



TUGAS AKHIR - MO184804

ANALISIS *ON-BOTTOM STABILITY* PIPA RTP (*REINFORCED THERMOPLASTIC PIPE*) SEBAGAI SARANA PENYALUR GAS BAWAH LAUT

Hirsto Eirsan Marstahan

NRP. 04311640000030

Dosen Pembimbing :

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknolgi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020



FINAL PROJECT - MO184804

***ON-BOTTOM STABILITY ANALYSIS OF REINFORCED
THERMOPLASTIC PIPES AS UNDERWATER GAS
DISTRIBUTION FACILITIES***

Hirsto Eirsan Marstahan

NRP. 04311640000030

Supervisors :

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN OF OCEAN ENGINEERING
Faculty of Marine Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2020

**ANALISIS ON-BOTTOM STABILITY PIPA RTP
(REINFORCED THERMOPLASTIC PIPE) SEBAGAI SARANA PENYALUR
GAS BAWAH LAUT**

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

HIRSTO EIRSAN MARSTAHAN

04311640000030

Disetujui oleh :

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

2. Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.T., Ph.D. (Pembimbing II)

3. Ir. Handyanu, M.Sc., Ph.D. (Penguji I)

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



Handwritten signature

Handwritten signature

SURABAYA, JANUARI 2020

**ANALISIS *ON-BOTTOM STABILITY* PIPA RTP
(*REINFORCED THERMOPLASTIC PIPE*) SEBAGAI SARANA
PENYALUR GAS BAWAH LAUT**

Nama : Hirsto Eirsan Marstahan
NRP : 04311640000030
Departemen : Teknik Kelautan
Dosen Pembimbing : Ir. Imam Rochani, M.Sc.
Dr. Eng Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

ABSTRAK

Pipa bawah laut merupakan salah satu sarana penyalur migas yang paling banyak digunakan oleh industri. Pada penggunaan pipa bawah laut, stabilitas di dasar laut menjadi hal yang harus diperhatikan. Pipa bawah laut yang di instalasi di dasar laut harus mampu menahan beban lingkungan terutama gelombang dan arus. Pada tugas akhir ini dilakukan analisis terhadap stabilitas pipa *reinforced thermoplastic pipe* sebagai sarana penyalur gas bawah laut berdasarkan standar DNVGL RP F109 tentang “*On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines*”. Analisis yang dilakukan meliputi analisis stabilitas vertikal dan lateral. Berdasarkan acuan tersebut, pipa bawah laut dapat dikatakan stabil apabila memiliki nilai *design criteria* kurang dari atau sama dengan satu baik secara vertikal maupun lateral. Selain itu pipa bawah laut dikatakan stabil apabila pergerakan lateralnya kurang dari 0.5D pada zona 2. Dari hasil analisis diketahui bahwa konfigurasi beton pemberat seberat 332 kg dengan interval peletakkan tiap 5 meter memiliki nilai *design criteria* sebesar 0,18 pada kondisi instalasi dan 0,77 pada kondisi operasi di kilometer point 2.2. Dari hasil simulasi dinamis *software* OrcaFlex didapatkan nilai pergerakan lateral maksimum yang terjadi pada zona 2 adalah sebesar 2,17mm pada kondisi instalasi dan 34,39mm pada kondisi operasi. Berdasarkan hasil kriteria-kriteria tersebut, pipa RTP dengan konfigurasi pemberat demikian dapat dikatakan stabil untuk meletak di dasar laut.

Kata kunci: *On-Bottom Stability, Reinforced Thermoplastic Pipe, Beton Pemberat, Gas Bawah Laut, OrcaFlex*

**ON-BOTTOM STABILITY ANALYSIS OF REINFORCED
THERMOPLASTIC PIPES AS UNDERWATER GAS
DISTRIBUTION FACILITIES**

Name : Hirsto Eirsan Marstahan
NRP : 04311640000030
Departement : Ocean Engineering
Supervisors : Ir. Imam Rochani, M.Sc.
Dr. Eng Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

ABSTRACT

The submarine pipeline is one of the oil and gas distribution facilities most widely used by industry. In the use of submarine pipelines, stability on the seabed becomes a matter that must be considered. Subsea pipelines installed on the seabed must be able to withstand environmental loads, especially waves and currents. In this final project, an analysis of the stability of the reinforced thermoplastic pipe as an underwater gas distribution facility is based on DNVGL RP F109 standard about "On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines". The analysis included vertical and lateral stability analyzes. Based on these references, the underwater pipeline can be said to be stable if it has a design criteria value of less than or equal to 1(one) both vertically and laterally. In addition, the underwater pipeline is said to be stable if the lateral movement is less than 0.5D in zone 2. From the results of the analysis it is known that the 332 kg weights concrete configuration with laying intervals 5 meters has a design criteria value of 0.18 under installation conditions and 0.77 in operating conditions at kilometer point 2.2. From the dynamic simulation results of the OrcaFlex software, the maximum lateral movement value in zone 2 is 2.17mm in the installation condition and 34.39mm in the operating condition. Based on the results of these criteria, the RTP pipe with such ballast configuration can be said to be stable to place on the seabed.

Keywords: *On-Bottom Stability, Reinforced Thermoplastic Pipe, Concrete Weight, Underwater Gas, OrcaFlex*

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah ﷻ , Dzat yang hanya kepada-Nya kita menyembah, memuji, dan memohon pertolongan. Karena atas berkah rahmat serta kasih sayang-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. Tak lupa shalawat serta salam juga penulis haturkan kepada Nabi Muhammad ﷺ , penghulu para Nabi dan Rasul serta penutup risalah kenabian.

Tugas Akhir ini berjudul “Analisis On-Bottom Stability Pipa RTP (Reinforced Thermoplastic Pipe) Sebagai Sarana Penyalur Gas Bawah Laut”. Penyusunan Tugas Akhir ini berguna untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Penulis berharap penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi penulis, pembaca, serta bagi pihak-pihak yang terkait didalam penyusunan laporan ini terutama di bidang rekayasa kelautan. Laporan ini tentu masih jauh dari kata sempurna, oleh karena itu penulis sangat menerima masukan dan saran dari semua pihak agar kedepannya laporan ini menjadi lebih baik lagi.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakaatuh

Surabaya, 14 Januari 2020

Penulis

Hirsto Eirsan Marstahan

UCAPAN TERIMA KASIH

Selama penyelesaian Tugas Akhir ini, penulis tidak terlepas dari bantuan dan motivasi yang tulus dan ikhlas dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Orang tua dan keluarga besar penulis yang senantiasa mendukung baik secara finansial maupun moral sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan lancar.
2. Bapak Ir. Imam Rochani, M.Sc. selaku dosen pembimbing I dan Bapak Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan waktu dan bimbingan kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Herman Pratikno, S.T., M.T., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Kelautan FTK ITS.
4. Bapak Dr. Ir. Hasan Ikhwan, M.Sc. selaku Dosen Wali penulis yang telah banyak memberikan bimbingan dan arahan dalam menjalani masa perkuliahan hingga selesai.
5. Bapak Agro Wisudawan, S.T., M.T. selaku Dosen Wali penulis ketika dua tahun pertama diperkuliahan yang telah percaya terhadap kemampuan penulis dan selalu memberi nasihat selama perkuliahan.
6. Mentor penulis selama menjalani Kerja Praktik di PT. PHE ONWJ, khususnya Bapak Edim Toto Sinulingga, Bapak Aditya Pratama, Bapak Januar Adi Murdani, dan seluruh keluarga divisi Brownfield and Pipeline Repair Replacement Project yang telah membimbing penulis semasa kerja praktik.
7. Karyawan PT. ZEE Indonesia, khususnya Bapak Agus Budiono, Bapak Angga, dan Mas Faris yang telah memperbolehkan penulis untuk berkonsultasi dan belajar walaupun hanya sehari di perusahaan.
8. Teman-teman Adhiwamastya P56-L34 yang telah menjadi keluarga kecil penulis selama menjalani perkuliahan di Departemen Kelautan.
9. Kakak-kakak tingkat penulis Tritonous P55-L33 dan Maelstrom P54-L32 yang telah membantu penulis menjalani perkuliahan selama ini.

10. Kakak-kakak tingkat dan teman-teman pengurus Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS yang selalu memberikan dukungan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
11. Keluarga LDD Bahrul Ilmi FTK ITS yang selalu memotivasi penulis untuk semangat menyelesaikan kuliah dengan niat untuk berbakti kepada orang tua dan bisa segera bermanfaat untuk orang lain.
12. Keluarga besar UKM Robotika ITS yang telah mendukung penulis dalam menjalani perkuliahan serta memberikan tempat berbagi diluar departemen.
13. Teman-teman kerja praktik saya Mas Zullian, Mas Novian, Aziz, dan Krisna yang telah menemani dan membantu penulis selama kerja praktik hingga akhirnya penulis mengambil tema tugas akhir dari topik kerja praktik.
14. Semua pihak lain yang tidak bisa disebutkan satu per satu yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian tugas akhir ini.

“Jazakumullah Khairan Katsiran Wa Jazakumullah Ahsanal Jaza”

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK.....	iv
KATA PENGANTAR.....	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xii
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan	3
1.4. Manfaat Penelitian	4
1.5. Batasan Masalah	4
1.6. Sistematika Penulisan	4
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1. Tinjauan Pustaka.....	7
2.2. Dasar Teori.....	8
2.2.1. <i>On-Bottom</i> Stability Pipa RTP	8
2.2.2. Kondisi Gelombang dan Arus	11
2.2.3. Tahanan Tanah	17
2.2.4. Gaya Reduksi.....	20
2.2.5. <i>On-Bottom Stability Analysis</i>	23
METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1. Diagram Alir Penelitian	33
3.2. Penjelasan Diagram Alir	34
ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1. Pengumpulan Data.....	37
4.2. Perhitungan Berat Terendam	39
4.3. Pengecekan <i>Vertical Stability Criteria</i>	40
4.4. Perhitungan Wave Induced Parameter.....	40
4.5. Perhitungan Kecepatan Arus <i>Steady</i>	42
4.6. Perhitungan Penetrasi Total Pipa.....	42

4.7. Perhitungan Gaya Tahanan Pasif Tanah.....	43
4.8. Perhitungan Faktor Beban Reduksi Total.....	44
4.9. Perhitungan Beban Puncak.....	44
4.10. Pengecekan Lateral Stability Criteria.....	46
4.11. Pemodelan Menggunakan <i>Software</i> OrcaFlex.....	47
4.11.1. Pemodelan Pipa Fleksibel.....	47
4.11.2. Hasil Pemodelan Stabilitas Dinamis.....	51
4.12. Pembahasan Hasil Analisis <i>On-Bottom Stability</i>	53
4.13. Pembahasan Analisis <i>On-Bottom Stability</i> pada <i>Sloping Seabed</i>	54
KESIMPULAN DAN SARAN.....	57
5.1. Kesimpulan.....	57
5.2. Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA.....	59
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Denah Lokasi Platform LE – LD (Sumber : Dokumen PT. X).....	3
Gambar 2.1 Strategic and Gravity Anchor (Y. Bai <i>et al</i> , 2014)	9
Gambar 2.2 Rock Bolt (Y. Bai <i>et al</i> , 2014)	9
Gambar 2.3 Concrete Matresses (Y. Bai <i>et al</i> , 2014)	10
Gambar 2.4 Rock Dumping (Y. Bai <i>et al</i> , 2014)	10
Gambar 2.5 Kecepatan Amplitudo Signifikan Terhadap Dasar Laut	14
Gambar 2.6 <i>Mean Zero-up Crossing Period</i> Osilasi Aliran Pada Dasar Laut.....	14
Gambar 2.7 Faktor Reduksi Akibat Arah Dan Persebaran Gelombang	16
Gambar 2.8 <i>Soil Passive Resistance</i> (DNVGL RP F109, 2017)	18
Gambar 2.9 Definisi Penetrasi Pipa (DNVGL RP F109, 2017)	21
Gambar 2.10 Reduksi Beban Akibat Penetrasi (DNVGL RP F109, 2017)	21
Gambar 2.11 Parameter Trenching (DNVGL RP F109, 2017)	22
Gambar 2.12 Reduksi Beban Akibat <i>Trenching</i> (DNVGL-RP-F109, 2017).....	23
Gambar 2.13 Gaya-gaya Yang Bekerja pada Pipa Bawah Laut (Mousselli, 1982).....	23
Gambar 2.14 Stabilitas Pipa Bawah Pada <i>Sloping Seabed</i> Kondisi <i>Downslope</i> (Gao dan Han, 2012)	29
Gambar 2.15 Stabilitas Pipa Bawah Pada <i>Sloping Seabed</i> Kondisi <i>Upslope</i> (Gao dan Han, 2012)	30
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	33
Gambar 4.1 Model <i>Line Element</i> OrcaFlex (Manual, 2008)	48
Gambar 4.2 Pemodelan Menggunakan Orcaflex Tampak Atas.....	49
Gambar 4.3 Pemodelan Menggunakan Orcaflex Tampak Longitudinal	50
Gambar 4.4 Pemodelan Menggunakan Orcaflex Tampak Transversal.....	50
Gambar 4.5 <i>Longitudinal Seabed Profile</i> Pada Orcaflex.....	50
Gambar 4.6 Pemodelan Menggunakan Orcaflex Tampak 3 Dimensi	51
Gambar 4.7 Pergerakan Lateral Pipa Sepanjang Rute Saat Kondisi Instalasi	52
Gambar 4.8 Pergerakan Lateral Pipa Sepanjang Rute Saat Kondisi Operasi	53

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kekasaran Dasar Laut (DNVGL-RP-F109, 2017)	17
Tabel 2.2 Safety Factor Kondisi Badai Musim Dingin (DNVGL RP F109, 2017).....	25
Tabel 2.3 Safety Factor Kondisi Cyclone (DNVGL RP F109, 2017)	25
Tabel 2.4 Koefisien Beban Puncak Horizontal (DNVGL RP F109, 2017)	26
Tabel 2.5 Koefisien Beban Puncak Vertikal (DNVGL RP F109, 2017)	26
Tabel 4.1 Properti Pipa	37
Tabel 4.2 Data Batimetri.....	37
Tabel 4.3 Data Operasi	38
Tabel 4.4 Data Metaocean	38
Tabel 4.5 Data Perairan.....	38
Tabel 4.6 Data Tanah.....	39
Tabel 4.7 Tabel Properti Pipa	39
Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Berat Terendam.....	39
Tabel 4.9 Hasil Perhitungan <i>Vertical Stability Criteria</i>	40
Tabel 4.10 Hasil Perhitungan <i>Wave Induced Parameter</i> pada KP 0.0	41
Tabel 4.11 Hasil Perhitungan <i>Wave Induced Parameter</i> pada KP 2.2	41
Tabel 4.12 Nilai Faktor Beban Reduksi Total	44
Tabel 4.13 Nilai <i>Peak Load Coefficient</i>	45
Tabel 4.14 Besar Beban Puncak Yang Bekerja Pada Pipa	46
Tabel 4.15 Hasil Perhitungan Lateral Stability Criteria.....	47
Tabel 4.16 Hasil Validasi Properti Pipa dan Beton Pemberat Kondisi Instalasi	51
Tabel 4.17 Hasil Validasi Properti Pipa dan Beton Pemberat Kondisi Operasi	51
Tabel 4.18 Hasil Simulasi <i>Software Orcaflex</i>	52
Tabel 4.19 Hasil Perhitungan <i>Vertical Stability Criteria</i>	53
Tabel 4.20 Perbandingan Hasil <i>Lateral Stability Criteria</i> dengan <i>Maximum Lateral Displacement</i> Menggunakan <i>Software</i>	53
Tabel 4.21 Hasil <i>Coefficient of Critical Lateral Soil Resistance</i>	55

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi dan perindustrian yang semakin maju menuntut pemenuhan energi yang terus menerus dengan jumlah yang selalu meningkat dari waktu ke waktu. Salah satu sumber energi yang banyak diminati oleh industri ialah minyak dan gas. Kebergantungan manusia akan minyak dan gas tersebut membuat manusia semakin bersemangat untuk melakukan eksplorasi dari darat hingga ke lepas pantai. Pada awal tahun 1897, eksplorasi minyak dan produksinya di mulai di Summerland, California (Guo *et al*, 2005). Metode transportasi minyak dengan pipa bawah laut pertama kali dibuat di Summerland karena dianggap lebih efisien dibandingkan dengan media lain. Sejak saat itu, pipa bawah laut semakin banyak digunakan sebagai sarana transportasi minyak dan gas.

Pipa bawah laut yang sudah beroperasi memiliki jadwal inspeksi yang berguna untuk menjaga *integrity* dari pipa bawah laut itu sendiri. Apabila setelah dilakukan inspeksi ditemukan kerusakan pada pipa bawah laut yang dapat menyebabkan penurunan fungsi dari pipa itu sendiri, maka diperlukan penggantian dengan pipa baru apabila pipa tersebut sudah tidak bisa diperbaiki kembali. Berdasarkan dari pengalaman PT. X yang pernah melakukan penggantian pipa bawah laut berjenis *carbon steel* ke *reinforced thermoplastic pipe* (RTP) dikarenakan masalah kebocoran pipa Main Gas Line (MGL) yang sebabkan karena meningkatnya kandungan gas CO₂ dalam konten yang di muat oleh pipa, penggunaan pipa RTP dirasa pilihan yang tepat untuk mengatasi permasalahan tersebut. Sebelum melakukan penggantian pipa *carbon steel* ke *reinforced thermoplastic pipe* (RTP) ini, PT. X sudah melakukan kajian baik dari segi teknis hingga segi ekonomi hingga akhir pipa dapat diputuskan untuk di instalasi.

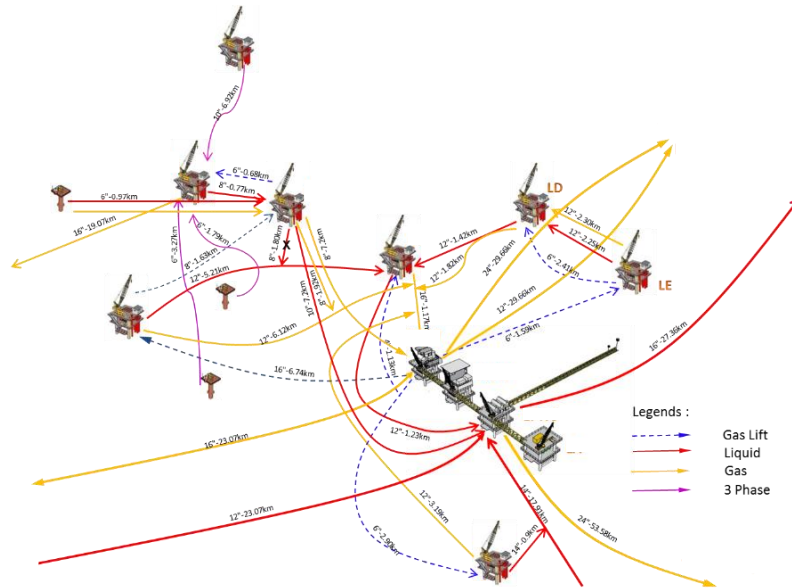
Pipa RTP sendiri memiliki beberapa keunggulan seperti tahan terhadap korosi, memiliki *allowable plastic strain* yang tinggi, dan memiliki metode instalasi yang mudah. Dewasa ini, dikarenakan banyak produk minyak dan gas yang mengandung konten korosif yang tinggi menyebabkan banyak pipa *carbon steel* mengalami korosi dalam waktu yang singkat sehingga mengharuskan

penggantian pipa baru. Hal tersebut merupakan tambahan biaya operasi bagi operator migas. Oleh karena itu, pipa RTP merupakan solusi yang tepat sebagai sarana transportasi minyak dan gas yang memiliki konten korosif. Namun, pipa RTP memiliki beberapa kekurangan seperti permasalahan berat yang ringan, rentan terjadi penyok dikarenakan tekanan eksternal, dan memerlukan tindakan tambahan terhadap stabilitasnya di dasar laut (Y. Bai *et al*, 2014).

Analisis stabilitas pipa RTP merupakan hal penting dalam tahap instalasi dikarenakan berat dari pipa RTP yang lebih ringan daripada pipa *carbon steel*. Oleh karena itu, diperlukan tambahan pemberat dengan berat dan jarak peletakkan tertentu pada pipa RTP agar dapat meletak dengan stabil di dasar laut. Ada banyak jenis metode yang dapat digunakan untuk menjaga kestabilan pipa RTP di bawah laut seperti metode *Strategic and Gravity Anchor*, *Rock Bolt*, *Mattresses*, dan *Rock Dumping* (Y. Bai *et al*, 2014). Dalam penelitian ini penulis berfokus pada metode *Rock Bolt* atau biasa disebut sebagai *concrete weight*. Metode ini dipilih dikarenakan proses fabrikasi dan instalasi yang mudah dikerjakan oleh pihak kontraktor.

Salah satu fokus utama dalam mendesain pipa bawah laut adalah bagaimana menjaga stabilitas pipa ketika dikenai beban hidrodinamis. Stabilitas yang dimaksudkan dalam tugas akhir ini adalah kecenderungan dari pipa untuk tidak mengalami pergerakan secara vertikal maupun lateral sesuai batasan yang diizinkan meskipun dalam kondisi lingkungan yang ekstrim (White and Chatie, 2010).

Saat ini, standar DNVGL-RP-F109 adalah standar yang umum digunakan sebagai acuan dalam analisis stabilitas pipa bawah laut. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan analisis stabilitas pipa RTP sebagai penyalur gas bawah laut dari platform LE menuju platform LD yang berjarak 2, km dengan menggunakan acuan DNV RP F109. Denah lokasi platform LE dan LD ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Denah Lokasi Platform LE – LD (Sumber : Dokumen PT. X)

1.2. Rumusan Masalah

Perumusan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Berapakah berat pemberat yang diperlukan agar pipa dapat memenuhi kriteria stabilitas berdasarkan standar DNVGL RP F109?
2. Berapakah nilai *design criteria* untuk stabilitas vertikal dan lateral pipa berdasarkan standar DNVGL RP F109?
3. Apakah pergerakan lateral maksimum yang terjadi pada pipa masih memenuhi standar DNVGL RP F109?

1.3. Tujuan

Adapun tujuan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui berat pemberat yang diperlukan agar pipa dapat memenuhi kriteria stabilitas berdasarkan standar DNVGL RP F109.
2. Mengetahui nilai *design criteria* untuk stabilitas vertikal dan lateral pipa berdasarkan standar DNVGL RP F109.
3. Mengetahui apakah pergerakan lateral maksimum yang terjadi pada pipa masih memenuhi standar DNVGL RP F109.

1.4. Manfaat Penelitian

Diharapkan dari penyusunan laporan tugas akhir ini dapat memberikan pemahaman terhadap penulis dan pembaca mengenai stabilitas pipa fleksibel bawah laut berjenis *reinforced thermoplastic pipe* sebagai penyalur gas bawah laut yang ketika di instalasi di dasar laut memerlukan pemberat tambahan untuk menjaga stabilitas pipa tersebut meskipun dalam kondisi yang ekstrim.

1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Kondisi pipa yang di hitung adalah kondisi instalasi (sementara) dan operasi (permanen).
2. Kondisi arus laut dalam keadaan *steady flow*.
3. Arah datang gelombang dan arus yang digunakan tegak lurus terhadap pipa.
4. Variasi tanah yang digunakan dalam perhitungan berjenis lempung.
5. Pengaruh *soil liquefaction* diabaikan.
6. Resiko pipa terhadap *dropped object* diabaikan.
7. Standar yang digunakan adalah DNVGL RP F109.
8. Pipa fleksibel yang digunakan adalah standar API 15S.

1.6. Sistematika Penulisan

1. Bab I Pendahuluan

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat yang akan diperoleh, batasan masalah penelitian untuk membatasi analisis, dan sistematika penulisan laporan.

2. Bab II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

Bab ini berisi referensi mengenai penelitian sejenis yang pernah dilakukan dan teori-teori yang akan digunakan. Referensi tersebut bersumber pada buku, jurnal dan *standard/codes* yang berkaitan dengan topik penelitian.

3. Bab III Metodologi Penelitian

Bab ini berisi langkah-langkah pengerjaan tugas akhir. Alur pengerjaan dijelaskan dalam bentuk diagram alir dan disusun secara sistematis.

4. Bab IV Analisis dan Pembahasan

Bab ini menjelaskan analisis dan hasil pengolahan data penelitian.

5. Bab V Penutup

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang dilakukan dan juga berisi saran untuk penelitian – penelitian sejenis kedepannya.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Analisis stabilitas pipa bawah laut merupakan analisis yang sangat kompleks dengan banyak bidang yang harus diintegrasikan, seperti karakteristik tanah, *seabed liquefaction*, *scouring*, *sediment transport*, serta arus dan gelombang laut. Namun salah satu permasalahan utama pada pipa bawah laut adalah ketidakstabilan akibat gelombang laut (Herbich, 1985). Ghebreghiorghis (2014) menambahkan jika pipa terlalu ringan, maka pipa akan bergerak secara lateral dan vertikal akibat gaya hidrodinamis dan gaya apung pada pipa. Sebaliknya jika pipa terlalu berat, maka proses instalasinya menjadi rumit dan mahal karena keterbatasan *installation barge* dan jenis *tensioner*.

Ketika pipa berada didasar laut ada kemungkinan terjadi kerusakan pada pipa dikarenakan gerakan vertikal dan lateral pipa. Oleh karena itu diperlukan persyaratan mengenai berat minimum pipa untuk menjamin stabilitas pipa ketika meletak didasar laut meskipun dalam kondisi lingkungan yang paling buruk. Umumnya untuk menjaga kestabilan dari pipa bawah laut dapat dilakukan dengan cara penambahan tebal dari *concrete coating* pipa bawah laut. Persyaratan stabilitas ini sudah diatur dalam standar DNV RP F109 mengenai *On-bottom Stability Design of Submarine Pipelines*.

Det Norske Veritas (DNV) melakukan revisi terhadap standar DNV-RP-E305 mengenai *On-bottom Stability Design of Submarine Pipelines* tahun 2007 untuk menyelaraskan pendekatan desain yang terdapat pada standar DNV-OS-101 mengenai *Submarine Pipeline System*. Disisi lain, metode analisis dalam standar DNVGL-RP-F109 ini lebih luas dalam pembahasan pada kondisi tanah lempung dan pasir. Beberapa revisi yang diperbarui yaitu adanya beban reduksi pada pipa akibat interaksi antara pipa dengan tanah dimana pipa meletak. Gaya-gaya hidrodinamika juga tereduksi karena adanya faktor permeabilitas *seabed*, penetrasi pipa ke *seabed*, dan *trenching*.

Hamzah (2018) telah melakukan analisis *on-bottom stability gas pipeline* dengan studi kasus laut dalam di selat Makassar dan didapatkan bahwa pipa tersebut stabil secara vertikal dan lateral berdasarkan acuan DNVGL RP F109.

Selanjutnya Wicaksono (2018) melakukan analisis mengenai stabilitas pipa fleksibel bawah laut dengan studi kasus platform ESRA menuju ESA yang mengacu pada standar DNV RP F109. Namun dalam penelitian tersebut belum melakukan analisis terhadap bentuk *concrete weight* dan pemodelan lengkap fasilitas bawah laut. Oleh karena itu penulis mengajukan penelitian mengenai analisis *on-bottom stability* pipa RTP (*Reinforced Thermoplastic Pipe*) sebagai sarana penyalur gas bawah laut dengan pendetailan pada bentuk *concrete weight* dan kontur dasar laut yang melingkupinya dengan studi kasus di lokasi yang berbeda.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. *On-Bottom Stability* Pipa RTP

2.2.1.1. Gambaran Umum

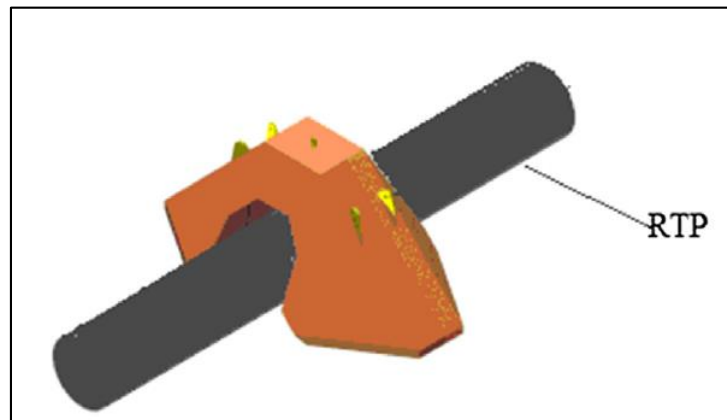
Pipa RTP memiliki beberapa keunggulan seperti tahan terhadap korosi, memiliki *allowable plastic strain* yang tinggi, dan metode instalasi yang mudah. Dewasa ini, dikarenakan banyak produk minyak dan gas yang mengandung kandungan korosif yang tinggi menyebabkan banyak pipa *carbon steel* yang mengalami korosi dalam waktu yang singkat sehingga mengharuskan penggantian. Hal tersebut merupakan tambahan biaya operasi bagi kontraktor migas. Oleh karena itu pipa RTP merupakan solusi yang tepat sebagai sarana transportasi minyak dan gas yang memiliki konten korosif. Namun, pipa RTP memiliki beberapa kekurangan yang antara lain seperti permasalahan berat yang ringan, rentan terjadi penyok dikarenakan tekanan eksternal, dan tindakan tambahan terhadap stabilitas didasar laut (Y. Bai *et al*, 2014).

2.2.1.2. *Stabilizing Methods*

Untuk mengatasi permasalahan stabilitas pada pipa RTP agar dapat meletak di dasar laut diperlukan penambahan pemberat tambahan agar pipa stabil. Selain itu penggunaan pemberat juga bertujuan untuk membatasi pergerakan dari pipa RTP ketika berada di dasar laut. Menurut Bai dan Bai (2014), Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk menjaga kestabilan dari pipa RTP. Metode-metode tersebut antara lain adalah sebagai berikut:

a. Strategic and Gravity Anchor

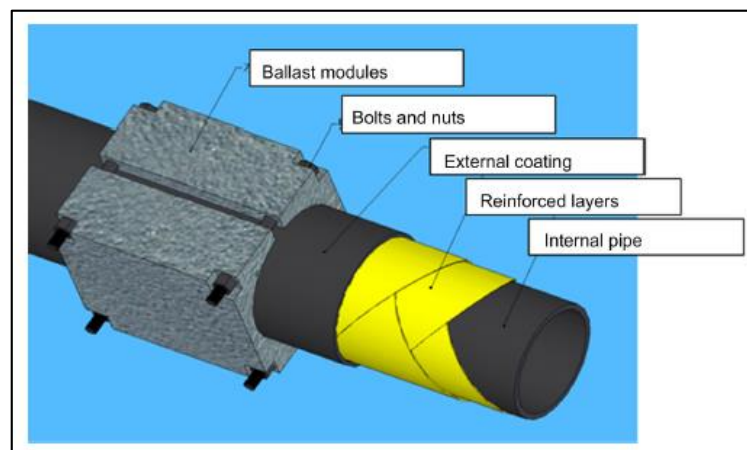
Metode ini digunakan juga pada pipa baja yang mengalami ketidakstabilan ketika meletak pada dasar laut. Keuntungan utama dari metode ini adalah jangkar dapat mencegah pipa bergerak dari posisi awal selama usia operasi pipa. Namun metode ini memiliki kekurangan, yaitu rawan terjadi *buckling* pada pipa yang terkontak langsung dengan *gravity anchor*. Selain itu, metode ini memerlukan biaya yang tinggi untuk fabrikasi dan instalasi. Ilustrasi dari metode Strategic and Gravity Anchor dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Strategic and Gravity Anchor (Y. Bai *et al*, 2014)

b. Rock Bolts

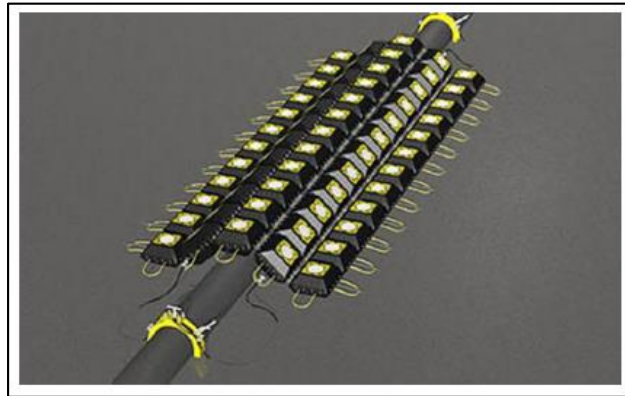
Metode *Rock Bolt* merupakan metode yang baru dewasa ini. Metode ini dilakukan dengan cara menggabungkan dua bagian dari *ballast block* dengan menggunakan mur dan baut seperti pada Gambar 2.2 dibawah. Keuntungan dari metode ini yaitu biaya yang rendah karena proses fabrikasi dan instalasi yang mudah.



Gambar 2.2 Rock Bolt (Y. Bai *et al*, 2014)

c. Concrete Matresses

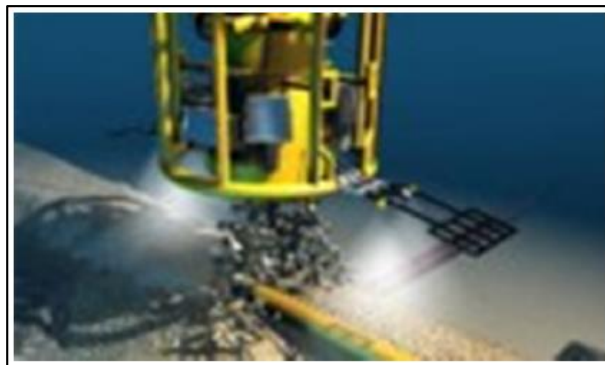
Metode ini memiliki prinsip yang sama dengan metode *rock bolt* dalam menjaga stabilitas dari pipa. Jika dibandingkan dengan metode *rock bolt*, metode ini membuat beban arus yang mengenai permukaan pipa lebih halus dan tenang. Selain itu pipa memiliki kontak penuh dengan dasar laut untuk meletak. Namun, metode ini memerlukan biaya tambahan lebih untuk proses fabrikasi dan instalasi dibandingkan dengan metode *rock bolt*. Gambar 2.3 berikut menampilkan ilustrasi penggunaan metode *Concrete Matresses*.



Gambar 2.3 Concrete Matresses (Y. Bai *et al*, 2014)

d. Rock Dumping

Metode ini memiliki kelebihan instalasi yang mudah dari keseluruhan metode yang sudah dijelaskan sebelumnya. Namun metode ini kurang direkomendasikan dikarena kesulitannya dalam memastikan kestabilan dari pipa, selain itu metode ini memungkinkan terjadinya kerusakan pada pipa. Efek dari *soil liquefaction* juga dapat menyebabkan batuan bergeser dan pipa RTP dapat menjadi mengapung dan tidak stabil. Ilustrasi dari penggunaan metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.4 Rock Dumping (Y. Bai *et al*, 2014)

2.2.2. Kondisi Gelombang dan Arus

2.2.2.1. Spektrum JONSWAP

Gelombang laut acak dalam kurun waktu pendek dapat dijelaskan dengan spektrum gelombang. Menurut DNVGL RP F109 untuk menghitung beban dari gelombang laut yang diterima oleh pipa diwajibkan menggunakan spektrum JONSWAP. Selain itu, menurut Djatmiko (2012) penggunaan spektrum JONSWAP dapat digunakan pada laut yang mempunyai karakteristik tertutup, hal ini sesuai dengan kondisi perairan di Indonesia yang merupakan wilayah kepulauan. Spektrum JONSWAP secara umum dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \cdot \gamma \cdot \exp\left(-0.5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma \cdot \omega_p}\right)^2\right) \quad (2.1)$$

dengan,

α : konstanta Generalized Philips

g : percepatan gravitasi

ω : frekuensi gelombang

ω_p : frekuensi gelombang puncak

γ : peak-enhancement factor

σ : parameter lebar spectra

dimana konstanta Generalized Philips dapat dicari melalui persamaan (2.2) berikut:

$$\alpha = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega_p^4}{g^2} (1 - 0.287 \cdot \ln \gamma) \quad (2.2)$$

dengan,

H_s : tinggi gelombang signifikan

ω_p : frekuensi gelombang puncak

g : percepatan gravitasi

γ : peak-enhancement factor

Kemudian parameter lebar spectra didapatkan dari persamaan (2.3) berikut:

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0.09 & \text{jika } \omega > \omega_p \end{cases} \quad (2.3)$$

Sedangkan Peak-enhancement factor didapatkan dari persamaan (2.4) berikut:

$$\gamma = \begin{cases} 5.0 & \varphi \leq 3.6 \\ \exp(5.75 - 1.15\varphi) & 3.6 < \varphi < 5.0; \\ 1.0 & \varphi \geq 5.0 \end{cases} \quad \varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \quad (2.4)$$

Spektrum Pierson Moskowitz menggunakan $\gamma = 1$, sedangkan $\gamma = 3.3$ biasanya diterapkan untuk analisis gelombang di North Sea. Suatu hal yang menarik, dimana persamaan JONSWAP ini sekarang banyak digunakan oleh perusahaan-perusahaan minyak yang beroperasi di Indonesia dalam mendesain fasilitas anjungan lepas pantai, tetapi dengan mengambil harga γ yang lebih rendah yaitu berkisar 2.5 atau 2 (Djarmiko, 2012).

Spektrum kecepatan yang diinduksi gelombang di dasar laut $S_{uu}(\omega)$ bisa didapatkan melalui transformasi spektral gelombang dipermukaan laut menggunakan teori gelombang orde pertama melalui persamaan (2.5) berikut:

$$S_{uu}(\omega) = G^2(\omega) \cdot S_{\eta\eta}(\omega) \quad (2.5)$$

dengan,

$G(\omega)$ = fungsi Transfer

$S_{\eta\eta}(\omega)$ = kerapatan spektral gelombang

Fungsi Transfer G mentransformasikan arus di permukaan laut menjadi kecepatan arus yang di induksi gelombang di dasar laut melalui persamaan (2.6) berikut:

$$G(\omega) = \frac{\omega}{\sinh(kd)} \quad (2.6)$$

dimana nilai d dan k didapatkan dari iterasi menggunakan persamaan transcendental berikut :

$$\frac{\omega^2}{g} = k \tanh(kd) \quad (2.7)$$

dengan,

ω : frekuensi gelombang

g : percepatan gravitasi

k : angka gelombang

d : kedalaman perairan

Momen spectra gelombang pada orde ke-n didefinisikan menggunakan persamaan (2.8) berikut:

$$M_n = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S_{uu}(\omega) d\omega \quad (2.8)$$

Amplitudo kecepatan aliran signifikan pada permukaan pipa didefinisikan pada persamaan (2.9) berikut:

$$U_s = 2\sqrt{M_0} \quad (2.9)$$

dengan,

U_s : kecepatan rata-rata didasar laut

M_0 : momen spektra orde pertama

Tidak direkomendasikan untuk mempertimbangkan setiap efek *boundary layer* pada kecepatan yang diinduksi gelombang. *Mean zero up-crossing* aliran pada permukaan pipa dapat dicari menggunakan persamaan (2.10) berikut:

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \quad (2.10)$$

dengan,

T_u : periode rata-rata di dasar laut

M_0 : momen spektra orde pertama

M_2 : momen spektra orde kedua

Dengan asumsi teori gelombang linier, U_s bisa diambil dari Gambar 2.5 dan T_u dari Gambar 2.6, menggunakan T_n yang didapatkan dari persamaan (2.11) berikut:

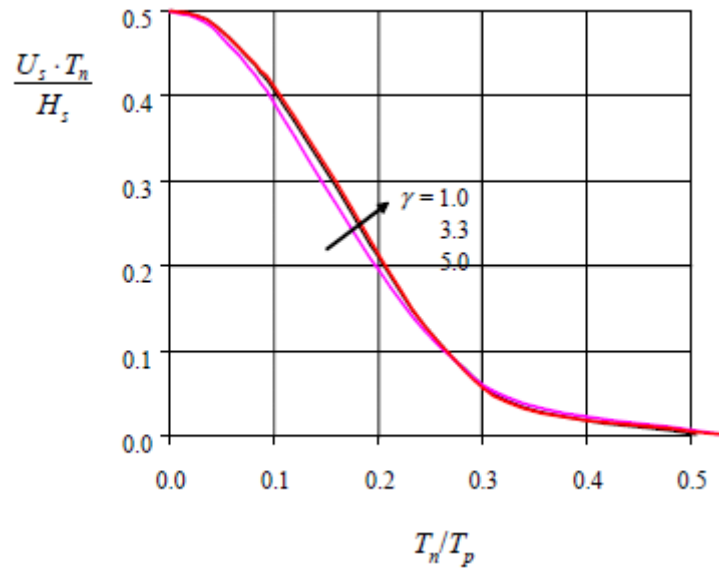
$$T_n = \sqrt{\frac{d}{g}} \quad (2.11)$$

dengan,

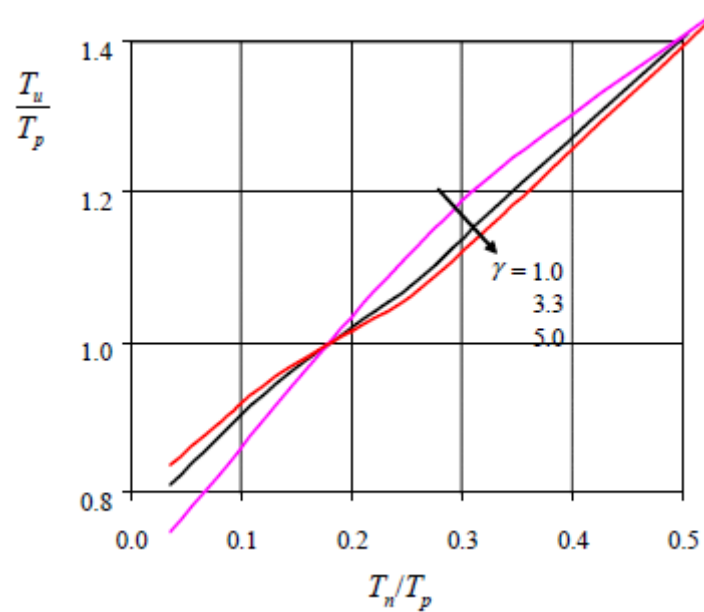
T_n : periode referensi

d : kedalaman perairan

g : percepatan gravitasi



Gambar 2.5 Kecepatan Amplitudo Signifikan Terhadap Dasar Laut
(DNVGL RP F109, 2017)



Gambar 2.6 Mean Zero-up Crossing Period Osilasi Aliran Pada Dasar Laut
(DNVGL RP F109, 2017)

Persamaan rasio antara amplitudo kecepatan osilasi desain tunggal dan amplitudo kecepatan desain spektral untuk osilasi sejumlah τ adalah:

$$k_U = \frac{U^*}{U_s} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{2 \cdot \ln \tau} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln \tau}} \right) \quad (2.12)$$

Persamaan rasio antara periode kecepatan osilasi desain tunggal dan periode *zero up-crossing* rata-rata adalah:

$$k_T = \frac{T^*}{T_u} = \begin{cases} k_t - 5 \cdot (k_t - 1) \cdot T_n/T_u & \text{untuk } T_n/T_u \leq 0.2 \\ 1 & \text{untuk } T_n/T_u > 0.2 \end{cases} \quad (2.13)$$

dimana,

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

2.2.2.2. Arah dan Persebaran Gelombang

Efek yang ditimbulkan karena arah dan persebaran gelombang dijelaskan dalam bentuk faktor reduksi dari kecepatan arus signifikan yaitu proyeksi kecepatan normal terhadap pipa dan efek persebaran gelombang sebagai berikut:

$$U_w = R_D \cdot U_{w\theta} \quad (2.14)$$

Nilai faktor reduksi dapat dicari melalui pendekatan menggunakan grafik pada Gambar 2.7 atau menggunakan persamaan (2.15) berikut:

$$R_D = \sqrt{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} D_w(\theta) d\theta} \quad (2.15)$$

dimana fungsi arah persebaran energi gelombang dapat dijelaskan melalui persamaan:

$$D_w = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma(1 + s/2)}{\Gamma(0.5 + s/2)} \cdot \cos^2\theta \cdot \sin^2(\theta_w - \theta) & |\theta| < \frac{\pi}{2} \\ 0 & |\theta| > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (2.16)$$

dengan,

U_w = kecepatan partikel air terinduksi gelombang

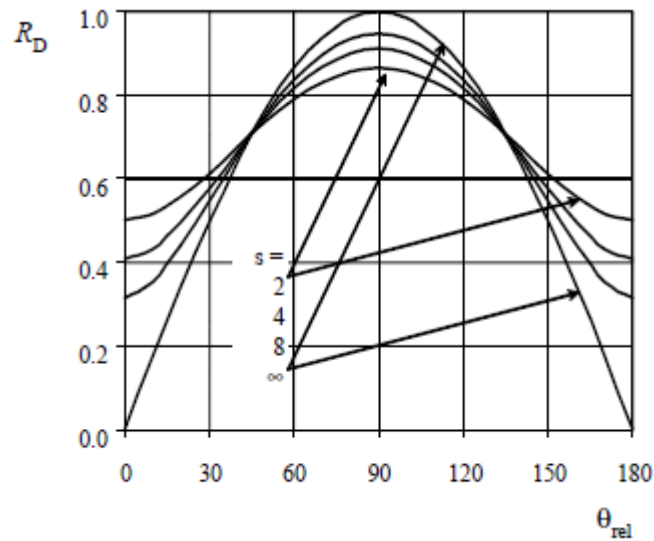
R_D = faktor reduksi karena spectral arah dan persebaran

$U_{w\theta}$ = kecepatan partikel air terinduksi gelombang pada sudut terhadap pipa

Γ = fungsi Gamma

s = parameter specific spreading

Normalnya nilai s yang digunakan adalah antara 2 dan 8. Jika tidak ada informasi yang tersedia, nilai yang paling konservatif antara 2 sampai 8 akan dipilih. Nilai 6 sampai 8 umumnya digunakan pada perairan *North Sea*.



Gambar 2.7 Faktor Reduksi Akibat Arah Dan Persebaran Gelombang
(DNVGL RP F109, 2017)

2.2.2.3. Kecepatan Arus

Aliran arus steady pada pipa memiliki keterkaitan dengan pasang surut, angin pembangkit gelombang, gelombang akibat badai, dan densitas arus. Arah kecepatan arus diperhitungkan melalui nilai θ_c yang merupakan sudut antara kecepatan arus dan sumbu pipa. Jika tidak ada informasi yang tersedia mengenai nilai θ_c , maka arus dapat diasumsikan tegak lurus dengan pipa.

Arus acuan, $V_c(z_r)$, diukur pada kedalaman yang variasi kecepatannya kecil pada arah horizontal. Pada dasar laut yang relatif datar, tinggi acuan bisa lebih besar dari satu meter, tergantung dari kekasaran dasar lautnya yang dapat dilihat pada Tabel 2.1. Kecepatan arus dapat tereduksi karena efek dasar laut dan arah arus laut. Kecepatan arus yang tereduksi dapat dijelaskan dengan persamaan (2.17) berikut:

$$V_c = V_c(z_r) \cdot \left(\frac{\left(1 + \frac{z_0}{D}\right) \cdot \ln\left(\frac{D}{z_0} + 1\right) - 1}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0} + 1\right)} \right) \cdot \sin\theta_c \quad (2.17)$$

dengan,

V_c : kecepatan arus pada pipa

$V_c(z_r)$: kecepatan arus acuan pada pipa

Z_r : kedalaman perairan acuan

- Z_0 : parameter kekasaran *seabed* (lihat Tabel 2.1)
 D : diameter luar pipa
 θ_c : sudut antara arah datang arus dengan pipa

Tabel 2.1 Kekasaran Dasar Laut (DNVGL-RP-F109, 2017)

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

2.2.3. Tahanan Tanah

Tahanan tanah pada umumnya dibagi menjadi dua bagian, yaitu *Coulomb Friction* dan *Passive Resistance* (F_R) akibat penetrasi pipa saat bergerak secara lateral.

1. *Coulomb Friction Models*

Perilaku dari interaksi antara pipa dan tanah disekitarnya telah menjadi fokus utama pada tahap *pipeline design*. Teori yang paling sering digunakan dan paling sederhana adalah coulomb friction model. Faktor μ digunakan untuk mempresentasikan interaksi antara pipa dengan tanah disekitarnya. Tahanan horizontal maksimum yang dihasilkan oleh tanah merupakan perkalian antara resultan gaya vertikal dengan *friction factor* yang jika dapat dituliskan seperti persamaan (2.18) berikut:

$$F_F = \mu \cdot (W_s - F_L) \quad (2.18)$$

dengan,

F_F = gaya tahanan horizontal

μ = faktor gesekan

W_s = berat terendam pipa

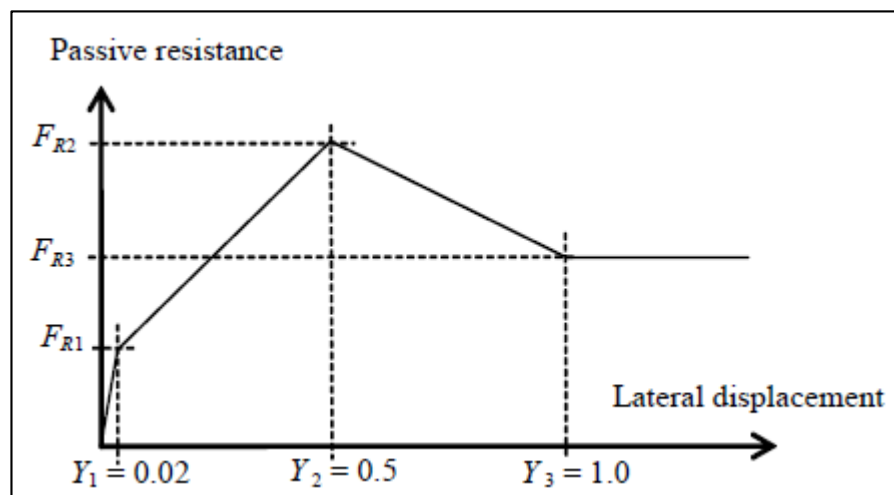
F_L = gaya angkat pipa

Friction factor μ biasanya menggunakan nilai 0.6 untuk jenis *sandy seabed* dan *rock seabed* serta 0.2 untuk *clay*. Jenis *sandy seabed* didefinisikan sebagai tanah yang permeable dan tidak kohesif, sedangkan *clay* didefinisikan sebagai jenis tanah impermeable dan kohesif. Sementara definisi dari *rock* merupakan butiran tanah yang memiliki diameter lebih besar dari 50 mm.

2. *Passive Resistance*

Jenis dari tahanan pasif tanah sendiri dapat dibedakan menjadi 4 macam daerah yang antara lain sebagai berikut:

1. Daerah elastis dimana perpindahan lateralnya biasanya kurang dari 2% diameter pipa.
2. Daerah dimana perpindahan yang signifikan terjadi, sampai dengan setengah diameter pipa pada *sandy seabed* dan *clay* yang menyebabkan meningkatnya penetrasi dan *soil passive resistance*.
3. Daerah setelah *break-out* dimana penetrasi dan tahanan pasif tanah akan berkurang.
4. Ketika perpindahan melebihi 1 kali diameter pipa, tahanan pasif dan penetrasi diasumsikan konstan.



Gambar 2.8 *Soil Passive Resistance* (DNVGL RP F109, 2017)

Dapat dilihat dari Gambar 2.8 bahwa pada daerah elastis, dimana $Y \leq Y_1$, *stiffness k* adalah sebesar 50-100 N/m untuk tanah pasir dan 20-40 N/m untuk *clay*. *Stiffness* meningkat seiring meningkatnya *sand density* dan *clay shear strength*. Pada daerah $Y_1 < Y \leq Y_2$, *pipe soil interaction* kembali bekerja dan meningkatkan penetrasi begitu juga *passive resistance*. Perlu dicatat bahwa

nilai *breakout resistance* F_{R2} tidak dapat dihitung karena bergantung pada akumulasi displacement didaerah antara Y_1 dan Y_2 .

Jika *displacement* melebihi Y_2 , pipa diasumsikan *breakout*. Akumulasi gaya dianggap nol dan tidak ada kerja *soil resistance* pada daerah ini. Penetrasi tereduksi secara linier dari titik *breakout* Y_2 hingga $Y = Y_2$, dan *passive resistance* pada *sandy seabed* dapat dihitung dengan persamaan (2.19) berikut :

$$\frac{F_R}{F_C} = \begin{cases} (5.0.k_s - 0.15k_s^2) \left(\frac{z_p}{D}\right)^{1.25} & \text{Jika } k_s \leq 26.7 \\ k_s \left(\frac{z_p}{D}\right)^{1.25} & \text{Jika } k_s > 26.7 \end{cases} \quad (2.19)$$

dimana nilai k_s didapatkan dari persamaan berikut:

$$k_s = \frac{\gamma'_s D^2}{W_s - F_z} = \frac{\gamma'_s D^2}{F_c} \quad (2.20)$$

sedangkan *passive resistance* pada *clay seabed* dapat dihitung dengan persamaan (2.21) dan (2.22) berikut:

$$\frac{F_R}{F_C} = \frac{4.1k_c}{G_c^{0.39}} \left(\frac{z_p}{D}\right)^{1.31} \quad (2.21)$$

$$G_c = \frac{S_u}{D\gamma_s} \quad \text{dan} \quad k_c = \frac{S_u D}{W_s - F_z} = \frac{S_u D}{F_c} \quad (2.22)$$

dengan,

F_R : tahanan pasif tanah

F_C : gaya kontak arah vertikal antara pipa dan tanah

F_z : beban hidrodinamika arah vertikal

z_p : kedalaman penetrasi

D : diameter luar pipa

γ'_s : *submerged unit soil weight*

γ_s : *dry unit soil weight*

S_u : *undrained clay shear strength*

W_s : berat terendam pipa

G_c : *soil clay strength parameter*

Penetrasi total merupakan hasil penjumlahan dari *intial penetration* dengan penetrasi akibat perpindahan pipa, sehingga dapat dirumuskan seperti melalui persamaan (2.23) sampai (2.24) seperti berikut ;

$$z_p = z_{pi} + z_{pm} \quad (2.23)$$

Initial penetration pada tanah jenis pasir dapat dirumuskan sebagai :

$$\frac{z_{pi}}{D} = 0.037k_s^{-0.67} \quad (2.24)$$

Sedangkan *initial penetration* pada tanah jenis *clay* dirumuskan sebagai :

$$\frac{z_{pi}}{D} = 0.0071 \left(\frac{G_c^{0.3}}{k_c} \right)^{3.2} + 0.0062 \left(\frac{G_c^{0.3}}{k_c} \right)^{0.7} \quad (2.25)$$

dengan,

z_p = penetrasi total

z_{pi} = initial penetration

z_{pm} = penetrasi akibat pergeseran pipa

2.2.4. Gaya Reduksi

Beban hidrodinamika dapat tereduksi karena permeabilitas dasar laut ($r_{perm,i}$), penetrasi pipa kedalam tanah ($r_{pen,i}$) dan/atau, *trenching* ($r_{tr,i}$) yang dapat dilihat melalui persamaan beban reduksi total berikut :

$$r_{tot,i} = r_{perm,i} \cdot r_{pen,i} \cdot r_{tr,i} \quad (2.26)$$

2.2.4.1. Reduksi Akibat Permeable seabed

Sifat permeabilitas dasar laut akan menyebabkan munculnya aliran di bawah pipa sehingga dapat mengurangi beban vertikal yang terjadi. Jika beban hidrodinamis vertikal yang digunakan didasarkan pada koefisien beban yang diturunkan dari asumsi *non-permeable seabed*, faktor reduksi beban berikut dapat digunakan:

$$r_{perm,z} = 0.7 \quad (2.27)$$

2.2.4.2. Reduksi Beban Akibat penetrasi

Dalam reduksi beban akibat penetrasi pipa, besarnya reduksi dipengaruhi oleh kedalaman penetrasi dan besar diameter pipa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 dan hubungannya dapat dilihat pada Gambar 2.10. Nilai dari beban reduksi pada arah horizontal dan vertikal sendiri dapat dicari menggunakan persamaan (2.28) dan (2.29) berikut :

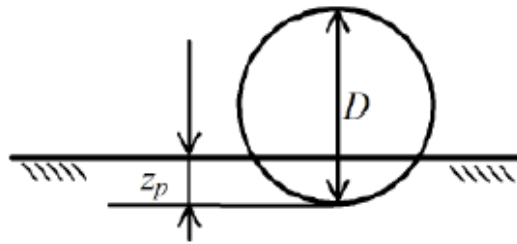
$$r_{pen,y} = 1.0 - 1.4 \left(\frac{z_p}{D} \right) \geq 0.3 \quad (2.28)$$

$$r_{pen,z} = 1.0 - 1.3 \left(\frac{z_p}{D} - 0.1 \right) \geq 0.0 \quad (2.29)$$

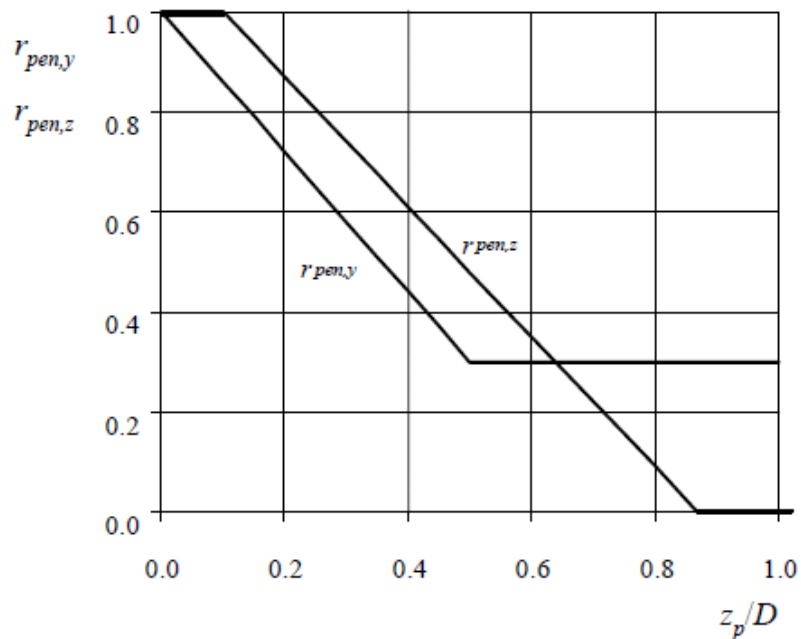
dengan,

z_p : kedalaman penetrasi

D : diameter luar pipa



Gambar 2.9 Definisi Penetrasi Pipa (DNVGL RP F109, 2017)



Gambar 2.10 Reduksi Beban Akibat Penetrasi (DNVGL RP F109, 2017)

2.2.4.3. Reduksi Beban Akibat Trenching

Besarnya reduksi akibat *trenching* dipengaruhi oleh faktor kedalaman *trenching* diameter pipa serta sudut kemiringan *trenching* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11. Hubungan faktor-faktor tersebut dengan besarnya beban reduksi akibat *trenching* ditunjukkan pada Gambar 2.12 dibawah. Faktor reduksi beban akibat *trenching* baik arah horizontal maupun arah vertikal masing-masing adalah sebagai berikut:

$$r_{tr,y} = 1.0 - 0.18(\theta - 5)^{0.25} \left(\frac{z_t}{D}\right)^{0.42}, 5 \leq \theta \leq 45 \quad (2.30)$$

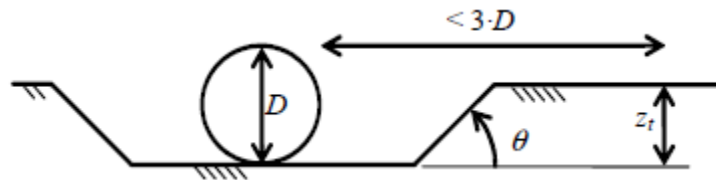
$$r_{tr,z} = 1.0 - 0.14(\theta - 5)^{0.43} \left(\frac{z_t}{D}\right)^{0.46}, 5 \leq \theta \leq 45 \quad (2.31)$$

dengan,

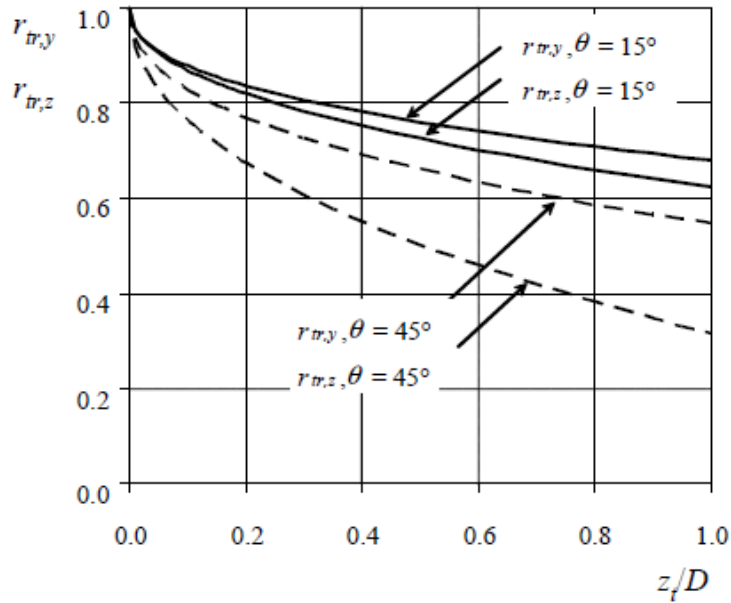
z_t : kedalaman trench

D : diameter luar pipa

Kedalaman *trenching* harus diambil relatif terhadap seabed dengan lebar tidak melebihi 3 kali diameter pipa.



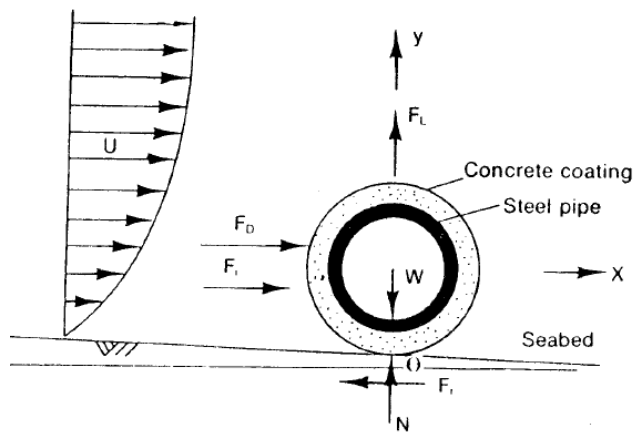
Gambar 2.11 Parameter Trenching (DNVGL RP F109, 2017)



Gambar 2.12 Reduksi Beban Akibat *Trenching* (DNVGL-RP-F109, 2017)

2.2.5. On-Bottom Stability Analysis

Pipa bawah laut dikatakan stabil jika mempunyai berat yang cukup, sehingga tahanan lateral tanah mencukupi untuk menghindari pergerakan pipa secara lateral karena beban lingkungan. Meningkatkan ketebalan baja pada pipa untuk menambah berat dari pipa merupakan cara yang kurang ekonomis, sehingga peningkatan ketebalan *concrete coating* untuk menambah berat dari pipa untuk mencapai kestabilan merupakan cara yang umum dipakai. Gambar 2.13 menunjukkan gaya hidrodinamika yang bekerja pada pipa bawah laut yang sangat mempengaruhi stabilitas dari pipa bawah laut.



Gambar 2.13 Gaya-gaya Yang Bekerja pada Pipa Bawah Laut (Mousselli, 1982)

2.2.5.1. Stabilitas Vertikal Dalam Air

Kestabilan pipa di dasar laut sangat dipengaruhi oleh berat pipa di dalam air, gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa, serta tahanan tanah di dasar laut. Analisis stabilitas vertikal dilakukan untuk mengetahui apakah berat pipa di udara mampu melawan gaya apung pipa ketika tercelup di dalam air agar memenuhi kriteria yang ditentukan. Adapun kriteria kestabilan vertikal menurut DNVGL RP F109 adalah sebagai berikut:

$$\gamma_w \cdot \frac{b}{W_s + b} = \frac{\gamma_w}{S_g} \leq 1.0 \quad (2.32)$$

dengan,

- γ_w : safety factor (1.1)
- b : gaya apung pipa
- W_s : berat terendam pipa
- S_g : kerapatan spesifik pipa

2.2.5.2. Absolute Lateral Static Stability Method

Secara umum penyebab pergerakan lateral pada pipa bawah laut adalah karena adanya gaya drag dan inersia di bidang horizontal karena beban gelombang dan arus. Apabila gaya-gaya tersebut cukup besar untuk mengalahkan gesekan seabed, maka gerakan lateral di mungkinkan terjadi. Namun metode *absolute lateral static stability* memberikan pernyataan statis mutlak untuk lateral *on-bottom stability pipeline* berdasarkan keseimbangan gaya statis yang memastikan bahwa daya tahan pipa terhadap gerakan cukup untuk menahan beban hidrodinamika maksimum selama seastate. Adapun kriteria agar memenuhi persyaratan *absolute lateral static stability* dapat dicari melalui persamaan (2.23) berikut:

$$\gamma_{sc} \cdot \frac{F_Y^* + \mu \cdot F_Z^*}{\mu \cdot W_s + F_R} \leq 1.0 \quad (2.33)$$

dengan,

- γ_{sc} : safety factor
- F_Y^* : beban hidrodinamika arah horizontal
- F_Z^* : beban hidrodinamika arah vertikal

- μ : koefisien gesekan
 W_s : berat terendam pipa
 F_R : tahanan tanah

Untuk *safety factor* yang digunakan untuk perhitungan *static absolute* pada kondisi musim dingin dan badai disajikan pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3.

Tabel 2.2 Safety Factor Kondisi Badai Musim Dingin (DNVGL RP F109, 2017)

Tabel Safety Factor, Musim Dingin di North Sea			
Jenis seabed	Low	Normal	High
Sand and rock	0.98	1.32	1.67
Clay	1.00	1.40	1.83

Tabel Safety Factor, Musim Dingin di Gulf of Mexico and Southern Ocean			
Jenis seabed	Low	Normal	High
Sand and rock	0.95	1.41	1.99
Clay	0.97	1.50	2.16

Tabel 2.3 Safety Factor Kondisi Cyclone (DNVGL RP F109, 2017)

Tabel Safety Factor, Kondisi Cyclone/Badai di North West Shelf			
Jenis seabed	Low	Normal	High
Sand and rock	0.95	1.50	2.16
Clay	0.95	1.56	2.31

Tabel Safety Factor, Cyclone/Badai di Gulf of Mexico			
Jenis seabed	Low	Normal	High
Sand and rock	0.95	1.64	2.46
Clay	0.93	1.64	2.54

Pada metode ini, nilai F_Y^* dan F_Z^* dapat dicari menggunakan persamaan (2.34) dan (2.35) berikut:

$$F_Y^* = r_{tot,y} \frac{1}{2} \rho_w DC_Y^* (U^* + V^*)^2 \quad (2.34)$$

$$F_Z^* = r_{tot,z} \frac{1}{2} \rho_w DC_Z^* (U^* + V^*)^2 \quad (2.35)$$

dengan,

F_Y^* : beban hidrodinamika arah horizontal

F_Z^* : beban hidrodinamika arah vertikal

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

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

ρ_w : massa jenis air laut

- D : diameter luar pipa
 C_Y^* : koefisien beban puncak horizontal
 C_Z^* : koefisien beban puncak vertikal
 U^* : kecepatan amplitudo osilator, tegak lurus pipa
 V^* : kecepatan arus steady osilator, tegak lurus pipa

Sementara U^* dan V^* didapatkan dari persamaan (2.12) dan (2.17) yang telah dibahas sebelumnya. Untuk nilai koefisien beban puncak baik arah horizontal maupun vertikal dapat dicari menggunakan Tabel 2.4 dan 2.5 berikut:

Tabel 2.4 Koefisien Beban Puncak Horizontal (DNVGL RP F109, 2017)

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

Tabel 2.5 Koefisien Beban Puncak Vertikal (DNVGL RP F109, 2017)

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

Untuk nilai K^* dan M^* dapat dicari menggunakan persamaan (2.36) dan (2.37) dibawah ini:

$$K^* = \frac{U^* T^*}{D} \quad (2.36)$$

$$M^* = \frac{V^*}{U^*} \quad (2.37)$$

dengan,

K^* : Keulegan-Carpenter number for single design oscillation

M^* : rasio kecepatan stabil untuk berosilasi

T^* : periode osilasi desain tunggal

2.2.5.3. Generalized Lateral Stability Method

Metode ini mengizinkan perpindahan pipa sampai batas tertentu. Namun efek beban aksial karena temperature dan tekanan operasi yang tinggi pada metode ini diabaikan, sehingga analisis lebih lanjut diperlukan untuk menghindari terjadinya buckling pada pipa bawah laut. Perpindahan pipa, Y , dipengaruhi oleh beberapa parameter non-dimensional yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Y = f(L, K, M, N, \tau, G_S, G_C) \quad (2.38)$$

dimana,

$$N = \frac{U_S R_D}{G T_U}, \quad K^* = \frac{U_S R_D T_U}{D}, \quad L = \frac{W_S}{0.5 \rho_w D U_S^2} \quad (2.39)$$

dengan,

K : keulegen-carpenter number

L : parameter berat

M : rasio antara kecepatan arus dengan single oscillation velocity

N : faktor percepatan spektra

U_S : kecepatan arus signifikan di dasar laut

ρ_w : massa jenis air laut

R_D : faktor reduksi akibat spectral arah dan persebaran

T_U : periode rata-rata di dasar laut

G_C : soil (clay) density parameter

Generalized lateral stability mengizinkan perpindahan lateral sebesar 0.5 hingga 10 kali diameter pipa. L_{stable} adalah berat yang diperlukan agar perpindahan lateral yang terjadi sebesar 0.5 kali diameter pipa. Sedangkan L_{10} merupakan berat yang diperlukan agar perpindahan lateral yang terjadi sebesar 10 kali diameter pipa. L_{stable} dan L_{10} didapatkan dari banyak analisis dinamis pipa bawah laut dengan asumsi dasar laut yang datar. Berat minimum yang diperlukan

agar maksimum perpindahan pipa sejauh 0.5 kali diameter pipa pada tanah lempung dapat dihitung dengan persamaan (2.40) berikut:

$$L_{stable} = 90 \sqrt{\frac{G_c}{N^{0.67}K} f(M)} \quad (2.40)$$

dimana,

$$f(M) = [0.58(\log M)^2 + 0.60(\log M) + 0.47]^{1.1} \leq 1.0 \quad (2.41)$$

Untuk perpindahan pipa maksimal sejauh 10 kali diameter, berat minimum yang diperlukan dapat dihitung dengan persamaan (2.42) berikut :

$$\frac{L_{10}}{(2+M)^2} = \begin{cases} c_1 + \frac{c_2}{K^{c_3}} & \text{untuk } K \geq K_b \\ c_1 + \frac{c_2}{K^{c_3}} & \text{untuk } K < K_b \end{cases} \quad (2.42)$$

Untuk nilai koefisien c_1, c_2, c_3 dan K_b dapat dilihat pada lampiran Appendix A DNVGL RP F109.

2.2.5.4. *Dynamic Lateral Stability Methods*

Analisis stabilitas dinamis menggunakan simulasi respon pipa dengan metode *time domain* yang mencakup beban hidrodinamis dari gelombang acak dan gaya tahanan tanah. Spektrum gelombang di permukaan harus di transformasikan ke dalam time series untuk mendapatkan nilai kecepatan partikel yang diinduksi gelombang didasar laut. Umumnya, kecepatan arus konstan ditambahkan kedalam kecepatan partikel induksi gelombang dan beban hidrodinamika didasarkan pada kecepatan dan percepatan relative yang mengenai pipa. Gaya tahanan dari tanah umumnya dibagi menjadi dua yaitu *pure friction* dan *passive resistance* yang bergantung pada kedalaman penetrasi pipa pada tanah.

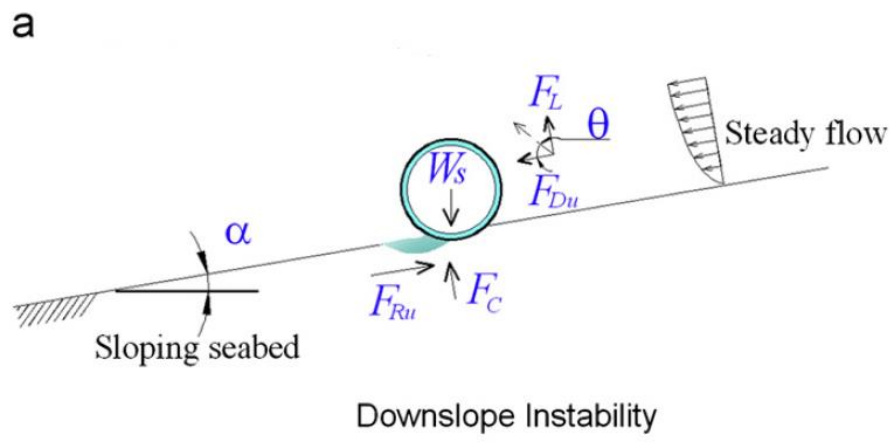
Jika dalam perhitungan tidak didapatkan data durasi *seastate*, maka *seastate* dengan durasi 3 (tiga) jam bisa menjadi rekomendasi. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk menghitung perpindahan lateral pipa yang terjadi pada pipa bawah laut akibat beban dari kombinasi gelombang dan arus selama durasi *seastate*. Dalam hal ini, *random number generator* merupakan hal yang penting dalam proses *hydrodynamic load generation*. Setidaknya harus dilakukan analisis sebanyak 7 (tujuh) kali dengan *random number generator* secara acak.

Perpindahan lateral pipa berupa nilai rata-rata ditambah satu standard deviasi dari 7 (tujuh) percobaan yang telah dilakukan (Youssef, 2011).

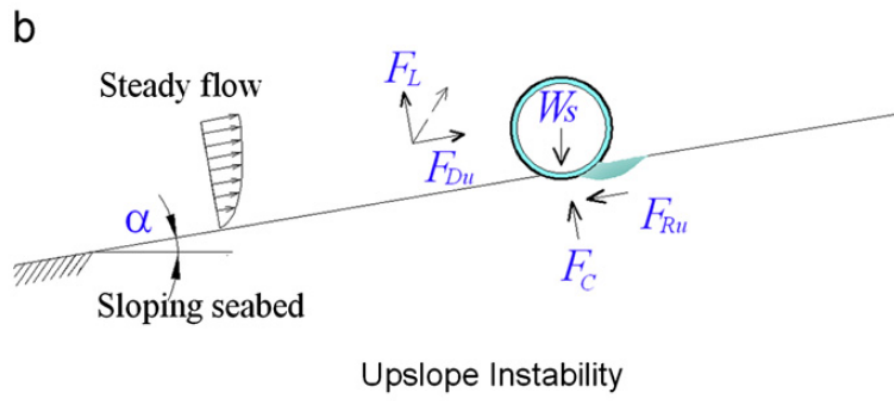
2.2.5.5. *On-Bottom Stability pada Sloping Seabed*

Semakin banyaknya reservoir yang ditemukan di daerah *sloping seabed* (dasar laut yang memiliki kemiringan) membuat stabilitas pipa bawah laut di daerah *sloping seabed* semakin banyak diteliti. Area *sloping seabed* merupakan daerah dasar laut dangkal yang kemudian menukik tajam kebawah seiring bertambahnya kedalaman perairan (Gao dan Han, 2012).

Meskipun demikian, dalam *design codes* maupun *recommended practice* tentang stabilitas pipa bawah laut yang berlaku saat ini belum mengakomodir tentang pengaruh *sloping seabed* terhadap stabilitas pipa. Seperti yang diilustrasikan oleh Gambar 2.14 dan Gambar 2.15 bahwa kestabilan pipa bawah laut pada *sloping seabed* dikategorikan menjadi dua, yaitu *downslope instability* dan *upslope instability*. *Downslope instability* merupakan kondisi dimana pipa bergeser ke arah lereng bawah karena terkena beban hidrodinamis dari arah lereng atas, sedangkan *upslope instability* merupakan kebalikannya.



Gambar 2.14 Stabilitas Pipa Bawah Pada *Sloping Seabed* Kondisi *Downslope* (Gao dan Han, 2012)



Gambar 2.15 Stabilitas Pipa Bawah Pada *Sloping Seabed* Kondisi *Upslope* (Gao dan Han, 2012)

Kestabilan pipa pada kondisi sloping seabed dipengaruhi oleh *lateral soil resistance* (F_R) dan gaya drag (F_D). Gao dan Han (2012) memberikan hubungan antara gaya drag dan *lateral soil resistance* seperti pada persamaan (2.43) berikut:

$$F_R = F_D - W_s \sin \alpha_s \quad (2.43)$$

dengan,

F_R : *lateral soil resistance*

F_D : gaya drag pipa

W_s : berat terendam pipa

α_s : sudut kemiringan *seabed*

Aliran arus yang mengenai pipa pada kasus *on-bottom stability* pada *sloping seabed* menimbulkan interaksi yang kompleks antara aliran arus, pipa, dan dasar laut disekitarnya. *Lateral soil resistance* pada ketidakstabilan pipa bawah laut memiliki kaitan yang erat dengan properti pipa, properti dasar laut, dan karakteristik beban lingkungan dimana nilai *coefficient of critical lateral soil resistance* (η_α) merupakan rasio antara *lateral soil resistance* dengan gaya kontak pipa pada *sloping seabed*. Gao dan Han (2012) memberikan hubungan untuk menghitung nilai (η_α) sebagai berikut :

$$\eta_\alpha = \frac{F_D - W_s \sin \alpha_s}{W_s \cos \alpha_s - F_D \tan \left[\arctan \left(\frac{F_L}{F_D} \right) \right]} \quad (2.44)$$

dengan,

η_α : *coefficient of critical lateral soil resistance*

F_D : gaya drag pipa

- W_s : berat terendam pipa
 α_s : sudut kemiringan seabed
 F_L : gaya angkat pipa

2.2.5.6. Kombinasi Pembebanan

Kondisi beban harus merefleksikan kemungkinan respon paling ekstrim yang terjadi pada pipa selama periode desain. Sebelum digunakan untuk menyalurkan minyak dan gas, pipa bawah laut perlu di instal di lokasi operasi. Kombinasi beban dibagi menjadi dua kondisi, yaitu sementara (instalasi) dan permanen (operasi).

1. Kondisi Sementara (Instalasi)

Kondisi sementara adalah kondisi pada saat fase instalasi, ketika pipa kosong. Kondisi sementara dapat dibagi menjadi dua:

- a. Untuk durasi kurang dari 12 bulan dan lebih dari 3 hari, digunakan periode ulang 10 tahun untuk kondisi aktual lingkungan. Pendekatan untuk kondisi ini adalah menggunakan kondisi paling ekstrim diantara dua kondisi berikut:
 - Periode ulang 10 tahun gelombang dikombinasikan dengan periode ulang 1 tahun arus.
 - Periode ulang 1 tahun gelombang dikombinasikan dengan periode ulang 10 tahun arus.
- b. Untuk durasi kurang dari 3 hari, kondisi beban ekstrim ditentukan berdasarkan data harian cuaca terpercaya. Sedangkan kondisi sementara yang melebihi 12 bulan, digunakan kondisi permanen (operasi).

2. Kondisi Permanen (Operasi)

Untuk kondisi operasi atau permanen dan kondisi sementara yang melebihi 12 bulan, digunakan periode ulang 100 tahun. Pendekatan kondisi permanen menggunakan beban paling ekstrim diantara dua kondisi berikut:

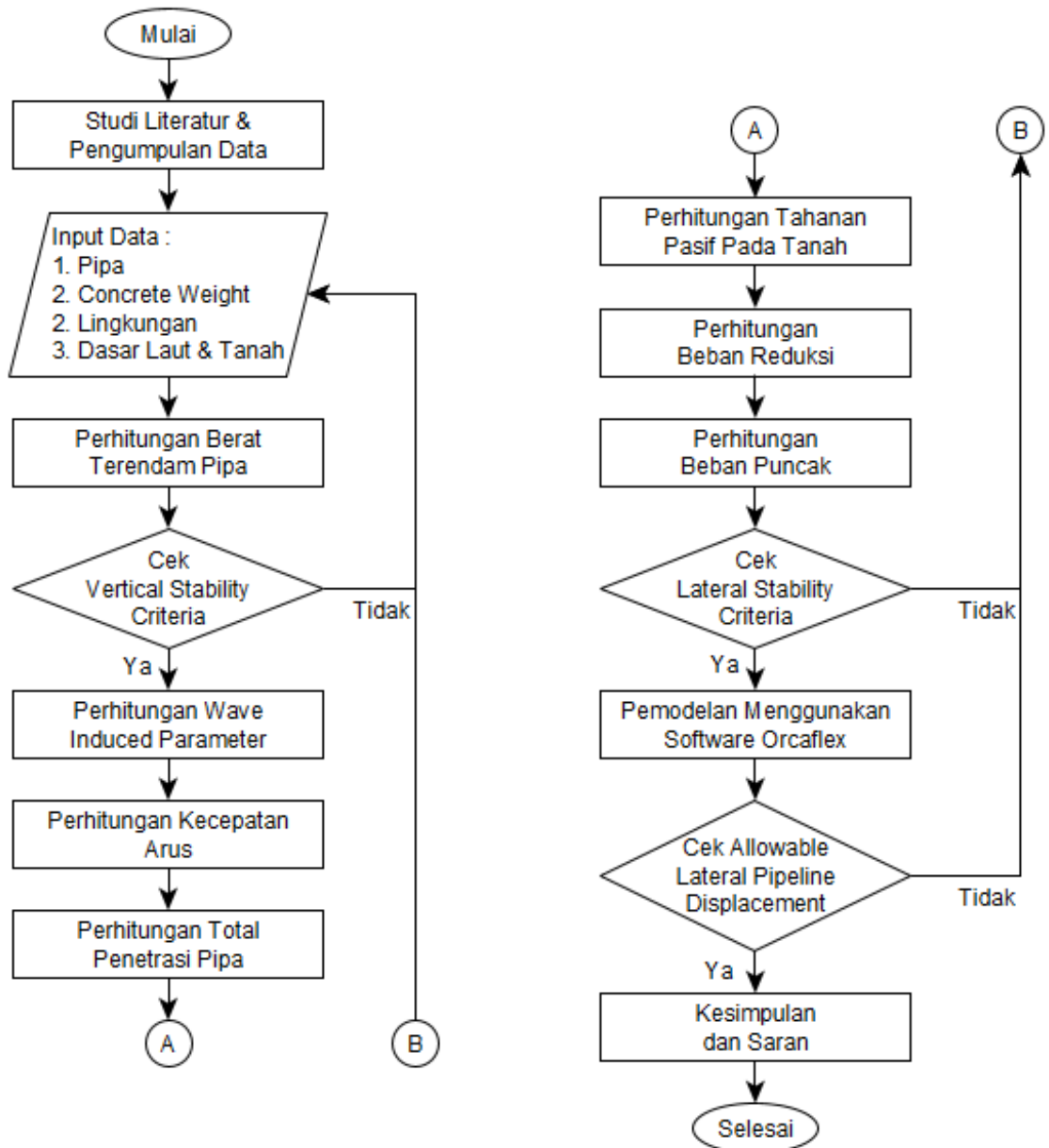
- a. Periode ulang 100 tahun gelombang dikombinasikan dengan periode ulang 10 tahun arus.
- b. Periode ulang 10 tahun gelombang dikombinasikan dengan periode ulang 100 tahun arus.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Metodologi penelitian yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini dapat direpresentasikan melalui diagram alir pada Gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2. Penjelasan Diagram Alir

1. Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Pada tahap ini penulis akan mempelajari dasar teori, studi pustaka, dan penelitian yang berkaitan dengan *on-bottom stability* pada pipa. Bahan studi literatur dapat diperoleh dari buku, jurnal, dan juga *codes/standar* internasional. Kemudian dilanjutkan dengan pengumpulan data-data yang nantinya dibutuhkan dalam penelitian.

2. Input Data

Penginputan data disini meliputi data properti pipa, properti beton pemberat, data lingkungan perairan, dan juga tanah serta dasar laut.

3. Perhitungan Berat Terendam Pipa

Setelah dilakukan perhitungan terhadap properti pipa maka akan ditemukan berat terendam dari pipa tersebut

4. Pengecekan *Vertical Stability Criteria*

Jika berat terendam dari pipa sudah diketahui maka perlu dilakukan verifikasi terhadap *vertical stability criteria* agar memastikan berat dari pipa sudah mengakomodir gaya apung dari pipa ketika tercelup didalam air.

5. Perhitungan *Wave Induced Parameter*

Perhitungan *wave induced parameter* digunakan untuk menentukan nilai dari kecepatan arus yang disebabkan oleh gelombang yang ada dipermukaan laut.

6. Perhitungan Kecepatan Arus

Di sini perhitungan kecepatan arus yang dimaksud adalah kecepatan arus steady yang mengenai pipa karena faktor kedalaman laut

7. Perhitungan Total Penetrasi Pipa

Setelah didapatkan kecepatan arus yang mengenai pipa selanjutnya dilakukan perhitungan terhadap total penetrasi dari pipa akibat dari berat pipa dengan gaya hidrodinamika dan tanah yang bekerja pada pipa

8. Perhitungan Tahanan Pasif pada Tanah

Perhitungan tahanan pasif pada tanah digunakan untuk mengetahui besar dari gaya tahanan tanah terhadap pipa ketika meletak didasar laut.

9. Perhitungan Beban Reduksi

Ada beberapa kondisi yang dapat mengurangi beban yang diterima oleh pipa ketika berada di dasar laut. Kondisi-kondisi seperti kondisi dasar laut, kondisi penetrasi pipa, kondisi akibat trenching. Kondisi tersebut dapat mengurangi beban yang diterima oleh pipa sehingga bisa disebut beban reduksi.

10. Perhitungan Beban Puncak

Setelah didapatkan nilai dari total reduksi pada pipa dan juga kondisi arus yang mengenai pipa maka selanjutnya dapat diketahui nilai dari beban puncak yang terjadi pada pipa baik arah vertikal maupun horizontal.

11. Pengecekan *Lateral Stability Criteria*

Jika parameter-parameter lingkungan yang bekerja pada pipa sudah diketahui semuanya, selanjutnya dilakukan verifikasi *Lateral Stability Criteria* terhadap pipa untuk didapatkan berat optimum dari pemberat (*concrete weight*) yang dibutuhkan agar pipa stabil.

12. Pemodelan Menggunakan *Software OrcaFlex*

Setelah didapatkan berat dari pemberat pipa selanjutnya dilakukan pemodelan menggunakan bantuan *software OrcaFlex* untuk mengetahui gaya hidrodinamika yang bekerja pada pipa dan pergeseran *lateral* yang terjadi pada pipa ketika dikenai beban lingkungan ekstrim (arah arus dan gelombang tegak lurus terhadap pipa).

13. Pengecekan Berdasarkan *Allowable Lateral Pipeline Displacement*

Hasil yang didapatkan dari simulasi menggunakan software nantinya akan di verifikasi terhadap *Allowable Lateral Pipeline Displacement* menurut DNVGL RP F109 sebesar $0.5D$ untuk area 500m di dekat platform. Jika tidak memenuhi maka berat dari pemberat akan diperbesar hingga pipa memenuhi persyaratan pergerakan lateral maksimum.

14. Kesimpulan dan Saran

Pada tahap terakhir ini penulis akan menarik kesimpulan sesuai dengan permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data operasi, spesifikasi pipa RTP, beton pemberat, kondisi lingkungan, dan dasar laut serta tanah. Data-data tersebut adalah milik PT. X yang penulis dapatkan ketika melaksanakan program kerja praktik. Berikut merupakan lampiran tabel data yang penulis gunakan mulai dari Tabel 4.1 sampai dengan Tabel. 4.6.

Tabel 4.1 Properti Pipa

Parameter	Units	Value
Pipe Data	-	-
Pipe Outside Diameter	mm	142.3
Pipe Outside Diameter	mm	179.9
Storage/Operating Bend Radius, SBR/OBR	m	1.61
Weight	-	-
Weight Empty in Air	kg/m	21.1
Weight Water-filled in Air	kg/m	37.4
Weight Empty in Water	kg/m	-4.9
Weight Water-filled in Water	kg/m	11.4
SG Empty in Air	-	0.83
SG Pipe Wall	-	2.22
Pressures	-	-
Design Pressure	MPa	10.34
Factory Test Pressure	MPa	13.44
Burst Pressure	MPa	22.76
Maximum External Pressure	kPa	793
Maximum Water Depth	M	81
Thermal Properties	-	-
Maximum Temperature	°C	60
Mechanical Properties	-	-
Bending Stiffness, EI	Nm ²	14158
Spooling Tension	kN	5.5
Maximum Installation Tension	kN	89

Tabel 4.2 Data Batimetri

Location	Units	Value
LE Platform	m	33.6
LD Platform	m	31.0

Tabel 4.3 Data Operasi

Parameter	Units	Value
Fluid Service	-	Gas
Max. Operating Temperature (MOT)	°C	60
Max. Allowable Operating Pressure (MAOP)	barg	38.95
Operating Temperature (OT)	°C	38
Operating Pressure (OP)	barg	19.03
Hydrotest Pressure	barg	54.54
Content Density	kg/m ³	38

Tabel 4.4 Data Metaocean

Description	Units	Return Period	
		1 Yr	100 Yr
Wind Speed	-	-	-
60-minute mean	m/s	9.9	20.6
1-minute mean	m/s	12.3	25.7
3-second gust	m/s	14.9	31.2
Wave Height	-	-	-
Significant Wave Height (Hs)	m	1.8	3.6
Significant Wave Period (Ts)	m	6.3	8.3
Maximum Individual Wave Height (Hmax)	m	3.2	6.4
Maximum Individual Wave Period (Tmax)	s	6.6	9.4
Water Level	-	-	-
Astronomical Tide – Highest (above MSL)	m	0.53	0.53
– Lowest (below MSL)	m	0.61	0.61
Strom Surge (above MSL)	m	0.02	0.10
Current Speed Data	-	-	-
At 0% of depth (depth=31m)	m/s	0.72	1.15
10% of depth	m/s	0.62	0.93
20% of depth	m/s	0.54	0.77
30% of depth	m/s	0.48	0.65
40% of depth	m/s	0.44	0.56
50% of depth	m/s	0.41	0.50
60% of depth	m/s	0.39	0.45
70% of depth	m/s	0.37	0.42
80% of depth	m/s	0.36	0.39
90% of depth	m/s	0.35	0.38
100% of depth	m/s	0.34	0.36

Tabel 4. 5 Data Perairan

Parameter	Units	Max	Mean	Min
Seawater Temperature	Surface	32.3	28.9	26.1
	On Seabed	25	22.8	21
Salinity	%	3.25		
Seawater Density	kg/m ³	1025		

Tabel 4.6 Data Tanah

Parameter	Units	Value
Soil Type	-	Very Soft Clay
Undrained Shear Strength, S_u	kPa	4.78
Submerged Unit Weight of Soil	kN/m ³	6.28

4.2. Perhitungan Berat Terendam

Sebelum dilakukan perhitungan berat terendam pipa perlu dilakukan perhitungan properti pipa yang hasilnya terlampir pada tabel 4.7. Setelah itu, berat terendam dapat dicari dengan mengurangi berat ketika di udara terhadap gaya apung yang bekerja. Perhitungan yang dilakukan meliputi berat terendam pipa dan berat terendam beton pemberat dengan meninjau dua kondisi yaitu kondisi instalasi dan operasi yang mana pada saat kondisi instalasi pipa kosong berisi udara dan ketika operasi berisi konten gas. Dalam perhitungan berat terendam ini, pipa RTP diasumsikan diselimuti oleh *concrete weight coating* sebagai pemberat untuk memenuhi persamaan perhitungan berat terendam yang digunakan dalam DNVGL RP F109 dengan tebal minimum *concrete weight coating* sebesar 40mm sesuai rekomendasi DNV OS F101 Section 9C tentang “*Concrete Weight Coating*”. Tabel 4.8 berikut menyajikan hasil perhitungan berat terendam.

Tabel 4.7 Tabel Properti Pipa

Deskripsi	Satuan	Nilai
Diameter Luar Pipa	mm	179.9
Tebal Nominal Pipa	mm	18.8
Tebal Concrete	mm	40
Massa Jenis Pipa	kg/m ³	2218
Massa Jenis Concrete	kg/m ³	2400

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Berat Terendam

Deskripsi	Satuan	Nilai	
		Instalasi	Operasi
Berat pipa di udara	N/m	206.92	206.92
Berat beton pemberat	N/m	650.38	650.38
Berat konten pipa	N/m	0.00	5.93
Buoyancy pipa	N/m	255.50	255.50
Buoyancy beton pemberat	N/m	277.77	277.77
Berat terendam pipa + konten	N/m	-48.58	-42.66
Berat terendam beton pemberat	N/m	372.61	372.61
Berat terendam pipa dan beton pemberat per satuan panjang	N/m	324.03	362.48

Dari perhitungan berat terendam yang dilakukan bahwa apabila nilai dari berat terendam adalah negatif, berarti gaya *buoyancy* yang bekerja lebih besar daripada gaya berat yang bekerja. Oleh karena, dikarenakan pipa RTP memiliki nilai berat terendam negatif maka untuk menjaga stabilitas pipa ketika meletak di dasar laut diperlukan tambahan beton pemberat sebesar 650.38 N/m dengan *minimum weight requirement* sebesar 324.04 N/m pada saat kondisi instalasi dan sebesar 362.48 N/m pada kondisi operasi.

4.3. Pengecekan *Vertical Stability Criteria*

Pengecekan *vertical stability criteria* dilakukan untuk mengetahui apakah berat pipa ketika di udara cukup untuk melawan gaya apung ketika pipa tercelup di dalam air agar memenuhi kriteria stabilitas yang telah ditentukan oleh DNVGL RP F109. Tabel 4.9 dibawah ini menyajikan hasil perhitungan kriteria stabilitas yang telah dilakukan dengan menggunakan nilai *safety factor* (γ_w) sebesar 1.1 sesuai rekomendasi DNVGL RP F109 Section 3.2 tentang “*Vertical Stability in Water*”. Adapun persamaan kriteria tersebut dapat dilihat pada persamaan (4.1) sebagai berikut:

$$\gamma_w \cdot \frac{b}{W_s + b} = \frac{\gamma_w}{S_g} \leq 1.0 \quad (4.1)$$

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan *Vertical Stability Criteria*

Kondisi	<i>Safety Factor</i>	W_s (N/m)	<i>Design Criteria</i>	Keterangan
Instalasi	1.1	324.04	0.68	Memenuhi
Operasi		362.48	0.65	Memenuhi

Dari Tabel 4.9 tersebut didapatkan bahwa nilai *design criteria* dari stabilitas vertikal pipa tidak lebih dari 1 (satu) sehingga memenuhi kriteria persyaratan stabilitas vertikal yang disyaratkan. Nilai dari *design criteria* akan semakin mengecil jika berat terendam pipa bertambah yang mana hal tersebut berpengaruh pada stabilitas vertikal pipa yang semakin baik, begitu pun sebaliknya.

4.4. Perhitungan *Wave Induced Parameter*

Berdasarkan standar DNVGL RP F109 dalam menentukan stabilitas dari pipa bawah laut diperlukan analisis gaya hidrodinamis yang mengenai pipa.

Perhitungan *wave induced parameter* bertujuan untuk mengetahui besar kecepatan arus yang mengenai pipa yang terjadi akibat pengaruh transformasi gelombang yang ada dipermukaan laut. Perhitungan *wave induced parameter* disini di mulai dari perhitungan nilai peak enhancement factor yang nantinya digunakan untuk mengetahui nilai konstanta Generalized Philip's. Nilai dari konstanta Generalized Philip's ini nantinya digunakan sebagai input dalam perhitungan spektrum JONSWAP yang mana menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \cdot \gamma^{\exp\left(-0.5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma \cdot \omega_p}\right)^2\right)} \quad (4.2)$$

Selanjutnya untuk mencari transformasi kecepatan gelombang menjadi kecepatan partikel air di dasar laut dapat digunakan persamaan berikut ini:

$$S_{uu}(\omega) = G^2(\omega) \cdot S_{\eta\eta}(\omega) \quad (4.3)$$

Namun kecepatan signifikan ini nantinya akan dikalkulasi kembali dengan menambahkan faktor *seastate design* dengan simulasi waktu selama 3 jam (10800 detik) sehingga dihasilkan nilai kecepatan arus yang mengenai pipa pada kondisi lingkungan ekstrim. Hasil dari seluruh perhitungan gaya hidrodinamis ini dapat dilihat pada tabel 4.1 dibawah ini.

Tabel 4.10 Hasil Perhitungan *Wave Induced Parameter* pada KP 0.0

Parameter	Kedalaman (m)	Satuan	Kondisi	
			Instalasi	Operasi
M ₀	33.6	-	0.003	0.039
M ₂		-	0.002	0.016
U _s		m/s	0.10	0.39
T _u		s	8.07	9.70
U*		m/s	0.19	0.71
T*		s	8.07	9.78

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan *Wave Induced Parameter* pada KP 2.2

Parameter	Kedalaman (m)	Satuan	Kondisi	
			Instalasi	Operasi
M ₀	31.0	-	0.004	0.048
M ₂		-	0.002	0.021
U _s		m/s	0.12	0.44
T _u		s	7.96	9.58
U*		m/s	0.22	0.79
T*		s	7.96	9.70

Nilai-nilai yang didapatkan pada Tabel 4.10 dan Tabel 4.11 dapat menjadi pembahasan yang menarik juga bahwa nilai dari kecepatan arus yang mengenai pipa akan meningkat dan periodenya semakin kecil seiring dengan berkurangnya kedalaman perairan yang ditinjau. Oleh sebab itu untuk penelitian selanjutnya, peninjauan parameter pada kedalaman perairan yang paling rendah dapat digunakan sebagai acuan penentuan utama dalam desain *on-bottom stability* pipa bawah laut.

4.5. Perhitungan Kecepatan Arus *Steady*

Dalam perhitungan gaya hidrodinamika yang mengenai pipa juga diperlukan nilai parameter kecepatan arus *steady* yang mengenai pipa karena efek dasar laut seperti kedalaman perairan dan juga karakteristik tanah dasar laut. Nilai dari parameter tersebut dapat dicari melalui persamaan (4.4) berikut:

$$V_c = V_c(z_r) \cdot \left(\frac{\left(1 + \frac{z_0}{D}\right) \cdot \ln\left(\frac{D}{z_0} + 1\right) - 1}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0} + 1\right)} \right) \cdot \sin\theta_c \quad (4.4)$$

Untuk arah arus yang digunakan dalam perhitungan yaitu tegak lurus terhadap pipa ($\theta_c = 90^\circ$) sebagai asumsi kondisi terburuk pada pipa dan jenis tanah yang digunakan yaitu *silt and clay* dengan nilai *grain size* (D_{50}) sebesar 0.0625mm. Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa nilai kecepatan arus *steady* yang mengenai pipa adalah sebesar 0.26 m/s pada kondisi instalasi dan sebesar 0.28 m/s pada saat kondisi operasi pada kilometer point 2.2. Nilai dari arus *steady* sendiri juga bergantung pada kecepatan arus acuan yang digunakan dalam perhitungan, semakin dekat dengan pipa maka nilai yang didapatkan juga semakin akurat.

4.6. Perhitungan Penetrasi Total Pipa

Setelah didapatkan kecepatan arus yang mengenai pipa, selanjutnya perlu dilakukan perhitungan terhadap penetrasi total pipa yang terjadi akibat pengaruh dari berat pipa, gaya hidrodinamika, dan kondisi tanah tempat pipa meletak. Selain faktor-faktor tersebut, dalam perhitungan total penetrasi pipa juga mempertimbangkan faktor-faktor lain yang berpengaruh terhadap besarnya kedalaman penetrasi pipa seperti faktor penetrasi akibat proses *laying* dan juga

penetrasi akibat pergerakan pipa ketika beroperasi. Kedalaman penetrasi pipa dapat dicari melalui persamaan (4.5) berikut :

$$\frac{z_{pi}}{D} = 0.0071 \left(\frac{G_c^{0.3}}{k_c} \right)^{3.2} + 0.0062 \left(\frac{G_c^{0.3}}{k_c} \right)^{0.7} \quad (4.5)$$

Melalui perhitungan yang dilakukan berdasarkan persamaan (4.5) diatas ,didapatkan nilai dari penetrasi pipa yang terjadi adalah sedalam 2.71 cm pada saat kondisi instalasi dan sedalam 3.29 cm pada saat kondisi operasi baik pada kilometer point 0.0 maupun kilometer point 2.2. Perbedaan kedalaman penetrasi pipa tersebut diakibatkan oleh salah satu faktor utama yaitu berat terendam pipa yang mana berat pipa ketika kondisi operasi lebih berat dibandingkan ketika kondisi instalasi.

4.7. Perhitungan Gaya Tahanan Pasif Tanah

Jika nilai total penetrasi pipa sudah didapatkan, selanjutnya dilakukan perhitungan terhadap besarnya gaya tahanan pasif tanah yang bekerja pada pipa bawah laut. Perhitungan gaya tahanan pasif disini berguna untuk mengetahui besarnya gaya rekat tanah terhadap pipa untuk menjaga stabilitasnya ketika meletak di dasar laut. Pada studi kasus yang digunakan dalam penelitian ini jenis tanah yang digunakan ialah berjenis lempung yang besar gaya tahanan pasif tanahnya dapat dicari melalui persamaan 4.5 dibawah ini:

$$\frac{F_R}{F_C} = \frac{4.1k_c}{G_c^{0.39}} \left(\frac{z_p}{D} \right)^{1.31} \quad (4.5)$$

Melalui persamaan diatas dengan memasukkan parameter penetrasi total pipa maka didapatkan besar gaya tahanan pasif tanah pada kondisi instalasi adalah sebesar 261.77 N/m sedangkan pada kondisi operasi adalah sebesar 336.38 N/m. Besarnya nilai tahanan pasif tanah tersebut salah satu faktor yang mempengaruhi besar kecilnya adalah kedalaman penetrasi pipa pada dasar laut. Semakin dalam kedalaman penetrasi pipa maka nilai dari tahanan pasifnya juga semakin besar. Oleh karena itu, pipa akan semakin stabil apabila kedalamannya penetrasinya besar bahkan metode *buried* (mengubur pipa) merupakan salah satu solusi untuk menjaga stabilitas pipa bawah laut yang paling aman.

4.8. Perhitungan Faktor Beban Reduksi Total

Ketika pipa meletak di dasar laut ada beberapa kondisi yang terjadi pada pipa yang dapat mempengaruhi besarnya gaya lingkungan yang mengenai pipa. Faktor permeabilitas tanah dasar laut, kedalaman penetrasi pipa, dan pengaruh *trenching* sangat berpengaruh terhadap berkurangnya beban puncak yang diterima oleh pipa di dasar laut. Beban reduksi sendiri terbagi menjadi beban horizontal dan beban vertikal yang nilainya sudah ditentukan oleh DNVGL RP F109 pada masing-masing kondisi dengan rumusan sebagai berikut:

$$r_{tot,i} = r_{perm,i} \cdot r_{pen,i} \cdot r_{tr,i} \quad (4.6)$$

Notasi “*r*” persamaan (4.6) diatas mewakili sumbu vertikal (sumbu *z*) dan lateral (sumbu *y*) yang digunakan dalam perhitungan. Dalam studi kasus yang digunakan dalam penelitian ini jenis tanah yang digunakan adalah lempung dengan nilai permeabilitas bernilai 1 (satu) serta asumsi tidak dilakukan tindakan *trenching* terhadap pipa. Tabel 4.12 berikut merupakan rangkuman hasil perhitungan nilai beban reduksi yang terjadi pada pipa di tiap kilometer point yang ditinjau.

Tabel 4.12 Nilai Faktor Beban Reduksi Total

Kondisi	Arah	r_{perm}	r_{pen}	r_{tr}	r_{tot}
Instalasi	Horizontal	1.00	0.85	1.00	0.85
	Vertikal	1.00	0.99	1.00	0.99
Operasi	Horizontal	1.00	0.79	1.00	0.79
	Vertikal	1.00	0.94	1.00	0.94

Dari Tabel 4.12 tersebut diketahui bahwa pada saat kondisi operasi nilai faktor beban reduksi lebih kecil dibandingkan pada saat kondisi instalasi. Salah satu parameter yang mempengaruhi hal tersebut adalah kondisi kedalaman penetrasi pipa ketika sudah beroperasi yang lebih dalam dibandingkan ketika kondisi instalasi. Akibatnya beban puncak yang mengenai pipa akan berkurang berdasarkan nilai faktor beban reduksi tersebut.

4.9. Perhitungan Beban Puncak

Setelah didapatkan nilai dari total reduksi pada pipa dan juga kondisi arus yang mengenai pipa maka selanjutnya dapat diketahui nilai dari beban puncak

total yang mengenai pipa baik pada arah horizontal maupun vertikal melalui persamaan 4.7 dan persamaan 4.8 dibawah ini :

$$F_Y^* = r_{tot,y} \frac{1}{2} \rho_w DC_Y^* (U^* + V^*)^2 \quad (4.7)$$

$$F_Z^* = r_{tot,z} \frac{1}{2} \rho_w DC_Z^* (U^* + V^*)^2 \quad (4.8)$$

Gaya hidrodinamis dalam arah horizontal terjadi karena adanya pergerakan partikel air yang bekerja di sekitar pipa. Gaya horizontal yang terjadi pada pipa merupakan gabungan gaya drag dan juga gaya inersia. Gaya drag terjadi karena adanya gesekan antara fluida dengan dinding pipa, sedangkan gaya inersia dikarenakan adanya perpindahan massa fluida yang mengenai pipa. Untuk gaya hidrodinamis arah vertikal yang bekerja pada pipa merupakan gaya angkat pipa akibat arus *streamline* yang mengenai pipa. Gaya-gaya hidrodinamis ini dapat di cari dengan menentukan terlebih dahulu nilai *velocity ratio* dan *Keulegan-Carpenter number* masing-masing kondisi di masing-masing kilometer point yang ditinjau seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Nilai *Peak Load Coefficient*

Kondisi	KP (km)	Kedalaman (m)	M*	K*	C _Y *	C _Z *
Instalasi	0.0	33.6	1.35	5.91	1.93	1.12
Operasi			0.39	26.55	1.29	1.00
Instalasi	2.2	31.0	1.16	6.81	1.92	1.16
Operasi			0.35	29.24	1.39	1.15

Dari Tabel 4.13 diatas nilai M* akan semakin membesar seiring bertambahnya kedalaman perairan, berkebalikan dengan nilai K* yang semakin mengecil apabila kedalamannya bertambah. Nilai-nlai M* dan K* tersebut juga berhubungan linier dengan nilai *peak load coefficient* yang didapatkan. Hasil dari perhitungan beban puncak total yang mengenai pipa pada tiap kilometer point yang ditinjau berdasarkan nilai *velocity ratio* dan *Keulegan-Carpenter number* yang sudah didapatkan sebelumnya ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Besar Beban Puncak Yang Bekerja Pada Pipa

Kondisi	KP (km)	Kedalaman (m)	Beban Puncak Horizontal (N/m)	Beban Puncak Vertikal (N/m)
Instalasi	0.0	33.6	43.93	29.69
Operasi			133.93	122.71
Instalasi	2.2	31.0	50.52	35.54
Operasi			169.74	165.98

4.10. Pengecekan Lateral Stability Criteria

Jika parameter-parameter lingkungan yang bekerja pada pipa sudah diketahui, selanjutnya dilakukan verifikasi *Lateral Stability Criteria* berdasarkan kriteria DNVGL-RP-F109 dengan metode *absolute lateral static stability*. Metode ini mengharuskan bahwa pipa tidak diizinkan untuk berpindah sehingga berat terendam dan gaya tahanan pasif tanah harus lebih besar daripada gaya-gaya hidrodinamis yang mengenai pipa. Adapun kriterianya berdasarkan pada persamaan 4.9 berikut

$$\gamma_{sc} \cdot \frac{F_Y^* + \mu \cdot F_Z^*}{\mu \cdot W_s + F_R} \leq 1.0 \quad (4.9)$$

Pada penelitian ini saat kondisi instalasi pipa berisi konten berupa udara sedangkan pada saat kondisi operasi pipa berisi konten gas hidrokarbon. Perhitungan stabilitas lateral dilakukan menggunakan arah datang sudut gelombang dan arus sebesar 90° atau tegak lurus dengan pipa. Nilai *safety factor* yang digunakan beracuan pada standar DNV OS F101 tentang “*Submarine Pipeline Systems*” pada Section 2 mengenai *Risk Basis for Design*. Nilai *safety factor* dipilih dengan menentukan terlebih dahulu kategori fluida konten pipa kemudian menentukan lokasi pipa. Dalam penelitian ini digunakan jenis fluida dengan kategori *E* pada lokasi zona 2 dikarenakan lokasi pipa yang merupakan zona yang memiliki frekuensi aktivitas manusia yang tinggi di sekitarnya. Berdasarkan acuan tersebut maka dapat diambil nilai *safety factor* (γ_{sc}) sebesar 1,0 (satu) untuk kondisi instalasi dan *safety factor* (γ_{sc}) sebesar 1,83 untuk kondisi operasi. Tabel 4.15 berikut menyajikan hasil dari perhitungan *lateral stability criteria* pipa di tiap kilometer point yang ditinjau berdasarkan persamaan (4.9).

Tabel 4.15 Hasil Perhitungan Lateral Stability Criteria

Kondisi	KP (km)	Kedalaman (m)	Safety Factor	Lateral Stability Criteria	Keterangan
Instalasi	0.0	33.6	1.0	0.15	Memenuhi
Operasi			1.83	0.60	Memenuhi
Instalasi	2.2	31.0	1.0	0.18	Memenuhi
Operasi			1.83	0.77	Memenuhi

Didapatkan bahwa nilai *design criteria* pada stabilitas lateral pipa tidak lebih dari 1 (satu) sehingga pipa masih memenuhi kriteria persyaratan yang digunakan oleh DNVGL RP F109. Faktor kedalaman perairan yang semakin dalam menyebabkan beban puncak yang mengenai pipa semakin menurun sehingga nilai *design criteria* stabilitas lateralnya semakin kecil yang mana berarti pipa semakin aman untuk tidak bergeser ketika terkena beban lingkungan ketika meletak di dasar laut.

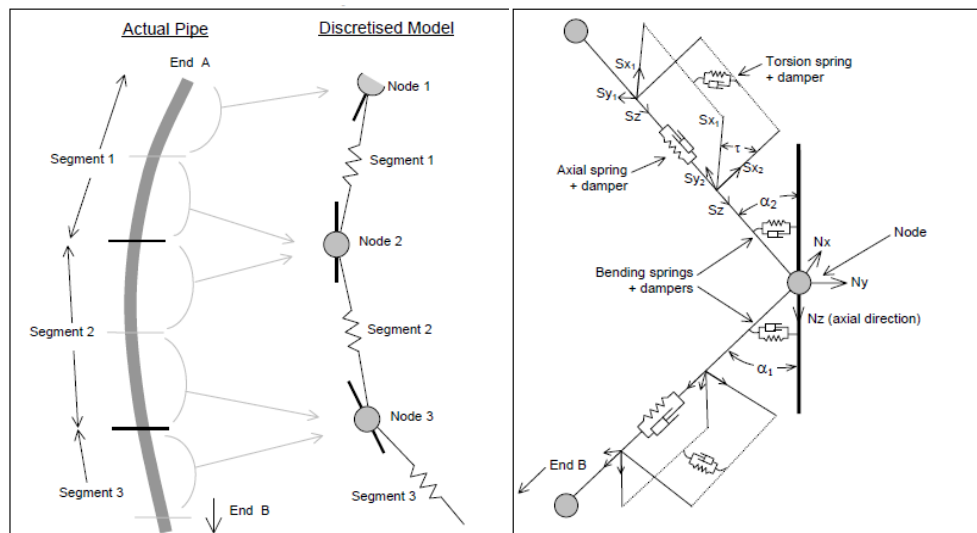
4.11. Pemodelan Menggunakan Software OrcaFlex

4.11.1. Pemodelan Pipa Fleksibel

Analisis dinamis dengan metode *dynamic lateral stability* dilakukan menggunakan bantuan *software* berbasis *time domain analysis* yaitu OrcaFlex untuk mensimulasikan stabilitas pipa fleksibel di dasar laut. Seluruh komponen-komponen kritis dalam analisis stabilitas pipa bawah laut dimodelkan dengan kriteria-kriteria tertentu seperti pipa RTP dimodelkan sebagai *homogeneous pipe line element* dan beton pemberat dimodelkan sebagai *clump attachment* pada pipa. Dalam simulasi, arah arus dan gelombang yang digunakan adalah tegak lurus terhadap pipa sebagai skenario terburuk terhadap kondisi lingkungan. Pada saat kondisi instalasi pipa berisi konten berupa udara sedangkan pada saat kondisi operasi pipa berisi konten gas hidrokarbon. Untuk kondisi pembebanan lingkungan pada saat kondisi instalasi digunakan periode ulang 1 (satu) tahunan untuk kombinasi gelombang dan arus, sedangkan saat kondisi operasi menggunakan kombinasi gelombang dan arus dengan periode ulang 100 tahunan. Simulasi dinamis dilakukan dengan durasi *seastate* selama 3 jam (10800 detik). Dalam melakukan simulasi menggunakan *software* OrcaFlex selain diperlukan input properti pipa, juga diperlukan input kondisi lingkungan yang meliputi

kedalaman laut, salinitas air laut, massa jenis air laut, karakter dasar laut, properti tanah, data gelombang, data arus, serta data angin.

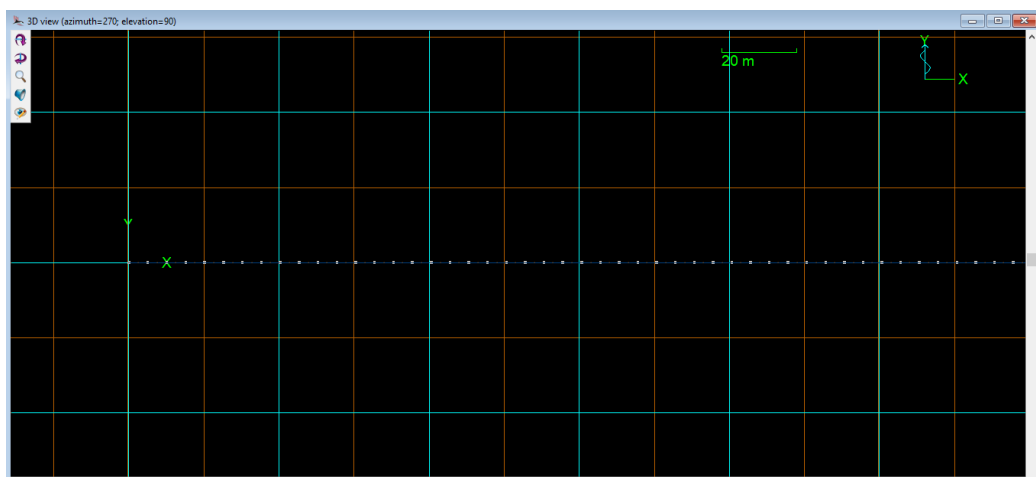
Dalam OrcaFlex, *lines* direpresentasikan oleh model elemen hingga dengan massa terpusat. Massa, volume dan properti hidrodinamik dari panjang line diakumulasikan dalam sebuah node, sedangkan rangkaian spring dan dampers didefinisikan mewakili *axial bending* dan *torsional stiffness*. *Axial stiffness* dan *axial damping* dari *line* dapat dimodelkan dengan *axial spring* dan *axial damper* pada tiap titik tengah di setiap segmen, sehingga dapat menimbulkan *tension force* yang besarnya sama dan memiliki arah yang berlawanan pada *node* di setiap segmen. Kelenturan dari *line* dapat dimodelkan dengan *rotational spring* dan *rotational dampers* di kedua sisi *node* yang terbentang diantara sumbu axial *node* NZ dan sumbu axial segmen SZ seperti yang dapat dijelaskan melalui Gambar 4.1 dibawah ini.



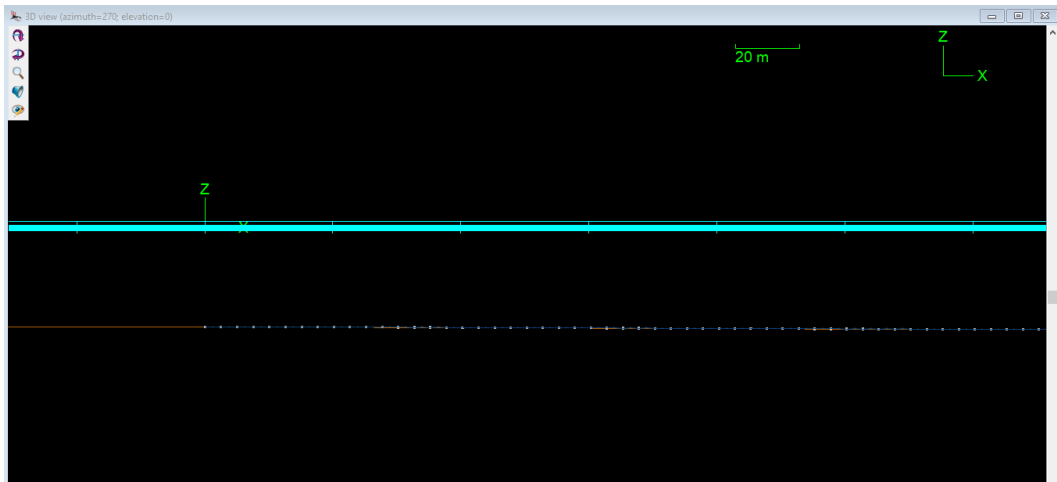
Gambar 4.1 Model *Line Element* OrcaFlex (Manual, 2008)

Dalam pemodelan menggunakan *software* OrcaFlex, hasil perhitungan stabilitas vertikal dan lateral yang sudah dilakukan sebelumnya menjadi acuan dalam penentuan massa beton pemberat serta jarak peletakkan antar beton pemberat. Pipa dimodelkan searah sumbu x sepanjang 2,2 kilometer seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 hingga Gambar 4.4. Untuk kontur dasar laut di modelkan dengan tipe profile pada OrcaFlex yang mana hanya dimodelkan kontur arah memanjang (sumbu x) dan untuk arah transversal (sumbu y) di asumsikan datar seperti pada Gambar 4.5.

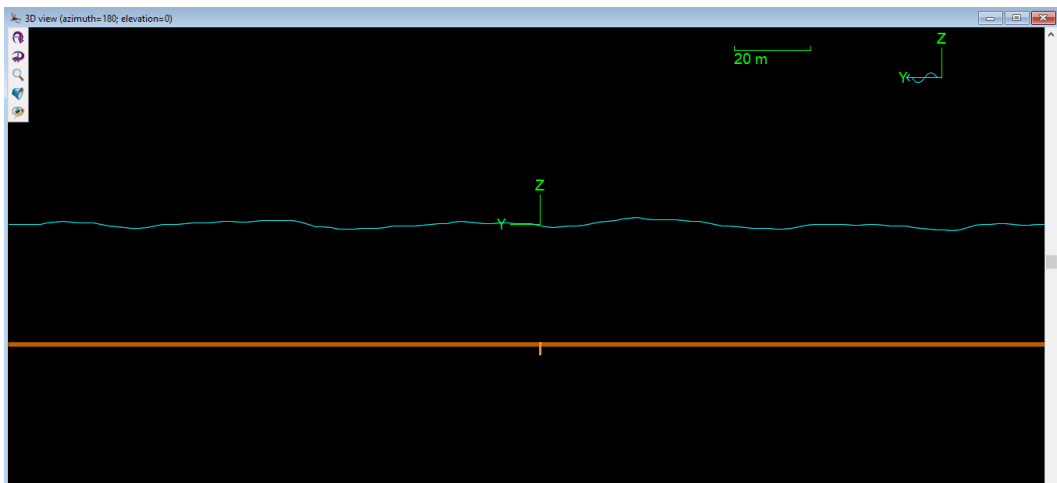
Diketahui melalui perhitungan menggunakan metode *absolute lateral static stability* bahwa pipa RTP memerlukan tambahan pemberat seberat 66,8 kg tiap meternya agar dapat meletak dengan stabil di dasar laut, sehingga beton pemberat dimodelkan sebagai clump dengan interval pemasangan tiap 5 meter pada pipa RTP seberat 332 kg seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Beton pemberat diasumsikan memiliki massa jenis yang sama dengan massa jenis beton bertulang yaitu 2400 kg/m^3 . Untuk ukuran dari beton pemberat yang digunakan berbentuk balok dengan ukuran panjang 50 cm, lebar 60 cm, dan tinggi 50 cm. Selain itu, beton pemberat diberi lubang berdiameter 18 cm di tengahnya yang berguna pada saat pemasangan pipa. Pada lubang beton pemberat tersebut juga dilapisi dengan lapisan *rubber* setebal 6mm yang berguna untuk mencegah gesekan langsung antara pipa dengan beton pemberat yang dapat menyebabkan kerusakan pada lapisan luar pipa RTP.



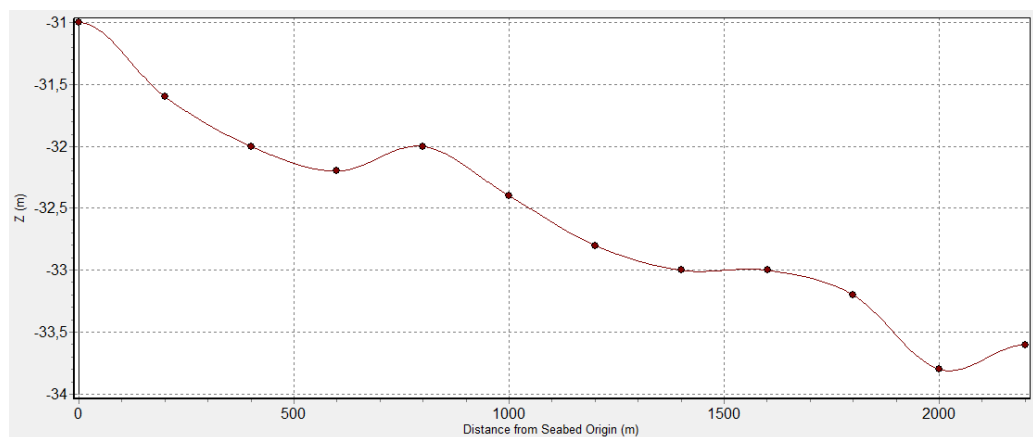
Gambar 4.2 Pemodelan Menggunakan Orcaflex Tampak Atas



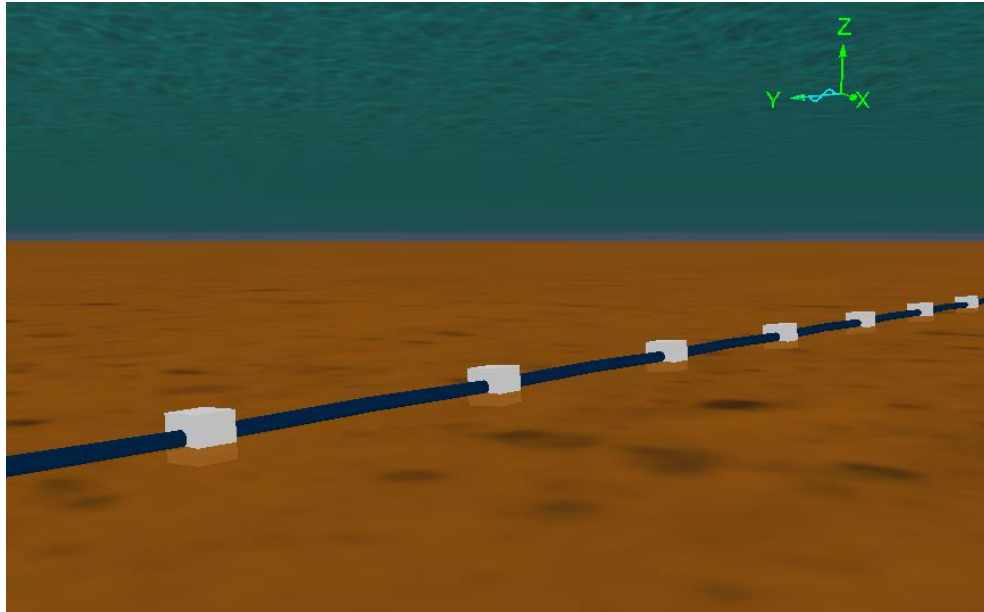
Gambar 4.3 Pemodelan Menggunakan Orcaflex Tampak Longitudinal



Gambar 4.4 Pemodelan Menggunakan Orcaflex Tampak Transversal



Gambar 4.5 Longitudinal Seabed Profile Pada Orcaflex



Gambar 4.6 Pemodelan Menggunakan Orcaflex Tampak 3 Dimensi

4.11.2. Hasil Pemodelan Stabilitas Dinamis

Dalam pemodelan *on-bottom stability* menggunakan software OrcaFlex ini dapat dilakukan validasi terhadap properti pipa dan beton pemberat pada OrcaFlex dengan properti pipa dan beton pemberat hasil perhitungan manual. Apabila karakteristik pemodelan dan juga hasil perhitungan manual sama, maka pemodelan yang dilakukan dapat dikatakan valid. Perbandingan properti hasil perhitungan manual dengan properti menggunakan *software* ditunjukkan pada Tabel 4.18 dan 4.19.

Tabel 4.16 Hasil Validasi Properti Pipa dan Beton Pemberat Kondisi Instalasi

Parameter	Satuan	Manual	OrcaFlex	Koreksi
Berat Pipa + Konten di Udara	N/m	206.92	207	0.03%
Berat Terendam Pipa + Konten	N/m	-48.58	-49	0.85%
Berat Beton Pemberat di Udara	N/m	650.38	651.2	0.12%
Berat Terendam Beton Pemberat	N/m	372.61	373.8	0.31%

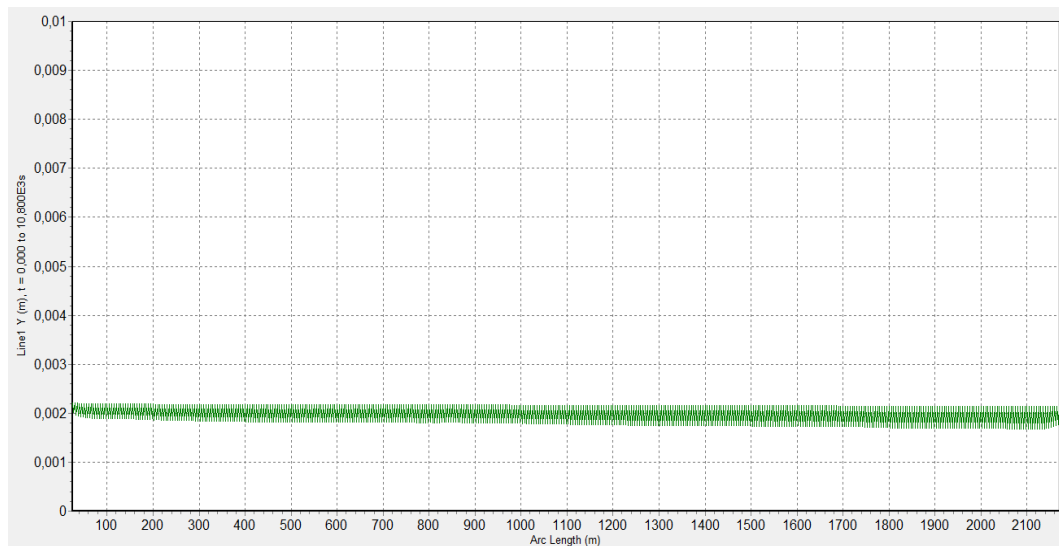
Tabel 4.17 Hasil Validasi Properti Pipa dan Beton Pemberat Kondisi Operasi

Parameter	Satuan	Manual	OrcaFlex	Koreksi
Berat Pipa + Konten di Udara	N/m	212.85	213	0.07%
Berat Terendam Pipa + Konten	N/m	-42.66	-43.00	0.79%
Berat Beton Pemberat di Udara	N/m	650.38	651.2	0.12%
Berat Terendam Beton Pemberat	N/m	372.61	373.8	0.31%

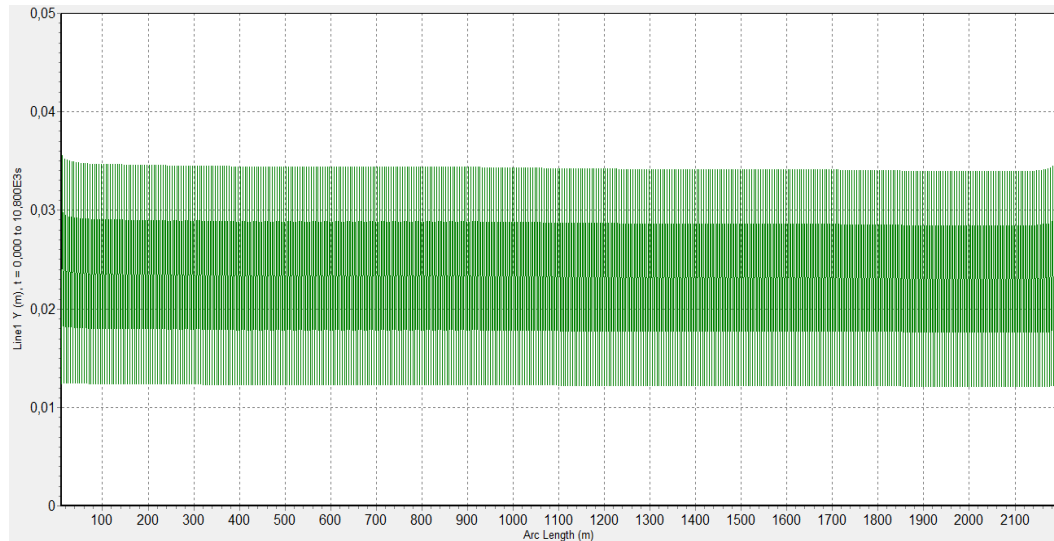
Melalui hasil *running* menggunakan *software* Orcaflex akan didapatkan nilai perpindahan lateral maksimum yang di alami oleh pipa. Menurut standar DNVGL RP F109, perpindahan lateral maksimum yang diperbolehkan adalah sebesar 10D pada zona 1 dan sebesar 0.5D pada zona 2. Zona 1 merupakan area dengan frekuensi aktifitas manusia yang kecil dengan radius jangkauan lebih dari 500 meter diluar platform, sedangkan zona 2 merupakan area dengan frekuensi aktifitas manusia yang tinggi dengan radius jangkauan 500 meter disekitar platform. Dari hasil simulasi dinamis didapatkan nilai besar pergeseran lateral yang terjadi pada pipa seperti yang terlampir pada Tabel 4.20. Sedangkan grafik pergeseran lateral sepanjang rute pipa baik saat kondisi instalasi dan operasi hasil simulasi menggunakan *software* dapat dilihat pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7.

Tabel 4.18 Hasil Simulasi *Software* Orcaflex

Kondisi	KP (km)	Beton Pemberat	Perpindahan Lateral Maks. (mm)	Pipeline Zone	Perpindahan Lateral Izin (mm)
Instalasi	0.0	332kg tiap interval 5m	1.73	2	(0.5D)89.95
Operasi			34.09		
Instalasi	2.2		2.17		
Operasi			34.39		



Gambar 4.7 Pergerakan Lateral Pipa Sepanjang Rute Saat Kondisi Instalasi



Gambar 4.8 Pergerakan Lateral Pipa Sepanjang Rute Saat Kondisi Operasi

4.12. Pembahasan Hasil Analisis *On-Bottom Stability*

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan menurut alur pengerjaan yang digunakan dalam penelitian ini. Maka dapat dibuat rangkuman hasil perhitungan sesuai tabel 4.19 dan Tabel 4.20.

Tabel 4.19 Hasil Perhitungan *Vertical Stability Criteria*

Kondisi	<i>Safety Factor</i>	W_s (N/m)	<i>Vertical Stability Criteria</i>	Keterangan
Instalasi	1.1	324.04	0.68	Memenuhi
Operasi		362.48	0.65	Memenuhi

Tabel 4.20 Perbandingan Hasil *Lateral Stability Criteria* dengan *Maximum Lateral Displacement* Menggunakan *Software*

Kondisi	KP (km)	Kedalaman (m)	<i>Lateral Stability Criteria</i>	<i>Maximum Lateral Displacement</i>	Keterangan
Instalasi	0.0	33.6	0.15	1.73 mm	Memenuhi
Operasi			0.60	34.09 mm	Memenuhi
Instalasi	2.2	31.0	0.18	2.17 mm	Memenuhi
Operasi			0.77	34.39 mm	Memenuhi

Dari hasil perhitungan dan simulasi menggunakan bantuan *software* yang telah dilakukan, diketahui bahwa pipa RTP yang sudah diberi tambahan berat dengan beton pemberat sebesar 650.38 N/m dapat memenuhi kriteria stabilitas vertikal berdasarkan metode *absolute lateral static stability*. Selain itu,

berdasarkan perhitungan dengan metode *absolute lateral static stability* pipa memiliki nilai desain kriteria pergerakan lateral yang nilainya kurang dari 1 (satu) sehingga juga dapat dikatakan memenuhi kriteria stabilitas lateral, yang mana jika dilakukan analisis menggunakan metode *dynamic lateral stability* berdasarkan simulasi *time domain* menggunakan *software* OrcaFlex, pipa juga masih memenuhi persyaratan pergerakan lateral izin yang mana kurang dari 0.5D pada lokasi zona 2 dengan frekuensi aktivitas manusia tinggi disekitar rute pipa yang mana persyaratan pergerakan pipa pada zona 1 sebesar 10D dengan frekuensi aktivitas manusia rendah juga masih memenuhi.

Selain itu, melalui perbandingan nilai kriteria stabilitas lateral menggunakan metode *absolute lateral static stability* dan *dynamic lateral stability* dapat disimpulkan juga bahwa nilai *design criteria* hasil perhitungan berbanding lurus dengan nilai pergeseran yang terjadi berdasarkan simulasi dinamis menggunakan bantuan *software* yang mana semakin kecil nilai *design kriteria* maka pergeseran lateral yang terjadi hasil dari simulasi dinamis juga semakin kecil, begitupun sebaliknya.

4.13. Pembahasan Analisis *On-Bottom Stability* pada *Sloping Seabed*

Pada kondisi sebenarnya di lapangan, kontur dasar laut di selalu datar. Kestabilan pada *sloping seabed* dipengaruhi oleh *lateral soil resistance* (F_R) dan gaya drag (F_D). Gao dan Han (2012) memberikan hubungan antara *lateral soil resistance* dengan gaya drag melalui persamaan (4.10) berikut :

$$F_R = F_D - W_s \sin \alpha_s \quad (4.10)$$

Sementara itu *contact force* (F_C) antara pipa dengan *seabed* akan memberikan pengaruh pada *coefficient of critical lateral soil resistance* (η_α) yang mana merupakan rasio antara besarnya *lateral soil resistance* (F_R) dengan gaya kontak pipa pada *sloping seabed* (F_C). Gao dan Han (2012) memberikan hubungan untuk menghitung nilai (η_α) ditunjukkan melalui persamaan (4.11).

$$\eta_\alpha = \frac{F_D - W_s \sin \alpha_s}{W_s \cos \alpha_s - F_D \tan \left[\arctan \left(\frac{F_L}{F_D} \right) \right]} \quad (4.11)$$

Pada penelitian ini berdasarkan data batimetri yang ada, diperoleh bahwa pada kilometer point 2.2 memiliki kemiringan yang paling besar yaitu sebesar 14°

dengan kondisi *downslope instability*. Oleh karena itu, untuk memastikan bahwa pipa dapat meletak dengan stabil meskipun pada kondisi *sloping seabed* yang ekstrim di sepanjang rute pipa, maka dilakukan analisis perhitungan baik pada kondisi instalasi dan operasi untuk memastikan kestabilan pipa. Hasil dari perhitungan stabilitas pipa ketika berada pada *sloping seabed* tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.21 berikut :

Tabel 4.21 Hasil *Coefficient of Critical Lateral Soil Resistance*

Kondisi	α_s	W_{sub} (N/m)	F_R (N/m)	F_C (N/m)	η_α
Instalasi	14°	324.03	128.91	314.40	0.41
Operasi		362.48	257.43	351.71	0.73

Dari Tabel 4.21 tersebut menunjukkan bahwa nilai *coefficient of critical lateral soil resistance* (η_α) pada lokasi yang ditinjau bernilai sebesar 0,41 pada kondisi instalasi dan bernilai sebesar 0,73 pada kondisi operasi. Nilai dari *coefficient of critical lateral soil resistance* akan semakin meningkat seiring dengan meningkat nilai kemiringan kontur dasar laut (α) yang mana nilainya lebih besar pada keadaan *downslope instability* daripada keadaan *upslope instability*. Nilai *coefficient of critical lateral soil resistance* yang kurang dari satu tersebut dapat diartikan bahwa pipa masih memiliki daya dukung yang cukup untuk menjaga stabilitasnya ketika mendapat gaya lingkungan pada kondisi *sloping seabed* sepanjang rute pipa. Selain itu sebagai upaya mitigasi jika untuk mencegah terjadinya ketidakstabilan pipa ketika meletak dibawah laut, dapat dilakukan penggunaan *structural anchor* maupun penambahan *concrete mattresses* pada pipa sesuai rekomendasi DNVGL RP F109.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan serangkaian analisis dan pembahasan mengenai analisis *on-bottom stability pipa reinforced thermoplastic* sebagai sarana penyalur gas bawah laut ini, maka dapat di tarik kesimpulan pada permasalahan yang ada sebagai berikut :

1. Berat beton pemberat yang disarankan berdasarkan perhitungan menggunakan acuan code standar adalah sebesar 650,38 N/m atau 66,32 kg/m. Dengan penentuan interval jarak pemasangan setiap 5 meter, maka berat beton pemberat yang diperlukan adalah sebesar 332 kg.
2. Berdasarkan DNVGL RP F109 kriteria stabilitas pipa bawah laut dibagi menjadi dua yaitu stabilitas vertikal dan stabilitas lateral dimana nilai keduanya tidak boleh lebih dari satu. Dari hasil penelitian tugas akhir ini didapatkan nilai design criteria stabilitas vertikal pada saat kondisi instalasi adalah sebesar 0,68 dan pada saat kondisi operasi adalah sebesar 0,65. Sedangkan nilai design criteria stabilitas lateral pada saat kondisi instalasi adalah sebesar 0,15 dan 0,60 saat kondisi operasi pada kilometer point 0.0 serta bernilai 0,18 saat kondisi instalasi dan 0,77 saat kondisi operasi pada kilometer point 2.2 yang mana nilai-nilai tersebut kurang dari satu sehingga pipa dapat dikatakan memenuhi kriteria stabilitas yang diatur oleh DNVGL RP F109.
3. Setelah dilakukan simulasi dinamis menggunakan bantuan software OrcaFlex diketahui bahwa pipa mengalami pergerakan lateral maksimum pada kilometer point 0.0 sebesar 1,73mm pada saat kondisi instalasi dan sebesar 34,09mm pada saat kondisi operasi di zona 2. Sedangkan pada kilometer point 2.2 pipa mengalami pergerakan lateral sebesar 2.17mm pada saat kondisi instalasi dan sebesar 34,39mm pada saat kondisi operasi di zona 2. Dengan ini pipa dapat dikatakan stabil karena pergerakan lateral maksimum yang terjadi kurang dari 0.5D (89,95mm) pada zona 2 atau 500 meter di dekat platform.

Oleh karena itu pipa RTP (*Reinforced Thermoplastic Pipe*) dengan tambahan beton pemberat yang di analisis dalam penelitian ini dapat dikatakan stabil untuk meletak di dasar laut ketika di instalasi sepanjang rute LD ke LE. Selain itu, ujung dari pipa juga sudah dikaitkan pada *clump* yang ada di struktur platform melalui J-Tube sehingga dapat membatasi pergerakan dari pipa ketika beroperasi.

5.2. Saran

Berikut ini adalah beberapa saran yang diharapkan dapat menjadi masukan dan bahan pertimbangan untuk penelitian selanjutnya yang antara lain :

1. Melakukan analisis terhadap efek kontur dasar laut dengan memodelkan kontur dasar laut secara 3D berdasarkan data batimetri agar hasil simulasi lebih mendekati kenyataan di lapangan.
2. Melakukan analisis terhadap bentuk beton pemberat yang digunakan menggunakan variasi bentuk pemberat lain untuk mengetahui bentuk pemberat yang optimal untuk menahan gaya lingkungan yang mengenai pipa bawah laut.
3. Pemodelan menggunakan *software finite element* seperti ABAQUS atau ANSYS untuk melakukan penelitian tingkat *local analysis* agar didapatkan hasil simulasi yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- American Petroleum Institute. 2006. API RP 15S. *Qualification of Spoolable Reinforced Plastic Line Pipe*. Washington, D.C.
- Bai, Y., Bai, Q. 2014. *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation*. Oxford, UK : Gulf Professional Publishing Elsevier.
- DNV-OS-F101. 2013. *Submarine Pipeline System*. Norwegia : Det Norske Veritas.
- DNVGL-RP-F109. 2017. *On-bottom stability design of submarine pipelines*. Norwegia : Det Norske Veritas
- DNVGL-RP-F114. 2017. *Pipe-soil Interaction for Submarine Pipelines*. Norwegia : Det Norske Veritas.
- Djarmiko, E. B. 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*: itspress.
- Ghebregiorghis, D. A. 2014. *On-Bottom Stability Analysis of Subsea Pipelines According to DNV-RP-F109*. Laporan Tugas Akhir. US, Norwegia.
- Gao, F. dan Han, X. 2012. *Submarine Pipeline Lateral Instability On A Sloping Sandy Seabed*. Ocean Engineering Journal 50 : 44-52.
- Guo, B., Song, S., Chacko, J. 2005. *Offshore Pipelines*. Gulf Professional Publishing, Burlington, USA.
- Hamzah, K. M. 2018. *Analisis On-Bottom Stability Gas Pipeline: Studi Kasus Pada Laut Dalam di 1°15'S 117°39'E Selat Makassar*. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Herbich, J. B. 1985. *Hydromechanics of Submarine Pipelines: Design Problem*. Canadian Journal of Civil Engineering. 12:863-874.
- Imron, D. A. 2018. *Analisis Keandalan On-Bottom Stability Pada Subsea Pipeline Dengan Metode Monte Carlo Berbasis Scilab*. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Mouselli, A. H. 1981. *Offshore Pipeline Design, Analysis and Methods*. PenWell Books: Oklahoma.
- Orcina. *OrcaFlex Manual 9.2a*. Daltongate, Ulverston, Cumbria, UK.
- Tong, H. Y. 2016. *On-Bottom Stability Study of Non-Metallic Pipeline Due to Hydrodynamic Loadings*. Disertasi. Departemen Teknik Mesin. Universitas Teknologi Petronas.

- White, D.J., Cathie, D.N. 2010. *Geotechnic for Subsea Pipelines*. Frontiers in offshore geotechnics II. Perth: Taylor & Francis Group.
- Wicaksono, A. Y. 2018. *Analisis Stabilitas Pipa "Flowline" Fleksibel Bawah Laut: Studi Kasus Platform ESA PT.PHE ONWJ*. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Youssef, B. S. 2011. *The Integrated Stability Analysis of Offshore Pipelines*. Disertasi. School of Civil and Resource Engineering Centre for Offshore Foundation System. The University of Western Australia.

LAMPIRAN 1

PERHITUNGAN
ON-BOTTOM STABILITY
PADA KONDISI INSTALASI

Pipeline : 6" Main Gas Line (MGL) pipeline from LE to LD
Kilometers Point : 0.0
Condition : Installation

1. INPUT DATA

1.1 Pipeline Properties

Nominal outside diameter of pipeline		$D_o := 179.9\text{mm}$
Nominal inside diameter of pipeline		$D_i := 142.3\text{mm}$
Corrosion allowance of pipeline		$ca\% := 0\%$
Mass of pipeline in air per 1m		$m_p := 21.1\text{kg}$
Density of pipe pipeline per 1m	$\rho_p := \frac{m_p}{0.25 \cdot \pi \cdot (D_o^2 - D_i^2) \cdot 1\text{m}}$	$\rho_p = 2.218 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Thickness of concrete weight coating		$t_{\text{conc}} := 40\text{mm}$
Thickness of rubber coating		$t_{\text{coat}} := 6\text{mm}$
Density of concrete weight coating		$\rho_{\text{conc}} := 2400\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Density of rubber coating		$\rho_{\text{coat}} := 1300\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Water absorption on concrete weight coating		$\text{abs} := 0\%$
Density of pipeline content		$\rho_{\text{cont}} := 0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

1.2 Enviromental Parameters

Significant wave height during a sea state		$H_s := 1.8\text{m}$
Nominal minimum water depth		$d := 33.6\text{m}$
Significant period		$T_s := 6.3\text{s}$
Peak period for design spectrum	$T_p := 1.14 \cdot T_s$	$T_p = 7.182\text{s}$
Angle between wave and pipeline		$\theta_w := 90\text{deg}$
Bottom current velocity		$V_c := 0.35\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Reference height of current measurement	$z_r := 0.1 \cdot d$	$z_r = 3.36\text{m}$
Angle between current velocity and pipeline		$\theta_c := 90\text{deg}$
Seawater density		$\rho_{\text{sw}} := 1025\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Thickness of marine growth		$t_{\text{mg}} := 0\text{mm}$
Density of marine growth		$\rho_{\text{mg}} := 1400\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Design strom duration (sea state duration)		$T_{\text{strom}} := 3\text{hr}$
Seabed gap		$e_{\text{gap}} := 0.0\text{m}$

1.3 Soil Parameters

Select seabed type

Type := 1

Note : Seabed Roughness from Section 3.4.2 DNVGL-RP- F109 2017, Table 3-1

Table 3-1 Seabed roughness			
Type	Seabed	Grain size d50 [mm]	Roughness z0 [m]
1	Silt and Clay	0.0625	5.E-06
2	Fine sand	0.25	1.E-05
3	Medium sand	0.5	4.E-05
4	Coarse sand	1	1.E-04
5	Gravel	4	3.E-04
6	Pebble	25	2.E-03
7	Cobble	125	1.E-02

$$z0_{\text{Type}} = 5E-006$$

$$z_0 := 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Soil data "Sand" or "Clay"

Soil := "Clay"

Submerged unit soil weight for **Sand**
(7,000 Very Loose to 13,500 Very Dense, Section 1.5.2 DNVGL F109 2017)

$$\gamma_{\text{SS}} := 6.28 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$$

Dry unit soil weight for **Clay**
(18,000 according to Section 1.5.2 DNVGL F109 2017)

$$\gamma_{\text{S}} := 18000 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-3}$$

Clay Shear Strength *(Reasonable Assumptions for Sandy Clay)*

$$S_{\text{u}} := 4.78 \text{ kPa}$$

Angle of internal friction of sand
30deg Very Loose to 43deg Very Dense

$$\phi_{\text{s}} := 0 \text{ deg}$$

Soil friction factor

$$\mu := \begin{cases} 0.2 & \text{if Soil} = \text{"Clay"} \\ 0.6 & \text{if Soil} = \text{"Sand"} \end{cases}$$

$$\mu = 0.2$$

Trenching depth

$$z_{\text{t}} := 0 \text{ m}$$

Angle for trench slope

$$\theta_{\text{t}} := 0 \text{ deg}$$

2. CALCULATION

2.1 Pipeline Submerged Weight Calculation

Nominal wall thickness of pipeline	$wt := 0.5 \cdot (D_o - D_i)$	wt = 18.8 mm
Diameter of concrete weight coating	$D_{\text{conc}} := D_o + 2 \cdot t_{\text{conc}}$	$D_{\text{conc}} = 259.9 \text{ mm}$
Total diameter of pipeline	$D_{\text{tot}} := D_o + 2 \cdot t_{\text{conc}} + 2 \cdot t_{\text{mg}}$	$D_{\text{tot}} = 259.9 \text{ mm}$
Weight of pipeline	$W_{\text{p}} := 0.25 \cdot \pi \cdot (D_o^2 - D_i^2) \cdot \rho_{\text{p}} \cdot g$	$W_{\text{p}} = 206.92 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
Weight of concrete weight coating	$W_{\text{conc}} := 0.25 \pi (D_{\text{conc}}^2 - D_o^2) \cdot \rho_{\text{conc}} \cdot g$	$W_{\text{conc}} = 650.38 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

Weight of water absorption on concrete weight coating	$W_{abs} := abs \cdot W_{conc}$	$W_{abs} = 0 \cdot N \cdot m^{-1}$
Weight of marine growth	$W_{mg} := 0.25\pi(D_{tot}^2 - D_{conc}^2) \cdot \rho_{mg} \cdot g$	$W_{mg} = 0 \cdot N \cdot m^{-1}$
Weight of pipeline content	$W_{cont} := 0.25\pi(D_i^2) \cdot \rho_{cont} \cdot g$	$W_{cont} = 0 \cdot N \cdot m^{-1}$
Buoyancy force of pipeline	$b_p := 0.25\pi(D_o^2) \cdot \rho_{sw} \cdot g$	$b_p = 255.503 \cdot N \cdot m^{-1}$
Buoyancy force of concrete weight coating	$b_{conc} := 0.25\pi(D_{conc}^2 - D_o^2) \cdot \rho_{sw} \cdot g$	$b_{conc} = 277.766 \cdot N \cdot m^{-1}$
Submerged weight of pipeline per unit length	$W_{sub_p} := W_p - b_p$	$W_{sub_p} = -48.583 \cdot N \cdot m^{-1}$
Buoyancy force total	$b := 0.25\pi(D_{tot}^2) \cdot \rho_{sw} \cdot g$	$b = 533.27 \cdot N \cdot m^{-1}$
Submerged weight of pipeline and concrete per unit length	$W_{sub} := W_p + W_{conc} + W_{abs} + W_{mg} + W_{cont} - b$	$W_{sub} = 324.03 \cdot N \cdot m^{-1}$

2.2 Vertical Stability in Water (Specific Gravity Criteria)

Allowable safety factor for specific gravity criteria		$\gamma_w := 1.1$
Specific gravity of pipeline	$SG := \frac{W_{sub} + b}{b}$	$SG = 1.608$
Ratio for specific gravity of pipeline	$R_{sg} := \gamma_w \cdot \frac{b}{W_{sub} + b}$	$R_{sg} = 0.684$
Check for specific gravity criteria	$UC_v := \text{if}(R_{sg} \leq 1.0, \text{"OK"}, \text{"Not OK, Increase concrete coating thickness"})$	$UC_v = \text{"OK"}$

2.3 Wave Induced Parameters

Calculate near bed velocities using spectral theory.
Therefore, all parameters need to be made dimensionless

	$g_{dim} := \frac{g}{\frac{m}{sec^2}}$	$H_{sdim} := \frac{H_s}{m}$	$T_{pdim} := \frac{T_p}{sec}$	$D_{dim} := \frac{D_o}{m}$	$h_{dim} := \frac{d}{m}$	$\omega_p := 2 \frac{\pi}{T_{pdim}}$
Referenced Period		$T_n := \sqrt{\frac{d}{g}}$				$T_n = 1.851 \text{ s}$
Parameter for peak enhancement factor			$\varphi := \frac{T_{pdim}}{\sqrt{H_{sdim}}}$			$\varphi = 5.353$

Peak enhancement factor

$$\gamma := \begin{cases} 5 & \text{if } \varphi \leq 3.6 \\ e^{5.75-1.15\varphi} & \text{if } 3.6 < \varphi < 5 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \gamma = 1$$

Angular spectral peak frequency

$$\omega_p = 0.875$$

Spectral Width parameter

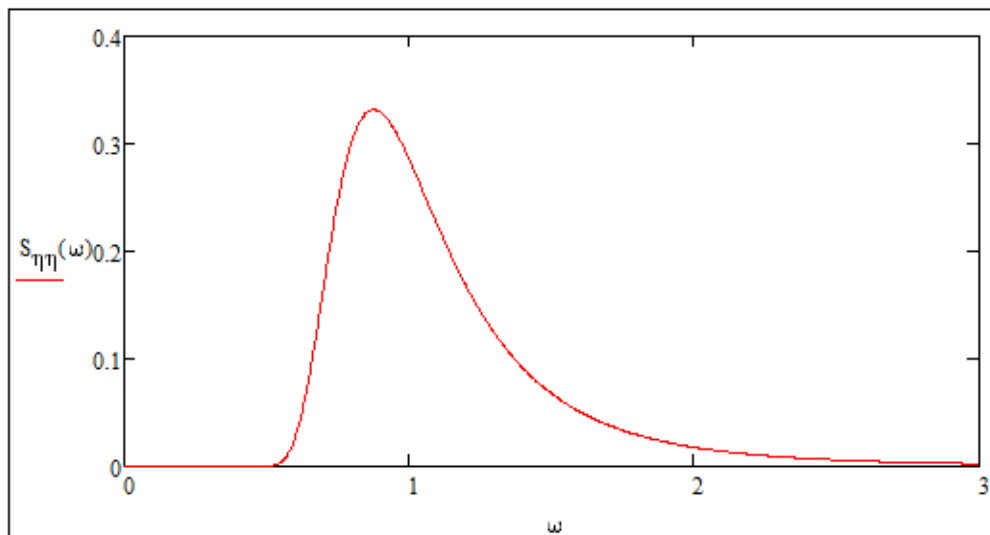
$$\sigma(\omega) := \begin{cases} 0.07 & \text{if } \omega \leq \omega_p \\ 0.09 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Generalised Phillips' constant

$$\alpha := \frac{5}{16} \cdot \frac{H_{s\text{dim}}^2 \cdot \omega_p^4}{g_{\text{dim}}^2} \cdot (1 - 0.287 \ln(\gamma)) \quad \alpha = 0.006$$

Spectral density function

$$S_{\eta\eta}(\omega) := \alpha \cdot g_{\text{dim}}^2 \cdot \omega^{-5} \cdot e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4}} \cdot \gamma^e \cdot e^{-0.5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma(\omega) \cdot \omega_p} \right)^2}$$



Seabed gap in case used for span analysis

$$\zeta := 0$$

Guess values

$$k := 100 \quad a_\omega := 2$$

Determine wave number
(with guess value)

$$kk(\omega) := \text{root} \left(k \cdot \tanh(k \cdot h_{\text{dim}}) - \frac{\omega^2}{g_{\text{dim}}}, k \right)$$

Determine omega max (with guess value) to avoid non convergence

$$\omega_{\text{max}} := \text{root}(kk(a_\omega) \cdot h_{\text{dim}} - \text{asinh}(\infty), a_\omega)$$

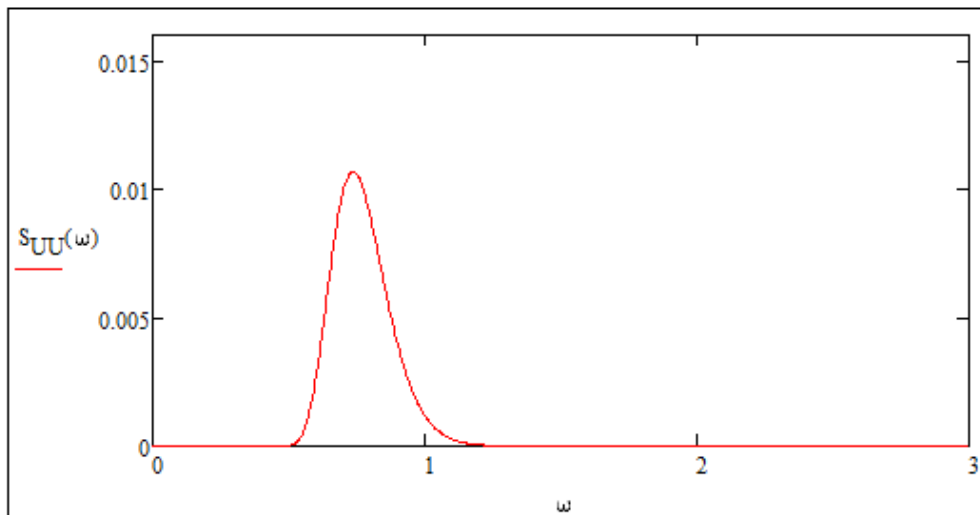
$$\omega_{\text{max}} = 14.371$$

Frequency transfer function to seabed
(based on first order wave theory)

$$G(\omega) := \begin{cases} \frac{\omega}{\sinh(kk(\omega) \cdot h_{\text{dim}})} & \text{if } \omega < \omega_{\text{max}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Wave induced velocity spectrum

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



Spectral moments of order n $M_n(n) := \int_0^{\omega_{\max}} \omega^n \cdot S_{UU}(\omega) d\omega$

Zeroth order spectral moment $M_n(0) = 0.003$

1st order spectral moment $M_n(1) = 0.002$

2nd order spectral moment $M_n(2) = 0.002$

4th order spectral moment $M_n(4) = 0.001$

Significant flow velocity amplitude at pipe level $U_s := 2 \cdot \sqrt{M_n(0)} \cdot \frac{m}{sec}$ $U_s = 0.104 \cdot m \cdot s^{-1}$

Mean zero up-crossing period of oscillating flow at pipe level $T_u := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{M_n(0)}{M_n(2)}} \cdot sec$ $T_u = 8.075 s$

Spectral parameter $s_p := 5$

Wave energy spreading $D_w(\theta) := \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\Gamma\left(1 + \frac{s_p}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2} + \frac{s_p}{2}\right)} \cdot \cos(\theta)^{s_p} \cdot \sin(\theta_w - \theta)^2 & \text{if } |\theta| < \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

Reduction factor due to spectral directionality and spreading $R_D := \sqrt{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} D_w(\theta) d\theta}$ $R_D = 0.926$

Velocity normal to the pipe including the effect of wave spreading - spectrum $U_{\text{res}} := R_D \cdot U_s$ $U_s = 0.096 \cdot m \cdot s^{-1}$

Ratio between period of single design oscillation and design spectrum

$$k_t := \begin{cases} 1.25 & \text{if } \gamma = 1 \\ 1.17 & \text{if } \gamma = 5 \\ 1.17 + \frac{(1.25 - 1.17)}{4} \cdot (\gamma - 1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_t = 1.25$$

Ratio between period of single design oscillation and design spectrum

$$k_T := \begin{cases} k_t - 5 \cdot (k_t - 1) \cdot \frac{T_n}{T_u} & \text{if } \frac{T_n}{T_u} \leq 0.2 \\ 1 & \text{if } \frac{T_n}{T_u} > 0.2 \end{cases} \quad k_T = 1$$

Period associated with single design oscillation

$$T_{so} := k_T \cdot T_u \quad T_{so} = 8.075 \text{ s}$$

Number of oscillation in the design bottom velocity spectrum

$$\tau := \frac{T_{strom}}{T_u} \quad \tau = 1337.425$$

Ratio of velocity amplitude between single design oscillation and the design spectral

$$k_U := \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)}} \right) \quad k_U = 1.973$$

Oscillatory velocity amplitude for single design oscillation, perpendicular to pipeline

$$U_{so} := k_U \cdot U_s \quad U_{so} = 0.19 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2.4 Current Velocity

Steady current velocity associated with design spectrum perpendicular to pipeline

$$V_C := V_c \cdot \left[\frac{\left(\left(1 + \frac{z_0}{D_{tot}} \right) \cdot \ln \left(1 + \frac{D_{tot}}{z_0} \right) - 1 \right)}{\ln \left(1 + \frac{z_T}{z_0} \right)} \right] \cdot \sin(\theta_c)$$

$$V_C = 0.257 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Steady current velocity associated with design oscillation perpendicular to pipeline

$$V_{Co} := V_C \quad V_{Co} = 0.257 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2.5 Total Penetration of Pipeline

Vertical hydrodynamic (lift) force (zero force according to Section 3.6.5 DNVGL F109 2017)

$$F_z := 0 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Vertical contact force between pipe and soil

$$F_c := W_{sub} - F_z \quad F_c = 324.03 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Soil strength parameter

$$G_c := \frac{S_u}{D_{tot} \cdot \gamma_s} \quad G_c = 1.022$$

Soil parameter kc for sand

$$k_s := \frac{\gamma_{ss} \cdot D_{tot}^2}{F_c} \quad k_s = 1.309$$

Soil parameter kc for clay

$$k_c := \frac{S_u \cdot D_{tot}}{F_c} \quad k_c = 3.834$$

Initial penetration on soil

$$z_{pi} := \begin{cases} 0.037 \cdot k_s^{-0.67} \cdot D_{tot} & \text{if Soil} = \text{"Sand"} \\ \left[0.0071 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{k_c} \right)^{3.2} + 0.062 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{k_c} \right)^{0.7} \right] \cdot D_{tot} & \text{if Soil} = \text{"Clay"} \end{cases}$$

$z_{pi} = 6.344 \cdot \text{mm}$

As a reasonable consideration,
8% outside diameter pipe of penetration
due to dynamic laying was considered.

$$z_{pl} := 8\% \cdot D_{conc} \quad z_{pl} = 20.792 \cdot \text{mm}$$

Total penetration depth of pipeline

$$z_p := z_{pi} + z_{pl} \quad z_p = 27.136 \cdot \text{mm}$$

2.6 Passive resistance on soil

Passive resistance on soil

$$F_R := F_c \cdot \begin{cases} \text{if Soil} = \text{"Sand"} \\ \left[5.0k_s - (0.15k_s)^2 \right] \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} \right)^{1.25} & \text{if } k_s \leq 26.7 \\ k_s \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} \right)^{1.25} & \text{if } k_s > 26.7 \\ 0 & \text{otherwise} \\ \text{if Soil} = \text{"Clay"} \\ \frac{4.1 \cdot k_c}{G_c^{0.39}} \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} \right)^{1.31} & \text{if } F_c > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$F_R = 261.77 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

2.7 Load reduction factor

2.7.1 Load reduction due to permeable seabed

Load reduction due to
permeable seabed in horizontal direction

$$r_{pem_y} := 1$$

Load reduction due to
permeable seabed in vertical direction

$$r_{pem_z} := 1$$

2.7.2 Load reduction due to penetration

Load reduction factor due to penetration (Eq. 3.19)
(horizontal direction) see Figure 3-6

$$r_{pen_y} := \begin{cases} 1.0 - 1.4 \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} \right) & \text{if } \frac{z_p}{D_{tot}} \leq 0.5 \\ 0.3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$r_{pen_y} = 0.854$$

Load reduction factor due to penetration (Eq. 3.20)
(vertical direction) see Figure 3-6

$$r_{pen_z} := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{z_p}{D_{tot}} \leq 0.1 \\ \left[1.0 - 1.3 \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} - 0.1 \right) \right] & \text{if } 0.1 < \frac{z_p}{D_{tot}} \leq 0.8667 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad r_{pen_z} = 0.994$$

2.7.3 Load reduction due to trenching

Load reduction due to trenching in horizontal direction

$$r_{tr_y} := 1 - 0.18 \cdot (\theta_t - 5 \text{deg})^{0.43} \cdot \left(\frac{z_t}{D_{tot}} \right)^{0.46} \quad r_{tr_y} = 1$$

Load reduction due to trenching in vertical direction

$$r_{tr_z} := 1 - 0.18 \cdot (\theta_t - 5 \text{deg})^{0.43} \cdot \left(\frac{z_t}{D_{tot}} \right)^{0.46} \quad r_{tr_z} = 1$$

2.7.4 Total load reduction factor

Total load reduction factor in horizontal direction

$$r_{tot_y} := r_{perm_y} \cdot r_{pen_y} \cdot r_{tr_y} \quad r_{tot_y} = 0.854$$

Total load reduction factor in vertical direction

$$r_{tot_z} := r_{perm_z} \cdot r_{pen_z} \cdot r_{tr_z} \quad r_{tot_z} = 0.994$$

2.8 Peak loads (Hydrodynamic Loads)

Keulegan-Carpenter number for single design oscillation

$$K_{so} := \frac{U_{so} \cdot T_u}{D_{tot}} \quad K_{so} = 5.91$$

Steady to oscillatory velocity ratio for single design oscillation

$$M_{so} := \frac{V_{Co}}{U_{so}} \quad M_{so} = 1.352$$

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

Peak horizontal load coefficient

$$C_{yo} := 1.93$$

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

Peak vertical load coefficient

$$C_{z0} := 1.12$$

Peak horizontal loads $F_{y0} := r_{\text{tot}_y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{sw}} \cdot D_{\text{tot}} \cdot C_{y0} \cdot (U_{s0} + V_{C0})^2$ $F_{y0} = 43.931 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

Peak vertical loads $F_{z0} := r_{\text{tot}_z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{sw}} \cdot D_{\text{tot}} \cdot C_{z0} \cdot (U_{s0} + V_{C0})^2$ $F_{z0} = 29.687 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

2.9 Absolute Static Stability Criteria

2.9.1 Lateral absolute static stability

Risk Basis for Design

Categorisation of fluids

Section 2 C200 DNV OS F101 Table 2-1, page 43)

Category	Description
A	Typical non-flammable water-based fluids.
B	Flammable and/or toxic fluids which are liquids at ambient temperature and atmospheric pressure conditions. Typical examples are oil and petroleum products. Methanol is an example of a flammable and toxic fluid.
C	Non-flammable fluids which are non-toxic gases at ambient temperature and atmospheric pressure conditions. Typical examples are nitrogen, carbon dioxide, argon and air.
D	Non-toxic, single-phase natural gas.
E	Flammable and/or toxic fluids which are gases at ambient temperature and atmospheric pressure conditions and which are conveyed as gases and/or liquids. Typical examples would be hydrogen, natural gas (not otherwise covered under category D), ethane, ethylene, liquefied petroleum gas (such as propane and butane), natural gas liquids, ammonia, and chlorine.

CF := "E"

Location Classes

Section 2 C300 DNV OS F101 Table 2-2, page 43)

Location	Definition
1	The area where no frequent human activity is anticipated along the pipeline route.
2	The part of the pipeline/riser in the near platform (manned) area or in areas with frequent human activity. The extent of location class 2 should be based on appropriate risk analyses. If no such analyses are performed a minimum horizontal distance of 500 m shall be adopted.

LC := 2

Safety Class

Section 2 C400 DNV OS F101 Table 2-2, page 43)

Safety class	Definition
Low	Where failure implies insignificant risk of human injury and minor environmental and economic consequences
Medium	Where failure implies low risk of human injury, minor environmental pollution or high economic or political consequences.
High	Classification for operating conditions where failure implies risk of human injury, significant environmental pollution or very high economic or political consequences

Section 2 C400 DNV OS F101 Table 2-2, page 43)

Phase	Fluid Category A, C		Fluid Category B, D and E	
	Location Class		Location Class	
	1	2	1	2
Temporary ^{2,3}	Low	Low	-	-
Operational	Low	Medium ⁴	Medium	High

1) Other classifications may exist depending on the conditions and criticality of failure the pipeline. For pipelines where some consequences are more severe than normal, i.e. when the table above does not apply, the selection of a higher safety class shall also consider the implication, on the total gained safety. If the total safety increase is marginal, the selection of a higher safety class may not be justified.

2) Installation until pre-commissioning (temporary phase) will normally be classified as safety class Low.

3) For safety classification of temporary phases after commissioning, special consideration shall be made to the consequences of failure, i.e. giving a higher safety class than Low.

4) Risers during normal operation will normally be classified as safety class High.

Cond := "Installation"

Safety Class: Low = 1
Normal = 2
High = 3

Safety := $\left\{ \begin{array}{l} \text{if LC} = 1 \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} 2 \text{ if Cond} = \text{"Operation"} \\ 1 \text{ if Cond} = \text{"Installation"} \end{array} \right. \\ \text{if LC} = 2 \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} 3 \text{ if Cond} = \text{"Operation"} \\ 1 \text{ if Cond} = \text{"Installation"} \end{array} \right. \end{array} \right.$

Safety = 1

Pipeline location: (Section 3.6.3 DNVGL RP F109 2017 Page 24)

* Is the pipeline located in a cyclonic area? "Yes" or "No"

Cyclonic := "No"

* Is the pipeline located in Gulf of Mexico? "Yes" or "No"

GoM := "No"

fact := $\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ if Soil} = \text{"Sand"} \\ 2 \text{ if Soil} = \text{"Clay"} \end{array} \right.$

fact = 2

Soil = "Clay"

Note : Safety Factor for absolute stability (Tables 3-5 to 3-8 DNVGL RP F109 - 2017)

Table 3-5 Safety factors, winter storm in North Sea			
	Low	Normal	High
Sand and rock	0.98	1.32	1.67
Clay	1.00	1.40	1.83

$$\gamma_{\text{fact, Safety}}^{35} = 1$$

Table 3-6 Safety factors, winter storm in GoM and Southern Ocean			
	Low	Normal	High
Sand and rock	0.95	1.41	1.99
Clay	0.97	1.50	2.16

$$\gamma_{\text{fact, Safety}}^{36} = 0.97$$

Table 3-7 Safety factors, cyclonic conditions in North West Shelf			
	Low	Normal	High
Sand and rock	0.95	1.50	2.16
Clay	0.95	1.56	2.31

$$\gamma_{\text{fact, Safety}}^{37} = 0.95$$

Table 3-8 Safety factors, cyclonic conditions Gulf of Mexico (GoM)			
	Low	Normal	High
Sand and rock	0.95	1.64	2.46
Clay	0.93	1.64	2.54

$$\gamma_{\text{fact, Safety}}^{38} = 0.93$$

$$\gamma_{\text{sc}} := \begin{cases} \text{if GoM} = \text{"Yes"} \\ \quad \left| \begin{array}{l} \gamma_{\text{fact, Safety}}^{38} \text{ if Cyclonic} = \text{"Yes"} \\ \gamma_{\text{fact, Safety}}^{36} \text{ if Cyclonic} = \text{"No"} \end{array} \right. \\ \text{if GoM} = \text{"No"} \\ \quad \left| \begin{array}{l} \gamma_{\text{fact, Safety}}^{37} \text{ if Cyclonic} = \text{"Yes"} \\ \gamma_{\text{fact, Safety}}^{35} \text{ if Cyclonic} = \text{"No"} \end{array} \right. \end{cases}$$

Safety factor to be used in absolute static stability

$$\gamma_{\text{sc}} = 1$$

Required submerged weight for lateral absolute static stability

$$w_{\text{req_L}} := \frac{\gamma_{\text{sc}} \cdot (F_{\text{yo}} + \mu \cdot F_{\text{yo}}) - F_{\text{R}}}{\mu} \quad w_{\text{req_L}} = -1045.265 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Safety factor for lateral absolute static stability

$$\text{SF}_{\text{L}} := \frac{\mu \cdot W_{\text{sub}} + F_{\text{R}}}{F_{\text{yo}} + \mu \cdot F_{\text{zo}}} \quad \text{SF}_{\text{L}} = 6.549$$

Utility ratio for lateral absolute static stability criteria

$$R_{\text{L}} := \gamma_{\text{sc}} \cdot \frac{F_{\text{yo}} + \mu \cdot F_{\text{zo}}}{\mu \cdot W_{\text{sub}} + F_{\text{R}}} \quad R_{\text{L}} = 0.153$$

Check for lateral absolute static stability criteria

Check_L := if (R_L ≤ 1.0, "OK", "Not OK, Check for Generalized Lateral Stability")

Check_L = "OK"

3. SUMMARY RESULT

submerged weight of concrete weight per unit length	$W_{\text{sub_con}} := \frac{(W_{\text{conc}} - b_{\text{conc}})}{g}$	$W_{\text{sub_con}} = 37.996 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$
submerged weight of concrete weight per 5m	$W_{\text{sub_con_5m}} := W_{\text{sub_con}} \cdot 5\text{m}$	$W_{\text{sub_con_5m}} = 189.98 \text{ kg}$
volume of concrete weight per 5m	$V_{\text{con}} := \frac{(W_{\text{sub_con_5m}})}{(\rho_{\text{conc}} - \rho_{\text{sw}})}$	$V_{\text{con}} = 0.138 \cdot \text{m}^3$
dry weight of concrete weight per 5m	$W_{\text{con_dry}} := V_{\text{con}} \cdot \rho_{\text{conc}}$	$W_{\text{con_dry}} = 331.601 \text{ kg}$
Bending stiffness	$EI := 14158 \text{ N} \cdot \text{m}^2$	
Inertia pipe	$I := \pi \cdot \frac{1}{64} \cdot [(D_o)^4 - (D_i)^4]$	$I = 3.129 \times 10^{-5} \text{ m}^4$
Modulus Young's	$E := \frac{EI}{I}$	$E = 452504.691 \cdot \text{kPa}$
Cross section area	$A_{\text{pipe}} := 0.25\pi(D_o^2 - D_i^2)$	$A_{\text{pipe}} = 9.515 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Axial stiffness	$Ax_{\text{stiff}} := \frac{E \cdot A_{\text{pipe}}}{1}$	$Ax_{\text{stiff}} = 4305.527 \cdot \text{kN}$
+ dimension of concrete weight (guess value)		$\text{length}_{\text{conc}} := 0.5\text{m}$ $\text{breadth}_{\text{conc}} := 0.6\text{m}$ $\text{height}_{\text{conc}} := 0.5\text{m}$
volume of concrete weight with hole for RTP	$\text{volume} := (\text{length}_{\text{conc}} \cdot \text{breadth}_{\text{conc}} \cdot \text{height}_{\text{conc}}) - \pi \cdot \left(\frac{D_o}{2}\right)^2 \cdot \text{length}_{\text{conc}}$	

Pipeline : 6" Main Gas Line (MGL) pipeline from LE to LD

Kilometers Point : 2.2

Condition : Installation

1. INPUT DATA

1.1 Pipeline Properties

Nominal outside diameter of pipeline

$$D_o := 179.9\text{mm}$$

Nominal inside diameter of pipeline

$$D_i := 142.3\text{mm}$$

Corrosion allowance of pipeline

$$ca\% := 0\%$$

Mass of pipeline in air per 1m

$$m_p := 21.1\text{kg}$$

Density of pipe pipeline per 1m

$$\rho_p := \frac{m_p}{0.25 \cdot \pi \cdot (D_o^2 - D_i^2) \cdot 1\text{m}}$$

$$\rho_p = 2.218 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Thickness of concrete weight coating

$$t_{\text{conc}} := 40\text{mm}$$

Thickness of rubber coating

$$t_{\text{coat}} := 6\text{mm}$$

Density of concrete weight coating

$$\rho_{\text{conc}} := 2400\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Density of rubber coating

$$\rho_{\text{coat}} := 1300\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Water absorption on concrete weight coating

$$abs := 0\%$$

Density of pipeline content

$$\rho_{\text{cont}} := 0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

1.2 Environmental Parameters

Significant wave height during a sea state

$$H_s := 1.8\text{m}$$

Nominal minimum water depth

$$d := 31\text{m}$$

Significant period

$$T_s := 6.3\text{s}$$

Peak period for design spectrum

$$T_p := 1.14 \cdot T_s$$

$$T_p = 7.182\text{s}$$

Angle between wave and pipeline

$$\theta_w := 90\text{deg}$$

Bottom current velocity

$$V_c := 0.35\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Reference height of current measurement

$$z_r := 0.1 \cdot d$$

$$z_r = 3.1\text{m}$$

Angle between current velocity and pipeline

$$\theta_c := 90\text{deg}$$

Seawater density

$$\rho_{\text{sw}} := 1025\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Thickness of marine growth

$$t_{\text{mg}} := 0\text{mm}$$

Density of marine growth

$$\rho_{\text{mg}} := 1400\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Design storm duration (sea state duration)

$$T_{\text{strom}} := 3\text{hr}$$

Seabed gap

$$e_{\text{gap}} := 0.0\text{m}$$

1.3 Soil Parameters

Select seabed type

Type := 1

Note : Seabed Roughness from Section 3.4.2 DNVGL-RP- F109 2017, Table 3-1

Table 3-1 Seabed roughness			
Type	Seabed	Grain size d50 [mm]	Roughness z0 [m]
1	Silt and Clay	0.0625	5.E-06
2	Fine sand	0.25	1.E-05
3	Medium sand	0.5	4.E-05
4	Coarse sand	1	1.E-04
5	Gravel	4	3.E-04
6	Pebble	25	2.E-03
7	Cobble	125	1.E-02

$$z0_{Type} = 5E-006$$

$$z_0 := 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Soil data "Sand" or "Clay"

Soil := "Clay"

Submerged unit soil weight for **Sand**
(7,000 Very Loose to 13,500 Very Dense, Section 1.5.2 DNVGL F109 2017)

$$\gamma_{ss} := 62.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$$

Dry unit soil weight for **Clay**
(18,000 according to Section 1.5.2 DNVGL F109 2017)

$$\gamma_s := 18000 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-3}$$

Clay Shear Strength *(Reasonable Assumptions for Sandy Clay)*

$$S_u := 4.78 \cdot \text{kPa}$$

Angle of internal friction of sand
30deg Very Loose to 43deg Very Dense

$$\phi_s := 0 \cdot \text{deg}$$

Soil friction factor

$$\mu := \begin{cases} 0.2 & \text{if Soil} = \text{"Clay"} \\ 0.6 & \text{if Soil} = \text{"Sand"} \end{cases}$$

$$\mu = 0.2$$

Trenching depth

$$z_t := 0 \text{ m}$$

Angle for trench slope

$$\theta_t := 0 \text{ deg}$$

2. CALCULATION

2.1 Pipeline Submerged Weight Calculation

Nominal wall thickness of pipeline	$wt := 0.5 \cdot (D_o - D_i)$	wt = 18.8 mm
Diameter of concrete weight coating	$D_{conc} := D_o + 2 \cdot t_{conc}$	$D_{conc} = 259.9 \text{ mm}$
Total diameter of pipeline	$D_{tot} := D_o + 2 \cdot t_{conc} + 2 \cdot t_{mg}$	$D_{tot} = 259.9 \text{ mm}$
Weight of pipeline	$W_p := 0.25 \cdot \pi \cdot (D_o^2 - D_i^2) \cdot \rho_p \cdot g$	$W_p = 206.92 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
Weight of concrete weight coating	$W_{conc} := 0.25 \pi (D_{conc}^2 - D_o^2) \cdot \rho_{conc} \cdot g$	$W_{conc} = 650.38 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

Weight of water absorption on concrete weight coating	$W_{abs} := abs \cdot W_{conc}$	$W_{abs} = 0 \cdot N \cdot m^{-1}$
Weight of marine growth	$W_{mg} := 0.25\pi(D_{tot}^2 - D_{conc}^2) \cdot \rho_{mg} \cdot g$	$W_{mg} = 0 \cdot N \cdot m^{-1}$
Weight of pipeline content	$W_{cont} := 0.25\pi(D_i^2) \cdot \rho_{cont} \cdot g$	$W_{cont} = 0 \cdot N \cdot m^{-1}$
Buoyancy force of pipeline	$b_p := 0.25\pi(D_o^2) \cdot \rho_{sw} \cdot g$	$b_p = 255.503 \cdot N \cdot m^{-1}$
Buoyancy force of concrete weight coating	$b_{conc} := 0.25\pi(D_{conc}^2 - D_o^2) \cdot \rho_{sw} \cdot g$	$b_{conc} = 277.766 \cdot N \cdot m^{-1}$
Submerged weight of pipeline per unit length	$W_{sub_p} := W_p - b_p$	$W_{sub_p} = -48.583 \cdot N \cdot m^{-1}$
Buoyancy force total	$b := 0.25\pi(D_{tot}^2) \cdot \rho_{sw} \cdot g$	$b = 533.27 \cdot N \cdot m^{-1}$
Submerged weight of pipeline and concrete per unit length	$W_{sub} := W_p + W_{conc} + W_{abs} + W_{mg} + W_{cont} - b$	$W_{sub} = 324.03 \cdot N \cdot m^{-1}$

2.2 Vertical Stability in Water (Specific Gravity Criteria)

Allowable safety factor for specific gravity criteria		$\gamma_w := 1.1$
Specific gravity of pipeline	$SG := \frac{W_{sub} + b}{b}$	$SG = 1.608$
Ratio for specific gravity of pipeline	$R_{sg} := \gamma_w \cdot \frac{b}{W_{sub} + b}$	$R_{sg} = 0.684$
Check for specific gravity criteria		
$UC_v := \text{if}(R_{sg} \leq 1.0, \text{"OK"}, \text{"Not OK, Increase concrete coating thickness"})$		$UC_v = \text{"OK"}$

2.3 Wave Induced Parameters

Calculate near bed velocities using spectral theory.
Therefore, all parameters need to be made dimensionless

$$g_{dim} := \frac{g}{\frac{m}{sec^2}} \quad H_{sdim} := \frac{H_s}{m} \quad T_{pdim} := \frac{T_p}{sec} \quad D_{dim} := \frac{D_o}{m} \quad h_{dim} := \frac{d}{m} \quad \omega_p := 2 \frac{\pi}{T_{pdim}}$$

Referenced Period	$T_n := \sqrt{\frac{d}{g}}$	$T_n = 1.778 \text{ s}$
-------------------	-----------------------------	-------------------------

Parameter for peak enhancement factor	$\varphi := \frac{T_{pdim}}{\sqrt{H_{sdim}}}$	$\varphi = 5.353$
---------------------------------------	---	-------------------

Peak enhancement factor	$\gamma := \begin{cases} 5 & \text{if } \varphi \leq 3.6 \\ e^{5.75 - 1.15\varphi} & \text{if } 3.6 < \varphi < 5 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$	$\gamma = 1$
-------------------------	--	--------------

Angular spectral peak frequency

$$\omega_p = 0.875$$

Spectral Width parameter

$$\sigma(\omega) := \begin{cases} 0.07 & \text{if } \omega \leq \omega_p \\ 0.09 & \text{otherwise} \end{cases}$$

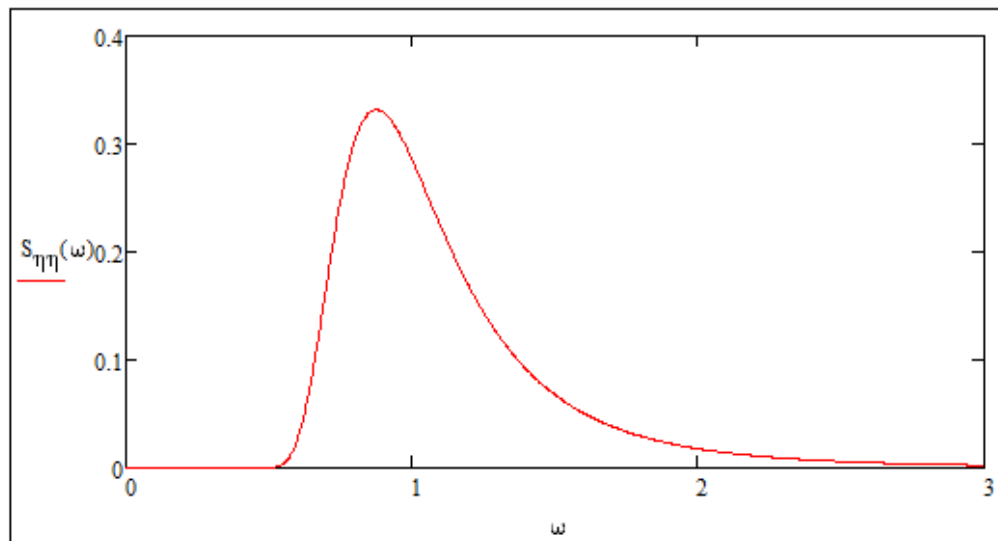
Generalised Phillips' constant

$$\alpha := \frac{5}{16} \cdot \frac{H_{s\text{dim}}^2 \cdot \omega_p^4}{\xi_{\text{dim}}^2} \cdot (1 - 0.287 \ln(\gamma)) \quad \alpha = 0.006$$

+

Spectral density function

$$S_{\eta\eta}(\omega) := \alpha \cdot \xi_{\text{dim}}^2 \cdot \omega^{-5} \cdot e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4}} \cdot \gamma^e \cdot e^{-0.5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma(\omega) \cdot \omega_p} \right)^2}$$



Seabed gap in case used for span analysis

$$\zeta := 0$$

Guess values

$$k := 100 \quad a_\omega := 2$$

Determine wave number
(with guess value)

$$kk(\omega) := \text{root} \left(k \cdot \tanh(k \cdot h_{\text{dim}}) - \frac{\omega^2}{\xi_{\text{dim}}}, k \right)$$

Determine omega max (with guess value) to avoid non convergence

$$\omega_{\text{max}} := \text{root}(kk(a_\omega) \cdot h_{\text{dim}} - \text{asinh}(\infty), a_\omega)$$

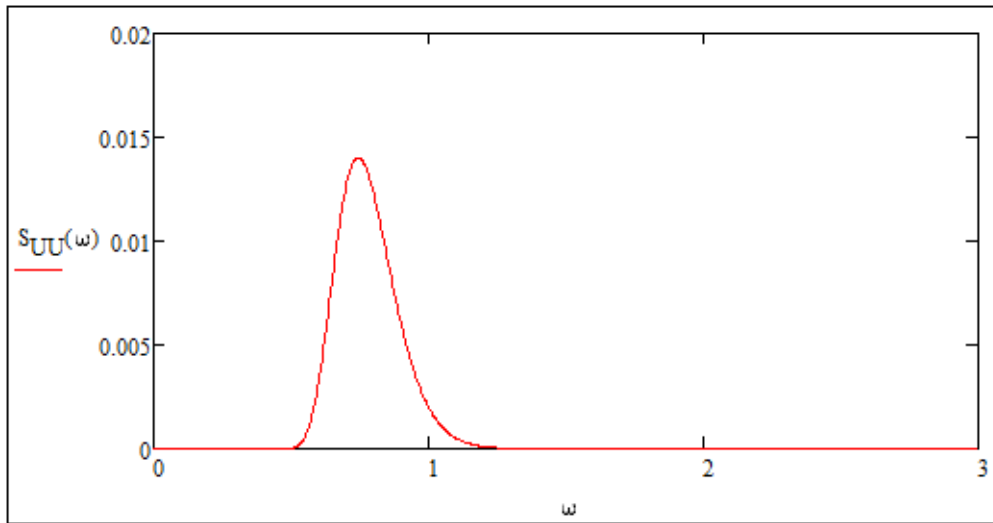
$$\omega_{\text{max}} = 14.961$$

Frequency transfer function to seabed
(based on first order wave theory)

$$G(\omega) := \begin{cases} \frac{\omega}{\sinh(kk(\omega) \cdot h_{\text{dim}})} & \text{if } \omega < \omega_{\text{max}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Wave induced velocity spectrum

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



Spectral moments of order n	$M_n(n) := \int_0^{\omega_{\max}} \omega^n \cdot S_{UU}(\omega) d\omega$	
Zeroth order spectral moment	$M_n(0) = 3.695 \times 10^{-3}$	
1st order spectral moment	$M_n(1) = 2.886 \times 10^{-3}$	
2nd order spectral moment	$M_n(2) = 2.3 \times 10^{-3}$	
4th order spectral moment	$M_n(4) = 0.002$	
Significant flow velocity amplitude at pipe level	$U_s := 2 \cdot \sqrt{M_n(0)} \cdot \frac{m}{sec}$	$U_s = 0.122 \cdot m \cdot s^{-1}$
Mean zero up-crossing period of oscillating flow at pipe level	$T_u := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{M_n(0)}{M_n(2)}} \cdot sec$	$T_u = 7.965 s$
Spectral parameter	$s_p := 5$	
Wave energy spreading	$D_w(\theta) := \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{\pi}} \cdot \frac{\Gamma\left(1 + \frac{s_p}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2} + \frac{s_p}{2}\right)} \cdot \cos(\theta)^{s_p} \cdot \sin(\theta_w - \theta)^2 & \text{if } \theta < \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$	
Reduction factor due to spectral directionality and spreading	$R_D := \sqrt{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} D_w(\theta) d\theta}$	$R_D = 0.926$
Velocity normal to the pipe including the effect of wave spreading - spectrum	$U_{\text{wave}} := R_D \cdot U_s$	$U_s = 0.113 \cdot m \cdot s^{-1}$

Ratio between period of single design oscillation and design spectrum

$$k_t := \begin{cases} 1.25 & \text{if } \gamma = 1 \\ 1.17 & \text{if } \gamma = 5 \\ 1.17 + \frac{(1.25 - 1.17)}{4} \cdot (\gamma - 1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_t = 1.25$$

Ratio between period of single design oscillation and design spectrum

$$k_T := \begin{cases} k_t - 5 \cdot (k_t - 1) \cdot \frac{T_n}{T_u} & \text{if } \frac{T_n}{T_u} \leq 0.2 \\ 1 & \text{if } \frac{T_n}{T_u} > 0.2 \end{cases} \quad k_T = 1$$

Period associated with single design oscillation

$$T_{so} := k_T \cdot T_u \quad T_{so} = 7.965 \text{ s}$$

Number of oscillation in the design bottom velocity spectrum

$$\tau := \frac{T_{strom}}{T_u} \quad \tau = 1355.998$$

Ratio of velocity amplitude between single design oscillation and the design spectral

$$k_U := \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)}} \right) \quad k_U = 1.975$$

Oscillatory velocity amplitude for single design oscillation, perpendicular to pipeline

$$U_{so} := k_U \cdot U_s \quad U_{so} = 0.222 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2.4 Current Velocity

Steady current velocity associated with design spectrum perpendicular to pipeline

$$V_C := V_c \cdot \left[\frac{\left(1 + \frac{z_0}{D_{tot}} \right) \cdot \ln \left(1 + \frac{D_{tot}}{z_0} \right) - 1}{\ln \left(1 + \frac{z_f}{z_0} \right)} \right] \cdot \sin(\theta_c)$$

$$V_C = 0.259 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Steady current velocity associated with design oscillation perpendicular to pipeline

$$V_{Co} := V_C \quad V_{Co} = 0.259 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2.5 Total Penetration of Pipeline

Vertical hydrodynamic (lift) force
(zero force according to Section 3.6.5 DNVGL F109 2017)

$$F_z := 0 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Vertical contact force between pipe and soil

$$F_c := W_{sub} - F_z \quad F_c = 324.03 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Soil strength parameter

$$G_c := \frac{S_u}{D_{tot} \cdot \gamma_s} \quad G_c = 1.022$$

Soil parameter kc for sand

$$k_s := \frac{\gamma_{ss} \cdot D_{tot}^2}{F_c} \quad k_s = 13.091$$

Soil parameter kc for clay

$$k_c := \frac{S_u \cdot D_{tot}}{F_c} \quad k_c = 3.834$$

Initial penetration on soil

$$z_{pi} := \begin{cases} 0.037 \cdot k_s^{-0.67} \cdot D_{tot} & \text{if Soil} = \text{"Sand"} \\ \left[0.0071 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{k_c} \right)^{3.2} + 0.062 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{k_c} \right)^{0.7} \right] \cdot D_{tot} & \text{if Soil} = \text{"Clay"} \end{cases}$$

$z_{pi} = 6.344 \text{ mm}$

As a reasonable consideration,
8% outside diameter pipe of penetration
due to dynamic laying was considered.

$$z_{p1} := 8\% \cdot D_{conc} \quad z_{p1} = 20.792 \text{ mm}$$

Total penetration depth of pipeline

$$z_p := z_{pi} + z_{p1} \quad z_p = 27.136 \text{ mm}$$

2.6 Passive resistance on soil

Passive resistance on soil

$$F_R := F_c \cdot \begin{cases} \text{if Soil} = \text{"Sand"} \\ \left[\begin{aligned} & \left[5.0k_s - (0.15k_s)^2 \right] \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} \right)^{1.25} & \text{if } k_s \leq 26.7 \\ & k_s \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} \right)^{1.25} & \text{if } k_s > 26.7 \\ & 0 & \text{otherwise} \end{aligned} \right. \\ \text{if Soil} = \text{"Clay"} \\ \left[\begin{aligned} & \frac{4.1 \cdot k_c}{G_c^{0.39}} \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} \right)^{1.31} & \text{if } F_c > 0 \\ & 0 & \text{otherwise} \end{aligned} \right. \end{cases}$$

$F_R = 261.77 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

2.7 Load reduction factor

2.7.1 Load reduction due to permeable seabed

Load reduction due to
permeable seabed in horizontal direction

$$r_{perm_y} := 1$$

Load reduction due to
permeable seabed in vertical direction

$$r_{perm_z} := 1$$

2.7.2 Load reduction due to penetration

Load reduction factor due to penetration (Eq. 3.19)
(horizontal direction) see Figure 3-6

$$r_{pen_y} := \begin{cases} 1.0 - 1.4 \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} \right) & \text{if } \frac{z_p}{D_{tot}} \leq 0.5 \\ 0.3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$r_{pen_y} = 0.854$$

Load reduction factor due to penetration (Eq. 3.20)
(vertical direction) see Figure 3-6

$$r_{pen_z} := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{z_p}{D_{tot}} \leq 0.1 \\ \left[1.0 - 1.3 \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} - 0.1 \right) \right] & \text{if } 0.1 < \frac{z_p}{D_{tot}} \leq 0.8667 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad r_{pen_z} = 0.994$$

2.7.3 Load reduction due to trenching

Load reduction due to trenching in horizontal direction

$$r_{tr_y} := 1 - 0.18 \cdot (\theta_t - 5 \text{deg})^{0.43} \cdot \left(\frac{z_t}{D_{tot}} \right)^{0.46} \quad r_{tr_y} = 1$$

Load reduction due to trenching in vertical direction

$$r_{tr_z} := 1 - 0.18 \cdot (\theta_t - 5 \text{deg})^{0.43} \cdot \left(\frac{z_t}{D_{tot}} \right)^{0.46} \quad r_{tr_z} = 1$$

2.7.4 Total load reduction factor

Total load reduction factor in horizontal direction

$$r_{tot_y} := r_{pem_y} \cdot r_{pen_y} \cdot r_{tr_y} \quad r_{tot_y} = 0.854$$

Total load reduction factor in vertical direction

$$r_{tot_z} := r_{pem_z} \cdot r_{pen_z} \cdot r_{tr_z} \quad r_{tot_z} = 0.994$$

2.8 Peak loads (Hydrodynamic Loads)

Keulegan-Carpenter number for single design oscillation

$$K_{so} := \frac{U_{so} \cdot T_u}{D_{tot}} \quad K_{so} = 6.812$$

Steady to oscillatory velocity ratio for single design oscillation

$$M_{so} := \frac{V_{Co}}{U_{so}} \quad M_{so} = 1.164$$

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

Peak horizontal load coefficient

$$C_{yo} := 1.92$$

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

Peak vertical load coefficient

$$C_{zo} := 1.16$$

Peak horizontal loads $F_{yo} := r_{tot_y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_{yo} \cdot (U_{so} + V_{Co})^2$ $F_{yo} = 50.522 \cdot N \cdot m^{-1}$

Peak vertical loads $F_{zo} := r_{tot_z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_{zo} \cdot (U_{so} + V_{Co})^2$ $F_{zo} = 35.544 \cdot N \cdot m^{-1}$

2.9 Absolute Static Stability Criteria

2.9.1 Lateral absolute static stability

Risk Basis for Design

Categorisation of fluids

Section 2 C200 DNV OS F101 Table 2-1, page 43)

Category	Description
A	Typical non-flammable water-based fluids.
B	Flammable and/or toxic fluids which are liquids at ambient temperature and atmospheric pressure conditions. Typical examples are oil and petroleum products. Methanol is an example of a flammable and toxic fluid.
C	Non-flammable fluids which are non-toxic gases at ambient temperature and atmospheric pressure conditions. Typical examples are nitrogen, carbon dioxide, argon and air.
D	Non-toxic, single-phase natural gas.
E	Flammable and/or toxic fluids which are gases at ambient temperature and atmospheric pressure conditions and which are conveyed as gases and/or liquids. Typical examples would be hydrogen, natural gas (not otherwise covered under category D), ethane, ethylene, liquefied petroleum gas (such as propane and butane), natural gas liquids, ammonia, and chlorine.

CF := "E"

Location Classes

Section 2 C300 DNV OS F101 Table 2-2, page 43)

Location	Definition
1	The area where no frequent human activity is anticipated along the pipeline route.
2	The part of the pipeline/riser in the near platform (manned) area or in areas with frequent human activity. The extent of location class 2 should be based on appropriate risk analyses. If no such analyses are performed a minimum horizontal distance of 500 m shall be adopted.

LC := 2

Safety Class

Section 2 C400 DNV OS F101 Table 2-2, page 43)

Safety class	Definition
Low	Where failure implies insignificant risk of human injury and minor environmental and economic consequences
Medium	Where failure implies low risk of human injury, minor environmental pollution or high economic or political consequences.
High	Classification for operating conditions where failure implies risk of human injury, significant environmental pollution or very high economic or political consequences

Section 2 C400 DNV OS F101 Table 2-2, page 43)

Phase	Fluid Category A, C		Fluid Category B, D and E	
	Location Class		Location Class	
	1	2	1	2
Temporary ^{2,3}	Low	Low	-	-
Operational	Low	Medium ⁴	Medium	High

1) Other classifications may exist depending on the conditions and criticality of failure the pipeline. For pipelines where some consequences are more severe than normal, i.e. when the table above does not apply, the selection of a higher safety class shall also consider the implication, on the total gained safety. If the total safety increase is marginal, the selection of a higher safety class may not be justified.

2) Installation until pre-commissioning (temporary phase) will normally be classified as safety class Low.

3) For safety classification of temporary phases after commissioning, special consideration shall be made to the consequences of failure, i.e. giving a higher safety class than Low.

4) Risers during normal operation will normally be classified as safety class High.

Cond := "Installation"

Safety Class: Low = 1
Normal = 2
High = 3

Safety := if LC = 1
 | 2 if Cond = "Operation"
 | 1 if Cond = "Installation"
 if LC = 2
 | 3 if Cond = "Operation"
 | 1 if Cond = "Installation"

Safety = 1

Pipeline location: (Section 3.6.3 DNVGL RP F109 2017 Page 24)

* Is the pipeline located in a cyclonic area? "Yes" or "No"

Cyclonic := "No"

* Is the pipeline located in Gulf of Mexico? "Yes" or "No"

GoM := "No"

fact := | 1 if Soil = "Sand"
 | 2 if Soil = "Clay"

fact = 2

Soil = "Clay"

Note : Safety Factor for absolute stability (Tables 3-5 to 3-8 DNVGL RP F109 - 2017)

Table 3-5 Safety factors, winter storm in North Sea			
	Low	Normal	High
Sand and rock	0.98	1.32	1.67
Clay	1.00	1.40	1.83

$$\gamma_{\text{fact, Safety}}^{35} = 1$$

Table 3-6 Safety factors, winter storm in GoM and Southern Ocean			
	Low	Normal	High
Sand and rock	0.95	1.41	1.99
Clay	0.97	1.50	2.16

$$\gamma_{\text{fact, Safety}}^{36} = 0.97$$

Table 3-7 Safety factors, cyclonic conditions in North West Shelf			
	Low	Normal	High
Sand and rock	0.95	1.50	2.16
Clay	0.95	1.56	2.31

$$\gamma_{\text{fact, Safety}}^{37} = 0.95$$

Table 3-8 Safety factors, cyclonic conditions Gulf of Mexico (GoM)			
	Low	Normal	High
Sand and rock	0.95	1.64	2.46
Clay	0.93	1.64	2.54

$$\gamma_{\text{fact, Safety}}^{38} = 0.93$$

$$\gamma_{\text{sc}} := \begin{cases} \text{if GoM} = \text{"Yes"} \\ \left| \begin{array}{l} \gamma_{\text{fact, Safety}}^{38} \text{ if Cyclonic} = \text{"Yes"} \\ \gamma_{\text{fact, Safety}}^{36} \text{ if Cyclonic} = \text{"No"} \end{array} \right. \\ \text{if GoM} = \text{"No"} \\ \left| \begin{array}{l} \gamma_{\text{fact, Safety}}^{37} \text{ if Cyclonic} = \text{"Yes"} \\ \gamma_{\text{fact, Safety}}^{35} \text{ if Cyclonic} = \text{"No"} \end{array} \right. \end{cases}$$

Safety factor to be used in absolute static stability

$$\gamma_{\text{sc}} = 1$$

Required submerged weight for lateral absolute static stability

$$w_{\text{req}_L} := \frac{\gamma_{\text{sc}}(F_{y0} + \mu \cdot F_{y0}) - F_R}{\mu} \quad w_{\text{req}_L} = -1005.718 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Safety factor for lateral absolute static stability

$$SF_L := \frac{\mu \cdot W_{\text{sub}} + F_R}{F_{y0} + \mu \cdot F_{z0}} \quad SF_L = 5.667$$

Utility ratio for lateral absolute static stability criteria

$$R_L := \gamma_{\text{sc}} \cdot \frac{F_{y0} + \mu \cdot F_{z0}}{\mu \cdot W_{\text{sub}} + F_R} \quad R_L = 0.176$$

Check for lateral absolute static stability criteria

Check_L := if(R_L ≤ 1.0, "OK", "Not OK, Check for Generalized Lateral Stability")

Check_L = "OK"

2.9.2 Vertical absolute static stability

Safety factor for vertical absolute static stability criteria

$$SF_v := \frac{W_{sub}}{F_{zo}} \quad SF_v = 9.116$$

Utility ratio for vertical absolute static stability criteria

$$R_v := \gamma_{sc} \cdot \frac{F_{zo}}{W_{sub}} \quad R_v = 0.11$$

Check for vertical absolute static stability criteria

Check_v := if(R_v ≤ 1.0, "OK", "Not OK, Check for Generalized Lateral Stability")

Check_v = "OK"

3. SUMMARY RESULT

submerged weight of concrete weight per unit length	$W_{sub_con} := \frac{(W_{conc} - b_{conc})}{g}$	$W_{sub_con} = 37.996 \frac{kg}{m}$
submerged weight of concrete weight per 5m	$W_{sub_con_5m} := W_{sub_con} \cdot 5m$	$W_{sub_con_5m} = 189.984 kg$
volume of concrete weight per 5m	$V_{con} := \frac{(W_{sub_con_5m})}{(\rho_{conc} - \rho_{sw})}$	$V_{con} = 0.138 \cdot m^3$
dry weight of concrete weight per 5m	$W_{con_dry} := V_{con} \cdot \rho_{conc}$	$W_{con_dry} = 331.601 kg$
anchor in Orcaflex	$anchor := 0.5 \cdot D_{conc} - z_p = 0.103 m$	
Bending stiffness	$EI := 14158 N \cdot m^2$	
Inertia pipe	$I := \pi \cdot \frac{1}{64} \cdot [(D_o)^4 - (D_i)^4]$	$I = 3.129 \times 10^{-5} m^4$
Modulus Young's	$E := \frac{EI}{I}$	$E = 452504.691 \cdot kPa$
Cross section area	$A_{pipe} := 0.25\pi(D_o^2 - D_i^2)$	$A_{pipe} = 9.515 \times 10^{-3} m^2$
Axial stiffness	$Ax_{stiff} := \frac{E \cdot A_{pipe}}{1}$	$Ax_{stiff} = 4305.527 \cdot kN$
dimension of concrete weight (guess value)		$length_{conc} := 0.5m$ $breadth_{conc} := 0.6m$ $height_{conc} := 0.5m$

LAMPIRAN 2

PERHITUNGAN
ON-BOTTOM STABILITY
PADA KONDISI OPERASI

Pipeline : 6" Main Gas Line (MGL) pipeline from LE to LD
Kilometers Point : 0.0
Condition : Operation

1. INPUT DATA

1.1 Pipeline Properties

Nominal outside diameter of pipeline		$D_o := 179.9\text{mm}$
Nominal inside diameter of pipeline		$D_i := 142.3\text{mm}$
Corrosion allowance of pipeline		$ca\% := 0\%$
Mass of pipeline in air per 1m		$m_p := 21.1\text{kg}$
Density of pipe pipeline per 1m	$\rho_p := \frac{m_p}{0.25 \cdot \pi \cdot (D_o^2 - D_i^2) \cdot 1\text{m}}$	$\rho_p = 2.218 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Thickness of concrete weight coating		$t_{\text{conc}} := 40\text{mm}$
Thickness of rubber coating		$t_{\text{coat}} := 6\text{mm}$
Density of concrete weight coating		$\rho_{\text{conc}} := 2400\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Density of rubber coating		$\rho_{\text{coat}} := 1300\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Water absorption on concrete weight coating		$\text{abs} := 5\%$
Density of pipeline content		$\rho_{\text{cont}} := 38\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

1.2 Enviromental Parameters

Significant wave height during a sea state		$H_s := 3.6\text{m}$
Nominal minimum water depth		$d := 33.6\text{m}$
Significant period		$T_s := 8.3\text{s}$
Peak period for design spectrum	$T_p := 1.14 \cdot T_s$	$T_p = 9.462\text{s}$
Angle between wave and pipeline		$\theta_w := 90\text{deg}$
Bottom current velocity		$V_c := 0.38\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Reference height of current measurement	$z_r := 0.1 \cdot d$	$z_r = 3.36\text{m}$
Angle between current velocity and pipeline		$\theta_c := 90\text{deg}$
Seawater density		$\rho_{\text{sw}} := 1025\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Thickness of marine growth		$t_{\text{mg}} := 0\text{mm}$
Density of marine growth		$\rho_{\text{mg}} := 1400\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Design strom duration (sea state duration)		$T_{\text{strom}} := 3\text{hr}$
Seabed gap		$e_{\text{gap}} := 0.0\text{m}$

1.3 Soil Parameters

Select seabed type

Type := 1

Note : Seabed Roughness from Section 3.4.2 DNVGL-RP- F109 2017, Table 3-1

Table 3-1 Seabed roughness			
Type	Seabed	Grain size d50 [mm]	Roughness z0 [m]
1	Silt and Clay	0.0625	5.E-06
2	Fine sand	0.25	1.E-05
3	Medium sand	0.5	4.E-05
4	Coarse sand	1	1.E-04
5	Gravel	4	3.E-04
6	Pebble	25	2.E-03
7	Cobble	125	1.E-02

$$z0_{Type} = 5E-006$$

$$z_0 := 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Soil data "Sand" or "Clay"

Soil := "Clay"

Submerged unit soil weight for **Sand**
(7,000 Very Loose to 13,500 Very Dense, Section 1.5.2 DNVGL F109 2017)

$$\gamma_{ss} := 10000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$$

Dry unit soil weight for **Clay**
(18,000 according to Section 1.5.2 DNVGL F109 2017)

$$\gamma_s := 18000 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-3}$$

Clay Shear Strength *(Reasonable Assumptions for Sandy Clay)*

$$S_u := 4.78 \cdot \text{kPa}$$

Angle of internal friction of sand
30deg Very Loose to 43deg Very Dense

$$\phi_s := 0 \cdot \text{deg}$$

Soil friction factor

$$\mu := \begin{cases} 0.2 & \text{if Soil} = \text{"Clay"} \\ 0.6 & \text{if Soil} = \text{"Sand"} \end{cases}$$

$$\mu = 0.2$$

Trenching depth

$$z_t := 0 \text{ m}$$

Angle for trench slope

$$\theta_t := 0 \cdot \text{deg}$$

2. CALCULATION

2.1 Pipeline Submerged Weight Calculation

Nominal wall thickness of pipeline	$wt := 0.5 \cdot (D_o - D_i)$	wt = 18.8 mm
Diameter of concrete weight coating	$D_{conc} := D_o + 2 \cdot t_{conc}$	$D_{conc} = 259.9 \cdot \text{mm}$
Total diameter of pipeline	$D_{tot} := D_o + 2 \cdot t_{conc} + 2 \cdot t_{mg}$	$D_{tot} = 259.9 \cdot \text{mm}$
Weight of pipeline	$W_p := 0.25 \cdot \pi \cdot (D_o^2 - D_i^2) \cdot \rho_p \cdot g$	$W_p = 206.92 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
Weight of concrete weight coating	$W_{conc} := 0.25 \pi (D_{conc}^2 - D_o^2) \cdot \rho_{conc} \cdot g$	$W_{conc} = 650.38 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

Weight of water absorption on concrete weight coating	$W_{abs} := abs \cdot W_{conc}$	$W_{abs} = 32.519 \cdot N \cdot m^{-1}$
Weight of marine growth	$W_{mg} := 0.25\pi(D_{tot}^2 - D_{conc}^2) \cdot \rho_{mg} \cdot g$	$W_{mg} = 0 \cdot N \cdot m^{-1}$
Weight of pipeline content	$W_{cont} := 0.25\pi(D_i^2) \cdot \rho_{cont} \cdot g$	$W_{cont} = 5.927 \cdot N \cdot m^{-1}$
Buoyancy force of pipeline	$b_p := 0.25\pi(D_o^2) \cdot \rho_{sw} \cdot g$	$b_p = 255.503 \cdot N \cdot m^{-1}$
Buoyancy force of concrete weight coating	$b_{conc} := 0.25\pi(D_{conc}^2 - D_o^2) \cdot \rho_{sw} \cdot g$	$b_{conc} = 277.766 \cdot N \cdot m^{-1}$
Submerged weight of pipeline per unit length	$W_{sub_p} := W_p - b_p$	$W_{sub_p} = -48.583 \cdot N \cdot m^{-1}$
Buoyancy force total	$b := 0.25\pi(D_{tot}^2) \cdot \rho_{sw} \cdot g$	$b = 533.27 \cdot N \cdot m^{-1}$
Submerged weight of pipeline and concrete per unit length	$W_{sub} := W_p + W_{conc} + W_{abs} + W_{mg} + W_{cont} - b$	$W_{sub} = 362.476 \cdot N \cdot m^{-1}$

2.2 Vertical Stability in Water (Specific Gravity Criteria)

Allowable safety factor for specific gravity criteria		$\gamma_w := 1.1$
Specific gravity of pipeline	$SG := \frac{W_{sub} + b}{b}$	$SG = 1.68$
Ratio for specific gravity of pipeline	$R_{sg} := \gamma_w \cdot \frac{b}{W_{sub} + b}$	$R_{sg} = 0.655$
Check for specific gravity criteria		
$UC_V := \text{if}(R_{sg} \leq 1.0, \text{"OK"}, \text{"Not OK, Increase concrete coating thickness"})$		$UC_V = \text{"OK"}$

2.3 Wave Induced Parameters

Calculate near bed velocities using spectral theory.
Therefore, all parameters need to be made dimensionless

	$g_{dim} := \frac{g}{\frac{m}{sec^2}}$	$H_{sdim} := \frac{H_s}{m}$	$T_{pdim} := \frac{T_p}{sec}$	$D_{dim} := \frac{D_o}{m}$	$h_{dim} := \frac{d}{m}$	$\omega_p := 2 \frac{\pi}{T_{pdim}}$
Referenced Period		$T_n := \sqrt{\frac{d}{g}}$				$T_n = 1.851 \text{ s}$
Parameter for peak enhancement factor			$\varphi := \frac{T_{pdim}}{\sqrt{H_{sdim}}}$			$\varphi = 4.987$
Peak enhancement factor			$\gamma := \begin{cases} 5 & \text{if } \varphi \leq 3.6 \\ e^{5.75 - 1.15\varphi} & \text{if } 3.6 < \varphi < 5 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$			$\gamma = 1.015$

Angular spectral peak frequency

$$\omega_p = 0.664$$

Spectral Width parameter

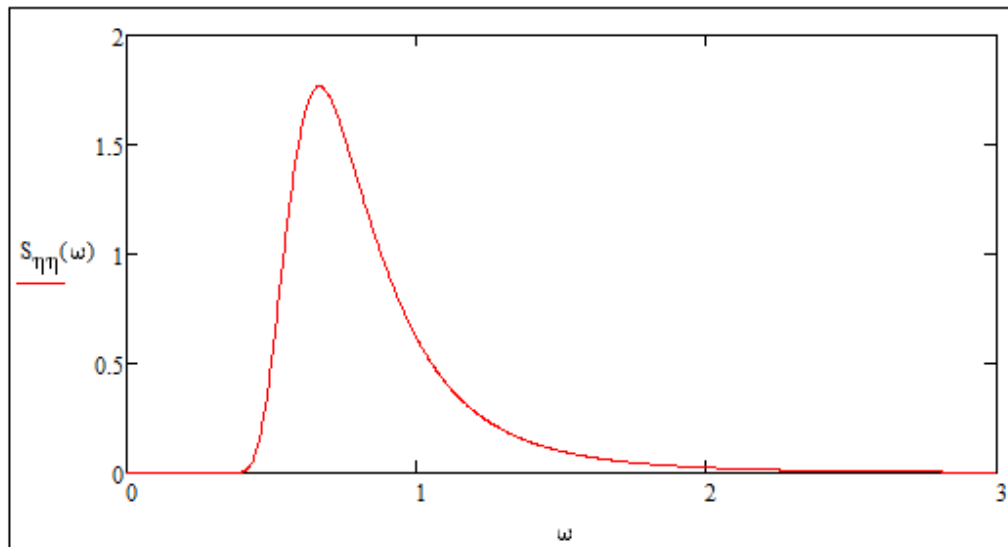
$$\sigma(\omega) := \begin{cases} 0.07 & \text{if } \omega \leq \omega_p \\ 0.09 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Generalised Phillips' constant

$$\alpha := \frac{5}{16} \cdot \frac{H_{s \text{ dim}}^2 \cdot \omega_p^4}{g_{\text{dim}}^2} \cdot (1 - 0.287 \ln(\gamma)) \quad \alpha = 0.008$$

Spectral density function

$$S_{\eta\eta}(\omega) := \alpha \cdot g_{\text{dim}}^2 \cdot \omega^{-5} \cdot e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4}} \cdot \gamma^{0.5} \cdot e^{-0.5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\alpha(\omega) \cdot \omega_p} \right)^2}$$



Seabed gap in case used for span analysis

$$\zeta := 0$$

Guess values

$$k := 100 \quad a_\omega := 2$$

Determine wave number
(with guess value)

$$kk(\omega) := \text{root} \left(k \cdot \tanh(k \cdot h_{\text{dim}}) - \frac{\omega^2}{g_{\text{dim}}}, k \right)$$

Determine omega max (with guess value) to avoid non convergence

$$\omega_{\text{max}} := \text{root}(kk(a_\omega) \cdot h_{\text{dim}} - \text{asinh}(\infty), a_\omega)$$

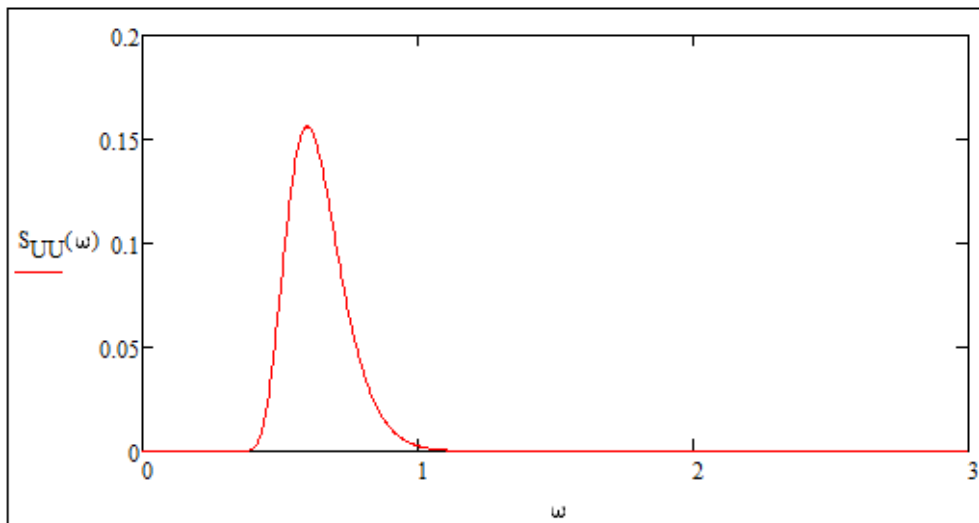
$$\omega_{\text{max}} = 14.371$$

Frequency transfer function to seabed
(based on first order wave theory)

$$G(\omega) := \begin{cases} \frac{\omega}{\sinh(kk(\omega) \cdot h_{\text{dim}})} & \text{if } \omega < \omega_{\text{max}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Wave induced velocity spectrum

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



Spectral moments of order n	$M_n(n) := \int_0^{\omega_{\max}} \omega^n \cdot S_{UU}(\omega) d\omega$	
Zeroth order spectral moment	$M_n(0) = 0.039$	
1st order spectral moment	$M_n(1) = 0.025$	
2nd order spectral moment	$M_n(2) = 0.016$	
4th order spectral moment	$M_n(4) = 0.008$	
Significant flow velocity amplitude at pipe level	$U_s := 2 \cdot \sqrt{M_n(0)} \cdot \frac{m}{\text{sec}}$	$U_s = 0.394 \cdot m \cdot s^{-1}$
Mean zero up-crossing period of oscillating flow at pipe level	$T_u := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{M_n(0)}{M_n(2)}} \cdot \text{sec}$	$T_u = 9.705 \text{ s}$
Spectral parameter	$s_p := 5$	
Wave energy spreading	$D_w(\theta) := \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{\pi}} \cdot \frac{\Gamma\left(1 + \frac{s_p}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2} + \frac{s_p}{2}\right)} \cdot \cos(\theta)^{s_p} \cdot \sin^2(\theta_w - \theta) & \text{if } \theta < \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$	
Reduction factor due to spectral directionality and spreading	$R_D := \sqrt{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} D_w(\theta) d\theta}$	$R_D = 0.926$
Velocity normal to the pipe including the effect of wave spreading - spectrum	$U_{\text{wave}} := R_D \cdot U_s$	$U_s = 0.365 \cdot m \cdot s^{-1}$

Ratio between period of single design oscillation and design spectrum

$$k_t := \begin{cases} 1.25 & \text{if } \gamma = 1 \\ 1.17 & \text{if } \gamma = 5 \\ 1.17 + \frac{(1.25 - 1.17)}{4} \cdot (\gamma - 1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_t = 1.17$$

Ratio between period of single design oscillation and design spectrum

$$k_T := \begin{cases} k_t - 5 \cdot (k_t - 1) \cdot \frac{T_n}{T_u} & \text{if } \frac{T_n}{T_u} \leq 0.2 \\ 1 & \text{if } \frac{T_n}{T_u} > 0.2 \end{cases} \quad k_T = 1.008$$

Period associated with single design oscillation

$$T_{so} := k_T \cdot T_u \quad T_{so} = 9.782 \text{ s}$$

Number of oscillation in the design bottom velocity spectrum

$$\tau := \frac{T_{strom}}{T_u} \quad \tau = 1112.84$$

Ratio of velocity amplitude between single design oscillation and the design spectral

$$k_U := \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)}} \right) \quad k_U = 1.95$$

Oscillatory velocity amplitude for single design oscillation, perpendicular to pipeline

$$U_{so} := k_U \cdot U_s \quad U_{so} = 0.711 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2.4 Current Velocity

Steady current velocity associated with design spectrum perpendicular to pipeline

$$V_C := V_c \cdot \left[\frac{\left(1 + \frac{z_0}{D_{tot}} \right) \cdot \ln \left(1 + \frac{D_{tot}}{z_0} \right) - 1}{\ln \left(1 + \frac{z_f}{z_0} \right)} \right] \cdot \sin(\theta_c)$$

$$V_C = 0.279 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Steady current velocity associated with design oscillation perpendicular to pipeline

$$V_{Co} := V_C \quad V_{Co} = 0.279 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2.5 Total Penetration of Pipeline

Vertical hydrodynamic (lift) force (zero force according to Section 3.6.5 DNVGL F109 2017)

$$F_z := 0 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Vertical contact force between pipe and soil

$$F_c := W_{sub} - F_z \quad F_c = 362.476 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Soil strength parameter

$$G_c := \frac{S_u}{D_{tot} \cdot \gamma_s} \quad G_c = 1.022$$

Soil parameter kc for sand

$$k_s := \frac{\gamma_{ss} \cdot D_{tot}^2}{F_c} \quad k_s = 1.864$$

Soil parameter kc for clay

$$k_c := \frac{S_u \cdot D_{tot}}{F_c} \quad k_c = 3.427$$

Initial penetration on soil

$$z_{pi} := \begin{cases} 0.037 \cdot k_s^{-0.67} \cdot D_{tot} & \text{if Soil} = \text{"Sand"} \\ \left[0.0071 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{k_c} \right)^{3.2} + 0.062 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{k_c} \right)^{0.7} \right] \cdot D_{tot} & \text{if Soil} = \text{"Clay"} \end{cases}$$

$z_{pi} = 6.871 \text{ mm}$

As a reasonable consideration,
12% outside diameter pipe of penetration
due to dynamic laying was considered.

$$z_{pl} := 12\% \cdot D_{conc} \quad z_{pl} = 31.188 \text{ mm}$$

Total penetration depth of pipeline

$$z_p := z_{pi} + z_{pl} \quad z_p = 38.059 \text{ mm}$$

2.6 Passive resistance on soil

Passive resistance on soil

$$F_R := F_c \cdot \begin{cases} \text{if Soil} = \text{"Sand"} \\ \left[5.0k_s - (0.15k_s)^2 \right] \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} \right)^{1.25} & \text{if } k_s \leq 26.7 \\ k_s \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} \right)^{1.25} & \text{if } k_s > 26.7 \\ 0 & \text{otherwise} \\ \text{if Soil} = \text{"Clay"} \\ \frac{4.1 \cdot k_c}{G_c^{0.39}} \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} \right)^{1.31} & \text{if } F_c > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$F_R = 407.73 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

2.7 Load reduction factor

2.7.1 Load reduction due to permeable seabed

Load reduction due to
permeable seabed in horizontal direction

$$r_{pem_y} := 1$$

Load reduction due to
permeable seabed in vertical direction

$$r_{pem_z} := 1$$

2.7.2 Load reduction due to penetration

Load reduction factor due to penetration (Eq. 3.19)
(horizontal direction) see Figure 3-6

$$r_{pen_y} := \begin{cases} 1.0 - 1.4 \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} \right) & \text{if } \frac{z_p}{D_{tot}} \leq 0.5 \\ 0.3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$r_{pen_y} = 0.795$$

Load reduction factor due to penetration (Eq. 3.20)
(vertical direction) see Figure 3-6

$$r_{pen_z} := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{z_p}{D_{tot}} \leq 0.1 \\ \left[1.0 - 1.3 \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} - 0.1 \right) \right] & \text{if } 0.1 < \frac{z_p}{D_{tot}} \leq 0.8667 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad r_{pen_z} = 0.94$$

2.7.3 Load reduction due to trenching

Load reduction due to trenching in horizontal direction

$$r_{tr_y} := 1 - 0.18 \cdot (\theta_t - 5 \text{deg})^{0.43} \cdot \left(\frac{z_t}{D_{tot}} \right)^{0.46} \quad r_{tr_y} = 1$$

Load reduction due to trenching in vertical direction

$$r_{tr_z} := 1 - 0.18 \cdot (\theta_t - 5 \text{deg})^{0.43} \cdot \left(\frac{z_t}{D_{tot}} \right)^{0.46} \quad r_{tr_z} = 1$$

2.7.4 Total load reduction factor

Total load reduction factor in horizontal direction

$$r_{tot_y} := r_{pem_y} \cdot r_{pen_y} \cdot r_{tr_y} \quad r_{tot_y} = 0.795$$

Total load reduction factor in vertical direction

$$r_{tot_z} := r_{pem_z} \cdot r_{pen_z} \cdot r_{tr_z} \quad r_{tot_z} = 0.94$$

2.8 Peak loads (Hydrodynamic Loads)

Keulegan-Carpenter number for single design oscillation

$$K_{so} := \frac{U_{so} \cdot T_u}{D_{tot}} \quad K_{so} = 26.549$$

Steady to oscillatory velocity ratio for single design oscillation

$$M_{so} := \frac{V_{Co}}{U_{so}} \quad M_{so} = 0.393$$

Table 3-9 Peak horizontal load coefficients

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

Peak horizontal load coefficient

$$C_{yo} := 1.29$$

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

Peak vertical load coefficient

$$C_{z0} := 1.00$$

Peak horizontal loads $F_{y0} := r_{tot_y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_{y0} \cdot (U_{s0} + V_{C0})^2$ $F_{y0} = 133.933 \cdot N \cdot m^{-1}$

Peak vertical loads $F_{z0} := r_{tot_z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_{z0} \cdot (U_{s0} + V_{C0})^2$ $F_{z0} = 122.714 \cdot N \cdot m^{-1}$

2.9 Absolute Static Stability Criteria

2.9.1 Lateral absolute static stability

Risk Basis for Design

Categorisation of fluids

Section 2 C200 DNV OS F101 Table 2-1, page 43)

Category	Description
A	Typical non-flammable water-based fluids.
B	Flammable and/or toxic fluids which are liquids at ambient temperature and atmospheric pressure conditions. Typical examples are oil and petroleum products. Methanol is an example of a flammable and toxic fluid.
C	Non-flammable fluids which are non-toxic gases at ambient temperature and atmospheric pressure conditions. Typical examples are nitrogen, carbon dioxide, argon and air.
D	Non-toxic, single-phase natural gas.
E	Flammable and/or toxic fluids which are gases at ambient temperature and atmospheric pressure conditions and which are conveyed as gases and/or liquids. Typical examples would be hydrogen, natural gas (not otherwise covered under category D), ethane, ethylene, liquefied petroleum gas (such as propane and butane), natural gas liquids, ammonia, and chlorine.

CF := "E"

Location Classes

Section 2 C300 DNV OS F101 Table 2-2, page 43)

Location	Definition
1	The area where no frequent human activity is anticipated along the pipeline route.
2	The part of the pipeline/riser in the near platform (manned) area or in areas with frequent human activity. The extent of location class 2 should be based on appropriate risk analyses. If no such analyses are performed a minimum horizontal distance of 500 m shall be adopted.

LC := 2

Safety Class

Section 2 C400 DNV OS F101 Table 2-2, page 43)

Safety class	Definition
Low	Where failure implies insignificant risk of human injury and minor environmental and economic consequences
Medium	Where failure implies low risk of human injury, minor environmental pollution or high economic or political consequences.
High	Classification for operating conditions where failure implies risk of human injury, significant environmental pollution or very high economic or political consequences

Section 2 C400 DNV OS F101 Table 2-2, page 43)

Phase	Fluid Category A, C		Fluid Category B, D and E	
	Location Class		Location Class	
	1	2	1	2
Temporary ^{2,3}	Low	Low	-	-
Operational	Low	Medium ⁴	Medium	High

1) Other classifications may exist depending on the conditions and criticality of failure the pipeline. For pipelines where some consequences are more severe than normal, i.e. when the table above does not apply, the selection of a higher safety class shall also consider the implication, on the total gained safety. If the total safety increase is marginal, the selection of a higher safety class may not be justified.

2) Installation until pre-commissioning (temporary phase) will normally be classified as safety class Low.

3) For safety classification of temporary phases after commissioning, special consideration shall be made to the consequences of failure, i.e. giving a higher safety class than Low.

4) Risers during normal operation will normally be classified as safety class High.

Cond := "Operation"

Safety Class: Low = 1
Normal = 2
High = 3

Safety := if LC = 1
 | 2 if Cond = "Operation"
 | 1 if Cond = "Installation"
 if LC = 2
 | 3 if Cond = "Operation"
 | 1 if Cond = "Installation"

Safety = 3

Pipeline location: (Section 3.6.3 DNVGL RP F109 2017 Page 24)

* Is the pipeline located in a cyclonic area? "Yes" or "No"

Cyclonic := "No"

* Is the pipeline located in Gulf of Mexico? "Yes" or "No"

GoM := "No"

fact := | 1 if Soil = "Sand"
 | 2 if Soil = "Clay"

fact = 2

Soil = "Clay"

Note : Safety Factor for absolute stability (Tables 3-5 to 3-8 DNVGL RP F109 - 2017)

Table 3-5 Safety factors, winter storm in North Sea			
	Low	Normal	High
Sand and rock	0.98	1.32	1.67
Clay	1.00	1.40	1.83

$$\gamma_{\text{fact, Safety}}^{35} = 1.83$$

Table 3-6 Safety factors, winter storm in GoM and Southern Ocean			
	Low	Normal	High
Sand and rock	0.95	1.41	1.99
Clay	0.97	1.50	2.16

$$\gamma_{\text{fact, Safety}}^{36} = 2.16$$

Table 3-7 Safety factors, cyclonic conditions in North West Shelf			
	Low	Normal	High
Sand and rock	0.95	1.50	2.16
Clay	0.95	1.56	2.31

$$\gamma_{\text{fact, Safety}}^{37} = 2.31$$

Table 3-8 Safety factors, cyclonic conditions Gulf of Mexico (GoM)			
	Low	Normal	High
Sand and rock	0.95	1.64	2.46
Clay	0.93	1.64	2.54

$$\gamma_{\text{fact, Safety}}^{38} = 2.54$$

$$\gamma_{\text{SC}} := \begin{cases} \text{if GoM} = \text{"Yes"} \\ \left| \begin{array}{l} \gamma_{\text{fact, Safety}}^{38} \text{ if Cyclonic} = \text{"Yes"} \\ \gamma_{\text{fact, Safety}}^{36} \text{ if Cyclonic} = \text{"No"} \end{array} \right. \\ \text{if GoM} = \text{"No"} \\ \left| \begin{array}{l} \gamma_{\text{fact, Safety}}^{37} \text{ if Cyclonic} = \text{"Yes"} \\ \gamma_{\text{fact, Safety}}^{35} \text{ if Cyclonic} = \text{"No"} \end{array} \right. \end{cases}$$

Safety factor to be used in absolute static stability

$$\gamma_{\text{SC}} = 1.83$$

Required submerged weight for lateral absolute static stability

$$w_{\text{req, L}} := \frac{\gamma_{\text{SC}} \cdot (F_{\text{yo}} + \mu \cdot F_{\text{yo}}) - F_{\text{R}}}{\mu} \quad w_{\text{req, L}} = -568.068 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Safety factor for lateral absolute static stability

$$\text{SF}_{\text{L}} := \frac{\mu \cdot W_{\text{sub}} + F_{\text{R}}}{F_{\text{yo}} + \mu \cdot F_{\text{zo}}} \quad \text{SF}_{\text{L}} = 3.03$$

Utility ratio for lateral absolute static stability criteria

$$R_{\text{L}} := \gamma_{\text{SC}} \cdot \frac{F_{\text{yo}} + \mu \cdot F_{\text{zo}}}{\mu \cdot W_{\text{sub}} + F_{\text{R}}} \quad R_{\text{L}} = 0.604$$

Check for lateral absolute static stability criteria

$$\text{Check}_{\text{L}} := \text{if}(R_{\text{L}} \leq 1.0, \text{"OK"}, \text{"Not OK, Check for Generalized Lateral Stability"})$$

$$\text{Check}_{\text{L}} = \text{"OK"}$$

2.9.2 Vertical absolute static stability

Safety factor for vertical absolute static stability criteria

$$SF_v := \frac{W_{sub}}{F_{zo}} \quad SF_v = 2.954$$

Utility ratio for vertical absolute static stability criteria

$$R_v := \gamma_{SC} \cdot \frac{F_{zo}}{W_{sub}} \quad R_v = 0.62$$

Check for vertical absolute static stability criteria

Check_v := if($R_v \leq 1.0$, "OK", "Not OK, Check for Generalized Lateral Stability")

Check_v = "OK"

3. SUMMARY RESULT

submerged weight of concrete weight per unit length	$W_{sub_con} := \frac{(W_{conc} - b_{conc})}{g}$	$W_{sub_con} = 37.996 \frac{kg}{m}$
submerged weight of concrete weight per 5m	$W_{sub_con_5m} := W_{sub_con} \cdot 5m$	$W_{sub_con_5m} = 189.98 \text{ kg}$
volume of concrete weight per 5m	$V_{con} := \frac{(W_{sub_con_5m})}{(\rho_{conc} - \rho_{sw})}$	$V_{con} = 0.138 \cdot m^3$
dry weight of concrete weight per 5m	$W_{con_dry} := V_{con} \cdot \rho_{conc}$	$W_{con_dry} = 331.601 \text{ kg}$
anchor in Orcaflex	$anchor := 0.5 \cdot D_{conc} - z_p = 0.092 \text{ m}$	
Bending stiffness	$EI := 14158 \text{ N} \cdot \text{m}^2$	
Inertia pipe	$I := \pi \cdot \frac{1}{64} \cdot [(D_o)^4 - (D_i)^4]$	$I = 3.129 \times 10^{-5} \text{ m}^4$
Modulus Young's	$E := \frac{EI}{I}$	$E = 452504.691 \text{ kPa}$
Cross section area	$A_{pipe} := 0.25\pi(D_o^2 - D_i^2)$	$A_{pipe} = 9.515 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Axial stiffness	$Ax_{stiff} := \frac{E \cdot A_{pipe}}{1}$	$Ax_{stiff} = 4305.527 \text{ kN}$
dimension of concrete weight (guess value)		$length_{conc} := 0.5 \text{ m}$ $breadth_{conc} := 0.6 \text{ m}$ $height_{conc} := 0.5 \text{ m}$

Pipeline : 6" Main Gas Line (MGL) pipeline from LE to LD
Kilometers Point : 2.2
Condition : Operation

1. INPUT DATA

1.1 Pipeline Properties

Nominal outside diameter of pipeline		$D_o := 179.9\text{mm}$
Nominal inside diameter of pipeline		$D_i := 142.3\text{mm}$
Corrosion allowance of pipeline		$ca\% := 0\%$
Mass of pipeline in air per 1m		$m_p := 21.1\text{kg}$
Density of pipe pipeline per 1m	$\rho_p := \frac{m_p}{0.25 \cdot \pi \cdot (D_o^2 - D_i^2) \cdot 1\text{m}}$	$\rho_p = 2.218 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Thickness of concrete weight coating		$t_{\text{conc}} := 40\text{mm}$
Thickness of rubber coating		$t_{\text{coat}} := 6\text{mm}$
Density of concrete weight coating		$\rho_{\text{conc}} := 2400\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Density of rubber coating		$\rho_{\text{coat}} := 1300\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Water absorption on concrete weight coating		$\text{abs} := 5\%$
Density of pipeline content		$\rho_{\text{cont}} := 38\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

1.2 Enviromental Parameters

Significant wave height during a sea state		$H_s := 3.6\text{m}$
Nominal minimum water depth		$d := 31\text{m}$
Significant period		$T_s := 8.3\text{s}$
Peak period for design spectrum	$T_p := 1.14 \cdot T_s$	$T_p = 9.462\text{s}$
Angle between wave and pipeline		$\theta_w := 90\text{deg}$
Bottom current velocity		$V_c := 0.38\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Reference height of current measurement	$z_r := 0.1 \cdot d$	$z_r = 3.1\text{m}$
Angle between current velocity and pipeline		$\theta_c := 90\text{deg}$
Seawater density		$\rho_{\text{sw}} := 1025\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Thickness of marine growth		$t_{\text{mg}} := 0\text{mm}$
Density of marine growth		$\rho_{\text{mg}} := 1400\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Design strom duration (sea state duration)		$T_{\text{strom}} := 3\text{hr}$
Seabed gap		$e_{\text{gap}} := 0.0\text{m}$

1.3 Soil Parameters

Select seabed type

Type := 1

Note : Seabed Roughness from Section 3.4.2 DNVGL-RP- F109 2017, Table 3-1

Type	Seabed	Grain size d50 [mm]	Roughness z0 [m]
1	Silt and Clay	0.0625	5.E-06
2	Fine sand	0.25	1.E-05
3	Medium sand	0.5	4.E-05
4	Coarse sand	1	1.E-04
5	Gravel	4	3.E-04
6	Pebble	25	2.E-03
7	Cobble	125	1.E-02

$$z0_{Type} = 5E-006$$

$$z_0 := 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Soil data "Sand" or "Clay"

Soil := "Clay"

Submerged unit soil weight for **Sand**
(7,000 Very Loose to 13,500 Very Dense, Section 1.5.2 DNVGL F109 2017)

$$\gamma_{ss} := 6.28 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$$

Dry unit soil weight for **Clay**
(18,000 according to Section 1.5.2 DNVGL F109 2017)

$$\gamma_s := 18000 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-3}$$

Clay Shear Strength *(Reasonable Assumptions for Sandy Clay)*

$$S_u := 4.78 \cdot \text{kPa}$$

Angle of internal friction of sand
30deg Very Loose to 43deg Very Dense

$$\phi_s := 0 \cdot \text{deg}$$

Soil friction factor

$$\mu := \begin{cases} 0.2 & \text{if Soil} = \text{"Clay"} \\ 0.6 & \text{if Soil} = \text{"Sand"} \end{cases}$$

$$\mu = 0.2$$

Trenching depth

$$z_t := 0 \text{ m}$$

Angle for trench slope

$$\theta_t := 0 \text{ deg}$$

2. CALCULATION

2.1 Pipeline Submerged Weight Calculation

Nominal wall thickness of pipeline	$wt := 0.5 \cdot (D_o - D_i)$	wt = 18.8-mm
Diameter of concrete weight coating	$D_{conc} := D_o + 2 \cdot t_{conc}$	$D_{conc} = 259.9 \cdot \text{mm}$
Total diameter of pipeline	$D_{tot} := D_o + 2 \cdot t_{conc} + 2 \cdot t_{mg}$	$D_{tot} = 259.9 \cdot \text{mm}$
Weight of pipeline	$W_p := 0.25 \cdot \pi \cdot (D_o^2 - D_i^2) \cdot \rho_p \cdot g$	$W_p = 206.92 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
Weight of concrete weight coating	$W_{conc} := 0.25 \pi (D_{conc}^2 - D_o^2) \cdot \rho_{conc} \cdot g$	$W_{conc} = 650.38 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

Weight of water absorption on concrete weight coating	$W_{abs} := abs \cdot W_{conc}$	$W_{abs} = 32.519 \cdot N \cdot m^{-1}$
Weight of marine growth	$W_{mg} := 0.25\pi(D_{tot}^2 - D_{conc}^2) \cdot \rho_{mg} \cdot g$	$W_{mg} = 0 \cdot N \cdot m^{-1}$
Weight of pipeline content	$W_{cont} := 0.25\pi(D_i^2) \cdot \rho_{cont} \cdot g$	$W_{cont} = 5.927 \cdot N \cdot m^{-1}$
Buoyancy force of pipeline	$b_p := 0.25\pi(D_o^2) \cdot \rho_{sw} \cdot g$	$b_p = 255.503 \cdot N \cdot m^{-1}$
Buoyancy force of concrete weight coating	$b_{conc} := 0.25\pi(D_{conc}^2 - D_o^2) \cdot \rho_{sw} \cdot g$	$b_{conc} = 277.766 \cdot N \cdot m^{-1}$
Submerged weight of pipeline per unit length	$W_{sub_p} := W_p - b_p$	$W_{sub_p} = -48.583 \cdot N \cdot m^{-1}$
Buoyancy force total	$b := 0.25\pi(D_{tot}^2) \cdot \rho_{sw} \cdot g$	$b = 533.27 \cdot N \cdot m^{-1}$
Submerged weight of pipeline and concrete per unit length	$W_{sub} := W_p + W_{conc} + W_{abs} + W_{mg} + W_{cont} - b$	$W_{sub} = 362.476 \cdot N \cdot m^{-1}$

2.2 Vertical Stability in Water (Specific Gravity Criteria)

Allowable safety factor for specific gravity criteria		$\gamma_w := 1.1$
Specific gravity of pipeline	$SG := \frac{W_{sub} + b}{b}$	$SG = 1.68$
Ratio for specific gravity of pipeline	$R_{sg} := \gamma_w \cdot \frac{b}{W_{sub} + b}$	$R_{sg} = 0.655$
Check for specific gravity criteria		
$UC_v := \text{if}(R_{sg} \leq 1.0, \text{"OK"}, \text{"Not OK, Increase concrete coating thickness"})$		$UC_v = \text{"OK"}$

2.3 Wave Induced Parameters

Calculate near bed velocities using spectral theory.
Therefore, all parameters need to be made dimensionless

	$g_{dim} := \frac{g}{\frac{m}{sec^2}}$	$H_{sdim} := \frac{H_s}{m}$	$T_{pdim} := \frac{T_p}{sec}$	$D_{dim} := \frac{D_o}{m}$	$h_{dim} := \frac{d}{m}$	$\omega_p := 2 \frac{\pi}{T_{pdim}}$
Referenced Period		$T_n := \sqrt{\frac{d}{g}}$				$T_n = 1.778 \text{ s}$
Parameter for peak enhancement factor			$\varphi := \frac{T_{pdim}}{\sqrt{H_{sdim}}}$			$\varphi = 4.987$
Peak enhancement factor			$\gamma := \begin{cases} 5 & \text{if } \varphi \leq 3.6 \\ e^{5.75 - 1.15\varphi} & \text{if } 3.6 < \varphi < 5 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$			$\gamma = 1.015$

Angular spectral peak frequency

$$\omega_p = 0.664$$

Spectral Width parameter

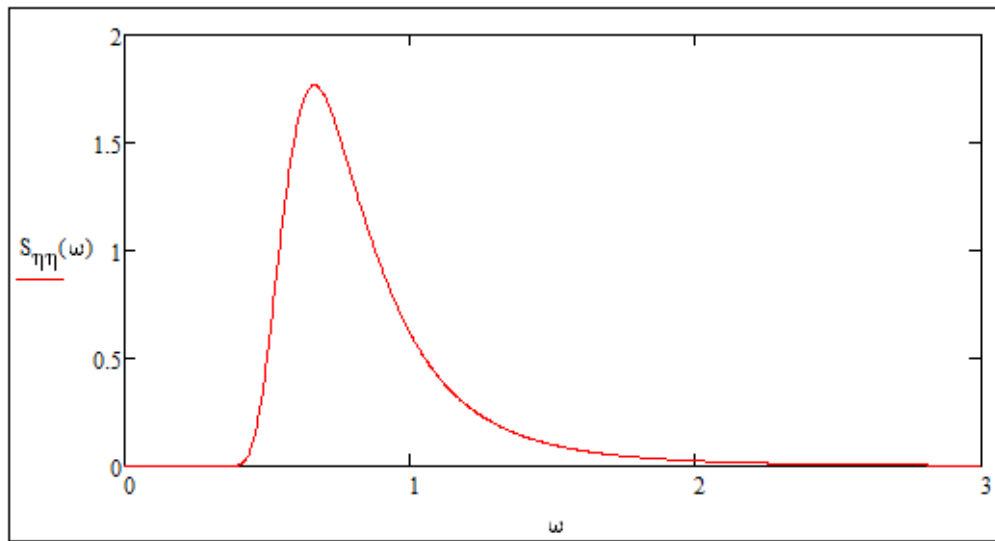
$$\sigma(\omega) := \begin{cases} 0.07 & \text{if } \omega \leq \omega_p \\ 0.09 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Generalised Phillips' constant

$$\alpha := \frac{5}{16} \cdot \frac{H_{s\text{dim}}^2 \cdot \omega_p^4}{g_{\text{dim}}^2} \cdot (1 - 0.287 \ln(\gamma)) \quad \alpha = 0.008$$

Spectral density function

$$S_{\eta\eta}(\omega) := \alpha \cdot g_{\text{dim}}^2 \cdot \omega^{-5} \cdot e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4}} \cdot \gamma^{e^{-0.5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma(\omega) \cdot \omega_p} \right)^2}}$$



Seabed gap in case used for span analysis

$$\zeta := 0$$

Guess values

$$k := 100 \quad a_\omega := 2$$

Determine wave number
(with guess value)

$$kk(\omega) := \text{root} \left(k \cdot \tanh(k \cdot h_{\text{dim}}) - \frac{\omega^2}{g_{\text{dim}}}, k \right)$$

Determine omega max (with guess value) to avoid non convergence

$$\omega_{\text{max}} := \text{root}(kk(a_\omega) \cdot h_{\text{dim}} - \text{asinh}(\infty), a_\omega)$$

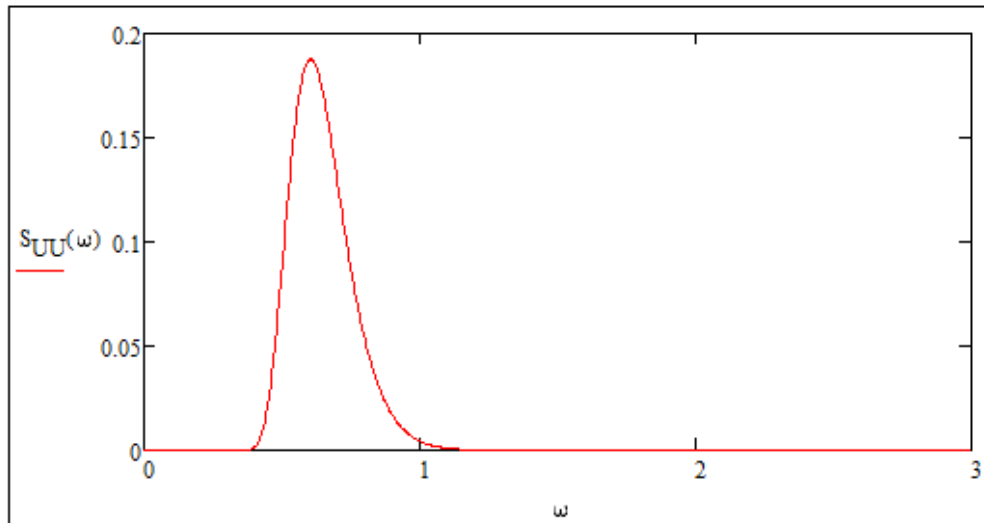
$$\omega_{\text{max}} = 14.961$$

Frequency transfer function to seabed
(based on first order wave theory)

$$G(\omega) := \begin{cases} \frac{\omega}{\sinh(kk(\omega) \cdot h_{\text{dim}})} & \text{if } \omega < \omega_{\text{max}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Wave induced velocity spectrum

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



Spectral moments of order n $M_n(n) := \int_0^{\omega_{\max}} \omega^n \cdot S_{UU}(\omega) d\omega$

Zeroth order spectral moment $M_n(0) = 0.048$

1st order spectral moment $M_n(1) = 0.031$

2nd order spectral moment $M_n(2) = 0.021$

4th order spectral moment $M_n(4) = 0.01$

Significant flow velocity amplitude at pipe level $U_s := 2 \cdot \sqrt{M_n(0)} \cdot \frac{m}{sec}$ $U_s = 0.439 \cdot m \cdot s^{-1}$

Mean zero up-crossing period of oscillating flow at pipe level $T_u := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{M_n(0)}{M_n(2)}} \cdot sec$ $T_u = 9.583 s$

Spectral parameter $s_p = 5$

Wave energy spreading $D_w(\theta) := \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{\pi}} \cdot \frac{\Gamma\left(1 + \frac{s_p}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2} + \frac{s_p}{2}\right)} \cdot \cos(\theta)^{s_p} \cdot \sin^2(\theta_w - \theta) & \text{if } |\theta| < \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

Reduction factor due to spectral directionality and spreading $R_D := \sqrt{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} D_w(\theta) d\theta}$ $R_D = 0.926$

Velocity normal to the pipe including the effect of wave spreading - spectrum $U_{\text{wave}} := R_D \cdot U_s$ $U_s = 0.406 \cdot m \cdot s^{-1}$

Ratio between period of single design oscillation and design spectrum

$$k_t := \begin{cases} 1.25 & \text{if } \gamma = 1 \\ 1.17 & \text{if } \gamma = 5 \\ 1.17 + \frac{(1.25 - 1.17)}{4} \cdot (\gamma - 1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_t = 1.17$$

Ratio between period of single design oscillation and design spectrum

$$k_T := \begin{cases} k_t - 5 \cdot (k_t - 1) \cdot \frac{T_n}{T_u} & \text{if } \frac{T_n}{T_u} \leq 0.2 \\ 1 & \text{if } \frac{T_n}{T_u} > 0.2 \end{cases} \quad k_T = 1.012$$

Period associated with single design oscillation

$$T_{so} := k_T \cdot T_u \quad T_{so} = 9.701 \text{ s}$$

Number of oscillation in the design bottom velocity spectrum

$$\tau := \frac{T_{strom}}{T_u} \quad \tau = 1126.998$$

Ratio of velocity amplitude between single design oscillation and the design spectral

$$k_U := \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)}} \right) \quad k_U = 1.951$$

Oscillatory velocity amplitude for single design oscillation, perpendicular to pipeline

$$U_{so} := k_U \cdot U_s \quad U_{so} = 0.793 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2.4 Current Velocity

Steady current velocity associated with design spectrum perpendicular to pipeline

$$V_C := V_c \cdot \left[\frac{\left(1 + \frac{z_0}{D_{tot}} \right) \cdot \ln \left(1 + \frac{D_{tot}}{z_0} \right) - 1}{\ln \left(1 + \frac{z_r}{z_0} \right)} \right] \cdot \sin(\theta_c)$$

$$V_C = 0.281 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Steady current velocity associated with design oscillation perpendicular to pipeline

$$V_{Co} := V_C \quad V_{Co} = 0.281 \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2.5 Total Penetration of Pipeline

Vertical hydrodynamic (lift) force (zero force according to Section 3.6.5 DNVGL F109 2017)

$$F_z := 0 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Vertical contact force between pipe and soil

$$F_c := W_{sub} - F_z \quad F_c = 362.476 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Soil strength parameter

$$G_c := \frac{S_u}{D_{tot}^{\gamma_s}} \quad G_c = 1.022$$

Soil parameter kc for sand

$$k_s := \frac{\gamma_{ss} \cdot D_{tot}^2}{F_c} \quad k_s = 1.17$$

Soil parameter kc for clay

$$k_c := \frac{S_u \cdot D_{tot}}{F_c} \quad k_c = 3.427$$

Initial penetration on soil

$$z_{pi} := \begin{cases} 0.037 \cdot k_s^{-0.67} \cdot D_{tot} & \text{if Soil} = \text{"Sand"} \\ \left[0.0071 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{k_c} \right)^{3.2} + 0.062 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{k_c} \right)^{0.7} \right] \cdot D_{tot} & \text{if Soil} = \text{"Clay"} \end{cases}$$

$z_{pi} = 6.871 \cdot \text{mm}$

As a reasonable consideration,
12% outside diameter pipe of penetration
due to dynamic laying was considered.

$$z_{pl} := 12\% \cdot D_{conc} \quad z_{pl} = 31.188 \cdot \text{mm}$$

Total penetration depth of pipeline

$$z_p := z_{pi} + z_{pl} \quad z_p = 38.059 \cdot \text{mm}$$

2.6 Passive resistance on soil

Passive resistance on soil

$$F_R := F_c \cdot \begin{cases} \text{if Soil} = \text{"Sand"} \\ \left[5.0k_s - (0.15k_s)^2 \right] \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} \right)^{1.25} & \text{if } k_s \leq 26.7 \\ k_s \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} \right)^{1.25} & \text{if } k_s > 26.7 \\ 0 & \text{otherwise} \\ \text{if Soil} = \text{"Clay"} \\ \frac{4.1 \cdot k_c}{G_c^{0.39}} \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} \right)^{1.31} & \text{if } F_c > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$F_R = 407.73 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

2.7 Load reduction factor

2.7.1 Load reduction due to permeable seabed

Load reduction due to
permeable seabed in horizontal direction

$$r_{perm_y} := 1$$

Load reduction due to
permeable seabed in vertical direction

$$r_{perm_z} := 1$$

2.7.2 Load reduction due to penetration

Load reduction factor due to penetration (Eq. 3.19)
(horizontal direction) see Figure 3-6

$$r_{pen_y} := \begin{cases} 1.0 - 1.4 \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} \right) & \text{if } \frac{z_p}{D_{tot}} \leq 0.5 \\ 0.3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$r_{pen_y} = 0.795$$

Load reduction factor due to penetration (Eq. 3.20)
(vertical direction) see Figure 3-6

$$r_{pen_z} := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{z_p}{D_{tot}} \leq 0.1 \\ \left[1.0 - 1.3 \cdot \left(\frac{z_p}{D_{tot}} - 0.1 \right) \right] & \text{if } 0.1 < \frac{z_p}{D_{tot}} \leq 0.8667 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad r_{pen_z} = 0.94$$

2.7.3 Load reduction due to trenching

Load reduction due to trenching in horizontal direction

$$r_{tr_y} := 1 - 0.18 \cdot (\theta_t - 5 \text{deg})^{0.43} \cdot \left(\frac{z_t}{D_{tot}} \right)^{0.46} \quad r_{tr_y} = 1$$

Load reduction due to trenching in vertical direction

$$r_{tr_z} := 1 - 0.18 \cdot (\theta_t - 5 \text{deg})^{0.43} \cdot \left(\frac{z_t}{D_{tot}} \right)^{0.46} \quad r_{tr_z} = 1$$

2.7.4 Total load reduction factor

Total load reduction factor in horizontal direction

$$r_{tot_y} := r_{perm_y} \cdot r_{pen_y} \cdot r_{tr_y} \quad r_{tot_y} = 0.795$$

Total load reduction factor in vertical direction

$$r_{tot_z} := r_{perm_z} \cdot r_{pen_z} \cdot r_{tr_z} \quad r_{tot_z} = 0.94$$

2.8 Peak loads (Hydrodynamic Loads)

Keulegan-Carpenter number for single design oscillation

$$K_{so} := \frac{U_{so} \cdot T_u}{D_{tot}} \quad K_{so} = 29.239$$

Steady to oscillatory velocity ratio for single design oscillation

$$M_{so} := \frac{V_{Co}}{U_{so}} \quad M_{so} = 0.354$$

Table 3-9 Peak horizontal load coefficients

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

Peak horizontal load coefficient

$$C_{yo} := 1.39$$

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

Peak vertical load coefficient

$$C_{z0} := 1.15$$

Peak horizontal loads $F_{yo} := r_{tot_y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_{yo} \cdot (U_{so} + V_{Co})^2$ $F_{yo} = 169.74 \cdot N \cdot m^{-1}$

Peak vertical loads $F_{zo} := r_{tot_z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_{zo} \cdot (U_{so} + V_{Co})^2$ $F_{zo} = 165.984 \cdot N \cdot m^{-1}$

2.9 Absolute Static Stability Criteria

2.9.1 Lateral absolute static stability

Risk Basis for Design

Categorisation of fluids

Section 2 C200 DNV OS F101 Table 2-1, page 43)

Category	Description
A	Typical non-flammable water-based fluids.
B	Flammable and/or toxic fluids which are liquids at ambient temperature and atmospheric pressure conditions. Typical examples are oil and petroleum products. Methanol is an example of a flammable and toxic fluid.
C	Non-flammable fluids which are non-toxic gases at ambient temperature and atmospheric pressure conditions. Typical examples are nitrogen, carbon dioxide, argon and air.
D	Non-toxic, single-phase natural gas.
E	Flammable and/or toxic fluids which are gases at ambient temperature and atmospheric pressure conditions and which are conveyed as gases and/or liquids. Typical examples would be hydrogen, natural gas (not otherwise covered under category D), ethane, ethylene, liquefied petroleum gas (such as propane and butane), natural gas liquids, ammonia, and chlorine.

CF := "E"

Location Classes

Section 2 C300 DNV OS F101 Table 2-2, page 43)

Location	Definition
1	The area where no frequent human activity is anticipated along the pipeline route.
2	The part of the pipeline/riser in the near platform (manned) area or in areas with frequent human activity. The extent of location class 2 should be based on appropriate risk analyses. If no such analyses are performed a minimum horizontal distance of 500 m shall be adopted.

LC := 2

Safety Class

Section 2 C400 DNV OS F101 Table 2-2, page 43)

Safety class	Definition
Low	Where failure implies insignificant risk of human injury and minor environmental and economic consequences
Medium	Where failure implies low risk of human injury, minor environmental pollution or high economic or political consequences.
High	Classification for operating conditions where failure implies risk of human injury, significant environmental pollution or very high economic or political consequences

Section 2 C400 DNV OS F101 Table 2-2, page 43)

Phase	Fluid Category A, C		Fluid Category B, D and E	
	Location Class		Location Class	
	1	2	1	2
Temporary ^{2,3)}	Low	Low	-	-
Operational	Low	Medium ⁴⁾	Medium	High

1) Other classifications may exist depending on the conditions and criticality of failure the pipeline. For pipelines where some consequences are more severe than normal, i.e. when the table above does not apply, the selection of a higher safety class shall also consider the implication, on the total gained safety. If the total safety increase is marginal, the selection of a higher safety class may not be justified.

2) Installation until pre-commissioning (temporary phase) will normally be classified as safety class Low.

3) For safety classification of temporary phases after commissioning, special consideration shall be made to the consequences of failure, i.e. giving a higher safety class than Low.

4) Risers during normal operation will normally be classified as safety class High.

Cond := "Operation"

Safety Class: Low = 1
Normal = 2
High = 3

Safety := if LC = 1
 | 2 if Cond = "Operation"
 | 1 if Cond = "Installation"
 if LC = 2
 | 3 if Cond = "Operation"
 | 1 if Cond = "Installation"

Safety = 3

Pipeline location: (Section 3.6.3 DNVGL RP F109 2017 Page 24)

* Is the pipeline located in a cyclonic area? "Yes" or "No"

Cyclonic := "No"

* Is the pipeline located in Gulf of Mexico? "Yes" or "No"

GoM := "No"

fact := | 1 if Soil = "Sand"
 | 2 if Soil = "Clay"

fact = 2

Soil = "Clay"

Note : Safety Factor for absolute stability (Tables 3-5 to 3-8 DNVGL RP F109 - 2017)

Table 3-5 Safety factors, winter storm in North Sea			
	Low	Normal	High
Sand and rock	0.98	1.32	1.67
Clay	1.00	1.40	1.83

$$\gamma_{35_{\text{fact, Safety}}} = 1.83$$

Table 3-6 Safety factors, winter storm in GoM and Southern Ocean			
	Low	Normal	High
Sand and rock	0.95	1.41	1.99
Clay	0.97	1.50	2.16

$$\gamma_{36_{\text{fact, Safety}}} = 2.16$$

Table 3-7 Safety factors, cyclonic conditions in North West Shelf			
	Low	Normal	High
Sand and rock	0.95	1.50	2.16
Clay	0.95	1.56	2.31

$$\gamma_{37_{\text{fact, Safety}}} = 2.31$$

Table 3-8 Safety factors, cyclonic conditions Gulf of Mexico (GoM)			
	Low	Normal	High
Sand and rock	0.95	1.64	2.46
Clay	0.93	1.64	2.54

$$\gamma_{38_{\text{fact, Safety}}} = 2.54$$

$$\gamma_{sc} := \begin{cases} \text{if GoM} = \text{"Yes"} \\ \quad \left| \begin{array}{l} \gamma_{38_{\text{fact, Safety}}} \text{ if Cyclonic} = \text{"Yes"} \\ \gamma_{36_{\text{fact, Safety}}} \text{ if Cyclonic} = \text{"No"} \end{array} \right. \\ \text{if GoM} = \text{"No"} \\ \quad \left| \begin{array}{l} \gamma_{37_{\text{fact, Safety}}} \text{ if Cyclonic} = \text{"Yes"} \\ \gamma_{35_{\text{fact, Safety}}} \text{ if Cyclonic} = \text{"No"} \end{array} \right. \end{cases}$$

Safety factor to be used in absolute static stability

$$\gamma_{sc} = 1.83$$

Required submerged weight for lateral absolute static stability

$$w_{\text{req_L}} := \frac{\gamma_{sc} \cdot (F_{yo} + \mu \cdot F_{yo}) - F_R}{\mu}$$

$$w_{\text{req_L}} = -174.901 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Safety factor for lateral absolute static stability

$$SF_L := \frac{\mu \cdot W_{\text{sub}} + F_R}{F_{yo} + \mu \cdot F_{zo}}$$

$$SF_L = 2.366$$

Utility ratio for lateral absolute static stability criteria

$$R_L := \gamma_{sc} \cdot \frac{F_{yo} + \mu \cdot F_{zo}}{\mu \cdot W_{\text{sub}} + F_R}$$

$$R_L = 0.773$$

Check for lateral absolute static stability criteria

$$\text{Check}_L := \text{if}(R_L \leq 1.0, \text{"OK"}, \text{"Not OK, Check for Generalized Lateral Stability"})$$

$$\text{Check}_L = \text{"OK"}$$

2.9.2 Vertical absolute static stability

Safety factor for vertical absolute static stability criteria

$$SF_v := \frac{W_{sub}}{F_{zo}} \quad SF_v = 2.184$$

Utility ratio for vertical absolute static stability criteria

$$R_v := \gamma_{sc} \cdot \frac{F_{zo}}{W_{sub}} \quad R_v = 0.838$$

Check for vertical absolute static stability criteria

$$Check_v := \text{if}(R_v \leq 1.0, \text{"OK"}, \text{"Not OK, Check for Generalized Lateral Stability"})$$

Check_v = "OK"

3. SUMMARY RESULT

submerged weight of concrete weight per unit length	$W_{sub_con} := \frac{(W_{conc} - b_{conc})}{g}$	$W_{sub_con} = 37.996 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$
submerged weight of concrete weight per 5m	$W_{sub_con_5m} := W_{sub_con} \cdot 5\text{m}$	$W_{sub_con_5m} = 189.98 \text{ kg}$
volume of concrete weight per 5m	$V_{con} := \frac{(W_{sub_con_5m})}{(\rho_{conc} - \rho_{sw})}$	$V_{con} = 0.138 \cdot \text{m}^3$
dry weight of concrete weight per 5m	$W_{con_dry} := V_{con} \cdot \rho_{conc}$	$W_{con_dry} = 331.601 \text{ kg}$
Bending stiffness		$EI = 14158 \text{ N} \cdot \text{m}^2$
Inertia pipe	$I := \pi \cdot \frac{1}{64} \cdot [(D_o)^4 - (D_i)^4]$	$I = 3.129 \times 10^{-5} \text{ m}^4$
Modulus Young's	$E := \frac{EI}{I}$	$E = 452504.691 \cdot \text{kPa}$
Cross section area	$A_{pipe} := 0.25\pi(D_o^2 - D_i^2)$	$A_{pipe} = 9.515 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Axial stiffness	$Ax_{stiff} := \frac{E \cdot A_{pipe}}{1}$	$Ax_{stiff} = 4305.527 \cdot \text{kN}$
dimension of concrete weight (guess value)		length _{conc} := 0.5m breadth _{conc} := 0.6m height _{conc} := 0.5m
volume of concrete weight with hole for RTP	$\text{volume} := (\text{length}_{conc} \cdot \text{breadth}_{conc} \cdot \text{height}_{conc}) - \pi \cdot \left(\frac{D_o}{2}\right)^2 \cdot \text{length}_{conc}$ $\text{volume} = 0.137 \cdot \text{m}^3$	

LAMPIRAN 3

**PERHITUNGAN
ON-BOTTOM STABILITY
ON SLOPING SEABED**

Kondisi Instalasi

On-Bottom Stability on Sloping Seabed

Sloping seabed $\alpha_s := -14\text{deg}$

Drag force (assumed same with F_{yo}) $F_D := F_{yo}$

Coefficient of lateral soil resistance
$$\eta_{\alpha} := \frac{F_D - W_{\text{sub}} \cdot \sin(\alpha_s)}{W_{\text{sub}} \cdot \cos(\alpha_s) - F_D \cdot \tan\left(\text{atan}\left(\frac{F_z}{F_D}\right)\right)}$$
$$\eta_{\alpha} = 0.41$$

$$F_D - W_{\text{sub}} \cdot \sin(\alpha_s) = 128.912 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$W_{\text{sub}} \cdot \cos(\alpha_s) - F_D \cdot \tan\left(\text{atan}\left(\frac{F_z}{F_D}\right)\right) = 314.405 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Kondisi Instalasi

On-Bottom Stability on Sloping Seabed

Sloping seabed $\alpha_s := -14\text{deg}$

Drag force (assumed same with F_{yo}) $F_D := F_{yo}$

Coefficient of lateral soil resistance
$$\eta_{\alpha} := \frac{F_D - W_{\text{sub}} \cdot \sin(\alpha_s)}{W_{\text{sub}} \cdot \cos(\alpha_s) - F_D \cdot \tan\left(\text{atan}\left(\frac{F_z}{F_D}\right)\right)}$$
$$\eta_{\alpha} = 0.732$$

$$F_D - W_{\text{sub}} \cdot \sin(\alpha_s) = 257.431 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$W_{\text{sub}} \cdot \cos(\alpha_s) - F_D \cdot \tan\left(\text{atan}\left(\frac{F_z}{F_D}\right)\right) = 351.709 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

LAMPIRAN 4

INPUT SIMULASI *ON-BOTTOM STABILITY* MENGUNAKAN *SOFTWARE ORCAFLEX* PADA KONDISI INSTALASI DAN OPERASI

```
%YAML 1.1
# Type: Model
# Program: OrcaFlex 10.3a
# File: E:\On-Bottom Stability of RTP (Installation).yaml
# Created: 9:06 AM on 1/9/2020
# User: USER
# Machine: Z00508
```

General:

```
# Units
UnitsSystem: SI

# Statics
BuoysIncludedInStatics: Individually specified
LineStaticsStep1Policy: Master lines excluded
LineStaticsStep2Policy: Master lines excluded
WholeSystemStaticsEnabled: Yes
StaticsMinDamping: 5

# Dynamics
DynamicsSolutionMethod: Implicit time domain
ImplicitUseVariableTimeStep: No
ImplicitConstantTimeStep: 0.1
LogPrecision: Single
TargetLogSampleInterval: 0.1
LogStartTime: ~

# Stages
StageDuration:
  - 100
  - 10.8E3
```

VariableData:

```
Kinematicviscosity:
  - Name: 3.5% Salinity
    IndependentValue, DependentValue:
      - [0, 1.82842473024E-6]
      - [0.5555555555555556, 1.79516544192E-6]
      - [1.1111111111111111, 1.76274228096E-6]
```

- [1.66666666666667, 1.73143395648E-6]
- [2.22222222222222, 1.70096175936E-6]
- [2.77777777777778, 1.67141859264E-6]
- [3.33333333333333, 1.64271155328E-6]
- [3.88888888888889, 1.61484064128E-6]
- [4.44444444444444, 1.58780585664E-6]
- [5, 1.56142139328E-6]
- [5.55555555555556, 1.53587305728E-6]
- [6.11111111111111, 1.51088213952E-6]
- [6.66666666666667, 1.48663444608E-6]
- [7.22222222222222, 1.46303707392E-6]
- [7.77777777777778, 1.44009002304E-6]
- [8.33333333333333, 1.41760748736E-6]
- [8.88888888888889, 1.39577527296E-6]
- [9.44444444444444, 1.37459337984E-6]
- [10, 1.35378309888E-6]
- [10.5555555555556, 1.33353023616E-6]
- [11.1111111111111, 1.31383479168E-6]
- [11.6666666666667, 1.2946038624E-6]
- [12.2222222222222, 1.27574454528E-6]
- [12.7777777777778, 1.2574426464E-6]
- [13.3333333333333, 1.23960526272E-6]
- [13.8888888888889, 1.22204658816E-6]
- [14.4444444444444, 1.2049524288E-6]
- [15, 1.18832278464E-6]
- [15.5555555555556, 1.1719718496E-6]
- [16.1111111111111, 1.15599252672E-6]
- [16.6666666666667, 1.140384816E-6]
- [17.2222222222222, 1.12514871744E-6]
- [17.7777777777778, 1.11028423104E-6]
- [18.3333333333333, 1.09569845376E-6]
- [18.8888888888889, 1.0813913856E-6]
- [19.4444444444444, 1.06736302656E-6]
- [20, 1.05370627968E-6]
- [20.5555555555556, 1.04032824192E-6]

- [21.11111111111111, 1.02722891328E-6]
- [21.66666666666667, 1.01431539072E-6]
- [22.22222222222222, 1.00177348032E-6]
- [22.77777777777778, 989.417376E-9]
- [23.33333333333333, 977.3399808E-9]
- [23.88888888888889, 965.44839168E-9]
- [24.44444444444444, 953.83551168E-9]
- [25, 942.5013408E-9]
- [25.55555555555556, 931.352976E-9]
- [26.11111111111111, 920.39041728E-9]
- [26.66666666666667, 909.61366464E-9]
- [27.22222222222222, 899.11562112E-9]
- [27.77777777777778, 888.80338368E-9]
- [28.33333333333333, 878.58404928E-9]
- [28.88888888888889, 868.643424E-9]
- [29.44444444444444, 858.8886048E-9]
- [30, 849.31959168E-9]

- Name: Freshwater

IndependentValue, DependentValue:

- [0, 1.78661836224E-6]
- [0.55555555555556, 1.75317326784E-6]
- [1.11111111111111, 1.7205643008E-6]
- [1.66666666666667, 1.6889772672E-6]
- [2.22222222222222, 1.65822636096E-6]
- [2.77777777777778, 1.62831158208E-6]
- [3.33333333333333, 1.5993258336E-6]
- [3.88888888888889, 1.57108330944E-6]
- [4.44444444444444, 1.54367691264E-6]
- [5, 1.51701374016E-6]
- [5.55555555555556, 1.49100088896E-6]
- [6.11111111111111, 1.46573126208E-6]
- [6.66666666666667, 1.44111195648E-6]
- [7.22222222222222, 1.41714297216E-6]
- [7.77777777777778, 1.39382430912E-6]
- [8.33333333333333, 1.37115596736E-6]

- [8.88888888888889, 1.3489521408E-6]
- [9.44444444444444, 1.32739863552E-6]
- [10, 1.30640254848E-6]
- [10.55555555555556, 1.28587097664E-6]
- [11.11111111111111, 1.26589682304E-6]
- [11.66666666666667, 1.24638718464E-6]
- [12.22222222222222, 1.22743496448E-6]
- [12.77777777777778, 1.20885435648E-6]
- [13.33333333333333, 1.19073826368E-6]
- [13.88888888888889, 1.17308668608E-6]
- [14.44444444444444, 1.15580672064E-6]
- [15, 1.1389912704E-6]
- [15.55555555555556, 1.12254743232E-6]
- [16.11111111111111, 1.1064752064E-6]
- [16.66666666666667, 1.09077459264E-6]
- [17.22222222222222, 1.07544559104E-6]
- [17.77777777777778, 1.0604882016E-6]
- [18.33333333333333, 1.04580952128E-6]
- [18.88888888888889, 1.03150245312E-6]
- [19.44444444444444, 1.01747409408E-6]
- [20, 1.00372444416E-6]
- [20.55555555555556, 990.3464064E-9]
- [21.11111111111111, 977.24707776E-9]
- [21.66666666666667, 964.42645824E-9]
- [22.22222222222222, 951.7916448E-9]
- [22.77777777777778, 939.52844352E-9]
- [23.33333333333333, 927.54395136E-9]
- [23.88888888888889, 915.74526528E-9]
- [24.44444444444444, 904.22528832E-9]
- [25, 892.89111744E-9]
- [25.55555555555556, 881.83565568E-9]
- [26.11111111111111, 870.966E-9]
- [26.66666666666667, 860.37505344E-9]
- [27.22222222222222, 849.96991296E-9]
- [27.77777777777778, 839.75057856E-9]

- [28.33333333333333, 829.71705024E-9]
- [28.88888888888889, 819.96223104E-9]
- [29.44444444444444, 810.30031488E-9]
- [30, 800.91710784E-9]

Environment:

Sea

WaterSurfaceZ: 0

KinematicViscosity: 3.5% Salinity

SeaTemperature: 10

ReynoldsNumberCalculation: Flow direction

Sea density

HorizontalWaterDensityFactor: ~

VerticalDensityVariation: Constant

Density: 1.025

Seabed

SeabedType: Profile

SeabedOrigin: [0, 0]

SeabedSlopeDirection: 0

SeabedProfileInterpolation: Cubic Bessel

SeabedProfileDistanceFromSeabedOrigin, SeabedProfileZ:

- [0, -31]
- [200, -31.6]
- [400, -32]
- [600, -32.2]
- [800, -32]
- [1000, -32.4]
- [1200, -32.8]
- [1400, -33]
- [1600, -33]
- [1800, -33.2]
- [2000, -33.8]
- [2200, -33.6]

SeabedModel: Elastic

SeabedNormalStiffness: 100

SeabedShearStiffness: ~

Waves

SimulationTimeOrigin: 0

KinematicStretchingMethod: Vertical stretching

UserSpecifiedRandomWaveSeeds: No

WaveFrequencySpectrumDiscretisationMethod: Equal energy, legacy,
depreciated

WaveTrains:

- Name: Wave1

WaveType: JONSWAP

WaveDirection: 90

WaveHs: 1.8

WaveTz: 4.689036

WaveOrigin: [0, 0]

WaveTimeOrigin: 0

WaveNumberOfSpectralDirections: 1

WaveJONSWAPParameters: Partially specified

WaveGamma: 1

WaveNumberOfComponents: 100

Wave calculation

WaveKinematicsCutoffDepth: Infinity

WaveCalculationMethod: Instantaneous position (exact)

WaveCalculationTimeInterval: 0

WaveCalculationSpatialInterval: 0

Current

MultipleCurrentDataCanBeDefined: No

CurrentRamp: No

HorizontalCurrentFactor: ~

CurrentApplyVerticalStretching: No

CurrentMethod: Interpolated

RefCurrentSpeed: 1

RefCurrentDirection: 90

CurrentDepth, CurrentFactor, CurrentRotation:

- [0, 0.72, 0]

- [3.36, 0.62, 0]

- [6.72, 0.54, 0]

- [10.08, 0.48, 0]
- [13.44, 0.44, 0]
- [16.8, 0.41, 0]
- [20.16, 0.39, 0]
- [23.52, 0.37, 0]
- [26.88, 0.36, 0]
- [30.24, 0.35, 0]
- [33.6, 0.34, 0]

Wind

IncludeVesselWindLoads: No

IncludeLineWindLoads: No

IncludeBuoyWingWindLoads: No

VerticalWindVariationFactor: ~

AirDensity: 0.00128

WindType: Constant

WindSpeed: 0

WindDirection: 0

Drawing

SeaSurfaceTranslucency: 20

LineTypes:

- Name: 6" RTP

Category: Homogeneous pipe

Geometry and density

OD: 0.1799

ID: 0.1423

MaterialDensity: 2.218

Structure

E: 452.504691E3

PoissonRatio: 0.42

Drag, lift, added mass and slam

Cdn: 0.5

Cdz: 0.08

C1: 0.5

Can: 1

Caz: 0.08

Cs: 0
Ce: 0
Friction
SeabedNormalFrictionCoefficient: 0.5
SeabedAxialFrictionCoefficient: ~
Contact
ClashStiffness: 17.5
Stress
AllowableStress: ~
Structural damping
RayleighDampingCoefficients: (no damping)
Coating and lining
CoatingThickness: 0
LiningThickness: 0
Additional stiffness
AdditionalEI: 0

ClumpTypes:

- Name: Clump Type1
Mass: 0.334
Volume: 0.138
Height: 0.5
Offset: 0
AlignWith: Global axes
DragArea: [0.3, 0.25, 0.3]
Cd: [1, 1, 1]
Ca: [1.2, 1.2, 1.2]
Pen: [3, Solid, Fuchsia]

Lines:

- Name: Line1
IncludeTorsion: No
TopEnd: End A
Representation: Finite element
PyModel: (none)
PreBendSpecifiedBy: Curvature
DragFormulation: Standard

```

StaticsVIV: None
DynamicsVIV: None
WaveCalculationMethod: Specified by environment
# End connections
Connection, ConnectionX, ConnectionY, ConnectionZ, ConnectionAzm,
  ConnectionDec, ConnectionGamma, ReleaseStage,
  ConnectionzRelativeTo:
  - [Free, 0, 0, -30.95005, 0, 0, 0, ~]
  - [Free, 2200, 0, -33.54205, 0, 0, 0, ~]
# End connection stiffness
ConnectionStiffnessX, ConnectionStiffnessY:
  - []
  - []
# Feeding
ConnectionInitialArclength, ConnectionPayoutRate,
  ConnectionShortestViableSegmentFactor, ConnectionApplyRamp,
  ConnectionUseSmoothGrowth:
  - [~, 0, 0.001]
  - [~, 0, 0.001]
# Sections
LineType, Length, TargetSegmentLength:
  - [6" RTP, 2200.0016, 2.5]
# Attachments
AttachmentType, Attachmentx, Attachmenty, Attachmentz,
  AttachmentzRel:
  - [Clump Type1, 0, 0, 0, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 5, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 10, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 15, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 20, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 25, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 30, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 35, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 40, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 45, End A]

```

- [Clump Type1, 0, 0, 50, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 55, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 60, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 65, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 70, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 75, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 80, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 85, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 90, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 95, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 100, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 105, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 110, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 115, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 120, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 125, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 130, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 135, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 140, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 145, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 150, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 155, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 160, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 165, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 170, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 175, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 180, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 185, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 190, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 195, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 200, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 205, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 210, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 215, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 220, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 225, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 230, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 235, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 240, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 245, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 250, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 255, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 260, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 265, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 270, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 275, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 280, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 285, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 290, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 295, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 300, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 305, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 310, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 315, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 320, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 325, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 330, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 335, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 340, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 345, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 350, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 355, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 360, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 365, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 370, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 375, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 380, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 385, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 390, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 395, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 400, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 405, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 410, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 415, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 420, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 425, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 430, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 435, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 440, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 445, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 450, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 455, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 460, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 465, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 470, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 475, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 480, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 485, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 490, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 495, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 500, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 505, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 510, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 515, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 520, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 525, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 530, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 535, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 540, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 545, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 550, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 555, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 560, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 565, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 570, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 575, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 580, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 585, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 590, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 595, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 600, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 605, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 610, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 615, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 620, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 625, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 630, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 635, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 640, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 645, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 650, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 655, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 660, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 665, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 670, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 675, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 680, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 685, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 690, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 695, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 700, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 705, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 710, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 715, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 720, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 725, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 730, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 735, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 740, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 745, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 750, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 755, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 760, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 765, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 770, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 775, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 780, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 785, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 790, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 795, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 800, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 805, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 810, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 815, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 820, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 825, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 830, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 835, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 840, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 845, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 850, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 855, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 860, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 865, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 870, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 875, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 880, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 885, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 890, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 895, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 900, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 905, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 910, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 915, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 920, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 925, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 930, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 935, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 940, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 945, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 950, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 955, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 960, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 965, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 970, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 975, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 980, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 985, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 990, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 995, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1000, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1005, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1010, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1015, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1020, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1025, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1030, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1035, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1040, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1045, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1050, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1055, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1060, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1065, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1070, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1075, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1080, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1085, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1090, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1095, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 1100, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1105, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1110, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1115, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1120, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1125, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1130, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1135, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1140, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1145, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1150, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1155, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1160, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1165, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1170, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1175, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1180, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1185, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1190, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1195, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1200, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1205, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1210, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1215, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1220, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1225, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1230, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1235, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1240, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1245, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1250, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1255, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1260, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1265, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1270, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 1275, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1280, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1285, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1290, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1295, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1300, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1305, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1310, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1315, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1320, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1325, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1330, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1335, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1340, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1345, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1350, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1355, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1360, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1365, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1370, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1375, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1380, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1385, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1390, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1395, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1400, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1405, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1410, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1415, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1420, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1425, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1430, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1435, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1440, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1445, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 1450, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1455, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1460, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1465, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1470, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1475, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1480, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1485, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1490, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1495, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1500, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1505, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1510, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1515, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1520, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1525, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1530, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1535, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1540, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1545, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1550, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1555, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1560, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1565, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1570, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1575, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1580, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1585, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1590, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1595, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1600, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1605, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1610, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1615, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1620, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 1625, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1630, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1635, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1640, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1645, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1650, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1655, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1660, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1665, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1670, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1675, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1680, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1685, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1690, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1695, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1700, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1705, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1710, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1715, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1720, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1725, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1730, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1735, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1740, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1745, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1750, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1755, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1760, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1765, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1770, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1775, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1780, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1785, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1790, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1795, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 1800, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1805, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1810, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1815, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1820, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1825, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1830, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1835, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1840, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1845, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1850, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1855, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1860, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1865, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1870, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1875, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1880, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1885, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1890, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1895, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1900, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1905, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1910, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1915, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1920, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1925, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1930, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1935, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1940, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1945, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1950, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1955, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1960, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1965, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1970, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 1975, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1980, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1985, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1990, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1995, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2000, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2005, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2010, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2015, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2020, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2025, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2030, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2035, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2040, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2045, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2050, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2055, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2060, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2065, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2070, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2075, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2080, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2085, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2090, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2095, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2100, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2105, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2110, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2115, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2120, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2125, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2130, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2135, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2140, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2145, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 2150, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2155, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2160, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2165, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2170, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2175, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2180, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2185, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2190, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2195, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2200, End A]

Contents

ContentsMethod: Uniform

IncludeAxialContentsInertia: Yes

ContentsDensity: 0.000

ContentsPressureRefZ: ~

ContentsPressure: 0

ContentsFlowRate: 0

Statics

IncludedInStatics: Yes

StaticsStep1: Catenary

StaticsStep2: Full statics

IncludeSeabedFrictionInStatics: Yes

LayAzimuth: 180

AsLaidTension: 0

Drawing

DrawContact: No

Groups:

Structure:

Line1: Model

State:

Collapsed:

- Variable data

...

```
%YAML 1.1
# Type: Model
# Program: OrcaFlex 10.3a
# File: E:\On-Bottom Stability of RTP (Operation).yaml
# Created: 9:06 AM on 1/9/2020
# User: USER
# Machine: Z00508
```

General:

```
# Units
UnitsSystem: SI

# Statics
BuoysIncludedInStatics: Individually specified
LineStaticsStep1Policy: Master lines excluded
LineStaticsStep2Policy: Master lines excluded
WholeSystemStaticsEnabled: Yes
StaticsMinDamping: 5

# Dynamics
DynamicsSolutionMethod: Implicit time domain
ImplicitUseVariableTimeStep: No
ImplicitConstantTimeStep: 0.1
LogPrecision: Single
TargetLogSampleInterval: 0.1
LogStartTime: ~

# Stages
StageDuration:
  - 100
  - 10.8E3
```

VariableData:

```
Kinematicviscosity:
  - Name: 3.5% Salinity
    IndependentValue, DependentValue:
      - [0, 1.82842473024E-6]
      - [0.5555555555555556, 1.79516544192E-6]
      - [1.1111111111111111, 1.76274228096E-6]
```

- [1.66666666666667, 1.73143395648E-6]
- [2.22222222222222, 1.70096175936E-6]
- [2.77777777777778, 1.67141859264E-6]
- [3.33333333333333, 1.64271155328E-6]
- [3.88888888888889, 1.61484064128E-6]
- [4.44444444444444, 1.58780585664E-6]
- [5, 1.56142139328E-6]
- [5.55555555555556, 1.53587305728E-6]
- [6.11111111111111, 1.51088213952E-6]
- [6.66666666666667, 1.48663444608E-6]
- [7.22222222222222, 1.46303707392E-6]
- [7.77777777777778, 1.44009002304E-6]
- [8.33333333333333, 1.41760748736E-6]
- [8.88888888888889, 1.39577527296E-6]
- [9.44444444444444, 1.37459337984E-6]
- [10, 1.35378309888E-6]
- [10.5555555555556, 1.33353023616E-6]
- [11.1111111111111, 1.31383479168E-6]
- [11.6666666666667, 1.2946038624E-6]
- [12.2222222222222, 1.27574454528E-6]
- [12.7777777777778, 1.2574426464E-6]
- [13.3333333333333, 1.23960526272E-6]
- [13.8888888888889, 1.22204658816E-6]
- [14.4444444444444, 1.2049524288E-6]
- [15, 1.18832278464E-6]
- [15.5555555555556, 1.1719718496E-6]
- [16.1111111111111, 1.15599252672E-6]
- [16.6666666666667, 1.140384816E-6]
- [17.2222222222222, 1.12514871744E-6]
- [17.7777777777778, 1.11028423104E-6]
- [18.3333333333333, 1.09569845376E-6]
- [18.8888888888889, 1.0813913856E-6]
- [19.4444444444444, 1.06736302656E-6]
- [20, 1.05370627968E-6]
- [20.5555555555556, 1.04032824192E-6]

- [21.11111111111111, 1.02722891328E-6]
- [21.66666666666667, 1.01431539072E-6]
- [22.22222222222222, 1.00177348032E-6]
- [22.77777777777778, 989.417376E-9]
- [23.33333333333333, 977.3399808E-9]
- [23.88888888888889, 965.44839168E-9]
- [24.44444444444444, 953.83551168E-9]
- [25, 942.5013408E-9]
- [25.55555555555556, 931.352976E-9]
- [26.11111111111111, 920.39041728E-9]
- [26.66666666666667, 909.61366464E-9]
- [27.22222222222222, 899.11562112E-9]
- [27.77777777777778, 888.80338368E-9]
- [28.33333333333333, 878.58404928E-9]
- [28.88888888888889, 868.643424E-9]
- [29.44444444444444, 858.8886048E-9]
- [30, 849.31959168E-9]

- Name: Freshwater

IndependentValue, DependentValue:

- [0, 1.78661836224E-6]
- [0.55555555555556, 1.75317326784E-6]
- [1.11111111111111, 1.7205643008E-6]
- [1.66666666666667, 1.6889772672E-6]
- [2.22222222222222, 1.65822636096E-6]
- [2.77777777777778, 1.62831158208E-6]
- [3.33333333333333, 1.5993258336E-6]
- [3.88888888888889, 1.57108330944E-6]
- [4.44444444444444, 1.54367691264E-6]
- [5, 1.51701374016E-6]
- [5.55555555555556, 1.49100088896E-6]
- [6.11111111111111, 1.46573126208E-6]
- [6.66666666666667, 1.44111195648E-6]
- [7.22222222222222, 1.41714297216E-6]
- [7.77777777777778, 1.39382430912E-6]
- [8.33333333333333, 1.37115596736E-6]

- [8.88888888888889, 1.3489521408E-6]
- [9.44444444444444, 1.32739863552E-6]
- [10, 1.30640254848E-6]
- [10.55555555555556, 1.28587097664E-6]
- [11.11111111111111, 1.26589682304E-6]
- [11.66666666666667, 1.24638718464E-6]
- [12.22222222222222, 1.22743496448E-6]
- [12.77777777777778, 1.20885435648E-6]
- [13.33333333333333, 1.19073826368E-6]
- [13.88888888888889, 1.17308668608E-6]
- [14.44444444444444, 1.15580672064E-6]
- [15, 1.1389912704E-6]
- [15.55555555555556, 1.12254743232E-6]
- [16.11111111111111, 1.1064752064E-6]
- [16.66666666666667, 1.09077459264E-6]
- [17.22222222222222, 1.07544559104E-6]
- [17.77777777777778, 1.0604882016E-6]
- [18.33333333333333, 1.04580952128E-6]
- [18.88888888888889, 1.03150245312E-6]
- [19.44444444444444, 1.01747409408E-6]
- [20, 1.00372444416E-6]
- [20.55555555555556, 990.3464064E-9]
- [21.11111111111111, 977.24707776E-9]
- [21.66666666666667, 964.42645824E-9]
- [22.22222222222222, 951.7916448E-9]
- [22.77777777777778, 939.52844352E-9]
- [23.33333333333333, 927.54395136E-9]
- [23.88888888888889, 915.74526528E-9]
- [24.44444444444444, 904.22528832E-9]
- [25, 892.89111744E-9]
- [25.55555555555556, 881.83565568E-9]
- [26.11111111111111, 870.966E-9]
- [26.66666666666667, 860.37505344E-9]
- [27.22222222222222, 849.96991296E-9]
- [27.77777777777778, 839.75057856E-9]

- [28.33333333333333, 829.71705024E-9]
- [28.88888888888889, 819.96223104E-9]
- [29.44444444444444, 810.30031488E-9]
- [30, 800.91710784E-9]

Environment:

Sea

WaterSurfaceZ: 0

KinematicViscosity: 3.5% Salinity

SeaTemperature: 10

ReynoldsNumberCalculation: Flow direction

Sea density

HorizontalWaterDensityFactor: ~

VerticalDensityVariation: Constant

Density: 1.025

Seabed

SeabedType: Profile

SeabedOrigin: [0, 0]

SeabedSlopeDirection: 0

SeabedProfileInterpolation: Cubic Bessel

SeabedProfileDistanceFromSeabedOrigin, SeabedProfileZ:

- [0, -31]
- [200, -31.6]
- [400, -32]
- [600, -32.2]
- [800, -32]
- [1000, -32.4]
- [1200, -32.8]
- [1400, -33]
- [1600, -33]
- [1800, -33.2]
- [2000, -33.8]
- [2200, -33.6]

SeabedModel: Elastic

SeabedNormalStiffness: 100

SeabedShearStiffness: ~

Waves

SimulationTimeOrigin: 0

KinematicStretchingMethod: Vertical stretching

UserSpecifiedRandomWaveSeeds: No

WaveFrequencySpectrumDiscretisationMethod: Equal energy, legacy,
depreciated

WaveTrains:

- Name: Wave1

WaveType: JONSWAP

WaveDirection: 90

WaveHs: 3.6

WaveTz: 6.6847738154081

WaveOrigin: [0, 0]

WaveTimeOrigin: 0

WaveNumberOfSpectralDirections: 1

WaveJONSWAPParameters: Partially specified

WaveGamma: 1.015

WaveNumberOfComponents: 100

Wave calculation

WaveKinematicsCutoffDepth: Infinity

WaveCalculationMethod: Instantaneous position (exact)

WaveCalculationTimeInterval: 0

WaveCalculationSpatialInterval: 0

Current

MultipleCurrentDataCanBeDefined: No

CurrentRamp: No

HorizontalCurrentFactor: ~

CurrentApplyVerticalStretching: No

CurrentMethod: Interpolated

RefCurrentSpeed: 1

RefCurrentDirection: 90

CurrentDepth, CurrentFactor, CurrentRotation:

- [0, 1.15, 0]

- [3.36, 0.93, 0]

- [6.72, 0.77, 0]

- [10.08, 0.65, 0]
- [13.44, 0.56, 0]
- [16.8, 0.5, 0]
- [20.16, 0.45, 0]
- [23.52, 0.42, 0]
- [26.88, 0.39, 0]
- [30.24, 0.38, 0]
- [33.6, 0.36, 0]

Wind

IncludeVesselWindLoads: No

IncludeLineWindLoads: No

IncludeBuoyWingWindLoads: No

VerticalWindVariationFactor: ~

AirDensity: 0.00128

WindType: Constant

WindSpeed: 0

WindDirection: 0

Drawing

SeaSurfaceTranslucency: 20

LineTypes:

- Name: 6" RTP

Category: Homogeneous pipe

Geometry and density

OD: 0.1799

ID: 0.1423

MaterialDensity: 2.218

Structure

E: 452.504691E3

PoissonRatio: 0.42

Drag, lift, added mass and slam

Cdn: 0.5

Cdz: 0.08

C1: 0.5

Can: 1

Caz: 0.08

Cs: 0
Ce: 0
Friction
SeabedNormalFrictionCoefficient: 0.5
SeabedAxialFrictionCoefficient: ~
Contact
ClashStiffness: 17.5
Stress
AllowableStress: ~
Structural damping
RayleighDampingCoefficients: (no damping)
Coating and lining
CoatingThickness: 0
LiningThickness: 0
Additional stiffness
AdditionalEI: 0

ClumpTypes:

- Name: Clump Type1
Mass: 0.334
Volume: 0.138
Height: 0.5
Offset: 0
AlignWith: Global axes
DragArea: [0.3, 0.25, 0.3]
Cd: [1, 1, 1]
Ca: [1.2, 1.2, 1.2]
Pen: [3, Solid, Fuchsia]

Lines:

- Name: Line1
IncludeTorsion: No
TopEnd: End A
Representation: Finite element
PyModel: (none)
PreBendSpecifiedBy: Curvature
DragFormulation: Standard

```
StaticsVIV: None
DynamicsVIV: None
WaveCalculationMethod: Specified by environment
# End connections
Connection, ConnectionX, ConnectionY, ConnectionZ, ConnectionAzm,
  ConnectionDec, ConnectionGamma, ReleaseStage,
  ConnectionzRelativeTo:
  - [Free, 0, 0, -30.95005, 0, 0, 0, ~]
  - [Free, 2200, 0, -33.54205, 0, 0, 0, ~]
# End connection stiffness
ConnectionStiffnessX, ConnectionStiffnessY:
  - []
  - []
# Feeding
ConnectionInitialArclength, ConnectionPayoutRate,
  ConnectionShortestViableSegmentFactor, ConnectionApplyRamp,
  ConnectionUseSmoothGrowth:
  - [~, 0, 0.001]
  - [~, 0, 0.001]
# Sections
LineType, Length, TargetSegmentLength:
  - [6" RTP, 2200.0016, 2.5]
# Attachments
AttachmentType, Attachmentx, Attachmenty, Attachmentz,
  AttachmentzRel:
  - [Clump Type1, 0, 0, 0, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 5, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 10, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 15, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 20, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 25, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 30, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 35, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 40, End A]
  - [Clump Type1, 0, 0, 45, End A]
```

- [Clump Type1, 0, 0, 50, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 55, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 60, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 65, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 70, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 75, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 80, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 85, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 90, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 95, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 100, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 105, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 110, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 115, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 120, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 125, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 130, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 135, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 140, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 145, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 150, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 155, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 160, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 165, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 170, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 175, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 180, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 185, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 190, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 195, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 200, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 205, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 210, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 215, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 220, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 225, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 230, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 235, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 240, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 245, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 250, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 255, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 260, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 265, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 270, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 275, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 280, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 285, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 290, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 295, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 300, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 305, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 310, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 315, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 320, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 325, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 330, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 335, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 340, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 345, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 350, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 355, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 360, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 365, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 370, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 375, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 380, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 385, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 390, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 395, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 400, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 405, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 410, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 415, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 420, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 425, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 430, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 435, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 440, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 445, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 450, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 455, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 460, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 465, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 470, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 475, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 480, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 485, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 490, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 495, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 500, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 505, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 510, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 515, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 520, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 525, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 530, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 535, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 540, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 545, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 550, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 555, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 560, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 565, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 570, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 575, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 580, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 585, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 590, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 595, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 600, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 605, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 610, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 615, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 620, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 625, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 630, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 635, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 640, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 645, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 650, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 655, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 660, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 665, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 670, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 675, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 680, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 685, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 690, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 695, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 700, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 705, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 710, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 715, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 720, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 725, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 730, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 735, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 740, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 745, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 750, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 755, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 760, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 765, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 770, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 775, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 780, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 785, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 790, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 795, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 800, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 805, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 810, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 815, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 820, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 825, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 830, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 835, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 840, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 845, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 850, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 855, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 860, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 865, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 870, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 875, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 880, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 885, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 890, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 895, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 900, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 905, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 910, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 915, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 920, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 925, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 930, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 935, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 940, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 945, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 950, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 955, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 960, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 965, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 970, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 975, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 980, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 985, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 990, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 995, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1000, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1005, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1010, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1015, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1020, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1025, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1030, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1035, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1040, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1045, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1050, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1055, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1060, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1065, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1070, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1075, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1080, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1085, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1090, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1095, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 1100, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1105, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1110, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1115, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1120, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1125, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1130, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1135, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1140, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1145, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1150, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1155, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1160, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1165, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1170, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1175, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1180, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1185, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1190, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1195, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1200, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1205, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1210, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1215, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1220, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1225, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1230, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1235, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1240, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1245, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1250, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1255, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1260, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1265, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1270, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 1275, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1280, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1285, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1290, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1295, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1300, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1305, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1310, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1315, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1320, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1325, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1330, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1335, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1340, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1345, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1350, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1355, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1360, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1365, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1370, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1375, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1380, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1385, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1390, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1395, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1400, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1405, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1410, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1415, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1420, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1425, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1430, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1435, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1440, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1445, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 1450, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1455, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1460, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1465, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1470, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1475, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1480, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1485, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1490, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1495, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1500, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1505, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1510, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1515, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1520, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1525, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1530, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1535, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1540, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1545, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1550, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1555, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1560, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1565, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1570, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1575, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1580, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1585, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1590, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1595, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1600, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1605, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1610, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1615, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1620, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 1625, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1630, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1635, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1640, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1645, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1650, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1655, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1660, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1665, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1670, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1675, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1680, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1685, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1690, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1695, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1700, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1705, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1710, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1715, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1720, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1725, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1730, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1735, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1740, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1745, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1750, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1755, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1760, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1765, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1770, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1775, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1780, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1785, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1790, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1795, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 1800, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1805, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1810, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1815, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1820, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1825, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1830, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1835, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1840, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1845, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1850, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1855, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1860, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1865, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1870, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1875, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1880, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1885, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1890, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1895, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1900, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1905, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1910, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1915, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1920, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1925, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1930, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1935, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1940, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1945, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1950, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1955, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1960, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1965, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1970, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 1975, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1980, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1985, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1990, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 1995, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2000, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2005, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2010, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2015, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2020, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2025, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2030, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2035, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2040, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2045, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2050, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2055, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2060, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2065, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2070, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2075, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2080, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2085, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2090, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2095, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2100, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2105, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2110, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2115, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2120, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2125, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2130, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2135, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2140, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2145, End A]

- [Clump Type1, 0, 0, 2150, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2155, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2160, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2165, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2170, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2175, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2180, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2185, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2190, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2195, End A]
- [Clump Type1, 0, 0, 2200, End A]

Contents

ContentsMethod: Uniform

IncludeAxialContentsInertia: Yes

ContentsDensity: 0.038

ContentsPressureRefZ: ~

ContentsPressure: 0

ContentsFlowRate: 0

Statics

IncludedInStatics: Yes

StaticsStep1: Catenary

StaticsStep2: Full statics

IncludeSeabedFrictionInStatics: Yes

LayAzimuth: 180

AsLaidTension: 0

Drawing

DrawContact: No

Groups:

Structure:

Line1: Model

State:

Collapsed:

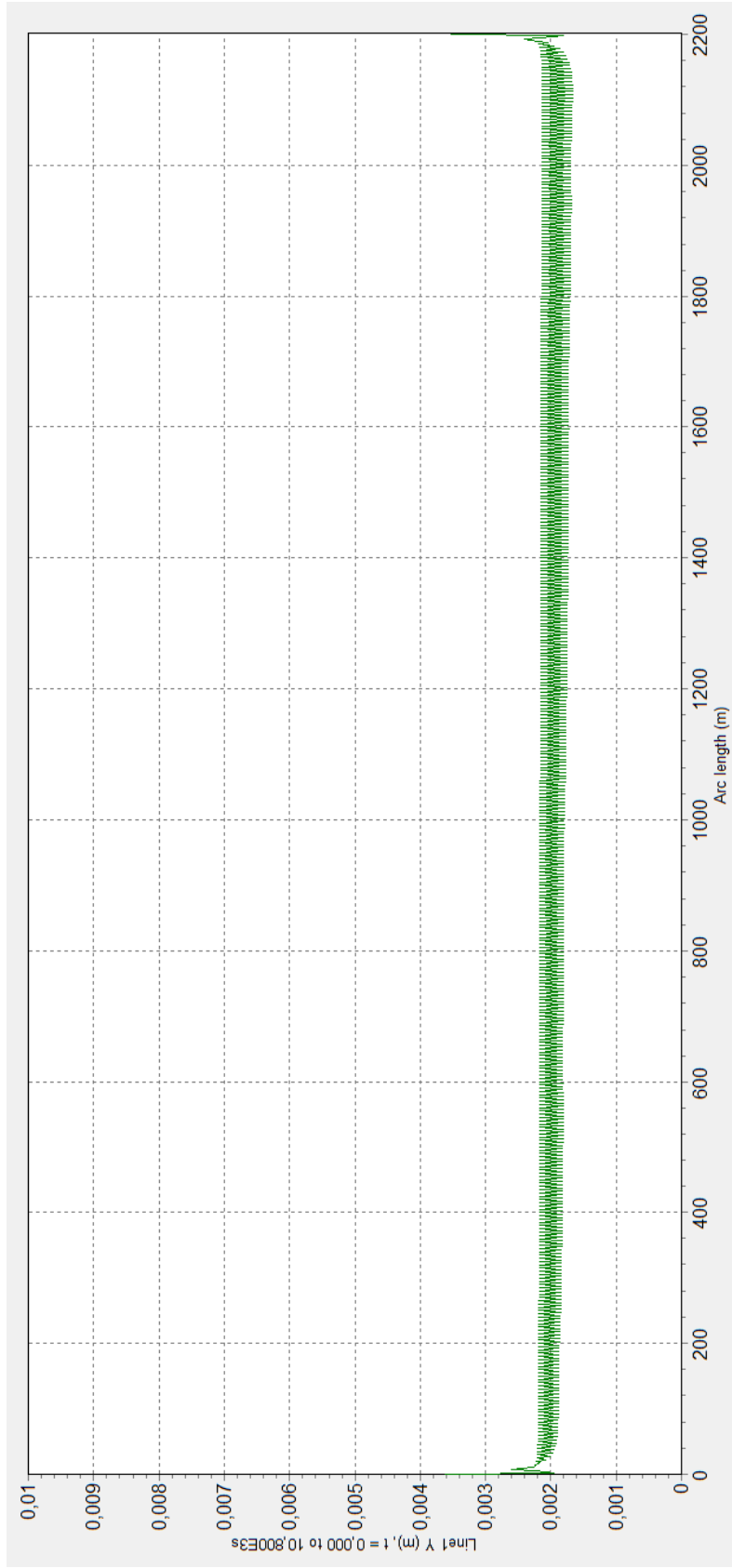
- Variable data

...

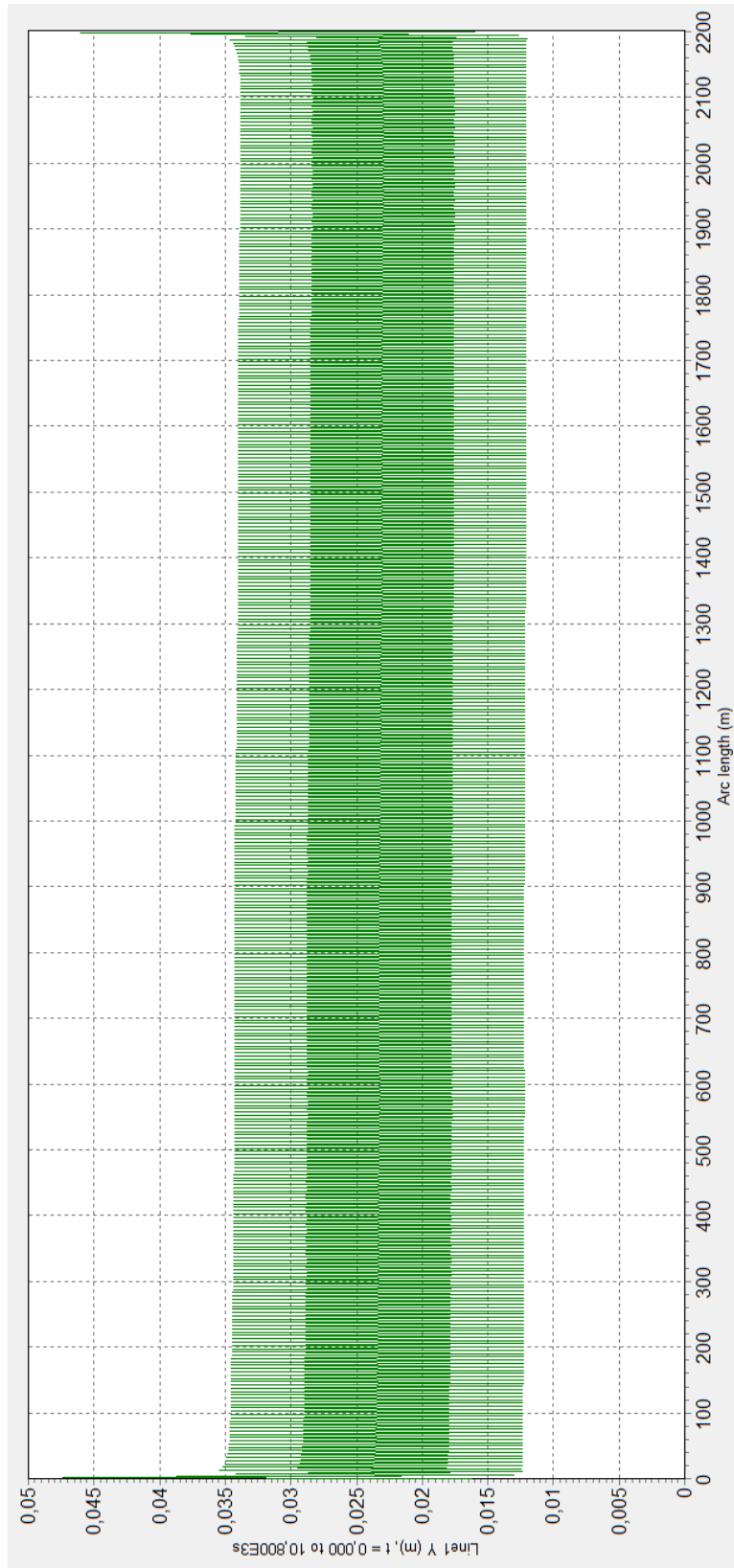
LAMPIRAN 5

**OUTPUT SIMULASI *ON-BOTTOM STABILITY*
MENGUNAKAN *SOFTWARE ORCAFLEX*
PADA KONDISI INSTALASI DAN OPERASI**

Output Pergerakan Lateral Pipa Sepanjang Rute Saat Kondisi Instalasi



Output Pergerakan Lateral Pipa Sepanjang Rute Saat Kondisi Operasi



BIODATA PENULIS

BIODATA PENULIS



Hirto Eirsan Marstahan dilahirkan di Madiun pada tanggal 28 Februari 1998, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis menempuh Pendidikan formal di SDN Krajan 01, SMPN 2 Mejayan, dan SMAN 1 Mejayan. Setelah lulus SMAN pada tahun 2016, penulis diterima di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya melalui jalur SNMPTN. Selain kesibukan perkuliahan, penulis juga aktif mengikuti pelatihan dan seminar untuk menambah pengetahuan penulis diluar kegiatan akademik perkuliahan.

Penulis sempat aktif menjadi ketua Badan Semi Otonom OURC (*Ocean Underwater Robotic Club*), Ketua Departemen Pembinaan LDJ Bahrul Ilmi FTK ITS, Ketua Divisi Pelatihan PSDM UKM Robotika ITS, dan Pengurus Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Penulis juga pernah mengikuti kegiatan kepanitian seperti menjadi *volunteer* Robot In Action ITS EXPO 2016. Selain itu, penulis juga pernah mendapat penghargaan Juara 2 ASEAN MATE Underwater Robot Competition 2017 ditahun kedua perkuliahan.

Pada tahun 2019 penulis juga berkesempatan melaksanakan kerja praktik di PT. Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java di divisi *Brownfield and Pipeline Repair Replacement Project* selama dua bulan. Selama masa studi strata 1 yang ditempuh penulis selama 3,5 tahun, penulis tertarik dengan bidang rekayasa laut dalam terutama di lepas pantai. Oleh karena itu, penulis tertarik untuk mengambil Tugas Akhir yang berhubungan seperti Rekayasa Pipa Bawah Laut.

Semoga apa yang telah ditulis oleh penulis dalam tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua orang terutama di bidang rekayasa kelautan. Akhir kata penulis mengucapkan terimakasih telah meluangkan waktunya untuk membaca tugas akhir ini. Apabila ada saran ataupun kritik dapat disampaikan ke penulis melalui email penulis yaitu hirstoeirsan@gmail.com.