

Klasifikasi respon pipa pada suatu *free span* ditentukan berdasarkan rasio L (panjang *span*) dan D (diameter terluar pipa). Kriteria L/D ini diberikan oleh DNV-RP-F105 dengan klasifikasi pada Tabel 2.5 berikut.

Tabel 2. 5 Klasifikasi Respon *Free Span* (DNV RP F105, 2017)

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

2.2.12 Panjang Effective Span

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

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

Dengan,

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

Di mana,

- L_{eff} = Panjang efektif *span* (m)
- L = Panjang aktual *free span* (m)
- β = *Relative soil stiffness parameter*
- K = *Relevant soil stiffness* (vertikal/ horizontal, statis/dinamis)
- CSF = *Concrete stiffness factor*
- E_{st} = *Young's modulus* pipa baja (N/m²)
- I_{st} = Momen inersia pipa baja (m⁴)

A. *Dynamic Soil Stiffness*

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

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

- **Vertikal**

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

Di mana,

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

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

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

- **Horizontal**

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

Di mana,

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

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

B. *Koefisien Dynamic Soil Stiffness*

Koefisien *dynamic soil stiffness* ditentukan di dalam DNV GL RP F105 untuk setiap jenis tanah. Pada tugas akhir ini, jenis tanah di lokasi pipa merupakan *very soft clay* sehingga koefisien yang digunakan dijelaskan pada Tabel 2.6 berikut :

Tabel 2. 6 Koefisien *Dynamic Soil Stiffness* untuk Jenis Tanah *Clay* (DNV RP F105, 2017)

<i>Clay Type</i>	C_v (kN/m ⁵)	C_L (kN/m ⁵)	$K_{v,s}$ (kN/m/m)
<i>Very Soft</i>	600	500	50-100
<i>Soft</i>	1400	1200	160-260
<i>Firm</i>	3000	2600	500-800
<i>Stiff</i>	4500	3900	1000-1600
<i>Very Stiff</i>	11000	9500	2000-3000
<i>Hard</i>	12000	10500	2600-4200

2.2.13 Frekuensi Natural Pipa

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

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

Di mana,

f_1 = *fundamental natural frequency* (Hz)

C_1, C_3 = *boundary condition coefficient*

CSF = *concrete stiffness factor*

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

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

A. Safety Factor

Safety factor merupakan faktor yang digunakan untuk meningkatkan keamanan suatu parameter analisis. *Safety factor* memiliki nilai yang berbeda-beda tergantung pada kondisi pada suatu parameter analisis. Nilai *safety factor* untuk setiap parameter analisis terdapat didalam DNVGL RP F105 dijelaskan di dalam Tabel 2.7 dan Tabel 2.8 berikut:

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

γ_{IL}	1,4
γ_{CF}	1,4

Tabel 2. 8 Faktor Keamanan *Screening Fatigue* (DNV RP F105, 2017)

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

B. Effective Axial Force

Pada dasarnya, ketika sebuah pipa bawah laut memiliki suatu penampang tertentu, memiliki nilai momen inersia dan kelakuan, maka pipa

bawah laut dapat dikategorikan sebagai balok secara umum. Akan tetapi, pada suatu *free span*, pipa mengalami regangan yang disebabkan oleh pemuaian material akibat temperatur *content*, dan juga tekanan *content* tersebut. Oleh karena itu, pipa bawah laut memiliki karakteristik yang unik dalam analisis mekanika teknik, sehingga tidak dapat disebut balok. Sebuah *free span* akan mengalami regangan pada kedua ujungnya, sehingga disimpulkan ada gaya aksial yang bekerja padanya. Pada umumnya perpanjangan ini menjadi suatu lendutan vertikal. Parameter *effective axial force* dijelaskan dalam Persamaan 2.59 berikut:

$$S_{eff} = H_{eff} - (1 - 2\nu) \cdot P_i \frac{\pi}{4} \cdot (D_i)^2 - \alpha_e \cdot \Delta T \cdot A_{st} \dots (2.59)$$

Di mana,

- H_{eff} = *Effective lay tension* (N)
- ν = *Poisson ratio* baja (0.3s)
- P_i = Perbedaan tekanan internal (Pa)
- D_i = Diameter dalam pipa (m)
- α_e = koefisien ekspansi suhu ($^{\circ}\text{C}$)
- ΔT = Perbedaan temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
- A_{st} = Luas penampang pipa baja (m^2)

C. *Critical Buckling Load*

Critical buckling load dipengaruhi oleh kekakuan pipa, berat terendam pipa dan pengaruh kontak pipa dengan tanah (Bai dan Bai, 2014). Di dalam DNV GL RP F105, *critical buckling load* dapat ditentukan dengan Persamaan 2.60 berikut :

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

Di mana,

- C_2 = *boundary condition coefficient*
- CSF = *concrete stiffness factor*
- I_{st} = Momen inersia pipa baja (m^4)

D. *Static Deflection*

Bentangan bebas pipa akan mengalami lendutan atau defleksi di sepanjang bagian tengah pipa yang tidak ditumpu oleh tanah. Defleksi ini

terjadi di arah *cross-flow* dan *in-line*. Defleksi untuk arah *cross-flow* disebabkan karena beban terendam pipa, sedangkan untuk arah *in-line* disebabkan karena beban hidrodinamis. Terjadinya defleksi dapat meningkatkan risiko kegagalan *buckling* pipa. Di dalam DNV RP F105, *static deflection* dijelaskan dalam Persamaan 2.61 berikut:

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

Di mana,

C_6 = boundary condition coefficient

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

P_{cr} = critical buckling load (N)

I_{st} = Momen inersia pipa baja (m⁴)

S_{eff} = effective axial force (N)

E. Concrete Stiffness Factor (CSF)

Fungsi penambahan selimut beton adalah untuk menambah berat pipa sehingga dapat meningkatkan kestabilan pipa di dasar laut. Selain itu, penambahan selimut beton dapat mempengaruhi kekakuan pipa. *Concrete stiffness factor* menunjukkan kekakuan selimut beton relatif terhadap kekakuan pipa baja. Persamaan CSF dijelaskan pada Persamaan 2.62 berikut:

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

Di mana,

k_c = konstanta empiris

= 0.33 untuk AE dan 0.25 untuk PP/PE coating

EI_{conc} = bending stiffness selimut beton

EI_{steel} = bending stiffness pipa baja

F. Boundary Condition

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

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

Boundary condition coefficient (C1-C6) ditentukan dalam DNV GL RP F105 yang disajikan pada Tabel 2.9 berikut:

Tabel 2. 9 Koefisien *Boundary Condition* (DNV RP F105, 2017)

	<i>Pinned-pinned</i>	<i>Fixed-fixed</i>	<i>Single Span on seabed</i>
C ₁	1.57	3.56	3.56
C ₂	1.0	0.25	0.25
C ₃	0.8 ⁽¹⁾	0.2 ⁽¹⁾	0.4 ⁽¹⁾
C ₄	4.93	14.1	<i>Shoulder</i> : $\frac{1}{18 (L_{eff}/L)^2 - 6}$ <i>Midspan</i> : 8.6
C ₅	1/8	1/12	<i>Shoulder</i> ⁽⁴⁾ : 14.1 (L/L _{eff}) ² <i>Midspan</i> : 8.6
C ₆	5/384	1/384	1/384

2.2.14 Screening Criteria Fatigue

Screening fatigue yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini mengacu pada DNV GL RP F105. Kriteria *screening* adalah meninjau terjadinya *fatigue*

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

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

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

Di mana,

- $f_{o,IL}$ = Frekuensi natural *in-line*
- γ_{IL} = *Safety Factor (in-line)*
- $U_{c,100 \text{ tahun}}$ = Periode ulang arus 100 tahun (m/s)
- $V_{R,onset}^{IL}$ = *In-line onset value*
- D_t =Diameter total pipa (m)
- L = Panjang aktual *freespan* pipa (m)
- $\bar{\alpha}$ = *Current flow ratio*

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

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

Di mana,

- $\gamma_{on,IL}$ = *Safety Factor (in-line) value*
- K_{sd} = *Stability Parameter/ γ_k (safety factor)*

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

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_f} > \frac{U_{c,100 \text{ tahun}} + U_{w,1 \text{ tahun}}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D_t} \times \gamma_{CF} \dots\dots\dots(2.65)$$

Di mana,

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

- γ_{CF} = Safety Factor (cross-flow)
- $U_{c,100\ tahun}$ = Periode ulang arus 100 tahun (m/s)
- $U_{w,1\ tahun}$ = Periode ulang gelombang 1 tahun (m/s)
- $V_{R,onset}^{CF}$ = Cross-flow onset value
- D_t = Diameter total pipa (m)

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

$$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3 \cdot \Psi_{proxi,onset} \cdot \Psi_{mass,onset} \cdot \Psi_{a,onset}}{\gamma_{on,CF}} \dots\dots\dots(2.66)$$

Di mana,

- $\gamma_{on,CF}$ = Safety Factor (cross-flow) value
- $\Psi_{proxi,onset}$ = faktor koreksi untuk *cross-flow* dekat seabed
- $\Psi_{mass,onset}$ = Reduction factor untuk *cross-flow* karena massa
- $\Psi_{a,onset}$ = faktor koreksi untuk kecepatan arus

2.2.15 Umur Kelelahan Pipa

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

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

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

Dalam desain suatu struktur pada kasus pipa bawah laut, salah satu kriteria persyaratan desainnya adalah memiliki waktu operasi yang tak terhingga waktunya untuk dapat bertahan karena adanya kegagalan akibat

kelelahan pada pipa. Sehingga jika pipa mendapatkan tekanan baik itu dari dalam dan dari luar yang pada akhirnya menyebabkan pipa mengalami kelelahan, struktur material dari pipa tersebut masih mampu dalam menahan tingkat kelelahan yang terjadi atau dengan kata lain tidak terjadi kegagalan pada pipa tersebut.

A. Siklus Kelelahan

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

$$D_{fat} = \sum \frac{n}{N} \dots \dots \dots (2.67)$$

Di mana,

D_{fat} = Akumulasi *fatigue damage*

n = Total number of stress cycles corresponding to Stress Range

N = Number cycles to failure at stress range

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

$$\log N = \log a - m \log S_i \dots \dots \dots (2.68)$$

Di mana,

S_i = Stress Range

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

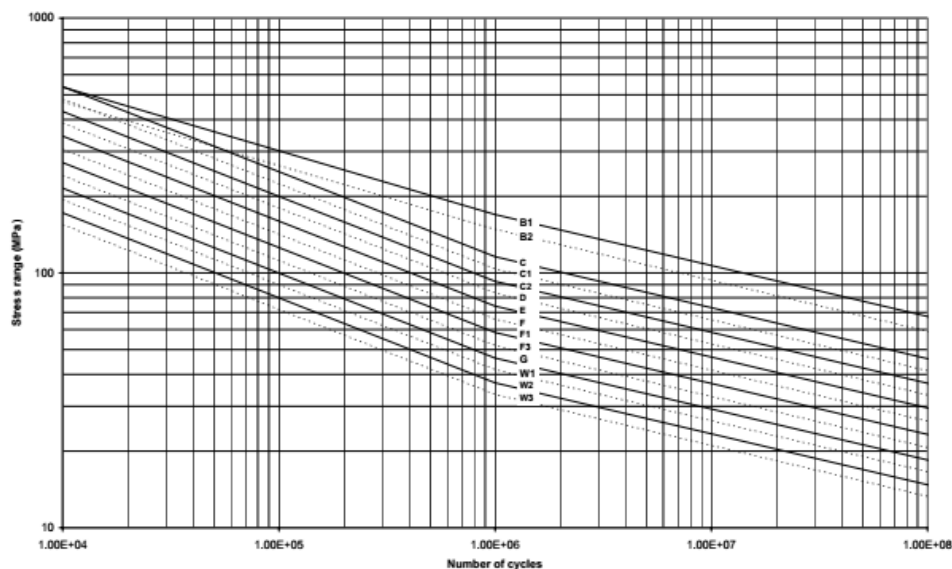
m = negative inverse slope oh the S-N Curve

Nilai n dapat ditentukan dengan menggunakan grafik pada Gambar 2.9 sesuai nilai *stress range*. Probabilitas kejadian siklus tegangan pada nilai n berkisar 2% - 10%. Kurva S-N yang digunakan seperti pada Gambar 2.9, mengacu pada *Figure 2-5 DNV RP C203 Fatigue Strength of Offshore Steel Structure* yaitu kategori D. Pemilihan kurva harus didasarkan ciri-ciri struktur yang dianalisa. Berikut pemilihan jenis kurva S-N dan *plotting* tegangan dalam grafik kurva S-N dalam menentukan jumlah tegangan lelah yang terjadi di struktur tersebut dijelaskan oleh Tabel 2.10 dan Gambar 2.9

Tabel 2. 10 Tabel *S-N Curve* di *Seawater* dengan *Cathodic Protection*
(DNV RP C203, 2005)

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

*) see also 2.10



Gambar 2. 9 Plotting *Stress S-N Curve* di *Seawater* (DNV RP C203, 2005)

Pada perhitungan estimasi sisa waktu operasi harus di cari terlebih dahulu nilai rasio kelelahan kerusakan. Oleh sebab itu, dalam penentuan rasio *fatigue damage* atau rasio kelelahan kerusakan, semua komponen yang berasal dari sumber lainnya perlu dihitung lebih lanjut. Komponen tersebut meliputi adanya penambahan *safety factor* dan rasio *damage*. Penentuan jenis kurva S-N seperti pada Gambar 2.9 berdasarkan pada struktur yang digunakan. Maka dari itu, perlunya penyesuaian kurva-SN untuk mendapatkan grafik yang benar agar mendapatkan nilai jumlah siklus menuju gagal pada saat *stress range*.

B. Response Model dan Stress Range

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

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

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

1. In-line response model

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

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

$$S_{IL} = 2 A_{IL} \left(\frac{A_v}{D}\right) \psi_{\alpha,IL} \cdot \gamma_{IL} \dots\dots\dots (2.69)$$

Di mana,

S_{IL} = *stress range* pada arah *in-line* VIV (N/m²)

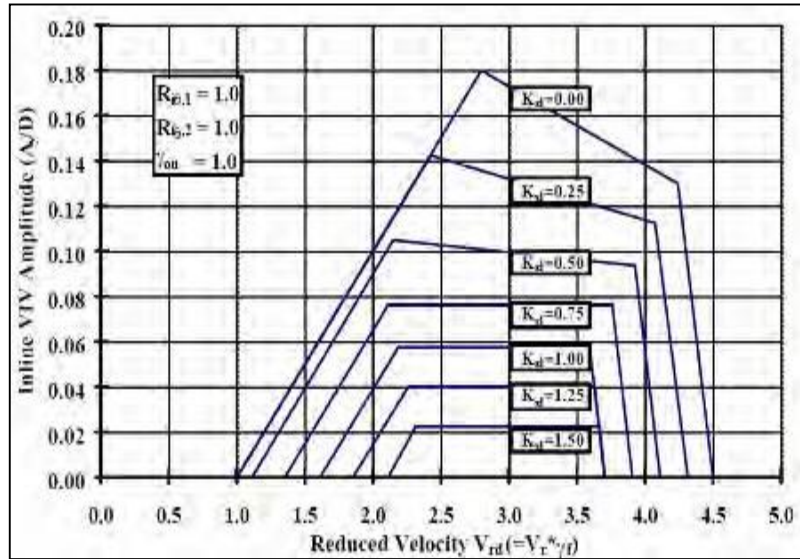
A_{IL} = *unit amplitude stress*, tegangan yang dilakukan unit diameter dari mode bentuk defleksi *in-line* (N/m²)

$\psi_{\alpha,IL}$ = faktor koreksi untuk rasio kecepaaan aliran arus

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

A_{γ}/D = amplitudo maksimum dari vibrasi pada arah *in-line* VIV

(dapat dilihat pada Gambar 2.10)



Gambar 2. 10 Respon Amplitudo *In-Line* VIV (DNV RP F105, 2017)

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

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

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

$$A_{IL} = C_4 \times (1 + CSF) \times \frac{D \times (D_o - t) \times E}{L_{eff}^2} \dots\dots\dots(2.71)$$

Di mana,

C_4 = boundary condition coefficient (Tabel 2.9)

CSF = Concrete Stiffness Factor

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2. Cross-flow response model

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

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

$$S_{CF} = 2 A_{CF} \left(\frac{A_z}{D} \right) R_k \gamma_s \quad \dots\dots\dots(2.79)$$

Di mana,

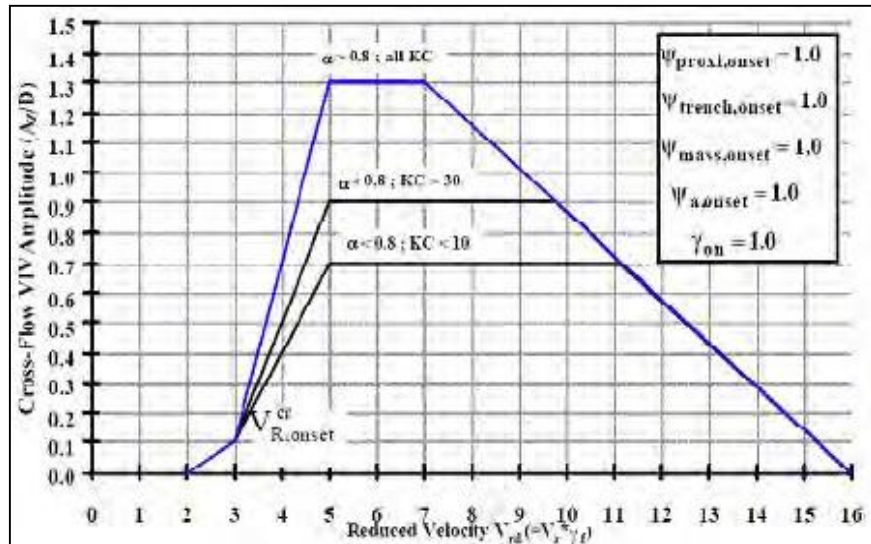
S_{CF} = *stress range* pada arah *cross-flow* VIV (N/m²)

A_{CF} = *unit amplitude stress*, tegangan yang dilakukan unit diameter dari mode bentuk defleksi *cross-flow* (N/m²)

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

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

A_z/D = amplitudo vibrasi arah *cross-flow* VIV (Gambar 2.11)



Gambar 2. 11 Response Amplitude Cross-Flow VIV (DNV RP F105, 2017)

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

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

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

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

Di mana,

$C_4 =$ Boundary Condition Coefficient

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

Selain itu, untuk menentukan nilai dari *cross-flow onset velocity*, hal ini sangat bergantung pada kedekatan dengan *seabed* geometri *trench*, rasio aliran arus, dan faktor massa spesifik pipa. Secara umum dijelaskan dalam Persamaan 2.82-2.85 berikut.

$$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3 \times \psi_{proxi,onset} \times \psi_{mass,onset} \times \psi_{a,onset}}{\gamma_{on,CF}} \dots\dots(2.82)$$

Di mana,

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

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

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

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

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

untuk nilai dari faktor koreksi dari kecepatan arus.

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

$$V_{R,1}^{CF} = 5 \dots\dots(2.86)$$

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

$$V_{R,end}^{IL} = 16 \dots\dots(2.88)$$

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

C. Perkiraan Sisa Waktu Operasi Pipeline

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

$$T_{life} = \frac{T_{exposure}}{D_{fat}} \times \eta \dots\dots\dots(2.90)$$

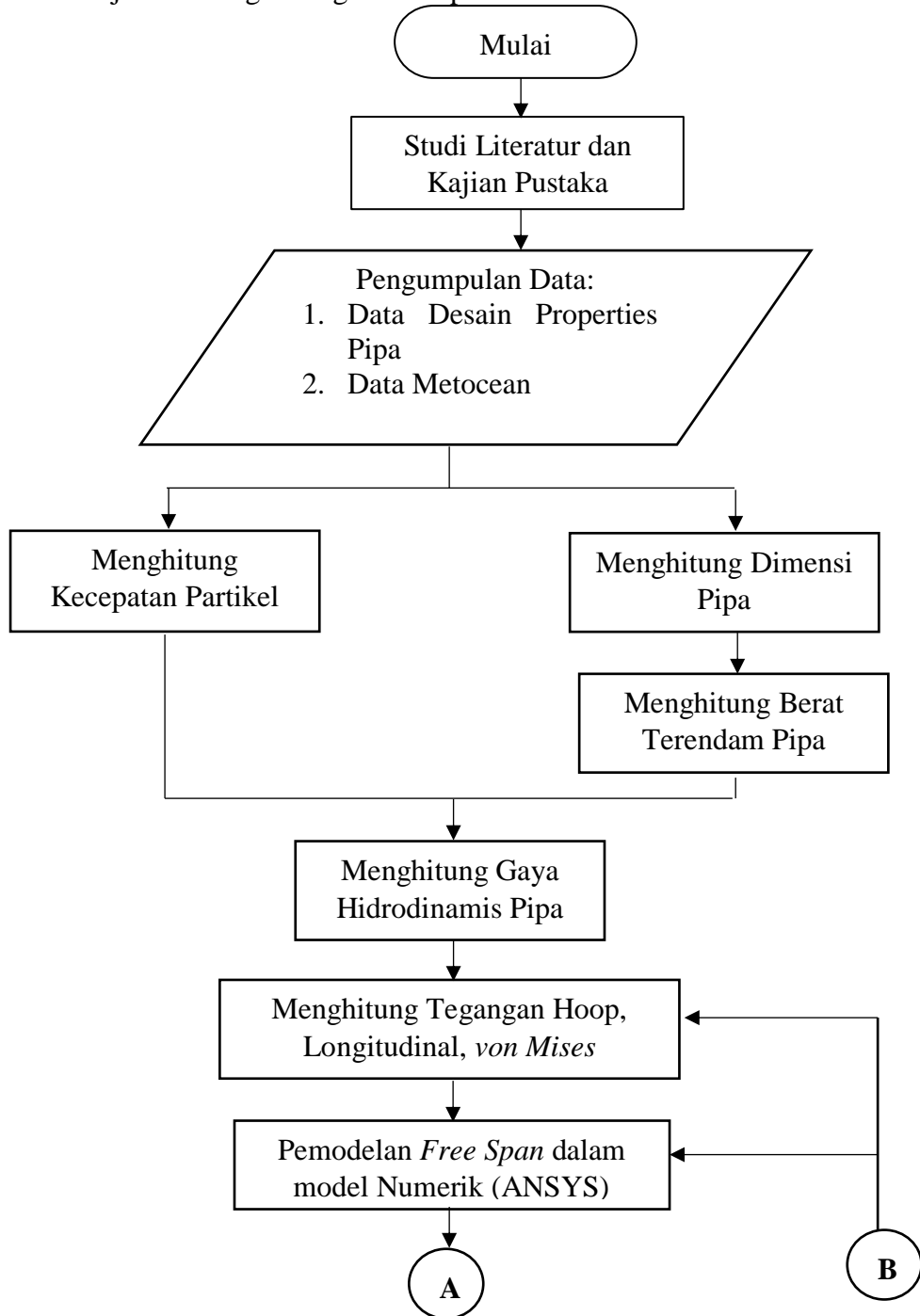
Di mana,

- T_{life} = Sisa waktu operasi pipa
- $T_{exposure}$ = Waktu pipa yang sudah beroperasi
- D_{fat} = Total akumulasi *fatigue damage*
- η = *safety factor*

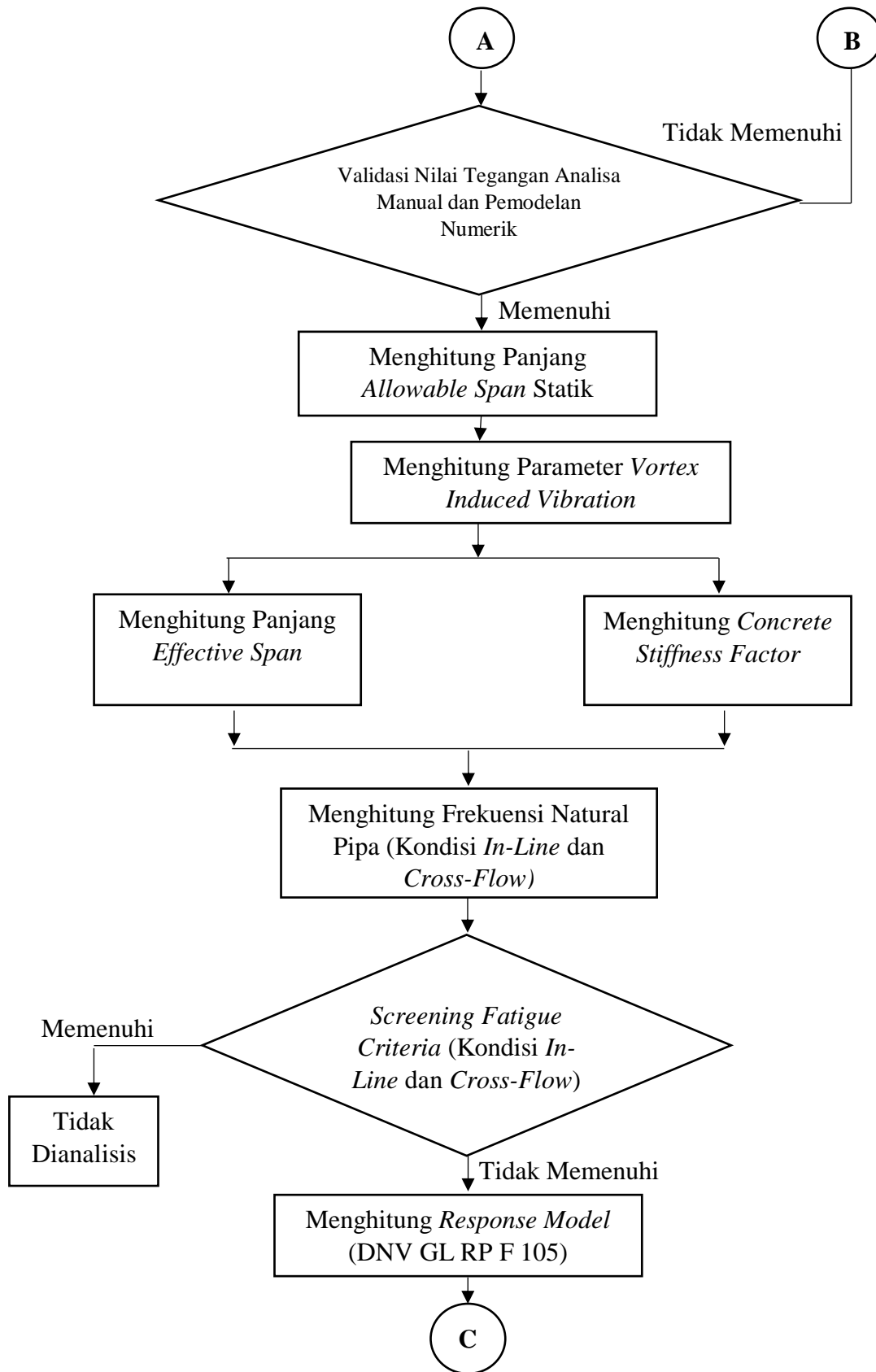
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir

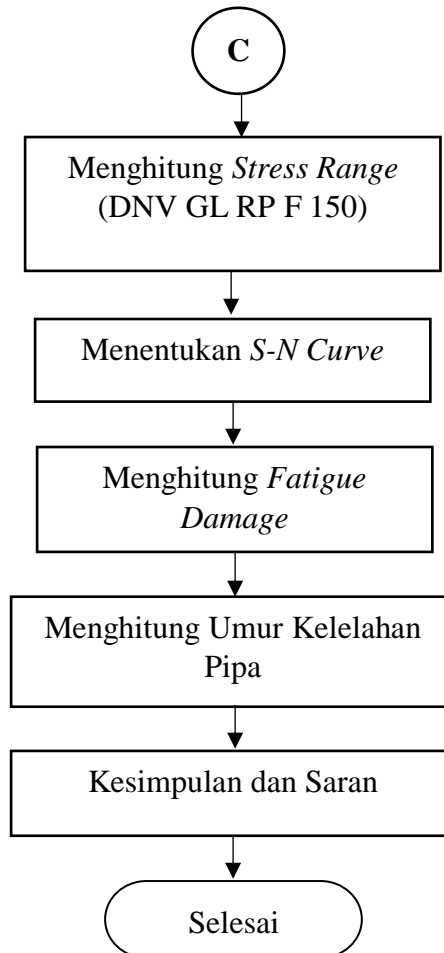
Metodologi penelitian yang digunakan selama pengerjaan tugas akhir ini diwujudkan dengan diagram alir pada Gambar 3.1 di bawah ini:



Gambar 3.1 Diagram Alir Tugas Akhir



Gambar 3. 1 Diagram Alir Tugas Akhir



Gambar 3. 1 Diagram Alir Tugas Akhir

3.2 Prosedur Penelitian

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

1. Studi Literatur

Hal pertama yang dilakukan dalam proses pengerjaan tugas akhir ini adalah mengumpulkan literatur yang berasal dari buku, jurnal penelitian, laporan tugas akhir dan *codes*. Literatur yang digunakan sebagai referensi mempunyai keterkaitan dengan teori pipa bawah laut, analisis bentangan bebas dan analisis kelelahan pada pipa. *Codes* yang digunakan adalah DNV GL RP F 105 & DNV RP C203 yang berhubungan dengan *freespan* dan analisis *fatigue*. Dan ASME B31.8 untuk analisis tegangan pada pipa gas.

2. Pengumpulan Data

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

3. Perhitungan Dimensi dan Berat Terendam Pipa

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

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

4. Perhitungan Kecepatan Partikel Air

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

5. Perhitungan Gaya Hidrodinamis pada Pipa

Gaya hidrodinamis yang terjadi pada pipa muncul akibat interaksi antara pipa dengan aliran air laut di sekitar pipa. Gaya hidrodinamis yang terjadi pada bentangan bebas pipa adalah gaya *drag*, *gaya lift* dan

gaya inersia. Gaya- gaya ini dapat mempengaruhi kestabilan pipa terutama defleksi yang terjadi pada pipa.

6. Perhitungan Tegangan pada *Free Span* yang Ditinjau

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

7. Pemodelan dan Validasi Tegangan pada Pipa Menggunakan ANSYS

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

8. Menghitung Panjang *Allowable Span* Statik

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

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

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

10. Perhitungan Panjang *Span* Efektif

Panjang bentangan bebas efektif dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan yang terdapat pada DNV RP F105. Panjang

bentangan bebas efektif dapat mempengaruhi defleksi statis, *critical buckling load* dan frekuensi natural pipa. Panjang bentangan bebas efektif ini akan dihitung untuk arah *in-line* dan *cross-flow* pipa.

11. Perhitungan Frekuensi Natural Pipa

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

12. Screening Fatigue Criteria

Frekuensi natural yang telah didapat kemudian di *screening* menggunakan kriteria yang ditentukan di dalam DNV RP F-105. *Screening* dilakukan untuk memeriksa panjang bentangan bebas pipa mana saja yang perlu dilakukan perhitungan umur kelelahan akibat *Vortex Induced Vibration*. Pada *Screening Fatigue Criteria*, Frekuensi natural pipa dibandingkan dengan frekuensi *fortex shedding*. Selain membutuhkan frekuensi natural, parameter lain yang dibutuhkan untuk proses *screening* adalah *reduced velocity* dan *current flow ratio*. *Span* yang tidak memenuhi kriteria *screening* akan dilakukan perhitungan *fatigue life* nya, sedangkan yang memenuhi tidak dianalisis.

13. Perhitungan Stress Range (S)

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

14. Penentuan Kurva S – N

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

15. Perhitungan *Fatigue Damage* dan Umur Kelelahan Pipa

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

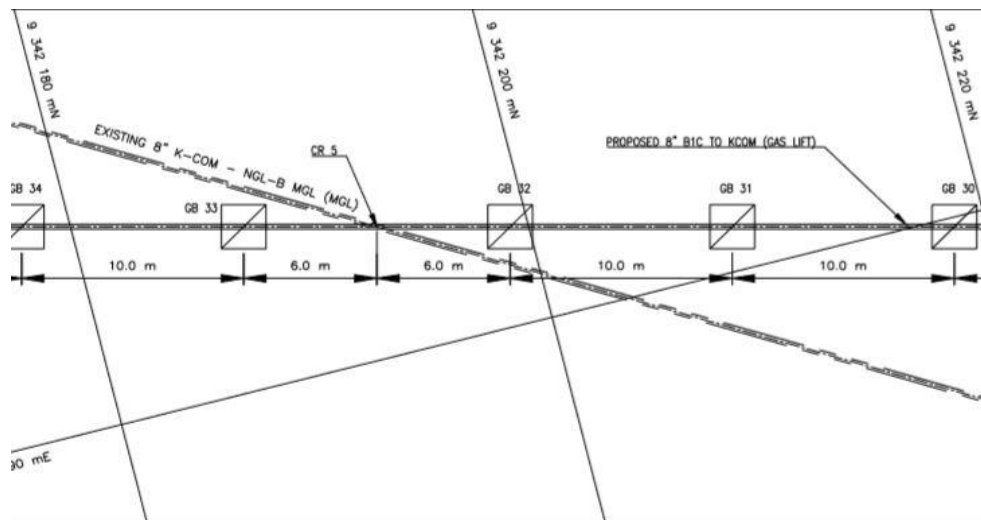
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

Studi Kasus yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah proyek dari Kilo Field milik *Pertamina Hulu Energy Offshore North West Java* yang dikerjakan oleh *PT. Depriwangga Engineering*. KILO Area terdiri dari dua platform produksi yaitu platform KCOM dan KPRO serta empat wellhead platform yaitu KA, KB, KC, dan JJA. Berdasarkan dari laporan pada tahun 2012, area ini masih memiliki cadangan yang berpotensi untuk menambah produksinya.

Dalam Tugas Akhir, analisis yang dilakukan merupakan analisis pada *free span* tunggal dari pipelines B1C ke KCOM yang bersilangan (*crossing*) dengan *existing pipelines* KCOM ke NGL-B (CR5) seperti Gambar 4.1 dibawah ini.



Gambar 4. 1 Lokasi *Crossing Pipelines* antara *Existing Pipelines* KCOM-NGLB dengan *Proposed Pipelines* B1C-KCOM (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Analisa yang dilakukan dalam tugas akhir ini yaitu analisis bentangan bebas untuk mengetahui panjang bentangan bebas yang masih diizinkan terjadi pada pipa dan berapa umur sisa dari pipa yang mengalami bentangan bebas (*crossing pipelines*). Studi kasus ini membutuhkan data – data di antaranya adalah data desain dan operasional pipa, data lingkungan, dan data karakteristik tanah di lokasi pipa.

4.2 Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan dalam pengerjaan Tugas Akhir antara lain data desain dan operasional pipa, data lingkungan, data karakteristik tanah, dan data titik *crossing* pipa.

4.2.1 Data Pipeline

A. Data Properti Pipa

Berikut data properti pipa yang ditampilkan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Data Properti Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012)

Parameters		Units	8" B1C-KCOM Gas Lift Pipeline
Outer Diameter		mm	219
Wall Thickness	Spool and Riser	mm	12.7
	Pipeline	mm	12.7
Material		-	API 5L Grade X52MO or X52QO PSL2 CS
Seam Type		-	SMLS
SMYS		MPa	360.0 (52.20 ksi)
SMTS		MPa	460.0 (66.70 ksi)
Young Modulus		MPa	2.07×10^5 (30022.9 ksi)
Poison Ratio		-	0.3
Density		kg/m ³	7850
Coefficient of Thermal Expansion		/°C	1.10×10^{-5}

B. Data Fungsional Pipa

Berikut data fungsional pipa yang ditampilkan dalam Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Data Fungsional Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012)

Parameters	Units	8" B1C-KCOM Gas Lift Pipeline
Design Pressure	psig	950 (6.55 MPa)
Operating Pressure	psig	660 (4.55 MPa)
Hydrotest Pressure	psig	1330 (9.2 MPa)
Mechanical Design Temp. (Metal)	°F	200 (93.33 °C)
Operating Temperature	°F	110 (43.33 °C)
Installation Temperature	°F	80 (26.66 °C)
Density	kg/m ³	39.76
Service		Gas Lift

C. Data *Coating* dan *Concrete* Pipa

Untuk data *coating* dan *concrete* pipa ditampilkan dalam Tabel 4.3-4.4.

Tabel 4. 3 Data *Coating* Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012)

Parameter	Units	Value
Asphalt Enamel Thickness	mm	4
Asphalt Enamel Density	kg/m ³	1281.5
Cut-Back - Asphalt Enamel	mm	150
Internal Corrosion Allowance	mm	3

Tabel 4. 4 Data *Concrete* Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012)

Parameters	Units	Value
Density	kg/m ³	3044
Thickness	mm	38
Cut Back	mm	300
Absorption	%	5

4.2.2 Data Lingkungan

A. *Water Depth*

Tabel 4. 5 Data *Water Depth* di sekitar Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012)

Platform Center Position	Parameter
	Water Depth (m)
B1C Platform	29.87
KCOM Platform	41.70
Crossing Position (CR5)	38.10

B. *Tidal Range*

Tabel 4. 6 Data *Tidal Range* di sekitar Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012)

Item	Units	Return Period	
		1-Year	100-Year
Storm Tide (Surge)	m	0.150	0.240
Highest Astronomical Tide (HAT)	m	1.158	

C. *Seawater Properties*

Tabel 4. 7 Data *Seawater Properties* di lokasi Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012)

Parameter	Unit	Value
Density of Sea Water	kg/m ³	1025
Sea Water Temperature	°C	26.67
Kinematics Viscosity	m ² /s	1.13 x 10 ⁻⁵

D. Wave Parameters

Tabel 4. 8 Data Wave Parameters di sekitar Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012)

Return Period	Maximum Wave		Significant Wave	
	Height (m)	Period (sec)	Height (m)	Period (sec)
1-year	5.09	7.10	2.74	5.42
100-years	8.63	9.40	4.64	7.18

E. Current Data

Tabel 4. 9 Data Arus di lokasi Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012)

Percent of Depth (%)	Current Speed (m/sec)	
	1-year	100-years
0	0.914	1.219
10	0.853	1.128
20	0.792	1.036
30	0.732	0.975
40	0.671	0.884
50	0.61	0.792
60	0.549	0.732
70	0.488	0.671
80	0.427	0.610
90	0.366	0.518
100	0.244	0.305

F. Hydrodynamics Coefficient

Tabel 4. 10 Data koefisien hidrodinamika (Pertamina Hulu Energi, 2012)

Parameter	Riser	Pipeline
Drag Coefficient	0.7 – 1.0	1.0 – 1.2
Lift Coefficient	0	1
Inertia Coefficient	2	3

G. Soil Parameter

Tabel 4. 11 Data Soil Parameter di lokasi Pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012)

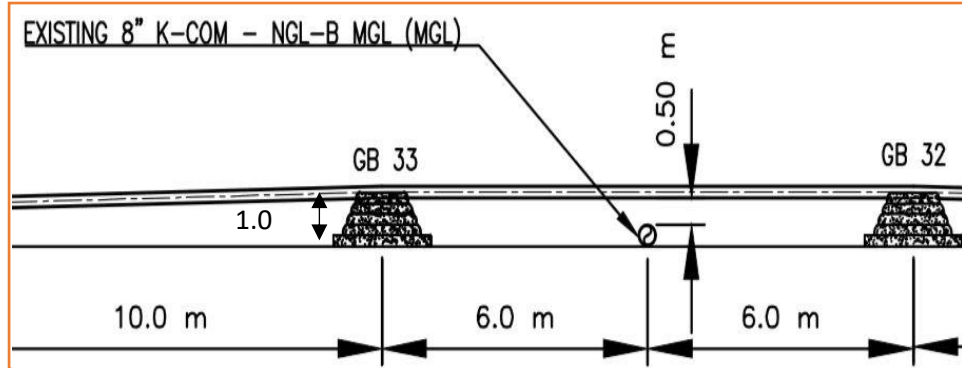
Parameter	Units	Value
Soil Type	-	Very Soft Clay
Undrained Shear Strength	kPa	2.0 – 5.0
Angle Friction	Deg	0
Koefisien Dynamic Soil Stiffness Vertikal (C_v)	$kN/m^{5/2}$	600000
Koefisien Dynamic Soil Stiffness Vertikal (C_L)	$kN/m^{5/2}$	500000

4.2.3 Data Lokasi Crossing Pipa

Untuk data lokasi *crossing* pipa dapat dilihat pada Tabel 4.12 berikut dan Gambar 4.2.

Tabel 4. 12 Data lokasi *crossing* pipa (Pertamina Hulu Energi, 2012)

Description	Crossing No	Crossing Pipeline	Crossing Line Size (NPS)	Coordinates	
				Northing (m)	Easting (m)
8" B1C-KCOM	CRS1	8" B1C-KCOM Gas Lift Pipeline	8	9 342 193.37	358 584.04
	CRS2	8" KCOM-NGL B MGL	8	9 342 193.75	358 584.13



Gambar 4. 2 Tampak Samping Lokasi Crossing Pipelines (Pertamina Hulu Energi, 2012)

Tabel 4. 13 Data *Span* Pipa

Parameters	Value	Units
Actual Span	12	m
Jarak Pipa dengan Seabed	1	m
Kedalaman Perairan	38.1	m
Umur Desain Pipelines	20	Tahun

4.3 Analisis Dimensi Pipa

4.3.1 Perhitungan Dimensi Pipa

Perhitungan dimensi pipa di sini, dilakukan untuk menghitung diameter pipa ataupun massa total dari pipa itu sendiri. Perhitungan dimensi pipa ini digunakan sebagai dasar untuk melakukan perhitungan analisis *freespan* selanjutnya, seperti perhitungan panjang efektif *span*, frekuensi natural, dan *screening*. Berikut Tabel 4.14 menampilkan hasil perhitungan dimensi pipa.

Tabel 4. 14 Perhitungan Dimensi Pipa

Cross Area Calculation	Persamaan	Satuan	Simbol	Nilai
External Pipe Diameter	$D = OD + (2xt_{coat}) + (2xt_{conc})$	m	D	0.303
Internal Cross Section Area	$A_i = \frac{\pi}{4} x(OD - (2xt_{nom}))^2$	m ²	A _i	0.0294
Steel Pipe Cross Section Area	$A_{pipa} = \left(\frac{\pi}{4} xOD^2\right) - A_i$	m ²	A _{pipa}	0.0082
Coating Layer Cross Section Area	$A_{coat} = \left(\frac{\pi}{4} x(OD + (2xt_{coat}))^2\right) - A_i - A_{pipa}$	m ²	A _{coat}	0.0028
Concrete Cross Section Area	$A_{conc} = \left(\frac{\pi}{4} x(OD + (2xt_{coat}) + (2xt_{conc}))^2\right) - A_i - A_{pipa} - A_{coat}$	m ²	A _{conc}	0.0316

Hasil perhitungan dimensi pipa akan digunakan dalam proses perhitungan massa efektif yang dijelaskan pada subbab selanjutnya.

4.3.2 Perhitungan Massa Efektif Pipa

Massa efektif pipa adalah jumlah dari massa seluruh struktur pipa ditambah dengan massa fluida yang dialirkan dan massa tambah. Hasil penjumlahan massa struktur pipa dan massa konten pipa ditampilkan dalam Tabel 4.15.

Tabel 4. 15 Perhitungan Massa

Mass Calculation	Persamaan	Satuan	Simbol	Nilai
Mass of Fluida	$M_{fluida} = A_i x \rho_{fluida}$	Kg/m	M _{fluida}	1.17
Mass of Pipe	$M_{pipa} = A_{pipa} x \rho_{pipa}$	kg/m	M _{pipa}	64.61
Mass of Coating	$M_{coat} = A_{coat} x \rho_{coat}$	kg/m	M _{coat}	3.59
Mass of Concrete	$M_{conc} = A_{conc} x \rho_{conc}$	kg/m	M _{conc}	96.30
Mass of Structure	$M_{struktur} = M_{pipa} + M_{coat} + M_{conc}$	kg/m	M _{struktur}	164.50
Mass of Disposal Water/Bouyancy	$M_{bouy} = \frac{\pi}{4} xD^2 x \rho_{seawater}$	Kg/m	M _{bouy}	73.91
Added Mass Coeficient	$C_a = \begin{cases} 0.68 + \left(\frac{1.6}{1 + \left(5 x \frac{e}{D}\right)}\right), & e/D < 0.8 \\ 1, & e/D \geq 0.8 \end{cases}$		C _a	1.00
Added Mass	$M_a = C_a x M_{bouy}$	kg/m	M _a	73.91
Effective Mass	$M_e = M_{fluida} + M_{struktur} + M_a$	kg/m	M _e	239.58
Specific Mass Ratio	$M_{ratio} = \frac{M_{struktur}}{M_{bouy}}$		M _{ratio}	2.23

Tabel di atas menunjukkan nilai massa efektif (**M_{eff}**) yang didapatkan dari hasil perhitungan adalah sebesar **239.58 kg/m**. Nantinya nilai ini juga yang akan digunakan dalam perhitungan selanjutnya.

4.3.3 Perhitungan Berat Terendam Pipa

Analisis berat terendam pipa diperlukan untuk mengetahui beban lateral yang timbul akibat berat pipa itu sendiri. Berat yang dihitung adalah berat

material (baja), berat muatan pipa (dalam kondisi operasi), berat *coating*, berat *concrete*, berat akibat *buoyancy*. Hasil perhitungan berat terendam pipa disajikan dalam Tabel 4.16 berikut.

Tabel 4. 82 Perhitungan Berat Pipa

Weight Calculation	Persamaan	Satuan	Simbol	Nilai
Pipe Weight per meter	$W_{pipa} = M_{pipa} \times 9.8067$	N/m	W_{pipa}	633.86
Coating weight per meter	$W_{coat} = M_{coat} \times 9.8067$	N/m	W_{coat}	35.23
Concrete weight per meter	$W_{conc} = M_{conc} \times 9.8067$	N/m	W_{conc}	944.70
Fluida Weight per Meter	$W_{fluida} = M_{fluida} \times 9.8067$	N/m	W_{fluida}	11.48
Bouyancy Force per Meter	$W_{bouy} = M_{bouy} \times 9.8067$	N/m	W_{bouy}	725.05
Berat Pipa yang Terendam	$W_{sub} = W_{pipa} + W_{coat} + W_{conc} + W_{fluida} - W_{bouy}$	N/m	W_{sub}	900.22

Dari perhitungan diatas didapatkan berat pipa yang terendam sebesar

900.22 N/m.

4.4 Analisis Kecepatan Partikel Air

4.4.1 Perhitungan Kecepatan Arus Akibat Gelombang

Kecepatan arus akibat gelombang dapat dicari dengan mengolah data gelombang menggunakan *spectrum* gelombang. Spektrum gelombang yang digunakan adalah spektrum JONSWAP, karena pipa yang dianalisis berada pada perairan Indonesia yang merupakan perairan tertutup (kepulauan) yang sesuai dengan spektrum gelombang JONSWAP. Berdasarkan data gelombang yang diberikan, dimana untuk data gelombang 1 tahunan, nilai tinggi gelombangnya (H) adalah 2.74 m dengan periode (T) 7.10 s serta kedalaman (d) sebesar 38.1 m.

Data gelombang yang telah diberikan, diolah untuk mencari parameter-parameter spektrum JONSWAP yang ditampilkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 17 Parameter JONSWAP

Parameter JONSWAP			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	2.74	m
Periode Gelombang Signifikan	T_s	5.42	s
Frekuensi Gelombang Signifikan	ω_s	1.16	rad/s
Periode Puncak Gelombang	T_p	7.10	s
Frekuensi Puncak Gelombang	ω_p	0.88	rad/s
Fungsi Distribusi	φ	4.29	
Peakness Parameter	γ	2.26	
Konstanta Generalized Phillips	α	0.01	

Langkah selanjutnya adalah menentukan angka gelombang, angka gelombang merupakan salah satu variabel yang digunakan untuk mentransformasikan gelombang permukaan ke gelombang di elevasi pipa. Angka gelombang dihitung dengan melakukan iterasi dan didapatkan nilai angka gelombang **0.08019**.

Setelah angka gelombang diperoleh, selanjutnya adalah menghitung spektrum gelombang dan transformasi gelombang. Setelah itu, menentukan momen spektrum dengan metode Simpson 1. Setelah itu didapat nilai kecepatan arus akibat gelombang pada kedalaman pipa.

Kemudian kecepatan arus tersebut, diolah menggunakan persamaan untuk mempertimbangkan efek arah datang arus. Terdapat grafik untuk mendapatkan variabel *reduction factor*. Untuk metode perhitungan kecepatan arus akibat gelombang dicantumkan dalam lampiran. Hasil kecepatan arus akibat gelombang dilampirkan dalam Tabel 4.18.

Tabel 4. 18 Perhitungan Hasil Kecepatan Arus akibat Gelombang

Perhitungan Kecepatan Arus akibat Gelombang			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Kecepatan Partikel Air Signifikan	U_s	0.15	m/s
Mean Zero-Up Crossing Period	T_u	4.41	s
Reduction Factor	R_D	0.95	-
Kecepatan Partikel Air akibat Gelombang	U_w	0.14	m/s
Periode Natural Gelombang	T_n	1.97	s
Osilasi Gelombang	τ	2449.29	

4.4.2 Perhitungan Kecepatan Arus pada Pipa

Arus yang dianalisis adalah arus yang arahnya tegak lurus dengan pipa (sudut 90°), karena arah tersebut memiliki pengaruh beban arus yang paling besar dibandingkan dengan arah yang lain. Dalam tugas akhir ini, data dari kecepatan arus telah diberikan dimana kecepatan tersebut diberikan berdasarkan persentasi 0-100 persen kedalaman dengan skala 10. Namun posisi dari pipa itu sendiri tidak berada tepat pada *seabed*, sehingga berada diantara persentase kedalaman 90 hingga 100 persen. Sehingga, untuk mendapatkan kecepatan arus yang tepat mengenai pipa, kita harus melakukan interpolasi. Perlu diketahui bahwa posisi *pipelines* berada pada kedalaman

yaitu : kedalaman pipa = kedalaman laut – (jari-jari luar pipa + gap) = 38.10 m – (0.1515 m + 1 m) = 36.9485 m. Kemudian nilai tersebut dikonversi menjadi persentase dengan cara : (kedalaman pipa : kedalaman air) x 100 persen = (36.9485 : 38.10) x 100% = 96.98%. Berikut ini adalah langkah pengerjaan untuk menentukan kecepatan arus *outer zone* pada kedalaman pipa menggunakan teori interpolasi pada Tabel 4.19.

Tabel 4. 19 Perhitungan Kecepatan Arus *Outer Zone*

$x_1 =$	90%	$y_1 =$	0.518 m/s	(kecepatan pada 90%)
$x_2 =$	96.98%	$y_3 =$	0.305 m/s	(kecepatan pada 100%)
$x_3 =$	100%			
$y_2 =$	$\frac{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1)} + y_1$		$y_2 =$	0.369 m/s

Berdasarkan perhitungan diatas, didapatkan kecepatan arus pada kedalaman pipa 36.9485 m yaitu 0.3694 m/s. Perlu diketahui, bahwa nilai kecepatan ini masih berupa nilai kecepatan arus yang dihitung dari permukaan laut *outer zone*, sedangkan aliran arus yang memiliki pengaruh besar terhadap *free span* adalah aliran yang berada pada *inner zone* yang juga telah mempertimbangkan tingkat kekasaran dari *seabed*. Maka dari itu, kecepatan arus pada *inner zone* sesuai Tabel 4.20 berikut.

Tabel 4. 20 Perhitungan Kecepatan Arus *Inner Zone*

$U(z) = U(z_r) \cdot R_c \cdot \frac{(\ln(z) - \ln(z_o))}{(\ln(z_r) - \ln(z_o))}$		$U(z) =$	0.288 m/s
$U(z_r)$:	kecepatan arus yang dihitung dari permukaan laut sampai kedalaman pipa.		
$U(z_r)$:	0.369 m/s		
(z_o) :	parameter kekasaran seabed (m) =	5.E-06	
(z_r) :	ketinggian yang dihitung dari permukaan air hingga ke pipa (m)		36.95
(z) :	ketinggian yang dihitung dari dasar laut hingga ke pipa (m) =		1.15
(R_c) :	reduction factor =	$(R_c) = \sin(\theta_{curr})$	1
θ_{curr} :	sudut datang arus terhadap freespan =		90°

Berdasarkan perhitungan di atas, nilai dari parameter kekasaran *seabed* didapatkan dari tabel parameter kekerasan *seabed* yang ada di DNV-RP-F105, yaitu untuk tipe tanah *slit* atau *clay*, nilai Z_o adalah sebesar $5 \cdot 10^{-6}$ m. Didapatkan nilai kecepatan arus pada *inner zone* adalah **0.288 m/s** dan kecepatan arus akibat gelombang adalah **0.138 m/s**.

4.5 Analisis Gaya Hidrodinamis

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

4.5.1 Perhitungan Gaya Drag

Gaya *drag* pada analisis bentangan bebas mempengaruhi besar defleksi yang terjadi pada pipa. Dari data awal telah diketahui koefisien *drag*, dan untuk kecepatan total dari partikel air didapatkan dari penjumlahan kecepatan arus dengan kecepatan arus akibat gelombang ($0.2884 + 0.138 = 0.4264$ m/s). Hasil perhitungan gaya *drag* sesuai dengan Tabel 4.21 berikut.

Tabel 4. 21 Perhitungan Gaya Drag

Parameter	Persamaan	Nilai	Satuan
Drag Force	$F_D = C_D \times \frac{1}{2} \times \rho_{seawater} \times D \times U^2$	29.70	N/m

4.5.2 Perhitungan Gaya Lift

Gaya *lift* atau angkat pada pipa muncul karena adanya aliran yang bekerja pada pipa. Koefisien *lift* dan kecepatan total telah diketahui, maka untuk perhitungan gaya *lift* sesuai dengan Tabel 4.22 berikut.

Tabel 4. 22 Perhitungan Gaya Lift

Parameter	Persamaan	Nilai	Satuan
Lift Force	$F_L = C_L \times \frac{1}{2} \times \rho_{seawater} \times D \times U^2$	28.28	N/m

4.5.3 Perhitungan Gaya Hidrodinamis

Gaya Hidrodinamis Total yang digunakan merupakan hasil penjumlahan dari Gaya *Drag* dan Gaya *Lift*. Nilai Gaya hidrodinamis total ditampilkan pada Tabel 4.23.

Tabel 4. 23 Perhitungan Gaya Hidrodinamis Total

Parameter	Persamaan	Nilai	Satuan
Gaya Hidrodinamis Total	$F_{tot} = F_D + F_L$	57.98	N/m

4.6 Perhitungan Tegangan Ekuivalen (*von Mises*)

4.6.1 Perhitungan *Hoop Stress*

Analisis *Hoop stress* pada pipa dianalisis berdasarkan ASME B31.8 dan API 5L 2000. Pada Tabel 4.24 merupakan parameter yang digunakan untuk analisis perhitungan tegangan *Hoop*.

Tabel 4. 24 Parameter untuk Perhitungan Tegangan *Hoop*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter luar pipa baja	D_0	0.303	m
Tebal nominal dinding pipa	t_{nom}	0.0127	m
<i>Mill Tolerance</i>	t_{mill}	0.0015875	m
Tebal dinding pipa	t	0.0081125	m
Tekanan eksternal	P_e	4.90E+05	Pa
Tekanan internal	P_i	6.60E+06	Pa
Rasio ukuran pipa	D/t	37	-

Data parameter diatas lalu diolah berdasarkan persamaan *hoop stress*, sehingga didapatkan nilai *Hoop Stress* pada pipa sesuai Tabel 4.25.

Tabel 4. 25 Perhitungan Tegangan *Hoop*

TEGANGAN HOOP			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tegangan <i>hoop</i>	σ_h	72887007.87	Pa
		72.89	MPa

Dari hasil perhitungan tegangan *hoop* yang didapatkan, hasil perhitungan tersebut kemudian dicek dengan parameter ASME B31.8. Tabel 4.26 merupakan perhitungan cek ASME B31.8.

Tabel 4. 26 Perhitungan Cek Batas Izin *Hoop Stress*

<i>Hoop Stress</i> (MPa)	Cek ASME (0.72xSMYS) (MPa)	Rasio
72.89	259.20	0.28
OK		

Hasil dari analisis, *hoop stress* pada pipa masih memenuhi batas yang ditentukan oleh ASME B31.8.

4.6.2 Perhitungan *Longitudinal Stress*

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

Tegangan longitudinal kemudian dapat dihitung dengan menjumlahkan tegangan aksial kombinasi dan tegangan *bending*. Hasil tegangan longitudinal yang digunakan adalah nilai terbesar dari penjumlahan aksial kombinasi dan tegangan *bending*. Setelah diperoleh, kembali dilakukan pengecekan hasil dengan *Allowable Stress* yang ada pada ASME B31.8. Semua langkah perhitungan, parameter yang dibutuhkan, dan pengecekan *allowable stress* untuk Tegangan *longitudinal* ditampilkan pada Tabel 4.27-4.28 berikut.

Tabel 4. 27 Parameter untuk Perhitungan *Longitudinal Stress*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tebal dinding pipa	t	0.0081125	m
Diameter luar pipa baja	D ₀	0.303	m
Diameter dalam pipa	D _i	0.287	m
Luas penampang pipa	A _{st}	0.008	m ²
Tekanan internal	P _i	6600000	Pa
Gaya tekanan internal	F _{pi}	49602.65	N
Berat terendam pipa	W _{sub}	10802.62	N
Lift Force	F _L	339.38	N

Tabel 4. 28 Perhitungan *Longitudinal Stress*

TEGANGAN LONGITUDINAL								
Panjang Span Aktual	Tegangan				Longitudinal Maksimum	0.8 SMYS	Cek Asme B31.8	Rasio
	Aksial Kombinasi	Bending	Longitudinal					
m	MPa	MPa	MPa	MPa	Mpa	MPa		
12.00	68.98	20.03	89.01	48.96	89.01	288.00	OK	0.31

Hasil perhitungan tegangan longitudinal pada aktual *span crossing pipeline* yang ada masih memenuhi batas aman kriteria yang ditentukan oleh ASME B31.8.

4.6.3 Perhitungan *von Mises Stress*

Setelah nilai tegangan *Hoop Stress* dan Tegangan *Longitudinal* didapat, tegangan *von mises* dapat ditentukan. Nilai hasil perhitungan *Von Mises Stress* dan pengecekan hasilnya terhadap ASME B31.8 ditampilkan pada Tabel 4.29 berikut.

Tabel 4. 29 Perhitungan *von Mises Stress*

Panjang Bentangan Bebas	TEGANGAN			0.9 SMYS	Cek ASME B31.8	RASIO
	<i>Hoop</i>	Longitudinal	<i>Von Mises</i>			
m	MPa	Mpa	MPa			
12.00	72.89	89.01	82.15	324.00	OK	0.25

Dari hasil validasi diatas, nilai tegangan *von mises* pada aktual *span* yang ada masih memenuhi *Allowable Stress* yang ditetapkan oleh ASME B31.8.

4.7 Pemodelan Bentangan Bebas di ANSYS

Pemodelan bentangan bebas yang dilakukan yaitu pemodelan bentangan bebas pada bagian struktur pipa yang ditinjau (lokasi *crossing pipelines*) dengan panjang *actual span* sebesar 12 m dan gap sebesar 1 m. Tujuan dari pemodelan ini yaitu untuk melihat *vortex pressure* yang terjadi pada pipa dan sebagai validasi perhitungan tegangan *von Mises* analitis dengan numeris yang dilakukan pada *software* ANSYS.

Langkah pengerjaan pemodelan bentang bebas ini yaitu:

1. Pemodelan bentang bebas pada *software* ANSYS CFX (*Computational Fluid Dynamic*). Pemodelan pada ANSYS CFX dilakukan untuk melihat pola aliran fluida yang mengenai pipa. Pemodelan fluida dilakukan untuk mendapatkan nilai *pressure* akibat adanya VIV dan arus terhadap pipa (*vortex pressure*) dimana *output* nilai *vortex pressure* tersebut akan menjadi *input* nilai pada langkah berikutnya.
2. Pemodelan tegangan akibat bentang bebas pada pipa. Untuk mencari nilai tegangan maksimum *von-Mises* pada pipa, digunakan *software* ANSYS *Static Structural*. *Input* pada *software* ANSYS *Static*

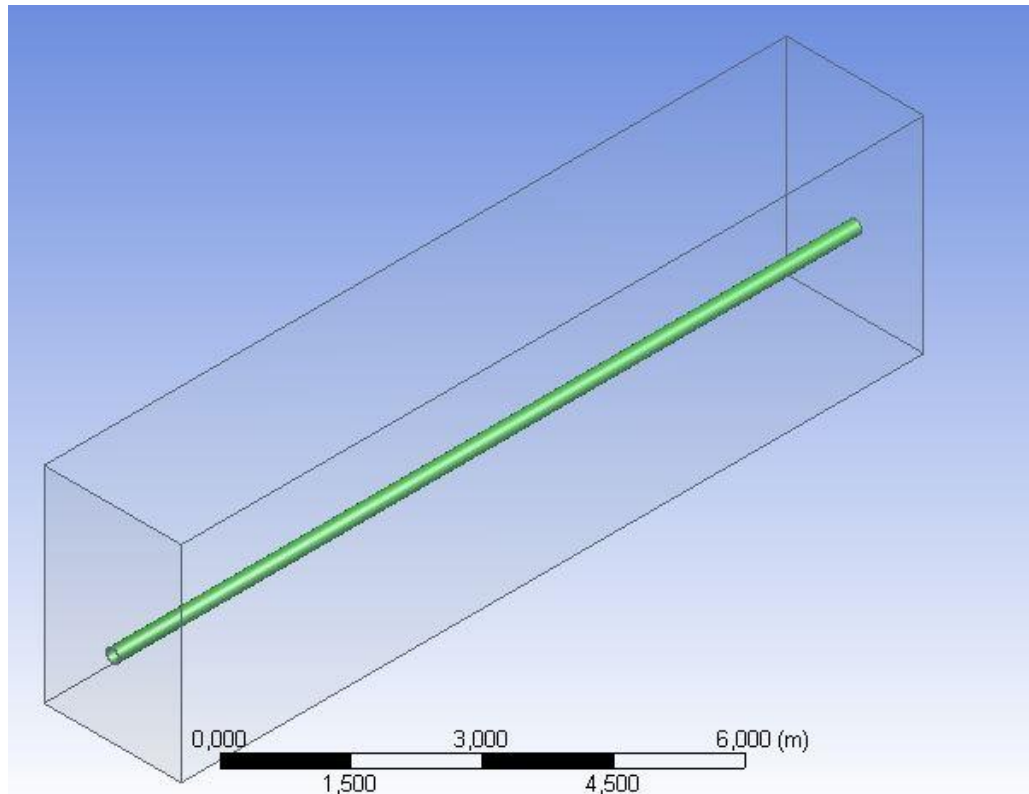
Structural yaitu berupa gaya-gaya yang bekerja pada pipa serta tekanan yang terjadi pada pipa. *Output* dari ANSYS CFX yang berupa *vortex pressure* kemudian dimasukkan pada ANSYS Static Structural sebagai *input* dari VIV yang terjadi.

3. Setelah nilai tegangan maksimum *von Mises* didapatkan, diperlukan *meshing sensitivity* untuk mendapatkan nilai *meshing* yang tepat sehingga *meshing* tersebut tidak mempengaruhi nilai *output* tegangan yang dihasilkan.
4. Validasi tegangan maksimum. Nilai tegangan maksimum *von-Mises* yang didapatkan pada *software* ANSYS *Static Structural* selanjutnya divalidasi dengan tegangan *von Mises* hasil perhitungan analitis. Dari validasi ini maka akan didapatkan nilai *error* dari kedua perhitungan.

4.7.1 Pemodelan Aliran pada ANSYS CFX

Langkah Pengerjaan untuk pemodelan aliran pada ANSYS CFX sebagai berikut :

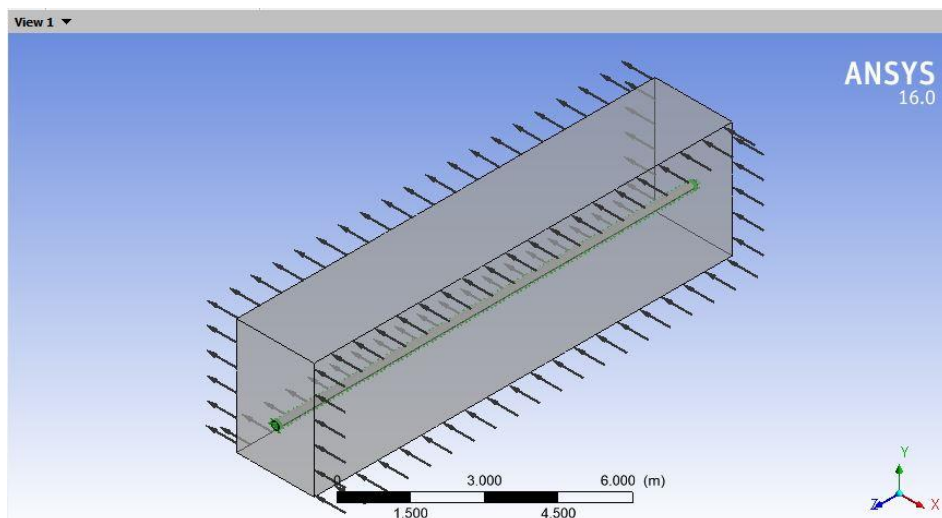
1. Menggambarkan geometri permodelan *free span* yang ditinjau. Permodelan yang sebelumnya telah dilakukan di *software* SOLIDWORK di *convert* ke dalam CFX lalu dilakukan *meshing*. *Meshing* adalah diskritisasi dari elemen dan merupakan bagian terpenting dari ANSYS. Adapun variable geometri yang digunakan adalah diameter terluar pipa dan panjang dari *free span*. Dalam tugas akhir ini, nilai panjang dari *free span* adalah 12 m dengan diameter 0,303 m dan *gap* sebesar 1 m. Gambar pemodelan ditampilkan pada Gambar 4.3 berikut:



Gambar 4. 3 Pemodelan Bentang Bebas pada ANSYS CFX

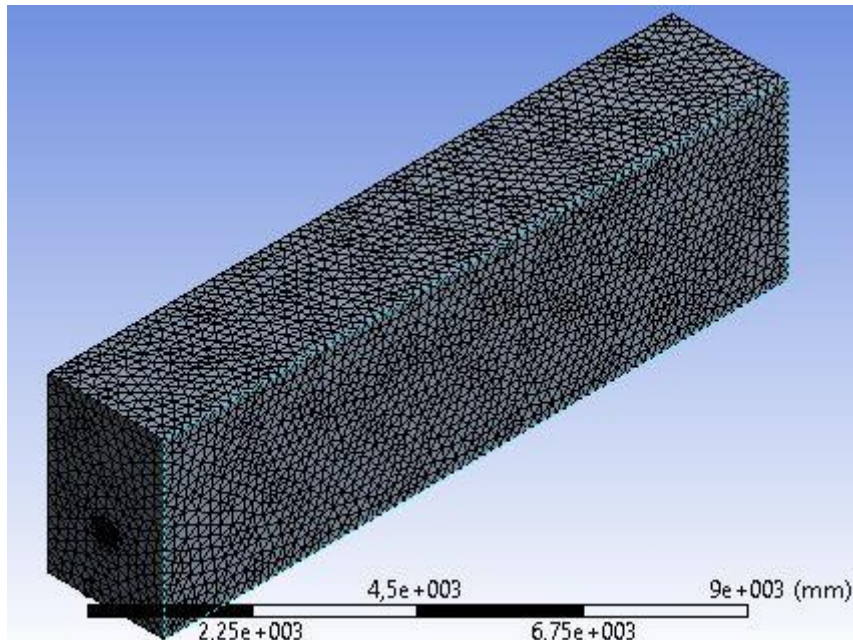
Pemodelan di atas merupakan hasil dari SOLIDWORK yang di *convert* ke dalam ANSYS CFX. Untuk balok merupakan *domain* arus laut, dan model silinder merupakan model pipa dari *free span* yang ditinjau.

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



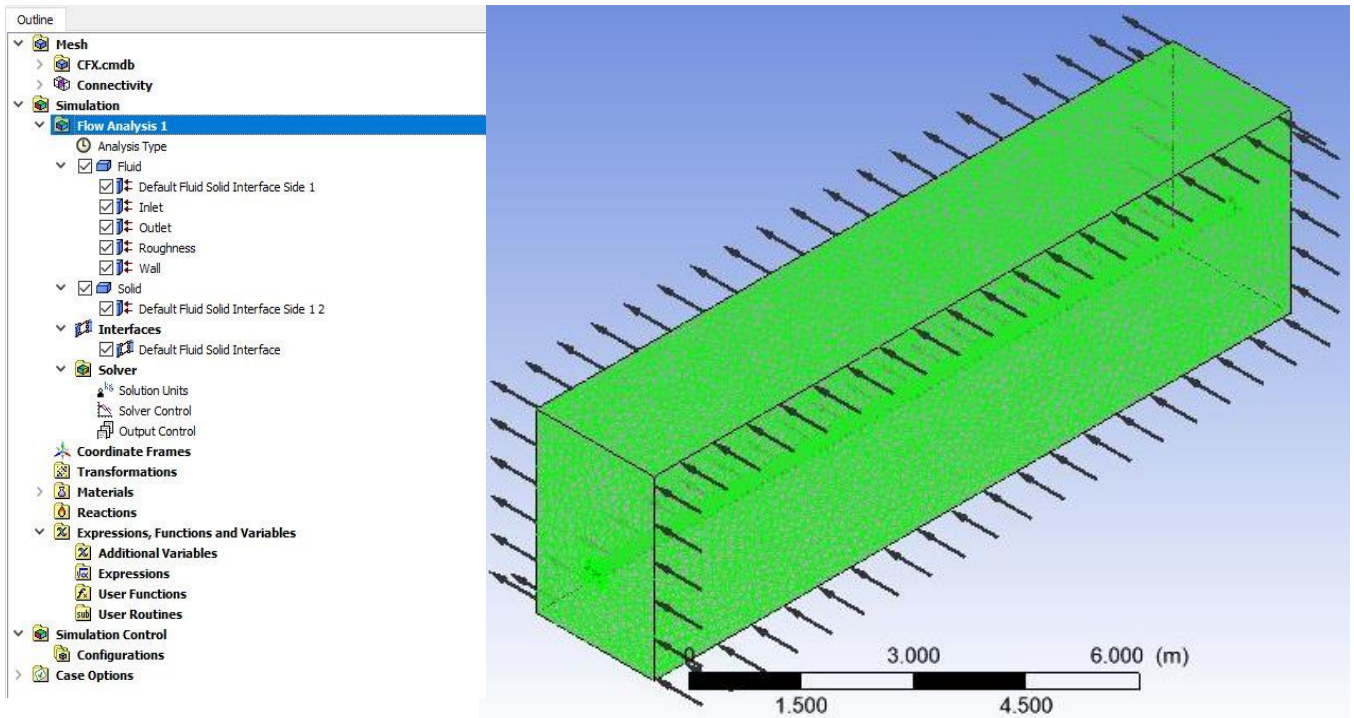
Gambar 4. 4 Model Aliran Arus pada Bentang Bebas

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



Gambar 4. 5 Bentuk *Meshing* pada Pemodelan

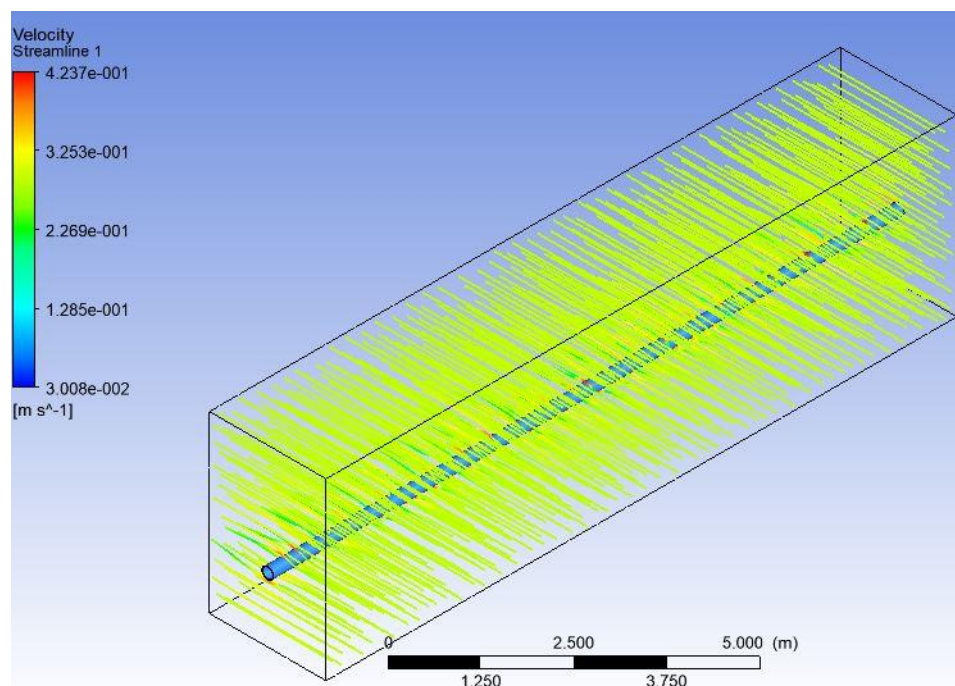
- Langkah berikutnya adalah pemberian batas – batas analisis pada model geometri. Untuk kondisi batas *inlet* diberikan nilai kecepatan arus sebesar 0,426 m/s (kondisi ekstrem), sedangkan *output* diberi luaran *pressure* 0 MPa. Hal ini dimaksudkan untuk melihat *pressure* yang terjadi pada pipa. Sedangkan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



Gambar 4. 6 *Setup* untuk Pemodelan ANSYS CFX

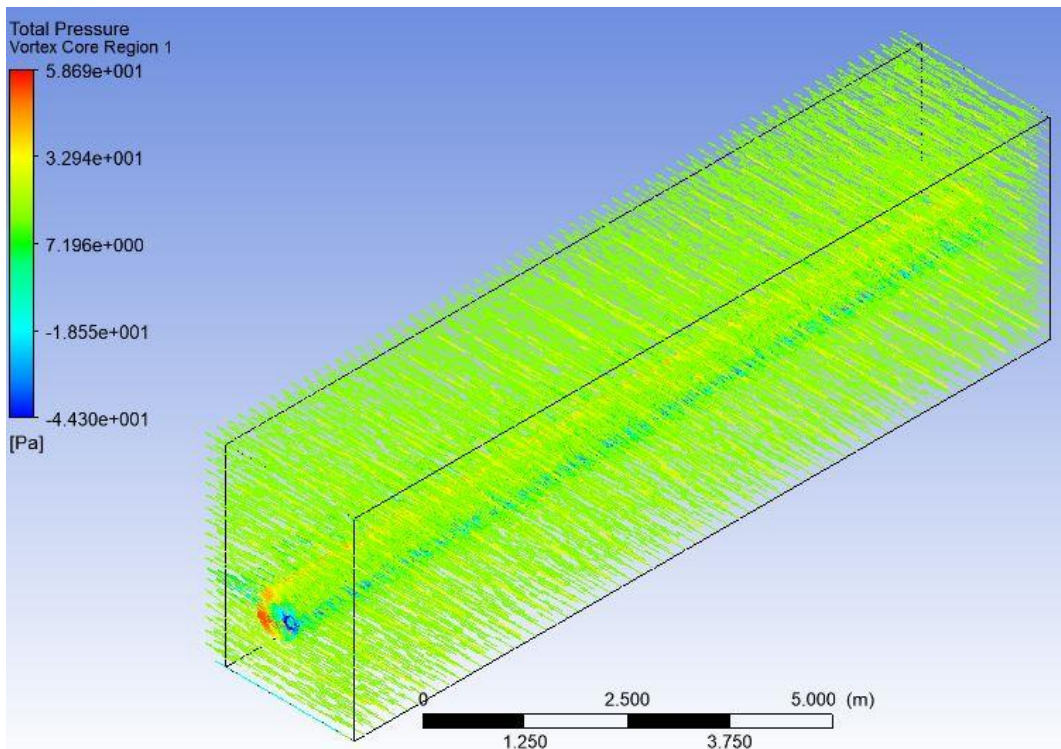
4.7.2 Hasil Pemodelan ANSYS CFX

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



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

Arah aliran yang menabrak *free span* ini berbentuk *streamline* sesuai bentuk geometri pipa. Tetapi untuk daerah di belakang arus mengalami sedikit *vortex*. Adapun hasil *output* dari CFX sebenarnya bermacam – macam, beberapa diantaranya yaitu kecepatan aliran setelah menabrak pipa sebesar 0,4237 m/s maksimum dan 0,03 m/s minimum (dapat dilihat pada Gambar 4.7). Hal itu menandakan terdapat pengurangan kecepatan yang awalnya sebesar 0,426 m/s menjadi 0,424 m/s. Selain itu output nilai *pressure* akibat dari aliran arus yang menabrak (*vortex pressure*) didapatkan sebesar 58,69 Pa (Gambar 4.8). Nilai ini nantinya di *input* kedalam ANSYS *static structural*.



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

4.7.3 Pemodelan Tegangan pada ANSYS *Structural*

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

1. Pemodelan Pipa

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

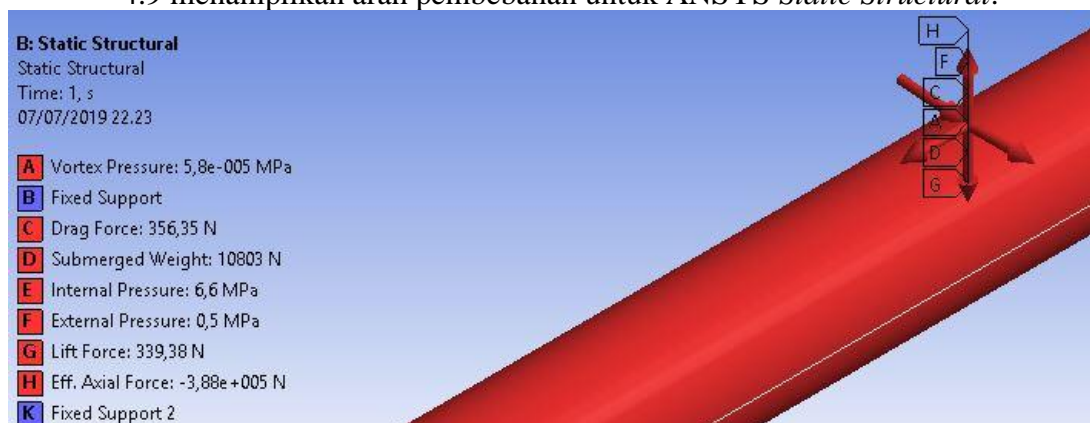
2. Input Force, Pressure dan Support

Beban yang dimasukkan merupakan beban-beban yang mempengaruhi besarnya tegangan ekuivalen dan besarnya didapat dari perhitungan sebelumnya dan hasil *output* dari Ansys CFX. Berikut merupakan Tabel 4.30 dari *input* pembebanan untuk ANSYS *static structural*.

Tabel 4. 30 *Input* untuk ANSYS *Static Structural*

Parameter	Nilai
Vortex Pressure	$5,8 \times 10^{-5}$ MPa
Support	Fixed-Fixed Support
Drag Force	356,35 N
Lift Force	339,38 N
Submerged Weight	10803 N
Effective Axial	388000 N
Internal Pressure	6,60 MPa
External Pressure	0,49 MPa

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

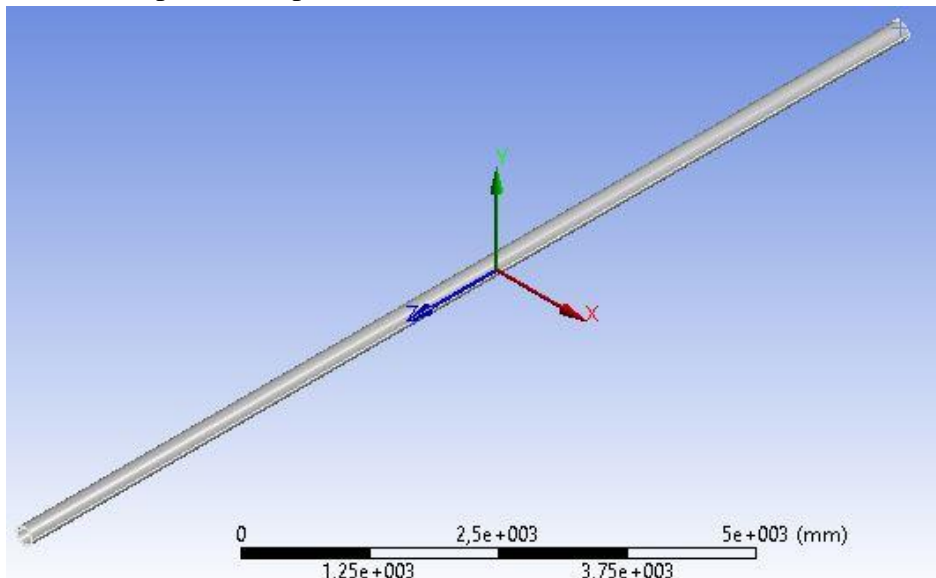


Gambar 4. 9 Arah pembebanan untuk ANSYS *Static Structural*

4.7.4 Meshing Sensitivity

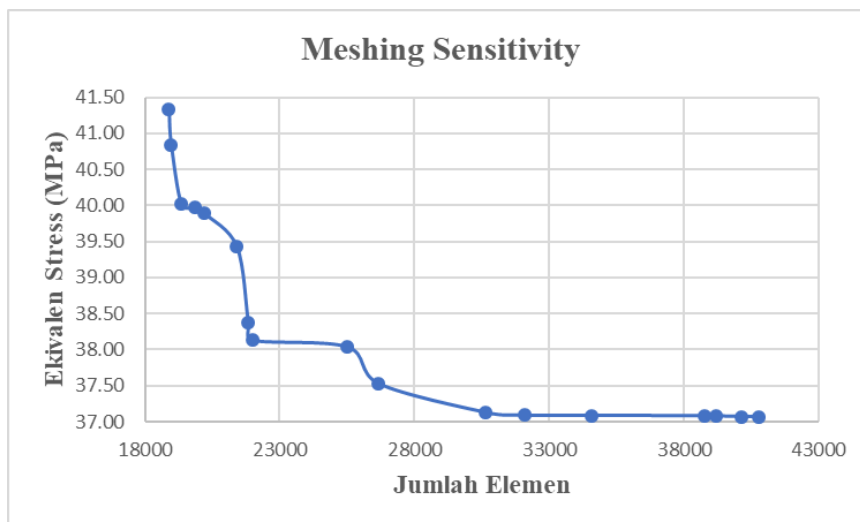
Setelah melakukan *running model*, maka selanjutnya diperlukan analisis *meshing* yang tepat pada struktur pipa tersebut sehingga *meshing* tersebut tidak mempengaruhi nilai *output* tegangan yang dihasilkan.

Dalam melakukan analisa *meshing*, diperlukan pembuatan *probe coordinat* agar nilai tegangan yang ditinjau hanya pada titik *probe* tersebut. Untuk *probe coordinat*, dalam Tugas Akhir ini diletakkan tepat ditengah pipa tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.10 berikut.



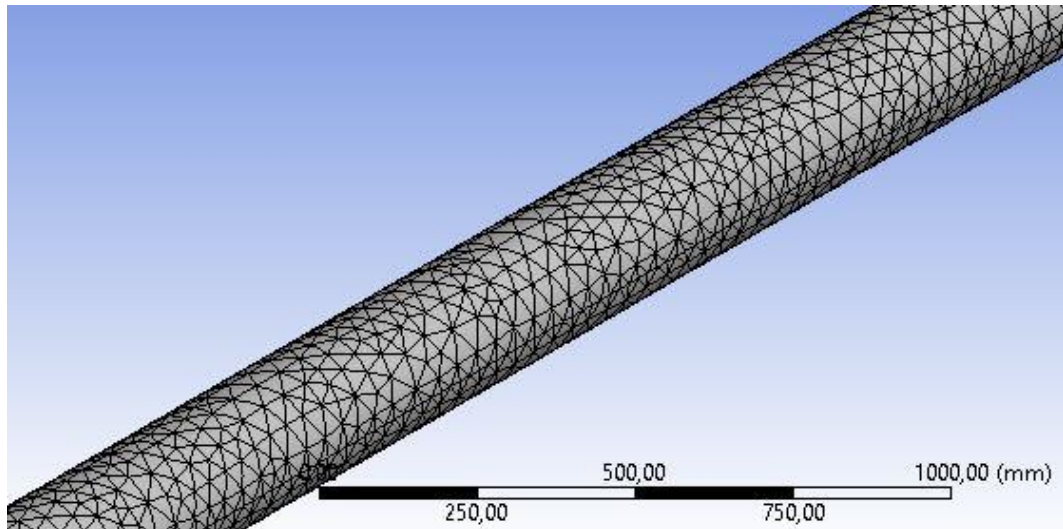
Gambar 4. 10 Letak *Probe Coordinate* pada Pipa

Setelah itu, maka dilakukan *running* berkali-kali sampai menemukan jumlah elemen yang sesuai. Berikut merupakan grafik perbandingan jumlah elemen dengan *ekuivalen stress* pada *probe coordinat* pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Grafik *Meshing Sensitivity*

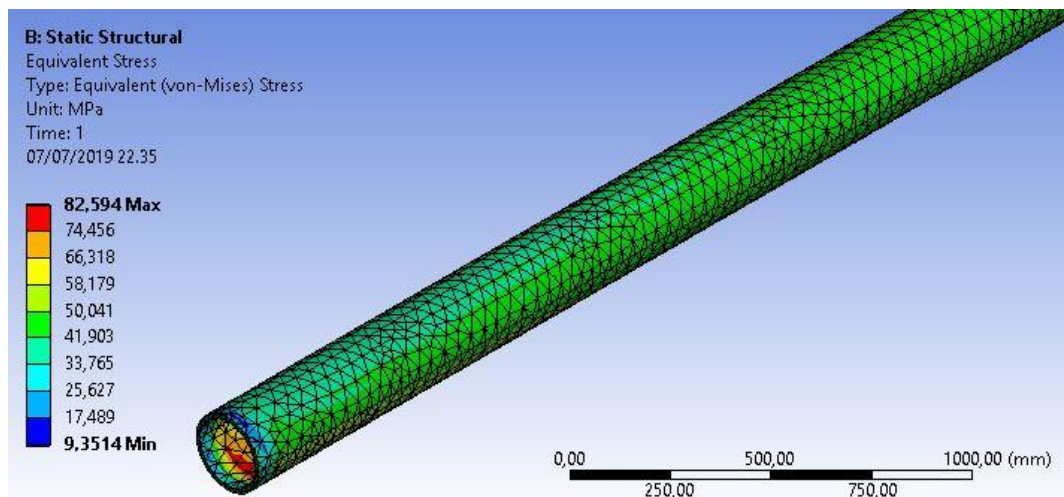
Dari grafik tersebut kita dapatkan nilai *meshing* yang tidak mempengaruhi *output* dari *software* Ansys tersebut yaitu dengan jumlah elemen sebanyak 38777 elemen dengan element size sebesar 21 mm. Untuk gambar *meshing* pada struktur pipa, dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 12 Meshing pada Pipa

4.7.5 Hasil Pemodelan Tegangan

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



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

4.7.6 Validasi nilai Tegangan *von Mises*

Setelah didapatkan *output* nilai tegangan *von Mises* dari software ANSYS *Static Structural*, maka selanjutnya melakukan validasi nilai *output* tersebut dengan nilai tegangan hasil analitis. Perhatikan Tabel 4.31 untuk melihat hasil validasi tersebut.

Tabel 4. 31 Validasi *Equivalent Stress*

VALIDASI EQUIVALENT STRESS			
Perhitungan	Nilai	Satuan	Error (%)
Manual (DNV dan ASME)	82.15	MPa	0.54
Permodelan (Ansys Static Structural)	82.59	MPa	

4.8 Perhitungan Panjang *Allowable Span* Statik

Berdasarkan perbandingan seluruh nilai tegangan dengan *allowable stress* dari ASME B31.8 telah didapatkan kesimpulan bahwa seluruh nilai tegangan tidak melebihi nilai kriteria tegangan yang diizinkan sehingga tegangan yang terjadi tidak membuat struktur gagal. Selain itu, setelah mendapatkan hasil validasi perhitungan tegangan maka tegangan hasil analitis yang telah dihitung sebelumnya digunakan untuk melakukan analisis panjang *allowable span statis*. Panjang *allowable span* kondisi *statis* disini yaitu panjang maksimum *span* yang diizinkan sehingga pipa tidak mengalami tegangan leleh atau runtuh yang disebabkan oleh berat pipa dan fluida yang mengalir dalam pipa maupun luar pipa tersebut. Untuk lebih mengetahui bagaimana cara mencari nilai panjang *allowable span statis*, perhatikan Tabel 4.32 berikut.

Tabel 4. 32 Perhitungan Panjang *Allowable Span* Statik

Parameter Perhitungan	Persamaan	Nilai	Satuan
Tegangan Ekvivalen	$\sigma_E = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2}$	82146287.89	N/m ²
Momen Inertia Penampang Pipa	$I_{pipa} = \frac{\pi}{64} \times (OD^4 - (OD - (2 \times t_{nom}))^4)$	4.40E-05	m ⁴
Gaya Drag	$F_D = C_D \times \frac{1}{2} \times \rho_{seawater} \times D \times U^2$	29.70	N/m
Gaya Inertia	$F_I = C_M \times \frac{\pi D^2}{4} \times \rho_{seawater} \times \frac{dU}{dt}$	106.59	N/m
Berat Pipa yang Terendam	$W_{sub} = W_{pipa} + W_{coat} + W_{conc} + W_{fluida} - W_{bouy}$	900.22	N/m
Berat Pipa Terdistribusi Merata	$W_t = \sqrt{W_{sub}^2 + (F_D + F_I)^2}$	910.48	N/m
Panjang Allowable Span Static	$L_{st} = \sqrt{\frac{2 \cdot C \cdot I \cdot \sigma_e}{W_t \cdot D}}$	16.07	m

Dari Tabel 4.32 maka didapatkan bahwa panjang *allowable span* kondisi statis yang didapatkan sebesar 16.074 m. Nilai tersebut melebihi nilai dari panjang *span actual* dari pipa yaitu sebesar 12 m. Maka dapat disimpulkan bahwa *freespan* akibat *crossing pipelines* yang terjadi pada pipa masih dalam batas aman dan tidak mengalami tegangan leleh atau runtuh yang disebabkan oleh berat pipa dan fluida yang mengalir di dalam pipa ataupun luar pipa.

4.9 Penentuan Kriteria Aliran

Dalam melakukan analisa dinamis *free span*, kriteria respon *free span* dan rasio aliran merupakan elemen penting karena merupakan langkah awal dalam melakukan analisis ini. Untuk rasio aliran arus dan kecepatan (α) merupakan faktor yang menentukan dampak aliran terhadap pipa, baik dari arah *in-line* (searah arus) atau arah *cross-flow* (tegak lurus dengan arah arus). Selain itu, rasio aliran (α) juga merupakan salah satu kriteria apakah kita perlu melakukan analisis *fatigue* atau tidak. Sedangkan kriteria respon pipa (L/D) bertujuan juga menjadi salah satu *screening* utama dalam mengetahui respon *free span* berdasarkan panjang aktual *span* (L) dan D (diameter terluar pipa) yang sedang dianalisis.

Untuk Tugas Akhir ini, untuk nilai respon pipa (L/D) terhadap *free span* yaitu sebesar : $L/D = 12 \text{ m} / 0.303 \text{ m} = 39.60$. Dari nilai ini kita dapat mengelompokkan pada kelompok yang kedua berdasarkan tabel klasifikasi respon pipa terhadap *free span* (DNV-RP-F105), yaitu pada kriteria $30 < L/D < 100$ yang mengatakan bahwa panjang *span* dikhususkan untuk kondisi operasi, serta *boundary condition* dan gaya efektif aksial menentukan frekuensi naturalnya, dijelaskan dalam Tabel 4.33 berikut.

Tabel 4. 33 Klasifikasi Respon *Free Span*

L/D	Response description
$L/D < 30$ ¹⁾	<u>Very little dynamic amplification.</u> Normally not required to perform comprehensive fatigue design check. Insignificant dynamic response from environmental loads expected and unlikely to experience VIV.
$30 < L/D < 100$	<u>Response dominated by beam behaviour</u> Typical span length for operating conditions. Natural frequencies sensitive to boundary conditions (and effective axial force).
$100 < L/D < 200$	<u>Response dominated by combined beam and cable behaviour</u> Relevant for free spans at uneven seabed in temporary conditions. Natural frequencies sensitive to boundary conditions, effective axial force (including initial deflection, geometric stiffness) and pipe "feed in".
$L/D > 200$	<u>Response dominated by cable behaviour</u> Relevant for small diameter pipes in temporary conditions. Natural frequencies governed by de-flected shape and effective axial force.

Sedangkan untuk nilai respon aliran arus (α) didapatkan sebesar : $\alpha = U_c / (U_c + U_w) = (0.288 \text{ m/s}) / (0.288 \text{ m/s} + 0.138) = 0.676$. Nilai respon aliran ini masuk dalam kelompok kategori gelombang dominan dan arus diakibatkan oleh gelombang $0.5 < \alpha < 0.8$, dijelaskan dalam Tabel 4.34.

Tabel 4. 34 Klasifikasi Respon Pipa terhadap Aliran Arus

$\alpha < 0.5$	<p>wave dominant - wave superimposed by current. <u>In-line direction:</u> in-line loads may be described according to Morison's formulae, see section 5. In-line VIV due to vortex shedding is negligible. <u>Cross-flow direction:</u> cross-flow loads are mainly due to asymmetric vortex shedding. A response model, see section 4, is recommended.</p>
$0.5 < \alpha < 0.8$	<p>wave dominant – current superimposed by wave <u>In-line direction:</u> in-line loads may be described according to Morison's formulae, see section 5. In-line VIV due to vortex shedding is mitigated due to the presence of waves. <u>Cross-flow direction:</u> cross-flow loads are mainly due to asymmetric vortex shedding and resemble the current dominated situation. A response model, see section 4, is recommended.</p>
$\alpha > 0.8$	<p>current dominant <u>In-line direction:</u> in-line loads comprises the following components : <ul style="list-style-type: none"> • a steady drag dominated component • a oscillatory component due to regular vortex shedding For fatigue analyses a response model applies, see section 4. In-line loads according to Morison's formulae are normally negligible. <u>Cross-flow direction:</u> cross-flow loads are cyclic and due to vortex shedding and resembles the pure current situation. A response model, see section 4, is recommended.</p>

4.10 Perhitungan *Vortex Induced Vibration* (VIV)

Parameter VIV yang digunakan dalam analisis terdiri dari *stability parameter*, *current flow ratio*, bilangan *keulegan carpenter*, *reynolds number* dan *reduced velocity*. Beberapa parameter awal yang digunakan dalam perhitungan parameter VIV disajikan pada Tabel 4.35 berikut.

Tabel 4. 35 Parameter Awal perhitungan Parameter VIV

PARAMETER AWAL			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Soil damping</i>	ζ_{soil}	0.001	-
<i>Hidrodynamic damping</i>	ζ_h	0.00	-
<i>Structural damping</i>	ζ_{str}	0.005	-
Diameter total pipa	D_t	0.303	m
frekuensi gelombang signifikan	ω_s	1.159	rad/s
Viskositas Kinematis Air Laut	ν_k	1.15E-06	m ² /s

Dari parameter diatas, maka untuk parameter-parameter VIV dapat ditentukan nilainya. Parameter VIV *Current Flow Ratio* yaitu parameter yang dapat mempengaruhi bentuk aliran. Parameter ini dapat ditentukan menggunakan persamaan *Current flow ratio* yang telah dijelaskan sebelumnya. Selain itu, Parameter *Keulegan-Carpenter Number* merupakan

parameter yang dapat menentukan perubahan jenis aliran partikel air (laminar/turbulen) pada silinder di bawah air, bersamaan dengan bilang *Reynold* (Re). Bilangan ini dipengaruhi oleh kecepatan arus, frekuensi gelombang dari diameter silinder atau pipa. Hasil perhitungan parameter tersebut dapat dilihat dalam Tabel 4.36 berikut.

Tabel 4. 36 Perhitungan Parameter VIV

Parameter	Persamaan	Nilai	Satuan
Reynolds Number	$Re = \frac{U \times D}{\nu}$	112583.85	-
Keulegan Carpenter	$KC = \frac{Uw}{\omega_s \times D}$	0.40	-
Strouhal Number	$S_t = \left(\frac{0.2}{(C_D)^{3/4}} \right)$	0.19	-
Frekuensi Vortex Shedding	$f_s = S_t \left(\frac{U_{tot}}{D_t} \right)$	0.27	Hz
Current Flow Ratio	$\alpha = \frac{U_{c,100yr}}{U_{w,1yr} + U_{c,100yr}}$	0.68	-
Total Damping Ratio	$\zeta_T = \zeta_{soil} + \zeta_{str} + \zeta_h$	0.006	-
Stability Parameters	$K_S = \frac{4 \times \pi \times M_e \times \zeta_T}{\rho_{seawater} \times D^2}$	0.19	-
Stability Parameters Factor	$K_{sd} = \frac{K_S}{\gamma_k}$	0.15	-

4.11 Perhitungan Panjang *Effective Span*

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

4.11.1 *Boundary Condition*

Sebelum Panjang *Span* Efektif, *Effective Axial Force*, *Critical Buckling Load* dan *Static Deflection* dihitung asumsi tumpuan bentangan bebas perlu ditentukan terlebih dahulu. Asumsi tumpuan yang efektif digunakan untuk kasus bentangan bebas ini adalah *fixed-fixed*. Nilai koefisien *boundary condition* dari *fixed-fixed span* menurut DNV GL RP F- 105 yang dijelaskan kembali dalam Tabel 4.37.

Tabel 4. 37 Boundary Condition

	<i>Pinned-pinned</i> ⁽²⁾	<i>Fixed-fixed</i> ⁽³⁾	<i>Single Span on seabed</i>
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	<i>Shoulder:</i> $\frac{1}{18 (L_{eff}/L)^2 - 6}$ <i>Midspan:</i> 8.6
C ₅	1/8	1/12	<i>Shoulder</i> ⁽⁴⁾ : 14.1 (L/L _{eff}) ² <i>Midspan:</i> 8.6
C ₆	5/384	1/384	1/384
1) Note that C ₃ = 0 is normally assumed for in-line direction if the steady current is not accounted for. 2) For pinned-pinned boundary condition L _{eff} shall be replaced by L in all expressions, including the expression for P _{cr} . 3) For fixed-fixed boundary conditions, L _{eff} /L = 1 per definition. 4) C ₅ shall be calculated using the static soil stiffness in the L _{eff} /L calculation.			

4.11.2 Perhitungan Concrete Stiffness Factor

Concrete stiffness factor menunjukkan kekakuan selimut beton relatif terhadap kekakuan pipa baja. Perhitungan *concrete stiffness factor* merupakan perhitungan faktor kekakuan dari *concrete* yang dipengaruhi oleh momen inersia pipa dan momen inersia dari *concrete* itu sendiri. Detail dari perhitungan CSF disajikan dalam Tabel 4.38 berikut.

Tabel 4. 38 Perhitungan Concrete Stiffness Factor

Concrete Stiffness Calculation	Persamaan	Satuan	Simbol	Nilai
Moment Inersia of Pipe	$I_{pipa} = \frac{\pi}{64} x (OD^4 - (OD - (2 x t_{nom}))^4)$	m ⁴	I _{pipa}	4.40E-05
Moment Inersia of Concrete	$I_{conc} = \frac{\pi}{64} x (OD^4 - (OD - (2 x t_{conc}))^4)$	m ⁴	I _{conc}	9.24E-05
Concrete Stiffness Enhancement Factor	$CSF = 0.25 x \left(\frac{E_{conc} x I_{conc}}{E_{pipa} x I_{pipa}} \right)^{0.75}$		CSF	1.00E-01

4.11.3 Perhitungan Dynamic Soil Stiffness

Panjang efektif bentangan bebas pipa dapat mempengaruhi frekuensi natural pipa terutama bentangan bebas pipa yang diasumsikan dengan tumpuan *span on seabed* dan *fixed-fixed*. Nilai panjang *free span* efektif juga bergantung pada nilai *Relative Soil Stiffness Number*. Tabel 4.39 dibawah

ini merupakan parameter perhitungan *dynamic soil stiffness* untuk mengetahui besar gaya dari interaksi tanah dengan pipa.

Tabel 4. 39 Parameter *Dynamic Soil Stiffness*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien <i>dynamic soil stiffness</i> vertikal	C_v	600000	$N/m^{5/2}$
Koefisien <i>dynamic soil stiffness</i> horizontal	C_L	500000	$kN/m^{5/2}$
<i>Poisson ratio</i> tanah vertical/horizontal (corroded)	v_{soil}	0.45	-
Massa pipa di udara	m_{str}	164.50	kg/m
Massa air yang dipindahkan	m_{bouy}	73.91	kg/m

Untuk mengetahui besar gaya interaksi tanah dengan pipa maka dilakukan perhitungan untuk menghitung gaya kekakuan dari tanah itu sendiri yang mana hasil dari perhitungan tersebut akan digunakan untuk menentukan panjang *span* efektif dari *actual span* yang terjadi. Tabel 4.40 dibawah ini menampilkan perhitungan kekakuan tanah dinamis untuk pipa yang berinteraksi dengan tumpuan yang berupa *fixed-fixed*.

Tabel 4. 40 Perhitungan *Dynamic Soil Stiffness*

<i>Dynamic Soil Stiffness</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Rasio Massa Spesifik	M_{ratio}	2.23	-
<i>Dynamic soil stiffness</i> vertikal	K_v	2180	kN/m^2
<i>Dynamic soil stiffness</i> horizontal	K_L	1160	kN/m^2

4.11.4 Perhitungan Panjang *Effective Span* (*actual span* 12 m)

Dalam DNV RP F105 apabila tumpuan *fixed-fixed* maka nilai $L_{eff}/L = 1$ sehingga nilai panjang *effective span* sama dengan nilai *actual span* sebesar 12 m. Tabel 4.41 berikut menampilkan perhitungan panjang *effective span* untuk *actual span* 12 m.

Tabel 4. 41 Perhitungan Panjang *Effective Span* (*actual span* 12 m)

Cross-Flow			In-Line		
Panjang <i>span</i>	L_{eff}/L	Panjang <i>span</i> Efektif	Panjang <i>span</i>	L_{eff}/L	Panjang <i>span</i> Efektif
m		m	m		m
12.00	1.00	12.00	12	1.00	12.00

4.12 Perhitungan Frekuensi Natural

Dalam persamaan perhitungan frekuensi natural, terlebih dahulu diperlukan perhitungan lain seperti perhitungan *correction factor*, *static deflection*, *effective axial force*, dan *critical buckling load*.

4.12.1 Perhitungan *Correction Factor*

Perhitungan faktor koreksi diperlukan karena variabel di dalamnya memiliki pengaruh dalam respon model untuk arah *cross-flow*. Karena *reduced velocity* untuk arah *cross-flow* lebih dipengaruhi oleh *gap* dan parameter stabilitas. Detail dari perhitungan *correction factor* disajikan dalam Tabel 4.42 berikut.

Tabel 4. 42 Perhitungan *Correction Factor*

Correction Factor Calculation	Persamaan	Satuan	Simbol	Nilai
Seabed Correction Factor	$\psi_{proxionset} = \begin{cases} \frac{1}{4}x \left(3 + \left(1.25x \frac{e}{D} \right) \right); \text{ untuk } \frac{e}{D} < 0.8 \\ 1; \text{ untuk } \frac{e}{D} \geq 0.8 \end{cases}$		$\psi_{proxionset}$	1
Mass Correction Factor	$\psi_{massonset} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{3}xM_{ratio}; \text{ untuk } M_{ratio} < 1.5 \\ 1; \text{ untuk } M_{ratio} \geq 1.5 \end{cases}$		$\psi_{massonset}$	1
Current Correction Factor	$\psi_{\alpha onset} = \begin{cases} 1 + \frac{\alpha}{3}; \text{ untuk } \alpha < 1.5 \\ 1.167; \text{ untuk } \alpha \geq 1.5 \end{cases}$		$\psi_{\alpha onset}$	1.225

4.12.2 Perhitungan *Effective Axial Force*

Effective axial force dapat mempengaruhi besar frekuensi pipa bawah laut. Parameter yang digunakan untuk perhitungan ini dijelaskan pada Tabel 4.43 dan Tabel 4.44.

Tabel 4. 43 Parameter Perhitungan *Effective Axial Force*

Parameter Perhitungan <i>Effective Axial Force</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Perbedaan Tekanan	ΔP	2.0E x 10 ⁶	Pa
<i>Poisson's Ratio</i> Baja	v	0.3	-
Diameter Dalam Pipa	D _i	0.1936	m
Luas Penampang Internal Pipa Baja	A _i	0.029	m ²
Luas Penampang Pipa Baja	A _{st}	0.0082	m ²
Koefisien <i>Thermal Expansion</i>	α_e	1.10 x 10 ⁻⁵	/ ^o C
Temperatur Operasi	T ₁	43.33	^o C
Temperatur Air Laut	T ₀	26.66	^o C

Tabel 4. 44 Perhitungan Perbedaan Tekanan

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas air laut	ρ_w	1025	kg/m ³
Tekanan Internal Desain	P_i	6.55	MPa
Tekanan eksternal	P_e	4.55	MPa
Perbedaan tekanan	ΔP	2.00×10^6	Pa

Perhitungan *effective axial force* juga menambahkan parameter perbedaan tekanan (P) yang merupakan pengurangan antara tekanan internal pipa dan tekanan di luar pipa yang berupa tekanan hidrostatik. Perbedaan tekanan dihitung sehingga menghasilkan nilai P sesuai dengan Tabel 4.44. Dari parameter yang telah ditentukan di atas diperoleh hasil *effective axial force* sebesar **-3.88E+05 Newton**.

4.12.3 Perhitungan *Critical Buckling Load*

Critical Buckling Load merupakan faktor yang mempengaruhi frekuensi natural pipa bawah laut. Perhitungan beban *buckling* kritis juga untuk menentukan berapa besar gaya untuk terjadinya *buckling* dari pipa itu sendiri berdasarkan panjang *span* yang ditinjau. Selain panjang bentangan efektif, beberapa parameter yang digunakan untuk perhitungan *critical buckling load* ditampilkan dalam Tabel 4.45.

Tabel 4. 45 Parameter Perhitungan *Critical Buckling Load*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Concrete stiffness factor</i>	CSF	0.10	-
Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	4.40×10^{-5}	m ⁴

Nilai *Critical Buckling Load* untuk arah *in-line* dan *cross-flow* ditampilkan pada Tabel 4.46.

Tabel 4. 46 Nilai *Critical Buckling Load*

<i>Cross-Flow</i>			<i>In-Line</i>		
<i>Span</i>	Panjang span efektif	<i>Critical Buckling Load</i>	<i>Span</i>	Panjang span efektif	<i>Critical Buckling Load</i>
m	m	N	m	m	N
12	12	6.86×10^5	12	12	6.86×10^5

4.12.4 Perhitungan *Static Deflection*

Static Deflection dipengaruhi oleh panjang efektif bentangan bebas pipa dan beban defleksi. Beban defleksi untuk arah *in-line* adalah total gaya hidrodinamis, sedangkan untuk arah *cross-flow* adalah berat terendam pipa. Selain itu, beberapa parameter lain yang digunakan untuk memperoleh *static deflection* ditampilkan dalam Tabel 4.47.

Tabel 4. 47 Parameter Perhitungan *Static Deflection*

Parameter Perhitungan <i>Static Deflection</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E_{st}	2.07×10^{11}	Pa
Boundary condition	C_2	0.25	-
Effective Axial Force	S_{eff}	-3.88×10^5	N

Sehingga *static deflection* dapat ditentukan, dan hasilnya dijelaskan dalam Tabel 4.48 dan Tabel 4.49.

Tabel 4. 48 Nilai *Static Deflection* kondisi *In-Line*

In-Line				
Panjang span	Panjang efektif	<i>Critical Buckling Load</i>	Gaya Hidrodinamis	Defleksi statis
m	m	N		m
12	12	6.86×10^5	57.98	3.56×10^{-4}

Tabel 4. 49 Nilai *Static Deflection* kondisi *Cross-Flow*

Cross-Flow				
Panjang span	Panjang efektif	<i>Critical Buckling Load</i>	Berat Terendam	Defleksi statis
m	m	N		m
12	12	6.86×10^5	900.218	1.00×10^{-2}

4.12.5 Perhitungan Frekuensi Natural

Frekuensi natural pipa merupakan parameter penting yang harus ditentukan karena parameter ini digunakan sebagai tolak ukur penentuan panjang maksimum bentangan bebas pipa bawah laut yang boleh terjadi. Jika frekuensi natural pipa bawah laut mendekati frekuensi *vortex shedding* yang terjadi di daerah pipa, maka pipa akan mengalami getaran yang dapat mengakibatkan kegagalan kelelahan pada pipa.

Frekuensi natural pipa dihitung menggunakan persamaan yang membutuhkan beberapa parameter yang telah ditentukan dan dihitung sebelumnya. Parameter ditampilkan dalam Tabel 4.50

Tabel 4. 50 Parameter Perhitungan Frekuensi Natural Pipa

Parameter Perhitungan <i>Fundamental Natural Frequency</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Boundary condition	C ₁	3.56	-
	C ₃	0.20	-
Effective Axial Force	S _{eff}	-3.88 x 10 ⁵	N
<i>Concrete stiffness factor</i>	CSF	0.10	-

Setelah mengetahui parameter diatas, maka selanjutnya menghitung nilai frekuensi natural dari pipa pada *actual span* 12 m. Dijelaskan dalam Tabel 4.51 dan Tabel 4.52 berikut.

Tabel 4. 51 Nilai Frekuensi Natural kondisi *In-Line*

<i>In-Line</i>			
Panjang Span Kritis	Critical Buckling Load	Defleksi statis	Frekuensi Natural Pipa
m	N	m	Hz
12	6.86 x 10 ⁵	3.56 x 10 ⁻⁴	4.73

Tabel 4. 52 Nilai Frekuensi Natural kondisi *Cross-Flow*

<i>Cross-Flow</i>			
Panjang Span Kritis	Critical Buckling Load	Defleksi statis	Frekuensi Natural Pipa
m	N	m	Hz
12	6.86 x 10 ⁵	1.00 x 10 ⁻²	4.73

Dari kedua Tabel diatas, maka didapatkan nilai frekuensi natural kondisi *in-line* dan *cross-flow* yang sama sebesar 4.73.

4.13 *Screening Check Criteria (actual span 12 m)*

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

Pada Tabel 4.53 merupakan parameter yang digunakan untuk *screening fatigue* arah *in-line* dan *cross-flow*.

Tabel 4. 53 Parameter Screening Fatigue

Safety Factor	Safety Class		
	Low	Normal	High
$\gamma_{on, IL}$	1.1		
$\gamma_{on, CF}$	1.2		

Setelah mengetahui parameter yang diperlukan untuk melakukan *screening*, langkah berikutnya adalah melakukan *screening* dengan mengelompokkan ruas kanan dan kiri yang akan dibandingkan untuk arah *in-line* dan untuk arah *cross-flow*. Tabel 4.54 dan Tabel 4.55 merupakan hasil *screening* untuk masing – masing arah *in-line* dan *cross-flow*. Pada kedua tabel tersebut terdapat keterangan “LOLOS” yang berarti panjang *freespan* tersebut lolos *screening* dan “TIDAK LOLOS” yang berarti sebaliknya.

Tabel 4. 54 Perhitungan Screening Fatigue kondisi In-Line

In-Line							
L m	f_{oIL} Hz	f_{oIL}/γ_{IL}	$V_{R^{IL}}^{onset}$	$U_{c,100yr}$	α	Ruas Kanan	Kriteria
12	4.73	3.95	0.91	0.288	0.68	1.83	Lolos

Tabel 4. 55 Perhitungan Screening Fatigue kondisi Cross-Flow

Cross-Flow								
L m	f_{oCF} Hz	f_{oCF}/γ_{CF}	$V_{R^{CF}}^{onset}$	$U_{c,100yr}$	$U_{w,1yr}$	α	Ruas Kanan	Kriteria
12	4.73	3.95	3.06	0.288	0.138	0.676	0.64	Lolos

Tabel 4. 56 Rangkuman Hasil Screening Check Criteria Fatigue

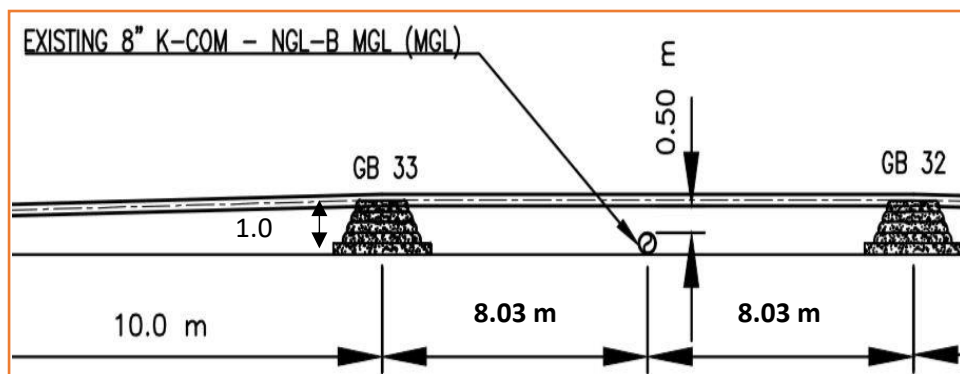
	Condition		Unit
	In Line	Cross Flow	
Aktual Span	12		Meter
Current Velocity Ratio	0.676		
Effective Span	12	12	Meter
Screening Fatigue	COMPLY	COMPLY	

Dari tabel di atas diketahui bahwa hasil *screening fatigue* untuk arah *in-line* dan *cross-flow* menunjukkan keterangan “*comply*”. Dari keterangan tersebut maka untuk *actual span* sebesar 12 m tidak terjadi VIV dan tidak

perlu dianalisa *fatigue*. Nilai *actual span* tersebut dapat dikatakan terlalu *overdesign* dikarenakan jarak antara *support* yang terlalu kecil. Maka dari itu, dalam Tugas Akhir ini dilakukan analisa nilai *actual span* (jarak antara *support*) sesuai dengan nilai *allowable span* statis sebesar 16.07 m dimana nilai tersebut dapat dikatakan nilai *actual span* optimum dikarenakan pipa tersebut tidak mengalami tegangan berlebihan pada kondisi statis.

4.14 Kondisi *actual span* 16.07 m

Dalam penentuan *screening check criteria*, maka diperlukan perhitungan panjang *effective span* terlebih dahulu dan frekuensi natural. *Crossing Pipelines* yang terjadi apabila *actual span* sebesar 16.07 m dapat dilihat pada Gambar 4.14 berikut.



Gambar 4. 14 Tampak Samping *Crossing Pipelines* dengan *actual span* 16.07 m

4.14.1 Perhitungan Panjang Effective Span (*actual span* 16.07 m)

Dalam DNV RP F105 apabila tumpuan fixed-fixed maka nilai $L_{eff}/L = 1$ sehingga nilai panjang *effective span* sama dengan nilai *actual span* sebesar 16.07 m. Tabel 4.57 berikut menampilkan perhitungan panjang *effective span* untuk *actual span* 16.07 m.

Tabel 4. 57 Perhitungan Panjang *Effective Span* (*actual span* 16.07 m)

Cross-Flow			In-Line		
Panjang <i>span</i>	L_{eff}/L	Panjang <i>span</i> Efektif	Panjang <i>span</i>	L_{eff}/L	Panjang <i>span</i> Efektif
m		m	m		m
16.07	1.00	16.07	16.07	1.00	16.07

4.14.2 Perhitungan Frekuensi Natural (*actual span* 16.07 m)

Frekuensi natural pipa merupakan parameter penting yang harus ditentukan karena parameter ini digunakan sebagai tolak ukur penentuan panjang maksimum bentangan bebas pipa bawah laut yang boleh terjadi.

Jika frekuensi natural pipa bawah laut mendekati frekuensi *vortex shedding* yang terjadi di daerah pipa, maka pipa akan mengalami getaran yang dapat mengakibatkan kegagalan kelelahan pada pipa.

Setelah mengetahui parameter diatas, maka selanjutnya menghitung nilai frekuensi natural dari pipa pada *actual span* 16.07 m. Dijelaskan dalam Tabel 4.58 dan Tabel 4.59 berikut.

Tabel 4. 58 Nilai Frekuensi Natural kondisi *In-Line*

<i>In-Line</i>			
Panjang Span Kritis	Critical Buckling Load	Defleksi statis	Frekuensi Natural Pipa
m	N	m	Hz
16.07	3.82×10^5	1.29×10^{-3}	2.49

Tabel 4. 59 Nilai Frekuensi Natural kondisi *Cross-Flow*

<i>Cross-Flow</i>			
Panjang Span Kritis	Critical Buckling Load	Defleksi statis	Frekuensi Natural Pipa
m	N	m	Hz
16.07	3.83×10^5	2.00×10^{-2}	2.49

Dari kedua Tabel diatas, maka didapatkan nilai frekuensi natural kondisi *in-line* dan *cross-flow* yang sama sebesar 2.49.

4.14.2 Screening Check Criteria (*actual span* 16.07 m)

Dalam Tabel 4.60 dan 4.61 menampilkan perhitungan *screening check criteria* untuk kedua kondisi baik *in-line* maupun *cross-flow*.

Tabel 4. 60 Perhitungan *Screening Fatigue* kondisi *In-Line*

<i>In-Line</i>							
L m	f_{oIL} Hz	f_{oIL}/γ_{IL}	$V_{R^{IL}}^{\text{onset}}$	$U_{c,100yr}$	α	Ruas Kanan	Kriteria
16.07	2.49	2.08	0.91	0.288	0.68	2.11	Tidak Lolos

Tabel 4. 61 Perhitungan *Screening Fatigue* kondisi *Cross-Flow*

<i>Cross-Flow</i>							
L m	f_{oCF} Hz	f_{oCF}/γ_{CF}	$V_{R^{CF}}^{\text{onset}}$	$U_{c,100yr}$	$U_{w,1yr}$	Ruas Kanan	Kriteria
16.07	2.49	2.08	3.06	0.288	0.138	0.64	Lolos

Tabel 4. 62 Rangkuman Hasil *Screening Check Criteria Fatigue*

	Condition		Unit
	In Line	Cross Flow	
Aktual Span	16.07		Meter
Current Velocity Ratio	0.68		
Effective Span	16.07	16.07	Meter
Screening Fatigue	NOT COMPLY	COMPLY	

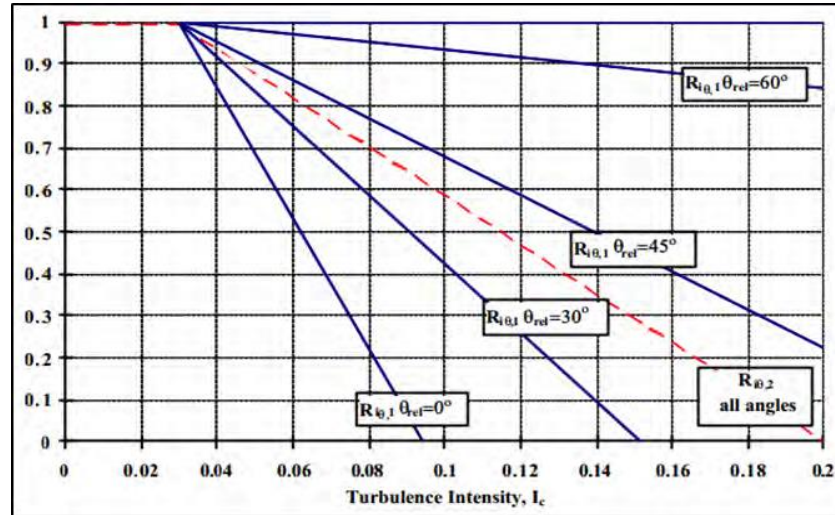
Dari tabel di atas diketahui bahwa hasil *screening fatigue* untuk arah *in-line* menunjukkan keterangan “*not comply*”, sedangkan arah *cross-flow* menandakan “*comply*”. Dari keterangan tersebut maka untuk *actual span* sebesar 16.07 m terjadi VIV dan perlu dianalisa *fatigue*. Dikarenakan hal tersebut maka selanjutnya diperlukan perhitungan *fatigue* untuk kondisi *in-line* pada *free span* pipa tersebut. Metode *fatigue* yang digunakan yaitu Metode *Deterministik* dengan variasi kecepatan arus dengan arah tegak lurus dengan arah pipa pada lokasi *crossing* pipa tersebut.

4.15 Perhitungan Umur Kelelahan Pipa

Setelah diketahui bahwa pipa pada kondisi *in-line* tidak memenuhi *criteria*, maka selanjutnya dilakukan perhitungan umur kelelahan pada pipa tersebut akibat adanya *free span* yang ditimbulkan oleh *crossing pipeline*. Dalam menentukan umur kelelahan pipa, diperlukan perhitungan *stress range*, kemudian mencari jumlah siklus yang terjadi pada daerah sekitar pipa tersebut dan selanjutnya mencari nilai kerusakan yang ditimbulkan oleh siklus tersebut dan terakhir didapat umur kelelahan pada pipa tersebut.

4.15.1 Perhitungan *Response Model*

Dalam perhitungan *response model*, diperlukan beberapa parameter sehingga nilai *response model* didapatkan. Untuk nilai faktor reduksi dari turbulensi arah aliran ($R_{I\theta,1}$ dan $R_{I\theta,2}$), didapatkan dari grafik hubungan antara intensitas turbulensi (I_c) dan sudut aliran yang ditampilkan dalam Gambar 4.15 berikut.



Gambar 4. 15 Grafik Hubungan Intensitas Turbulensi (I_c) dengan sudut aliran

Setelah nilai dari faktor reduksi didapat dari grafik diatas, maka parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan *response model* dapat dilihat pada Tabel 4.63 berikut.

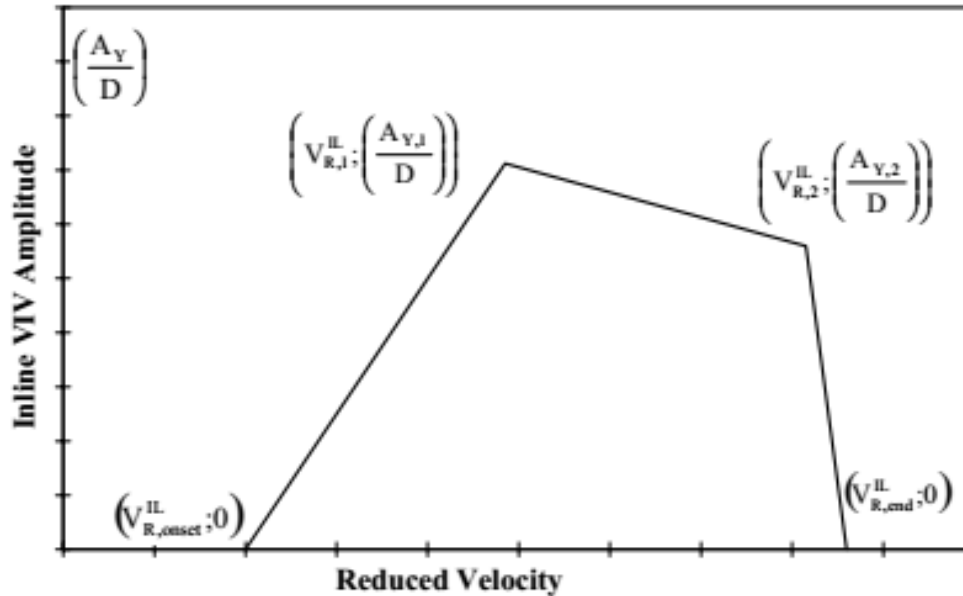
Tabel 4. 63 Parameter Perhitungan *Response Model*

Parameter Perhitungan <i>Response Model</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Stability Parameter Factor	K_{sd}	0.15	-
Intensitas Turbulensi	I_c	0.05	-
Safety Factor Onset In-Line	$\gamma_{on,IL}$	1.1	-
Safety Factor Onset Cross-Flow	$\gamma_{on,CF}$	1.2	-
Reduction Factor 1	$R_{I\theta,1}$	0.69	-
Reduction Factor 2	$R_{I\theta,2}$	0.88	-

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

A. In-Line Response Model

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



Gambar 4. 16 Prinsip Umum *Response Model In-Line*

Dengan *response model* dapat dikonstruksi dengan menggunakan koordinat parameter pada Tabel 4.64 berikut.

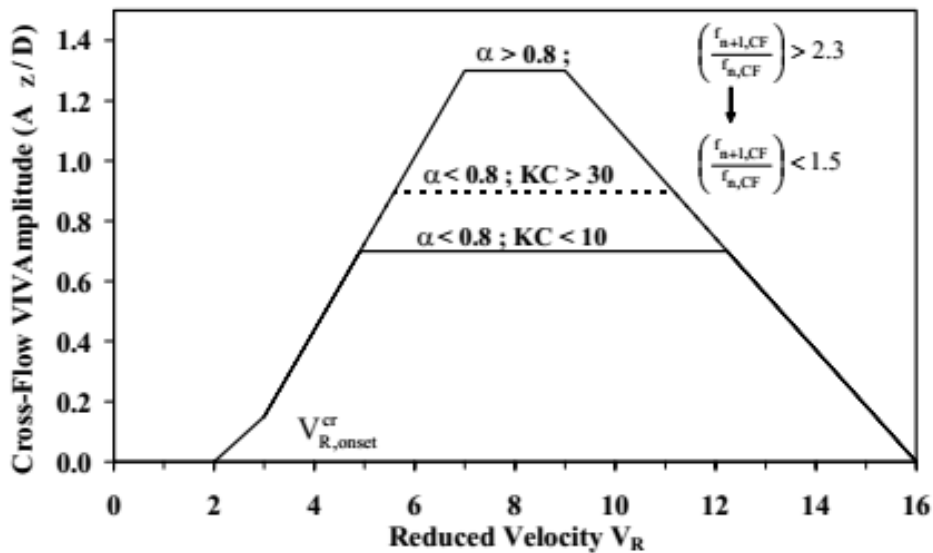
Tabel 4. 64 Parameter *Response Model In-Line*

Parameter <i>Response Model</i>	
Parameter	Nilai
$\frac{A_{y,1}}{D}$	0.11
$\frac{A_{y,2}}{D}$	0.11
$V_{r,onset}^{IL}$	0.91
$V_{r,1}^{IL}$	1.99
$V_{r,2}^{IL}$	4.17
$V_{r,end}^{IL}$	4.38

B. Cross-Flow Response Model

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

Untuk situasi aliran yang didominasi arus *steady*, *onset* dari *cross-flow* VIV untuk amplitudo signifikan terjadi secara tipikal pada nilai signifikan amplitudo V_R antara 3.0 dan 4.0, dimana level getaran maksimum terjadi pada nilai terbesar V_r . Untuk pipa dengan massa spesifik rendah, getaran *cross-flow* dimulai pada V_R antara 2 dan 3. *Crossflow* VIV menyebabkan rentang tegangan dengan konstruksi nilai *reduced velocity onset* pada Gambar 4.17 berikut.



Gambar 4. 17 Prinsip Umum *Response Model Cross-Flow*

Respon amplitude sebagai fungsi dari *current flow ratio* dan *KC* dengan *response model* dapat dikonstruksi dengan menggunakan koordinat parameter yang ditampilkan dalam Tabel 4.65 berikut.

Tabel 4. 65 Parameter *Response Model Cross-Flow*

Parameter <i>Response Model</i>	
Parameter	Nilai
$\frac{A_{z,1}}{D}$	0.7
$\frac{A_{z,2}}{D}$	0.7
$V_{r,onset}^{CF}$	3.06
$V_{r,1}^{CF}$	5
$V_{r,2}^{CF}$	11.15
$V_{r,end}^{CF}$	16

4.15.2 Perhitungan *Stress Range*

Perhitungan *Stress Range* berkaitan erat dengan nilai *unit stress amplitude*, faktor koreksi *damping*, dan faktor koreksi *current flow ratio*.

Stress range tersebut nantinya akan digunakan untuk menentukan siklus tegangan. Nilai *Unit Stress Amplitude* berhubungan erat dengan nilai *stress range* untuk tiap arah (*arah in-line* atau *cross-flow*). Berikut parameter yang digunakan untuk perhitungan nilai *Stress Range* ditampilkan pada Tabel 4.66

Tabel 4. 66 Parameter Perhitungan *Stress Range*

Parameter	Notasi	Nilai	
C4	C ₄	14,1	-
Diameter Total	D _t	0,303	m
Diameter Pipa	OD	0,219	m
Modulus Young Baja	E	2,07 x 10 ¹¹	Pa
Wall Thickness	t	0,0127	m
Concrete Stiffness Factor	CSF	0,10	-
Stress Amplitude Ratio 1 In-Line	$\left(\frac{A_Y}{D}\right)$	0.11	-
Stress Amplitude Ratio Cross-Flow	$\left(\frac{A_Z}{D}\right)$	0.7	-
Safety Factor	γ_s	1.05	-

Hasil perhitungan *Stress Range* untuk arah *In-Line* dan *Cross-Flow* ditampilkan pada Tabel 4.67.

Tabel 4. 67 Perhitungan *Stress Range*

Parameter	Persamaan	Simbol	Nilai	Satuan
Unit Stress Amplitude (In-line)	$A_{IL} = C_4 \times (1 + CSF) \times \frac{D \times (D_s - t) \times E}{L_{eff}^2}$	A _{IL}	7.77E+08	N/m ²
Unit Stress Amplitude (Cross Flow)	$A_{CF} = C_4 \times (1 + CSF) \times \frac{D \times (D_s - t) \times E}{L_{eff}^2}$	A _{CF}	7.77E+08	N/m ²
Faktor Koreksi untuk Current Flow Ratio	$\psi_{a,IL} = \begin{cases} 0 & \text{untuk } \alpha < 0.5 \\ \alpha - 0.5 & \text{untuk } 0.5 \leq \alpha \leq 0.8 \\ 0.3 & \text{untuk } 0.5 \leq \alpha \leq 0.8 \\ 1 & \text{untuk } \alpha > 0.8 \end{cases}$	$\psi_{a,IL}$	0.585704	
Faktor Koreksi dari Damping	$R_k = \begin{cases} 1 - 0.5K_{sd} & \text{untuk } K_{sd} \geq 4 \\ 3.2K_{sd}^{-1.5} & \text{untuk } K_{sd} < 4 \end{cases}$	R _k	56.39596	
Stress Range	$S_{IL} = 2 \cdot A_{IL} \cdot \left(\frac{A_{Y,1}}{D}\right) \cdot \psi_{a,IL} \cdot \gamma_s$	S _{IL}	1.04E+08	N/m ²
Stress Range	$S_{CF} = 2 \cdot A_{CF} \cdot \left(\frac{A_Z}{D}\right) \cdot R_k \cdot \gamma_s$	S _{CF}	6.44E+10	N/m ²

4.15.3 Perhitungan Siklus VIV dan Tegangan

Langkah pertama adalah menghitung jumlah siklus selama masa operasi *pipeline* dengan menggunakan frekuensi *vortex shedding* yang

menyebabkan pipa mengalami VIV. Kemudian dari hasil tersebut dikalikan dengan jumlah kejadian berdasarkan data arus di daerah Indramayu.

Data jumlah kejadian arus pada studi kasus Tugas Akhir ini menggunakan data lingkungan PHE ONWJ dengan interval pengukuran setiap satu detik. Tabel 4.68 menampilkan peluang kejadian dari siklus arus daerah Indramayu.

Tabel 4. 68 Data Peluang Kejadian dari Siklus Arus PHE ONWJ

All-Year

Total	5.02	5.26	20.51	14.50	4.35	4.56	19.37	26.44	100.00	
			<0.01						<0.01	
0.7			0.07	0.02			<0.01	<0.01	0.10	
0.6			0.86	0.18			0.04	0.18	1.26	0.10
0.5			2.72	0.87			0.52	2.16	6.28	1.36
0.4		<0.01	4.47	2.33	<0.01		2.08	5.85	14.74	7.64
0.3	0.20	0.55	5.52	3.89	0.07	0.03	6.45	8.39	25.10	22.38
0.2	2.70	2.75	4.77	4.84	1.98	2.11	7.54	7.25	33.95	47.48
0.1	2.12	1.95	2.10	2.36	2.30	2.42	2.72	2.59	18.57	81.43
0.0	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total %	Exceed %

Setelah mendapat peluang kejadian dari kecepatan arus untuk setiap arah, maka selanjutnya data tersebut dikonversi sehingga menghasilkan jumlah kejadian dari siklus arus tersebut yang nantinya akan digunakan untuk mengetahui siklus kejadian VIV. Tabel 4.69 berikut menampilkan jumlah kejadian dari siklus arus dengan interval satu detik (total kejadian = 31536000 siklus)

Tabel 4. 69 Jumlah Kejadian dari Kecepatan Arus

kec.arus (m/s)	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total
0.0-0.1	668563.20	614952.00	662256.00	744249.60	725328.00	763171.20	857779.20	816782.40	5853081.60
0.1-0.2	851472.00	867240.00	1504267.20	1526342.40	624412.80	665409.60	2377814.40	2286360.00	10703318.40
0.2-0.3	63072.00	173448.00	1740787.20	1226750.40	22075.20	9460.80	2034072.00	2645870.40	7915536.00
0.3-0.4		3153.60	1409659.20	734788.80	3153.60		655948.80	1844856.00	4651560.00
0.4-0.5			857779.20	274363.20			163987.20	681177.60	1977307.20
0.5-0.6			271209.60	56764.80			12614.40	56764.80	397353.60
0.6-0.7			22075.20	6307.20			3153.60	3153.60	34689.60
0.7-0.8			3153.60						3153.60
Total	1583107.20	1658793.60	6471187.20	4569566.40	1374969.60	1438041.60	6105369.60	8334964.80	31536000

Dari Tabel 4.69 diatas, maka didapatkan jumlah siklus kecepatan arus yang digunakan sebesar 1740787. Nilai tersebut digunakan karena *freespan* yang mengalami *fatigue* yaitu kondisi arah *in-line* (tegak lurus dengan arah pipa), maka arah yang digunakan yaitu arah Timur.

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

Kemudian menentukan jumlah nilai siklus tegangan struktur dan nilai siklus tegangan menuju kegagalan pada *stress range*. Pada perkiraan jumlah siklus tegangan pada struktur biasanya terjadi sekitar 2% - 10% dari nilai siklus terjadi. Tabel 4.70 menjelaskan parameter S-N *Curve* dari Jenis S-N *Curve* D.

Tabel 4. 70 Parameter *S-N Curve*

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

4.15.4 Perhitungan *Fatigue Life*

Langkah berikutnya adalah menghitung *fatigue damage*. Didalam DNV RP C 203 *fatigue damage* diperoleh dari pembagian antara nilai jumlah siklus yang terjadi dengan jumlah siklus kegagalan tegangan pada pipa. Setelah mendapatkan nilai dari *fatigue damage*, maka langkah terakhir dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah menghitung umur kelelahan pada panjang bentangan aktual pipa dalam kondisi *In-line*. Hasil perhitungan umur kelelahan ditampilkan pada Tabel 4.71.

Tabel 4. 71 Hasil Perhitungan *Fatigue Life* dari *Crossing Pipeline*.

Parameter	Persamaan	Simbol	Nilai	Satuan
Strouhal Number	$S_t = \left(\frac{0.2}{(C_D)^{3/4}} \right)$	S_t	0.19	
Frekuensi Vortex Shedding	$f_s = S_t \left(\frac{U_{tot}}{D_t} \right)$	f_s	0.27	Hz
Siklus VIV	$n_i = f_s(P_i)$	n_i	472746.4	cycle
Siklus Tegangan	$N_i = A \cdot (S_i)^{-m}$	N_i	5.16E+05	cycle
Fatigue Damage	$D_{fat} = \sum \frac{n_i}{N_i}$	D_{fat}	9.17E-01	
Fatigue Life	$T_{life} = \sum \frac{T_{exposure} \times \eta}{D_{fat}}$	T_{life}	22.90	tahun

Dari perhitungan diatas, maka dapat disimpulkan bahwa umur kelelahan pada pipa yang terdapat *crossing pipeline* sebesar 23 tahun. Umur kelelahan tersebut masih dalam batas aman dikarenakan umur desain awal untuk pipa tersebut yaitu 20 tahun.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Merujuk pada hasil perhitungan beberapa analisis dari *free span* pada platform B1C-KCOM yang bersilangan dengan *existing pipelines* KCOM ke NGLB di Kilo Field milik Pertamina Hulu Energi *Offshore North West Java*, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil perhitungan analisis tegangan, didapatkan nilai :
 - a. *hoop stress* sebesar 72.89 MPa;
 - b. *longitudinal stress* sebesar 89.01 MPa; dan
 - c. *ekuivalent stress (von Mises)* sebesar 82.15 MPa.

Sedangkan untuk tegangan yang diijinkan (*allowable stress*) berdasarkan ASME B 31.8.2000 mengenai *Gas Transmission and Distributing Piping System* didapatkan nilai :

- a. *hoop stress* sebesar 259.2 MPa
- b. *longitudinal stress* sebesar 288 MPa
- c. *ekuivalent stress (von Mises)* sebesar 324 MPa

Jika membandingkan kedua nilai diatas, dapat dilihat bahwa seluruh nilai tegangan yang dicari tidak melebihi nilai kriteria tegangan ijin yang telah ditetapkan selain itu didapatkan juga *allowable span* kondisi statis sebesar 16.075 m dan melebihi nilai *actual span* pipa yang sebesar 12 m sehingga pipa tersebut dikatakan aman tidak mengalami tegangan berlebihan.

2. Berdasarkan analisis dinamis *free span*, nilai *effective span* didapatkan dari hasil perhitungan panjang efektif *span* (L_{eff}), yaitu :
 - a. Untuk *actual span* 12 m, arah *in-line* dan *cross-flow*, $L_{eff} = 12$ m
 - b. Untuk *actual span* 16.07 m arah *in-line* dan *cross-flow*, $L_{eff} = 16.07$ mDari kedua *actual span* tersebut, kondisi *in-line* pada *actual span* 16.07 m tidak memenuhi kriteria yang telah ditetapkan oleh DNV RP F105 maka kondisi *in-line* diperlukan analisis *fatigue* untuk tahap selanjutnya.
3. Berdasarkan *fatigue analysis* untuk *in-line* yang telah dilakukan, didapatkan nilai umur kelelahan (T_{life}) sebesar 23 tahun dengan total kerusakan (D_{fat}) yang terjadi adalah 0.637.

5.2 Saran

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

1. Perlu adanya analisis *ultimate limit state* (ULS) dalam kasus ini, untuk mengetahui apakah bentang *span* tersebut harus dilakukan retifikasi atau tidak.
2. Perlu dilakukan validasi perhitungan menggunakan *software* untuk lebih memastikan hasil perhitungan yang didapat.
3. Perlu adanya perhitungan dari dimensi *support* untuk tiap *span* yang mengalami kegagalan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, Anang. 2016. **Analisa *Suppression Device* Sebagai Peredam *Vortex Induced Vibration (VIV)* Pada *Free Span* Menggunakan Metode Elemen Hingga**. Tugas Akhir. Departemen Teknik Sistem Perkapalan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Adhitya P, F. 2018. **Analisis Umur Kelelahan Akibat *Free Span* yang Terjadi pada *Export Pipeline* saat Kondisi Operasi**. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Afandi, D. 2011. **Optimalisasi Perhitungan Allowable *Free Span* Jalur Pipa SSWJ Phase II**. Tugas Akhir. PTK AKAMIGAS-STEM. Indramayu.
- American Society of Mechanical Engineers. 2000. ASME B 31.8.2000. **Gas Transmission and Distributing Piping System**. USA.
- Arif, A. 2008. **Analisis *Free Span* Untuk Pipeline di Bawah laut**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTSL, Institut Teknologi Bandung, Bandung
- Basir, I.A.M. 2015. **Analisis Tegangan dan Kelelahan Akibat Pengaruh *Vortex Induced Vibration* yang Terjadi pada Lokasi Crossing Pipelines “Studi Kasus : Kilo Field Milik Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java”**. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Bai, Y. dan Qiang, B. 2001. **Subsea Pipelines and Risers**. New York: Elsevier.
- Det Norske Veritas. 1981. **Rules Of Submarine Pipeline System**. Norway
- Det Norske Veritas. 2000. **DNV-OS-F101. Submarine Pipeline Systems**. Norway.
- Det Norske Veritas. 2002. **DNV-RP-F105. Free Spanning Pipelines**. Norway.
- Det Norske Veritas. 2005 **DNV-RP-C203. Fatigue Design Of Offshore Steel Structure**. Norway.
- Dianawati. 2008. **Analisis *Free Span* Pipa Bawah Laut Akibat Pengaruh Dinamika Dasar Laut Di Laut Cina Selatan**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan- FTSL, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- 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

- Krogstad, H. E. 2000. **Linear Wave Theory : Part A**. Norway: Norwegian University Of Science And Technology.
- Mouselli, A. H. 1981. **Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods**. Tulsa: PennWell Books.
- Naess, A. A. 1985. **Fatigue Handbook : Offshore Steel Structure**. Norway: Tapir.
- Ochi, M.K. 1978. **Wave Statistics for the Design pf Ships and Ocean Structure**. Transactions of SNAME Journal, Vol. 95, pp. 189-214
- Palmer, A. C. 1990. **Design of Submarine Pipelines Against Upheaval Buckling**. Offshore Technology Conference. Texas.
- Pertamina Hulu Energy. 2012. **KILO Field Further Development Project**. Jakarta.
- Pratama, D. A. 2007. **Analisis Free Span Pipa Bawah Laut Dan Span Remediation**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTSL, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Prayoga, D. G. S. 2013. **Analisa Kelelahan Free Span Pada Jalur Pipa Gas Bawah Laut East Java Gas Pipeline (EJGP) Dengan Pendekatan Finite Element Method (FEM)**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Sistem Perkapalan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Puspitasari, R. 2008. **Analisis Free Span Pipa Bawah Laut**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTSL, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Putra, S. A. 2013. **Studi Kasus Pengaruh Vortex Induced Vibration Pada Free Span Pipa Pertamina Hulu Energi-Offshore North West Java**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Semedi, D.W. 2005. **Optimasi Pipa Bawah Laut pada Lapangan Produksi Gas Tunu Kalimantan Timur**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- Soegiono. 2007. **Pipa Bawah Laut**. Surabaya: Airlangga University Press
- Tawekkal, A. H. dan Krisnaldi Idris. 2010. **Desain dan Analisis Pipeline Crossing**. Jurnal Teknik Sipil Institut Teknologi Bandung.

LAMPIRAN A
PERHITUNGAN DIMENSI, MASSA DAN BERAT PIPA
TERENDAM

LAMPIRAN A

A.1 Perhitungan Dimensi Pipa

Tabel A.1 Perhitungan Dimensi Pipa

Cross Area Calculation	Persamaan	Satuan	Simbol	Nilai
External Pipe Diameter	$D = OD + (2xt_{coat}) + (2xt_{conc})$	m	D	0.303
Internal Cross Section Area	$A_i = \frac{\pi}{4} x (OD - (2xt_{nom}))^2$	m ²	A _i	0.0294
Steel Pipe Cross Section Area	$A_{pipa} = \left(\frac{\pi}{4} x OD^2\right) - A_i$	m ²	A _{pipa}	0.0082
Coating Layer Cross Section Area	$A_{coat} = \left(\frac{\pi}{4} x (OD + (2xt_{coat}))^2\right) - A_i - A_{pipa}$	m ²	A _{coat}	0.0028
Concrete Cross Section Area	$A_{conc} = \left(\frac{\pi}{4} x (OD + (2xt_{coat}) + (2xt_{conc}))^2\right) - A_i - A_{pipa} - A_{coat}$	m ²	A _{conc}	0.0316

A.2 Perhitungan Massa Pipa

Tabel A.2 Perhitungan Massa Pipa

Mass Calculation	Persamaan	Satuan	Simbol	Nilai
Mass of Fluida	$M_{fluida} = A_i x \rho_{fluida}$	Kg/m	M _{fluida}	1.1704
Mass of Pipe	$M_{pipa} = A_{pipa} x \rho_{pipa}$	kg/m	M _{pipa}	64.6135
Mass of Coating	$M_{coat} = A_{coat} x \rho_{coat}$	kg/m	M _{coat}	3.5912
Mass of Concrete	$M_{conc} = A_{conc} x \rho_{conc}$	kg/m	M _{conc}	96.2997
Mass of Structure	$M_{struktur} = M_{pipa} + M_{coat} + M_{conc}$	kg/m	M _{struktur}	164.5044
Mass of Disposal Water/Bouyancy	$M_{bouy} = \frac{\pi}{4} x D^2 x \rho_{seawater}$	Kg/m	M _{bouy}	73.9095
Added Mass Coefficient	$C_a = \begin{cases} 0.68 + \left(\frac{1.6}{1 + \left(5 \times \frac{e}{D}\right)}\right), & e/D < 0.8 \\ 1, & e/D \geq 0.8 \end{cases}$		C _a	1.0000
Added Mass	$M_a = C_a x M_{bouy}$	kg/m	M _a	73.9095
Effective Mass	$M_e = M_{fluida} + M_{struktur} + M_a$	kg/m	M _e	239.5843
Specific Mass Ratio	$M_{ratio} = \frac{M_{struktur}}{M_{bouy}}$		M _{ratio}	2.2258

A.3 Perhitungan Berat Terendam Pipa

Tabel A.3 Perhitungan Berat Terendam Pipa

Weight Calculation	Persamaan	Satuan	Simbol	Nilai
Pipe Weight per meter	$W_{pipa} = M_{pipa} x 9.8067$	N/m	W _{pipa}	633.8588
Coating weight per meter	$W_{coat} = M_{coat} x 9.8067$	N/m	W _{coat}	35.2292
Concrete weight per meter	$W_{conc} = M_{conc} x 9.8067$	N/m	W _{conc}	944.7002
Fluida Weight per Meter	$W_{fluida} = M_{fluida} x 9.8067$	N/m	W _{fluida}	11.4820
Bouyancy Force per Meter	$W_{bouy} = M_{bouy} x 9.8067$	N/m	W _{bouy}	725.0518
Berat Pipa yang Terendam	$W_{sub} = W_{pipa} + W_{coat} + W_{conc} + W_{fluida} - W_{bouy}$	N/m	W _{sub}	900.2184

LAMPIRAN B
PERHITUNGAN KECEPATAN PARTIKEL AIR PADA PIPA
AKIBAT ARUS DAN GELOMBANG

LAMPIRAN B

B.1 Perhitungan Kecepatan Partikel Air Akibat Gelombang

1. Data Gelombang

Tabel B.1 Data Gelombang

Data Gelombang				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
Kedalaman	h	38.1		m
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	2.74	4.64	s
Periode Gelombang Signifikan	T_s	5.42	7.18	s

2. Parameter Spektra JONSWAP

a. Fungsi Distribusi

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

b. Parameter Lebar Spektra

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

c. Peak Enhancement Factor

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

d. Konstanta Generalized Phillips

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

Tabel B.2 Hasil Perhitungan Parameter Spektra JONSWAP

Parameter JONSWAP			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	2.74	m
Periode Gelombang Signifikan	T_s	5.42	s
Frekuensi Gelombang Signifikan	ω_s	1.16	rad/s
Periode Puncak Gelombang	T_p	7.10	s
Frekuensi Puncak Gelombang	ω_p	0.885	rad/s
Fungsi Distribusi	φ	4.289	
Peakness Parameter	γ	2.264	
Konstanta Generalized Phillips	α	0.0114	

3. Angka Gelombang

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

Tabel B.3 Perhitungan angka Gelombang 1 Tahun

No	kx asumsi	w	kx.d	tanh(kx.d)	k	error
1	0.2	0.884958	7.62	1	0.079832	-151%
2	0.079832	0.884958	3.041594	0.995449	0.080197	0%
3	0.080197	0.884958	3.055499	0.995573	0.080187	0%
4	0.080187	0.884958	3.055117	0.99557	0.080187	0%
5	0.080187	0.884958	3.055127	0.99557	0.080187	0%
6	0.080187	0.884958	3.055127	0.99557	0.080187	0%
7	0.080187	0.884958	3.055127	0.99557	0.080187	0%
8	0.080187	0.884958	3.055127	0.99557	0.080187	0%

Tabel B.4 Perhitungan angka Gelombang

Angka Gelombang			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
		1 Tahun	
Angka gelombang	k_w	0.0801	-

4. Perhitungan Spektra Gelombang

a. Parameter Lebar Spektra

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

b. Fungsi Transfer G

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

c. First Order Wave Theory

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

d. Spektra JONSWAP

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

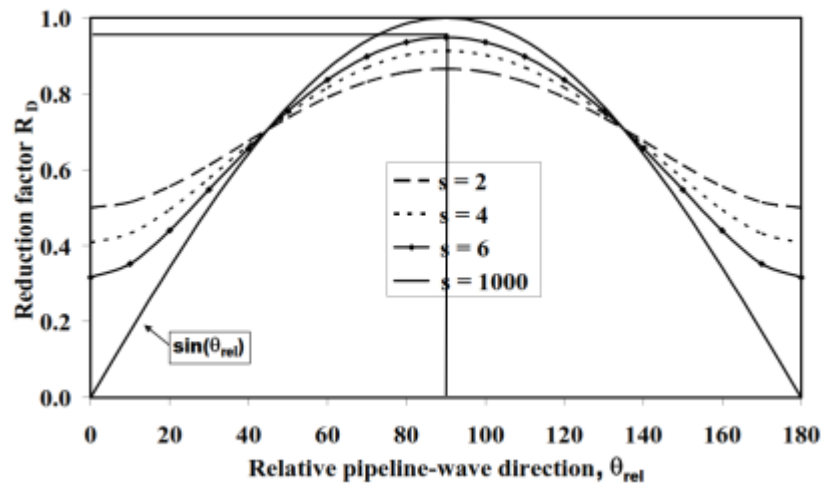
5. Kecepatan Arus Signifikan pada Pipa

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

6. Mean Zero up Crossing Period

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

7. Menentukan nilai R_D



8. Kecepatan Signifikan Arus Normal pada Pipa

$$U_w = U_s \cdot R_D$$

Tabel B.5 Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang

Perhitungan Kecepatan Arus akibat Gelombang			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Kecepatan Arus Signifikan	U_s	0.146	m/s
Mean Zero-Up Crossing Period	T_u	4.409	s
Reduction Factor	R_D	0.950	-
Kecepatan Arus akibat Gelombang	U_w	0.138	m/s
Periode Natural Gelombang	T_n	1.971	s
Osilasi Gelombang	τ	2449.291	

B.2 Perhitungan Kecepatan Arus *Steady* pada Pipa

Tabel B.6 Data Arus

Data Arus			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
		100 Tahun	
Kedalaman	h	38.1	m
Kecepatan Arus (90%)	-	0.518	m/s
Kecepatan Arus (100%)	-	0.308	m/s

Tabel B.7 Data Parameter Arus

Parameter Kecepatan Arus pada Elevasi Pipa			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter Total Pipa	D_t	0.303	m
Diameter Luar Pipa	D_0	0.219	m
Arah Aliran Arus	Θ_{rel}	90	°

1. Faktor Reduksi

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

2. Elevasi diatas Dasar Laut

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

3. Parameter Kekasaran Dasar Laut

Data tanah di lokasi pipa adalah *very soft clay*. Nilai *seabed roughness* yang dipilih adalah *silt*.

Seabed	Roughness z_0 (m)
Silt	$\approx 5 \times 10^{-6}$
Fine sand	$\approx 1 \times 10^{-5}$
Medium sand	$\approx 4 \times 10^{-5}$
Coarse sand	$\approx 1 \times 10^{-4}$
Gravel	$\approx 3 \times 10^{-4}$
Pebble	$\approx 2 \times 10^{-3}$
Cobble	$\approx 1 \times 10^{-2}$
Boulder	$\approx 4 \times 10^{-2}$

$$Z_0 = 5 \times 10^{-6} \text{ m}$$

4. Kecepatan Arus pada Elevasi Pipa

$$U_{c,100\text{tahun}} = R_c \cdot U(z_r)_{100\text{tahun}} \frac{(\ln(z) - \ln(z_0))}{(\ln(z_r) - \ln(z_0))}$$

Tabel B.8 Perhitungan Kecepatan Arus *Inner Zone*

1. Mencari kedalaman dari posisi pipelines

$$\begin{aligned} \text{Kedalaman pipa} &= \text{Kedalaman laut} - (\text{jari-jari luar pipa} + \text{gap}) \\ \text{Kedalaman pipa} &= 38.1 \text{ m} - ((0.5 \cdot D) + 1 \text{ m}) \\ \text{Kedalaman pipa} &= 36.9485 \text{ m} \end{aligned}$$

2. Mengkonversi kedalaman pipa ke persentase

$$\begin{aligned} \text{Persentase kedalaman pipa} &= (\text{kedalaman pipa} : \text{kedalaman laut}) \times 100 \text{ persen} \\ \text{Persentase kedalaman pipa} &= (36.9485 \text{ m} : 38.1 \text{ m}) \times 100 \text{ persen} \\ \text{Persentase kedalaman pipa} &= 96.9777 \% \end{aligned}$$

3. Mencari kecepatan arus pada kedalaman pipa (outer zone)

$$\begin{aligned} x_1 &= 90\% & y_1 &= 0.518 \text{ m/s} & (\text{kecepatan pada } 90\%) \\ x_2 &= 96.9777\% & y_2 &= 0.305 \text{ m/s} & (\text{kecepatan pada } 100\%) \\ x_3 &= 100\% \end{aligned}$$

$$y_2 = \frac{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1)} + y_1 \quad y_2 = 0.369375 \text{ m/s}$$

4. Mencari kecepatan arus pada inner zone

$U(z) = U(z_r) \cdot R_c \cdot \frac{(\ln(z) - \ln(z_0))}{(\ln(z_r) - \ln(z_0))}$		$U(z) = 0.288369 \text{ m/s}$	
$U(z_r)$:	kecepatan arus yang dihitung dari permukaan laut sampai kedalaman pipa.		
$U(z_r)$:	0.369375 m/s		
(z_0) :	parameter kekasaran seabed (m) =	5.E-06	
(z_r) :	ketinggian yang dihitung dari permukaan air hingga ke pipa (m) :		36.9485
(z) :	ketinggian yang dihitung dari dasar laut hingga ke pipa (m) =		1.1515
(R_c) :	reduction factor =	$(R_c) = \sin(\theta_{curr})$	1
θ_{curr} :	sudut datang arus terhadap freespan =		90°

B.3 Perhitungan Kecepatan Arus Total

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

Tabel B.9 Nilai Parameter & Perhitungan Kecepatan Arus Total

Panjang Span	gap (e)	U_c	U_w	Kecepatan Arus Total
12	1	0.288	0.138	0.426

LAMPIRAN C
PERHITUNGAN GAYA HIDRODINAMIS

LAMPIRAN C

C.1 Gaya Seret (*Drag Force*)

Gaya *drag* pada analisis bentangan bebas mempengaruhi besar defleksi yang terjadi pada pipa. Dari data awal telah diketahui koefisien *drag*, dan untuk kecepatan total dari partikel air didapatkan dari penjumlahan kecepatan arus dengan kecepatan arus akibat gelombang ($0.2884 + 0.138 = 0.4264$ m/s).

Tabel C.1 Perhitungan Gaya *Drag*

Parameter	Persamaan	Nilai	Satuan
Drag Force	$F_D = C_D \times \frac{1}{2} \times \rho_{seawater} \times D \times U^2$	29.696	N/m

C.2 Gaya Angkat (*Lift Force*)

Gaya *lift* atau angkat pada pipa muncul karena adanya aliran yang bekerja pada pipa.

Tabel C.2 Perhitungan Gaya *Lift*

Parameter	Persamaan	Nilai	Satuan
Lift Force	$F_L = C_L \times \frac{1}{2} \times \rho_{seawater} \times D \times U^2$	28.282	N/m

C.3 Gaya Hidrodinamis Total

Gaya Hidrodinamis Total yang digunakan merupakan hasil penjumlahan dari Gaya *Drag* dan Gaya *Lift*.

Tabel C.3 Perhitungan Gaya Hidrodinamis Total

Parameter	Persamaan	Nilai	Satuan
Gaya Hidrodinamis Total	$F_{tot} = F_D + F_L$	57.980	N/m

LAMPIRAN D

PERHITUNGAN TEGANGAN DAN
***ALLOWABLE SPAN* KONDISI STATIS**

LAMPIRAN D

D.1 Tegangan Hoop

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

Tabel D.1 Parameter untuk Perhitungan Tegangan Hoop

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter luar pipa baja	D ₀	0.303	m
Tebal nominal dinding pipa	t _{nom}	0.0127	m
Mill Tolerance	t _{mill}	0.0015875	m
Tebal dinding pipa	t	0.0081125	m
Tekanan eksternal	P _e	4.90E+05	Pa
Tekanan internal	P _i	6.60E+06	Pa
Rasio ukuran pipa	D/t	37	-

Tabel D.2 Perhitungan Tegangan Hoop

TEGANGAN HOOP			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tegangan hoop	σ _h	72887007.87	Pa
		72.89	MPa

Tabel D.3 Perhitungan Cek Batas Izin Hoop Stress

Hoop Stress (MPa)	Cek ASME (0.72xSMYS) (Mpa)	Rasio
72.89	259.20	0.28
OK		

D.2 Tegangan Longitudinal

- Perhitungan Tegangan Longitudinal

$$\sigma_L = \sigma_a + \sigma_b \text{ atau } \sigma_a - \sigma_b$$

2. Perhitungan Aksial Kombinasi

$$\sqrt{(F_{pi})^2 + (W_{sub})^2}$$

Tabel D.4 Parameter untuk Perhitungan *Longitudinal Stress*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tebal dinding pipa	t	0.0081125	m
Diameter luar pipa baja	D ₀	0.303	m
Diameter dalam pipa	D _i	0.287	m
Luas penampang pipa	A _{st}	0.008	m ²
Tekanan internal	P _i	6600000	Pa
Gaya tekanan internal	F _{pi}	49602.65	N
Berat terendam pipa	W _{sub}	10802.62	N
Lift Force	F _L	339.38	N

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

Tabel D.5 Perhitungan Tegangan Aksial Kombinasi

TEGANGAN AKSIAL RESULTAN					
Persamaan	Notasi	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
$\sigma_{a0} = F_r/A_{st}$	σ_{a0}	6745239.06	Pa	6.75	MPa
TEGANGAN THERMAL					
Persamaan	Notasi	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
$\sigma_t = E_{st} \times \alpha_e \times (T_2 - T_1)$	σ_t	40373073.00	Pa	40.37	MPa
TEGANGAN POISSON					
Persamaan	Notasi	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
$\sigma_{ps} = \sigma_h \times v_{st}$	σ_{ps}	21866102.36	Pa	21.87	MPa
TEGANGAN AKSIAL KOMBINASI					
Persamaan	Notasi	Nilai	Satuan		
$\sigma_a = \sigma_{a0} + \sigma_t + \sigma_{ps}$	σ_a	68.98	MPa		

3. Perhitungan Tegangan *Bending*

Tabel D.6 Parameter Perhitungan Tegangan *Bending*

Perhitungan Momen Maksimum			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Stress intensification factor inplane</i>	i_i	1.00	-
<i>Stress intensification factor outplane</i>	i_o		
Perhitungan Modulus Penampang Pipa			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Modulus penampang pipa	z_A	5.40E-04	m^3

Tabel D.7 Perhitungan *Bending Stress*

TEGANGAN BENDING						
$\sigma_b = \frac{\sqrt{(i_i M_v)^2 + (i_o M_H)^2}}{z_A}, \quad M_v = \frac{1}{12} x W_{sub} x L^2 \quad \text{dan} \quad M_H = \frac{1}{12} x F_D x L^2$						
Panjang Bentangan Bebas Aktual	Gaya Drag	Momen Maksimum (fixed-fixed)			Tegangan <i>Bending</i>	
		M. Vertikal	M. Horizontal	Resultan	Pa	MPa
m	N/m	N.m	N.m	N.m	Pa	MPa
12.000	29.6961	10802.616	356.354	10808.5	20029287.133	20.029

4. Perhitungan Tegangan *Longitudinal*

Tabel D.8 Perhitungan *Longitudinal Stress*

TEGANGAN LONGITUDINAL								
Panjang Span Aktual	Tegangan				Longitudinal Maksimum	0.8 SMYS	Cek Asme B31.8	Rasio
	<i>Aksial Kombinasi</i>	<i>Bending</i>	Longitudinal					
m	MPa	MPa	MPa	MPa	Mpa	MPa		
12.000	68.98	20.03	89.01	48.96	89.01	288.00	OK	0.31

D.3 Perhitungan *von-Mises Stress*

Tabel D.9 Perhitungan *von Mises Stress*

Panjang Bentangan Bebas	TEGANGAN			0.9 SMYS	Cek ASME B31.8	RASIO
	<i>Hoop</i>	Longitudinal	<i>Von Mises</i>			
m	MPa	Mpa	MPa			
12.00	72.89	89.01	82.15	324.00	OK	0.25

D.4 Panjang *Allowable Span Statis*

Tabel D.10 Perhitungan Panjang *Allowable Span Statis*

Parameter Perhitungan	Persamaan	Nilai	Satuan
Tegangan Ekuivalen	$\sigma_E = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2}$	82146287.9	N/m ²
Momen Inertia Penampang Pipa	$I_{pipa} = \frac{\pi}{64} \times (OD^4 - (OD - (2 \times t_{nom}))^4)$	4.40E-05	m ⁴
Gaya Drag	$F_D = C_D \times \frac{1}{2} \times \rho_{seawater} \times D \times U^2$	29.696	N/m
Gaya Inertia	$F_I = C_M \times \frac{\pi D^2}{4} \times \rho_{seawater} \times \frac{dU}{dt}$	106.588	N/m
Berat Pipa yang Terendam	$W_{sub} = W_{pipa} + W_{coat} + W_{conc} + W_{ftuida} - W_{bouy}$	900.218	N/m
Berat Pipa Terdistribusi Merata	$W_t = \sqrt{W_{sub}^2 + (F_D + F_I)^2}$	910.476	N/m
Panjang Allowable Span Static	$L_{st} = \sqrt{\frac{2 \cdot C \cdot I \cdot \sigma_e}{W_t \cdot D}}$	16.074	m

Dari panjang *allowable span* statis tersebut, didapatkan nilai sebesar 16.074 yang menandakan *actual span* pada pipa (sebesar 12 m) masih dalam batas aman dan tidak mengalami tegangan berlebihan.

LAMPIRAN E
PERHITUNGAN *VORTEX INDUCED VIBRATION*

LAMPIRAN E

E.1 Perhitungan Parameter VIV

Vortex Induced Vibration

Tabel E.1 Parameter Awal Perhitungan Parameter VIV

PARAMETER AWAL			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Soil damping</i>	ζ_{soil}	0.001	-
<i>Hidrodynamic damping</i>	ζ_h	0.00	-
<i>Structural damping</i>	ζ_{str}	0.005	-
Diameter total pipa	D_t	0.303	m
frekuensi gelombang signifikan	ω_s	1.159	rad/s
Viskositas Kinematis Air Laut	ν_k	1.15E-06	m ² /s

Tabel E.2 Perhitungan Parameter VIV

Parameter	Persamaan	Nilai	Satuan
Reynolds Number	$Re = \frac{U \times D}{\nu}$	112583.848	-
Keulegan Carpenter	$KC = \frac{Uw}{\omega_s \times D}$	0.394	-
Strouhal Number	$S_t = \left(\frac{0.2}{(C_D)^{3/4}} \right)$	0.192814	-
Frekuensi Vortex Shedding	$f_s = S_t \left(\frac{U_{tot}}{D_t} \right)$	0.27157	Hz
Current Flow Ratio	$\alpha = \frac{U_{c,100yr}}{U_{w,1yr} + U_{c,100yr}}$	0.676	-
Total Damping Ratio	$\zeta_T = \zeta_{soil} + \zeta_{str} + \zeta_h$	0.006	-
Stability Parameters	$K_S = \frac{4 \times \pi \times M_e \times \zeta_T}{\rho_{seawater} \times D^2}$	0.192	-
Stability Parameters Factor	$K_{sd} = \frac{K_S}{\gamma_k}$	0.148	-

LAMPIRAN F
PERHITUNGAN PANJANG *EFFECTIVE SPAN*

LAMPIRAN F

F.1 Perhitungan *Concrete Stiffness Factor*

Tabel F.1 Perhitungan *Concrete Stiffness Factor*

Concrete Stiffness Calculation	Persamaan	Satuan	Simbol	Nilai
Moment Inersia of Pipe	$I_{pipa} = \frac{\pi}{64} \times (OD^4 - (OD - (2 \times t_{nom}))^4)$	m^4	I_{pipa}	4.40E-05
Moment Inersia of Concrete	$I_{conc} = \frac{\pi}{64} \times (OD^4 - (OD - (2 \times t_{conc}))^4)$	m^4	I_{conc}	9.24E-05
Concrete Stiffness Enhancement Factor	$CSF = 0.25 \times \left(\frac{E_{conc} \times I_{conc}}{E_{pipa} \times I_{pipa}} \right)^{0.75}$		CSF	1.00E-01

F.2 Perhitungan *Dynamic Soil Stiffness*

Tabel F.2 Parameter *Dynamic Soil Stiffness*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien <i>dynamic soil stiffness</i> vertikal	C_v	1200000	$N/m^{5/2}$
Koefisien <i>dynamic soil stiffness</i> horizontal	C_L	800000	$kN/m^{5/2}$
<i>Poisson ratio</i> tanah vertical/horizontal (corroded)	ν_{soil}	0.45	-
Massa pipa di udara	m_{str}	164.504	kg/m
Massa air yang dipindahkan	m_{bouy}	73.909	kg/m

$$K_L = C_L(1 + \nu) \times \left(\frac{2}{3} \times M_{ratio} + \frac{1}{3} \right) \times \sqrt{D}$$

Tabel F.3 Perhitungan *Dynamic Soil Stiffness*

<i>Dynamic Soil Stiffness</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Rasio Massa Spesifik	M_{ratio}	2.226	-
<i>Dynamic soil stiffness</i> vertikal	K_v	2180	kN/m^2
<i>Dynamic soil stiffness</i> horizontal	K_L	1160	kN/m^2

F.3 Perhitungan Panjang *Effective Span*

$$L_{eff,IL} = L \times \begin{cases} \frac{4.73}{(-0.066 \times \beta_L^2) + (1.02 \times \beta_L) + 0.63}; & \text{untuk } \beta \geq 2.7 \\ \frac{4.73}{(0.036 \times \beta_L^2) + (0.61 \times \beta_L) + 1}; & \text{untuk } \beta < 2.7 \end{cases}$$

$$\beta_L = \log_{10} \left(\frac{K_L \times L^4}{(1 + CSF) \times E_{pipa} \times I_{pipa}} \right)$$

Tabel F.4 Perhitungan Panjang *Effective Span*

Cross-Flow					In-Line		
Panjang <i>span</i>	β	L_{eff}/L	Panjang <i>span</i> Efektif	Panjang <i>span</i>	β	L_{eff}/L	Panjang <i>span</i> Efektif
m			m	m			m
12	3.65	1.36	16.33	12	3.38	1.42	17.08

LAMPIRAN G
PERHITUNGAN FREKUENSI NATURAL

LAMPIRAN G

G.1 Perhitungan Faktor Koreksi

Tabel G.1 Perhitungan Faktor Koreksi

Correction Factor Calculation	Persamaan	Satuan	Simbol	Nilai
Seabed Correction Factor	$\psi_{prox, onset} = \begin{cases} \frac{1}{4} \times \left(3 + \left(1.25 \times \frac{e}{D} \right) \right); \text{ untuk } \frac{e}{D} < 0.8 \\ 1; \text{ untuk } \frac{e}{D} \geq 0.8 \end{cases}$		$\psi_{prox, onset}$	1
Mass Correction Factor	$\psi_{mass, onset} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \times M_{ratio}; \text{ untuk } M_{ratio} < 1.5 \\ 1; \text{ untuk } M_{ratio} \geq 1.5 \end{cases}$		$\psi_{mass, onset}$	1
Current Correction Factor	$\psi_{\alpha, onset} = \begin{cases} 1 + \frac{\alpha}{3}; \text{ untuk } \alpha < 1.5 \\ 1.167; \text{ untuk } \alpha \geq 1.5 \end{cases}$		$\psi_{\alpha, onset}$	1.225

G.2 Perhitungan *Effective Axial Force*

Tabel G.2 Parameter Perhitungan *Effective Axial Force*

Parameter Perhitungan <i>Effective Axial Force</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Perbedaan Tekanan	ΔP	2.0E x 10 ⁶	Pa
<i>Poisson's Ratio</i> Baja	ν	0.3	-
Diameter Dalam Pipa	D_i	0.1936	m
Luas Penampang Internal Pipa Baja	A_i	0.029	m ²
Luas Penampang Pipa Baja	A_{st}	0.0082	m ²
Koefisien <i>Thermal Expansion</i>	α_e	1.10 x 10 ⁻⁵	/ ^o C
Temperatur Operasi	T_1	43.33	^o C
Temperatur Air Laut	T_0	26.66	^o C

Tabel G.3 Perhitungan Perbedaan Tekanan

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas air laut	ρ_w	1025	kg/m ³
Tekanan Internal Desain	P_i	6.55	MPa
Tekanan eksternal	P_e	4.55	MPa
Perbedaan tekanan	ΔP	2.00 x 10 ⁶	Pa

Perhitungan *effective axial force*:

$$\begin{aligned}
 S_{eff} &= H_{eff} - (1 - 2\nu) \cdot P_i \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_i)^2 - \alpha_e \cdot \Delta T \cdot A_{st} \\
 &= - 3.88 \times 10^5
 \end{aligned}$$

G.3 Perhitungan *Critical Buckling Load*

Tabel G.4 Parameter Perhitungan *Critical Buckling Load*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Concrete stiffness factor</i>	CSF	0.10	-
Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	4.40×10^{-5}	m^4

Tabel G.5 Nilai *Critical Buckling Load*

<i>Cross-Flow</i>			<i>In-Line</i>		
Span	Panjang span efektif	<i>Critical Buckling Load</i>	Span	Panjang span efektif	<i>Critical Buckling Load</i>
m	m	N	m	m	N
12	16.33	3.71×10^5	12	17.07	3.39×10^5

G.4 Perhitungan *Static Deflection*

Tabel G.6 Parameter Perhitungan *Static Deflection*

Parameter Perhitungan <i>Static Deflection</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E_{st}	2.07×10^{11}	Pa
Boundary condition	C_2	0.25	-
Effective Axial Force	S_{eff}	-3.88×10^5	N

Tabel G.7 Nilai *Static Deflection* kondisi *In-Line*

<i>In-Line</i>				
Panjang span	Panjang efektif	<i>Critical Buckling Load</i>	Gaya Hidrodinamis	Defleksi statis
m	m	N		m
12	17.07	3.39×10^5	57.98	1.70×10^{-3}

Tabel G.8 Nilai *Static Deflection* kondisi *Cross-Flow*

<i>Cross-Flow</i>				
Panjang span	Panjang efektif	<i>Critical Buckling Load</i>	Berat Terendam	Defleksi statis
m	m	N		m
12	16.33	3.71×10^5	900.218	2.25×10^{-2}

G.5 Perhitungan Frekuensi Natural

Tabel G.9 Parameter Perhitungan Frekuensi Natural Pipa

Parameter Perhitungan <i>Fundamental Natural Frequency</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Boundary condition	C ₁	3.56	-
	C ₃	0.20	-
Effective Axial Force	S _{eff}	-3.88 x 10 ⁵	N
<i>Concrete stiffness factor</i>	CSF	0.10	-

Tabel G.10 Nilai Frekuensi Natural kondisi *In-Line*

<i>In-Line</i>			
Panjang Span Kritis	Critical Buckling Load	Defleksi statis	Frekuensi Natural Pipa
m	N	m	Hz
17.07	3.39 x 10 ⁵	1.80 x 10 ⁻³	2.11

Tabel G.11 Nilai Frekuensi Natural kondisi *Cross-Flow*

<i>Cross-Flow</i>			
Panjang Span Kritis	Critical Buckling Load	Defleksi statis	Frekuensi Natural Pipa
m	N	m	Hz
16.33	3.71 x 10 ⁵	2.25 x 10 ⁻²	2.34

LAMPIRAN H
SCREENING CRITERIA FATIGUE

LAMPIRAN H

H.1 *Screening Fatigue*

Tabel H.1 Parameter *Screening Fatigue*

<i>Safety</i>	<i>Safety Class</i>		
<i>Factor</i>	<i>Low</i>	<i>Normal</i>	<i>High</i>
$\gamma_{on, IL}$	1.1		
$\gamma_{on, CF}$	1.2		

Tabel H.2 Perhitungan *Screening Fatigue* kondisi *In-Line*

In-Line							
L m	f_{oIL} Hz	f_{oIL}/γ_{IL}	V_R^{IL}_{onset}	U_{c,100yr}	α	Ruas Kanan	Kriteria
12	2.11	1.805	0.9091	0.288	0.676	1.825	Tidak Lolos

Tabel H.3 Perhitungan *Screening Fatigue* kondisi *Cross-Flow*

Cross-Flow								
L m	f_{oCF} Hz	f_{oCF}/γ_{CF}	V_R^{CF}_{onset}	U_{c,100yr}	U_{w,1yr}	α	Ruas Kanan	Kriteria
12	2.35	2.003	3.0631	0.288	0.138	0.676	0.6437	Lolos

Tabel H.4 Rangkuman Hasil *Screening Check Criteria Fatigue*

	Condition		Unit
	In Line	Cross Flow	
Aktual Span	12		Meter
Current Velocity Ratio	0.676		
Effective Span	17.075	16.33	Meter
Screening Fatigue	NOT COMPLY	COMPLY	

LAMPIRAN I
PERHITUNGAN *RESPONSE MODEL*

LAMPIRAN I

1.1 In-Line Response Model

1. Perhitungan nilai *reduced Velocity Onset*

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

2. Perhitungan nilai *Reduced Velocity 1*

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

3. Perhitungan nilai *Reduced Velocity 2*

$$V_{R,2}^{IL} = V_{R,end}^{IL} - 2 \cdot \left(\frac{A_{Y,2}}{D} \right)$$

4. Perhitungan nilai *Reduced Velocity End*

$$V_{R,end}^{IL} = \begin{cases} 4.5 - 0.8 K_{sd} & \text{for } K_{sd} < 1.0 \\ 3.7 & \text{for } K_{sd} \geq 1.0 \end{cases}$$

5. Perhitungan nilai *stress amplitude ratio 1*

$$\left(\frac{A_{Y,1}}{D} \right) = \max \left(0.18 \cdot \left(1 - \frac{K_{sd}}{1.2} \right) \cdot R_{10,1}; \left(\frac{A_{Y,2}}{D} \right) \right)$$

6. Perhitungan nilai *stress amplitude ratio 2*

$$\left(\frac{A_{Y,2}}{D} \right) = 0.13 \cdot \left(1 - \frac{K_{sd}}{1.8} \right) \cdot R_{10,2}$$

7. Perhitungan nilai *reduction 1*

$$R_{10,1} = 1 - \pi^2 \left(\frac{\pi}{2} - \sqrt{2} \cdot \theta_{rel} \right) (I_c - 0.03) \quad 0 \leq R_{10,1} \leq 1$$

8. Perhitungan nilai *reduction 2*

$$R_{10,2} = 1.0 - \frac{(\hat{I}_c - 0.03)}{0.17} \quad 0 \leq R_{10,2} \leq 1$$

Tabel I.1 *Response Model In-Line*

Parameter <i>Response Model</i>	
Parameter	Nilai
$\frac{A_{y,1}}{D}$	0.1088
$\frac{A_{y,2}}{D}$	0.1053
$V_{r,onset}^{IL}$	0.9091
$V_{r,1}^{IL}$	1.9976
$V_{r,2}^{IL}$	4.1713
$V_{r,end}^{IL}$	4.3819
$R_{I\theta,1}$	0.689
$R_{I\theta,2}$	0.882

1.2 Cross Flow Response Model

1. Perhitungan nilai *reduced Velocity Onset*

$$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3 \cdot \Psi_{proxi,onset} \cdot \Psi_{mass,onset} \cdot \Psi_{\alpha,onset} \cdot \Psi_{trench,onset}}{\gamma_{on}}$$

- a. $\Psi_{proxi,onset}$ adalah perhitungan faktor koreksi untuk jarak dasar laut, dimana :

$$\Psi_{proxi,onset} = \begin{cases} \frac{1}{4} \left(3 + 1.25 \frac{e}{D} \right) & \text{for } \frac{e}{D} < 0.8 \\ 1 & \text{else} \end{cases}$$

- b. $\Psi_{mass,onset}$ adalah perhitungan faktor koreksi untuk *specific gravity* dari pipa, dimana :

$$\Psi_{mass,onset} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \frac{\rho_s}{\rho} & \text{for } \frac{\rho_s}{\rho} < 1.5 \\ 1 & \text{else} \end{cases}$$

- c. $\Psi_{\alpha,onset}$ adalah perhitungan faktor koreksi untuk *current wave ratio*, dimana :

$$\Psi_{\alpha,onset} = \begin{cases} 1 + \frac{\alpha}{3} & \text{for } \alpha < 0.5 \\ 1.167 & \text{else} \end{cases}$$

2. Perhitungan nilai *Reduced Velocity* 1

$$V_{R,1}^{CF} = 5$$

3. Perhitungan nilai *Reduced Velocity* 2

$$V_{R,2}^{CF} = V_{R,end}^{CF} - \left(\frac{9}{1.3}\right) \cdot \left(\frac{A_{Z,1}}{D}\right)$$

4. Perhitungan nilai *Reduced Velocity End*

$$V_{R,end}^{CF} = 16$$

5. Perhitungan nilai *stress amplitude ratio* 1

$$\left(\frac{A_{Z,1}}{D}\right) = \begin{cases} 1.3 & \alpha > 0.8 & \text{all KC} \\ 0.7 & & \text{KC} < 10 \\ 0.7 + 0.01 \cdot (\text{KC} - 10) & \alpha \leq 0.8 & 10 \leq \text{KC} \leq 30 \\ 0.9 & & \text{KC} > 30 \end{cases}$$

6. Perhitungan nilai *stress amplitude ratio* 2

$$\left(\frac{A_{Z,2}}{D}\right) = \left(\frac{A_{Z,1}}{D}\right)$$

Tabel I.2 Hasil Perhitungan *Response Model Cross-Flow*

Parameter <i>Response Model</i>	
Parameter	Nilai
$\frac{A_{Z,1}}{D}$	0.7
$\frac{A_{Z,2}}{D}$	0.7
$V_{r,onset}^{CF}$	3.063
$V_{r,1}^{CF}$	5
$V_{r,2}^{CF}$	11.153
$V_{r,end}^{CF}$	16

LAMPIRAN J
PERHITUNGAN *UNIT STRESS AMPLITUDE* DAN *STRESS RANGE*

LAMPIRAN J

Tabel J.1 Parameter Perhitungan *Stress Range*

Parameter	Notasi	Nilai	
C4	C_4	14,1	-
Diameter Total	Dt	0,303	m
Diameter Pipa	OD	0,219	m
Modulus Young Baja	E	$2,07 \times 10^{11}$	Pa
Wall Thickness	t	0,0127	m
Concrete Stiffness Factor	CSF	0,10	-
Stress Amplitude Ratio 1 In-Line	$\left(\frac{A_Y}{D}\right)$	0.1088	-
Stress Amplitude Ratio Cross-Flow	$\left(\frac{A_Z}{D}\right)$	0.7	-
Safety Factor	γ_s	1,05	-

Tabel J.2 Perhitungan *Stress Range*

Parameter	Persamaan	Simbol	Nilai	Satuan
Unit Stress Amplitude (In-line)	$A_{IL} = C_4 \times (1 + CSF) \times \frac{D \times (D_s - t) \times E}{L_{eff}^2}$	A_{IL}	6.88E+08	N/m^2
Unit Stress Amplitude (Cross Flow)	$A_{CF} = C_4 \times (1 + CSF) \times \frac{D \times (D_s - t) \times E}{L_{eff}^2}$	A_{CF}	7.53E+08	N/m^2
Faktor Koreksi untuk Current Flow Ratio	$\psi_{a,IL} = \begin{cases} 0 & \text{untuk } \alpha < 0.5 \\ \frac{\alpha - 0.5}{0.3} & \text{untuk } 0.5 \leq \alpha \leq 0.8 \\ 1 & \text{untuk } \alpha > 0.8 \end{cases}$	$\psi_{a,IL}$	0.585704	
Faktor Koreksi dari Damping	$R_k = \begin{cases} 1 - 0.5K_{sd} & \text{untuk } K_{sd} \geq 4 \\ 3.2K_{sd}^{-1.5} & \text{untuk } K_{sd} < 4 \end{cases}$	R_k	56.39596	
Stress Range	$S_{IL} = 2 \cdot A_{IL} \cdot \left(\frac{A_{Y,1}}{D}\right) \cdot \psi_{a,IL} \cdot \gamma_s$	S_{IL}	9.22E+07	N/m^2
Stress Range	$S_{CF} = 2 \cdot A_{CF} \cdot \left(\frac{A_Z}{D}\right) \cdot R_k \cdot \gamma_s$	S_{CF}	6.24E+10	N/m^2

LAMPIRAN K
PERHITUNGAN SIKLUS DAN *FATIGUE LIFE*

LAMPIRAN K

Frekuensi *vortex Shedding*

$$S_t = \left(\frac{0.2}{(C_D)^{3/4}} \right)$$

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

Tabel K.1 Parameter nilai Siklus Tegangan (DNV RP C 203)

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

Perhitungan nilai siklus tegangan adalah sebagai berikut:

$$N_i = A \cdot S_i^{-m}$$

Fatigue Damage (DNV RP C-203)

$$D_{exposure} = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

Menentukan *Fatigue Life*

$$T_{life} = \sum \frac{T_{exposure} \cdot \eta}{D_{fat}}$$

Tabel K.2 Perhitungan nilai *fatigue damage* dan *fatigue life (In-line)*

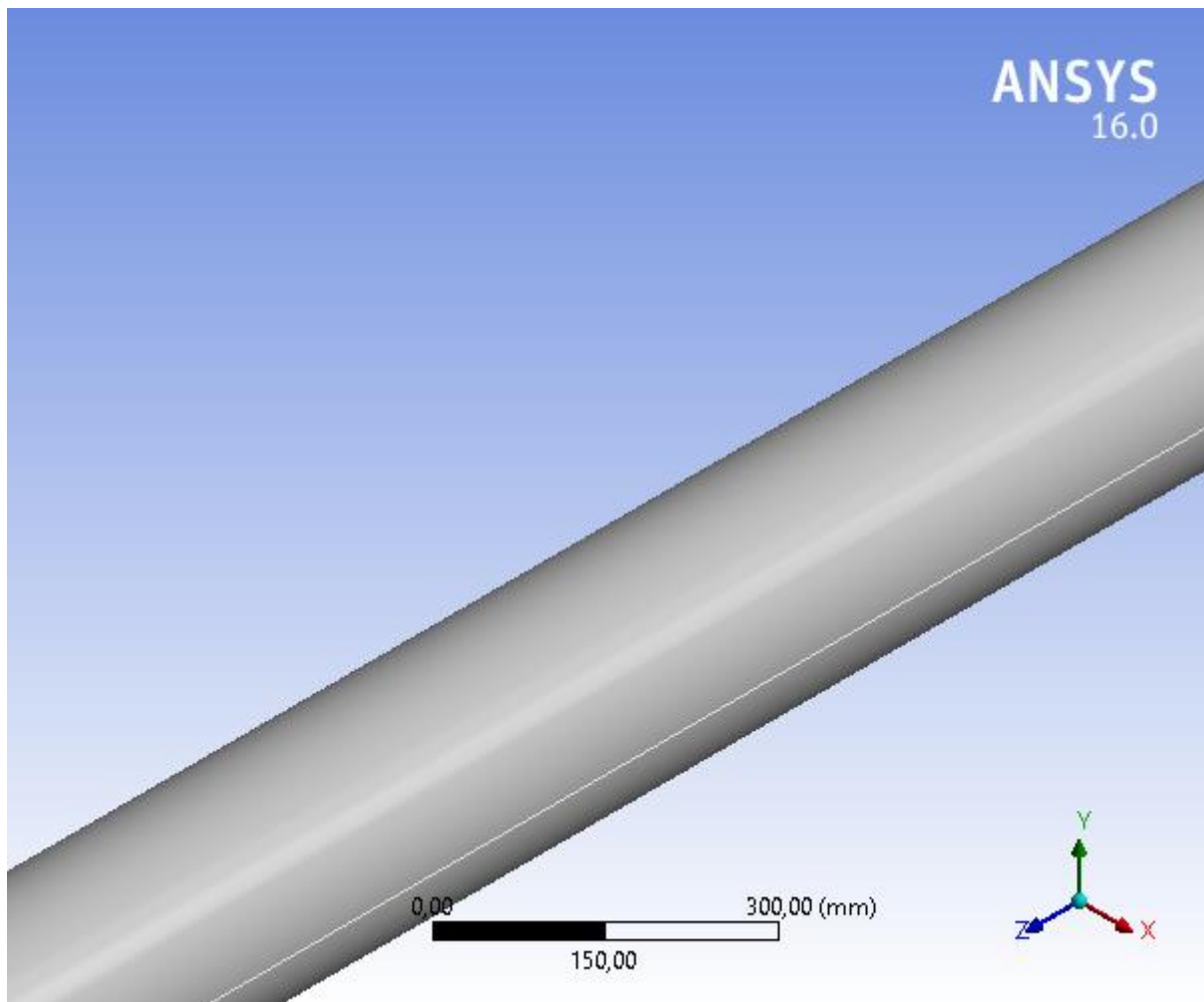
Parameter	Persamaan	Simbol	Nilai	Satuan
Strouhal Number	$S_t = \left(\frac{0.2}{(C_D)^{3/4}} \right)$	S_t	0.192814	
Frekuensi Vortex Shedding	$f_s = S_t \left(\frac{U_{tot}}{D_t} \right)$	f_s	0.27157	Hz
Siklus VIV	$n_i = f_s(P_i)$	n_i	472746.4	cycle
Siklus Tegangan	$N_i = A \cdot (S_i)^{-m}$	N_i	7.42E+05	cycle
Fatigue Damage	$D_{fat} = \sum \frac{n_i}{N_i}$	D_{fat}	6.37E-01	
Fatigue Life	$T_{life} = \sum \frac{T_{exposure} \times \eta}{D_{fat}}$	T_{life}	32.95941	tahun

LAMPIRAN L
ANSYS CFX DAN ANSYS STATIC STRUCTURAL



Project

First Saved	Monday, July 1, 2019
Last Saved	Sunday, July 21, 2019
Product Version	16.0 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



Contents

- [Units](#)
- [Model \(B4\)](#)
 - [Geometry](#)
 - [Solid](#)
 - [Coordinate Systems](#)
 - [Mesh](#)
 - [Patch Conforming Method](#)
 - [Static Structural \(B5\)](#)
 - [Analysis Settings](#)
 - [Loads](#)
 - [Solution \(B6\)](#)
 - [Solution Information](#)
 - [Equivalent Stress](#)
- [Material Data](#)
 - [Structural Steel](#)

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Model (B4)

Geometry

TABLE 2
Model (B4) > Geometry

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
Definition	
Source	E:\TA\data dan drawing pipa\ansys ta_files\dp0\SYS\DM\SYS.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled

Display Style	Body Color
Bounding Box	
Length X	219, mm
Length Y	219, mm
Length Z	12000 mm
Properties	
Volume	9,8761e+007 mm ³
Mass	775,28 kg
Scale Factor Value	1,
Statistics	
Bodies	1
Active Bodies	1
Nodes	77584
Elements	38777
Mesh Metric	None
Basic Geometry Options	
Parameters	Yes
Parameter Key	DS
Attributes	No
Named Selections	No
Material Properties	No
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	No
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	No
Compare Parts On Update	No
Attach File Via Temp File	Yes

Temporary Directory	C:\Users\ACER\AppData\Roaming\Ansys\v160
Analysis Type	3-D
Decompose Disjoint Geometry	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (B4) > Geometry > Parts

Object Name	<i>Solid</i>
State	Meshed
Graphics Properties	
Visible	Yes
Transparency	1
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Length X	219, mm
Length Y	219, mm
Length Z	12000 mm
Properties	
Volume	9,8761e+007 mm ³
Mass	775,28 kg
Centroid X	3,3602e-012 mm
Centroid Y	2,5663e-002 mm
Centroid Z	6000, mm

Moment of Inertia Ip1	9,2637e+009 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip2	9,2637e+009 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip3	8,2016e+006 kg·mm ²
Statistics	
Nodes	77584
Elements	38777
Mesh Metric	None

Coordinate Systems

TABLE 4
Model (B4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	<i>Global Coordinate System</i>
State	Fully Defined
Definition	
Type	Cartesian
Coordinate System ID	0,
Origin	
Origin X	0, mm
Origin Y	0, mm
Origin Z	0, mm
Directional Vectors	
X Axis Data	[1, 0, 0,]
Y Axis Data	[0, 1, 0,]
Z Axis Data	[0, 0, 1,]

Mesh

TABLE 5
Model (B4) > Mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
Display	
Display Style	Body Color

Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Fine
Element Size	21,0 mm
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Fast
Span Angle Center	Fine
Minimum Edge Length	304,110 mm
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Patch Independent Options	
Topology Checking	No
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)

Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default
Statistics	
Nodes	77584
Elements	38777
Mesh Metric	None

TABLE 6
Model (B4) > Mesh > Mesh Controls

Object Name	<i>Patch Conforming Method</i>
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Method	Tetrahedrons
Algorithm	Patch Conforming
Element Midside Nodes	Use Global Setting

Static Structural (B5)

TABLE 7
Model (B4) > Analysis

Object Name	<i>Static Structural (B5)</i>
State	Solved
Definition	

Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Environment Temperature	22, °C
Generate Input Only	No

TABLE 8
Model (B4) > Static Structural (B5) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	No
Nonlinear Controls	
Newton-Raphson Option	Program Controlled
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled

Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	No
Contact Miscellaneous	No
General Miscellaneous	No
Store Results At	All Time Points
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	E:\TA\data dan drawing pipa\ansys ta_files\dp0\SYS\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No
Solver Units	Active System
Solver Unit System	nmm

TABLE 9
Model (B4) > Static Structural (B5) > Loads

Object Name	<i>Vortex Pressure</i>	<i>Fixed Support</i>	<i>Drag Force</i>	<i>Submerged Weight</i>	<i>Internal Pressure</i>	<i>External Pressure</i>	<i>Lift Force</i>	<i>Eff. Axial Force</i>	<i>Fixed Support 2</i>
State	Fully Defined								
Scope									
Scoping Method	Geometry Selection								
Geometry	2 Faces	1 Face	2 Faces					1 Face	
Definition									

Type	Pressure	Fixed Support	Force		Pressure		Force		Fixed Support
Define By	Normal To		Components	Vector	Normal To		Vector		
Magnitude	5,e-005 MPa (ramped)			10803 N (ramped)	6,6 MPa (ramped)	0,5 MPa (ramped)	339,38 N (ramped)	- 3,88e+005 N (ramped)	
Suppressed	No								
Coordinate System			Global Coordinate System						
X Component			356,35 N (ramped)						
Y Component			0, N (ramped)						
Z Component			0, N (ramped)						
Direction				Defined			Defined		

FIGURE 1
Model (B4) > Static Structural (B5) > Vortex Pressure

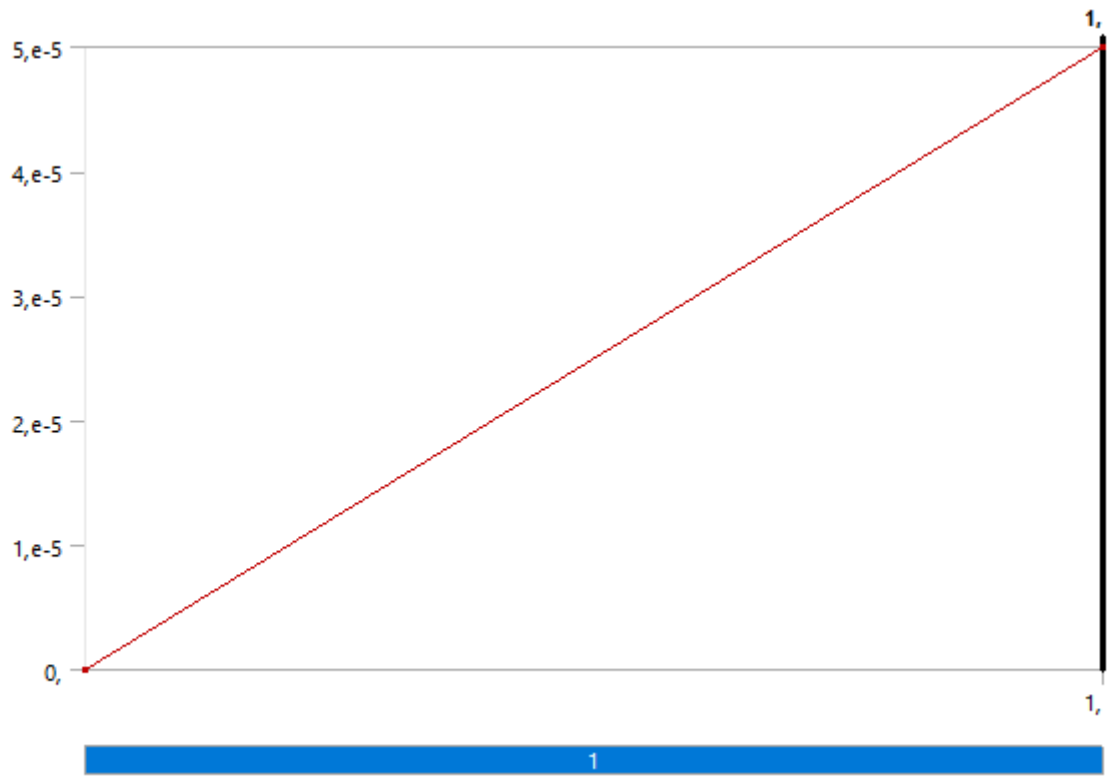


FIGURE 2
Model (B4) > Static Structural (B5) > Drag Force

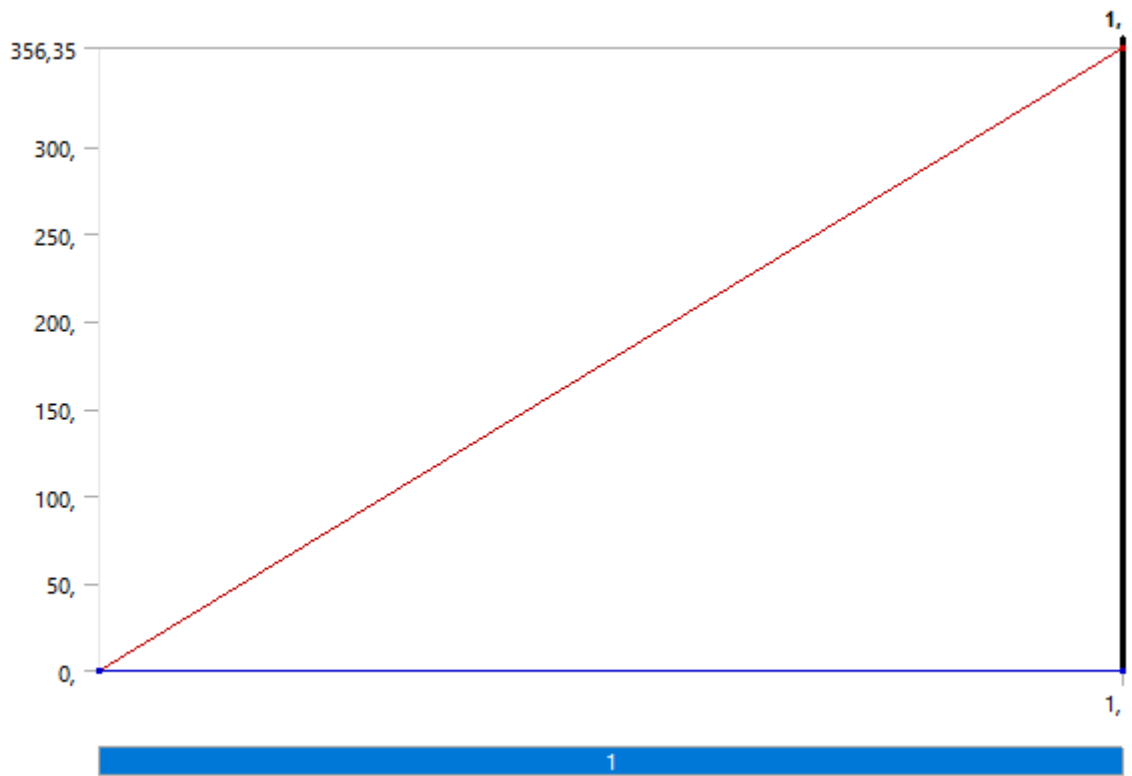


FIGURE 3
Model (B4) > Static Structural (B5) > Submerged Weight

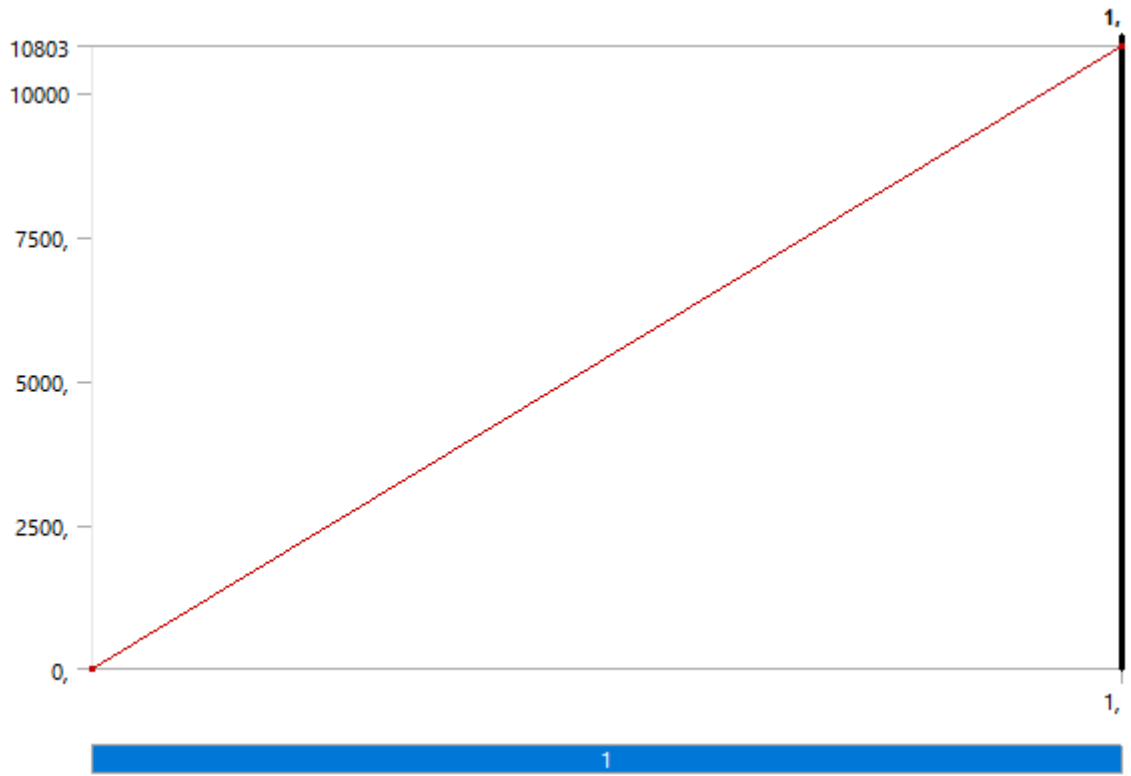


FIGURE 4
Model (B4) > Static Structural (B5) > Internal Pressure

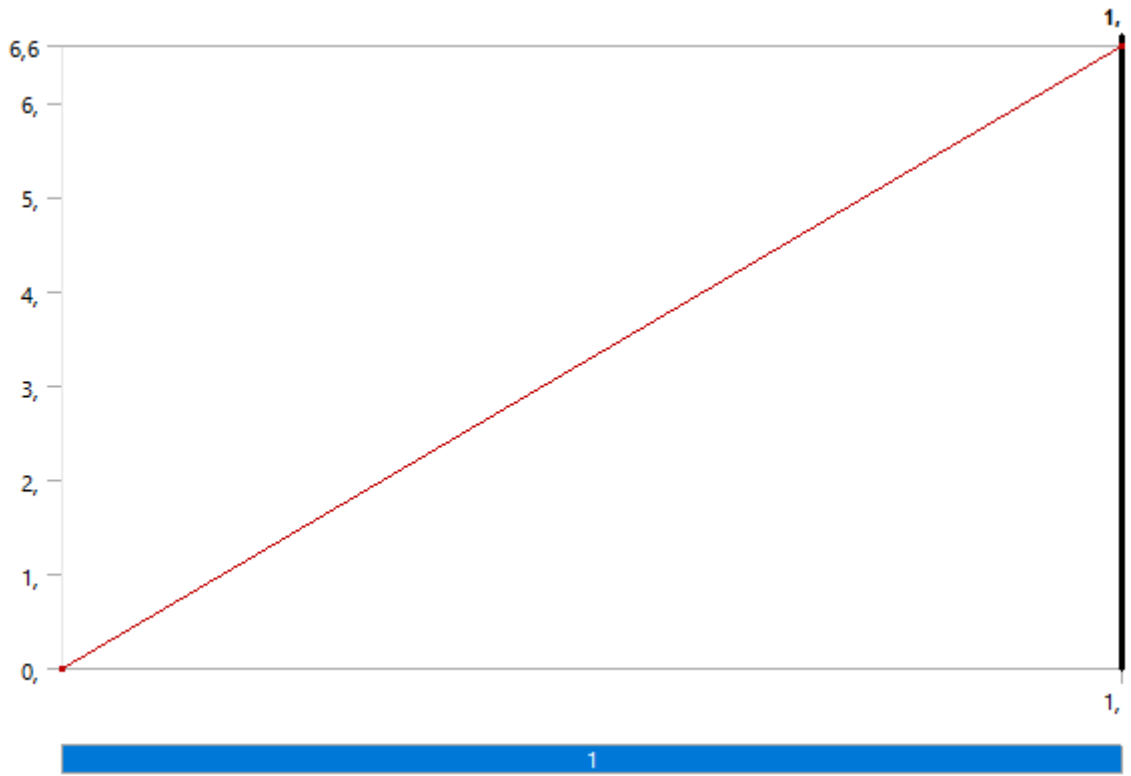


FIGURE 5
Model (B4) > Static Structural (B5) > External Pressure

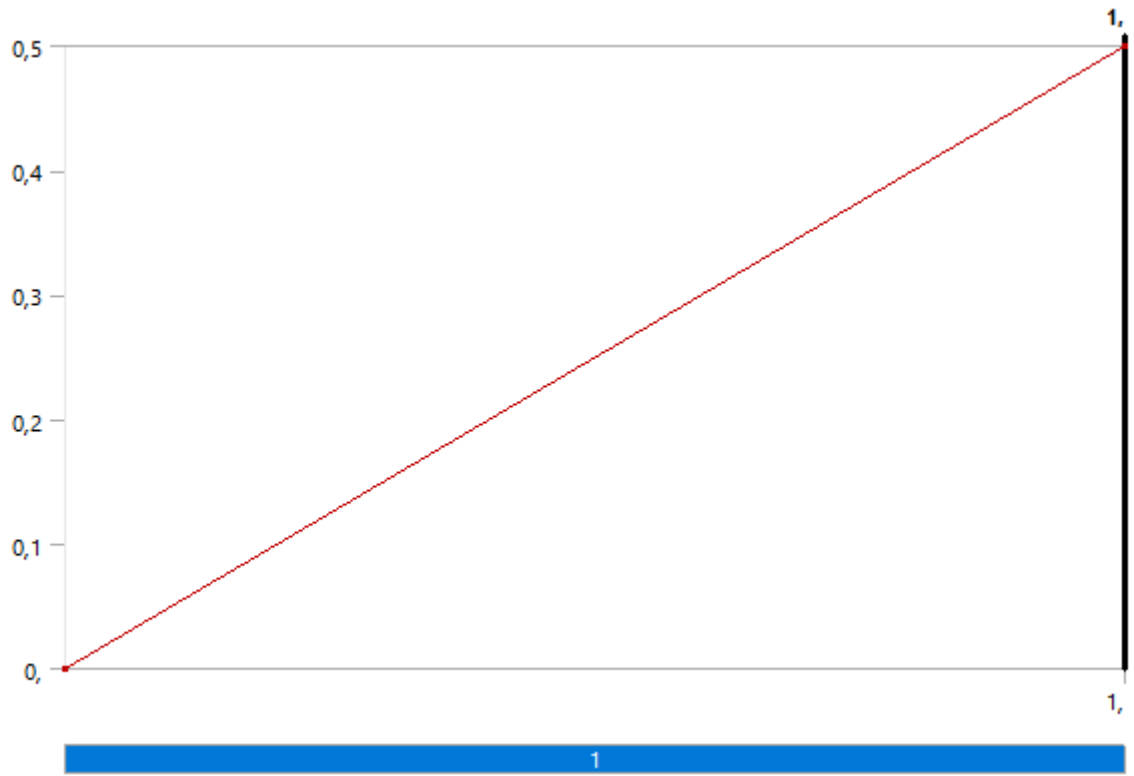


FIGURE 6
Model (B4) > Static Structural (B5) > Lift Force

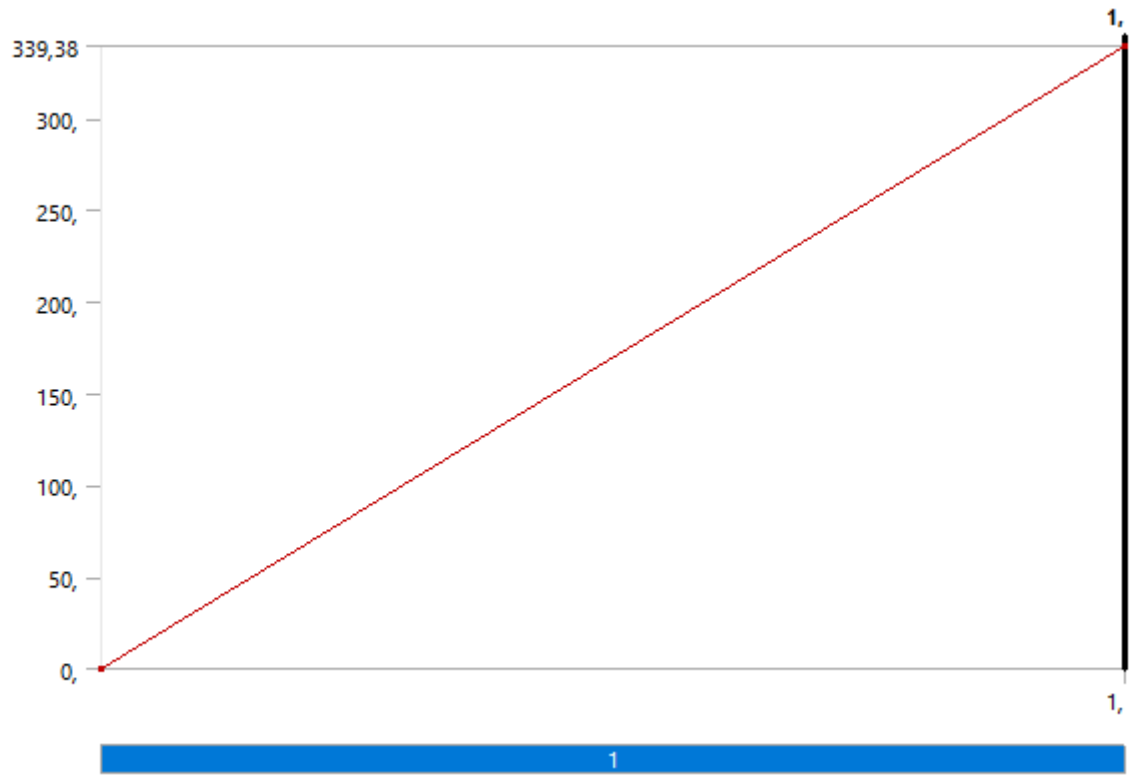
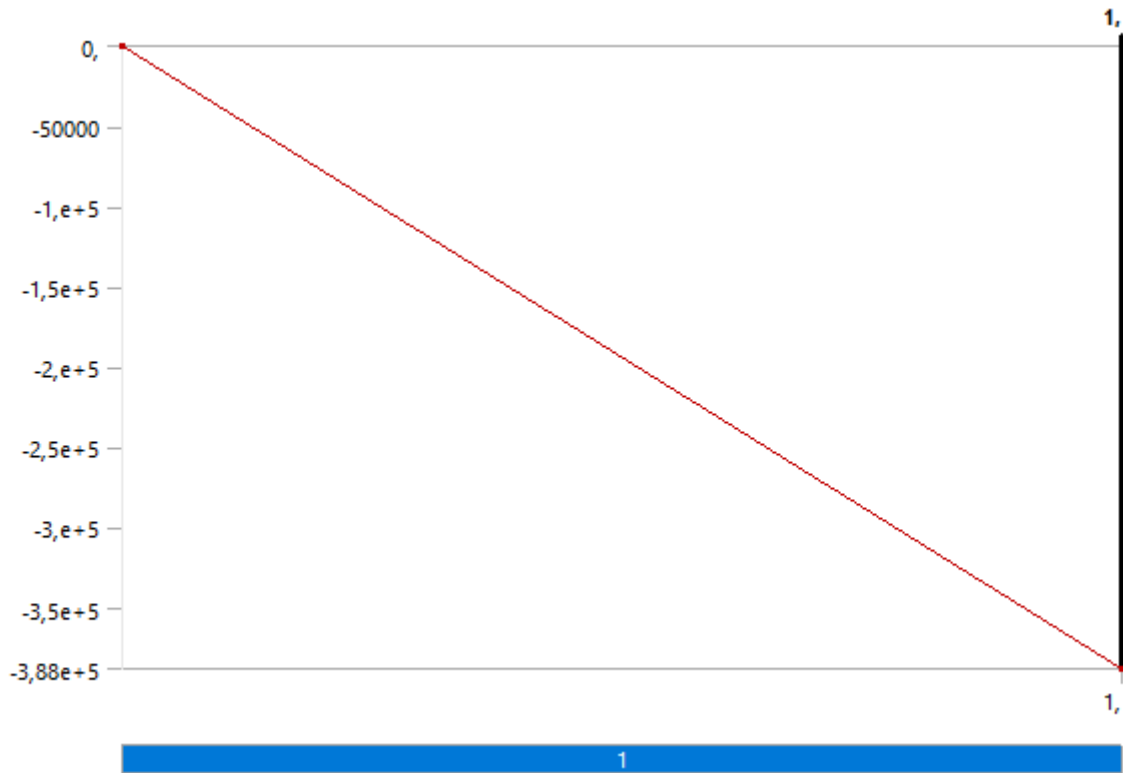


FIGURE 7
Model (B4) > Static Structural (B5) > Eff. Axial Force



Solution (B6)

TABLE 10
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution

Object Name	<i>Solution (B6)</i>
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
Information	
Status	Done
Post Processing	
Calculate Beam Section Results	No

TABLE 11
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved

Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Update Interval	2,5 s
Display Points	All
FE Connection Visibility	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

TABLE 12
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Results

Object Name	<i>Equivalent Stress</i>
State	Solved
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No

Results	
Minimum	9,3198 MPa
Maximum	82,592 MPa
Information	
Time	1, s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

FIGURE 8
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress

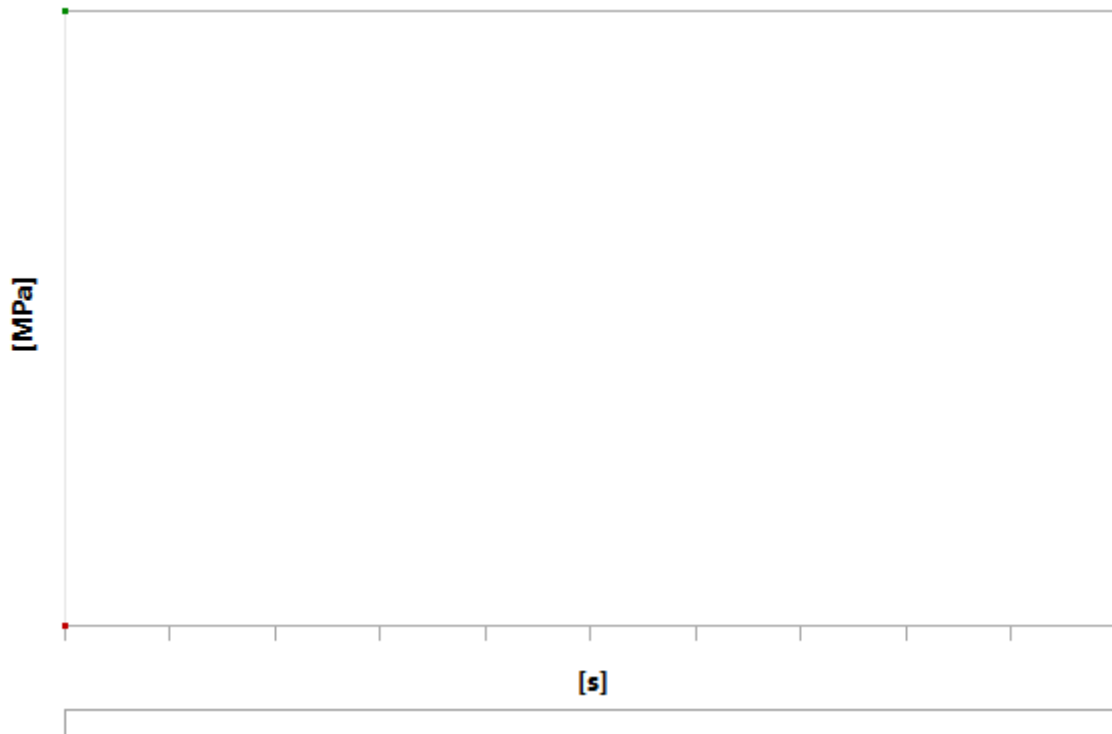


TABLE 13
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
1,	9,3198	82,592

Material Data

Structural Steel

TABLE 14
Structural Steel > Constants

Density	7,85e-006 kg mm ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	1,2e-005 C ⁻¹
Specific Heat	4,34e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹
Thermal Conductivity	6,05e-002 W mm ⁻¹ C ⁻¹
Resistivity	1,7e-004 ohm mm

TABLE 15
Structural Steel > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength MPa
0,

TABLE 16
Structural Steel > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength MPa
250,

TABLE 17
Structural Steel > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength MPa
250,

TABLE 18
Structural Steel > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength MPa
460,

TABLE 19
Structural Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

Reference Temperature C
22,

TABLE 20
Structural Steel > Alternating Stress Mean Stress

Alternating Stress MPa	Cycles	Mean Stress MPa
3999,	10,	0,
2827,	20,	0,
1896,	50,	0,

1413,	100,	0,
1069,	200,	0,
441,	2000,	0,
262,	10000	0,
214,	20000	0,
138,	1,e+005	0,
114,	2,e+005	0,
86,2	1,e+006	0,

TABLE 21
Structural Steel > Strain-Life Parameters

Strength Coefficient MPa	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient MPa	Cyclic Strain Hardening Exponent
920,	-0,106	0,213	-0,47	1000,	0,2

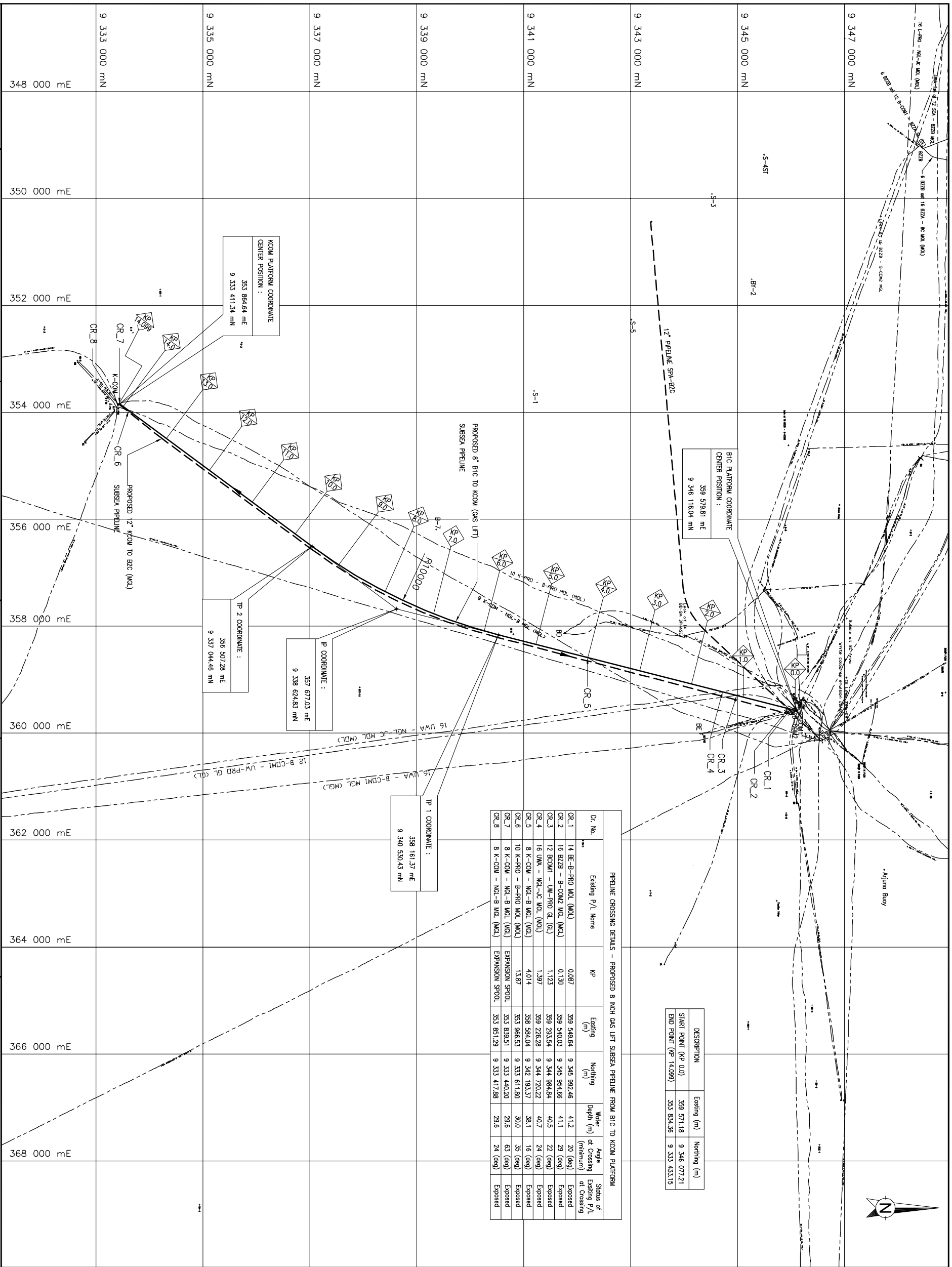
TABLE 22
Structural Steel > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa
	2,e+005	0,3	1,6667e+005	76923

TABLE 23
Structural Steel > Isotropic Relative Permeability

Relative Permeability
10000

LAMPIRAN M
PIPELINE CROSSING DETAILS DAN
PIPELINE ALIGNMENT SHEET



DESCRIPTION	Easting (m)	Northing (m)
START POINT (KP 0.0)	359 571.18	9 346 077.21
END POINT (KP 14.099)	353 534.36	9 333 433.15

Ct. No.	Existing P/L Name	KP	Existing (m)	Nothing (m)	Water Depth (m)	Angle of Crossing at Crossing (minimum)	Status of Existing P/L
CR.1	14 BE-B-PRD MGL (MGL)	0.087	359 549.64	9 345 992.46	41.2	20 (deg)	Exposed
CR.2	16 BZTB - B-COM2 MGL (MGL)	0.130	359 540.03	9 345 954.66	41.1	29 (deg)	Exposed
CR.3	12 BCOM1 - UM-FRG GL (GL)	1.123	359 293.54	9 344 994.84	40.5	22 (deg)	Exposed
CR.4	16 UWA - NGC-JC MGL (MGL)	1.397	359 228.28	9 344 720.22	40.7	24 (deg)	Exposed
CR.5	8 K-COM - NG-B MGL (MGL)	4.014	358 584.04	9 342 193.37	38.1	16 (deg)	Exposed
CR.6	10 K-FRD - B-PRD MGL (MGL)	13.87	353 966.53	9 333 611.80	30.0	35 (deg)	Exposed
CR.7	8 K-COM - NG-B MGL (MGL)	13.87	353 939.51	9 333 440.20	29.6	63 (deg)	Exposed
CR.8	8 K-COM - NG-B MGL (MGL)	EXPANSION SPOOL	353 951.29	9 333 417.88	29.6	24 (deg)	Exposed

LEGEND

- Proposed 8" BIC to KCOM (Gas Lift) Subsea pipeline route with KP (Kilometer Post) markers
- Existing pipeline extracted from PHE/ONWJ database
- Existing cable extracted from PHE/ONWJ database
- Existing Well extracted from PHE/ONWJ database

PANEL 1 : MULTIBEAM BATHYMETRY

Bathymetric soundings in metre and decimetre reduced to Mean Sea Level (MSL) using predicted tides at Tanjung Priok(5339).
 Bathymetric contour at 1 metre interval.

PANEL 2 : SEABED FEATURES

- USBL track plot, with fix number annotated at side scan sonar camera position.
- Existing pipeline
- As-found cable
- Retro-reflective node
- As found wellhead
- Support mattress
- Concrete sleepers
- Anchor scar
- Debris with identification number and dimension (Length x Width x Height) in metre.
- Note : msh is an abbreviation of non-measurable height
- Core location annotated with identification number

GEODETIC PARAMETERS :

Reference Datum : WGS 84
 Semi Major Axis : 6378 137.000 m
 Semi Minor Axis : 6356 752.314 m
 Prime Meridian : Greenwich
 Ellipsoid Eccentricity (e) : 0.006 768 000
 Ellipsoid Eccentricity (e²) : 0.000 044 380
 Local Datum : GDA95
 Semi Major Axis : 6378 137.000 m
 Semi Minor Axis : 6356 752.314 m
 Prime Meridian : Greenwich
 Ellipsoid Eccentricity (e) : 0.006 768 000
 Ellipsoid Eccentricity (e²) : 0.000 044 380
 Datum Shift Transformation : Bursa
 Translation (m) : X: 50.000, Y: -50.000, Z: 0.000
 Scale Factor : 1.000 000 000
 Rotation (mrad) : X: 0.000, Y: 0.000, Z: 0.000
 Secondary Positioning System : Vectors Positioning System, Differential Global Positioning System

NOTES :

1. ALL DIMENSIONS ARE IN METERS UNLESS NOTED OTHERWISE.
2. COORDINATES ARE SHOWN IN METERS.
3. ANY DIMS IN 10 METER ROUNDS FROM PROPOSED PIPELINE ROUTE SHALL BE REMOVED.

This drawing and the design it covers are the property of PT PHE ONWJ. It is merely loaned on borrower's expressed agreement that it will not be transmitted, reproduced or disclosed to anyone or otherwise used except privately and then only in a manner stated in the written consent by the lender.

NO	REV	DRAWING NO	REFERENCE DRAWING
1	1.0	PHEM-S0081-5001WOM-1/4-1.0	MULTIBEAM BATHYMETRY, MULTIBEAM MAPPING, SEABED FEATURES WITH POINT SONAR SHEET 1, 2, 3 AND SHEET 4 OF 4
2	1.0	PHEM-S0081-5001WOM-2/4-1.0	
3	1.0	PHEM-S0081-5001WOM-3/4-1.0	
4	1.0	PHEM-S0081-5001WOM-4/4-1.0	

REV	BY	DATE	DESCRIPTION
SK	SK	02.10.13	ISSUED FOR APPROVAL
SK	SK	10.09.13	ISSUED FOR REVIEW

CONTRACT NO : STC-0759
 WORK ORDER NO. DWE-057
 MOC NO. N/A

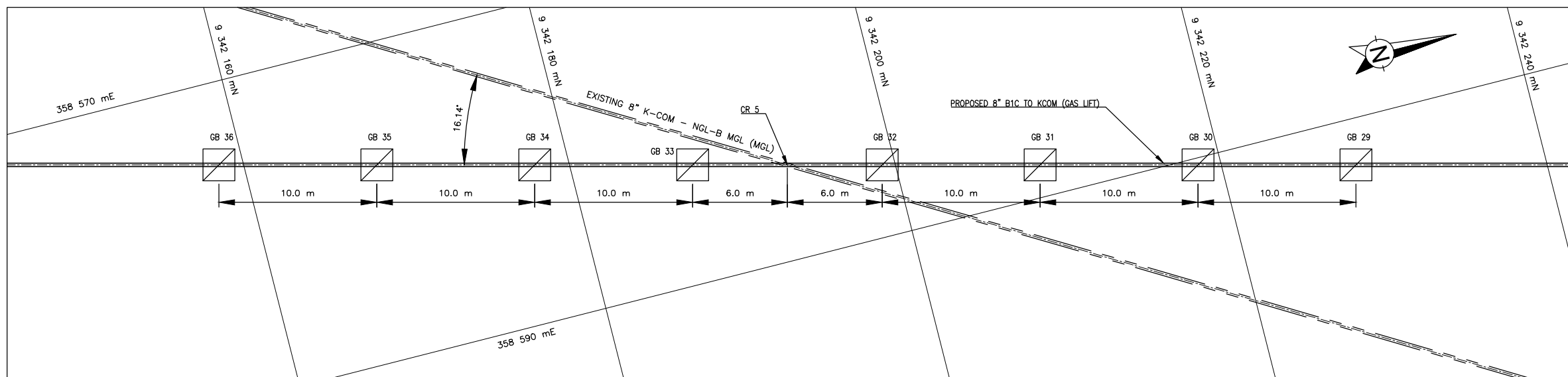
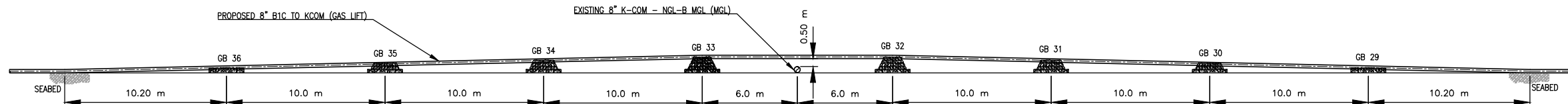
ENGINEERING APPROVAL		PT PHE ONWJ APPROVAL	
PROJECT	BY	DATE	DATE
STRUCTURAL			
MECHANICAL			
ELECTRICAL			
INSTRUMENT			
ARCHITECT			
FIRE & SAFETY			

PROJECT TITLE : KILU FIELD FURTHER DEVELOPMENT PROJECT

PT. DEPRIWANGGA ENGINEERING
 Jakarta - Indonesia

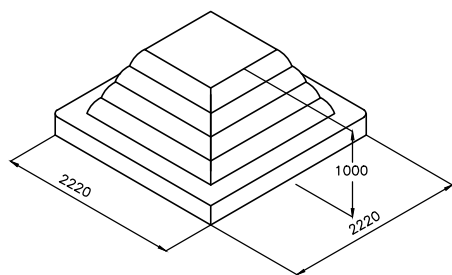
TITLE : PIPELINE ROUTE MAP/LAYOUT FOR 8" BIC-KCOM GAS LIFT PIPELINE

SCALE : 1:35000
 DRAWING NO. : BRAVO-B1C-M-PLR-5001

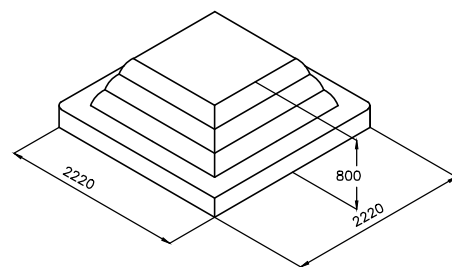


PIPELINE GROUTBAGS DATA								
SUPPORT No.	GB 29	GB 30	GB 31	GB 32	GB 33	GB 34	GB 35	GB 36
TYPE	4	3	2	1	1	2	3	4

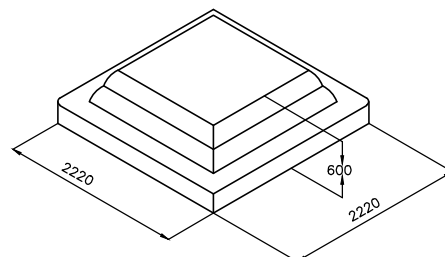
PIPELINE CROSSING DATA						
CROSSING No.	Existing P/L Name	KP	Easting (m)	Northing (m)	Angle at Crossing (minimum)	Status of Existing P/L at Crossing
CR_5	8" K-COM - NGL-B MGL (MGL)	4.007	358 584.13	9 342 193.75	16.14 (deg)	Exposed



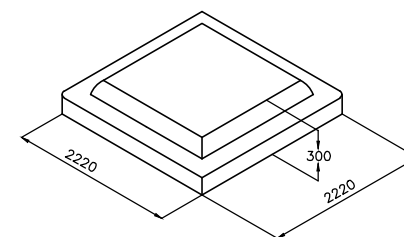
GROUTBAG TYPE 1
SCALE : NTS



GROUTBAG TYPE 2
SCALE : NTS



GROUTBAG TYPE 3
SCALE : NTS



GROUTBAG TYPE 4
SCALE : NTS

- NOTES :
- ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETER UNLESS NOTED OTHERWISE.
 - COORDINATES ARE SHOWN IN METER.
 - ALLOWABLE SPAN FOR 8" B1C-KCOM GAS LIFT PIPELINE IS 19.3 m AND 12.9 m FOR INSTALLATION AND OPERATING CONDITION RESPECTIVELY. FOR DETAIL, SEE DOC. NO. KILO-W-CAL-0104
 - GROUTBAG OR CONCRETE MATTRESS SHALL BE USED FOR THE PIPELINE CROSSING. EPCI CONTRACTOR TO VERIFY AND FINALIZE THE DESIGN & CONFIGURATION OF GROUTBAG OR CONCRETE MATTRESS BASED ON DESIGN AND INSTALLATION REQUIREMENT. NON-STANDARD SIZE CAN BE CONSIDERED IF NECESSARY.
 - EPCI CONTRACTOR TO ENSURE PIPELINE CAN REST ONTO ALL THE SUPPORTS. IF NECESSARY, SMALL DREDGING TO BE CARRIED OUT IN CASE THE SUPPORT IS TOO HIGH, OR ADDITIONAL GROUING TO BE PROVIDED IN CASE THERE IS STILL A GAP.
 - ADDITIONAL SUPPORT TO BE PROVIDED BY EPCI CONTRACTOR IF THERE IS STILL FREE SPAN MORE THAN ALLOWABLE.

CAD FILE NAME : BRAVO-B1C-M-PLR-5003-2.DWG
OLD DRAWING NO. :

This drawing and the design it covers are the property of PT PHE ONWJ. It is merely loaned on borrower's expressed agreement that it will not be transmitted, reproduced or disclosed to anyone or otherwise used except privately and then only in a manner stated in the written consent by the lender.

REFERENCE DRAWING :		
NO	DRAWING NO	REFERENCE DRAWING
1	BRAVO-B1C-M-PLR-5001	PIPELINE FIELD LAYOUT 8" B1C-KCOM GAS LIFT PIPELINE

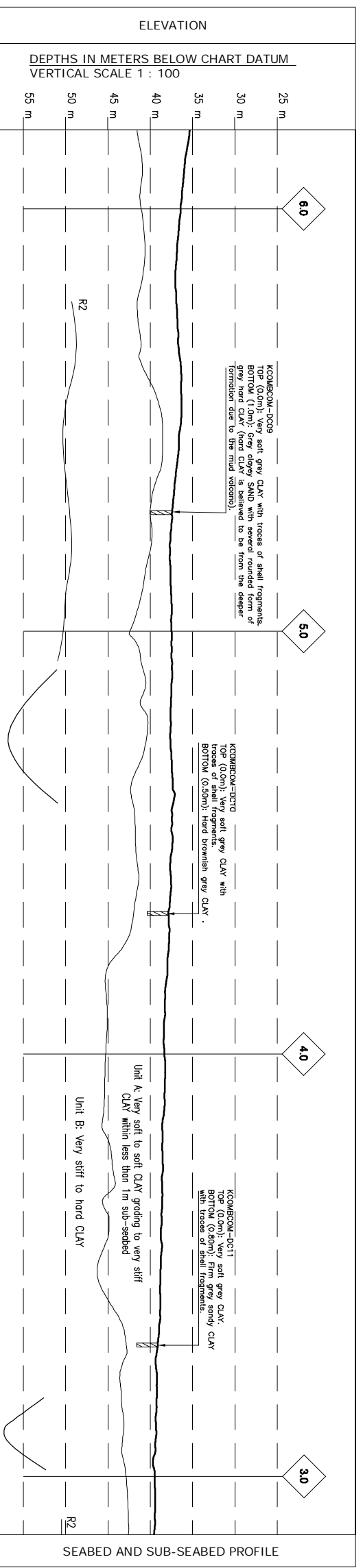
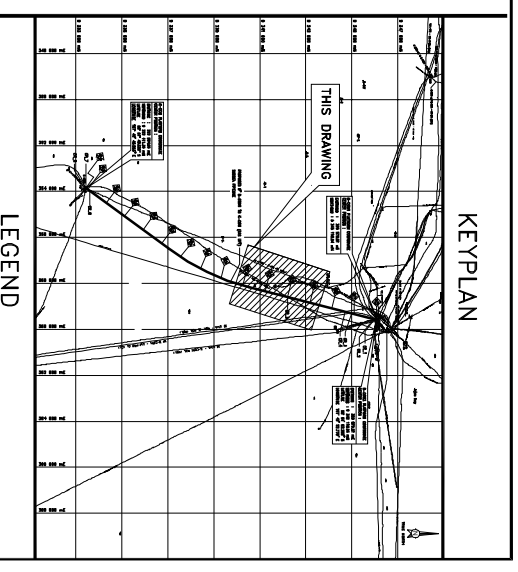
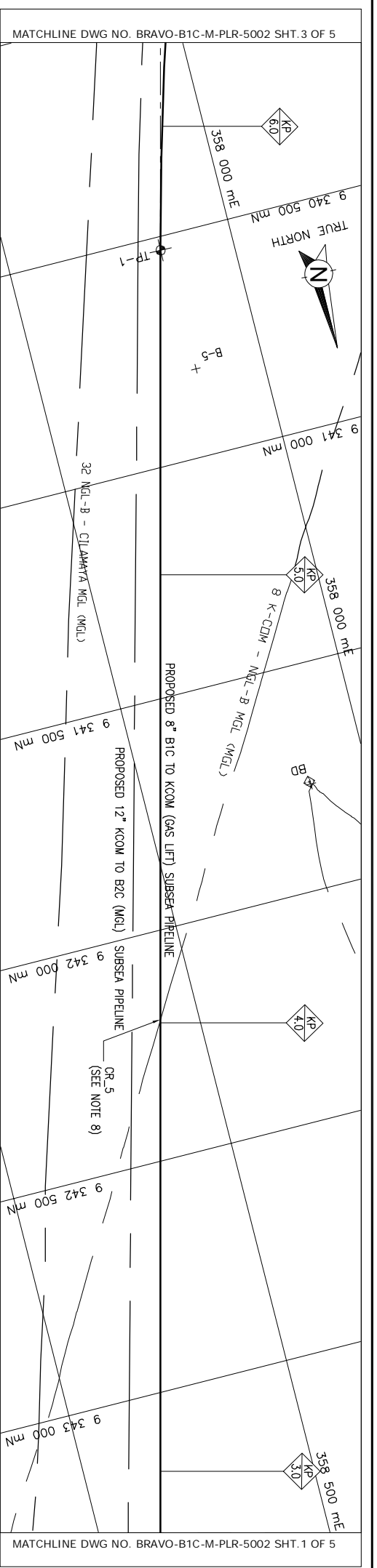
CONTRACT NO : STC-0759				WORK ORDER NO. DWE-057			MOC NO. N/A		
REVISIONS	REV	BY	DATE	DESCRIPTION	DRFT'G	CHECKED	APPROVED	ENGINEERING APPROVAL	PT PHE ONWJ APPROVAL
	△	KBN	08.04.14	RE-ISSUED FOR BID				BY	DATE
	△	KBN	08.01.14	ISSUED FOR BID	KBN	AP/LR	SUT		
	△	KBN	20.12.13	ISSUED FOR APPROVAL	KBN	AP/LR	SUT		
	△	KBN	15.11.13	ISSUED FOR REVIEW	KBN	AP/LR	SUT		

PROJECT TITLE : KILO FIELD FURTHER DEVELOPMENT PROJECT						
PROJECT	STRUCTURAL	MECHANICAL	ELECTRICAL	INSTRUMENT	ARCHITECT	FIRE & SAFETY
DATE:	DATE:	DATE:	DATE:	DATE:	DATE:	DATE:

PERTAMINA
PHE ONWJ

PT. DEPRIWANGGA ENGINEERING
Jakarta - Indonesia

TITLE		
PIPELINE CROSSING DETAILS 8" B1C-KCOM GAS LIFT PIPELINE		
SHEET 4 OF 6		
SCALE 1:150	DRAWING No. BRAVO-B1C-M-PLR-5003	REV. 2



KILOMETER POINT (PIPELINE ROUTE)	6.0	5.0	4.0	3.0
PIPE SIZE AND GRADE	8 625 000 API SL-GRADE X52 MO/00/NO PSL 2 GS	12.7 mm		
PIPELINE WALL THICKNESS	4 mm ASPHALT ENAMEL 1281.5 kg/m ³			
CORROSION COATING THICKNESS AND TYPE	38 mm			
CONCRETE COATING THICKNESS	DIR (EMPTY) = 141.42 kg/m SUB (EMPTY) = 74.7 kg/m SUB (HYDROTEST) = 104.3 kg/m SUB (OPERATING) = 79.70 kg/m SPECIFIC GRAVITY = 1.98 (operating pipeline submerged weight w/ max content density)			
WEIGHT OF PIPE	PIPELINE : 2165 kg BRACELET ANODE, EVERY 18 PIPE JOINT SPACING RISER : ONE (1) NUMBER OF ANODE, LOCATED AT BOTTOM OF RISER/EXPANSION SPOOL			
ANODE DETAILS (NOTE 5)	INSTALLATION : 19.2 m FLOOD : 19.6 m HYDROTEST : 18.3 m OPERATING : 13.4 m			
PIPELINE ALLOWABLE SPANS (NOTE 4)	UNBURIED			
TRENCHING/BURIAL REQUIREMENTS	HEAT SHRINKABLE SLEEVE WITH DENSITY POLYURETHANE FOAM			
FIELD JOINT COATING	DESIGN PRESSURE = 950 Psig HYDROTEST PRESSURE = 1330 Psig OPERATING PRESSURE = 660 Psig MECHANICAL DESIGN TEMPERATURE = 200 F OPERATING TEMPERATURE = 110 F			
DESIGN/OPERATING PRESSURE TEMPERATURE	VERY SOFT CLAY			
SOIL CHARACTERISTICS				

PIPELINE ENGINEERING DATA

REFERENCE DRAWING :	CONTRACT NO. : STC-0739	WORK ORDER NO. DWE-057	MOC NO. N/A	PROJECT TITLE : FEED FOR KILO FIELD FURTHER DEVELOPMENT PROJECT
DRAWING NO	TITLE DRAWING			
1	PHEOMW-SIC 0811	MULTIBEAM BATHYMETRY, MULTIBEAM WME, SCARED FEATURES WITH SIE SCAN SWMR		
2	BRM0-B1C-M-PLR-5001	PIPELINE ROUTE & B1C-KCOM-GAS LIFT PIPELINE		

REVISIONS		ENGINEERING APPROVAL		PT PHE ONWU APPROVAL	
NO	DESCRIPTION	BY	DATE	DATE	DATE
1	ISSUED FOR BID				
2	ISSUED FOR APPROVAL				
3	ISSUED FOR REVIEW				

This drawing and the design it covers are the property of PT PHE ONWU. It is merely loaned on borrower's expressed agreement that it will not be transmitted, reproduced or disclosed to anyone or otherwise used except privately and then only in a manner stated in the written consent by the lender.

- NOTES**
- ALL DIMENSIONS ARE IN METERS UNLESS NOTED OTHERWISE.
 - COORDINATES ARE SHOWN IN METERS.
 - THE DATA ARE BASED ON REFERENCE DRAWING (1) AND REFERENCE DRAWING (2)
 - ALLOWABLE FREE SPAN REFER TO PIPELINE FREE SPAN CALCULATION PIPELINE DOC. KILO-W-CAL-0104
 - ANODE TYPE, NUMBERS & SPACING REFER TO PIPELINE CATHODIC PROTECTION ANALYSIS DOC. KILO-W-CAL-0106
 - CUT POINT & LOCATION MARGE ADJUSTED AS PER SITE CONDITION.
 - ANY DEBRIS IN 10 METER RADII FROM PROPOSED PIPELINE ROUTE SHALL BE REMOVED.
 - REFER TO REF (2) FOR CROSSING COORDINATE.

GEODETIC PARAMETER

KCOM-0021-13

REFERENCE DATA	WGS 84	PROJECTION	Universal Mercator (U)
Spheroid	6378 1372.021 m	Latitude of Origin	0° 00' 00"
Semi-Major Axis (a)	6378 1372.021 m	Longitude of Origin	102° 00' 00"
Semi-Minor Axis (b)	6356 583.875 m	False Northing	10 000 000 m
Inverse Flattening (1/f)	298.257222101	False Easting	500 000 m
Geocentric Flattening (1/f')	0.004434499735	Coordinate System	UT Zone
Geoid Height (m)	0.000 000	Units	Meters

LEGEND

- Proposed 8" B1C to KCOM (Gas Lift) Subsea pipeline route with KP (Kilometer Post) markers
- Existing pipeline extracted from PHE/ONWU database
- Existing cable extracted from PHE/ONWU database
- Existing Well extracted from PHE/ONWU database

PANEL 1 : MULTIBEAM BATHYMETRY

Bathymetric soundings in meter and decimeter reduced to Mean Sea Level (MSL) using predicted tides of Tanjung Priok(6339).

Bathymetric contour at 1 metre interval.

PANEL 2 : SEABED FEATURES

USBL track plot, with fix number annotated at side scan sonar towfish position

EXISTING pipeline

As-found cable

Redo-rf anode pod

As found wellhead

Support mattress

Concrete sleepers

Anchor scar

Dredge marks

Jack-up footprint

Debris with identification number and dimension (Length x Width x Height) in metre

Note : mth is an abbreviation of non-measurable height

GEODETIC PARAMETER

KCOM-0021-13

PIPELINE ALIGNMENT SHEET

8" B1C-KCOM GAS LIFT PIPELINE

KP3.0-6.0 (SHEET 2 OF 5)

SCALE AS SHOWN DRAWING NO. BRAVO-B1C-M-PLR-5002



BIODATA PENULIS



Ari Affandi lahir di Tangerang pada tanggal 02 September 1997. Penulis menjalani pendidikan formal SD selama 6 tahun di SDN 1 Tangerang, kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 2 Tangerang dan SMA Negeri 2 Tangerang. Setelah lulus pada tahun 2015, penulis mengikuti SNMPTN dan diterima di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Sepuluh Nopember, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menempuh masa perkuliahan, penulis aktif di Society of Petroleum Engineer dan Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan sebagai Staff di Departemen Organisasi dan diberikan amanah untuk menjadi Kepala Divisi Kuliah Lapangan di Departemen Keprofesian HIMATEKLA Gradasi periode 2017-2018. Penulis juga aktif dalam dunia Latihan Keterampilan Manajerial Mahasiswa (LKMM) dan juga aktif mengurus beberapa big event di ITS dan Departemen seperti Petrolida dan Oceano. Selain aktif dalam kegiatan organisasi dan kepanitiaan, penulis juga pernah menjadi Tutor untuk Mata Kuliah Tugas Rancang Besar 2 dengan mengajarkan software SACS. Penulis juga diberi kesempatan untuk bisa Kerja Praktek di PT. Depriwangga Engineering pada bulan Juli-Agustus 2018, penulis ditempatkan pada bagian Pipeline serta Structural Engineering untuk beberapa proyek yang sudah dan sedang dikerjakan oleh Perusahaan. Salah satunya proyek pipeline di KILO Field serta melakukan perhitungan in-place, fatigue, dan seismic untuk proyek penambahan Trafo Platform XMA dengan menggunakan software SACS.

Narahubung :

Email : ariaffandi17@gmail.com