



TUGAS AKHIR - MO 141326

ANALISIS *LOCAL BUCKLING* PADA *FREE SPAN* PIPA BAWAH LAUT 20” DI SANGATTA, KALIMANTAN TIMUR

HIKMAH SUSETYO

NRP. 4312 100 071

Dosen Pembimbing :

1. Ir. Imam Rochani, M.Sc.
2. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016



FINAL PROJECT - MO 141326

LOCAL BUCKLING ANALYSIS ON FREE SPAN OF SUBSEA PIPELINE 20" IN SANGATTA, EAST KALIMANTAN

HIKMAH SUSETYO

Reg. Number 4312 100 071

Supervisors:

1. Ir. Imam Rochani, M.Sc.
2. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

Faculty of Marine Technology
Sepuluh Nopember Institut of Technology
Surabaya
2016

**ANALISIS LOCAL BUCKLING PADA FREE SPAN PIPA BAWAH LAUT 20”
DI SANGATTA, KALIMANTAN TIMUR**

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

HIKMAH SUSETYO

NRP. 4312 100 071

Disetujui oleh:

1. Ir. Imam Rochani, M.Sc.

(Pembimbing I)

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

(Pembimbing II)

3. Ir. J. J. Soedjono, M.Sc.

(Penguji I)



SURABAYA, JULI 2016

ANALISIS LOCAL BUCKLING PADA FREE SPAN PIPA BAWAH LAUT 20” DI SANGATTA, KALIMANTAN TIMUR

Nama : Hikmah Susetyo
NRP : 4312 100 071
Jurusan : Teknik Kelautan FTK-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Imam Rochani, M.Sc.
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Free span merupakan salah satu penyebab kegagalan *pipeline*, seperti kegagalan kelelahan *pipeline* dan *local buckling*. Kegagalan tersebut dapat dihindari dengan menentukan panjang *free span* maksimal yang diizinkan. Panjang tersebut akan digunakan sebagai batas kritis dari panjang *free span* aktual di lapangan. Tahap pertama untuk mendapatkan panjang *free span* maksimal adalah *screening* frekuensi natural sesuai DNV-RP-F105. Dari *screening* tersebut dihasilkan panjang *free span* maksimal yang diizinkan adalah 17.55 m. Panjang tersebut selanjutnya dilakukan *screening* lagi dengan kriteria ULS untuk *local buckling* sesuai DNV-OS-F101. Kriteria *local buckling* tersebut memuat kombinasi beberapa beban, diantaranya *bending moment*, *effective axial force*, tekanan internal, dan tekanan eksternal. *Bending moment* yang dihasilkan dari panjang *free span* 17.55 m adalah 164824.43 Nm dan menghasilkan UC sebesar 0.515, sehingga masih memenuhi ULS *check*. Nilai dari *bending moment* kritis atau yang dapat menghasilkan nilai UC = 1 adalah 382922.405 Nm. *Bending moment* kritis tersebut dapat dihasilkan dari panjang *free span* 21.83 m. Tahap selanjutnya adalah mendapatkan nilai tegangan *von-mises* dari perhitungan manual atau *software* dan tegangan *buckling* kritis. Tegangan *von-mises* untuk panjang *free span* 17.55 m dari hasil perhitungan manual adalah 163.478 MPa, sedangkan dari *software* adalah 164.53 MPa. Nilai dari tegangan *buckling* kritis adalah 200.995 MPa. Dari beberapa hasil tersebut, tegangan *von-mises* lebih kecil dari tegangan *buckling* kritis. Sehingga, didapatkan hasil akhir untuk panjang *free span* maksimal yang diizinkan adalah 17.55 m.

Kata kunci: *bending moment*, *local buckling*, panjang *free span*, tegangan *von-mises*

LOCAL BUCKLING ANALYSIS ON FREE SPAN OF SUBSEA PIPELINE 20" IN SANGATTA, EAST KALIMANTAN

Name : Hikmah Susetyo
Reg. Number : 4312 100 071
Department : Ocean Engineering FTK-ITS
Supervisors : Ir. Imam Rochani, M.Sc.
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Free span is one of the pipeline failure causes, such as fatigue pipeline failure and local buckling. The failure can be avoided by determining the allowable maximum length of free span. The length of free span will be used as critical limit from actual length of free span in the field. The first step to gain maximum length of free span is screening for natural frequency based on DNV-RP-F105. The allowable maximum length of free span from screening process is 17.55 m. The allowable length of free span is then performed in screening process of ULS criteria for local buckling based on DNV-OS-F101. The local buckling criteria substances are combination of several loads, including bending moment, effective axial force, internal pressure, and external pressure. The result of bending moment for 17.55m length of free span condition is 164824.43 Nm and the UC is 0.515, therefore it is allowable for ULS check. The value of critical bending moment which close to $UC = 1$ is 382922.405 Nm in 21.83m length of free span. The next step is to gain the value of von-mises stress from manual or software calculations and critical buckling stress. The result of von-mises stress for length of free span 17.55 m from manual calculation is 163.478, whilst from software calculation is 164.53 MPa. The critical buckling stress value 200.995 MPa. Therefore, based on the result the value of von-mises stress is smaller than the value of critical buckling stress as of the final result for allowable maximum length of free span is 17.55 m.

Keywords: bending moment, length of free span, local buckling, von-mises stress

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir beserta laporannya dengan baik dan tepat waktu. Laporan ini berisi tentang tahapan proses dan hasil dari tugas akhir penulis. Tugas akhir penulis berjudul Analisis *Local Buckling* pada *Free Span* Pipa Bawah Laut 20" di Sangatta, Kalimantan Timur.

Tugas akhir merupakan salah satu syarat untuk mendapatkan gelar sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Untuk itu setiap mahasiswa diwajibkan mengangkat suatu permasalahan di lingkungan sekitar sesuai dengan profesi dan perkuliahan yang diambil untuk dijadikan bahasan dalam tugas akhir. Untuk jurusan teknik kelautan khususnya, permasalahan yang diangkat adalah permasalahan yang ada di lingkungan laut dan fasilitas teknologi penunjangnya sesuai dengan materi yang diberikan selama perkuliahan. Penelitian ini diharapkan dapat berguna untuk beberapa pihak yang bersangkutan atau keperluan penelitian selanjutnya.

Dalam menyelesaikan tugas akhir, penulis mengalami beberapa kendala. Akan tetapi atas bantuan dan motivasi dari beberapa pihak penulis akhirnya dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak tersebut.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir dan laporan yang dibuat masih memiliki kekurangan, baik dari pemilihan batasan masalah, pemilihan parameter, dan dari sisi penulisan. Kritik dan saran dari pembaca sangat diharapkan oleh penulis, agar menjadi evaluasi guna menghasilkan suatu penelitian dan penulisan yang lebih baik ke depannya. Semoga tugas akhir ini bisa memberikan manfaat untuk orang banyak. Ilmu lebih penting dari harta, ilmu bukan yang ditulis tetapi yang bermanfaat, jadi sebarkan ilmu untuk kebermanfaatan dunia dan akhirat.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam bagian ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada beberapa pihak yang turut membantu kelancaran selama pengerjaan tugas akhir ini. Mungkin ucapan ini tidak sebanding dengan apa yang diberikan oleh pihak-pihak tersebut, namun diharapkan dapat menjadi sebuah pembelajaran untuk penulis agar senantiasa berterima kasih kepada pihak yang telah memberikan banyak sekali bantuan dalam tugas akhir ini. Beberapa pihak tersebut diantaranya:

1. Yang paling utama tentu Allah SWT, yang telah memberikan kesehatan dan kemudahan selama mengerjakan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua penulis yaitu Suwanto dan Soringatun, yang telah mengorbankan waktu dan tenaganya agar penulis dapat tetap melanjutkan kuliah sampai menyelesaikan tugas akhir ini, beserta doa-doa yang diberikan kepada penulis.
3. Penyelenggara beasiswa bidikmisi, atas bantuan biaya perkuliahan sehingga penulis dapat berkuliah sampai dengan semester akhir.
4. Bapak Imam Rochani dan Bapak Handayanu selaku dosen pembimbing penulis yang senantiasa memberikan ilmu dan masukan untuk penulis agar dapat menyelesaikan tugas akhir dengan baik dan tepat waktu.
5. PT. Dwisatu Mustika Bumi, tempat penulis melakukan kerja praktek dan mendapatkan data tugas akhir, sehingga dengan data tersebut dapat dilakukan suatu analisis untuk bahan tugas akhir.
6. Teman-teman satu bahasan tugas akhir tentang pipa (*Pipeline Ranger*), yang selalu memberikan masukan dan bahan diskusi selama mengerjakan tugas akhir.
7. Bapak Rudi Walujo, selaku Ketua Jurusan Teknik Kelautan yang telah mengizinkan penulis melaksanakan tugas akhir.
8. Tata Usaha Jurusan Teknik Kelautan FTK ITS yang telah membantu dari hal administrasi tugas akhir jurusan.
9. Teman-teman angkatan 2012, 2011, 2010, yang telah membantu untuk berdiskusi selama pengerjaan tugas akhir beserta motivasi dan candaan yang membuat penulis semangat untuk mengerjakan tugas akhir.
10. Pihak-pihak lainnya yang belum bisa disebutkan satu persatu oleh penulis.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR ISTILAH	xvii
DAFTAR SINGKATAN	xviii
DAFTAR NOTASI	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan.....	4
1.4. Manfaat.....	4
1.5. Batasan Masalah.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	
2.1. Tinjauan Pustaka.....	7
2.2. Dasar Teori.....	8
2.2.1. Pipa Bawah Laut.....	8
2.2.1.1. Sistem pipa bawah laut.....	8
2.2.1.2. Perhitungan umum pipa.....	10
2.2.1.3. Analisis pada pipa bawah laut.....	17
2.2.2. Kondisi dan Beban Lingkungan.....	19
2.2.2.1. Arus.....	19
2.2.2.2. Gelombang.....	20
2.2.3. <i>Free Span</i>	28
2.2.3.1. <i>Free span</i> secara umum.....	28
2.2.3.2. Panjang <i>free span</i> efektif dan maksimum yang diizinkan.....	30

2.2.4. <i>Vortex Induced Vibration (VIV)</i>	32
2.2.4.1. Parameter hidrodinamika untuk VIV	32
2.2.4.2. <i>Response model</i>	34
2.2.4.3. <i>Screening</i> frekuensi natural.....	38
2.2.4.4. <i>Safety factor</i>	40
2.2.5. Analisis Struktur.....	40
2.2.5.1. Frekuensi natural pipa.....	40
2.2.5.2. <i>Concrete stiffness factor (CSF)</i>	41
2.2.5.3. <i>Static deflection</i>	42
2.2.5.4. <i>Critical buckling load</i>	42
2.2.5.5. <i>Effective axial force</i>	42
2.2.5.6. <i>Boundary condition</i>	43
2.2.6. Interaksi Pipa dan Tanah.....	45
2.2.6.1. <i>Soil damping</i>	45
2.2.6.2. <i>Poisson's ratio</i> dan <i>soil stiffness</i>	45
2.2.7. <i>Bending Moment</i>	48
2.2.7.1. <i>Bending moment pipeline</i> kondisi <i>free span</i>	48
2.2.7.2. <i>Maximum environmental stress</i>	51
2.2.8. Analisis <i>Local Buckling</i>	52
2.2.8.1. <i>Limit state</i>	52
2.2.8.2. Kriteria <i>local buckling</i> pada pipa.....	52
2.2.8.3. Tegangan <i>buckling</i> dan <i>von-mises</i>	58
2.2.9. Mitigasi <i>Pipeline Free Span</i>	60
2.2.10. Pemodelan <i>Local Buckling</i> dengan <i>Software FEM</i>	60
2.2.10.1. Umum.....	60
2.2.10.2. Bagian dalam <i>software</i> untuk analisis struktural.....	61
2.2.10.3. Tahapan menggunakan <i>software</i> analisis struktur.....	64

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir (<i>Flowchart</i>).....	65
3.2. Penjelasan Diagram Alir.....	69

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Tugas Akhir.....	75
4.1.1. Data <i>pipeline design parameter</i>	75

4.1.2. Data <i>offshore environmental parameter</i>	77
4.1.3. Data tanah.....	77
4.1.4. Data <i>free span</i>	78
4.2. Perhitungan Umum Pipa.....	79
4.2.1. <i>Pipeline properties parameter</i>	79
4.2.2. Berat terendam pipa.....	80
4.2.3. Tekanan pada pipa.....	81
4.2.4. Massa efektif pipa.....	81
4.3. Arus dan Gelombang.....	82
4.3.1. Arus laut pada <i>pipeline</i>	82
4.3.2. Kecepatan partikel gelombang.....	83
4.4. Interaksi dengan tanah.....	85
4.4.1. <i>Soil stiffness</i>	85
4.5. Parameter Hidrodinamika.....	86
4.5.1. Parameter stabilitas.....	86
4.5.2. <i>Current flow ratio</i>	87
4.5.3. <i>Reduce velocity</i>	87
4.6. Analisis Struktural <i>Pipeline</i>	88
4.6.1. <i>Concrete stiffness factor (CSF)</i>	88
4.6.2. Panjang <i>free span</i> efektif.....	89
4.6.3. Gaya aksial efektif (S_{eff}).....	90
4.6.4. <i>Critical buckling load (P_{cr})</i>	91
4.6.5. <i>Static deflection</i>	91
4.6.6. Frekuensi natural <i>pipeline</i>	93
4.7. <i>Screening</i> Frekuensi Natural.....	93
4.8. <i>Bending Moment</i>	96
4.8.1. <i>Stress range in-line dan cross-flow</i>	96
4.8.2. <i>Environmental stress</i>	97
4.8.3. Perhitungan <i>bending moment</i>	99
4.9. ULS <i>check</i> dengan DNV-OS-F101.....	101
4.9.1. <i>Denote plastic capacities</i>	101
4.9.2. Parameter pada beban kombinasi.....	102
4.9.3. ULS <i>check</i>	103

4.9.4. Pemilihan panjang <i>free span</i> maksimal yang diizinkan.....	104
4.10. Tegangan <i>Von-mises</i> dan <i>Buckling</i>	104
4.10.1. Perhitungan tegangan <i>von-mises</i> manual.....	104
4.10.2. Tegangan <i>von-mises</i> dari pemodelan <i>software</i>	106
4.10.3. <i>Buckling stress</i> kritis.....	111
4.10.4. Perbandingan tegangan <i>von-mises</i> dengan <i>buckling</i>	111
4.11. <i>Screening</i> terhadap Panjang <i>Free Span</i> Aktual.....	112
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan.....	113
5.2. Saran.....	113
DAFTAR PUSTAKA	115
LAMPIRAN-LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Sangatta, Kalimantan Timur.....	3
Gambar 1.2. Konsep <i>layout</i>	3
Gambar 2.1. Sistem pipa bawah laut.....	9
Gambar 2.2. Tiga bidang rekayasa dalam <i>offshore pipeline</i>	9
Gambar 2.3. Lapisan pipa secara umum.....	10
Gambar 2.4. Ilustrasi pemasangan lapisan <i>field joint</i> pipa.....	14
Gambar 2.5. Ilustrasi <i>local buckling</i>	18
Gambar 2.6. Grafik untuk mendapatkan <i>reduction factor</i>	23
Gambar 2.7. Gaya hidrodinamis.....	25
Gambar 2.8. Faktor koreksi aliran untuk $KC < 5$	27
Gambar 2.9. Tipe <i>span</i>	28
Gambar 2.10. Skenario <i>pipeline free span</i>	29
Gambar 2.11. Tipe beban pada <i>free span</i>	30
Gambar 2.12. Visualisasi VIV.....	32
Gambar 2.13. <i>In-line</i> dan <i>cross flow vibration</i>	34
Gambar 2.14. Amplitudo respons <i>in-line</i> VIV terhadap V_R dan K_S	35
Gambar 2.15. Respons model <i>cross-flow</i>	37
Gambar 2.16. Grafik nilai <i>de-rating</i> untuk <i>yield stress</i>	56
Gambar 2.17. Ilustrasi kombinasi beban pada <i>free span pipeline</i>	58
Gambar 3.1. <i>Flowchart</i> pengerjaan tugas akhir.....	65
Gambar 4.1. Distribusi pembebanan dengan beban kombinasi.....	108
Gambar 4.2. Hasil tegangan <i>von-mises</i> dengan <i>software</i>	109
Gambar 4.3. Tampilan memanjang <i>pipeline</i> dari <i>software</i>	110
Gambar 4.4. Tampilan melintang <i>pipeline</i> dari <i>software</i>	110

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. <i>Seabed roughness</i>	20
Tabel 2.2. Kekasaran permukaan pipa.....	26
Tabel 2.3. <i>Safety factor</i> untuk parameter VIV.....	40
Tabel 2.4. <i>Safety factor</i> untuk <i>screening criteria</i>	40
Tabel 2.5. Koefisien kondisi batas.....	44
Tabel 2.6. <i>Modal soil damping ratio</i> untuk pasir.....	45
Tabel 2.7. <i>Modal soil damping ratio</i> untuk <i>clay</i>	45
Tabel 2.8. Parameter geoteknik untuk tanah pasir.....	46
Tabel 2.9. Parameter geoteknik untuk tanah <i>clay</i>	46
Tabel 2.10. Faktor kekakuan dinamis dan statis untuk pasir.....	47
Tabel 2.11. Faktor kekakuan dinamis dan statis untuk <i>clay</i>	47
Tabel 2.12. Faktor pembebanan untuk kombinasi beban.....	48
Tabel 2.13. Faktor kondisi beban.....	49
Tabel 2.14. Faktor tahanan material.....	54
Tabel 2.15. Faktor keamanan <i>resistance</i>	55
Tabel 2.16. Faktor kekuatan material.....	56
Tabel 4.1. Data <i>pipeline process</i>	75
Tabel 4.2. <i>Pipeline properties</i>	75
Tabel 4.3. <i>Pipeline coating properties</i>	76
Tabel 4.4. <i>Concrete coating properties</i>	76
Tabel 4.5. Data fluida dalam <i>pipeline</i>	76
Tabel 4.6. <i>Internal corrosion allowance</i>	76
Tabel 4.7. Kedalaman perairan <i>pipeline</i>	77
Tabel 4.8. Data <i>wave parameters</i>	77
Tabel 4.9. Data arus.....	77
Tabel 4.10. <i>Tidal data</i>	77
Tabel 4.11. Tipe tanah.....	78
Tabel 4.12. Karakteristik jenis tanah lokasi KP 2.50 – KP 2.898.....	78
Tabel 4.13. Data <i>free span</i> KP 2.50 – KP 2.898.....	78
Tabel 4.14. Data <i>pipe properties</i>	79
Tabel 4.15. Hasil perhitungan umum pipa.....	80
Tabel 4.16. Hasil perhitungan berat bagian pipa dan <i>buoyancy</i>	80

Tabel 4.17. Berat pipa terendam.....	81
Tabel 4.18. Tekanan pipa.....	81
Tabel 4.19. Koefisien massa tambah.....	82
Tabel 4.20. Massa efektif pipa.....	82
Tabel 4.21. Parameter untuk perhitungan arus laut di lokasi pipa.....	83
Tabel 4.22. Arus laut pada pipa.....	83
Tabel 4.23. Parameter untuk perhitungan kecepatan partikel gelombang.....	84
Tabel 4.24. Varian <i>spectral moment</i>	84
Tabel 4.25. Kecepatan partikel gelombang pada <i>pipe level</i>	85
Tabel 4.26. Kecepatan partikel gelombang yang digunakan.....	85
Tabel 4.27. Parameter untuk perhitungan kekakuan tanah.....	85
Tabel 4.28. Kekakuan tanah.....	86
Tabel 4.29. Total <i>damping</i>	86
Tabel 4.30. Parameter untuk menghitung parameter stabilitas.....	87
Tabel 4.31. Parameter stabilitas.....	87
Tabel 4.32. Perhitungan <i>current flow ratio</i>	87
Tabel 4.33. Parameter untuk perhitungan <i>reduce velocity</i>	88
Tabel 4.34. <i>Reduce velocity</i>	88
Tabel. 4.35. Perhitungan CSF.....	89
Tabel 4.36. Parameter untuk perhitungan panjang efektif <i>free span</i>	89
Tabel 4.37. Panjang <i>free span</i> efektif.....	89
Tabel 4.38. Parameter untuk perhitungan S_{eff}	90
Tabel 4.39. Gaya aksial efektif.....	90
Tabel 4.40. Parameter perhitungan P_{cr}	91
Tabel 4.41. Hasil perhitungan <i>critical buckling load</i>	91
Tabel 4.42. Perhitungan koefisien gaya <i>drag</i>	92
Tabel 4.43. Perhitungan gaya <i>drag</i>	92
Tabel 4.44. Beban defleksi.....	92
Tabel 4.45. Hasil perhitungan <i>static deflection</i>	92
Tabel 4.46. Parameter untuk perhitungan frekuensi natural.....	93
Tabel 4.47. Frekuensi natural pipa.....	93
Tabel 4.48. Parameter untuk <i>screening in-line</i>	94
Tabel 4.49. Parameter untuk <i>screening cross-flow</i>	94

Tabel 4.50. <i>Screening in-line</i>	95
Tabel 4.51. <i>Screening cross-flow</i>	95
Tabel 4.52. Panjang <i>free span</i> maksimal dari hasil <i>screening</i> frekuensi natural.....	95
Tabel 4.53. Nilai parameter dan hasil <i>unit stress amplitude</i>	96
Tabel 4.54. Nilai <i>stress range</i> untuk <i>in-line</i>	97
Tabel 4.55. Nilai <i>stress range</i> untuk <i>cross-flow</i>	97
Tabel 4.56. Perhitungan M_w	98
Tabel 4.57. Perhitungan σ_{FM}	98
Tabel 4.58. Hasil <i>environmental stress in-line</i>	98
Tabel 4.59. Hasil <i>environmental stress cross-flow</i>	99
Tabel 4.60. Rangkuman hasil <i>enviromental stress</i> untuk <i>in-line</i> dan <i>cross-flow</i>	99
Tabel 4.61. Nilai <i>bending moment</i> akibat beban fungsional.....	99
Tabel 4.62. Nilai <i>bending moment</i> akibat pengaruh gerakan <i>cross-flow</i>	100
Tabel 4.63. Nilai <i>bending moment</i> akibat gerakan <i>in-line</i>	100
Tabel 4.64. Nilai <i>bending moment</i> total.....	101
Tabel 4.65. Perhitungan nilai kekuatan material.....	101
Tabel 4.66. Nilai karakteristik <i>plastic moment</i> dan <i>axial force resistance</i>	102
Tabel 4.67. Nilai parameter aliran tegangan.....	102
Tabel 4.68. Nilai tekanan <i>bursting</i>	102
Tabel 4.69. Nilai faktor tekanan untuk kriteria beban kombinasi.....	103
Tabel 4.70. Hasil ULS <i>check</i> sesuai DNV-OS-F101.....	103
Tabel 4.71. Rangkuman hasil panjang <i>free span</i> maksimal yang diizinkan.....	104
Tabel 4.72. <i>Hoop stress</i>	105
Tabel 4.73. <i>Thermal stress</i>	105
Tabel 4.74. <i>Poisson stress</i>	105
Tabel 4.75. <i>Bending stress</i>	105
Tabel 4.76. Perhitungan <i>longitudinal stress</i>	106
Tabel 4.77. Hasil <i>von-mises stress</i>	106
Tabel 4.78. Data struktur pemodelan <i>free span pipeline</i>	107
Tabel 4.79. <i>Input</i> kombinasi beban.....	107
Tabel 4.80. Hasil <i>buckling stress</i>	111
Tabel 4.81. Perbandingan tegangan <i>von-mises</i> dengan <i>buckling</i>	111
Tabel 4.82. <i>Screening</i> terhadap panjang <i>free span</i> aktual.....	112

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A	PERHITUNGAN UMUM PIPA
LAMPIRAN B	ARUS DAN GELOMBANG
LAMPIRAN C	KEKAKUAN TANAH
LAMPIRAN D	PANJANG <i>FREE SPAN</i> EFEKTIF DAN <i>BOUNDARY CONDITION</i>
LAMPIRAN E	PARAMETER HIDRODINAMIKA
LAMPIRAN F	GAYA <i>DRAG</i> ARUS KOMBINASI
LAMPIRAN G	ANALISIS STRUKTUR
LAMPIRAN H	<i>SCREENING</i> FREKUENSI NATURAL
LAMPIRAN I	PARAMETER UNTUK ULS <i>CHECK</i>
LAMPIRAN J	<i>STRESS RANGE</i> DAN <i>ENVIRONMENTAL STRESS</i>
LAMPIRAN K	<i>BENDING MOMENT</i>
LAMPIRAN L	ULS <i>CHECK LOCAL BUCKLING</i>
LAMPIRAN M	TEGANGAN <i>VON-MISES</i> DAN <i>BUCKLING</i> KRITIS
LAMPIRAN N	LAPORAN TEGANGAN <i>VON-MISES SOFTWARE</i>
LAMPIRAN O	KONDISI DASAR LAUT KP 2.5 – KP 2.898

DAFTAR ISTILAH

1. *Bending moment*: momen yang menyebabkan *bending* pada struktur dan merupakan parameter utama dalam *screening local buckling*.
2. *Corrosion allowance*: tebal tambahan dinding pipa untuk mengantisipasi korosi pipa selama beroperasi.
3. *Cross flow VIV*: gerakan menggetar *pipeline* ke arah vertikal saat terkena beban arus.
4. *Free span* atau bentangan bebas: suatu kondisi saat *pipeline* berada di dasar laut tanpa dukungan apapun.
5. Frekuensi natural: frekuensi struktur dimana sistem beresonansi ketika sistem itu terganggu, frekuensi natural akan menunjukkan getaran struktur yang tergantung dari beberapa faktor seperti berat, kekakuan, dan panjang dari struktur tersebut.
6. *Gap*: jarak antara permukaan tanah dasar laut dengan pipa saat kondisi *free span*.
7. *In line VIV*: arah gerakan menggetar *pipeline* ke arah horizontal saat terkena beban arus.
8. *Local buckling*: salah satu jenis *buckling* yang mempengaruhi bentuk penampang struktur (penampang *pipeline* tidak lagi berbentuk lingkaran sempurna).
9. *Marine growth*: makhluk hidup yang biasanya hidup di permukaan struktur yang terendam air.
10. Tegangan *buckling* kritis: tegangan maksimal struktur sebelum terjadi tekukan atau *buckling*, biasanya digunakan sebagai batas tegangan yang diizinkan untuk masalah *buckling*.
11. *Steady*: untuk aliran dengan kecepatan yang tidak berubah terhadap waktu
12. Tegangan *hoop*: tegangan yang berada pada luasan penampang pipa dengan arah melingkar sesuai penampang tersebut.
13. *Trench*: galian tanah pada lokasi rute pipa, sehingga *pipeline* akan terkubur penuh atau sebagian di dalam tanah.
14. VIV: suatu permasalahan hidrodinamika yang mengakibatkan getaran pada pipa dan dapat menghasilkan aliran *vortex* (ulekan) ke arah struktur.

DAFTAR SINGKATAN

ALS	<i>Accidental Limit State</i>
CD	<i>Chart Datum</i>
CF	<i>Cross Flow</i>
CSF	<i>Concrete Stiffness Factor</i>
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FLS	<i>Fatigue Limit State</i>
HAT	<i>Highest Astronomical Tide</i>
IL	<i>In-Line</i>
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
KC	<i>Keulegan Carpenter</i>
KP	<i>Kilometer Point</i>
KPC	<i>Kaltim Prima Coal</i>
LAT	<i>Low Astronomical Tide</i>
LCC	<i>Load Control Condition</i>
MSL	<i>Mean Sea Level</i>
OS	<i>Offshore Standard</i>
PCS	<i>Pipeline Control System</i>
PE	<i>Polyethylene</i>
PP	<i>Polypropylene</i>
PSE	<i>Petro Storindo Energi</i>
RP	<i>Recommended Practice</i>
UC	<i>Unity Check</i>
ULS	<i>Ultimate Limit State</i>
VIV	<i>Vortex Induced Vibration</i>

DAFTAR NOTASI

a. Latin

A_{CF}	<i>cross-flow unit amplitude stress</i> (Pa)
A_i	<i>internal cross section area</i> pada pipa (m^2)
A_{IL}	<i>in-line unit amplitude stress</i> (Pa)
$A_{IL/CF}$	<i>maximum (unit diameter) stress amplitude</i> (Pa)
a_s	percepatan signifikan partikel air yang mengenai pipa (m/s^2)
A_s	<i>cross section area</i> pada <i>steel</i> pipa (m^2)
$A_{Y/D}$	amplitudo respons maksimal <i>in-line</i> VIV
$A_{Z/D}$	amplitudo <i>cross-flow</i> VIV
$C_1 - C_6$	koefisien kondisi batas
C_a	koefisien <i>added mass</i>
C_D	koefisien gaya <i>drag</i>
$C_D^0(k/D)$	koefisien <i>drag</i> umum untuk aliran <i>steady</i>
C_L	koefisien kekakuan tanah lateral ($kN/m^{5/2}$) atau koefisien gaya angkat
C_M	koefisien gaya inersia
C_V	koefisien untuk kekakuan tanah vertikal ($kN/m^{5/2}$)
d	kedalaman perairan (m)
D_0	diameter luar <i>steel</i> pipa (m)
D_c	diameter luar <i>concrete</i> (m)
D_i	diameter dalam pipa (m)
D_t	diameter luar total pipa (m)
D_{tm}	diameter luar total pipa tanpa <i>marine growth</i> (m)
d_{trench}	kedalaman <i>trench</i> (m)
e	<i>seabed gap</i> (m)
E	<i>Young's modulus</i> untuk <i>steel</i> (Pa)
e/D_t	rasio antara <i>gap</i> dan diameter luar pipa
E_c	<i>Young's modulus</i> untuk <i>concrete</i> (Pa)
e_s	<i>void ratio</i>
F_b	<i>buoyancy</i> per meter (N/m)
F_{buoy}	<i>buoyancy</i> pipa sepanjang <i>joint</i> pipa (N)
f_{cb}	nilai terkecil antara f_y dan $f_u/1.15$ (dibandingkan) (Pa)
f_{cn}	kekuatan konstruksi <i>concrete</i> (Pa)

F_D	gaya <i>drag</i> (N)
F_G	<i>gravity</i> (N)
F_I	gaya inersia (N)
F_J	panjang <i>field joint cutback</i> (m)
F_L	gaya angkat (N)
f_n	frekuensi natural <i>pipeline free span</i> (Hz)
$f_{n,CF}$	frekuensi natural <i>cross flow</i> (Hz)
$f_{n,IL}$	frekuensi natural <i>in-line</i> (Hz)
f_s	frekuensi <i>vortex shedding</i> (Hz)
$f_{u,temp}$	nilai <i>de-rating</i> karena pengaruh temperatur dari <i>tensile strength</i> (Pa)
f_w	frekuensi gelombang signifikan (Hz)
f_y	karakteristik kekuatan material (Pa)
$f_{y,temp}$	nilai <i>de-rating</i> karena pengaruh temperatur dari <i>yield stress</i> (Pa)
g	percepatan gravitasi (m/s^2)
$G(\omega)$	fungsi transformasi frekuensi dari elevasi gelombang ke kecepatan aliran
g_c	fungsi koreksi untuk arus <i>steady</i>
g_D	bagian persamaan gaya <i>drag</i>
H_{eff}	<i>effective lay tension</i> (N)
H_s	tinggi gelombang signifikan (m)
h_t	kedalaman perairan total (m)
I_{conc}	momen inersia <i>concrete</i> (m^4)
I_{steel}	momen inersia <i>steel</i> (m^4)
k	angka gelombang
K	<i>relevant soil stiffness</i> (vertikal atau horizontal, statis atau dinamis)
k_c	<i>parameter for concrete stiffening (empirical parameter)</i>
K_L	kekakuan tanah dinamis horizontal (kN/m^2)
K_s	parameter stabilitas
K_{sd}	parameter stabilitas dengan sudah mempertimbangkan <i>safety factor</i>
K_v	kekakuan tanah dinamis vertikal (kN/m^2)
$K_{v,s}$	kekakuan tanah statis vertikal (kN/m^2)
k_w	<i>normalisation constant</i>
L	panjang aktual <i>free span</i> (m)

L_{cr}	panjang <i>free span</i> maksimal yang diizinkan atau kritis (m)
L_{eff}	panjang efektif <i>span</i> (m)
L_{pj}	panjang antar <i>joint</i> pipa (m)
$m(s)$	massa per satuan panjang (massa struktur, isi, dan tambah) (kg/m)
m_a	massa tambah (kg/m)
M_A	momen karena <i>accidental load</i> (Nm)
m_{add}	massa <i>displacement water</i> (kg/m)
m_c	massa dari isi fluida di dalam pipa (kg/m)
m_e	massa efektif per satuan panjang (kg/m)
M_E	momen karena <i>environmental load</i> (Nm)
M_F	momen karena beban fungsional (Nm)
M_I	momen karena <i>interference load</i> (Nm)
M_{max}	<i>bending moment</i> maksimal (Nm)
M_n	momen spektra orde-n
M_p	<i>denote plastic moment capacities</i> (Nm)
M_{Sd}	<i>bending moment</i> (Nm)
m_{str}	massa struktur termasuk <i>coating</i> (kg/m)
M_w	momen karena gaya <i>drag</i> aliran air (Nm)
P_b	<i>pressure containment resistance</i> atau tekanan <i>bursting</i> (Pa)
P_c	tekanan karakteristik <i>collaps</i> (Pa)
P_{cr}	<i>critical buckling load</i> (N)
P_e	tekanan eksternal (Pa)
P_i	tekanan internal (Pa)
P_{min}	tekanan internal minimum (Pa)
q	<i>deflection load per unit length</i> (N/m)
R_c	<i>reduction factor</i>
R_D	<i>reduction factor</i> akibat arah gelombang dan sebaran gelombang
Re	<i>Reynold's number</i>
R_k	<i>amplitude reduction factor</i> untuk <i>damping</i>
s	<i>spreading parameter</i>
$S_{\eta\eta}$	spektra gelombang
S_{CF}	<i>stress range (cross-flow)</i> (Pa)
S_{eff}	gaya aksial efektif (N)

S_{IL}	<i>stress range (in-line)</i> (Pa)
S_p	<i>denote plastic axial force capacities</i> (N)
S_{Sd}	<i>desain axial effective force</i> (N)
S_t	<i>strouhal number</i> (silinder bulat = 0.2)
S_u	<i>undrained shear strength, cohesive soils</i> (kN/m ²)
S_{UU}	spektra kecepatan gelombang di <i>pipe level</i>
t_{cc}	tebal <i>coating</i> korosi pipa (m)
t_{corr}	tebal toleransi terhadap korosi (m)
t_{int}	tebal <i>coating</i> internal pipa (m)
t_{mar}	tebal <i>marine growth</i> (m)
t_{nom}	tebal nominal dinding pipa (m)
T_p	periode puncak gelombang (s)
T_{surge}	ketinggian pasang air laut (m)
T_w	periode gelombang (s)
t_{wc}	tebal <i>concrete coating</i> (m)
$U(z_r)$	kecepatan arus jauh di atas <i>seabed</i> (m/s)
U_c	kecepatan normal arus pada pipa (m/s)
$U_{c,100 \text{ tahun}}$	periode ulang 100 tahun untuk arus laut (m/s)
U_s	kecepatan arus dari gelombang signifikan (m/s)
U_{tot}	kecepatan total aliran (m/s)
U_w	kecepatan normal aliran signifikan yang mengenai pipa, dengan koreksi akibat arah gelombang dan sebaran gelombang (m/s)
$U_{w, 1 \text{ tahun}}$	periode ulang signifikan 1 tahun untuk <i>wave induce velocity</i> (m)
ν	<i>poisson's ratio</i> dari <i>steel</i>
V_R	<i>reduced velocity</i>
ν_{soil}	<i>poisson's ratio</i> dari tanah
ν_u	viskositas kinematis air (m ² /s), [1.5 x 10 ⁻⁶ (m ² /s)]
w	fungsi sebaran energi gelombang
W_c	berat isi pipa (N)
W_{cc}	berat <i>corrosion coating</i> (N)
W_{fj}	berat <i>field joint</i> (N)
W_{ic}	berat <i>coating</i> internal (N)
W_m	berat <i>marine growth</i> (N)

W_s	berat <i>steel</i> pipa (N)
W_{sub}	berat terendam pipa (N/m)
W_{wc}	berat <i>concrete coating</i> (N)
z	elevasi di atas <i>seabed</i> (m)
z_0	parameter kekasaran <i>seabed</i> (<i>bottom roughness</i>) (m)
z_r	tinggi referensi (m)

b. Greek

α	konstanta Generalised Phillips atau <i>current flow ratio</i>
α_c	parameter aliran tegangan
α_e	koefisien ekspansi suhu ($^{\circ}\text{C}$)
α_p	faktor tekanan untuk beban kombinasi
α_U	faktor kekuatan material
β	<i>relative soil stiffness parameter</i> atau faktor untuk kriteria kombinasi beban
Δ/D_t	kedalaman relatif <i>trench</i>
ΔT	perbedaan temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
δ	<i>static deflection</i> (m)
Γ	fungsi gamma
γ	parameter ketinggian atau <i>peakedness parameter</i>
γ_A	faktor pembebanan untuk <i>accidental load</i>
γ_C	faktor pengaruh kondisi beban
γ_{CF}	<i>safety factor (cross flow)</i>
γ_E	faktor pembebanan untuk <i>environmental load</i>
γ_F	faktor pembebanan untuk beban fungsional
γ_{IL}	<i>safety factor (in-line)</i>
γ_k	<i>safety factor</i> untuk parameter stabilitas
γ_m	faktor tahanan material
$\gamma_{on,CF}$	<i>safety factor</i> untuk <i>cross flow</i>
$\gamma_{on,IL}$	<i>safety factor</i> untuk <i>in-line</i>
γ_s	faktor keamanan untuk <i>stress range</i>
γ_{SC}	faktor keamanan <i>resistance</i>

γ_{soil}	berat unit tanah (kN/m^3)
λ_1	<i>mode shape</i> faktor berat
η	<i>usage factor</i>
$\phi(s)$	<i>mode shape</i>
φ	fungsi distribusi
φ_s	sudut dari gesekan tanah ($^\circ$)
$\Psi_{\alpha,IL}$	faktor koreksi dari rasio aliran arus α
$\Psi_{\text{proxi,onset}}$	faktor koreksi untuk <i>cross flow</i> dekat <i>seabed</i>
$\Psi_{\text{trench,onset}}$	<i>reduction factor</i> untuk <i>cross flow</i> karena pengaruh <i>trench</i>
$\Psi_{KC,\alpha}^{CD}$	faktor koreksi untuk aliran yang tidak <i>steady</i>
Ψ_{VIV}^{CD}	faktor tambahan selama pipa mengalami getaran <i>cross-flow</i>
Ψ_{proxi}^{CD}	faktor koreksi untuk lokasi yang dekat dengan dasar laut
$\Psi_{\text{trench}}^{CD}$	faktor koreksi karena pengaruh <i>trench</i> pada pipa
ρ_c	densitas isi pipa (kg/m^3)
ρ_{cc}	densitas <i>coating</i> korosi pipa (kg/m^3)
ρ_{fj}	densitas isi bagian <i>field joint cutback</i> (kg/m^3)
ρ_{int}	densitas <i>coating</i> internal pipa (kg/m^3)
ρ_{mar}	densitas <i>marine growth</i> (kg/m^3)
ρ_s/ρ	rasio massa spesifik antara massa pipa (tidak termasuk massa tambah) dan <i>buoyancy</i>
ρ_w	densitas air (kg/m^3)
ρ_{wc}	densitas <i>concrete coating</i> pipa (kg/m^3)
σ	lebar spektral
σ_b	tegangan <i>bending</i> (Pa)
σ_{cr}	tegangan kritis <i>buckling</i> (Pa)
σ_E	<i>environmental stress</i> (Pa)
σ_{eq}	tegangan <i>equivalent</i> (Pa)
σ_{FM}	<i>environmental stress due to direct wave loading</i> (Pa)
σ_h	tegangan <i>hoop</i> (Pa)
σ_L	tegangan longitudinal (Pa)
σ_p	<i>poisson stress</i> (Pa)

σ_T	tegangan <i>thermal</i> (Pa)
σ_u	standar deviasi
τ	tegangan <i>shear</i> (Pa)
θ_{rel}	arah relatif antara arah <i>pipeline</i> dengan arah aliran arus (°)
ζ_h	<i>hydrodynamic damping</i>
ζ_{soil}	<i>soil damping</i>
ζ_{str}	<i>structural damping</i>
ζ_T	total modal <i>damping ratio</i>
ω	frekuensi <i>angular</i> gelombang (rad/s)
ω_p	frekuensi <i>angular</i> puncak gelombang (rad/s)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Pada dasarnya manusia selalu berusaha untuk memenuhi segala kebutuhan selama hidupnya terutama dalam hal energi. Untuk itu manusia membutuhkan suatu sumber energi, dimana minyak dan gas bumi merupakan sumber energi yang menjadi prioritas utama di dunia. Sumber minyak dan gas tidak hanya berada di darat namun juga di bawah dasar laut. Permintaan sumber energi yang terus meningkat, mendorong manusia atau perusahaan melakukan peningkatan eksplorasi dan produksi. Keterbatasan sumber energi di darat menyebabkan pergeseran eksplorasi ke arah lepas pantai dengan didukung oleh fasilitas-fasilitas yang memadai (Sianturi, 2008). Hal yang dibutuhkan dalam hal ini adalah suatu moda transportasi yang efektif dalam pendistribusian migas dari laut ke darat.

Pada perkembangannya, penggunaan jaringan pipa untuk mengalirkan minyak dan gas sudah banyak digunakan, karena dianggap lebih praktis dan efektif (Abidin, 2008). *Pipeline* digunakan untuk pengembangan sumber daya hidrokarbon baik di darat maupun di laut, termasuk pipa untuk ekspor dan mengangkut produksi dari suatu *platform* (Soegiono, 2007). *Pipeline* menjadi sebuah alternatif yang paling mudah, aman, dan efisien dalam pendistribusian migas, sehingga pada kasus di atas dapat menggunakan sistem *pipeline* untuk pendistribusian migas dari laut ke darat. Seiring hal tersebut, pembangunan *pipeline* di lepas pantai dari waktu ke waktu semakin meningkat.

Pipa bawah laut memerlukan perencanaan awal dan keseluruhan proses instalasi yang baik dan teliti, agar semua proses pembangunan pipa berhasil dan dengan biaya yang efektif. Pemilihan rute atau jalur pipa merupakan salah satu tahap dalam mendesain pemasangan sistem pipa. Pemilihan rute yang tidak baik pada umumnya akan menimbulkan banyak permasalahan diantaranya permasalahan karena bentangan bebas atau *free span*, sehingga perlu dipertimbangkan dan diperhitungkan dengan baik.

Free span dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya adalah kondisi dasar laut yang tidak rata, *scouring* dasar laut, dan *crossing* dengan pipa lain. Ketika pipa ditempatkan di dasar laut, daerah di sekitar pipa tersebut akan mudah

mengalami erosi dan pola aliran di sekitar pipa akan berubah. Variasi pola aliran tersebut akhirnya menyebabkan gerusan di sekitar pipa. Gerusan lokal adalah fenomena yang kompleks karena merupakan hasil dari interaksi antara fluida, struktur, dan dasar laut (Zhao dan Fernando, 2007).

Free span dapat menyebabkan beberapa kerusakan atau kegagalan pipa, salah satunya adalah *local buckling*. *Local buckling* merupakan kegagalan serius yang disebabkan oleh *free span* (Dong dkk, 2015). Selain itu, *free span* dapat menyebabkan vibrasi atau dikenal dengan *vortex induced vibration* (VIV). *Free span* yang terjadi akan menimbulkan gerakan osilasi pipa sehingga menyebabkan kegagalan pada saat tertentu jika frekuensinya melebihi frekuensi natural pipa (Guo dkk, 2014). *Vortex induced vibration* (VIV) merupakan permasalahan hidrodinamika yang perlu diperhatikan dalam sistem perpipaan bangunan lepas pantai. VIV tersebut memberikan dampak yang cukup besar dan dapat menyebabkan kekuatan struktur menjadi lemah secara signifikan dalam waktu yang relatif singkat (Mathelin dan de Langre, 2005 dalam Chen dkk, 2015).

Free span yang dialami oleh pipa di dasar laut memerlukan pengecekan untuk menentukan apakah bentangan pipa tersebut perlu untuk dilakukan evaluasi atau tidak, sehingga kerusakan pipa dapat dihindari. Karakteristik statis dan dinamis pada *free span* perlu untuk diperhitungkan untuk memastikan bentangan pipa yang ada dapat diterima dalam kondisi aman. Jika hasil yang didapat dari perhitungan analisis pipa menunjukkan bahwa *free span* yang terjadi tersebut kritis dan pipa tidak dapat dipastikan keamanannya, maka perlu untuk dilakukan tindakan perbaikan seperti koreksi panjang *free span*, atau mengurangi potensi VIV yang menyebabkan kerusakan karena kelelahan. Keberadaan atau lokasi *free span* yang akan dianalisis perlu untuk ditentukan dalam tahapan desain (Bai dan Bai, 2014).

Pipa bawah laut yang digunakan dalam penelitian ini adalah pipa milik PT PSE (Petro Storindo Energi) yang merupakan anak perusahaan dari KPC (*Kaltim Prima Coal*). Pipa tersebut menyalurkan bahan hasil olahan minyak bumi yaitu bahan bakar solar dari *tanker* yang berada di laut ke terminal bahan bakar di darat untuk kebutuhan produksi perusahaan tersebut. Pipa tersebut berdiameter 20 inci yang berlokasi di Sangatta, Kutai Timur, Kalimantan Timur. Lokasi pipa ditunjukkan pada Gambar 1.1 di bawah, beserta konsep *layout* pipa pada Gambar 1.2. Kedalaman laut maksimal di lokasi penggelaran pipa adalah 20 m dengan jenis tanah yang

bervariasi tergantung lokasi *kilometer point* (KP) pada jalur pipa. Kondisi dasar laut yang tidak rata saat operasional, menyebabkan perlunya untuk melakukan analisis *free span* pada jalur pipa tersebut. Dalam tugas akhir ini akan dilakukan analisis tentang *free span* pada pipa untuk mendapatkan panjang *free span* maksimal yang diizinkan untuk kondisi operasi, sehingga dapat mencegah atau menghilangkan kerusakan karena *local buckling* dan kelelahan VIV.



Gambar 1.1. Sangatta, Kalimantan Timur

(Sumber: Google Maps, 2016)



Gambar 1.2. Konsep *layout*

(Sumber: PT. Petro Storindo Energi, 2014)

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Berapa panjang *free span* maksimal yang diizinkan pada pipa bawah laut agar memenuhi *screening* frekuensi natural?
2. Berapa nilai *bending moment* pada *free span* pipa bawah laut?
3. Berapa panjang *free span* maksimal yang diizinkan pada pipa bawah laut agar memenuhi kriteria *local buckling*?

1.3. Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Mendapatkan panjang *free span* maksimal yang diizinkan pada pipa bawah laut agar memenuhi *screening* frekuensi natural.
2. Mendapatkan nilai *bending moment* pada *free span* pipa bawah laut.
3. Mendapatkan panjang *free span* maksimal yang diizinkan pada pipa bawah laut agar memenuhi kriteria *local buckling*.

1.4. Manfaat

Dari tugas akhir ini diharapkan dapat menghitung nilai *bending moment* dan panjang *free span* maksimal yang diizinkan pada pipa bawah laut untuk kondisi operasi agar memenuhi kriteria frekuensi natural dan *local buckling*. Hasil yang didapatkan dapat dimanfaatkan oleh suatu praktisi atau perusahaan yang akan melakukan penggelaran atau perawatan pipa bawah laut dengan mempertimbangkan keberadaan *free span*. Panjang *free span* maksimal yang diizinkan tersebut digunakan sebagai pembanding terhadap panjang *free span* aktual yang terdapat di lokasi rute pipa. Sehingga, jika panjang *free span* mendekati atau melebihi panjang yang diizinkan, maka perlu untuk dievaluasi dengan mengurangi panjang *free span* di lokasi pipa. Hal tersebut dapat mengurangi potensi kerusakan karena *local buckling* dan kelelahan *pipeline*.

1.5. Batasan Masalah

Untuk mengurangi permasalahan selama pengerjaan tugas akhir, diberikan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Aliran yang mengenai pipa adalah tegak lurus dengan arah pipa.
2. Jenis *span* yang ditinjau adalah *span* tunggal.
3. Aliran fluida di dalam pipa adalah *steady*.
4. Kondisi batas ujung *free span pipeline* adalah *pinned-pinned*.
5. Tidak dilakukan analisis kelelahan.
6. Pipa yang dianalisis adalah pada lokasi KP 2.50 – KP 2.898.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Analisis dalam tugas akhir ini bertujuan untuk mendapatkan panjang *free span* maksimal yang diizinkan untuk kondisi operasi. Panjang *free span* yang diperbolehkan tersebut harus memenuhi kriteria frekuensi natural dan *local buckling* (ULS *check*) sesuai pada DNV-RP-F105 dan DNV-OS-F101 serta disimulasikan dengan suatu *software*. Analisis untuk *local buckling* pada *pipeline*, sebelumnya sudah pernah dibahas oleh Dong dkk (2015) yang dipublikasikan melalui jurnal pada konferensi internasional “14th International Conference on Pressure Vessel Technology”. Dalam jurnal tersebut, dilakukan analisis tentang *local buckling* untuk beberapa panjang *free span*, dari beberapa panjang tersebut akan didapatkan panjang *free span* kritis. Dalam penelitiannya, untuk menghitung salah satu parameter *local buckling* dibantu dengan menggunakan *software* FEM. Panjang *free span* kritis dalam analisis pada jurnal tersebut hanya didapatkan dari analisis kegagalan *local buckling* saja, tanpa memperhatikan kriteria frekuensi natural *pipeline* sesuai dalam DNV-RP-F105 (2006) yang nantinya akan berpengaruh pada kriteria kelelahan *pipeline* tersebut.

Analisis *local buckling* pada *pipeline* juga pernah dibahas dalam beberapa penelitian lainnya, diantaranya adalah Koto dkk (2014) dan Selker (2013). Keduanya tidak hanya membahas *local buckling* pada kondisi *free span* saja namun juga keseluruhan kondisi struktur yang memungkinkan terjadi *local buckling* umum. Dengan kata lain, mereka membahas teori *local buckling* secara umum dengan dibantu oleh *software* FEM. Di dalam jurnal Koto dkk (2014), juga dibahas tentang beberapa beban kombinasi yang mempengaruhi terjadinya *local buckling*. *Software* FEM pada jurnal tersebut digunakan untuk mengetahui *strain* yang terjadi dengan memperhatikan aturan DNV. Sedangkan pada Selker (2013), *local buckling* yang dibahas lebih umum lagi, yaitu *local buckling* pada *ring* dan *local buckling* pada silinder. *Software* FEM juga diikutsertakan untuk melakukan simulasi dan verifikasi hasil yang didapatkan.

Selain memperhatikan *local buckling* dalam menentukan panjang *free span* kritis, juga diperhatikan faktor frekuensi natural pipa terhadap frekuensi aliran di

sekitar pipa. Beberapa penelitian sebelumnya sudah pernah dilakukan analisis frekuensi natural pada *free span*, diantaranya oleh Choi (2000) dan Yaghoobi dkk (2012). Dalam Choi (2000), bertujuan untuk menghitung frekuensi natural dari *free span* menggunakan konsep keseimbangan. Hasil yang didapatkan dapat meningkatkan standar desain saat itu. Langkah ini akan menghasilkan perhitungan yang sesuai untuk mengetahui panjang *free span* pipa bawah laut yang diizinkan. Selama operasi dan instalasi pipa, efek dari gaya aksial tidak bisa diabaikan. Hasil dari penelitian ini menunjukkan, bahwa beban aksial berpengaruh pada frekuensi natural pipa dan panjang *free span* yang diizinkan untuk berbagai kondisi batas. Untuk meningkatkan keakuratan hasil perlu untuk dilakukan perbaikan atau meningkatkan ketelitian dalam analisis *vortex shedding*, sehingga menghasilkan perhitungan yang lebih akurat untuk mendapatkan panjang *free span* yang diizinkan. Sedangkan dalam Yaghoobi dkk (2012), dilakukan analisis frekuensi natural pada *pipeline free span* dengan mempertimbangkan karakteristik dari tanah.

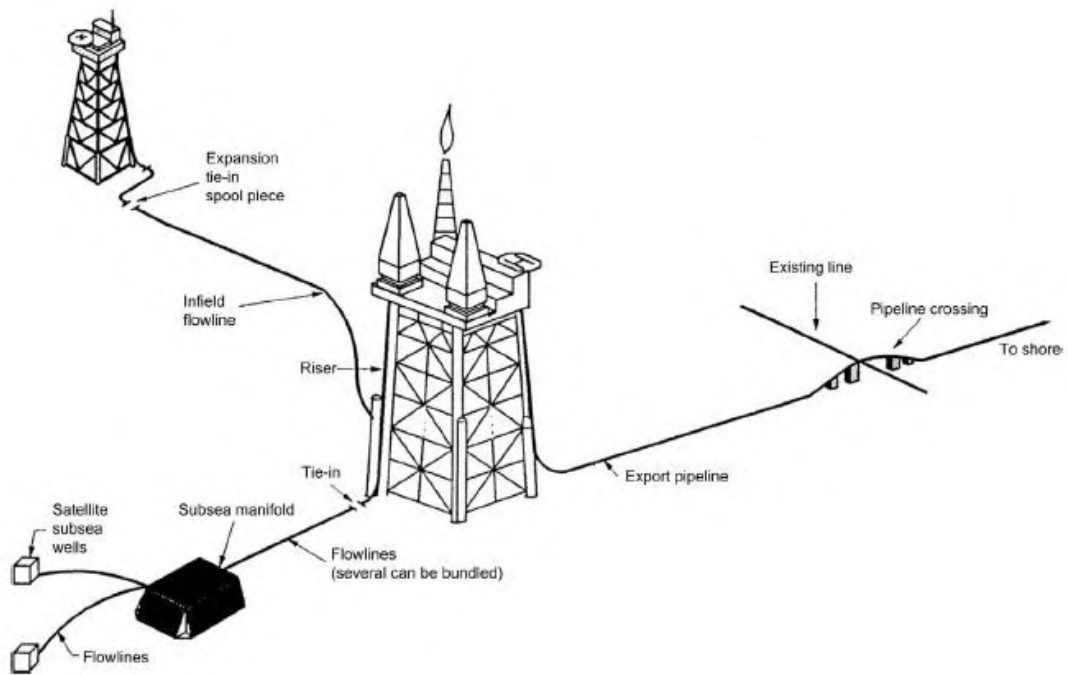
Dalam tugas akhir yang sebelum-sebelumnya, beberapa orang sudah pernah melakukan analisis tentang *free span* pipa bawah laut. Salah satunya adalah Khanifudin (2015), yang membahas tentang pengecekan *Ultimate Limit State (ULS)* untuk mendapatkan panjang *free span* yang diizinkan beserta tegangan yang terjadi. Dalam analisisnya dilakukan analisis statis untuk mendapatkan panjang *free span* yang diperbolehkan tanpa melakukan analisis secara dinamis. Sehingga untuk analisis selanjutnya diperlukan analisis dinamis dalam hal melakukan *screening criteria* untuk frekuensi natural *free span pipeline* yang terjadi sesuai DNV-RP-F105 (2006).

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Pipa Bawah Laut

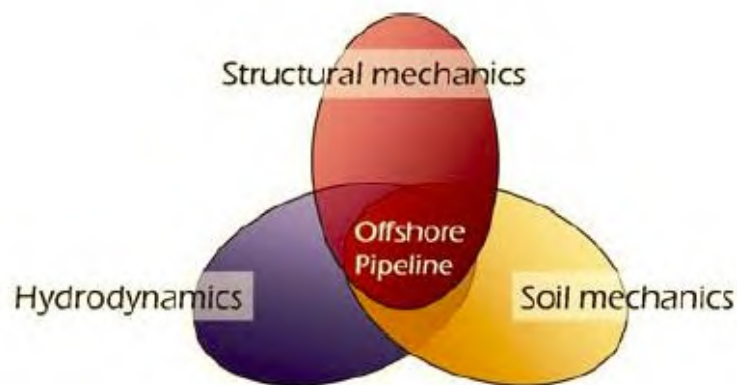
2.2.1.1. Sistem pipa bawah laut

Pipeline merupakan bagian dari suatu jaringan pipa bawah laut yang biasanya disebut dengan *subsea flowlines*. *Pipeline* dari fasilitas proses menuju darat disebut *export pipelines*, sedangkan *pipeline* dari *platform* ke peralatan bawah laut untuk mengirimkan air atau inhibitor kimia disebut *water injection* atau *chemical flowlines* (Bai dan Bai, 2014).



Gambar 2.1. Sistem pipa bawah laut
(Sumber: Bai dan Bai, 2014)

Penggunaan *offshore pipeline* merupakan perkembangan yang baru pada akhir abad kedua puluh. Desain dari pipa lepas pantai merupakan multidisiplin ilmu, yang biasanya melibatkan tiga bidang yaitu *structural mechanics*, *hydrodynamics* dan *soil mechanics* (Ruby dan Hartvig, 2008).



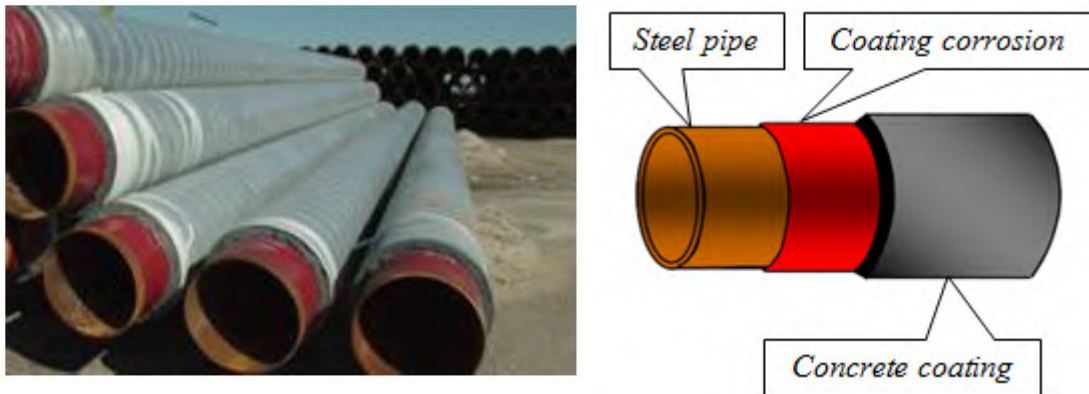
Gambar 2.2. Tiga bidang rekayasa dalam *offshore pipeline*
(Sumber: Ruby dan Hartvig, 2008)

2.2.1.2. Perhitungan umum pipa

Sebelum melakukan suatu analisis pada pipa bawah laut, perlu dilakukan beberapa perhitungan umum yang nantinya hasil tersebut diperlukan untuk melakukan analisis pipa selanjutnya. Beberapa perhitungan umum yang dimaksud diantaranya:

1. *Pipe properties*

Perhitungan dimensi pipa ini merupakan langkah awal dalam melakukan suatu analisis untuk pipa yang sudah ada. Hal ini dilakukan karena tidak semua dimensi pipa yang digunakan terdapat dalam data, sehingga perlu untuk dihitung. Gambar 2.3 di bawah ini merupakan bagian lapisan pipa secara umum, kemudian diikuti dengan beberapa persamaan untuk menghitung beberapa dimensi pipa yang digunakan.



Gambar 2.3. Lapisan pipa secara umum

(Sumber: Lee, 2008)

a. Tebal dinding pipa (t_2)

Tebal dinding pipa yang digunakan untuk melakukan analisis adalah tebal dinding pipa tanpa ada penambahan dari tebal tambahan untuk perlindungan korosi. Sesuai dengan DNV-OS-F101 (2013), tebal pipa (t_2) digunakan untuk melakukan analisis kegagalan yang dipengaruhi oleh kondisi beban ekstrim dan pertimbangan untuk pipa beroperasi.

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

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

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

b. Diameter luar total pipa

Diameter total yang dimaksudkan adalah diameter pipa secara keseluruhan dengan menjumlahkan beberapa diameter yang membentuknya seperti diameter *steel*, *coating corrosion*, *concrete*, dan *marine growth*.

$$D_t = D_0 + 2t_{cc} + 2t_{wc} + 2t_{mar} \quad (2.2)$$

D_t : diameter luar total pipa (m)

D_0 : diameter luar untuk *steel* pipa (m)

t_{cc} : tebal *coating* korosi pipa (m)

t_{wc} : tebal *concrete coating* (m)

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

c. Diameter total pipa tanpa *marine growth*

Untuk diameter tanpa *marine growth*, persamaannya hampir sama dengan diameter total sebelumnya, hanya saja tidak ditambah dengan tebal dari *marine growth*.

$$D_{tm} = D_0 + 2t_{cc} + 2t_{wc} \quad (2.3)$$

D_{tm} : diameter total pipa tanpa *marine growth* (m)

d. Diameter dalam pipa

Diameter dalam pipa merupakan diameter maksimal yang dapat dilewati oleh fluida yang dialirkan. Persamaannya sebagai berikut (Pers.2.4):

$$D_i = D_0 - 2(t_{nom} + t_{int}) \quad (2.4)$$

D_i : diameter dalam pipa (m)

t_{int} : tebal *coating* internal pipa (m)

e. Diameter *concrete*

$$D_c = D_0 + 2t_{cc} + 2t_{wc} \quad (2.5)$$

D_c : diameter *concrete* (m)

f. *Moment area* dari *steel* pipa

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

I_{steel} : momen inersia *steel* (m^4)

g. *Moment area dari concrete* (I_{conc})

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

I_{conc} : momen inersia *concrete* (m^4)

h. *Internal cross section area*

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

A_i : *internal cross section area* pada pipa (m^2)

i. Area dari *steel* pipa

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

A_s : *cross section area* pada pipa baja (m^2)

2. Berat setiap lapisan pipa

a. Berat *coating* internal

Menurut Lee (2008), permukaan dalam pipa biasanya tidak dilapisi *coating*, namun jika diperlukan perlindungan terhadap erosi dan korosi maka lapisan *coating* internal dapat diberikan. Pada permukaan luar pipa biasanya dilapisi oleh lapisan anti korosi seperti *three layer polyethylene* (3LPE).

$$W_{ic} = \frac{\pi}{4} [(D_i + 2 \cdot t_{int})^2 - (D_i)^2] \cdot \rho_{int} \cdot g \cdot L_{pj} \quad (2.10)$$

W_{ic} : berat *coating* internal (N)

ρ_{int} : densitas *coating* internal pipa (kg/m^3)

g : percepatan gravitasi (m/s^2)

L_{pj} : panjang antar *joint* pipa (m)

b. Berat *corrosion coating*

$$W_{cc} = \frac{\pi}{4} [(D_o + 2 \cdot t_{cc})^2 - (D_o)^2] \cdot \rho_{cc} \cdot g \cdot L_{pj} \quad (2.11)$$

W_{cc} : berat *corrosion coating* (N)

ρ_{cc} : densitas *coating* korosi pipa (kg/m^3)

c. Berat *concrete coating*

Concrete coating pada *pipeline* dapat diterapkan untuk membuat pipa stabil di bawah air. Dapat digunakan *concrete* dengan harga yang paling murah, yang terpenting dapat meningkatkan berat dari pipa dan ketebalan *concrete* di atur sesuai yang dibutuhkan. Peningkatan tebal *concrete* tentunya akan meningkatkan biaya fabrikasi dari *pipeline* tersebut (Lee, 2008).

$$W_{wc} = \frac{\pi}{4} [D_c^2 - (D_0 + 2 \cdot t_{cc})^2] \cdot \rho_{wc} \cdot g \cdot (L_{pj} - 2 \cdot FJ) \quad (2.12)$$

W_{wc} : berat *concrete coating* (N)

ρ_{wc} : densitas *concrete coating* pipa (kg/m^3)

FJ : panjang *field joint cutback* (m)

d. Berat *marine growth*

$$W_m = \frac{\pi}{4} [(D_t)^2 - D_c^2] \cdot \rho_{mar} \cdot g \cdot L_{pj} \quad (2.13)$$

W_m : berat *marine growth* (N)

ρ_{mar} : densitas *marine growth* (kg/m^3)

e. Berat *steel* pipa

$$W_s = A_s \cdot \rho_s \cdot g \cdot L_{pj} \quad (2.14)$$

W_s : berat *steel* pipa (N)

f. Berat isi pipa

$$W_c = A_i \cdot \rho_c \cdot g \cdot L_{pj} \quad (2.15)$$

W_c : berat isi pipa (N)

ρ_c : densitas isi pipa (kg/m^3)

g. Berat *field joint*

Bagian ujung-ujung dari pipa dibiarkan tidak dilapisi *concrete*, untuk memudahkan dalam penyambungan dengan pengelasan ataupun dalam melakukan inspeksi, namun tetap diberikan lapisan *coating* korosi. Bagian tersebut dinamakan *field joint cut back*. Setelah penyambungan pipa dengan pengelasan selesai dilakukan, selanjutnya adalah melapisi bagian tersebut (*field joint coating*) dengan

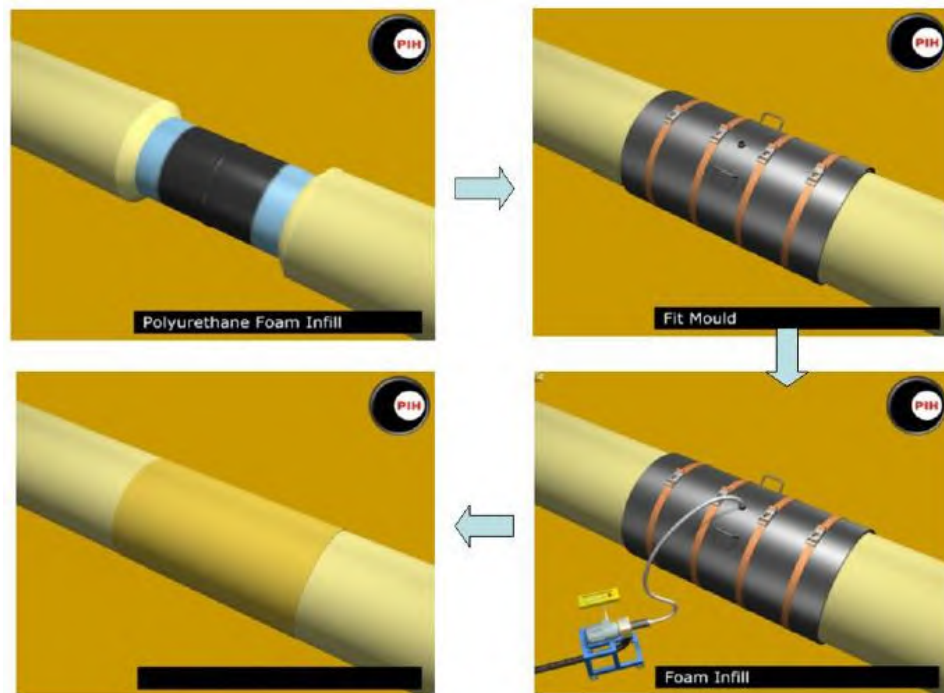
coating anti korosi. Coating tersebut dapat menggunakan lapisan dari epoxy, heat shrink sleeve, kemudian foam, untuk menyetarakan ketebalan dengan concrete pipa (Lee, 2008). Persamaan 2.16 berikut untuk mendapatkan berat bagian *field joint*:

$$W_{fj} = \frac{\pi}{4} [D_c^2 - (D_0 + 2t_{cc})^2] \cdot \rho_{fj} \cdot g \cdot 2FJ \quad (2.16)$$

W_{fj} : berat *field joint* (N)

ρ_{fj} : densitas isi bagian *field joint cutback* (kg/m^3)

Gambar 2.4 berikut ini merupakan gambar ilustrasi pemasangan lapisan untuk bagian *field joint* pada pipeline:



Gambar 2.4. Ilustrasi pemasangan lapisan *field joint* pipa

(Sumber: Lee, 2008)

3. Gravity dan buoyancy

Gravity dan buoyancy pipa merupakan parameter untuk stabilitas pipa bawah laut di atas seabed dan tentunya berada di dalam air. Untuk menghitung kedua parameter tersebut dapat digunakan persamaan berikut ini:

a. Gravity

$$F_G = W_c + W_s + W_{cc} + W_m + W_{wc} + W_{ic} + W_{fj} \quad (2.17)$$

- F_G : *gravity* (N)
 W_c : berat isi pipa (N)
 W_s : berat *steel* pipa (N)
 W_{cc} : berat *corrosion coating* (N)
 W_m : berat *marine growth* (N)
 W_{wc} : berat *concrete coating* (N)
 W_{ic} : berat *coating internal* (N)
 W_{fj} : berat *field joint* (N)

b. *Buoyancy*

$$F_b = m_{add}g \quad (2.18)$$

Atau dapat digunakan Pers. (2.19) berikut:

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

- F_b : *buoyancy* per meter (N/m)
 m_{add} : massa *displacement water* (kg/m)

Untuk mendapatkan nilai *buoyancy* sepanjang *joint* pipa, yaitu dengan mengalikannya dengan panjang pipa untuk setiap *linepipe* tersebut:

$$F_{buoy} = F_b \cdot L_{pj} \quad (2.20)$$

F_{buoy} : *buoyancy* pipa sepanjang *joint* pipa (N)

4. Berat terendam pipa

Jika pipa sudah berada di dalam air, maka akan memiliki berat yang berbeda jika pipa belum masuk di dalam air. Apalagi untuk kondisi operasi yang memiliki berat terendam yang berbeda dengan pipa yang baru selesai digelar. Berat terendam pipa berhubungan dengan *gravity* dan *buoyancy*, persamaan untuk menghitung berat terendam pipa adalah sebagai berikut:

$$W_{sub} = \frac{W_c + W_s + W_{cc} + W_m + W_{wc} + W_{ic} + W_{fj} - F_{buoy}}{L_{pj}} \quad (2.21)$$

W_{sub} : berat terendam pipa (N/m)

6. Tekanan internal dan eksternal pipa

a. Tekanan internal (P_i)

Tekanan internal yang digunakan adalah tekanan desain internal. Menurut DNV-OS-F101 (2013), tekanan desain merupakan tekanan maksimal selama operasi normal pipa yang diizinkan sesuai *pipeline control system* (PCS). Tidak ada tekanan internal untuk kondisi instalasi.

b. Tekanan eksternal (P_e)

Pipa akan terkena tekanan luar berupa tekanan hidrostatik selama terendam. Tekanan luar tersebut akan berpengaruh pada pipa, dan pipa akan merespons tekanan tersebut (Bai dan Bai, 2014). Persamaannya sebagai berikut:

$$P_e = h_t \cdot g \cdot \rho_w \quad (2.27)$$

h_t : kedalaman perairan total (m), termasuk penambahan karena pasang

ρ_w : densitas air (kg/m^3)

$$h_t = d + T_{\text{surge}} \quad (2.28)$$

d : kedalaman perairan (m)

T_{surge} : ketinggian pasang air laut (m)

2.2.1.3. Analisis pada pipa bawah laut

Menurut Kenny dkk (1993), selama waktu operasi dari pipa bawah laut, terdapat 4 jenis kondisi pembebanan yaitu:

a. Instalasi

Kondisi ini mewakili sesaat setelah *pipeline* diinstalasi dan belum dialiri fluida di dalamnya. Beban utama yang bekerja pada pipa selama waktu ini adalah gelombang, arus *steady* dan *self weight*. Kombinasi dari tekanan dan beban *bending*, dihasilkan dari metode instalasi yang digunakan dan formasi dari *span*.

b. Kondisi *water filled*

Kondisi ini terjadi sebelum dan setelah dilakukan *hydrotest* terhadap *pipeline*. Dalam keadaan ini air laut masuk ke dalam pipa. Kenaikan dari berat terendam memberikan *critically effect* terhadap konfigurasi *pipeline* dan kondisi tegangan.

c. *Hydrotest*

Hydrotest dilakukan untuk menguji *pipeline* terhadap tekanan internal, yang mana sesuai dengan desain tekanan operasi yang diberikan. Hasil dari kenaikan berat terendam dan tekanan internal yang sangat tinggi pada kondisi ini akan memberikan beban yang berat terhadap *pipeline*.

d. Kondisi operasi

Setelah instalasi dan pengujian pipa selesai dilakukan, kemudian pipa akan memasuki fase operasi. Selama operasi, pipa mungkin mengalami tekanan internal dan suhu yang tinggi.

Ketika beban tersebut mencapai nilai kritisnya, pipa menjadi tidak stabil dan menghasilkan *displacement* ke berbagai arah seperti *upheavel buckling*, *lateral buckling* atau *axial walking*. Hal ini dapat membahayakan integritas struktur pipa dan menjadikan potensi bahaya untuk jaringan pipa tersebut. Hal ini merupakan permasalahan yang serius sehingga dalam perkembangan fasilitas di dalam laut perlu untuk dilakukan penelitian tentang interaksi pipa (Eton, 2011).

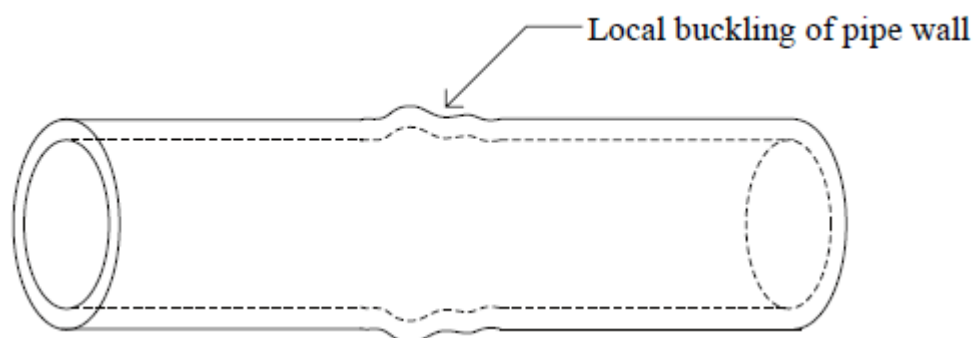
Menurut Bai dan Bai (2014), analisis *pipeline* yang dapat dilakukan mencakup respons global dan kekuatan lokal, seperti berikut:

a. Analisis respons global

- *expansion, effective force, global buckling,*
- respons hidrodinamis,
- *impact*

b. Analisis kekuatan lokal

- *bursting, local buckling,*
- kerusakan karena korosi



Gambar 2.5. Ilustrasi *local buckling*
(Sumber: Ruby dan Hartvig, 2008)

2.2.2. Kondisi dan Beban Lingkungan

2.2.2.1. Arus

Efek dari arus akan berpengaruh pada perancangan pipa bawah laut dalam konstruksi dan operasi. Menurut DNV-RP-C205 (2010), arus dapat menyebabkan beberapa pengaruh terhadap struktur lepas pantai diantaranya:

- Arus dapat memberikan tambahan gaya *drag* dan *lift* pada struktur terendam
- Arus dapat menimbulkan VIV (*Vortex Induced Vibrations*) untuk struktur silinder
- Interaksi arus dan gelombang akan menjadikan perubahan tinggi dan periode gelombang
- Arus dapat menyebabkan *scouring* pada dasar laut

Kecepatan arus rata-rata yang mengenai pipa sesuai dalam DNV-RP-F105 (2006) adalah:

$$U_c = R_c \cdot U(z_r) \frac{(\ln(z) - \ln(z_0))}{(\ln(z_r) - \ln(z_0))} \quad (2.29)$$

U_c : kecepatan arus rata-rata pada lokasi pipa (m/s)

$U(z_r)$: kecepatan arus jauh di atas *seabed* (m/s)

R_c : *reduction factor*

$$R_c = \sin(\theta_{rel}) \quad (2.30)$$

θ_{rel} : arah relatif antara arah *pipeline* dengan arah aliran arus ($^\circ$)

z : elevasi di atas *seabed* (m)

$$z = e + \frac{D_t}{2} \quad (2.31)$$

e : *gap*, jarak pipa dengan tanah (m)

D_t : diameter luar total pipa (m)

z_r : tinggi referensi (m)

$$z_r = D_0 + 2 \cdot t_{wc} + t_{cc} \quad (2.32)$$

D_0 : diameter luar untuk *steel* pipa (m)

t_{wc} : tebal dinding concrete pipa (m)

t_{cc} : tebal coating pipa (m)

z_0 : parameter kekasaran *seabed* (*bottom roughness*) (m), Tabel 2.1

Tabel 2.1. *Seabed roughness*

<i>Seabed</i>	<i>Roughness z_0 (m)</i>
Silt	$\approx 5 \cdot 10^{-6}$
fine sand	$\approx 1 \cdot 10^{-5}$
Medium sand	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$
coarse sand	$\approx 1 \cdot 10^{-4}$
Gravel	$\approx 3 \cdot 10^{-4}$
Pebble	$\approx 2 \cdot 10^{-3}$
Cobble	$\approx 1 \cdot 10^{-2}$
Boulder	$\approx 4 \cdot 10^{-2}$

(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

2.2.2.2. Gelombang

Gelombang laut merupakan suatu fenomena alam yang sangat menarik dan dinamis, dapat memiliki pola yang indah jika dilihat, namun menakutkan saat kondisi laut mengganas. Referensi numerik yang umum digunakan untuk mengukur dan menjelaskan tingkat keganasan lautan pada suatu waktu tertentu adalah *sea state* (Djarmiko, 2012).

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

Gelombang yang mengakibatkan kondisi aliran berosilasi dapat dihitung dengan menggunakan teori numerik atau analisis gelombang. Teori gelombang harus dapat mendiskripsikan kondisi di lokasi pipa. Untuk kasus yang praktis, teori gelombang linear dapat diterapkan. Kondisi laut yang acak, stasioner, dan kurun waktu pendek dapat dijelaskan dengan menggunakan spektrum gelombang. Spektra yang sering digunakan adalah spektra JONSWAP (DNV-RP-F105, 2006).

➤ Spektra gelombang JONSWAP

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

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \gamma \exp\left(-0.5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right), \quad (2.33)$$

- $S_{\eta\eta}$: spektra gelombang
 ω : frekuensi *angular* gelombang (rad/s)
 ω_p : frekuensi *angular* puncak gelombang (rad/s)
 T_w : periode gelombang (s)
 T_p : periode puncak gelombang (s)
 α : konstanta Generalised Phillips
 g : percepatan gravitasi (m/s^2)
 γ : parameter ketinggian atau *peakedness parameter*
 σ : lebar spektral

- Konstanta Generalised Phillips:

$$\alpha = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega_p^4}{g^2} \cdot (1 - 0.287 \ln \gamma) \quad (2.34)$$

H_s : tinggi gelombang signifikan (m)

- Parameter lebar spektra:

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0.09 & \text{untuk yang lainnya} \end{cases} \quad (2.35)$$

- *Peak-enhancement factor*:

$$\gamma = \begin{cases} 5 & \varphi \leq 3.6 \\ \exp(5.75 - 1.15\varphi) & 3.6 < \varphi < 5 \\ 1 & \varphi \geq 5 \end{cases} \quad (2.36)$$

φ : fungsi distribusi

$$\varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \quad (2.37)$$

➤ Transformasi spektra gelombang

Wave-induced velocity spectrum pada level atau letak pipa pada dasar laut $S_{UU}(\omega)$ ditentukan dengan transformasi spektra gelombang pada permukaan menggunakan teori gelombang orde 1:

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) S_{\eta\eta}(\omega) \quad (2.38)$$

S_{UU} : spektra kecepatan gelombang di *pipe level*

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

$$G(\omega) = \frac{\omega \cdot \cosh(k \cdot (D_t + e))}{\sinh(k \cdot d)} \quad (2.39)$$

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

d : kedalaman perairan (m)

k : angka gelombang

D_t : diameter luar pipa (m)

e : *seabed gap* (m)

- *Transcendental equation* untuk iterasi:

$$kh = \frac{\omega^2 \cdot h}{g} \coth(k \cdot h) \quad (2.40)$$

- Momen spektra pada orde ke-n (M_n) didefinisikan dengan:

$$M_n = \int_0^\infty \omega^n \cdot S_{UU}(\omega) d\omega \quad (2.41)$$

- Kecepatan aliran gelombang signifikan pada pipa adalah:

$$U_s = 2\sqrt{M_0} \quad (2.42)$$

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

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \quad (2.43)$$

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

$$U_w = U_s \cdot R_D \quad (2.44)$$

U_w : kecepatan normal aliran pipa signifikan, koreksi untuk arah gelombang dan sebaran gelombang (m/s)

U_s : kecepatan arus dari gelombang signifikan (m/s)

R_D : *reduction factor* akibat pengaruh arah dan sebaran gelombang

- *Reduction factor*

Untuk menghitung *reduction factor* dapat digunakan persamaan seperti berikut:

$$R_D = \sqrt{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} w(\beta) \sin^2(\theta_{rel} - \beta) d\beta} \quad (2.45)$$

w : fungsi sebaran energi gelombang

$$w(\beta) = \begin{cases} k_w \cos^s(\beta) & \text{untuk } |\beta| < \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{untuk yang lainnya} \end{cases} \quad (2.46)$$

k_w : normalisation constant

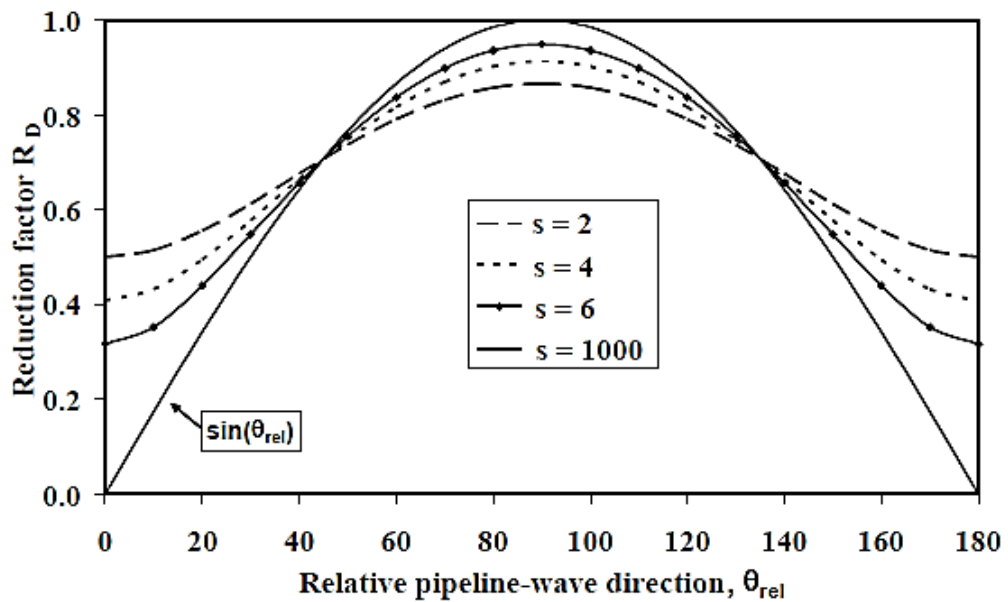
$$k_w = \sqrt{\frac{1}{\pi} \frac{\Gamma(1+\frac{s}{2})}{\Gamma(\frac{1+s}{2})}} \quad (2.47)$$

Γ : fungsi gamma

s : spreading parameter

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (2.48)$$

Untuk memudahkan mendapatkan nilai *reduction factor*, dapat menggunakan grafik pada Gambar 2.6 di bawah ini:



Gambar 2.6. Grafik untuk mendapatkan *reduction factor*

(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

Dalam DNV-RP-F105 (2006), disebutkan bahwa jika tidak ada informasi yang valid mengenai nilai *spreading parameter* (s) maka dapat dimasukkan nilai antara 2 dan 8.

➤ Beban dan koefisien beban

- Gaya drag

Gaya drag dipengaruhi oleh gelombang dan arus laut. Gaya drag menghasilkan tekanan yang tinggi di depan pipa dan tekanan yang rendah di

belakang pipa. Namun, gelombang juga menimbulkan pusaran air di belakang pipa yang mempengaruhi besarnya gaya *drag*.

- Gaya inersia

Gelombang menghasilkan beban siklis melalui partikel air. Beban siklis tersebut akan mengurangi atau menambah kecepatan air. Pipa akan memberikan gaya untuk menolak perubahan kecepatan partikel air yang bekerja pada pipa.

- Gaya angkat (*lift*)

Gaya angkat muncul karena ada aliran yang bekerja pada pipa. Keberadaan dasar laut di bawah pipa mengakibatkan perbedaan bentuk aliran air di atas dan di bawah pipa. Hal tersebut membuat aliran menjadi lambat/tidak ada di bagian bawah pipa (tekanan tinggi) dan aliran di atas pipa semakin cepat (tekanan rendah). Perbedaan tekanan di bagian bawah dan atas pipa akan menyebabkan pipa terangkat. Beban hidrodinamis dari gelombang dan arus laut dijelaskan dengan Pers. (2.49 – 2.51) Morison berikut:

- Gaya *drag*

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D_t \cdot C_D \cdot U_{tot}^2 \quad (2.49)$$

- Gaya inersia

$$F_I = (\pi \cdot D_t^2) / 4 \cdot \rho_w \cdot C_M \cdot a_s \cdot \sin \theta \quad (2.50)$$

- Gaya angkat

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D_t \cdot C_L \cdot (U_s \cdot \cos \theta + U_c)^2 \quad (2.51)$$

F_D : gaya *drag* (N)

F_I : gaya inersia (N)

F_L : gaya angkat (N)

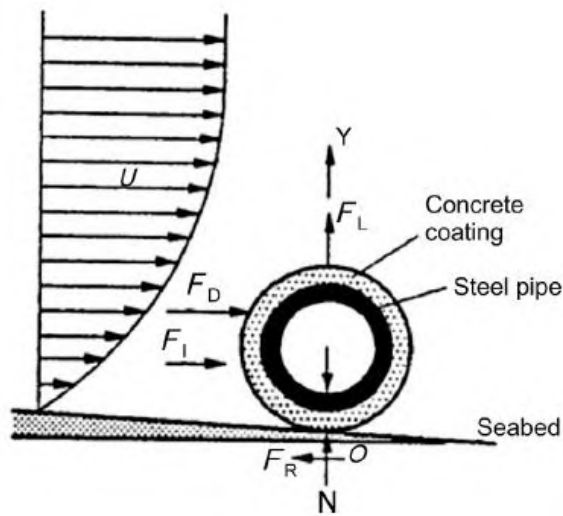
C_D : koefisien gaya *drag*

C_M : koefisien gaya inersia

C_L : koefisien gaya angkat

a_s : percepatan signifikan partikel air yang mengenai pipa (m/s^2)

Gaya tersebut jika dilustrasikan pada posisi pipa adalah seperti Gambar 2.7 berikut:



Gambar 2.7. Gaya hidrodinamis
(Sumber: Bai dan Bai, 2014)

Dalam analisis nantinya, gaya *drag* digunakan sebagai beban untuk persamaan menentukan *static deflection* arah *in-line*, sehingga gaya *drag* perlu untuk dilakukan perhitungan (untuk gaya yang lain tidak dipergunakan dalam analisis). Menghitung koefisien gaya *drag* sesuai dengan DNV-RP-F105 (2006) memiliki persamaan seperti berikut:

$$C_D = C_D^0(k/D) \cdot \psi_{KC,\alpha}^{CD} \cdot \psi_{proxi}^{CD} \cdot \psi_{trench}^{CD} \cdot \psi_{VIV}^{CD} \quad (2.52)$$

- $C_D^0(k/D)$: koefisien *drag* umum untuk aliran *steady*
- $\psi_{KC,\alpha}^{CD}$: faktor koreksi untuk aliran yang tidak *steady*
- ψ_{proxi}^{CD} : faktor koreksi untuk lokasi yang dekat dengan dasar laut
- ψ_{trench}^{CD} : faktor koreksi karena pengaruh *trench* pada pipa
- ψ_{VIV}^{CD} : faktor tambahan selama pipa mengalami getaran *cross-flow*

a. Koefisien *drag* umum

Koefisien ini merupakan fungsi dari kekasaran permukaan pipa (k/D), persamaannya adalah sebagai berikut (Pers. 2.53):

$$C_D^0(k/D_t) = \begin{cases} 0.65 & \text{untuk } \frac{k}{D_t} < 10^{-4} & (2.53a) \\ 0.65 \left(\frac{29}{13} + \frac{4}{13} \log_{10} \left(\frac{k}{D_t} \right) \right) & \text{untuk } 10^{-4} < \frac{k}{D_t} < 10^{-2} & (2.53b) \\ 1.05 & \text{untuk } \frac{k}{D_t} > 10^{-2} & (2.53c) \end{cases}$$

D_t merupakan diameter luar pipa, sedangkan k adalah kekasaran permukaan pipa. Untuk mendapatkan nilai k , tergantung pada kekasaran permukaan pipa yang akan dianalisis. Nilai k dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut:

Tabel 2.2. Kekasaran permukaan pipa

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

(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

b. Faktor koreksi untuk aliran tidak *steady*

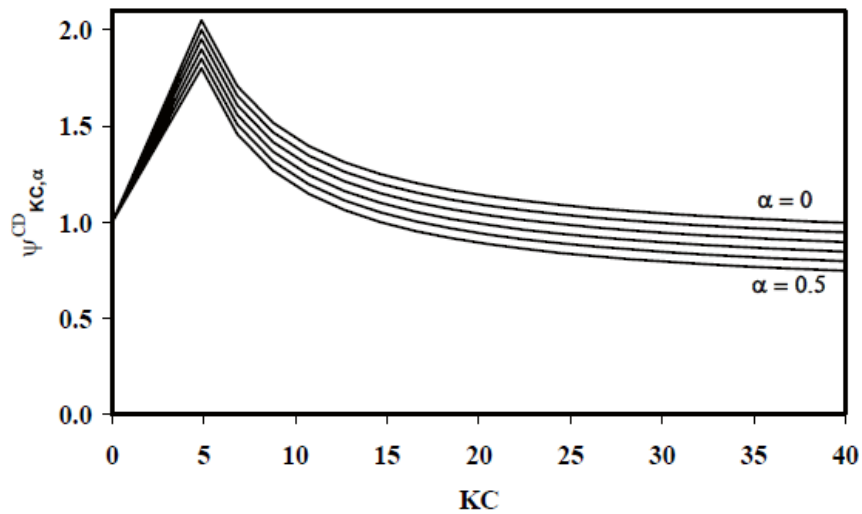
Menurut DNV-RP-F105 (2006), faktor ini merupakan pengaruh dari nilai Keulegan-Carpenter dan rasio aliran. Persamaannya adalah sebagai berikut (untuk $5 < KC < 40$):

$$\psi_{KC,\alpha}^{CD} = \begin{cases} 0.85 + \frac{6}{KC} - \frac{\alpha}{2} & \text{untuk } \alpha \leq 0.5 & (2.54a) \\ 0.6 + \frac{6}{KC} & \text{untuk } \alpha > 0.5 & (2.54b) \end{cases}$$

KC : Keulegan-Carpenter number, Pers. (2.61)

α : rasio aliran arus, Pers. (2.62)

Untuk $KC > 40$, untuk nilai $6/KC$ pada persamaan di atas dapat diisi nilai 0.15. Sedangkan untuk $KC < 5$, dapat menggunakan grafik pada Gambar 2.8 di bawah ini dan melakukan interpolasi. Persamaan KC dapat dilihat pada Pers. (2.61).



Gambar 2.8. Faktor koreksi aliran untuk $KC < 5$

(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

c. Faktor koreksi karena letaknya yang dekat dengan dasar laut
Persamannya adalah sebagai berikut (DNV-RP-F105, 2006):

$$\psi_{proxi}^{CD} = \begin{cases} 0.9 + \frac{0.5}{\left(1 + 5 \cdot \left(\frac{e}{D_t}\right)\right)} & \text{untuk } \frac{e}{D_t} < 0.8 \\ 1 & \text{untuk yang lainnya} \end{cases} \quad (2.55a)$$

(2.55b)

d. Faktor koreksi karena pengaruh *trench* pada lokasi pipa
Persamaan untuk mendapatkan nilai tersebut adalah seperti berikut:

$$\psi_{trench}^{CD} = 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{\Delta}{D_t}\right) \quad (2.56)$$

$\frac{\Delta}{D_t}$: kedalaman relatif *trench*

e. Faktor koreksi tambahan selama mengalami getaran *cross-flow*

$$\psi_{VIV}^{CD} = 1 + 1.043 \left(\sqrt{2} \frac{A_z}{D_t}\right)^{0.65} \quad (2.57)$$

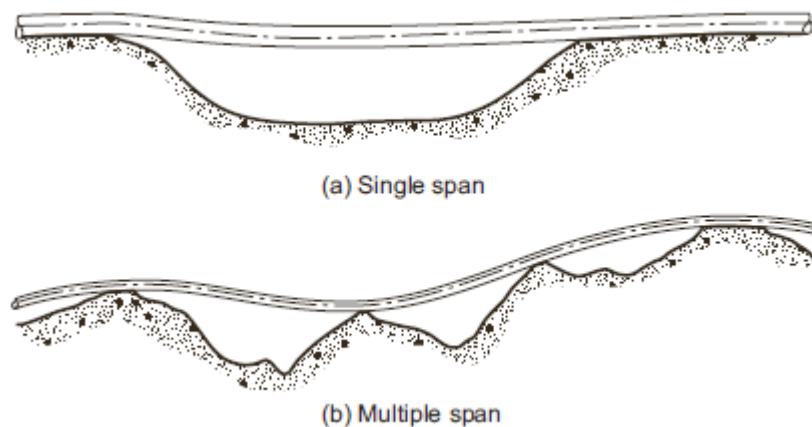
$\frac{A_z}{D_t}$: amplitudo normal VIV arah *cross-flow*, Gambar 2.15

Untuk mendapatkan nilai $\frac{A_z}{D_t}$ dapat menggunakan grafik pada Gambar 2.15 yang berada pada bagian *response model*.

2.2.3. Free Span

2.2.3.1. Free span secara umum

Konfigurasi pipa di dasar laut tergantung dari profil topografi dasar laut, jenis tanah, tegangan sisa, kekakuan pipa, dan berat terendamnya. *Free span* pada *pipeline* berarti sebagian dari pipa tersebut tidak didukung atau ditahan oleh dasar laut. Pipa cenderung membentuk *span* atau bentangan daripada mengikuti topografi dasar laut karena topografinya yang sangat tidak teratur atau kasar. *Span* pada pipa dapat terbentuk karena penyimpangan selama instalasi, *scouring* (penggerusan) dan gerakan horizontal pipa selama operasi. Jenis *span* pada *pipeline* tidak hanya bentangan tunggal (*single span*), namun juga beberapa bentangan (*multi span*). *Multi span* yang berdekatan dapat saling berpengaruh atau saling berinteraksi (Bai dan Bai, 2014).

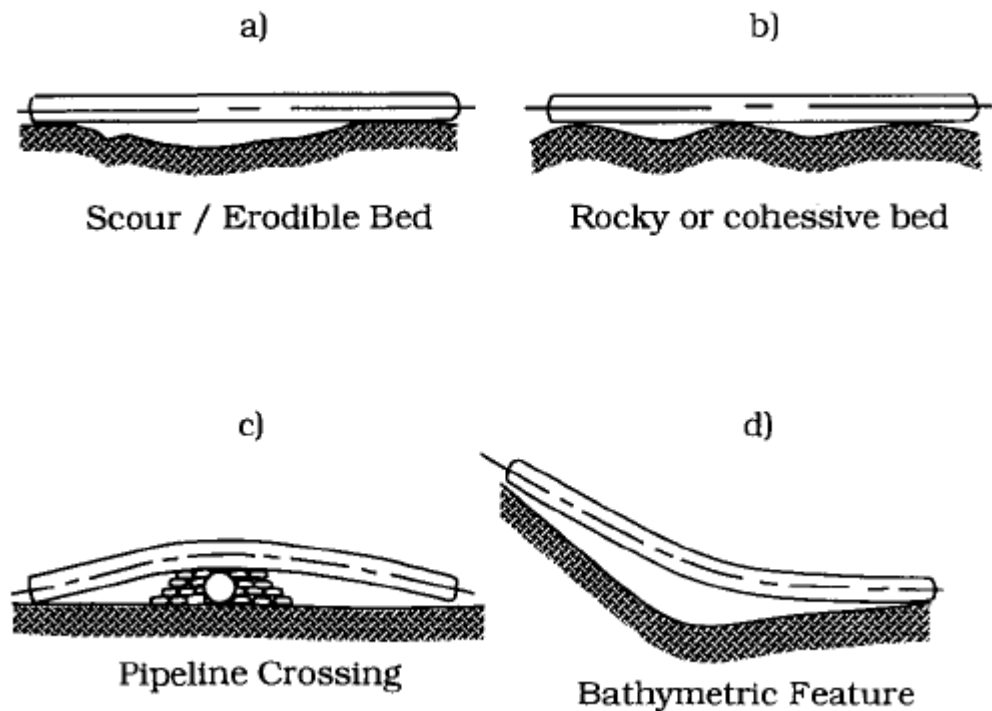


Gambar 2.9. Tipe *span*

(Sumber: Bai dan Bai, 2014)

Menurut DNV-RP-F105 (2006), *free span* dapat dibagi menjadi dua kategori utama yaitu:

- a. *Scouring* yang menyebabkan *free span*, yang terjadi karena erosi dasar laut. Parameter *free span* dapat berubah dengan waktu yaitu panjang *span*, *gap ratio*, dan yang lainnya.
- b. *Free span* yang terjadi karena dasar laut yang tidak merata atau tidak teratur.



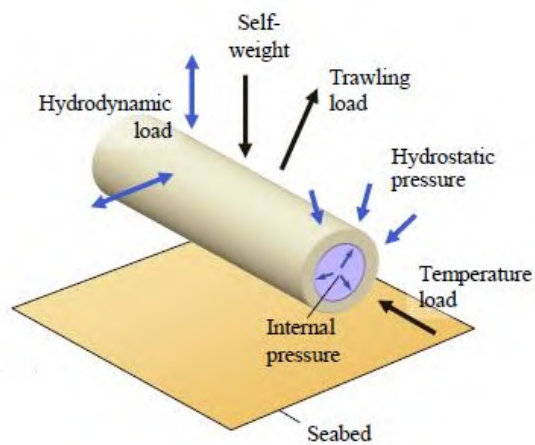
Gambar 2.10. Skenario *pipeline free span*
 (Sumber: Orgill dkk, 1992 dalam Sumer dan Fredsøe, 2006)

Free span biasanya dipengaruhi oleh gerakan dasar laut, pengaruh arus, dan gelombang. Analisis *free span* pada pipa bawah laut merupakan masalah yang kompleks yang berhubungan dengan bidang hidrodinamika, mekanika tanah, dan analisis struktur (Elshafey dkk, 2011).

Beban yang mempengaruhi *free span* menurut Ruby dan Hartvig (2008) yaitu:

- a. *Self weight* yaitu beban statis vertikal karena pengaruh gravitasi dan massa pipa dengan *coating*, fluida di dalamnya atau mungkin *marine growth*. Berat *self weight* terbesar saat di dalamnya berisi air (saat *water filled*), karena densitas air lebih besar dari pada minyak dan gas.
- b. *Trawling load* yaitu beban karena pengaruh kecelakaan dari *trawling* (pukat).
- c. *Temperature load* yaitu beban aksial statis selama pipa beroperasi karena perbedaan suhu antara isi pipa dengan air di sekitar atau luar pipa.
- d. *Internal pressure* yaitu tekanan statis yang mempengaruhi permukaan bagian dalam dinding pipa yang terjadi selama pipa beroperasi.
- e. *Hydrostatic pressure* yaitu tekanan statis yang mempengaruhi permukaan luar pipa karena pengaruh dari tekanan air dasar laut.

- f. *Hydrodynamic load* yaitu beban dinamis yang timbul karena medan aliran di sekitar *free span* yaitu arus dan gelombang.



Gambar 2.11. Tipe beban pada *free span*

(Sumber: Ruby dan Hartvig, 2008)

2.2.3.2. Panjang *free span* efektif dan maksimum yang diizinkan

Menurut Bai dan Bai (2014) bentangan pada *pipeline* memiliki pengaruh yang besar terhadap keamanan dan integritas pada operasi pipa. Panjang *span* dapat diprediksi sebelum melakukan instalasi dengan sebelumnya mengumpulkan data dari survei bawah laut sepanjang rute pipa yang direncanakan. Panjang *span pipeline* harus memenuhi beberapa kriteria yaitu tegangan statis, *vortex induced vibrations* (VIV), dan kerusakan karena kelelahan, serta *buckling*. Untuk setiap kriteria, panjang *span* yang diizinkan umumnya dihitung untuk beberapa kondisi berikut yaitu:

- a. Kondisi instalasi
- b. Kondisi *hydrotest*
- c. Kondisi operasi

Dalam kasus *scouring* yang menyebabkan *free span*, jika tidak ada informasi rinci untuk menentukan panjang *span* maksimum, *gap ratio*, dan waktu pemaparan, berlaku hal berikut (DNV-RP-F105, 2006):

- a. Dalam kondisi *uniform* dan tidak ada detail kontur dasar laut, panjang maksimum mungkin dapat diambil dari panjang yang menghasilkan defleksi statis pada tengah *span* untuk satu diameter luar.
- b. Waktu pemaparan dapat diambil dari waktu operasi yang tersisa dari umur pipa, kerusakan sebelumnya harus disertakan.

Menurut Chakrabarti (2005), penentuan panjang bentangan pipa yang diizinkan harus mempertimbangkan lima kriteria berikut:

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

Bentang dari empat kriteria pertama dipertimbangkan untuk menghitung rentang maksimal bentangan yang diizinkan, mengevaluasi analisis *bottom roughness*, atau mengevaluasi analisis pipa *crossing*. Kriteria terakhir dilibatkan untuk analisis kelelahan untuk meningkatkan panjang *span* karena *in-line* VIV.

Menurut DNV-RP-F105, persamaan untuk menghitung panjang efektif *span* adalah:

$$\frac{L_{eff}}{L} = \frac{4.73}{-0.066\beta^2 + 1.02\beta + 0.63} \quad \text{untuk } \beta \geq 2.7 \quad (2.58a)$$

$$\frac{L_{eff}}{L} = \frac{4.73}{0.036\beta^2 + 0.61\beta + 1.0} \quad \text{untuk } \beta < 2.7 \quad (2.58b)$$

dengan,

$$\beta = \log_{10} \left(\frac{K \cdot L^4}{(1 + CSF) EI_{steel}} \right) \quad (2.59)$$

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

L : panjang aktual *free span* (m)

β : *relative soil stiffness parameter*

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

CSF : faktor kekakuan *concrete*, Pers (2.84)

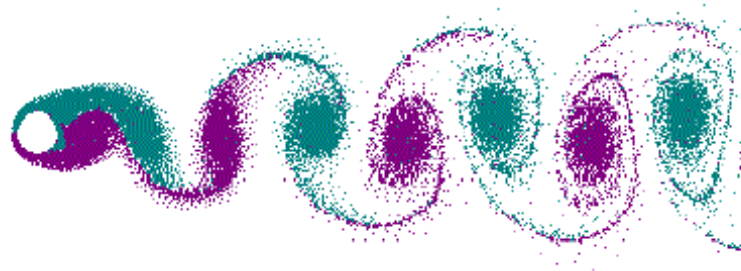
E : *Young's modulus* untuk *steel* (N/m^2)

I_{steel} : momen inersia dari *steel* (m^4)

2.2.4. Vortex Induced Vibration (VIV)

2.2.4.1. Parameter hidrodinamika untuk VIV

Vortex merupakan suatu aliran dimana partikel fluidanya berotasi pada aliran rotasinya terhadap titik pusatnya. Pelepasan *vortex* disebut *vortex shedding*, yang mempunyai kecepatan transversal dan tangensialnya konstan dan bervariasi terhadap radiusnya (Indiyono, 1994).



Gambar 2.12. Visualisasi VIV

(Sumber: Lee, 2008)

Beberapa parameter VIV adalah sebagai berikut (DNV-RP-F105, 2006):

a. *Reduced velocity* (V_R)

$$V_R = \frac{U_c + U_w}{f_n D_t} \quad (2.60)$$

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

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

f_n : frekuensi natural (Hz), Pers. (2.83)

D_t : diameter luar pipa (m)

b. Keulegan-Carpenter *number* (KC)

$$KC = \frac{U_w}{f_w D_t} \quad (2.61)$$

f_w : frekuensi gelombang signifikan (Hz)

c. *Current flow velocity ratio* (α)

$$\alpha = \frac{U_{c,100 \text{ tahun}}}{U_{c,100 \text{ tahun}} + U_{w,1 \text{ tahun}}} \quad (2.62)$$

d. *Stability parameter* (K_s)

$$K_s = \frac{4\pi m_e \zeta_T}{\rho_w D_t^2} \quad (2.63)$$

m_e : massa efektif pipa per satuan panjang (kg/m), Pers (2.25)

ζ_T : total modal *damping ratio*, Pers. (2.65)

ρ_w : densitas air (kg/m³)

Untuk meningkatkan keamanan, maka perlu diperhitungkan *safety factor* sesuai DNV-RP-F105:

$$K_{sd} = \frac{K_s}{\gamma_k} \quad (2.64)$$

K_{sd} : parameter stabilitas dengan sudah mempertimbangkan *safety factor*

γ_k : *safety factor* untuk parameter stabilitas, Tabel 2.3

➤ Total modal *damping ratio*

$$\zeta_T = \zeta_{str} + \zeta_h + \zeta_{soil} \quad (2.65)$$

ζ_{str} : *structural damping*

ζ_h : *hydrodynamic damping*

ζ_{soil} : *soil damping*

➤ *Structural damping*

Structural damping terjadi karena gesekan internal dari material pipa. Jika tidak ada informasi mengenai *detail structural modal damping* dapat diasumsikan dengan nilai berikut sesuai DNV-RP-F105 yaitu:

$$\zeta_{str} = 0.005 \quad (2.66)$$

Jika terdapat *concrete*, maka geser pada permukaan *concrete* dan *corrossion coating* dapat meningkatkan *damping* menjadi 0.01-0.02.

➤ *Hydrodynamic damping*

$$\zeta_h = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sigma_u g_D}{m_{efn}} g_c \left(\frac{U_c}{\sigma_u} \right) \lambda_1 \quad (2.67)$$

σ_u : standar deviasi

g_D : bagian gaya *drag*

g_c : fungsi koreksi untuk arus *steady*

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

f_n : frekuensi natural (Hz)

λ_1 : *mode shape* faktor berat

Sesuai yang disarankan pada DNV-RP-F105, nilai dari *damping* hidrodinamis adalah nol (ζ_h : 0.00), dikarenakan faktor VIV untuk *lock-in regional*.

➤ *Soil damping*

Damping untuk tanah dapat dilihat pada 2.2.6.1, dan pada Tabel 2.6 untuk tanah pasir, dan Tabel 2.7 untuk tanah *clay*. Namun jika tujuan analisis untuk *screening*, nilai dari *soil damping* dapat dimasukkan 0.01 (ζ_{soil} : 0.01) sesuai pada DNV-RP-F105 (2006).

e. *Reynolds number (Re)*

$$Re = \frac{U_{tot} D_t}{\nu_u} \quad (2.68)$$

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

ν_u : viskositas kinematis air (m^2/s), [1.5×10^{-6} (m^2/s)]

f. *Vortex shedding frequency (f_s)*

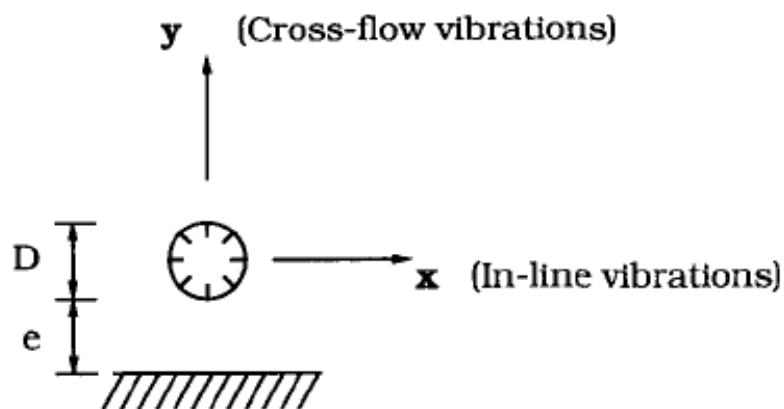
Adanya arus di dasar laut dapat menyebabkan tegangan dinamis yang signifikan, jika interaksi struktur fluida (*vortex shedding*) dalam area *free span* dapat menyebabkan *pipeline* untuk beresilasi. Osilasi ini dapat menyebabkan kelelahan pada pipa, yang mana mengurangi umur pipa tersebut (Guo dkk, 2014).

$$f_s = S_t \frac{U_{tot}}{D_t} \quad (2.69)$$

S_t : *strouhal number* (silinder bulat = 0.2)

U_{tot} : kecepatan partikel air (m/s)

2.2.4.2. *Response model*



Gambar 2.13. *In-line dan cross flow vibration*

(Sumber: Sumer dan Fredsøe, 2006)

a. *In-line response model*

Respons *in-line* pada *free span pipeline* dalam kondisi arus dominan adalah berkaitan dengan salah satu dari *vortex shedding* bolak-balik atau simetris (DNV-RP-F105, 2006).

➤ *Stress range* pada *in-line* VIV

$$S_{IL} = 2 \cdot A_{IL} \cdot (A_Y/D) \cdot \psi_{\alpha,IL} \cdot \gamma_s \quad (2.70)$$

dimana,

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

A_{IL} : *unit stress amplitude (in-line)* (Pa), Pers. (2.80)

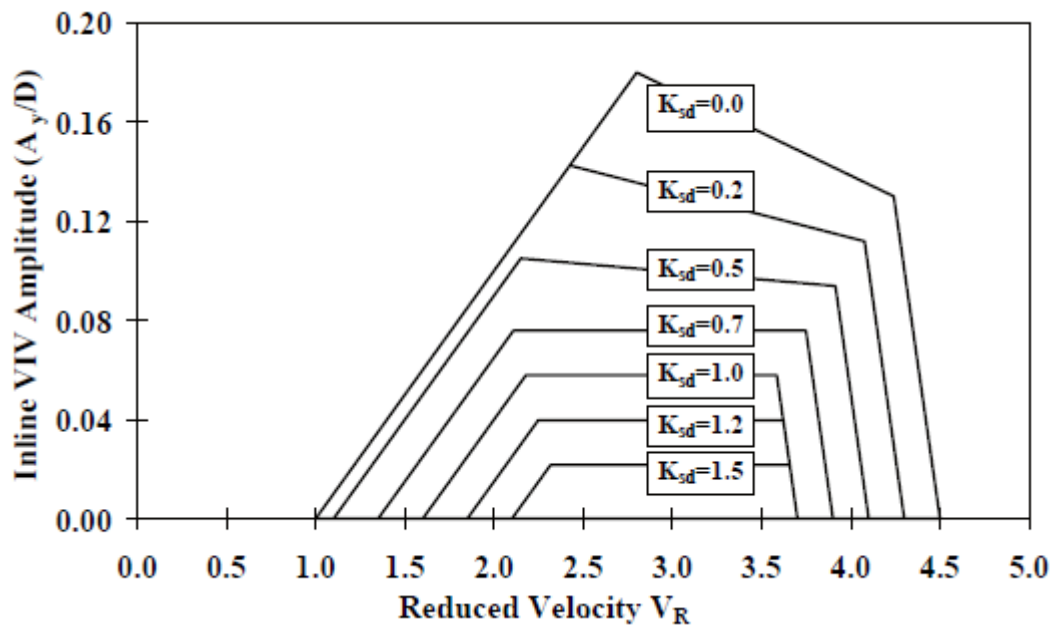
(A_Y/D) : amplitudo respons maksimal *in-line* VIV

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

γ_s : faktor keamanan untuk *stress range*

Nilai dari γ_s dapat dilihat pada Tabel 2.3 di bagian *safety factor*.

Nilai (A_Y/D) dapat didapatkan dengan grafik di bawah ini yang merupakan fungsi dari V_R dan K_S :



Gambar 2.14. Amplitudo respons *in-line* VIV terhadap V_R dan K_S

(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

Nilai untuk faktor koreksi dari rasio aliran arus, didapatkan dengan persamaan berikut:

$$\psi_{\alpha,IL} = \begin{cases} 0.0 & \text{untuk } \alpha < 0.5 \\ (\alpha - 0.5)/0.3 & \text{untuk } 0.5 < \alpha < 0.8 \\ 1.0 & \text{untuk } \alpha > 0.8 \end{cases} \quad (2.71)$$

➤ *Reduce velocity* untuk arah *in-line*

$$V_{R,onset}^{IL} = \left(\frac{1.0}{\gamma_{on,IL}} \right) \quad \text{untuk } K_{sd} < 0.4 \quad (2.72a)$$

$$V_{R,onset}^{IL} = \left(\frac{0.6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} \right) \quad \text{untuk } 0.4 < K_{sd} < 1.6 \quad (2.72b)$$

$$V_{R,onset}^{IL} = \left(\frac{2.2}{\gamma_{on,IL}} \right) \quad \text{untuk } K_{sd} > 1.6 \quad (2.72c)$$

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

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

K_{sd} : parameter stabilitas dengan sudah mempertimbangkan *safety factor*

b. *Cross-flow response model*

➤ *Stress Range cross flow VIV*

$$S_{CF} = 2 \cdot A_{CF} \cdot (A_Z/D) \cdot R_k \cdot \gamma_s \quad (2.73)$$

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

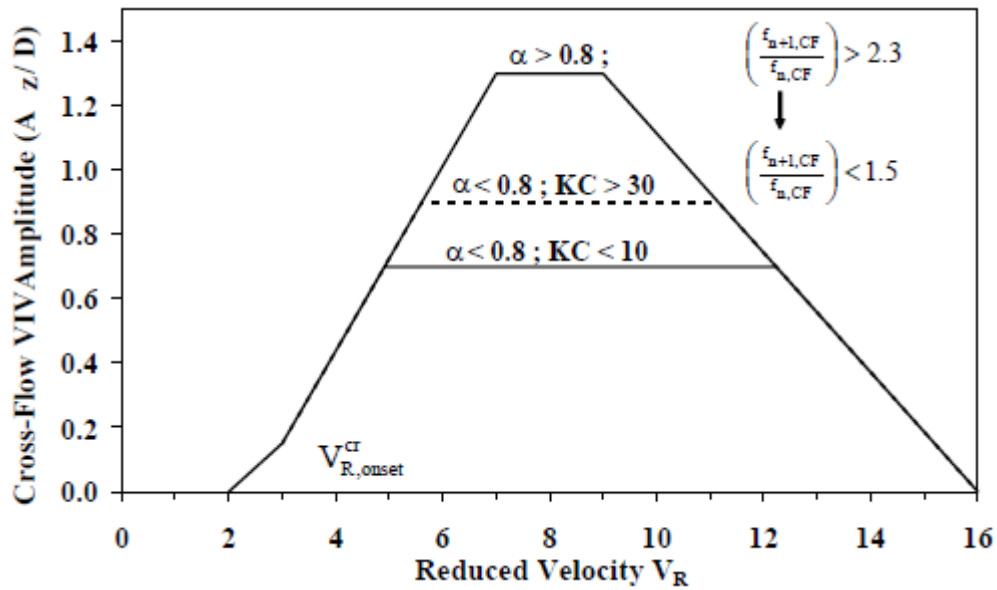
A_{CF} : *unit stress amplitude* (Pa)

(A_Z/D) : amplitudo *cross-flow VIV*, Gambar 2.15

R_k : *amplitude reduction factor* untuk *damping*

γ_s : faktor keamanan untuk *stress range*

Nilai (A_z/D) didapatkan dari grafik di bawah ini:



Gambar 2.15. Respons model *cross-flow*

(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

Untuk mendapatkan nilai *amplitude reduction factor* untuk *damping*, dapat digunakan persamaan berikut sesuai DNV-RP-F105 (2006):

$$R_k = \begin{cases} 1 - 0.15K_{sd} & \text{untuk } K_{sd} \leq 4 \\ 3.2K_{sd}^{-1.5} & \text{untuk } K_{sd} > 4 \end{cases} \quad (2.74a)$$

$$(2.74b)$$

➤ *Reduce velocity* untuk arah *cross-flow*

$$V_{R,onset}^{CF} = \left(\frac{3^{\psi_{proxi,onset}} \cdot \psi_{trench,onset}}{\gamma_{on,CF}} \right) \quad (2.75)$$

$V_{R,onset}^{CF}$: *reduce velocity cross flow*

$\psi_{proxi,onset}$: faktor koreksi untuk *cross flow* dekat *seabed*

$\psi_{trench,onset}$: *reduction factor* untuk *cross flow* karena pengaruh *trench*

$\gamma_{on,CF}$: *safety factor* untuk *cross flow*

- Faktor koreksi

$$\psi_{proxi,onset} = \frac{1}{5} \left(4 + 1.25 \frac{e}{D_t} \right) \quad \text{untuk } e/D_t < 0.8 \quad (2.76a)$$

$$\psi_{proxi,onset} = 1 \quad \text{untuk yang lainnya} \quad (2.76b)$$

- *Reduction factor* karena pengaruh *trench*

$$\psi_{trench,onset} = 1 + 0.5 \frac{\Delta}{D_t} \quad (2.77)$$

dengan,

$$0 \leq \frac{\Delta}{D_t} \leq 1$$

dimana,

$$\frac{\Delta}{D_t} = \frac{1.25 d_{trench} - e}{D_t} \quad (2.78)$$

$$\frac{\Delta}{D_t} = 0 \quad \text{jika } d_{trench} = 0 \quad (2.79)$$

- *Maximum (unit diameter) stress amplitude*

$$A_{IL/CF} = C_4 (1 + CSF) \frac{D_t (D_0 - t_{nom}) \cdot E}{I_{eff}^2} \quad (2.80)$$

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

C_4 : *boundary condition*

D_0 : *outer steel diameter (m)*

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

2.2.4.3. Screening frekuensi natural

Free span dapat menyebabkan kegagalan pipa karena melebihi *yield* dan *fatigue*. Kegagalan *free span* ini juga dipengaruhi oleh aktifitas manusia seperti penurunan jangkar. *Free span* dapat terjadi karena *unsupported weight* dari bagian pipa dan beban dinamis dari gelombang dan arus. Dalam kondisi resonansi, osilasi akan menyebabkan kelelahan pipa dan akhirnya dapat terjadi bencana kegagalan.

Osilasi ini biasanya *in-line* dengan arah aliran, tetapi juga dapat melintang (*cross flow*), tergantung pada kecepatan arus dan panjang bentang (Guo dkk, 2014).

Kehadiran arus bawah dapat menyebabkan tegangan dinamis yang signifikan, jika fluida struktur berinteraksi (*vortex shedding*) dalam area *free span* dapat menyebabkan pipa berosilasi. Osilasi ini dapat mengakibatkan kelelahan pada sambungan pipa, yang mana mengurangi umur *pipeline*. Frekuensi *vortex shedding* merupakan fungsi dari diameter pipa, kecepatan arus, dan *strouhal number*. Jika frekuensi *vortex shedding* (juga disebut frekuensi *strouhal*) disinkronkan dengan salah satu frekuensi alami dari *pipeline span*, maka terjadi resonansi dan getaran pipa *span*. Kegagalan pipa karena *vortex motion* dapat dicegah jika frekuensi *vortex shedding* cukup jauh dari frekuensi alami *span* pipa sehingga osilasi dinamis pipa diminimalkan (Guo dkk, 2014).

Aliran arus dan arus karena gelombang di sekitar *free span* pipa menghasilkan pusaran yang disebut *vortex shedding*. Pusaran terbentuk dari aliran atas dan bawah pipa, hal ini mengakibatkan gaya osilasi pada *free span pipeline*. Jika frekuensi dari *vortex shedding* mendekati frekuensi natural pipa, maka resonansi dapat terjadi. Resonansi ini dapat menyebabkan kegagalan kelelahan pipa dan dapat menyebabkan lapisan *concrete* pada pipa retak atau lepas. Evaluasi dari potensi *span* yang mengakibatkan resonansi didasarkan pada perbandingan frekuensi *vortex shedding* dan frekuensi natural dari *free span pipeline* (Bai dan Bai, 2014).

➤ *Screening criteria*

Frekuensi natural *in-line* harus memenuhi:

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{c,100 \text{ tahun}}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D_t} \cdot \left(1 - \frac{L/D_t}{250}\right) \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (2.81)$$

$f_{n,IL}$: frekuensi natural *in-line* (Hz), Pers. (2.83)

γ_{IL} : *safety factor (in-line)*, Tabel 2.4

$U_{c,100 \text{ tahun}}$: periode ulang 100 tahun untuk arus laut (m/s)

$V_{R,onset}^{IL}$: *in-line onset value*, Pers. (2.72)

L : panjang *free span* aktual (m)

α : *current flow ratio*, Pers. (2.62)

Frekuensi natural *cross-flow* harus memenuhi:

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100 \text{ tahun}} + U_{w,1 \text{ tahun}}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D_t} \quad (2.82)$$

$f_{n,CF}$: frekuensi natural *cross flow* (Hz)

γ_{CF} : *safety factor (cross flow)*, Tabel 2.4

$U_{w, 1 \text{ tahun}}$: periode ulang signifikan 1 tahun untuk *wave induce velocity* (m/s)

$V_{R,onset}^{CF}$: *cross-flow onset value*, Pers. (2.75)

2.2.4.4. Safety factor

Beberapa persamaan sebelumnya membutuhkan nilai *safety factor* untuk masing-masing. Sesuai dengan DNV-RP-F105 (2006), *safety factor* untuk persamaan di atas adalah sebagai berikut (Tabel 2.3 dan 2.4):

Tabel 2.3. *Safety factor* untuk parameter VIV

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

(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

Tabel 2.4. *Safety factor* untuk *screening criteria*

γ_{IL}	1.4
γ_{CF}	1.4

(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

2.2.5. Analisis Struktur

2.2.5.1. Frekuensi natural pipa

Frekuensi natural ini merupakan suatu nilai yang harus didapatkan, karena hasil dari frekuensi natural ini akan digunakan untuk melakukan *screening* frekuensi natural sesuai dengan DNV-RP-F105. Persamaan untuk menghitung frekuensi natural kondisi *in-line* dan *cross-flow* adalah sebagai berikut:

$$f_n = C_1 \sqrt{1 + CSF} \sqrt{\frac{EI_{steel}}{m_e L_{eff}^4} \left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}} + C_3 \left(\frac{\delta}{D_t} \right)^2 \right)} \quad (2.83)$$

- $C_1 - C_3$: koefisien kondisi batas
 CSF : *concrete stiffness factor*
 E : *Young's modulus* untuk *steel* (Pa)
 I_{steel} : momen inersia untuk *steel* (m⁴)
 m_e : massa efektif (kg/m)
 L_{eff} : panjang *span* efektif (m)
 S_{eff} : gaya aksial efektif (N)
 P_{cr} : *critical buckling load* (N)
 δ : *static deflection* (m)
 D_t : diameter luar pipa (m)

2.2.5.2. Concrete stiffness factor (CSF)

Coating pada pipa memiliki pengaruh pada beberapa parameter, diantaranya meningkatkan berat terendam, gaya *drag*, massa tambah atau *buoyancy* pipa. Untuk efek lainnya adalah kekakuan dan kekuatan pipa.

$$CSF = k_c \cdot \left(\frac{E_c \cdot I_{conc}}{E \cdot I_{steel}} \right)^{0.75} \quad (2.84)$$

- k_c : *parameter for concrete stiffening (empirical parameter)*
 E_c : *Young's modulus* untuk *concrete* (Pa)

$$E_c = 10000 \cdot f_{cn}^{0.3} \quad (2.85)$$

- f_{cn} : kekuatan konstruksi *concrete* (Pa)
 E : *Young's modulus* untuk *steel* (Pa)
 I_{conc} : momen inersia *concrete* (m⁴)
 I_{steel} : momen inersia *steel* (m⁴)

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

2.2.5.3. Static deflection

Jika *static deflection* tidak didapatkan dari survei atau perhitungan yang akurat, estimasi berikut dapat dilakukan sesuai DNV-RP-F105 (2006):

$$\delta = C_6 \frac{q \cdot L_{eff}^4}{EI \cdot (1 + CSF)} \frac{1}{\left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}}\right)} \quad (2.86)$$

- δ : *static deflection* (m)
 C_6 : *boundary condition coefficient*
 q : *deflection load per unit length* (N/m)
 S_{eff} : gaya aksial efektif (N)
 P_{cr} : *critical buckling load* (N)

Nilai *deflection load* (q) didapatkan dari beberapa perhitungan sebelumnya tergantung pada arah getaran pipa (*in-line* atau *cross-flow*). Sesuai dengan DNV-RP-F105 (2006), untuk arah *in-line* nilai q adalah nilai dari gaya *drag* yang terjadi. Sedangkan untuk arah *cross-flow* nilai q merupakan nilai dari berat terendam pipa.

2.2.5.4. Critical buckling load

Menurut Bai dan Bai (2014), *critical buckling load* dipengaruhi oleh beberapa parameter diantaranya adalah kekakuan pipa, pengaruh kontak dengan tanah, berat terendam pipa. Persamaan menentukan *critical buckling load* sesuai dengan DNV-RP-F105 (2006) adalah sebagai berikut:

$$P_{cr} = (1 + CSF) C_2 \pi^2 EI_{steel} / L_{eff}^2 \quad (2.87)$$

- P_{cr} : *Critical buckling load* (N)
 C_2 : *boundary condition*
 E : *Young's modulus* untuk *steel* (Pa)
 I_{steel} : momen inersia dari *steel* (m⁴)
 L_{eff} : panjang *free span* efektif (m)

2.2.5.5. Effective axial force

Choi (2000) meneliti efek dari gaya aksial pada *free span* pipa bawah laut. Dari hasil penelitiannya menunjukkan bahwa gaya aksial memiliki pengaruh yang signifikan pada frekuensi natural pipa. Gaya aksial sangat penting untuk menentukan

panjang *free span* yang diizinkan pada pipa bawah laut. Intensitas ini sangat krusial atau dominan dalam formasi tanah pada *seabed* karena kenaikan frekuensi natural pipa (Bakhtiary, 2007).

$$S_{eff} = H_{eff} - (1 - 2 \cdot \nu) \cdot (P_i) \cdot \frac{\pi}{4} (D_i)^2 - \alpha_e \cdot \Delta T \cdot E \cdot A_s \quad (2.88)$$

- S_{eff} : *effective axial force* (N)
 H_{eff} : *effective lay tension* (N)
 P_i : perbedaan tekanan internal (Pa)
 D_i : diameter dalam pipa (m)
 A_s : *cross section area* pada *steel* pipa (m²)
 ν : *poisson's ratio* dari *steel*
 E : *Young's modulus* untuk *steel* (Pa)
 ΔT : perbedaan temperatur (°C)
 α_e : koefisien ekspansi suhu (°C)

2.2.5.6. *Boundary condition*

Untuk menentukan nilai kondisi batas yang berada pada persamaan-persamaan sebelumnya (C₁-C₆) dapat melihat pada Tabel 2.5 di bawah ini, dengan sebelumnya sudah menentukan *end condition* pada *free span*. Menurut DNV-RP-F105 (2006), *end condition* ini biasanya *fixed* atau *pinned* untuk analisis *free span* tunggal. *Fixed-fixed* hanya digunakan jika telah melakukan pengamatan di lokasi pipa dengan ujungnya terdapat *support* yang sifatnya *fixed*. Selain *fixed-fixed* terdapat juga kondisi *pinned-pinned*. Kondisi batas ini sangat berpengaruh pada penentuan panjang *free span* maksimal yang diizinkan. Dalam melakukan penentuan ini tentu tidak mudah, perlu untuk memodelkannya dalam sebuah model FEM. Kondisi yang sepertinya *pinned-pinned* tidak sepenuhnya *pinned-pinned*, seperti contohnya pada *free span* di antara 2 batu.

Koefisien kondisi batas disajikan dalam Tabel 2.5 berikut:

Tabel 2.5. Koefisien kondisi batas

	Pinned-Pinned ²⁾	Fixed-Fixed ³⁾	Single span on seabed
C ₁	1.57	3.56	3.56
C ₂	1.0	4.0	4.0
C ₃	0.8 ¹⁾	0.2 ¹⁾	0.4 ¹⁾
C ₄	4.93	14.1	Shoulder: $14.1(L/L_{\text{eff}})^2$ Mid-span: 8.6
C ₅	1/8	1/12	Shoulder: ⁴⁾ $\frac{1}{18(L_{\text{eff}} / L)^2 - 6}$ Mid-span: 1/24
C ₆	5/384	1/384	1/384
1) Note that C ₃ = 0 is normally assumed for in-line if the steady current is not accounted for. 2) For pinned-pinned boundary condition L _{eff} is to be replaced by L in the above expressions also for P _{cr} . 3) For fixed-fixed boundary conditions, L _{eff} /L = 1 per definition. 4) C ₅ shall be calculated using the static soil stiffness in the L _{eff} /L calculation.			

(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

Dari keterangan di bawah nilai kondisi batas C₁ – C₆, dapat dilihat bahwa pada nomer 2 dikatakan untuk kondisi batas *pinned-pinned*, L_{eff} (panjang *free span* efektif) diganti dengan L (panjang aktual *free span*) untuk beberapa persamaan di atasnya. Persaman “di atas tabel berikut” dalam hal ini adalah frekuensi natural, *static deflection*, *critical buckling load*. Di ketiga persamaan tersebut diperlukan untuk substitusi nilai L_{eff}, karena keterangan pada Tabel 2.5 sehingga L_{eff} diganti dengan memasukkan L pada persamaan masing-masing.

2.2.6. Interaksi Pipa dan Tanah

2.2.6.1. Soil damping

Soil damping (ζ_{soil}) dapat dilihat pada Tabel 2.6 atau 2.7 di bawah ini sesuai dengan jenis tanah yang berada di lokasi pipa dan juga rasio antara panjang *free span* (L) dan diameter pipa (D).

Tabel 2.6. *Modal soil damping ratio* untuk pasir

<i>Sand type</i>	<i>Horizontal (in-line) direction</i> <i>L/D</i>			<i>Vertical (cross-flow) direction</i> <i>L/D</i>		
	<i>< 40</i>	<i>100</i>	<i>> 160</i>	<i>< 40</i>	<i>100</i>	<i>> 160</i>
Loose	3.0	2.0	1.0	2.0	1.4	0.8
Medium	1.5	1.5	1.5	1.2	1.0	0.8
Dense	1.5	1.5	1.5	1.2	1.0	0.8

(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

Tabel 2.7. *Modal soil damping ratio* untuk clay

<i>Clay type</i>	<i>Horizontal (in-line) direction</i> <i>L/D</i>			<i>Vertical (cross-flow) direction</i> <i>L/D</i>		
	<i>< 40</i>	<i>100</i>	<i>> 160</i>	<i>< 40</i>	<i>100</i>	<i>> 160</i>
Very soft - Soft	4.0	2.0	1.0	3.0	2.0	1.0
Firm – Stiff	2.0	1.4	0.8	1.2	1.0	0.8
Very stiff - Hard	1.4	1.0	0.6	0.7	0.6	0.5

(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

Dalam DNV-RP-F105 (2006), juga menyebutkan bahwa untuk tujuan *screening*, *soil damping* (ζ_{soil}) dapat diasumsikan bernilai 0.01.

2.2.6.2. Poisson's ratio dan soil stiffness

Poisson's ratio (ν) merupakan salah satu parameter khusus untuk tanah. Untuk menentukan nilainya dapat dilihat pada Tabel 2.8 atau 2.9 di bawah ini sesuai dengan jenis tanah pada lokasi pipa.

Tabel 2.8. Parameter geoteknik untuk tanah pasir

<i>Soil type</i>	φ_s	γ_{soil}' [kN/m ³]	ν	e_s
Loose	28 – 30°	8.5 – 11.0	0.35	0.7 – 0.9
Medium	30 – 36°	9.0 – 12.5	0.35	0.5 – 0.8
Dense	36 – 41°	10.0 – 13.5	0.35	0.4 – 0.6

(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

Tabel 2.9. Parameter geoteknik untuk tanah *clay*

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

(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

- φ_s : sudut dari gesekan (°)
 s_u : *undrained shear strength, cohesive soils* (kN/m²)
 γ_{soil}' : berat unit tanah (kN/m³)
 e_s : *void ratio*

Soil stiffness merupakan parameter yang perlu didapatkan nilainya. *Soil stiffness* memiliki beberapa nilai tergantung pada kondisi yang diperhitungkan seperti statis, dinamis, vertikal, atau horizontal. Persamaannya sebagai berikut:

- K_v (*dynamic soil stiffness vertikal*)

$$K_v = \frac{C_v}{1 - \nu_{soil}} \left(\frac{2\rho_s}{3\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D_t} \quad (2.89)$$

- K_L (*dynamic soil stiffness horizontal*)

$$K_L = C_L(1 + \nu_{soil}) \left(\frac{2\rho_s}{3\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D_t} \quad (2.90)$$

- K_v : kekakuan tanah dinamis vertikal (kN/m^2)
 K_L : kekakuan tanah dinamis horizontal (kN/m^2)
 ν_{soil} : *poisson's ratio* dari tanah
 C_V : koefisien untuk kekakuan tanah vertikal ($\text{kN/m}^{5/2}$)
 C_L : koefisien untuk kekakuan tanah lateral ($\text{kN/m}^{5/2}$)
 ρ_s/ρ : rasio massa spesifik antara massa pipa (tidak termasuk massa tambah) dan *buoyancy*

$$\frac{\rho_s}{\rho} = \frac{W_{\text{sub}} + F_b}{F_b} \quad (2.91)$$

W_{sub} : berat terendam pipa (N/m)

F_b : *buoyancy* pipa (N/m)

Untuk mendapatkan koefisien kekakuan tanah dinamis atau statis, vertikal atau lateral dapat menggunakan tabel berikut sesuai dengan jenis tanah yang ada:

Tabel 2.10. Faktor kekakuan dinamis dan statis untuk pasir

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

(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

Tabel 2.11. Faktor kekakuan dinamis dan statis untuk *clay*

<i>Clay type</i>	C_V ($\text{kN/m}^{5/2}$)	C_L ($\text{kN/m}^{5/2}$)	$K_{V,S}$ (kN/m/m)
Very soft	600	500	50-100
Soft	1400	1200	160-260
Firm	3000	2600	500-800
Stiff	4500	3900	1000-1600
Very stiff	11000	9500	2000-3000
Hard	12000	10500	2600-4200

(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

$K_{v,s}$: kekakuan tanah statis vertikal (kN/m^2)

2.2.7. Bending Moment

2.2.7.1. Bending moment pipeline kondisi free span

Dalam Bai dan Bai (2014), *local buckling* dapat terjadi pada pipa yang terkena kombinasi beberapa beban diantaranya tekanan, gaya longitudinal, dan *bending*. Mode kegagalan mungkin menghasilkan tekuk pada sisi tekan pipa. Cek *local buckling* dapat dipisahkan menjadi dua yaitu untuk kondisi *load control (bending moment)* dan kondisi *displacement control (strain level)*. Untuk kondisi *free span* dapat menggunakan kondisi *load control* sesuai yang dituliskan pada DNV-RP-F105 (2006), sehingga perhitungan untuk *bending moment* sangat perlu untuk dilakukan.

Sesuai dengan DNV-OS-F101 (2013), persamaan untuk menghitung *bending moment* pada *free span pipeline* adalah seperti berikut:

$$M_{Sd} = M_F \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C + M_E \cdot \gamma_E + M_I \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C + M_A \cdot \gamma_A \cdot \gamma_C \quad (2.92)$$

M_F : momen karena beban fungsional (Nm)

M_E : momen karena *environmental load* (Nm)

M_I : momen karena *interference load* (Nm)

M_A : momen karena *accidental load* (Nm)

γ_F : faktor pembebanan untuk beban fungsional

γ_C : faktor pengaruh kondisi beban

γ_E : faktor pembebanan untuk *environmental load*

γ_A : faktor pembebanan untuk *accidental load*

Untuk mendapatkan faktor pembebanan tersebut dapat digunakan faktor pembebanan sesuai dalam DNV-OS-F101 (2013) pada Tabel 2.12 sebagai berikut:

Tabel 2.12. Faktor pembebanan untuk kombinasi beban

Limit State / Load combination	Load effect combination		Functional loads ¹⁾	Environmental load	Interference loads	Accidental loads
			γ_F	γ_E	γ_F	γ_A
ULS	a	System check ²⁾	1.2	0.7		
	b	Local check	1.1	1.3	1.1	
FLS	c		1.0	1.0	1.0	
ALS	d		1.0	1.0	1.0	1.0

1) If the functional load effect reduces the combined load effects, γ_F shall be taken as 1/1.1.
2) This load effect factor combination shall only be checked when system effects are present, i.e. when the major part of the pipeline is exposed to the same functional load. This will typically only apply to pipeline installation.

(Sumber: DNV-OS-F101, 2013)

Dalam Tabel 2.12 di atas dapat dilihat bahwa untuk pengecekan ULS terdapat dua *load effect combination* dengan fungsi masing-masing. DNV-OS-F101 (2013), menyebutkan bahwa untuk *system check* digunakan untuk menganalisis beberapa kasus seperti *pressure containment*, *collaps*, dan *installation*. Sedangkan untuk *local check* digunakan pada analisis *local buckling*.

Sedangkan untuk mendapatkan γ_C dapat digunakan Tabel 2.13 berikut:

Tabel 2.13. Faktor kondisi beban

<i>Condition</i>	γ_C
Pipeline resting on uneven seabed	1.07
Reeling on and J-tube pull-in	0.82
System pressure test	0.93
Otherwise	1.00

(Sumber: DNV-OS-F101, 2013)

Dari Tabel 2.13 di atas terdapat nilai γ_C untuk beberapa kondisi. Untuk kondisi *free span* digunakan nilai yang 1.07, sesuai dengan kegunaannya.

Untuk pembebanan *free span*, umumnya hanya diperhitungkan dua faktor pembebanan, sehingga persamaan di atas dapat diganti dengan Pers. (2.93) di bawah ini:

$$M_{Sd} = M_F \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C + M_E \cdot \gamma_E \quad (2.93)$$

1. *Bending moment* akibat beban fungsional

Dengan menggunakan teori mekanika teknik seperti yang dijelaskan pada Bai dan Bai (2014), untuk mendapatkan *bending moment* akibat beban fungsional ini dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

a. *Pinned-pinned boundary condition*

$$M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{8} \quad (2.94)$$

b. *Fixed-fixed boundary condition*

$$M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{12} \quad (2.95)$$

c. *Fixed-pinned boundary condition*

$$M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{10} \quad (2.96)$$

- M_{\max} : *bending moment* maksimal (Nm)
 q : beban defleksi yang diterima (N/m)
 L : panjang *free span* aktual (m)

Beban (q) yang digunakan untuk mendapatkan momen fungsional adalah beban fungsional pipa itu sendiri yaitu berupa berat terendam pipa (W_{sub}). Sehingga persamaan di atas dapat diganti seperti berikut (*pinned-pinned boundary condition*):

$$M_F = \frac{W_{\text{sub}} \cdot L^2}{8} \quad (2.97)$$

2. *Bending moment* akibat beban lingkungan

Untuk kondisi *free span*, momen karena pengaruh beban lingkungan menghasilkan dua arah sesuai dengan arah pembebanan yang ditinjau yaitu untuk kondisi *in-line* (horizontal) dan *cross-flow* (vertikal). Perbedaan keduanya terdapat pada *environmental stress* yang disubstitusikan ke dalam persamaan. Persamaan untuk mendapatkan *bending moment* karena pengaruh beban lingkungan dapat dilihat pada Pers. (2.98) berikut:

$$M_E = \sigma_E \frac{2I_{\text{steel}}}{D_0 - t_{\text{nom}}} \quad (2.98)$$

- σ_E : tegangan karena pengaruh beban lingkungan (Pa)
 D_0 : diameter luar *steel* pipa (m)
 I_{steel} : momen inersia *steel* pipa (m⁴)
 t_{nom} : tebal dinding pipa (m)

3. *Bending moment* kombinasi

Bending moment di atas menghasilkan nilai dengan kombinasi arah *moment* yang berbeda yaitu horisontal ($M_{E(IL)}$) dan vertikal ($M_{E(CF)}$ dan M_F), sehingga perlu untuk mendapatkan resultan *bending* momennya. Pers. (2.100) dapat diganti dengan persamaan berikut untuk mendapatkan resultannya:

$$M_{Sd} = \sqrt{\left((M_F \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C) + (M_{E(CF)} \cdot \gamma_E) \right)^2 + (M_{E(IL)} \cdot \gamma_E)^2} \quad (2.99)$$

2.2.7.2. Maximum environmental stress

Untuk mendapatkan *maximum environmental stress* dapat digunakan persamaan berikut untuk arah *in-line* dan *cross-flow*:

$$\text{In-line} \quad \sigma_E = \frac{1}{2} \max \left\{ S_{IL}; 0.4 \cdot S_{CF} \frac{A_{IL}}{A_{CF}} \right\} + \sigma_{FM} \quad (2.100)$$

$$\text{Cross-flow} \quad \sigma_E = \frac{1}{2} S_{CF} \quad (2.101)$$

σ_E : *environmental stress* (Pa)

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

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

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

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

σ_{FM} : *environmental stress due to direct wave loading* (Pa)

Untuk mendapatkan tegangan karena beban gelombang langsung (σ_{FM}) dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma_{FM} = \frac{M_w \cdot (D_0 - t_2)}{2 \cdot I_{steel}} \quad (2.102)$$

M_w : momen karena gaya *drag* aliran air (Nm)

$$M_w = C_5 \left(\frac{F_D \cdot L_{eff}}{1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}}} \right) \quad (2.103)$$

F_D : gaya *drag* aliran air (N)

L_{eff} : panjang *free span* efektif (m)

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

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

2.2.8. Analisis *Local Buckling*

2.2.8.1. *Limit state*

Pipa laut biasanya mengalami tekanan eksternal dan *bending*, pipa tersebut dirancang untuk mencegah kegagalan karena *buckling* dan *collapse*. Pipa yang rusak pada area lokal dan mungkin *collaps*, dapat merambat sepanjang pipa jika tekanan hidrostatik cukup tinggi. *Collaps propagasi pressure* merupakan nilai tekanan terendah yang harus dipertahankan oleh pipa dari *collaps propagation* (Palmer dan Martin, 1975).

Pipa berpotensi dapat mengalami *fatigue damage* (FLS) dan *local buckling failure* karena pengaruh *free span*. Getaran pipa karena pengaruh *vortex shedding* (*in line* dan *cross flow VIV*) dan pengaruh dari gelombang menyebabkan akumulasi kelelahan pada *free span*. *Pipeline static bending*, *vortex induced vibration*, efek arus dan gelombang, peralatan pukat merupakan faktor utama pada kegagalan *local buckling* pada pipa (Z-Subsea, 2013).

Menurut Bai dan Bai (2014), salah satu *limit state* yang perlu untuk dicek adalah ULS yaitu batasan yang berkaitan dengan pengaruh beban tunggal atau situasi *overload*. Integritas *pipeline* dapat dicek dengan beberapa integritas struktur yaitu:

- *bursting*,
- *local buckling*.

2.2.8.2. Kriteria *local buckling* pada pipa

Ketika pipa terkena momen lentur (*bending moment*), tegangan longitudinal menghasilkan komponen gaya melintang selama terjadi kelengkungan pipa. Sebagai pipa melengkung, komponen dari tegangan *bending* longitudinal berpengaruh pada penampang pipa (*cross section area*). Hal ini akan mengakibatkan terjadinya momen melintang, ovalisasi, sampai terjadi keruntuhan (*collapse*). Sebuah pipa yang mengalami *bending* akan *collaps* ketika penampang menyilang (*cross section area*) kehilangan kekakuan karena perubahan bentuk secara mekanik atau disebut *local buckling*. Titik tersebut merupakan titik lemah dari suatu pipa yang berpotensi terjadi ovalisasi yang nantinya dapat mengakibatkan kegagalan *local buckling* (Chakrabarti, 2005).

Desain pipa bawah laut yang paling utama adalah didasarkan pada desain keadaan batas. Dalam perencanaan *limit state design*, semua potensi kegagalan ke depan harus diperhitungkan dan menghasilkan kapasitas minimal yang masih dapat diterima. Sebuah pipa harus dapat menahan beban selama kegiatan instalasi dan operasi. Selain itu, beban luar seperti gelombang, arus, kondisi dasar laut yang tidak rata, perubahan suhu, tekanan juga harus dipertimbangkan. Dari pengalaman sebelumnya menunjukkan bahwa efek dari beban utama pada pipa bawah laut adalah kombinasi beban yang mengakibatkan *bending* dengan gaya longitudinal dari pengaruh tekanan hidrostatik eksternal dan tekanan internal selama operasi. Pipa mengalami *bending* dapat terjadi kegagalan karena pengaruh *local buckling*, *collapse*, atau kepecahan. Namun, *local buckling* atau batas *collapse* sangat berperan dalam penentuan desain. *Local buckling* terjadi pada pipa yang mengalami tekanan kombinasi, gaya longitudinal, dan *bending*. Mode kegagalan memungkinkan terjadi kelenturan pada penampang pipa yang selanjutnya terjadi *buckling*. Pengecekan *local buckling* dapat dilakukan pada *pipeline* kondisi *load control (bending moment)* dan *displacement control (strain level)* (Bai dan Bai, 2014).

Untuk pengecekan *local buckling* pada *pipeline free span* sesuai yang terdapat dalam DNV-RP-F105 (2006), yaitu menggunakan kombinasi beban dan kondisi *load controlled* pada kriteria yang terdapat dalam DNV-OS-F101 (2013). Menurut Dong dkk (2015) kriteria kegagalan *local buckling* pada *pipeline* karena kombinasi beban dari *external pressure*, *internal pressure*, *bending moment*, dan *effective axial force* sesuai dengan yang ditunjukkan pada DNV-OS-F101 (2013) yaitu:

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{Sd}(P_i)}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p \cdot \frac{P_i - P_e}{\alpha_c \cdot P_b(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (2.104)$$

untuk $15 \leq D_0/t_2 \leq 45, P_i > P_e$

atau,

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{Sd}}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{P_e - P_{min}}{P_c(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (2.105)$$

untuk $15 \leq D_0/t_2 \leq 45, P_i < P_e$

Dengan,

- γ_m : faktor tahanan material
- γ_{SC} : faktor keamanan *resistance*
- α_c : parameter aliran tegangan
- M_{Sd} : *bending moment* (Nm)
- M_p : *denote plastic moment capacities* (Nm)
- S_{Sd} : *desain effective axial force* (N)

$$S_{Sd} = S_{eff} \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C \quad (2.106)$$

- S_p : *denote plastic axial force capacities* (N)
- α_p : faktor tekanan untuk beban kombinasi
- P_i : tekanan internal (Pa)
- P_e : tekanan eksternal (Pa)
- P_{min} : tekanan internal minimum (Pa)
- P_b : *pressure containment resistance* atau tekanan *bursting* (Pa)
- P_c : tekanan karakteristik *collaps* (Pa)
- D_0 : diameter luar pipa (m)
- t_2 : tebal dinding pipa (m)

Untuk faktor tahanan material (γ_m) dapat menggunakan Tabel 2.14 berikut, sesuai yang ada dalam DNV-OS-F101 (2013):

Tabel 2.14. Faktor tahanan material

<i>Limit state category</i> ¹⁾	<i>SLS/ULS/ALS</i>	<i>FLS</i>
γ_m	1.15	1.00
1) The limit states (SLS, ULS, ALS and FLS) are defined in D.		

(Sumber: DNV-OS-F101, 2013)

Sedangkan untuk faktor keamanan sesuai *class*, dapat menggunakan Tabel 2.15 seperti yang tersedia dalam DNV-OS-F101 (2013) berikut:

Tabel 2.15. Faktor keamanan *resistance*

<i>Safety class</i>	γ_{sc}		
	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>
Pressure containment ¹⁾	1.046 ^{2),3)}	1.138	1.308 ⁴⁾
Other	1.04	1.14	1.26

1) The number of significant digits is given in order to comply with the ISO usage factors.
 2) Safety class low will be governed by the system pressure test which is required to be 3% above the incidental pressure. Hence, for operation in safety class low, the resistance factor will effectively be minimum 3% higher.
 3) For system pressure test, α_t shall be equal to 1.00, which gives an allowable hoop stress of 96% of SMYS both for materials fulfilling supplementary requirement U and those not.
 4) For parts of pipelines in location class 1, resistance safety class medium may be applied (1.138).

(Sumber: DNV-OS-F101, 2013)

1. Denote plastic capacities

- Karakteristik *plastic moment resistance*

$$M_p(t_2) = f_y \cdot (D_0 - t_2)^2 \cdot t_2 \quad (2.107)$$

- Karakteristik *plastic axial force resistance*

$$S_p(t_2) = f_y \cdot \pi \cdot (D_0 - t_2) \cdot t_2 \quad (2.108)$$

f_y : karakteristik kekuatan material (Pa)

t_2 : tebal dinding pipa (m)

2. Karakteristik kekuatan material

Karakteristik kekuatan material dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$f_y = (SMYS - f_{y,temp}) \cdot \alpha_U \quad (2.109)$$

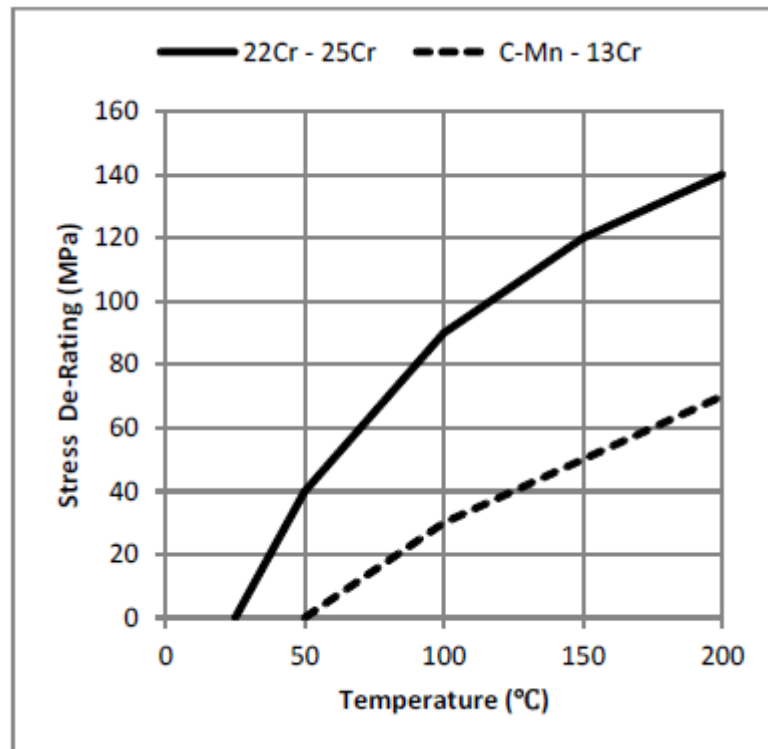
$$f_u = (SMTS - f_{u,temp}) \cdot \alpha_U \quad (2.110)$$

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

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

α_U : faktor kekuatan material

Jika tidak ada data mengenai nilai *de-rating* untuk *yield stress* ($f_{y,temp}$), dapat digunakan grafik di bawah ini sesuai yang disarankan oleh DNV-OS-F101 (2013).



Gambar 2.16. Grafik nilai *de-rating* untuk *yield stress*

(Sumber: DNV-OS-F101, 2013)

Dari grafik di atas, nilai *de-rating yield stress* yang didapatkan tergantung pada suhu dan jenis material yang digunakan untuk pembuatan pipa.

Untuk nilai *de-rating* untuk *tensile strength* atau *ultimate stress* ($f_{u,temp}$), sesuai dengan apa yang terdapat dalam DNV-OS-F101 (2013) bahwa jika tidak ada informasi data yang jelas mengenai hal ini, nilainya dapat disamakan dengan nilai *de-rating* untuk *yield stress*.

Untuk mendapatkan faktor kekuatan material, dapat menggunakan Tabel 2.16:

Tabel 2.16. Faktor kekuatan material

Factor	Normally	Supplementary requirement U
α_U	0.96	1.00

(Sumber: DNV-OS-F101, 2013)

3. Parameter tekanan dan tegangan

- Parameter aliran tegangan

$$\alpha_c = (1 - \beta) + \beta \cdot \frac{f_u}{f_y} \quad (2.111)$$

➤ Faktor tekanan untuk beban kombinasi

$$\alpha_p = \begin{cases} 1 - \beta & \frac{P_i - P_e}{P_b} < \frac{2}{3} \\ 1 - 3\beta \left(1 - \frac{P_i - P_e}{P_b}\right) & \frac{P_i - P_e}{P_b} \geq \frac{2}{3} \end{cases} \quad (2.112)$$

$$\beta = \frac{60 - D_0/t_2}{90} \quad (2.113)$$

β : faktor untuk kriteria kombinasi beban

P_b : *pressure containment resistance* atau tekanan *bursting* (Pa)

$$P_b(t_2) = \frac{2 \cdot t_2}{D_0 - t_2} f_{cb} \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (2.114)$$

f_{cb} merupakan nilai terkecil dari f_y dan $f_u/1.15$ (dibandingkan)

$$f_{cb} = \text{Min} \left[f_y; \frac{f_u}{1.15} \right] \quad (2.115)$$

Untuk kasus *free span* sesuai dengan DNV-OS-F101 (2013) digunakan kondisi beban yang dikontrol (LCC) dengan menggunakan *bending moment* maksimal yang diizinkan. Dengan mengeluarkan variabel *bending moment* (M_{sd}) pada persamaan ULS *check* dari DNV-OS-F101 (2013) dalam Pers. (2.89), dapat dihasilkan nilai *bending moment* maksimal yang diizinkan atau kritis karena menghasilkan *unity check* yang mendekati atau sama dengan satu (UC=1). Dari *bending moment* maksimal tersebut dapat dihasilkan nilai panjang *free span* maksimal yang menghasilkan nilai *bending moment* kritis tersebut. Nilai *bending moment* untuk kondisi *free span* dari pipa yang sudah beroperasi tergantung pada panjang *free span*, semakin panjang *free span*, semakin besar juga nilai *bending moment* yang didapatkan. Untuk mendapatkannya perlu dilakukan iterasi dari persamaan dalam ULS *check*.

2.2.8.3. Tegangan *buckling* dan *von-mises*

1. Tegangan *buckling* kritis

Selain menggunakan persamaan ULS *check* atau menggunakan nilai *bending moment* kritis, salah satu kriteria *local buckling* lainnya adalah mendapatkan tegangan kombinasi atau *von-mises* yang dihasilkan dari kondisi *free span pipeline* kemudian dibandingkan dengan nilai tegangan *buckling*. *Local buckling* dapat terjadi jika nilai tegangan *von-mises* lebih besar dari nilai tegangan *buckling* kritis.

Untuk mendapatkan nilai tegangan *buckling* kritis, dapat menggunakan persamaan berikut yang didapatkan dari Bai (2003):

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{steel}}{A_s L^2} \quad (2.116)$$

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

E : *modulus young steel* (Pa)

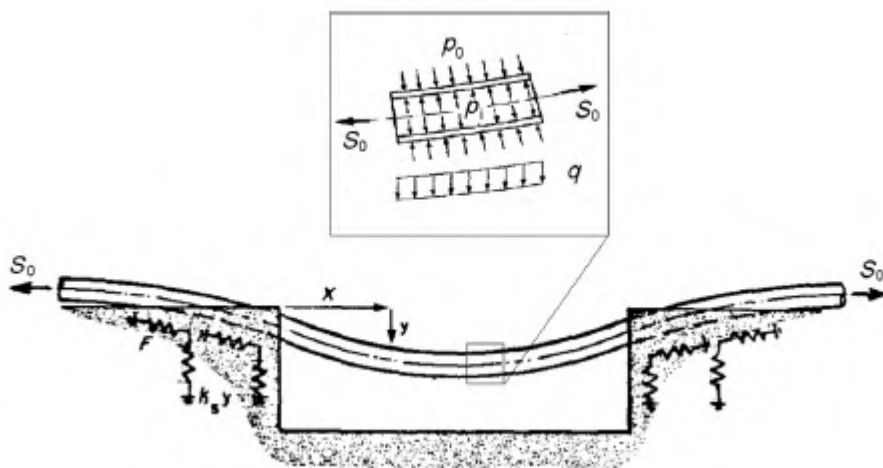
I_{steel} : momen inersia steel (m^4)

A_s : area dari *steel* pipa (m^2)

L : panjang *free span* aktual (m)

2. Tegangan *equivalent* (*von-mises*)

Kombinasi dari beberapa beban akan dapat menghasilkan tegangan *von-mises*. Tegangan *von-mises* juga disebut tegangan *equivalent* (Bai dan Bai, 2014).



Gambar 2.17. Ilustrasi kombinasi beban pada *free span pipeline*

(Sumber: Bai dan Bai, 2014)

Persamaan menurut Bai dan Bai (2014) untuk mendapatkan tegangan *von-mises* untuk pipa adalah sebagai berikut:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_h^2 - \sigma_L\sigma_h + 3\tau^2} \quad (2.117)$$

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

a. *Hoop stress*

$$\sigma_h = (P_i - P_e) \frac{D_0 - t_2}{2 \cdot t_2} \quad (2.118)$$

- P_i : tekanan internal (Pa)
 P_e : tekanan eksternal (Pa)
 D_0 : diameter luar nominal pipa (m)
 t_2 : tebal dinding pipa (m)

b. *Longitudinal stress*

$$\sigma_L = \sigma_T + \sigma_p \pm \sigma_b \quad (2.119)$$

- σ_T : tegangan *thermal* (Pa)
 σ_p : *Poisson stress* (Pa)
 σ_b : tegangan *bending* (Pa)

c. *Bending stress*

$$\sigma_b = \frac{M_{Sd} \cdot D_0}{2I_{steel}} \quad (2.120)$$

- M_{Sd} : *bending moment* (Nm)
 D_0 : diameter luar pipa (m)
 I_{steel} : momen inersia *steel* pipa (m⁴)

d. *Thermal stress*

$$\sigma_T = -E\alpha_e\Delta T \quad (2.121)$$

E : modulus Young dari *steel* (Pa)
 α_e : koefisien *temperature expansion* ($^{\circ}\text{C}$)
 ΔT : perbedaan temperatur dengan saat *lay* ($^{\circ}\text{C}$)

e. *Poisson stress*

$$\sigma_p = \nu \sigma_h \quad (2.122)$$

ν : *poisson's ratio steel*

Dalam Bai dan Bai (2014) disebutkan bahwa untuk tegangan *shear* (τ) pada kondisi *pipeline span* nilainya adalah nol atau diabaikan.

2.2.9. Mitigasi Pipeline Free Span

Bai dan Bai (2014), Jika *span pipeline* sudah dalam kondisi kritis dengan pengaruh VIV, *span* harus dilakukan evaluasi atau koreksi dengan *rock dumping* di bawah *pipeline* untuk memperpendek panjang *free span* dan meningkatkan frekuensi natural pipa pada kondisi *free span*. Koreksi *free span* berikut dapat digunakan untuk memperbaiki panjang *free span* yang melebihi *free span* yang diizinkan.

- *Mattras* dan *bags*
- *Trenching*
- *Rock dumping*
- *Mechanical support*

Koreksi tersebut dapat digunakan untuk melakukan evaluasi panjang *free span*. Evaluasi *free span* dengan mengurangi panjang *free span* yang terjadi, *free span* dilakukan koreksi jika panjangnya sudah mendekati panjang maksimal *free span* yang diizinkan yang diperoleh dalam beberapa tahapan analisis *free span*.

2.2.10. Pemodelan Local Buckling dengan Software FEM

2.2.10.1. Umum

Bentangan pipa dapat terkena beban dalam fase dan arah yang berbeda, seperti instalasi dan operasi. Respons pipa terhadap beban ini bervariasi, tergantung pada tingkat interaksi dengan lingkungan, penggunaan, konfigurasi dan geometri. Perilaku pipa mungkin lebih kompleks daripada yang diperkirakan dengan penyederhanaan metode analitis. Untuk evaluasi yang lebih akurat dapat digunakan analisis dengan elemen hingga (FEM) (Bai dan Bai, 2014).

Software yang digunakan adalah *software* dengan analisis struktur metode FEM. Dalam analisis struktur, dijelaskan tentang beberapa parameter diantaranya *displacement, stress, strain*, gaya dan sebagainya. Beban dan respons struktur diasumsikan lambat terhadap waktu (ANSYS, 2009).

2.2.10.2. Bagian dalam *software* untuk analisis struktural

Untuk melakukan simulasi analisis struktural diperlukan beberapa bagian dari *software* yang diperlukan diantaranya (ANSYS, 2009):

1. Geometri dan elemen
2. *Assemblies* dan tipe kontak
3. *Analysis setting*
4. *Environmental*, termasuk beban dan *supports*
5. *Solving models*
6. Hasil

1. Geometri dan elemen

Dalam analisis struktur digunakan model yang memiliki kriteria sama dengan kenyataannya khususnya dalam hal tipe dari bagian struktur. Untuk memodelkan struktur dapat langsung menggunakan *software* ini atau menggunakan *software* lain jika lebih memudahkan. Beberapa *properties* dari material struktur harus dimasukkan ke dalam suatu model. Bagian tersebut dimasukkan ke dalam bagian *engineering data* pada *software* tersebut (ANSYS, 2009). Beberapa yang diperlukan adalah:

- a. Modulus Young
- b. *Poisson's ratio*
- c. Densitas
- d. *Thermal expansion coefficient*
- e. *Stress Limit*
- f. Dan sebagainya

2. *Assemblies*

Ini diperlukan jika hubungan struktur satu dengan yang lainnya penting untuk diperhitungkan. Beberapa tipe kontak diantaranya *bonded, no separation, frictionless, rough*, dan *frictional*.

3. *Analysis Setting*

a. *Step controls*

- pengaturan waktu secara otomatis atau manual
- spesifikasi penomoran *step* dalam suatu analisis dan untuk mengakhiri *step*

b. *Solver controls*

- *direct solver* dan *iterative solver*
- *weak springs*

c. *Analysis data management*

- Menunjukkan lokasi tempat penyimpanan *file* setelah disimpan
- Menghapus *file* yang tidak dibutuhkan
- *Scratch solver files directory* digunakan untuk *file* selama menyelesaikan hasil

d. *Step controls*

- Langkah yang banyak diperbolehkan dalam suatu analisis statis dalam hal *set up*
- Hasil dapat dilihat secara *step by step*
- Nilai dari beban untuk setiap *step* dimasukkan dalam “*Tabular Data*”

4. Beban dan *Support*

a. Tipe beban

- *Inertial loads*
- *Structural loads*
- *Structural supports*
- *Thermal loads*
- Beban tekanan
 - Digunakan pada permukaan, dengan arah normal terhadap permukaan
 - Nilai positif ke arah permukaan struktur dan sebaliknya
 - Satuan tekanan dalam gaya per luasan
- Beban gaya
 - Gaya dapat diaplikasikan tegak lurus, bagian tepi, atau permukaan
 - Satuan dalam massa dikali panjang
 - Gaya dapat didefinisikan dalam vektor atau komponen
- Tekanan hidrostatik
 - Untuk fluida sebagai isi atau di bagian luar

- *Bearing load*
 - Komponen gaya didistribusikan dalam tekan
 - Beban *bearing* dapat didefinisikan dalam vektor atau metode komponen
- Beban momen
 - Untuk *solid*, momen dapat diaplikasikan hanya dalam permukaan
 - Untuk badan permukaan, momen dapat diaplikasikan tegak lurus, tepi, atau permukaan
 - Satuan momen dalam gaya kali lengan
- *Remote force loading*
- *Bolt pretension*
- *Line pressure loading*
- *Thermal loading*
 - Diaplikasikan untuk suhu yang sama pada suatu analisis struktur
 - Berada pada bagian “*Loads*”

b. *Support*

- *Fixed support*
- Memberikan *displacement*

Memasukkan “0” berarti untuk arah tersebut ditahan atau tidak mengalami pergerakan, jika dimasukkan “*free*” maka berarti ada gerakan ke arah yang dimasukkan tersebut

- *Elastic support*
- *Frictionless support*

5. *Solving* pada model

Untuk melakukan *running* untuk mengetahui hasil dari analisis yang dilakukan, dengan mengklik “*solve*” *button* pada *standard toolbar*.

6. Hasil

a. Deformasi

- Total
- *Directional*

b. *Stress* dan *strain*

- Teori *ductile*
 - *Equivalent stress* maksimal

- *Shear stress* maksimal
- Teori *brittle*
- *Mohr-coulomb stress*
- *Tensile stress* maksimal

c. *Contact output*

d. Reaksi gaya

2.2.10.3. Tahapan menggunakan *software* analisis struktur

Untuk memulai suatu analisis diperlukan beberapa tahapan menurut ANSYS (2013), yaitu:

1. Membentuk model

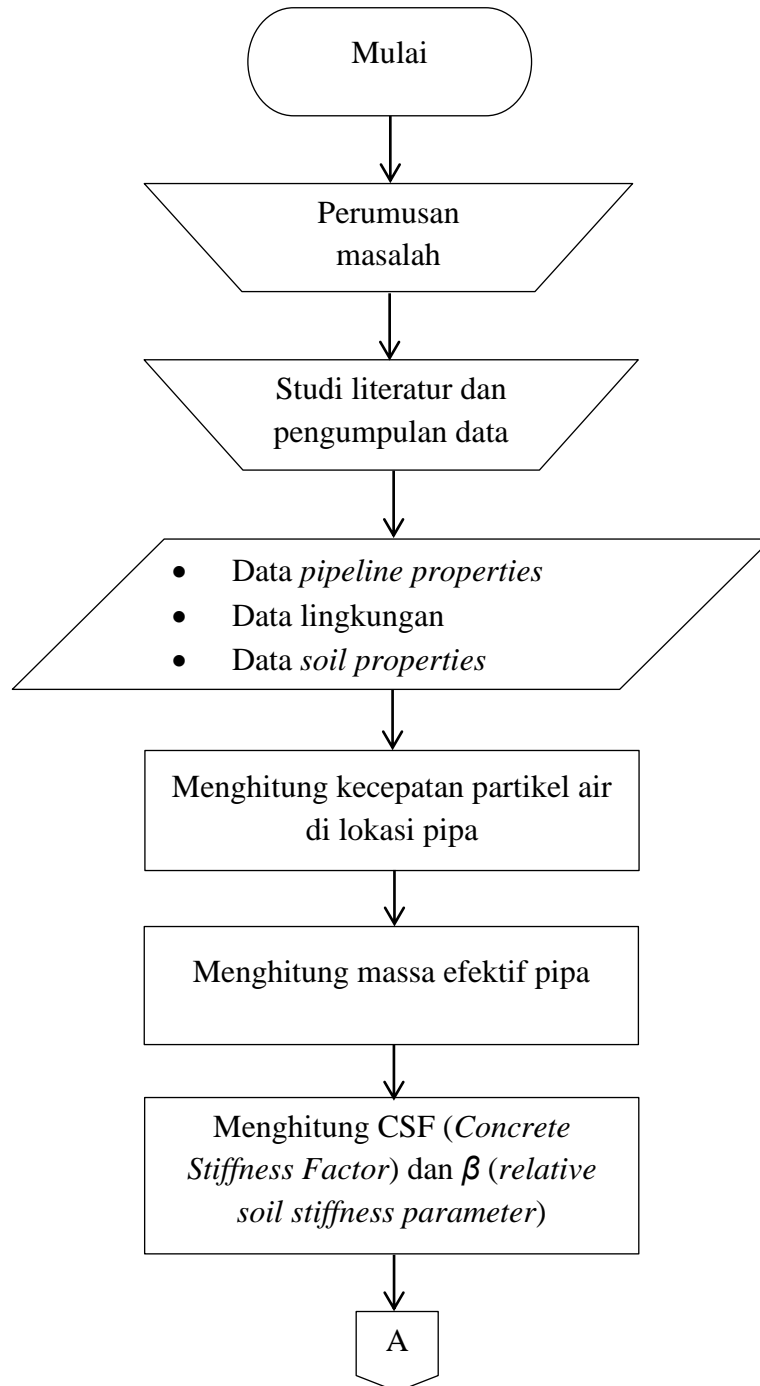
- Spesifikasi pekerjaan dan judul analisis
- Mendefinisikan tipe elemen
- Memasukkan *properties* material yang sesuai

2. Mengaplikasikan beban dan mendapatkan hasil

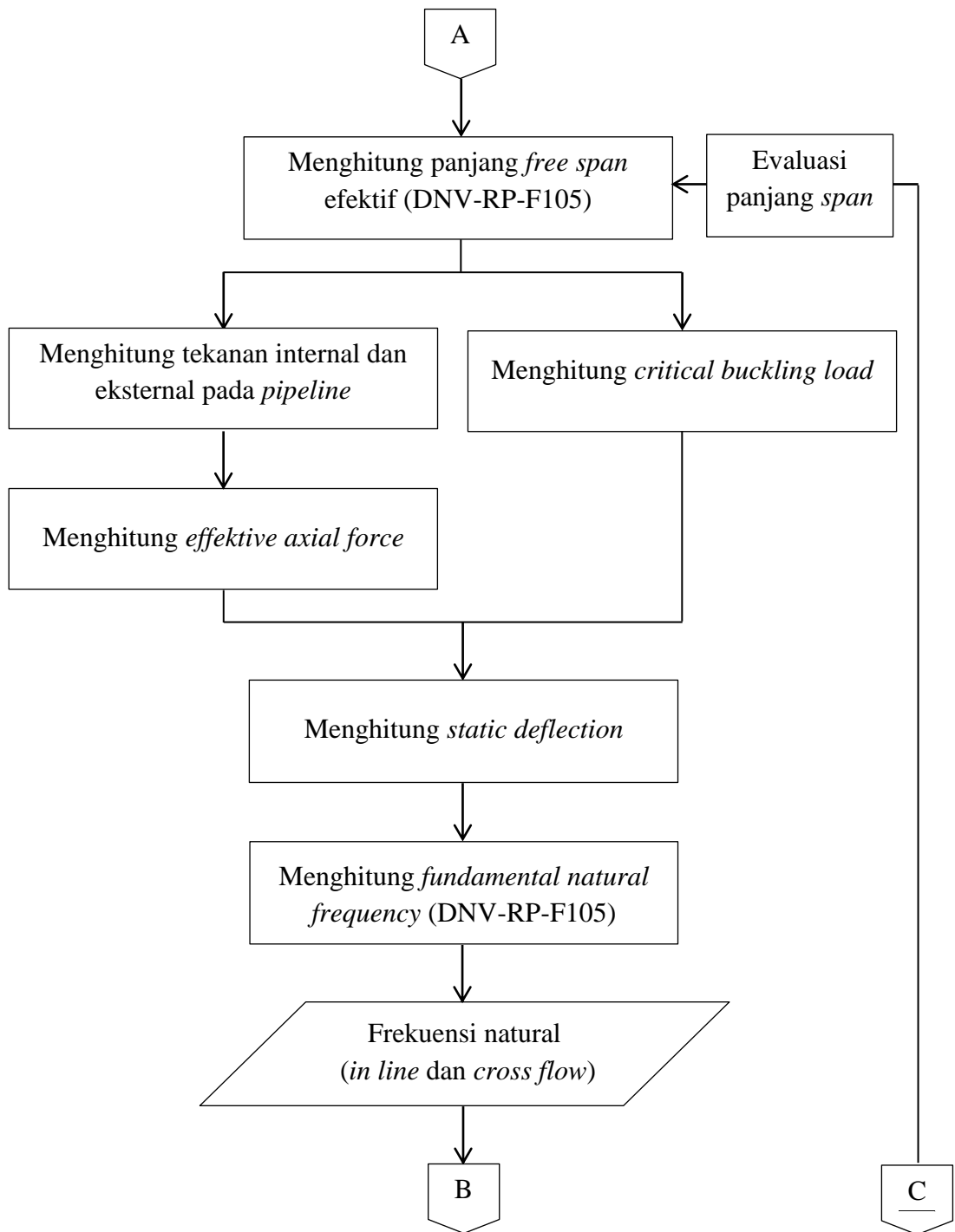
- Spesifikasi tipe analisis
- Memasukkan beban
- Spesifikasi pilihan *step* beban
- *Solve*

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

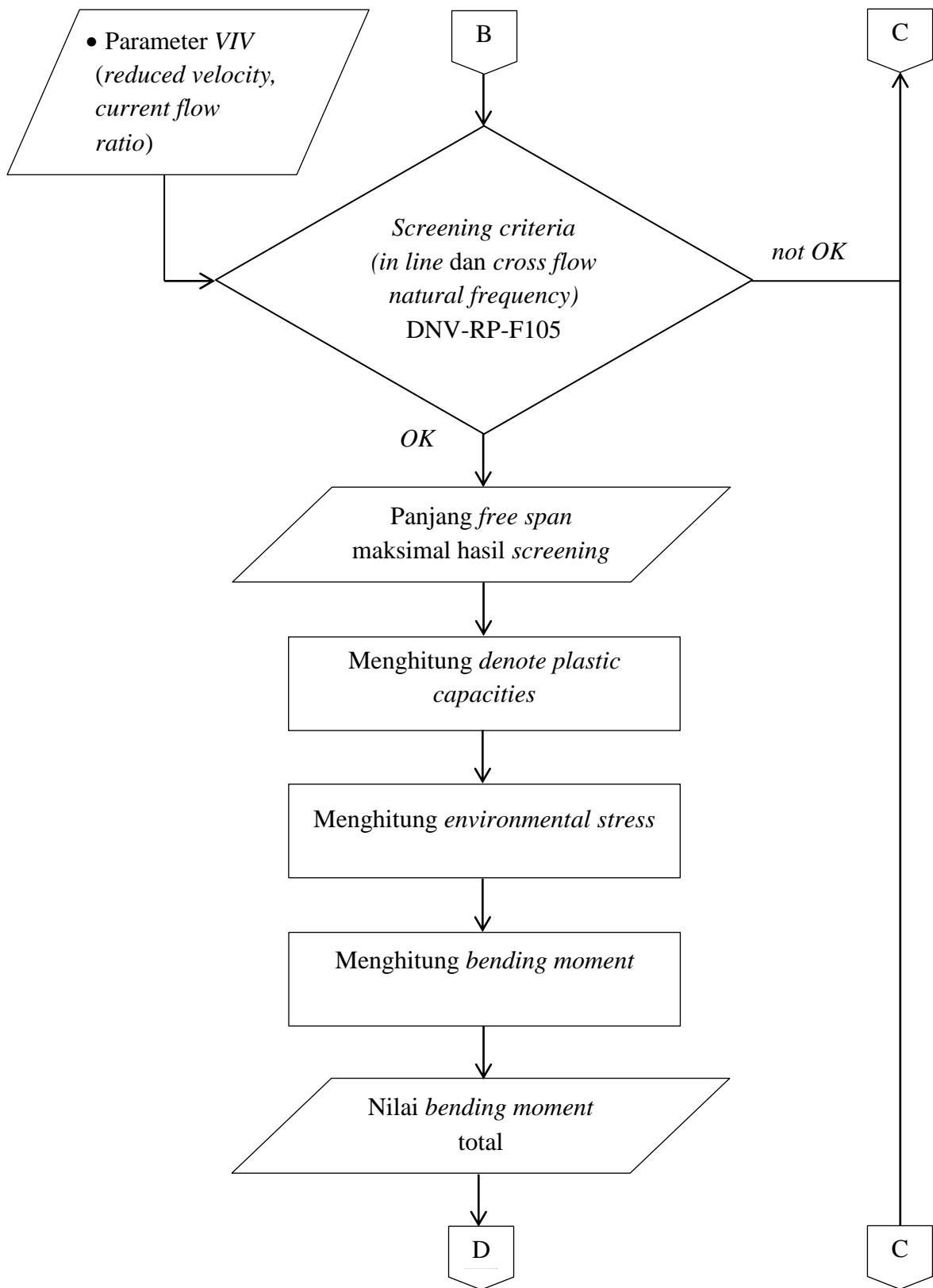
3.1. Diagram Alir (*Flowchart*)



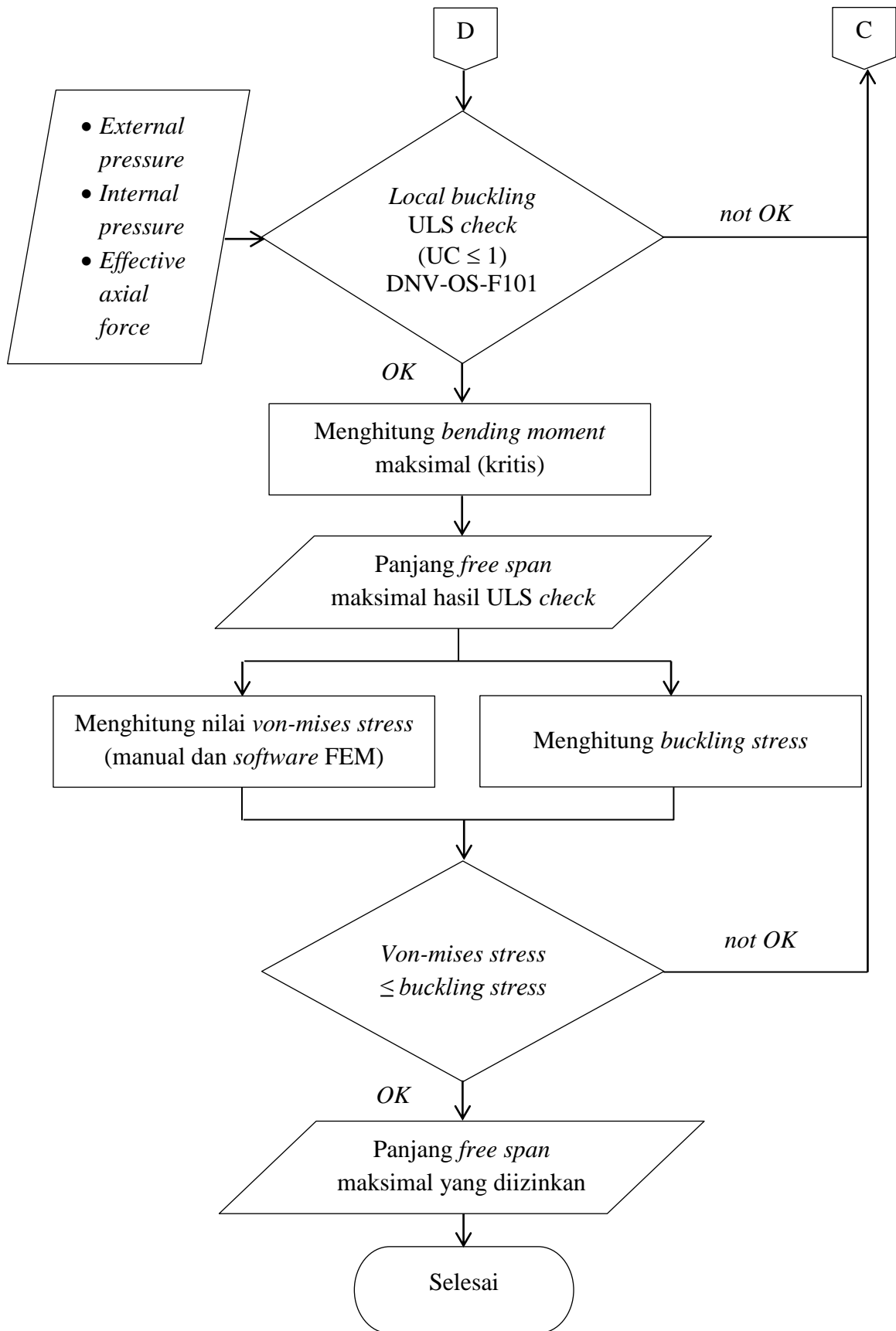
Gambar 3.1. *Flowchart* pengerjaan tugas akhir



Gambar 3.1. Flowchart pengerjaan tugas akhir (lanjutan)



Gambar 3.1. Flowchart pengerjaan tugas akhir (lanjutan)



Gambar 3.1. Flowchart pengerjaan tugas akhir (lanjutan)

3.2. Penjelasan Diagram Alir

Untuk menyelesaikan permasalahan dalam rumusan masalah tugas akhir ini harus melalui beberapa tahapan yang ditunjukkan dalam *flowchart* atau diagram alir sebelumnya (Gambar 3.1). Dalam *flowchart* tersebut dapat diketahui beberapa tahapan proses pengerjaan tugas akhir dari awal sampai akhir. Terdapat beberapa data dan proses kerja yang diperlukan untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Selanjutnya akan dijelaskan beberapa tahapan tersebut, sebagai berikut:

a. Perumusan masalah

Hal yang pertama dilakukan untuk memulai pengerjaan tugas akhir ini adalah menentukan permasalahan terkait. Dalam hal ini objek yang digunakan adalah pipa bawah laut milik PT PSE (Petro Storindo Energi) yang merupakan anak perusahaan dari PT KPC (*Kaltim Prima Coal*) yang berada di Sangatta, Kalimantan Timur. Dalam perancangan *pipeline* tentunya akan terdapat beberapa permasalahan diantaranya adalah permasalahan *local buckling* pada *pipeline* akibat keberadaan *free span* pada jalur pipa. Permasalahan tersebut dapat dihindari, salah satunya dengan menentukan panjang *free span* maksimal yang diizinkan melalui tahapan analisis *free span* untuk kondisi operasi.

b. Studi literatur dan pengumpulan data

Setelah menentukan rumusan masalah, selanjutnya melakukan studi literatur atau mencari referensi terkait untuk menyelesaikan permasalahan tersebut. Selain itu juga diperlukan beberapa data, seperti data *pipeline*, data lingkungan (*metocean*) dan data tanah di lokasi tempat *pipeline* beroperasi. Data tersebut didapatkan dari dokumen proyek PT PSE di Sangatta, Kalimantan Timur. Dalam menyelesaikan tugas akhir ini, juga berpedoman pada beberapa *code* dan *standart* seperti DNV-RP-F105 tentang *Free Spanning Pipeline*, DNV-OS-F101 tentang *Submarine Pipeline System*. Beberapa buku atau jurnal yang berkaitan menjadi referensi yang perlu untuk ditambahkan.

c. Menghitung kecepatan partikel air di lokasi pipa

Pipa yang berada di perairan dasar laut tentunya akan selalu terkena aliran dari arus perairan tersebut. Arus tersebut bisa terjadi dari arus *steady*, arus karena gelombang, atau kombinasi arus *steady* dan gelombang. Untuk gelombang, perlu dilakukan analisis spektra, karena gelombang di laut adalah gelombang acak. Gelombang acak tersebut akan diolah dengan metode stokastik yang nantinya

didapatkan kecepatan arus yang diakibatkannya. Arus permukaan akibat gelombang harus ditransformasikan ke kecepatan arus dasar laut tempat pipa meletak. Sehingga arus yang digunakan merupakan arus kombinasi dari arus laut *steady* dan arus akibat gelombang.

d. Menghitung massa efektif pipa

Nilai massa efektif pipa diperlukan nantinya untuk menghitung *fundamental natural frequency* dan beberapa parameter lainnya seperti menghitung panjang *span* efektif. Massa efektif pipa merupakan penjumlahan dari massa struktur, massa fluida di dalamnya (kondisi operasi), dan massa tambah.

e. Menghitung CSF dan β

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

f. Menghitung panjang *free span* efektif sesuai DNV-RP-F105

Untuk menghitung panjang *span* efektif menggunakan persamaan yang ada di dalam DNV-RP-F105. Dalam menghitung panjang *span* efektif perlu dipertimbangkan nilai β yaitu *relative soil stiffness parameter*, yang nantinya digunakan untuk menentukan persamaan menghitung panjang *span* efektif. Panjang *free span* efektif tersebut diperlukan di beberapa persamaan seperti pada bagian analisis struktural. Dalam DNV-RP-F105, dijelaskan bahwa untuk *free span* dengan kondisi batas *pinned-pinned*, nilai panjang efektif ini diganti dengan panjang *free span* aktual untuk beberapa atau hampir keseluruhan persamaan yang memerlukan nilai panjang *free span* efektif.

g. Menghitung *static deflection*

Salah satu nilai yang diperlukan dalam mendapatkan frekuensi natural adalah *static deflection*. *Static deflection* dapat diestimasi dengan menggunakan persamaan dalam DNV-RP-F105. Defleksi yang diperlukan dalam *in-line* dan *cross-flow*.

h. Menghitung frekuensi natural pipa sesuai DNV-RP-F105

Untuk menghitung frekuensi natural pipa diperlukan analisis dinamis dengan menghitung terlebih dahulu nilai *effective axial force*, *critical buckling load*, dan *static deflection*. Hasil tersebut dimasukkan dalam persamaan menghitung frekuensi

natural pipa. Frekuensi yang dihitung adalah untuk *in-line* dan *cross-flow*. Hasil dari frekuensi natural tersebut digunakan untuk melakukan *screening* sesuai DNV-RP-F105.

i. *Screening criteria (in-line dan cross-flow natural frequency)*

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

j. Menghitung *denote plastic capacities*

Dalam bagian ini terdapat dua karakteristik yang diperlukan dalam *screening* ULS yaitu *plastic moment resistance* dan *plastic axial force resistance*. Untuk mendapatkan keduanya, terlebih dahulu harus menghitung parameter lainnya, diantaranya kekuatan material dan nilai *de-rating* karena pengaruh temperatur dari *tensile strength*.

k. Menghitung *environmental stress*

Tegangan ini merupakan suatu nilai yang diperlukan untuk mengetahui nilai *bending moment* akibat pengaruh lingkungan (*environmental bending moment*), yaitu *bending moment in-line* dan *cross-flow*. *Environmental stress* yang dihasilkan ada dua, satu untuk *in-line* dan satunya untuk bagian *cross-flow*.

l. Menghitung *bending moment*

Bending moment pada *pipeline* karena *free span* merupakan salah satu persoalan yang perlu diperhitungkan. Persamaan umumnya menggunakan persamaan yang ada di dalam DNV-OS-F101. Sebelum menghitung *bending moment* perlu untuk menghitung *functional load* dan *environmental stress*. *Functional load* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan di DNV-OS-F101. *Environmental stress*

tersebut nantinya akan digunakan untuk menghitung *environmental load*. Setelah didapatkan semua yang diperlukan, selanjutnya menghitung *bending moment* total.

m. ULS *check (local buckling)* sesuai DNV-OS-F101

Kriteria kegagalan *local buckling pipeline* karena pengaruh beban kombinasi dari tekanan eksternal, tekanan internal, *bending moment* dan *effektive axial force* dapat menggunakan ULS *check* pada DNV-OS-F101 sesuai yang disarankan pada DNV-RP-F105. Nilai kriteria *local buckling* (UC) harus kurang dari atau sama dengan 1 (DNV-OS-F101), jika lebih dari 1 akan dilakukan evaluasi panjang *span* dengan mengurangi panjang *free span* dengan menambahkan suatu penumpu pada bawah *pipeline*. Panjang *free span* maksimal yang diizinkan dari hasil *screening criteria* untuk frekuensi natural harus dicek lagi menggunakan *local buckling chek* ini. Jika hasilnya memenuhi maka panjang *span* maksimal tersebut dapat diterima dan dijadikan hasil dari permasalahan tugas akhir ini untuk kondisi operasi. Jika tidak memenuhi akan dilakukan evaluasi panjang *free span* untuk mendapatkan panjang *free span* maksimal yang diizinkan dengan memenuhi *screening criteria* frekuensi natural (*in line* dan *cross flow*) dan kriteria *local buckling*.

n. Menghitung *bending moment* maksimal (kritis)

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

o. Menghitung *von-mises stress*

Untuk memperkuat hasil yang didapatkan, diperlukan suatu kriteria *local buckling* lain. Kriteria tersebut merupakan suatu kriteria yang didapatkan dari teori mekanika teknik dan dapat disimulasikan dalam suatu *software*. Kriteria tersebut yaitu membandingkan besar tegangan *von-mises* yang terjadi pada *free span pipeline* dengan tegangan *buckling* sebagai batasnya atau tegangan kritisnya.

Tegangan *von-mises* juga disebut tegangan *equivalent* yaitu tegangan yang didapatkan dari kombinasi pembebanan dari berbagai arah. Tegangan *von-mises* yang diperlukan di sini adalah tegangan yang diterima *pipeline* akibat pembebanan

operasional pipa seperti gaya aksial, tekanan internal, tekanan eksternal, gaya *drag* gelombang, dan pengaruh dari suhu operasi. Tegangan ini didapatkan dengan menggunakan suatu persamaan dalam buku referensi dan dengan menggunakan suatu *software* yang dapat melakukan analisis struktur elemen hingga. Kedua hasil tersebut diharapkan sama atau tidak terlalu jauh perbedaannya.

p. Menghitung *buckling stress*

Nilai *buckling stress* diperlukan sebagai batasan atau nilai kritis dari *von-mises stress* yang dihasilkan dari *pipeline free span*. Nilai ini akan dibandingkan dengan tegangan *von-mises* yang sebelumnya sudah didapatkan sebagai suatu kriteria *local buckling*.

q. Pengecekan kriteria ($von-mises \leq buckling\ stress$)

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, tegangan *von-mises* akan dibandingkan tegangan *buckling* kritis. Jika tegangan *von-mises* melebihi tegangan *buckling* kritis, maka struktur mengalami kegagalan *buckling* dari kriteria ini sehingga perlu untuk dilakukan pencegahan. Namun jika tidak melebihi, maka *pipeline free span* dikatakan aman dari *buckling*.

r. Hasil akhir panjang *free span* maksimal yang diizinkan

Hasil akhir panjang *free span* maksimal yang diizinkan merupakan panjang terpendek dari beberapa hasil *screening* yang sudah dilakukan (*screening* frekuensi natural dan *local buckling*). Hasil tersebut nantinya digunakan sebagai panjang kritis yang dijadikan pembanding dengan panjang *free span* aktual di lapangan. Jika panjang *free span* aktual melebihi panjang maksimal yang diizinkan, maka *free span* tersebut harus dilakukan retifikasi atau mitigasi dengan mengurangi panjangnya.

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Tugas Akhir

Data yang digunakan untuk analisis pada tugas akhir ini adalah data *subsea pipeline* milik PT Petro Storindo Energi (PSE) yang merupakan anak perusahaan dari PT Kaltim Prima Coal (KPC). *Pipeline* tersebut berada di daerah Sangatta, Kutai Timur, Kalimantan Timur yang menyalurkan bahan bakar solar dari *tanker* yang ada di laut ke terminal bahan bakar yang berada di darat untuk keperluan produksi perusahaan. Data yang diperlukan untuk melakukan analisis diantaranya adalah data *pipeline properties*, lingkungan, karakteristik tanah dasar laut, *free span*, dan beberapa data operasional pipa lainnya.

4.1.1 Data *pipeline design parameter*

a. Tekanan dan suhu

Tabel 4.1. Data *pipeline process*

<i>Parameters</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
<i>Design Pressure</i>	285	psig	19.6	<i>barg</i>
<i>Operating Pressure</i>	145	psig	9.8	<i>barg</i>
<i>Hydrotest Pressure</i>	356.25	psig	24.5	<i>barg</i>
<i>Design Temperature</i>	50	°C		
<i>Operating Temperature</i>	47	°C		

(Sumber: PT. Petro Storindo Energi, 2014)

b. *Pipeline properties*

Tabel 4.2. *Pipeline properties*

<i>Parameters</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
<i>Outside Diameter</i>	508	mm		
<i>Material</i>	API 5L Grade X52 PSL2 CS			
<i>Seam Type</i>	SAWL			
<i>SMYS</i>	360	MPa	52.2	ksi
<i>SMTS</i>	460	MPa	66.7	ksi
<i>Young Modulus</i>	2.07×10^5	MPa	30022.9	ksi
<i>Poisson Ratio</i>	0.3			
<i>Density</i>	7850	kg/m ³		
<i>Coefficient of Thermal Expansion</i>	1.1×10^{-5}	/°C		
<i>Oil product</i>	<i>Diesel Oil</i>			

(Sumber: PT. Petro Storindo Energi, 2014)

Untuk tebal nominal dinding pipa berukuran 15.9 mm

c. External coating pipeline

Tabel 4.3. Pipeline coating properties

<i>Parameters</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
<i>3LPE Thickness</i>	2.5	mm
<i>3LPE Density</i>	958.23	kg/m ³
<i>Cut Back - 3LPE</i>	150 (+/- 20)	mm

(Sumber: PT. Petro Storindo Energi, 2014)

d. Concrete coating

Tabel 4.4. Concrete coating properties

<i>Parameters</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
<i>Density</i>	3040	kg/m ³
<i>Cut Back</i>	300 (+/- 20)	mm
<i>Absorption</i>	5	%

(Sumber: PT. Petro Storindo Energi, 2014)

e. Data fluida

Tabel 4.5. Data fluida dalam pipeline

<i>Parameters</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
<i>Fluid or Content Density</i>		
<i>Density</i>	850	kg/m ³

(Sumber: PT. Petro Storindo Energi, 2014)

f. Corrosion allowance

Tabel 4.6. Internal corrosion allowance

<i>Location</i>	<i>Internal Corrosion Allowance</i>	<i>Units</i>
<i>All Section Pipeline</i>	3	mm

(Sumber: PT. Petro Storindo Energi, 2014)

4.1.2. Data offshore environmental parameter

a. Kedalaman laut

Tabel 4.7. Kedalaman perairan *pipeline*

<i>Item</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
<i>Max Water Depth</i>	20	m

(Sumber: PT. Petro Storindo Energi, 2014)

b. Gelombang dan arus

Tabel 4.8. Data *wave parameters*

<i>Return Period</i>	<i>Max. Significant Wave Height</i>	<i>Units</i>	<i>Wave Peak Period</i>	<i>Units</i>
1-year	2.11	m	7.2	s
100-year	3.19	m	8.8	s

(Sumber: PT. Petro Storindo Energi, 2014)

Tabel 4.9. Data arus

<i>Return Period</i>	<i>Current Velocity</i>	<i>Units</i>
1-year	0.2	m/s
100-year	0.25	m/s

(Sumber: PT. Petro Storindo Energi, 2014)

c. Tide data

Tabel 4.10. *Tidal data*

<i>Tide Level</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
<i>Highest Astronomical Tide (HAT)</i>	MSL +1.430	m
<i>Low Astronomical Tide (LAT)</i>	MSL -1.210	m
<i>Chart Datum (CD)</i>	MSL -1.500	m

(Sumber: PT. Petro Storindo Energi, 2014)

4.1.3. Data tanah

Jenis tanah di lokasi pipa disajikan dalam Tabel 4.11 di bawah ini yang diambil dari dokumen proyek PT Petro Storindo Energi (2014) dalam bagian *survey* seperti berikut:

Tabel 4.11. Tipe tanah

Location	Titik Uji	Jarak dari KP 0.00 (m)	Jenis Tanah
KP 0.00 - KP 0.50	BH - 01	0	<i>clayey sandy silt</i>
	BH - 02A	334	<i>organics silt</i>
KP 0.50 - KP 1.00	BH - 03A	761	<i>silty sand</i>
	BH - 04A	1167	<i>silty clay</i>
KP 1.00 - KP 1.50	BH - 05	1424	<i>coral fragment</i>
	BH - 05A	1445	<i>silty clay</i>
KP 1.50 - KP 2.00	BH - 06A	1980	<i>clayey gravelly sand</i>
KP 2.00 - KP 2.25	BH - 06	1987	<i>coral fragment</i>
KP 2.25 - KP 2.50	-	-	-
KP 2.50 - KP 2.898	BH - 07	2527	<i>sandy clay</i>

Dalam analisis ini lokasi rute pipa yang dianalisis adalah pada KP 2.5–KP 2.898. Karakteristik dari tanah untuk lokasi tersebut adalah sebagai berikut (Tabel 4.12):

Tabel 4.12. Karakteristik jenis tanah lokasi KP 2.50 – KP 2.898

<i>Top of Strata</i>	<i>Soil Type</i>	<i>Undrained Shear Strength, s_u (kN/m²)</i>	<i>Submerged Unit Weight, γ_{soil}' (kN/m³)</i>	<i>Angle of Friction, ϕ_s (°)</i>
0.000	<i>Clay</i>	0	4	-
7.000	<i>Clay</i>	15	4	-
7.001	<i>Clay</i>	15	5	-
17.750	<i>Clay</i>	15	5	-
17.751	<i>Sand-Dense</i>	-	6	28
22.000	<i>Sand-Dense</i>	-	6	28

4.1.4. Data *free span*

Pada Tabel 4.13 berikut ini merupakan data panjang *free span* yang berada pada lokasi KP 2.50-KP 2.898:

Tabel 4.13. Data *free span* KP 2.50–KP 2.898

No	Panjang <i>free span</i> , L (m)
1	9.28
2	7.64
3	8.28
4	8.77
5	12.14
6	10.80

4.2. Perhitungan Umum Pipa

Seperti dijelaskan dalam Bab 2, sebelum melakukan suatu analisis pada pipa, dilakukan terlebih dahulu perhitungan umum pipa (Bagian 2.2.1.2). Berikut merupakan beberapa perhitungan umum yang didapatkan:

4.2.1. Pipeline properties parameter

Pada Tabel 4.14 di bawah ini, merupakan nilai-nilai yang nantinya diperlukan dalam menghitung beberapa parameter yang didapatkan dari data tugas akhir (Bagian 4.1) sebagai berikut:

Tabel 4.14. Data pipe properties

No	Parameter pipa	Notasi	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
1	Diameter luar pipa nominal	D_0	508	mm	0.508	m
2	Tebal nominal dinding pipa	t_{nom}	15.9	mm	0.0159	m
3	<i>Corrosion allowance</i>	t_{corr}	3	mm	0.003	m
4	Tebal <i>coating</i> korosi	t_{cc}	2.5	mm	0.0025	m
5	Tebal <i>concrete coating</i>	t_{wc}	50	mm	0.05	m
6	Ketebalan <i>marine growth</i>	t_{mar}	50	mm	0.05	m
7	Tebal <i>coating</i> dalam	t_{int}	0	mm	0	m
8	Densitas <i>corrosion coating</i>	ρ_{cc}	958.23	kg/m ³	-	-
9	Densitas <i>concrete coating</i>	ρ_{wc}	3040	kg/m ³	-	-
10	Densitas <i>field joint infill</i>	ρ_{fj}	1025	kg/m ³	-	-
11	Densitas <i>steel</i> pipa	ρ_s	7850	kg/m ³	-	-
12	Densitas isi pipa	ρ_{con}	850	kg/m ³	-	-
13	Densitas <i>marine growth</i>	ρ_{mar}	1025	kg/m ³	-	-
14	Panjang <i>joint</i> pipa	L_{pj}	12.1	m	-	-
15	Panjang <i>joint cutback</i>	FJ	300	mm	0.3	m

Dengan menggunakan persamaan yang ada dalam bagian 2.2.1.2, tentang perhitungan umum pipa (Pers. 2.1–2.9), didapatkan hasil pada Tabel 4.15 sebagai berikut:

Tabel 4.15. Hasil perhitungan umum pipa

No	Parameter <i>Pipeline</i>	Notasi	Nilai	Satuan
1	Tebal dinding pipa	t_2	0.0129	m
2	Diameter total	D_t	0.713	m
3	Diameter tanpa <i>marine growth</i>	D_{tm}	0.613	m
4	Diameter dalam pipa	D_i	0.4762	m
5	Diameter <i>concrete</i> pipa	D_c	0.613	m
6	<i>Moment area</i> dari <i>steel</i> pipa	I_{steel}	0.000745	m^4
7	<i>Moment area</i> dari <i>concrete</i>	I_{conc}	0.003532	m^4
8	<i>Internal cross section area</i>	A_i	0.178102	m^2
9	Area dari <i>steel</i> pipa	A_s	0.024581	m^2

4.2.2. Berat terendam pipa

Berat terendam pipa merupakan selisih antara berat pipa (*gravity*) dengan *buoyancy* pipa yang terjadi untuk setiap satuan panjangnya. Langkah pertama yang dilakukan adalah menghitung berat pipa dengan semua bagiannya, seperti bagian *steel*, lapisan *coating*, *concrete*, isi pipa (khusus untuk operasi). Setelah didapatkan berat pipa kemudian mengurangnya dengan *buoyancy* yang terjadi. Pada Tabel 4.16 berikut ini merupakan hasil perhitungan berat bagian pipa dan *buoyancy* yang terjadi dengan menggunakan Pers. (2.10–2.16) untuk berat bagian-bagian pipa dan Pers. (2.19 dan 2.20) untuk perhitungan *buoyancy* pipa yang terdapat pada bagian 2.2.1.2 tentang perhitungan umum pipa:

Tabel 4.16. Hasil perhitungan berat bagian pipa dan *buoyancy*

No	Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
1	Berat <i>internal coating</i>	W_{ic}	0	N
2	Berat <i>corrosion coating</i>	W_{cc}	456.047	N
3	Berat <i>concrete coating</i>	W_{wc}	30329.741	N
4	Berat <i>marine growth</i>	W_m	12671.022	N
5	Berat <i>pipeline steel</i>	W_s	22904.689	N
6	Berat isi <i>pipeline</i>	W_c	17969.747	N
7	Berat <i>field joint</i>	W_{fj}	533.547	N
8	<i>Bouyancy</i> setiap meter	F_b	4014.781	N/m
9	<i>Bouyancy</i> setiap joint	F_{buoy}	48578.845	N

Selanjutnya adalah menghitung berat terendam pipa dengan Pers. (2.21) kondisi operasi, didapatkan hasilnya pada Tabel 4.17 berikut:

Tabel 4.17. Berat pipa terendam

Parameter	Nilai (N/m)
Berat pipa terendam (W_{sub})	2998.839

4.2.3. Tekanan pada pipa

Perhitungan tekanan pipa sangat penting untuk dilakukan. Tekanan ini nantinya digunakan untuk melakukan analisis selanjutnya seperti melakukan pengecekan dengan pengujian *local buckling* (ULS check). Tekanan pipa yang dihitung adalah tekanan internal dan eksternal pipa. Untuk tekanan internal didapatkan dari tekanan desain internal, sedangkan untuk menghitung tekanan eksternal menggunakan Pers. (2.27). Dalam Pers. (2.27) terdapat parameter kedalaman perairan total yang didapatkan dari Pers. (2.28). Nilai parameter dan hasil kedua tekanan tersebut disajikan dalam Tabel 4.18 berikut:

Tabel 4.18. Tekanan pipa

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Percepatan gravitasi bumi	g	9.81	m/s^2
Massa jenis air laut	ρ_w	1025	kg/m^3
Kedalaman perairan	d	20	m
Kenaikan muka air laut	T_{surge}	1.454	m
Tekanan desain	P_{de}	1960000	Pa
Tekanan internal	P_i	1960000	Pa
Tekanan eksternal	P_e	215725.3335	Pa

Dari kedua hasil tersebut dapat dilihat bahwa tekanan internal pipa lebih besar dari tekanan eksternal pipa, hal ini nantinya akan berpengaruh pada pemilihan persamaan dalam analisis *local buckling* untuk beban kombinasi (Pers. 2.89 dan Pers. 2.90).

4.2.4. Massa efektif pipa

Massa efektif pipa merupakan hasil penjumlahan antara berat struktur pipa, isi pipa, dan berat tambah pipa sebagai konsekuensi pipa di dalam air. Untuk massa struktur dan isi pipa dapat digunakan hasil perhitungan pada bagian berat terendam pipa. Sedangkan untuk massa tambah (*added mass*) perlu untuk dilakukan perhitungan lagi dengan mendapatkan koefisien *added mass* terlebih dahulu.

Untuk mendapatkan nilai koefisien massa tambah sesuai dengan DNV-RP-F105 (2006) yang sudah disajikan dalam tugas akhir ini pada Bab 2 Pers. (2.26), sebelumnya perlu untuk mempertimbangkan rasio antara *gap* dan diameter luar pipa. Dengan memasukkan nilai *gap* dengan nilai 1 m, sehingga didapatkan rasio dengan diameter luar pipa (untuk D_t 0.713 m) adalah 1.4025.

Dengan e/D_t (1.4025) \geq 0.8, maka digunakan Pers. (2.26b), sehingga didapatkan hasil dari koefisien massa tambah seperti dalam Tabel 4.19 berikut:

Tabel 4.19. Koefisien massa tambah

Parameter	Notasi	Nilai	
<i>Gap</i>	e	1	m
Diameter luar pipa total	D_t	0.713	m
Rasio	e/D_t	1.4025	(≥ 0.8)
Koefisien massa tambah	C_a	1	

Dengan menggunakan Pers. (2.25), didapatkan nilai massa efektif pipa untuk kondisi operasi. Pada Tabel 4.20 berikut merupakan hasil dan parameter massa efektif yang sesuai dengan Pers. (2.25) tersebut:

Tabel 4.20. Massa efektif pipa

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Berat terendam pipa	W_{sub}	2998.839	N/m
<i>Buoyancy</i> pipa	F_b	4014.781	N/m
Massa efektif pipa	m_e	1124.1998	kg/m

4.3. Arus dan Gelombang

4.3.1. Arus laut pada *pipeline*

Arus yang diperlukan untuk melakukan analisis pipa adalah arus laut yang berada pada posisi pipa bawah laut (*pipe level*), dengan arah arus tegak lurus dengan pipa ($\theta_{rel} = 90^\circ$) karena pada arah tersebut pengaruh beban arus yang terjadi adalah yang paling besar diantara arah yang lainnya. Karena pipa berada di daerah dekat dengan dasar laut, sehingga kekasaran dasar laut (z_0) juga berpengaruh pada aliran arus laut dengan tetap mempertimbangkan *gap* (e) yang ada pada kondisi *free span*.

Untuk mendapatkan nilai kekasaran (*roughness*, z_0) dasar laut dapat digunakan Tabel 2.1, yang didapatkan dari DNV-RP-F105 (2006) dengan mempertimbangkan jenis tanah di dasar laut tersebut. Dengan jenis tanah *sandy clay*,

maka untuk kekasaran dapat digunakan *silt* sehingga didapatkan nilai kekasarannya adalah 5×10^{-6} m. Untuk menghitung arus pipa pada *pipe level*, diperlukan beberapa nilai yang didapatkan dari data tugas akhir yang ada dan perhitungan lainnya. Beberapa perhitungan yang diperlukan diantaranya faktor reduksi, R_c (Pers. 2.30), elevasi di atas *seabed*, z (Pers. 2.31), dan tinggi relatif untuk *outer zone*, z_r (Pers. 2.32). Dalam Tabel 4.21 berikut disajikan beberapa data dan hasil perhitungan yang diperlukan untuk menghitung kecepatan arus di lokasi pipa:

Tabel 4.21. Parameter untuk perhitungan arus laut di lokasi pipa

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Arah aliran arus	θ_{rel}	90	°
Diameter luar nominal	D_0	0.508	m
Diameter total pipa	D_t	0.713	m
Gap	e	1	m
Kecepatan arus <i>outer zone</i> , 1 tahun	$U(z_r)$	0.2	m/s
Kecepatan arus <i>outer zone</i> , 100 tahun	$U(z_r)$	0.25	m/s
Faktor reduksi	R_c	1	
Kekasaran dasar laut, (<i>silt</i>)	z_0	0.000005	m
Elevasi di atas dasar laut	z	1.3565	m
Tinggi referensi di <i>outer zone</i>	z_r	0.613	m

Dengan menggunakan Pers. (2.29), didapatkan nilai kecepatan arus di lokasi pipa adalah sebagai berikut (Tabel 4.22):

Tabel 4.22. Arus laut pada pipa

No	Periode ulang	U_c (m/s)
1	1 tahun	0.214
2	100 tahun	0.267

4.3.2. Kecepatan partikel gelombang

Dengan menggunakan prosedur sesuai dengan Bab 2 (Bagian 2.2.2.2) dan beberapa perhitungan yang ditunjukkan pada Pers. (2.33–2.43) untuk menghitung kecepatan partikel yang dipengaruhi oleh gelombang, ada beberapa tahapan untuk menghitungnya. Langkah pertama adalah membuat spektra gelombang sesuai dengan beberapa parameter-parameter yang diperlukan. Persamaan spektra yang digunakan adalah persamaan spektra JONSWAP (Pers. 2.33) karena sering digunakan di Indonesia karena sama-sama untuk perairan laut tertutup, namun hasil yang didapatkan akan berlebihan, sehingga untuk mengurangnya dapat dimasukkan nilai

peakedness parameter (γ) yang lebih kecil, dalam hal ini menggunakan Pers. (2.36). Langkah selanjutnya adalah mentransformasikan kecepatan partikel gelombang tersebut ke posisi pipa di dasar laut dengan menggunakan Pers. (2.38). Parameter yang dibutuhkan oleh beberapa persamaan tersebut diantaranya disajikan pada Tabel 4.23 berikut:

Tabel 4.23. Parameter untuk perhitungan kecepatan partikel gelombang

Parameter	Kondisi		Satuan
	1 tahun	100 tahun	
H_s	2.11	3.19	m
T_w	7.2	8.8	s
ω_p	0.873	0.714	rad/s
ϕ	4.95668	4.92705	
γ	1.05107	1.08751	
α	0.00826	0.00838	
d	20	20	m
k	0.08342	0.06162	

Nilai fungsi distribusi (ϕ) tersebut digunakan untuk memilih persamaan *peakedness parameter* yang sesuai. Sedangkan α merupakan nilai konstanta Generalised Philips yang didapatkan dengan menggunakan Pers. (2.34). Untuk nilai k (angka gelombang) didapatkan dengan menggunakan iterasi dari Pers. (2.40).

Setelah melakukan perhitungan momen spektra seperti pada Pers. (2.41), didapatkan hasil dari *spectral moment* (varian) dari perhitungan sebelumnya pada Tabel 4.24 berikut:

Tabel 4.24. Varian *spectral moment*

<i>Spectral moment</i>	Nilai	
	1 tahun	100 tahun
M_0	0.06249391	0.2538274
M_1	0.09712259	0.3326204
M_2	0.19029864	0.5744717
M_4	1.41242391	3.8355176

Kecepatan arus dan periode simpangan nol akibat gelombang di posisi *pipe level* dapat dihitung dengan Pers. (2.42 dan 2.43) dan hasilnya pada Tabel 4.25 sebagai berikut:

Tabel 4.25. Kecepatan partikel gelombang pada *pipe level*

Kondisi	U_s (m/s)	T_u (s)
1 tahun	0.500	3.601
100 tahun	1.008	4.177

Kecepatan partikel air karena gelombang di atas akan berkurang karena pengaruh dari arah dan persebaran gelombang, sehingga perlu dipertimbangkan *reduction factor*. Dengan menggunakan grafik pada Gambar 2.6, didapatkan *reduction factor* sebesar 0.95 (untuk *spreading parameter*, $s=6$), sehingga kecepatan partikel air karena gelombang akan menjadi seperti pada Tabel 4.26 berikut ini (Pers. 2.44):

Tabel 4.26. Kecepatan partikel gelombang yang digunakan

Kondisi	U_w (m/s)	T_u (s)
1 tahun	0.475	3.601
100 tahun	0.957	4.177

Untuk perhitungan detail mengenai perhitungan spektra dan transformasi gelombang dapat dilihat dalam Lampiran B (Bagian B.2).

4.4. Interaksi dengan Tanah

4.4.1. Soil stiffness

Tanah sangat berperan dalam analisis ini, sehingga beberapa perhitungan yang berhubungan dengan interaksi pipa dengan tanah harus diperhitungkan. Dengan jenis tanah yang ada dalam data yaitu *sandy clay*, maka beberapa parameter dapat ditentukan. Tabel 4.27 berikut berisi nilai parameter yang diperlukan untuk perhitungan kekakuan tanah.

Tabel 4.27. Parameter untuk perhitungan kekakuan tanah

Parameter	Nilai	Satuan
W_{sub}	2998.839	N/m
F_b	4014.781	N/m
ρ_s/ρ	1.747	
D_t	0.713	m
v_{soil}	0.45	(<i>clay</i>)
C_v	1400	(<i>soft clay</i>)
C_L	1200	(<i>soft clay</i>)

Beberapa nilai di atas merupakan hasil perhitungan sebelumnya (W_{sub} dan F_b). Untuk nilai ρ_s/ρ didapatkan dengan menggunakan Pers. (2.91). Sedangkan untuk nilai koefisien kekakuan tanah vertikal (C_V) dan lateral (C_L) didapatkan dari Tabel 2.11, sesuai dengan jenis tanah di lokasi tersebut yaitu *sandy clay* (tipe *soft clay*). Dengan menggunakan Pers. (2.89) untuk vertikal dan Pers. (2.90) untuk horizontal, hasil untuk kekakuan tanah adalah pada Tabel 4.28 berikut:

Tabel 4.28. Kekakuan tanah

Kekakuan tanah	Hasil (N/m ²)
Vertikal (K_V)	3219676.08
Lateral (K_L)	2200878.58

Mengenai perhitungan detail untuk kekakuan tanah dapat dilihat dalam Lampiran C.

4.5. Parameter Hidrodinamika

4.5.1. Parameter stabilitas

Beberapa nilai yang dibutuhkan untuk menghitung parameter stabilitas diantaranya massa efektif pipa dan modal rasio *damping* total. Modal rasio *damping* total merupakan penjumlahan dari beberapa *damping* yaitu *damping* struktur, *damping* hidrodinamis, dan *soil damping* sesuai Pers. (2.65). Dari penjelasan pada bagian 2.2.4.1, khususnya pada bagian *damping* didapatkan nilai masing-masing dan total *damping* disajikan dalam Tabel 4.29 berikut:

Tabel 4.29. Total *damping*

<i>Damping</i>	Nilai
<i>Structural damping</i> , ζ_{str}	0.015
<i>Hydrodynamic damping</i> , ζ_h	0.000
<i>Soil damping</i> , ζ_{soil}	0.010
<i>Total damping</i> , ζ_T	0.025

Beberapa parameter lain yang dibutuhkan untuk menghitung parameter stabilitas diantaranya adalah pada Tabel 4.30 berikut:

Tabel 4.30. Parameter untuk menghitung parameter stabilitas

Parameter	Nilai	Satuan
m_e	1124.199779	kg/m
ζ_T	0.025	
ρ_w	1025	kg/m ³
D_t	0.713	m
γ_k	1.3	

Selanjutnya adalah menghitung parameter stabilitas sesuai dengan Pers. (2.63), untuk koreksi hasil parameter stabilitas tersebut harus dibagi dengan *safety factor* untuk parameter stabilitas (γ_k) yang didapatkan pada Tabel 2.3. Setelah dibagi dengan parameter stabilitas (*high*, $\gamma_k : 1.3$), maka parameter stabilitas yang digunakan adalah pada Tabel 4.31 berikut:

Tabel 4.31. Parameter stabilitas

Parameter	Hasil
Parameter stabilitas (K_{sd})	0.372

4.5.2. Current flow ratio

Current flow ratio (α) adalah perbandingan antara arus laut *steady* dan kecepatan partikel air karena gelombang. Nilai tersebut merupakan salah satu nilai yang diperlukan untuk melakukan *screening* terhadap frekuensi natural dan juga keperluan lainnya. Untuk mendapatkan nilai tersebut digunakan Pers. (2.62), hasilnya pada Tabel 4.32 berikut:

Tabel 4.32. Perhitungan *current flow ratio*

Parameter	Nilai	Satuan
$U_{c,100}$ tahun	0.267	m/s
$U_{w,1}$ tahun	0.475	m/s
α	0.3598	

4.5.3. Reduce velocity

a. In-line

Persamaan yang digunakan untuk menghitung *reduce velocity* arah *in-line* berdasarkan pada nilai parameter stabilitas yang sudah dihitung sebelumnya. Dari nilai parameter stabilitas yang didapatkan ($K_{sd} < 0.4$), sehingga persamaan yang

digunakan adalah Pers. (2.72a). Hasil dari *reduce velocity* arah *in-line* disajikan pada Tabel 4.34 di bawah bersama untuk arah *cross-flow*.

b. *Cross-flow*

Untuk arah *cross flow*, *reduce velocity* dipengaruhi oleh adanya *gap* dan *trenching* pada lokasi pipa. Sebelum menghitung *reduce velocity*, sebelumnya dihitung faktor koreksi untuk keberadaan *pipeline* yang dekat dengan tanah dan *trenching*. Kedua persamaan tersebut dipilih sesuai dengan nilai *gap* dan diameter pipa yang ada sesuai data. Setelah mendapatkan kedua nilai tersebut kemudian menghitung *reduce velocity* untuk arah *cross-flow* sesuai Pers. (2.75).

Beberapa parameter yang diperlukan dalam persamaan *reduce velocity in-line* dan *cross-flow* tersebut diantaranya (Tabel 4.33):

Tabel 4.33. Parameter untuk perhitungan *reduce velocity*

Parameter	Nilai
K_{sd}	0.37174
$\Psi_{proxi,onset}$	1
$\Psi_{trench,onset}$	1
$\gamma_{on, IL}$	1.1
$\gamma_{on, CF}$	1.2

Hasil dari *reduce velocity* untuk arah *cross-flow* dan *in-line* adalah sebagai berikut:

Tabel 4.34. *Reduce velocity*

<i>Reduced Velocity</i>	Hasil
<i>In-line</i>	0.9091
<i>Cross-flow</i>	2.5

4.6. Analisis Struktural *Pipeline*

4.6.1. *Concrete stiffness factor (CSF)*

Dengan data dan perhitungan sebelumnya didapatkan beberapa nilai yang nantinya digunakan untuk menghitung *concrete stiffness factor (CSF)*. Dengan menggunakan Pers. (2.84) didapatkan CSF pada Tabel 4.35 berikut beserta dengan nilai parameter yang diperlukan:

Tabel. 4.35. Perhitungan CSF

Parameter	Nilai	Keterangan
Empirical parameter <i>concrete</i> (k_c)	0.25	(untuk PP/PE coating)
Modulus Young <i>steel</i> (E_{steel})	207000000000	Pa
Modulus Young <i>concrete</i> (E_{conc})	29054970000	Pa
Momen inersia <i>steel</i> (I_{steel})	0.000745	m ⁴
Momen inersia <i>concrete</i> (I_{conc})	0.003532	m ⁴
<i>Concrete stiffness factor</i> (CSF)	0.1842	

4.6.2. Panjang *free span* efektif

Sebelum menentukan panjang *free span* efektif, yang harus dilakukan terlebih dahulu adalah menghitung nilai β yaitu *relative soil stiffness parameter* sesuai dengan Pers. (2.59). Nilai β tersebut digunakan untuk menentukan persamaan perhitungan panjang *free span* efektif di Pers. (2.58). Nilai β tersebut berhubungan dengan nilai kekakuan tanah, panjang aktual *free span*, faktor kekakuan *concrete*, modulus Young dan momen inersia pipa. Hasil dari nilai β sesuai dengan panjang *free span* aktual yang dimasukkan adalah dalam Tabel 4.36 berikut:

Tabel 4.36. Parameter untuk perhitungan panjang efektif *free span*

Parameter	Nilai	Keterangan
E	207000000000	Pa
I_{steel}	0.000745	m ⁴
K_V	3219676.08	N/m ²
K_L	2200878.58	N/m ²
CSF	0.1842	
β (L=17.55 m)	3.058 (<i>in-line</i>), 3.223 (<i>cross-flow</i>)	$\beta \geq 2.7$
β (L=26.85 m)	3.797 (<i>in-line</i>), 3.962 (<i>cross-flow</i>)	$\beta \geq 2.7$

Dengan menggunakan Pers. (2.58), didapatkan hasil perhitungan untuk panjang *free span* efektif (L_{eff}) yang ditunjukkan pada Tabel 4.37 berikut:

Tabel 4.37. Panjang *free span* efektif

No	Panjang <i>free span</i> , L (m)	Panjang <i>free span</i> efektif, L_{eff} (m)	
		<i>In-line</i>	<i>Cross-flow</i>
1	17.55	26.503	25.683
2	26.85	35.761	34.936

Panjang *free span* aktual (L) yang dimasukkan dalam Tabel 4.36 dan 4.37 di atas adalah panjang *free span* maksimal yang sudah dilakukan *screening* frekuensi natural sebelumnya, sehingga dalam Tabel 4.37 tersebut hanya untuk ditunjukkan panjang *free span* efektif yang terjadi (pengaruh arah *in-line* dan *cross-flow*) untuk masing masing *free span* maksimal tersebut. Begitu juga untuk perhitungan lainnya yang memerlukan nilai panjang aktual *free span* (L). Untuk perhitungan detail dapat dilihat dalam Lampiran D (Bagian D.1) dan untuk *boundary condition* yang diperlukan pada lampiran D (Bagian D.2).

4.6.3. Gaya aksial efektif (S_{eff})

Beberapa data dibutuhkan untuk mendapatkan nilai dari gaya aksial efektif seperti *effective lay tension*, pebedaan temperatur dari mulai digelar, *section area*, dan yang lainnnya sesuai Pers. (2.88). Beberapa parameter tersebut disajikan dalam Tabel 4.38 di bawah ini:

Tabel 4.38. Parameter untuk perhitungan S_{eff}

Parameter	Nilai	Satuan
H_{eff}	0	N
v	0.3	
P_i	1960000	Pa
D_i	0.4762	m
ΔT	50	$^{\circ}C$
α_e	0.000011	
E	207000000000	Pa
A_s	0.024581	m^2

Dengan menggunakan Pers. (2.88), didapatkan nilai gaya aksial efektif yang disajikan pada Tabel 4.39 berikut:

Tabel 4.39. Gaya aksial efektif

Parameter	Hasil (N)
Gaya aksial efektif (S_{eff})	-2938184.0286

Hasil tersebut bernilai negatif, ini menunjukkan bahwa gaya tersebut mengakibatkan tekan terhadap pipa dalam keadaan bentangan bebas. Jika hasilnya positif maka terjadi gaya tarik, hal ini sesuai dengan yang dituliskan dalam DNV-OS-F101 (2013).

4.6.4. Critical buckling load (P_{cr})

Beberapa parameter yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai *critical buckling load* diantaranya disajikan pada Tabel 4.40 berikut:

Tabel 4.40. Parameter perhitungan P_{cr}

Parameter	Nilai	Satuan
C_2	1	
CSF	0.184204457	
E	207000000000	Pa
I_{steel}	0.000744852	m^4

Nilai C_2 di atas merupakan koefisien yang digunakan dalam persamaan P_{cr} yang didapatkan dari Tabel 2.5. Untuk kasus *free span* dalam tugas akhir ini *boundary condition* diasumsikan sebagai *pinned-pinned*. Jadi nilai C_2 harus menyesuaikan dengan kondisi tersebut. Sesuai dengan Pers. (2.87), hasil yang didapatkan untuk perhitungan *critical buckling load* untuk arah *in-line* dan *cross-flow* adalah pada Tabel 4.41. Nilai L_{eff} yang dimasukkan adalah nilai L, sesuai penjelasan dalam *boundary condition* Bagian (2.2.5.6) untuk *pinned-pinned*.

Tabel 4.41. Hasil perhitungan *critical buckling load*

No	Panjang <i>free span</i> , L (m)	<i>Critical buckling load</i> , P_{cr} (N)	
		<i>In-line</i>	<i>Cross-flow</i>
1	17.55	5850766.946	5850766.946
2	26.85	2499645.726	2499645.726

4.6.5. Static deflection

Sebelum menghitung *static deflection*, hal yang dilakukan adalah menghitung beban defleksi (q) yang diterima masing-masing arah gerakan pipa (*in-line* dan *cross-flow*). Sesuai pada bagian 2.2.5.3, dijelaskan bahwa q untuk arah *in-line* adalah gaya *drag* yang terjadi. Sedangkan untuk arah *cross-flow*, nilai q adalah berat terendam pipa. Untuk gaya *drag* sendiri memerlukan suatu koefisien gaya *drag* yang dapat dihitung dengan Pers. (2.52), hasilnya disajikan dalam Tabel 4.42 berikut:

Tabel 4.42. Perhitungan koefisien gaya *drag*

Koefisien gaya <i>drag</i>	Notasi	Nilai	Keterangan
Koefisien <i>drag</i> dasar	C_{D0}	0.98396	$k/Dt=0.0047$
Koreksi karena KC	ψ_{KC}	1.37261	$\alpha=0.3598$
Koreksi dekat dengan <i>seabed</i>	ψ_{proxi}	1	$e/Dt=1.403$
Koreksi karena <i>trench</i>	ψ_{trench}	1	$\Delta/D=0$
Koreksi selama getaran <i>cross-flow</i>	ψ_{VIV}	1.23493	
Koefisien <i>drag</i> yang digunakan	C_D	1.668	

Untuk gaya *drag* dapat dihitung menggunakan Pers. 2.49. Hasil dari perhitungan gaya *drag* ditunjukkan dalam Tabel 4.43 di bawah ini beserta parameter yang dibutuhkan:

Tabel 4.43. Perhitungan gaya *drag*

Parameter	Nilai	Satuan
U_c	0.267	m/s
U_w	0.957	m/s
U_{tot}	1.224	m/s
D_t	0.713	m
C_D	1.668	
F_D	913.373	N/m

Untuk perhitungan detail mengenai gaya *drag* dapat dilihat dalam lampiran F. Rangkuman untuk beban defleksi masing-masing arah (*in-line* dan *cross-flow*) sesuai dengan perhitungan sebelumnya disajikan dalam Tabel 4.44 berikut:

Tabel 4.44. Beban defleksi

No	Arah	Beban defleksi, q (N/m)	Keterangan
1	<i>In-line</i>	913.373	F_D
2	<i>Cross flow</i>	2998.839	W_{sub}

Dengan Pers. (2.86), hasil untuk *static deflection* adalah pada Tabel 4.45. Nilai L_{eff} yang dimasukkan adalah nilai L , sesuai penjelasan dalam *boundary condition* Bagian (2.2.5.6) untuk *pinned-pinned*.

Tabel 4.45. Hasil perhitungan *static deflection*

No	Panjang <i>free span</i> , L (m)	<i>Static deflection</i> , δ (m)	
		<i>In-line</i>	<i>Cross-flow</i>
1	17.55	0.0124	0.0408
2	26.85	-0.1930	-0.6335

Dari hasil tersebut nilai *static deflection* untuk kondisi arah *in-line* dan *cross-flow* memiliki nilai yang berbeda, hal ini dikarenakan perbedaan nilai beban defleksi yang diterima masing-masing, yang sebelumnya sudah dijelaskan pada Bagian 2.2.5.3.

4.6.6. Frekuensi natural *pipeline*

Untuk mendapatkan nilai dari frekuensi natural pipa dapat menggunakan Pers. (2.83). Nilai L_{eff} yang dimasukkan adalah nilai L , sesuai penjelasan dalam *boundary condition* Bagian (2.2.5.6) untuk *pinned-pinned*. Parameter yang dibutuhkan dalam Pers. (2.83) disajikan pada Tabel 4.46 berikut:

Tabel 4.46. Parameter untuk perhitungan frekuensi natural

Parameter	Nilai		Satuan
	L=17.55 m	L=26.85 m	
C_1	1.57	1.57	(<i>pin-pin</i>)
C_3	0.8	0.8	(<i>pin-pin</i>)
CSF	0.184204457	0.184204457	
E	207000000000	207000000000	Pa
I_{steel}	0.000744852	0.000744852	m^4
m_e	1124.199779	1124.199779	kg/m
D_t	0.713	0.713	m
S_{eff}	-2938184.029	-2938184.029	N
P_{cr}	5850766.946	2499645.726	N
δ	0.0124 (<i>in-line</i>)	-0.6335 (<i>cross-flow</i>)	m

Pada Tabel 4.47 berikut merupakan hasil dari frekuensi natural pipa:

Tabel 4.47. Frekuensi natural pipa

Arah	Panjang <i>free span</i> , L (m)	Frekuensi natural, f_n (Hz)
<i>In-line</i>	17.55	1.44976
<i>Cross-flow</i>	26.85	0.59278

Hasil dari frekuensi natural ini nantinya akan digunakan dalam persamaan *screening* frekuensi natural untuk menentukan panjang maksimal *free span*. Persamaan *screening* tersebut sesuai dengan Pers. (2.81) untuk *in-line* dan (2.82) untuk *cross-flow*.

4.7. Screening Frekuensi Natural

Setelah mendapatkan beberapa nilai yang dibutuhkan untuk melakukan *screening* frekuensi natural, kemudian melakukan *screening* tersebut sesuai dengan DNV-RP-F105 (2006) untuk arah *in-line* dan *cross-flow*.

1. Untuk *in-line*

Beberapa parameter yang dibutuhkan untuk melakukan *screening* frekuensi natural untuk arah *in-line* sesuai dengan Pers. (2.81) adalah pada Tabel 4.48 berikut:

Tabel 4.48. Parameter untuk *screening in-line*

Parameter	Nilai	Satuan
γ_{IL}	1.4	
$U_{c,100}$ tahun	0.267	m/s
$V_{R,IL}$	0.9091	
D_t	0.713	m
α	0.3598	

2. Untuk *cross-flow*

Seperti untuk arah *in-line*, untuk *screening* frekuensi natural arah *cross-flow* juga diperlukan beberapa parameter sesuai yang dibutuhkan dalam Pers. (2.82). Beberapa parameter tersebut disajikan dalam Tabel 4.49 berikut:

Tabel 4.49. Parameter untuk *screening cross-flow*

Parameter	Nilai	Satuan
γ_{CF}	1.4	
$U_{c,100}$ tahun	0.267	m/s
$U_{w,1}$ tahun	0.475	m/s
$V_{R,CF}$	2.5	
D_t	0.713	m

Langkah selanjutnya adalah mensubstitusikan parameter tersebut ke dalam persamaan untuk *screening* frekuensi natural arah *in-line* dan *cross-flow*. Untuk mendapatkan panjang *free span* maksimal yang diizinkan, hal yang harus dilakukan adalah melakukan iterasi terhadap persamaan tersebut dengan memasukkan beberapa nilai panjang *free span* aktual (L). Panjang maksimal tersebut didapatkan dengan cara menyamadengankan ruas kiri dan ruas kanan dalam persamaan *screening* frekuensi natural (Pers.2.81 dan 2.82). Perubahan nilai L akan mempengaruhi nilai beberapa parameter yang menyusun persamaan tersebut. Iterasi dengan memasukkan nilai L tersebut akan berhenti jika ruas kiri dan ruas kanan nilainya sama atau mendekati.

Pada Tabel 4.50 dan 4.51 berikut ini akan disajikan tahapan *sreening* beberapa panjang aktual *free span* yang dimasukkan ke dalam persamaan *screening*

frekuensi natural beserta hasil pada ruas kiri dan kanan untuk dibandingkan (*screening in-line* dan *cross-flow*):

Tabel 4.50. *Screening in-line*

No	L (m)	Frekuensi natural (Hz)	Ruas kiri	Ruas kanan	Keterangan
1	5	24.7876	17.705	1.113	OK
2	10	5.7884	4.135	1.0804	OK
3	15	2.2377	1.598	1.0483	OK
4	17.55	1.44976	1.0355	1.032	OK
5	17.6	1.437	1.0267	1.0295	NOT OK

Tabel 4.51. *Screening cross-flow*

No	L (m)	Frekuensi natural (Hz)	Ruas kiri	Ruas kanan	Keterangan
1	5	24.7876	17.705	0.4162	OK
2	10	5.7885	4.135	0.4162	OK
3	15	2.2384	1.599	0.4162	OK
4	20	0.953	0.681	0.4162	OK
5	26.85	0.593	0.4234	0.4162	OK
6	26.9	0.573	0.4097	0.4162	NOT OK

Dari kedua tabel di atas, dapat dilihat hasil untuk *screening* frekuensi natural *in-line* dan *cross-flow*. Kedua hasil tersebut akan dirangkum dan disajikan pada Tabel 4.52 berikut:

Tabel 4.52. Panjang *free span* maksimal dari hasil *screening* frekuensi natural

Kondisi	Arah gerakan	Panjang <i>free span</i> maksimal, L_{cr} (m)
Operasi	<i>In-line</i>	17.55
	<i>Cross-flow</i>	26.85

Untuk pengerjaan *screening* frekuensi natural dapat dilihat dalam Lampiran H.

Dari kedua hasil tersebut yaitu panjang *free span* maksimal yang diizinkan sesuai dengan arah gerakan pipa *in-line* dan *cross-flow*, harus diambil salah satu panjang *free span* untuk dijadikan batasan panjang bentangan pipa maksimal yang diizinkan dari hasil *screening* frekuensi natural. Hasil tersebut diambil yang paling pendek diantara keduanya, yaitu dipilih untuk kondisi *in-line* dengan panjang *free span* maksimal 17.55 m. Sehingga dari salah satu rumusan masalah dalam tugas akhir ini, didapatkan panjang maksimal *free span* yang diizinkan dari hasil *screening* frekuensi natural adalah 17.55 m. Selanjutnya panjang *free span* maksimal dari hasil *screening* frekuensi natural tersebut, dilakukan pengecekan dengan kriteria *local*

buckling sesuai DNV-OS-F101 (2013) dan juga disimulasikan dengan menggunakan *software* untuk mencari tegangan *von-mises* yang dihasilkan dan nantinya dibandingkan dengan tegangan *buckling* kritis.

4.8. Bending Moment

Bending moment merupakan salah satu parameter yang diperlukan di dalam persamaan *screening* untuk ULS atau *local buckling*. *Bending moment* pipa dalam kondisi *free span* terdapat dua tipe, yaitu momen akibat beban fungsional dan momen akibat beban lingkungan untuk gerakan pipa (*in-line* dan *cross-flow*) saat terkena arus laut. Untuk menghitung momen akibat beban lingkungan diperlukan suatu nilai yang harus didapatkan terlebih dahulu yaitu nilai *environmental stress*. Tegangan tersebut dapat dihitung dengan menggunakan Pers. (2.100 dan 2.101) dengan beberapa parameter penyusunnya.

4.8.1. Stress range in-line dan cross-flow

Stress range merupakan salah satu parameter yang diperlukan untuk mendapatkan nilai *environmental stress*. Sebelum menghitung *stress range*, terlebih dahulu menghitung *stress amplitude* sesuai Pers. (2.80). Nilai dari *stress amplitude* disajikan dalam Tabel 4.53 berikut:

Tabel 4.53. Nilai parameter dan hasil *unit stress amplitude*

Parameter	Nilai	Satuan
C_4	4.93	
CSF	0.1842	
D_t	0.713	m
D_0	0.508	m
t_{nom}	0.0159	m
E	207000000	Pa
L_{eff}	17.55	m
$A_{IL/CF}$	1376678.8	Pa

Dengan menggunakan Pers. (2.70), didapatkan *stress range* untuk arah gerakan *in-line* adalah ditunjukkan pada Tabel 4.54 berikut:

Tabel 4.54. Nilai *stress range* untuk *in-line*

Parameter	Nilai	Satuan
α	0.3598	
(A_Y/D)	0	
ψ_{IL}	0	
γ_s	1.3	
A_{IL}	1376678.752	Pa
S_{IL}	0	Pa

Sedangkan untuk *stress range* gerakan *cross-flow* dapat menggunakan Pers.(2.73). Hasilnya disajikan pada Tabel 4.55 di bawah ini:

Tabel 4.55. Nilai *stress range* untuk *cross-flow*

Parameter	Nilai	Satuan
K_{sd}	0.37173771	
(A_Z/D)	0.07137654	
R_k	0.94423934	
γ_s	1.3	
A_{CF}	1376678.752	Pa
S_{CF}	241236.7779	Pa

4.8.2. Environmental stress

Environmental stress ini merupakan salah satu nilai yang diperlukan untuk menghitung *bending moment* untuk gerakan *in-line* dan *cross-flow*. Untuk *in-line* dapat menggunakan Pers. (2.100), sedangkan untuk *cross-flow* menggunakan Pers. (2.101).

1. In-line

Dalam Pers. (2.100), terdapat beberapa nilai parameter yang diperlukan untuk mendapatkan nilai *environmental stress* gerakan *in-line*. Diantaranya adalah *stress range*, *stress amplitude*, dan *environmental stress* selama terkena beban gelombang langsung. Untuk *stress range* dan *stress amplitude* sudah pernah dilakukan perhitungan sebelumnya, sehingga hanya perlu untuk mendapatkan nilai *stress* akibat beban gelombang langsung (σ_{FM}).

Untuk menghitung σ_{FM} dihitung menggunakan Pers. (2.102). Di dalam persamaan tersebut terdapat suatu nilai yang harus dicari terlebih dahulu yaitu nilai

momen karena gaya *drag* aliran air (M_w) dengan menggunakan Pers. (2.103). Hasil dari perhitungan M_w disajikan pada Tabel 4.56 berikut:

Tabel 4.56. Perhitungan M_w

Parameter	Nilai	Satuan
C_5	0.13	
F_D	913.373	N/m
L	17.55	m
S_{eff}	-2938184.029	N
P_{cr}	5850766.946	N
M_w	70639.39324	Nm

Selanjutnya adalah menghitung σ_{FM} dengan menggunakan Pers. (2.102). Hasilnya disajikan pada Tabel 4.57 berikut:

Tabel 4.57. Perhitungan σ_{FM}

Parameter	Notasi	Satuan
D_0	0.508	m
t_2	0.0129	m
I_{steel}	0.000744852	m^4
M_w	70639.39324	Nm
σ_{FM}	23476839.58	Pa

Dengan menggunakan Pers. (2.100), didapatkan nilai *environmental stress* untuk *in-line* adalah disajikan pada Tabel 4.58 berikut:

Tabel 4.58. Hasil *environmental stress in-line*

Parameter	Nilai	Satuan
S_{CF}	241236.7779	Pa
A_{IL}	1376678.752	Pa
A_{CF}	1376678.752	Pa
S_{IL}	0	Pa
σ_{FM}	23476839.58	Pa
$\sigma_{E,IL}$	23525086.93	Pa

2. Cross-flow

Dengan menggunakan Pers. (2.101), didapatkan nilai *environmental stress* untuk *cross-flow*. Di dalam persamaan tersebut nilai *stress range* merupakan suatu nilai yang sangat berpengaruh pada nilai *environmental stress* untuk *cross-flow*. *Stress range* tersebut sebelumnya sudah dilakukan perhitungan, sehingga hanya

tinggal memasukkan ke dalam peramaan untuk *environmental stress cross-flow*. Hasilnya disajikan pada Tabel 4.59 berikut:

Tabel 4.59. Hasil *environmental stress cross-flow*

Parameter	Nilai	Satuan
S_{CF}	241236.7779	Pa
$\sigma_{E,CF}$	120618.389	Pa

Pada Tabel 4.60 berikut merupakan rangkuman hasil dari *environmental stress* untuk *in-line* dan *cross-flow*:

Tabel 4.60. Rangkuman hasil *enviromental stress* untuk *in-line* dan *cross-flow*

Arah	Notasi	Nilai (Pa)
<i>In-line</i>	$\sigma_{E,IL}$	23525086.933
<i>Cross-flow</i>	$\sigma_{E,CF}$	120618.389

4.8.3. Perhitungan *bending moment*

1. Momen *bending* arah vertikal

a. Momen *bending* akibat beban fungsional

Momen ini terjadi akibat beban dari berat terendam pipa, dengan kata lain beban atau gaya yang menyebabkan *bending moment static* ini adalah berat terendam pipa itu sendiri. Persamaan untuk mendapatkan nilai ini adalah pada Pers. (2.97) untuk kondisi *pinned-pinned boundary condition*. Dalam persamaan tersebut terdapat beberapa nilai parameter yang harus dimasukkan sebelum menghitung *bending moment static*. Beberapa parameter dan hasil dari *bending moment* fungsional disajikan dalam Tabel 4.61 berikut:

Tabel 4.61. Nilai *bending moment* akibat beban fungsional

Parameter	Nilai	Satuan
$q (W_{sub})$	2998.839	N/m
L	17.55	m
M_F	115456.2267	Nm

b. *Bending moment* untuk gerakan *cross-flow* pipa

Selain dipengaruhi oleh beban fungsional, *bending moment* arah vertikal juga dipengaruhi oleh gerakan pipa vertikal (*cross-flow*) pada kondisi *free span*. Momen ini dipengaruhi oleh *environmental stress* yang sudah dihitung sebelumnya. Untuk

menghitung momen ini dapat digunakan Pers. (2.98) dengan *environmental stress* untuk *cross-flow*. Nilai dari *bending moment* akibat gerakan *cross-flow* ini disajikan pada Tabel 4.62 berikut:

Tabel 4.62. Nilai *bending moment* akibat pengaruh gerakan *cross-flow*

Parameter	Nilai	Satuan
$\sigma_{E,CF}$	120618.389	Pa
I_{steel}	0.000744852	m ⁴
D_0	0.508	m
t_{nom}	0.0159	m
$M_E (CF)$	365.140842	Nm

2. *Bending moment* arah horizontal

Momen ini dipengaruhi oleh gerakan pipa ke arah *in-line* karena beban arus yang mengenai pipa tersebut. Untuk menghitung persamaan ini dapat menggunakan Pers. (2.98). Di dalam persamaan tersebut terdapat beberapa parameter penyusunnya. Salah satu yang paling berpengaruh adalah *environmental stress* untuk *in-line* yang sudah dihitung sebelumnya. Beberapa parameter tersebut ditunjukkan dalam Tabel 4.63 berikut beserta hasil perhitungan momen untuk arah *in-line*:

Tabel 4.63. Nilai *bending moment* akibat gerakan *in-line*

Parameter	Nilai	Satuan
$\sigma_{E,IL}$	23525086.93	Pa
I_{steel}	0.000744852	m ⁴
D_0	0.508	m
t_{nom}	0.0159	m
$M_E (IL)$	71216.09005	Nm

3. *Bending moment* total

Bending moment yang didapatkan dari perhitungan sebelumnya adalah *bending moment* dengan arah yang berbeda yaitu arah horizontal dan vertikal. Untuk itu perlu untuk dilakukan penggabungan kedua arah tersebut dengan menghitung resultan dari kedua arah *bending moment* tersebut. Dengan menggunakan Pers. (2.99) didapatkan hasil untuk resultan *bending moment* adalah:

Tabel 4.64. Nilai *bending moment* total

Parameter	Nilai	Satuan
M_F	115456.2267	Nm
$M_{E (IL)}$	71216.09005	Nm
$M_{E (CF)}$	365.140842	Nm
γ_F	1.1	
γ_C	1.07	
γ_E	1.3	
M_{Sd}	164824.43	Nm

4.9. ULS *check* dengan DNV-OS-F101

4.9.1. *Denote plastic capacities*

Sebelum menghitung nilai *denote plastic capacities* diperlukan beberapa perhitungan suatu parameter, yaitu mendapatkan nilai karakteristik kekuatan *yield* dan *tensile* material dengan menggunakan Pers. (2.108) dan (2.109). Di dalam persamaan tersebut dibutuhkan suatu nilai yaitu nilai *de-rating* ($f_{y,temp}$ dan $f_{u,temp}$) karena pengaruh temperatur yang didapatkan dengan menggunakan grafik yang ada pada Gambar 2.16. Dengan temperatur kekuatan pipa 100 °C, didapatkan nilai *de-rating* sesuai dengan grafik tersebut adalah 30 MPa. Langkah selanjutnya adalah menghitung karakteristik kekuatan material (f_y dan f_u). Hasil untuk beberapa perhitungan tersebut disajikan dalam Tabel 4.65 berikut:

Tabel 4.65. Perhitungan nilai kekuatan material

Parameter	Nilai	Satuan
D_0	0.508	m
t_2	0.0129	m
$f_{y,temp}$	30000000	Pa
$f_{u,temp}$	30000000	Pa
SMYS	360000000	Pa
SMTS	460000000	Pa
α_u	1	
f_y	330000000	Pa
f_u	430000000	Pa

Nilai α_u tersebut didapatkan dari Tabel 2.16 sesuai DNV-OS-F101 (2013) untuk sistem pipa bertekanan.

Hasil dari karakteristik *plastic moment* (M_p) dan *plastic axial force resistance* (S_p) sesuai dengan Pers. (2.107) dan Pers. (2.108), dapat dilihat dalam Tabel 4.66 berikut:

Tabel 4.66. Nilai karakteristik *plastic moment* dan *axial force resistance*

Parameter	Nilai	Satuan
M_p	1043492.911	Nm
S_p	6621348.54	N

4.9.2. Parameter pada beban kombinasi

a. Parameter aliran tegangan

Salah satu parameter yang dibutuhkan di dalam kriteria *local buckling* (beban kombinasi) adalah nilai parameter aliran tegangan yang dapat dihitung menggunakan Pers. (2.111). Didapatkan hasilnya pada Tabel 4.67 berikut:

Tabel 4.67. Nilai parameter aliran tegangan

Parameter	Nilai	Satuan
f_y	330000000	Pa
f_u	430000000	Pa
β	0.2291128	
α_c	1.0694281	

b. Faktor tekanan untuk beban kombinasi

Parameter lainnya yang diperlukan untuk persamaan ULS *check* pada kriteria *local buckling* adalah faktor tekanan untuk beban kombinasi. Untuk mendapatkannya dapat digunakan Pers. (2.112). Di dalam persamaan tersebut terdapat dua persamaan tergantung pada nilai rasio antara selisih tekanan internal dan eksternal yang dibagi dengan tekanan *bursting*. Tekanan *bursting* didapatkan dengan menggunakan Pers. (2.114), dan hasilnya disajikan pada Tabel 4.68 berikut:

Tabel 4.68. Nilai tekanan *bursting*

Parameter	Nilai	Satuan
D_0	0.508	m
t_2	0.0129	m
f_{cb}	330000000	Pa
P_b	19856838	Pa

Hasil faktor tekanan untuk tekanan kriteria beban kombinasi disajikan pada Tabel 4.69 berikut:

Tabel 4.69. Nilai faktor tekanan untuk kriteria beban kombinasi

Parameter	Nilai	Satuan
P_i	1960000	Pa
P_e	215725.33	Pa
P_b	19856838	Pa
β	0.2291128	
α_p	0.7708872	

Nilai faktor untuk kriteria kombinasi beban (β) dengan menggunakan Pers (2.113).

4.9.3. ULS check

Setelah mendapatkan semua parameter yang dibutuhkan, selanjutnya adalah melakukan *screening* ULS sesuai DNV-OS-F101 (2013) untuk kondisi tekanan internal lebih besar dari tekanan eksternal sesuai dengan *pipeline operation* yang ada. Untuk nilai S_{Sd} dapat menggunakan Pers. (2.106). Dari Pers. (2.104), didapatkan nilai UC untuk *screening* tersebut adalah pada Tabel 2.70 dibawah ini dengan panjang *free span* aktual yang digunakan merupakan hasil *screening* frekuensi natural ($L=17.55$ m):

Tabel 4.70. Hasil ULS check sesuai DNV-OS-F101

Parameter	Nilai	Satuan
γ_m	1.15	
γ_{SC}	1.26	
α_c	1.069428131	
α_p	0.770887166	
M_p	1043492.911	Nm
S_p	6621348.54	N
S_{Sd}	-3458242.602	N
M_{Sd}	164824.43	Nm
P_i	1.96	MPa
P_e	0.215725334	MPa
P_b	19.85683778	MPa
UC	0.515	< 1

Dari hasil di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa *pipeline free span* dengan panjang bentangan 17.55 m tidak mengalami *local buckling* sesuai dengan kriteria DNV-OS-F101 (2013) karena menghasilkan nilai UC kurang dari 1.

Dari Pers. (2.104), dapat ditentukan nilai dari *bending moment* maksimal atau kritis (yang menghasilkan $UC = 1$), yaitu dengan mengeluarkan variabel *bending moment* (M_{sd}) untuk diketahui nilai maksimalnya dan menghasilkan UC samadengan 1. Hasil yang didapatkan untuk *bending moment* maksimal adalah 382922.405 Nm, yang dapat dihasilkan oleh pipa dengan panjang bentangan bebas 21.83 m.

4.9.4. Pemilihan panjang *free span* maksimal yang diizinkan

Setelah sebelumnya mendapatkan beberapa nilai panjang *free span*, selanjutnya adalah membandingkan panjang *free span* maksimal yang didapatkan dari ULS *check* dengan hasil *screening* frekuensi natural. Dari beberapa nilai tersebut diambil nilai panjang *free span* yang paling pendek untuk dilanjutkan ke simulasi dengan menggunakan *software*.

Tabel 4.71. Rangkuman hasil panjang *free span* maksimal yang diizinkan

Parameter	Screening frekuensi natural		ULS <i>check</i>	Hasil akhir
	<i>In-line</i>	<i>Cross-flow</i>		
L_{cr} (m)	17.55	26.85	21.83	17.55

4.10. Tegangan *Von-mises* dan *Buckling*

4.10.1. Perhitungan tegangan *von-mises* manual

Tegangan *von-mises* pada *pipeline free span* merupakan kombinasi dari beberapa tegangan yaitu tegangan *hoop*, longitudinal dan *shear*. Dalam Bai dan Bai (2014) disebutkan bahwa untuk tegangan *shear* (τ) pada kondisi *pipeline span* nilainya adalah nol atau diabaikan. Untuk tegangan *hoop* dapat digunakan Pers. (2.118). Sedangkan untuk tegangan longitudinal dapat digunakan Pers. (2.119). Tegangan longitudinal sesuai persamaan tersebut merupakan kombinasi dari beberapa tegangan juga yaitu tegangan *thermal*, *poisson*, dan *bending*.

Hasil dari tegangan *hoop* disajikan pada Tabel 4.72 berikut sesuai dengan Pers. (2.118):

Tabel 4.72. *Hoop stress*

Parameter	Nilai	Satuan
P_i	1960000	Pa
P_e	215725.334	Pa
D_0	0.508	m
t_2	0.0129	m
σ_h	33472495.6	Pa

Salah satu tegangan yang berpengaruh pada tegangan longitudinal adalah tegangan *thermal*. Dengan menggunakan Pers. (2.121) didapatkan nilai dari tegangan *thermal* yang disajikan pada Tabel 4.73 berikut:

Tabel 4.73. *Thermal stress*

Parameter	Nilai	Satuan
E	207000000000	Pa
α	0.000011	
ΔT	50	°
σ_T	-113850000	Pa

Sedangkan untuk menghitung *poisson stress* digunakan Pers. (2.122), yang hasilnya disajikan dalam Tabel 4.74 berikut:

Tabel 4.74. *Poisson stress*

Parameter	Nilai	Satuan
ν	0.3	
σ_h	33472495.64	Pa
σ_p	10041748.69	Pa

Tegangan lainnya yang mempengaruhi tegangan longitudinal adalah tegangan *bending*. Untuk mendapatkan tegangan tersebut dapat digunakan Pers. (2.120). Hasil untuk *bending stress* disajikan pada Tabel 4.75 berikut:

Tabel 4.75. *Bending stress*

Parameter	Nilai	Satuan
M_{sd}	164824.4299	Nm
D_0	0.508	m
I	0.000744852	m ⁴
σ_b	56206305.59	Pa

Setelah mendapatkan beberapa tegangan di atas, selanjutnya adalah menghitung tegangan longitudinal sesuai Pers. (2.119). Hasil dari tegangan longitudinal disajikan pada Tabel 4.76 di bawah ini:

Tabel 4.76. Perhitungan *longitudinal stress*

Tegangan	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Thermal stress</i>	σ_T	-113850000	Pa
<i>Poisson stress</i>	σ_p	10041748.69	Pa
<i>Bending stress</i>	σ_b	56206305.59	Pa
<i>Longitudinal stress</i>	σ_L	-160014556.9	Pa

Setelah mendapatkan beberapa tegangan yang diperlukan, selanjutnya adalah menghitung tegangan *von-mises* dengan menggunakan Pers. (2.117). Hasil dari tegangan *von-mises* disajikan dalam Tabel 4.77 berikut ini:

Tabel 4.77. Hasil *von-mises stress*

Tegangan	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Hoop stress</i>	σ_h	33472495.64	Pa
<i>Longitudinal stress</i>	σ_L	-160014556.9	Pa
<i>Von-mises stress</i>	σ_{eq}	163478030.9	Pa

Setelah mendapatkan hasil *von-mises stress* menggunakan persamaan (hitungan manual), dalam tugas akhir ini juga mencari nilainya dengan *software* FEM. Pemodelan dengan *software* disajikan pada Bagian (4.10.2).

4.10.2. Tegangan *von-mises* dari pemodelan *software*

Setelah sebelumnya mendapatkan nilai tegangan *von-mises* dari perhitungan dengan suatu persamaan (manual), selanjutnya dilakukan pemodelan untuk mengetahui hasil dari tegangan tersebut menggunakan *software*. Hasil yang didapatkan nantinya akan dibandingkan dengan tegangan *von-mises* hasil perhitungan manual dengan harapan hasilnya sama atau mendekati. Jika berbeda jauh, maka akan dilakukan pengecekan kembali terhadap model dan input beban yang diberikan. Setelah ini, akan dibahas tentang tahapan untuk mendapatkan tegangan *von-mises* dengan *software*.

1. *Properties* struktur dalam model

Properties struktur dalam suatu model harus sama dengan kondisi di kenyataan, agar hasil yang didapatkan relevan dengan yang asli. Pada Tabel 4.78 berikut merupakan data struktur pipa yang akan dilakukan analisis:

a. Data struktur *pipeline*

Tabel 4.78. Data struktur pemodelan *free span pipeline*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Panjang pipa (<i>free span</i>)	L	17.55	m
Diameter luar <i>steel</i> pipa	D_0	0.508	m
Ketebalan <i>steel</i> pipa	t_{nom}	0.0159	m
Densitas <i>steel</i> pipa	ρ_{steel}	7850	kg/m ³
Modulus Young	E	207000	MPa
Koefisien <i>thermal expansion</i>	α_e	0.000011	/°C
SMYS	SMYS	360	MPa
SMTS	SMTS	460	MPa

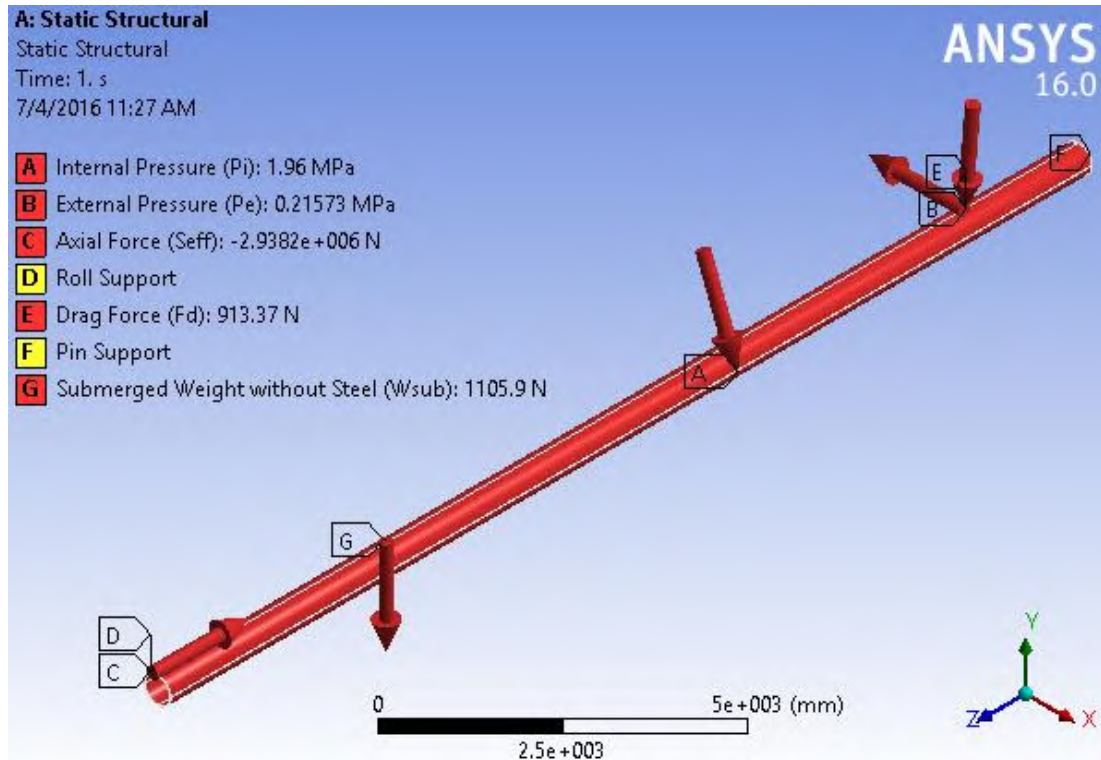
2. Pembebanan dalam model

Pembebanan pada suatu struktur sangatlah penting untuk mendapatkan respons dari struktur. Pembebanan yang dimasukkan harus sesuai dengan beban yang dimasukkan dalam perhitungan manual dengan suatu persamaan atau *code* yang sebelumnya sudah pernah dilakukan perhitungan. Pada Tabel 4.79 berikut merupakan beban-beban yang dimasukkan ke dalam model yaitu:

Tabel 4.79. *Input* kombinasi beban

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Gaya aksial	S_{eff}	-2938184.029	N
Gaya <i>drag</i> aliran air	F_D	913.3730735	N/m
Tekanan internal pipa	P_i	1960000	Pa
Tekanan eksternal pipa	P_e	215725.3335	Pa
W_{sub} (tanpa <i>steel</i>)	$W_{sub(no\ steel)}$	1105.889198	N/m

Beberapa beban di atas akan dimasukkan ke dalam model struktur. Beban tersebut memiliki arah masing masing terhadap struktur. Arah tersebut harus sesuai dengan yang terjadi sesungguhnya. Berikut ini merupakan tampilan model dan pembebanan sesuai arah masing-masing di dalam *software*:

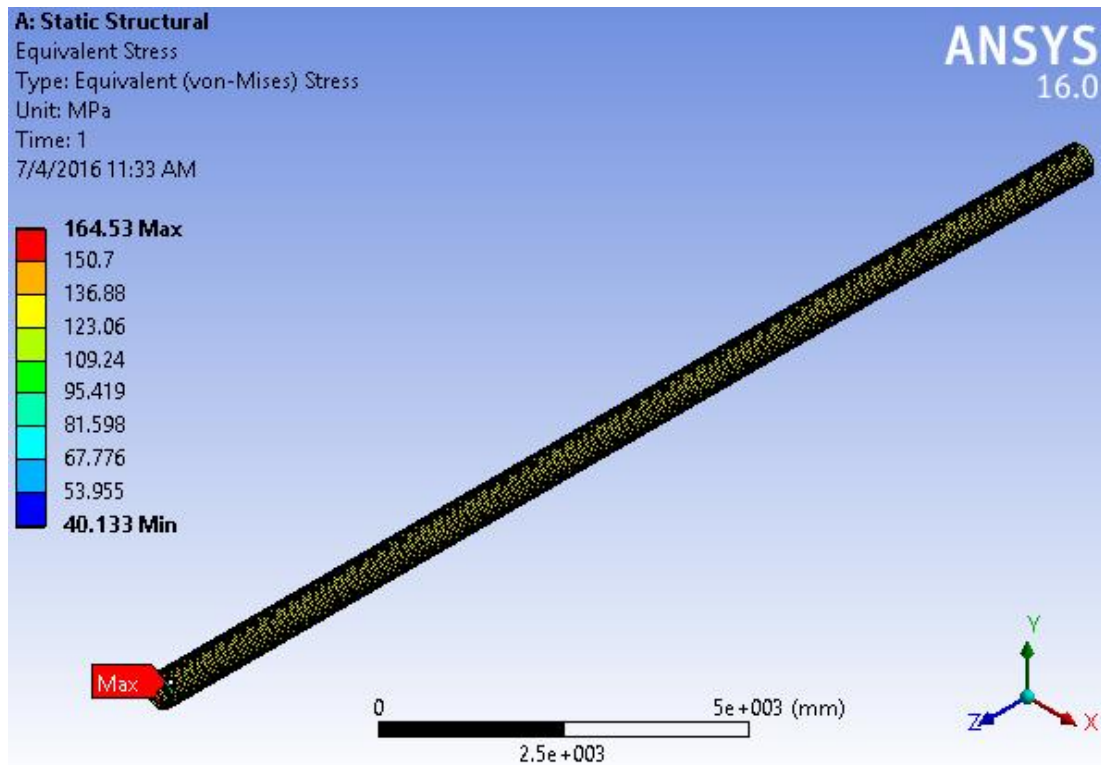


Gambar 4.1. Distribusi pembebanan dengan beban kombinasi

Kondisi *free span pipeline* adalah *pinned-pinned boundary condition*.

3. Hasil *von-mises software*

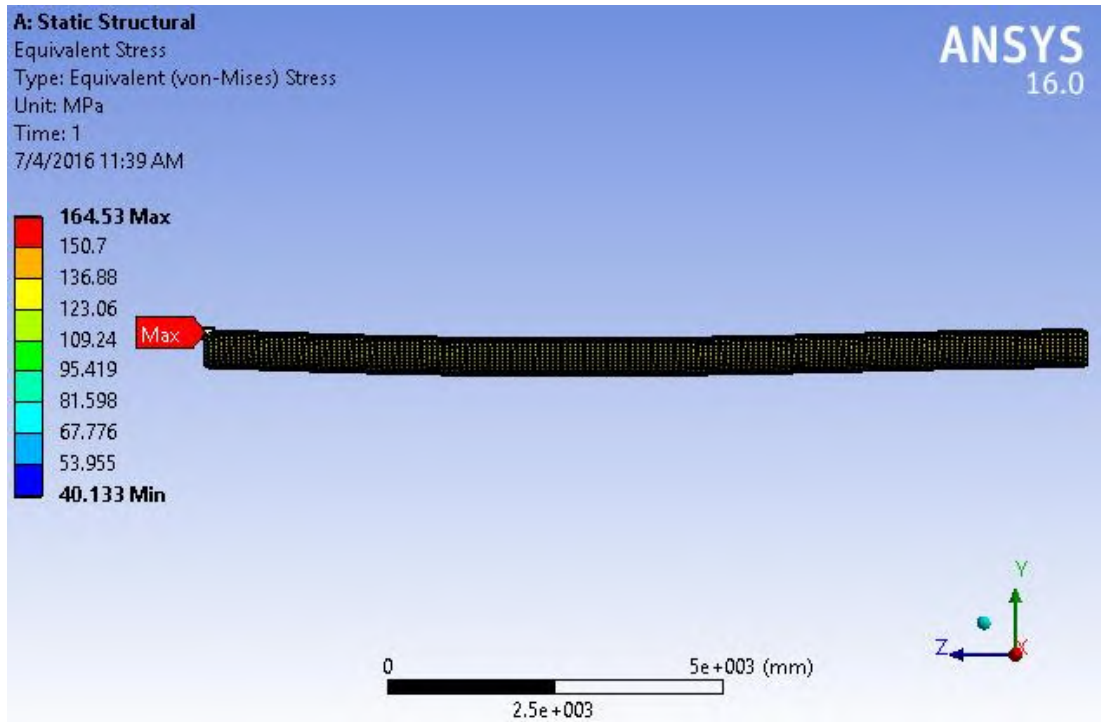
Solution yang dipilih dalam menentukan *output software* adalah *equivalent stress (von-mises stress)*. Berikut ini merupakan tampilan *software* setelah dilakukan *running* terhadap beban yang diberikan beserta hasil yang didapatkan:



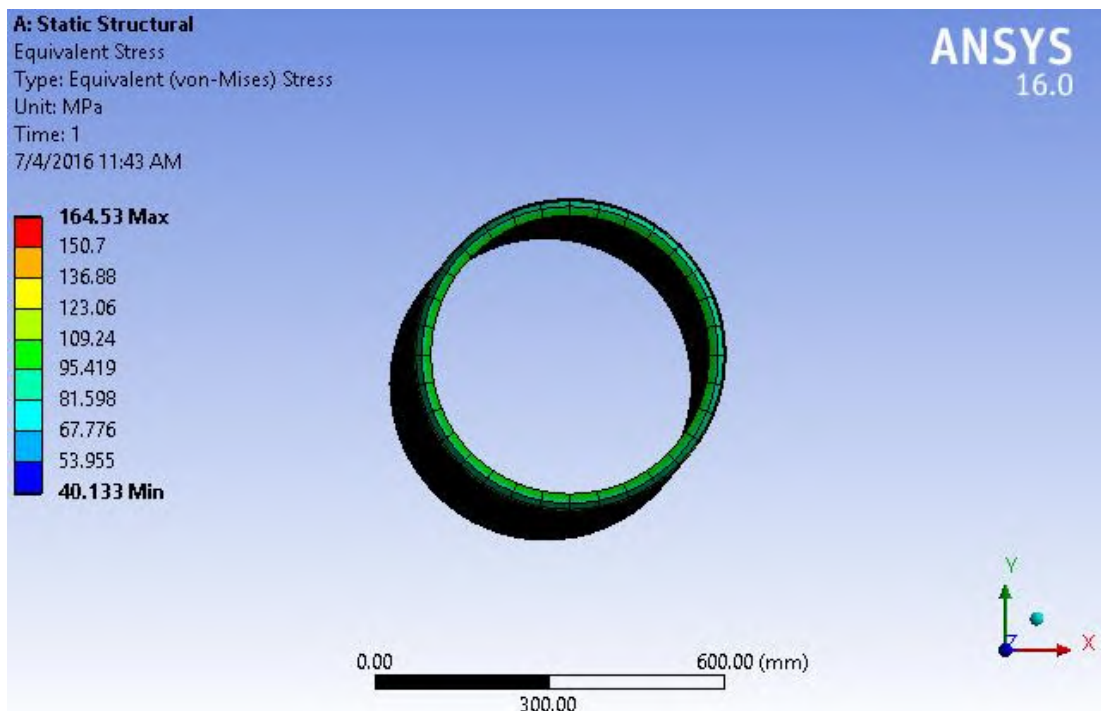
Gambar 4.2. Hasil tegangan *von-mises* dengan *software*

Dari *software* didapatkan nilai tegangan *von-mises* maksimal adalah 164.53 MPa. Nilai tersebut tidak jauh berbeda dengan hasil perhitungan manual (163.478 MPa). Hasil tersebut nantinya akan dibandingkan dengan nilai *buckling stress* kritis yang merupakan batas tegangan maksimal yang diizinkan.

Untuk memperlihatkan respons bentuk struktur terhadap beban yang diterima dengan *software*, Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 berikut ini merupakan beberapa tampilan struktur dari penampang memanjang dan melintang dengan memperbesar skala (2x *Auto* atau 162) tampilan hasil dalam *software* agar perubahannya terlihat lebih jelas.



Gambar 4.3. Tampilan memanjang *pipeline* dari *software*



Gambar 4.4. Tampilan melintang *pipeline* dari *software*

Dari Gambar 4.3 dan 4.4, terlihat bahwa pipa dalam kondisi *free span* dengan kondisi batas *pinned-pinned* mengalami defleksi akibat beban yang diterimanya.

4.10.3. Buckling stress kritis

Kriteria lainnya yang dapat digunakan untuk penentuan *buckling* struktur adalah *buckling stress*. Hasil dari *buckling stress* kritis nantinya akan dibandingkan dengan hasil *von-mises* yang sudah dihitung sebelumnya. Jika *von-mises stress* melebihi *buckling stress* kritis, maka struktur mengalami *local buckling* dan sebaliknya. *Buckling stress* kritis didapatkan dengan menggunakan Pers. (2.116). Panjang *free span* (L) yang dimasukkan adalah hasil *screening* dari frekuensi natural dan ULS yaitu 17.55 m. Berikut adalah parameter dan hasil dari *buckling stress* kritis (Tabel 4.80):

Tabel 4.80. Hasil *buckling stress*

Parameter	Nilai	Satuan
E	207000000000	Pa
L	17.55	m
I_{steel}	0.000744852	m ⁴
A_s	0.024581046	m ²
σ_{cr}	200995227.6	Pa
σ_{cr}	200.9952276	MPa

Hasil tersebut nantinya akan dibandingkan dengan tegangan *von-mises* yang dihasilkan. Perbandingan tegangan tersebut akan disajikan pada Tabel 4.81 pada Bagian 4.10.4 di bawah ini.

4.10.4. Perbandingan tegangan *von-mises* dengan *buckling*

Untuk mengetahui apakah struktur mengalami *local buckling* atau tidak, maka perlu untuk membandingkan tegangan *von-mises* dengan tegangan *buckling* kritis sebagai salah satu kriteria lainnya. Pada Tabel 4.81 berikut merupakan hasil perhitungan kedua tegangan tersebut:

Tabel 4.81. Perbandingan tegangan *von-mises* dengan *buckling*

Panjang <i>free span</i> , L (m)	Tegangan <i>Von-mises</i> (MPa)		<i>Buckling stress</i> (MPa)
	Manual	<i>Software</i>	
17.55	163.478	164.53	200.995

Dari Tabel 4.81 di atas, dapat dilihat bahwa hasil dari tegangan *von-mises* dengan menggunakan perhitungan manual dan *software* memiliki nilai yang hampir

sama untuk panjang *free span* 17.55 m. Nilai tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai *buckling stress* kritis. Nilai tegangan *von-mises* yang dihasilkan lebih kecil dari nilai tegangan *buckling*, sehingga untuk pipa dengan panjang *free span* 17.55 m ke bawah tidak terjadi *local buckling*. Hal ini sesuai dengan pengecekan dengan kriteria *local buckling* (ULS check) dengan DNV-OS-F101 (2013).

4.11. Screening terhadap Panjang *Free Span* Aktual

Setelah mendapatkan panjang maksimal *free span* yang diizinkan, selanjutnya hasil tersebut dapat digunakan sebagai pembanding terhadap panjang aktual *free span* di lapangan. Untuk sementara hasil tersebut dibandingkan dengan dengan keadaan *free span* yang ada saat ini, jika nanti setelah beberapa tahun beroperasi dan sudah dilakukan pengecekan kembali terhadap keadaan *free span* di lapangan, hasil panjang *free span* maksimal tersebut masih dapat digunakan, asalkan kriteria data yang diperhitungkan relatif masih sama. Jika panjang *free span* aktual di lapangan lebih besar dari panjang maksimal yang diizinkan, maka *free span* tersebut harus dievaluasi dengan mengurangi panjang bentangannya. Tabel 4.82 berikut ini merupakan *screening* yang dilakukan terhadap panjang *free span* aktual di lapangan.

Tabel 4.82. *Screening* terhadap panjang *free span* aktual

No	Panjang <i>free span</i> aktual, L (m)	Panjang <i>free span</i> maksimal yang diizinkan, L_{cr} (m)	Keterangan
1	9.28	17.55	Aman
2	7.64		Aman
3	8.28		Aman
4	8.77		Aman
5	12.14		Aman
6	10.8		Aman

Dari *screening* di atas, dapat dilihat bahwa beberapa panjang *free span* aktual yang ada di lapangan pada saat ini (saat pengambilan data *free span*) masih lebih pendek daripada panjang *free span* maksimal yang diizinkan. Sehingga untuk keseluruhan panjang *free span* aktual masih dalam keadaan aman dan tidak perlu untuk dilakukan retifikasi atau mitigasi.

LAMPIRAN A

PERHITUNGAN UMUM PIPA

A.1. Perhitungan *Properties* Pipa

Ketebalan dinding pipa	$t_2 = t_{\text{nom}} - t_{\text{corr}}$ 0.0129	m
Diameter total	$D_t = D_0 + 2t_{\text{cc}} + 2t_{\text{wc}} + 2t_{\text{mar}}$ 0.713	m
Diameter tanpa <i>marine growth</i>	$D_{\text{tm}} = D_0 + 2t_{\text{cc}} + 2t_{\text{wc}}$ 0.613	m
Diameter dalam	$D_i = D_0 - 2(t_{\text{nom}} + t_{\text{int}})$ 0.4762	m
Diameter <i>concrete</i>	$D_c = D_0 + 2t_{\text{cc}} + 2t_{\text{wc}}$ 0.613	m
<i>Moment area dari steel</i>	$I_{\text{steel}} = \pi \frac{D_0^4 - (D_i)^4}{64}$ 0.000744852	m ⁴
<i>Moment area dari concrete</i>	$I_{\text{conc}} = \pi \frac{D_c^4 - (D_c - 2t_{\text{wc}})^4}{64}$ 0.003531563	m ⁴
<i>Internal cross section area</i>	$A_i = \frac{\pi}{4} \cdot (D_i)^2$ 0.178101945	m ²
Area dari <i>steel</i>	$A_s = \frac{\pi}{4} [D_0^2 - (D_i)^2]$ 0.024581046	m ²

A.2. Perhitungan Berat Terendam Pipa

Berat <i>internal coating</i>	$W_{ic} = \frac{\pi}{4} [(D_i + 2 \cdot t_{int})^2 - (D_i)^2] \cdot \rho_{int} \cdot g \cdot L_{pj}$	
		0
Berat <i>corrosion coating</i>	$W_{cc} = \frac{\pi}{4} [(D_0 + 2 \cdot t_{cc})^2 - (D_0)^2] \cdot \rho_{cc} \cdot g \cdot L_{pj}$	
		456.0471741 N
Berat <i>concrete coating</i>	$W_{wc} = \frac{\pi}{4} [D_c^2 - (D_0 + 2 \cdot t_{cc})^2] \cdot \rho_{wc} \cdot g \cdot (L_{pj} - 2 \cdot FJ)$	
		30329.74111 N
Berat <i>marine growth</i>	$W_m = \frac{\pi}{4} [(D_t)^2 - D_c^2] \cdot \rho_{mar} \cdot g \cdot L_{pj}$	
		12671.0221 N
Berat <i>steel</i>	$W_s = A_s \cdot \rho_s \cdot g \cdot L_{pj}$	
		22904.68885 N
Berat isi	$W_c = A_i \cdot \rho_c \cdot g \cdot L_{pj}$	
		17969.74718 N
Berat <i>field joint</i>	$W_{fj} = \frac{\pi}{4} [D_c^2 - (D_0 + 2t_{cc})^2] \cdot \rho_{fj} \cdot g \cdot 2FJ$	
		533.5466471 N
<i>Bouyancy per metre</i>	$F_b = \frac{\pi}{4} (D_t)^2 \cdot \rho_w \cdot g$	
		4014.780572 N/m
<i>Bouyancy per joint</i>	$F_{buoy} = F_b \cdot L_{pj}$	
		48578.84492 N
Berat terendam pipa	$W_{sub} = \frac{W_c + W_s + W_{cc} + W_m + W_{wc} + W_{ic} + W_{fj} - F_{buoy}}{L_{pj}}$	
		2998.839 N/m (Operasi)

A.3. Perhitungan Massa Efektif

1. Koefisien massa tambah:

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

$$\begin{aligned} e &= 1 & \text{m} \\ D_t &= 0.713 & \text{m} \\ e/D_t &= 1.40252454417952 \end{aligned}$$

$$C_a = 1$$

2. Massa efektif pipa:

$$m_e = \frac{W_{sub} + F_b}{g} + \frac{\pi}{4} (D_t)^2 \cdot \rho_w \cdot C_a$$

$$W_{sub} = 2998.84 \quad \text{N/m}$$

$$F_b = 4014.78 \quad \text{N/m}$$

$$g = 9.81 \quad \text{m/s}^2$$

$$D_t = 0.713 \quad \text{m}$$

$$\rho_w = 1025 \quad \text{kg/m}^3$$

$$m_e = 1124.1998 \quad \text{kg/m}$$

LAMPIRAN B

ARUS DAN GELOMBANG

B.1. Perhitungan Arus *Steady* pada *Pipe Level*

1. Menentukan kekasaran dasar laut

Dari jenis tanah yang ada yaitu *sandy clay*, maka untuk kekasaran dapat dipilih *silt*, sehingga nilai kekasaran dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel B.1. Penentuan kekasaran dasar laut

<i>Seabed</i>	<i>Roughness z_0 (m)</i>
Silt	$\approx 5 \cdot 10^{-6}$
fine sand	$\approx 1 \cdot 10^{-5}$
Medium sand	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$
coarse sand	$\approx 1 \cdot 10^{-4}$
Gravel	$\approx 3 \cdot 10^{-4}$
Pebble	$\approx 2 \cdot 10^{-3}$
Cobble	$\approx 1 \cdot 10^{-2}$
Boulder	$\approx 4 \cdot 10^{-2}$

2. Menghitung kecepatan arus dasar laut

Diketahui :

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Arah aliran arus	θ_{rel}	90	°
Diameter luar nominal	D_0	0.508	m
Diameter total pipa	D_t	0.713	m
<i>Gap</i>	e	1	m
Kecepatan arus <i>outer zone</i> , 1 tahun	$U(z_r)$	0.2	m/s
Kecepatan arus <i>outer zone</i> , 100 tahun	$U(z_r)$	0.25	m/s
Faktor reduksi	R_c	1	
Kekasaran dasar laut, (<i>silt</i>)	z_0	0.000005	m
Elevasi di atas dasar laut	z	1.3565	m
Tinggi referensi di <i>outer zone</i>	z_r	0.613	m

Reduction factor:

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

$$\theta_{rel} = 90^\circ$$

$$R_c = 1$$

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

$$z = 1.3565 \text{ m}$$

$$z_r = D_0 + 2 \cdot t_{wc} + t_{cc}$$

$$z_r = 0.613 \text{ m}$$

Menghitung kecepatan arus pada *pipe level* sesuai DNV-RP-F105 (2006).

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

Tabel B.2. Hasil perhitungan arus laut

Periode ulang	U_c (m/s)
1 tahun	0.214
100 tahun	0.267

B.2. Perhitungan Kecepatan Arus Akibat Gelombang

1. Data gelombang

Tabel B.3. Data gelombang

<i>Return Period</i>	<i>Max. Significant Wave Height</i>	<i>Units</i>	<i>Wave Peak Period</i>	<i>Units</i>
1-year	2.11	m	7.2	s
100-year	3.19	m	8.8	s

Frekuensi gelombang signifikan

1 tahun $\omega_p = 0.873$ rad/s

100 tahun $\omega_p = 0.714$ rad/s

2. Parameter spektra JOSNWAP

a. *Peak-enhancement factor:*

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

100 tahun $\varphi = 4.927 \longrightarrow 3.6 < \varphi < 5 \quad \gamma = 1.08751$

1 tahun $\varphi = 4.957 \longrightarrow 3.6 < \varphi < 5 \quad \gamma = 1.05107$

b. Konstanta generalised Philips

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

Tabel B.4. Parameter untuk perhitungan arus gelombang

Parameter	Kondisi		Satuan
	1 tahun	100 tahun	
Hs	2.11	3.19	m
Tw	7.2	8.8	s
ω_p	0.873	0.714	rad/s
ϕ	4.95668	4.92705	
γ	1.05107	1.08751	
α	0.00826	0.00838	

3. Transformasi gelombang

a. Menentukan angka gelombang (k)

➤ Untuk gelombang 1 tahun

Tabel B.5. Menentukan angka gelombang (1 tahun) dengan iterasi

k asumsi	kh	tanh kh	coth kh	k
0.07769	1.5537798	0.914406995	1.094	0.08496
0.08496	1.6992213	0.935311651	1.069	0.08306
0.08306	1.6612429	0.9303844	1.075	0.08350
0.08350	1.6700407	0.931557066	1.073	0.08340
0.08340	1.6679384	0.931278596	1.074	0.08342
0.08342	1.6684372	0.931344758	1.074	0.08342
0.08342	1.6683186	0.93132904	1.074	0.08342
0.08342	1.6683468	0.931332775	1.074	0.08342
0.08342	1.6683401	0.931331887	1.074	0.08342
0.08342	1.6683417	0.931332098	1.074	0.08342
0.08342	1.6683413	0.931332048	1.074	0.08342

b. Pengolahan spektra gelombang

Selanjutnya adalah melakukan perhitungan untuk persamaan di bawah ini, yang hasilnya disajikan dalam tabel selanjutnya.

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

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

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

Tabel B.6. Perhitungan arus akibat gelombang 1 tahun

ω (rad/s)	s	Sw(Instalasi)	Gw	Suu	FM	M0	M1	M2	M4
0.023	0.07	0.0000000	0.009	0	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.073	0.07	0.0000000	0.029	0	4	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.123	0.07	0.0000000	0.049	0	2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.173	0.07	0.0000000	0.068	0	4	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.223	0.07	0.0000000	0.088	5.5E-127	2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.273	0.07	0.0000000	0.108	1.27E-56	4	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.323	0.07	0.0000000	0.128	4.38E-29	2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.373	0.07	0.0000000	0.147	1.3E-16	4	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.423	0.07	0.0000000	0.167	2.4E-10	2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.473	0.07	0.0000172	0.187	6.02E-07	4	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.523	0.07	0.0012590	0.207	5.37E-05	2	0.00011	0.00006	0.00003	0.00001
0.573	0.07	0.0154605	0.226	0.000792	4	0.00317	0.00182	0.00104	0.00034
0.623	0.07	0.0688948	0.246	0.004173	2	0.00835	0.00520	0.00324	0.00126
0.673	0.07	0.1682205	0.266	0.011889	4	0.04756	0.03201	0.02154	0.00976
0.723	0.07	0.2842678	0.286	0.023187	2	0.04637	0.03353	0.02424	0.01267
0.773	0.07	0.3833347	0.305	0.035742	4	0.14297	0.11051	0.08543	0.05105
0.823	0.07	0.4496176	0.325	0.047521	2	0.09504	0.07822	0.06437	0.04360
0.873	0.07	0.4732366	0.345	0.056279	4	0.22512	0.19653	0.17157	0.13076
0.923	0.09	0.4553779	0.365	0.060536	2	0.12107	0.11175	0.10315	0.08787
0.973	0.09	0.4152309	0.384	0.061342	4	0.24537	0.23874	0.23230	0.21992
1.023	0.09	0.3691252	0.404	0.060279	2	0.12056	0.12333	0.12617	0.13204
1.073	0.09	0.3242476	0.424	0.058253	4	0.23301	0.25002	0.26827	0.30887
1.123	0.09	0.2823790	0.444	0.055569	2	0.11114	0.12481	0.14016	0.17676
1.173	0.09	0.2442167	0.463	0.052434	4	0.20973	0.24602	0.28858	0.39707
1.223	0.09	0.2102289	0.483	0.049066	2	0.09813	0.12002	0.14678	0.21954
1.273	0.09	0.1805188	0.503	0.045648	4	0.18259	0.23244	0.29589	0.47950
1.323	0.09	0.1548769	0.523	0.042301	2	0.08460	0.11193	0.14808	0.25919
1.373	0.09	0.1329244	0.542	0.039101	4	0.15640	0.21474	0.29484	0.55581
1.423	0.09	0.1142203	0.562	0.03609	2	0.07218	0.10271	0.14616	0.29597
1.473	0.09	0.0983243	0.582	0.033289	4	0.13316	0.19614	0.28892	0.62687
1.523	0.09	0.0848270	0.602	0.030702	2	0.06140	0.09352	0.14243	0.33037
1.573	0.09	0.0733640	0.621	0.028326	4	0.11330	0.17822	0.28035	0.69367
1.623	0.09	0.0636186	0.641	0.026149	2	0.05230	0.08488	0.13776	0.36288
1.673	0.09	0.0553201	0.661	0.024161	4	0.09664	0.16169	0.27050	0.75711
1.723	0.09	0.0482394	0.681	0.022347	2	0.04469	0.07701	0.13268	0.39390
1.773	0.09	0.0421839	0.7	0.020692	4	0.08277	0.14675	0.26018	0.81790
1.823	0.09	0.0369923	0.72	0.019183	2	0.03837	0.06994	0.12751	0.42374
1.873	0.09	0.0325297	0.74	0.017807	4	0.07123	0.13341	0.24988	0.87661
1.923	0.09	0.0286834	0.76	0.016551	2	0.03310	0.06366	0.12241	0.45266
1.973	0.09	0.0253594	0.779	0.015404	4	0.06162	0.12157	0.23985	0.93369
2.023	0.09	0.0224788	0.799	0.014355	2	0.02871	0.05808	0.11750	0.48086
2.073	0.09	0.0199759	0.819	0.013395	4	0.05358	0.11107	0.23025	0.98947
2.123	0.09	0.0177952	0.839	0.012515	2	0.02503	0.05314	0.11282	0.50848
2.173	0.09	0.0158903	0.858	0.011708	4	0.04683	0.10177	0.22114	1.04421
2.223	0.09	0.0142220	0.878	0.010967	2	0.02193	0.04876	0.10839	0.53563
2.273	0.09	0.0127573	0.898	0.010285	4	0.04114	0.09351	0.21255	1.09813
2.323	0.09	0.0114681	0.918	0.009657	2	0.01931	0.04487	0.10422	0.56242
2.373	0.09	0.0103308	0.937	0.009078	4	0.03631	0.08616	0.20447	1.15138
2.423	0.09	0.0093250	0.957	0.008543	2	0.01709	0.04140	0.10031	0.58890
2.473	0.09	0.0084336	0.977	0.008048	4	0.03219	0.07961	0.19688	1.20408

Tabel B.6. Perhitungan arus akibat gelombang 1 tahun (lanjutan)

ω (rad/s)	s	Sw(Instalasi)	Gw	Suu	FM	M0	M1	M2	M4
2.523	0.09	0.0076418	0.997	0.00759	2	0.01518	0.03830	0.09663	0.61513
2.573	0.09	0.0069369	1.016	0.007166	4	0.02866	0.07375	0.18977	1.25634
2.623	0.09	0.0063082	1.036	0.006772	2	0.01354	0.03553	0.09319	0.64116
2.673	0.09	0.0057463	1.056	0.006407	4	0.02563	0.06850	0.18310	1.30822
2.723	0.09	0.0052431	1.076	0.006066	2	0.01213	0.03304	0.08996	0.66702
2.773	0.09	0.0047916	1.095	0.005749	4	0.02300	0.06377	0.17684	1.35980
2.823	0.09	0.0043857	1.115	0.005454	2	0.01091	0.03079	0.08693	0.69275
2.873	0.09	0.0040202	1.135	0.005178	4	0.02071	0.05951	0.17096	1.41112
2.923	0.09	0.0036906	1.155	0.00492	2	0.00984	0.02876	0.08408	0.71835
2.973	0.09	0.0033927	1.174	0.004679	4	0.01872	0.05565	0.16543	1.46223
3.023	0.09	0.0031231	1.194	0.004454	2	0.00891	0.02693	0.08140	0.74386
3.073	0.09	0.0028788	1.214	0.004242	4	0.01697	0.05214	0.16023	1.51315
3.123	0.09	0.0026569	1.234	0.004044	2	0.00809	0.02526	0.07887	0.76928
3.173	0.09	0.0024552	1.253	0.003857	4	0.01543	0.04896	0.15534	1.56392
3.223	0.09	0.0022716	1.273	0.003682	2	0.00736	0.02373	0.07650	0.79463
3.273	0.09	0.0021042	1.293	0.003517	4	0.01407	0.04605	0.15072	1.61455
3.323	0.09	0.0019513	1.313	0.003362	2	0.00672	0.02234	0.07425	0.81991
3.373	0.09	0.0018115	1.332	0.003216	4	0.01286	0.04339	0.14635	1.66508
3.423	0.09	0.0016835	1.352	0.003078	2	0.00616	0.02107	0.07213	0.84515
3.473	0.09	0.0015663	1.372	0.002948	4	0.01179	0.04095	0.14223	1.71550
3.523	0.09	0.0014586	1.392	0.002825	2	0.00565	0.01990	0.07012	0.87034
3.573	0.09	0.0013597	1.411	0.002709	4	0.01083	0.03871	0.13832	1.76584
3.623	0.09	0.0012688	1.431	0.002599	2	0.00520	0.01883	0.06822	0.89549
3.673	0.09	0.0011850	1.451	0.002495	4	0.00998	0.03665	0.13462	1.81611
3.723	0.09	0.0011078	1.471	0.002396	2	0.00479	0.01784	0.06642	0.92061
3.773	0.09	0.0010365	1.49	0.002302	4	0.00921	0.03475	0.13110	1.86631
3.823	0.09	0.0009706	1.51	0.002214	2	0.00443	0.01693	0.06471	0.94569
3.873	0.09	0.0009097	1.53	0.002129	4	0.00852	0.03299	0.12776	1.91645
3.923	0.09	0.0008534	1.55	0.002049	2	0.00410	0.01608	0.06308	0.97075
3.973	0.09	0.0008011	1.569	0.001973	4	0.00789	0.03136	0.12459	1.96655
4.023	0.09	0.0007527	1.589	0.001901	2	0.00380	0.01529	0.06153	0.99579
4.073	0.09	0.0007077	1.609	0.001832	4	0.00733	0.02985	0.12156	2.01660
4.123	0.09	0.0006659	1.629	0.001766	2	0.00353	0.01456	0.06005	1.02081
4.173	0.09	0.0006270	1.648	0.001704	4	0.00682	0.02844	0.11868	2.06662
4.223	0.09	0.0005908	1.668	0.001644	2	0.00329	0.01389	0.05864	1.04581
4.273	0.09	0.0005571	1.688	0.001587	4	0.00635	0.02713	0.11592	2.11660
4.323	0.09	0.0005257	1.708	0.001533	2	0.00307	0.01325	0.05730	1.07079
4.373	0.09	0.0004964	1.727	0.001481	4	0.00592	0.02591	0.11329	2.16655
4.423	0.09	0.0004690	1.747	0.001432	2	0.00286	0.01266	0.05601	1.09576
4.473	0.09	0.0004434	1.767	0.001384	4	0.00554	0.02477	0.11078	2.21647
4.523	0.09	0.0004194	1.787	0.001339	2	0.00268	0.01211	0.05478	1.12071
4.573	0.09	0.0003970	1.806	0.001296	4	0.00518	0.02370	0.10838	2.26637
4.623	0.09	0.0003760	1.826	0.001254	2	0.00251	0.01160	0.05361	1.14566
4.673	0.09	0.0003564	1.846	0.001214	4	0.00486	0.02270	0.10607	2.31625
4.723	0.09	0.0003379	1.866	0.001176	2	0.00235	0.01111	0.05248	1.17059
4.773	0.09	0.0003206	1.885	0.00114	4	0.00456	0.02176	0.10386	2.36611
4.823	0.09	0.0003044	1.905	0.001105	2	0.00221	0.01066	0.05140	1.19552
4.873	0.09	0.0002891	1.925	0.001071	4	0.00428	0.02088	0.10174	2.41595
4.923	0.09	0.0002747	1.945	0.001039	1	0.00104	0.00511	0.02518	0.61022
Jumlah						3.74963	5.82736	11.41792	84.74543
						$\Sigma 0$	$\Sigma 1$	$\Sigma 2$	$\Sigma 4$

M ₀	0.062493906
M ₁	0.097122595
M ₂	0.190298645
M ₄	1.412423911

➤ **Untuk gelombang 100 tahun**

a. Menentukan angka gelombang (k)

Tabel B.7. Menentukan angka gelombang (100 tahun) dengan iterasi

k asumsi	kh	tanh	coth kh	k
0.05197	1.0393394	0.777627088	1.286	0.06683
0.06683	1.3365525	0.870841715	1.148	0.05967
0.05967	1.1934884	0.831657614	1.202	0.06249
0.06249	1.2497204	0.848205205	1.179	0.06127
0.06127	1.2253396	0.841222218	1.189	0.06178
0.06178	1.2355112	0.844170492	1.185	0.06156
0.06156	1.2311961	0.842925928	1.186	0.06165
0.06165	1.233014	0.843451342	1.186	0.06161
0.06161	1.2322459	0.843229537	1.186	0.06163
0.06163	1.23257	0.843323174	1.186	0.06162
0.06162	1.2324332	0.843283645	1.186	0.06162
0.06162	1.2324909	0.843300332	1.186	0.06162
0.06162	1.2324665	0.843293288	1.186	0.06162
0.06162	1.2324768	0.843296262	1.186	0.06162

b. Pengolahan spektra gelombang

Selanjutnya adalah melakukan perhitungan untuk persamaan di bawah ini, yang hasilnya disajikan dalam tabel selanjutnya.

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

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

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

Tabel B.8. Perhitungan arus akibat gelombang 100 tahun

ω (rad/s)	s	Sw(Operasi)	Gw	Suu	FM	M0	M1	M2	M4
0.014	0.07	0.0000000	0.0089723	0.00000	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.064	0.07	0.0000000	0.0410161	0.00000	4	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.114	0.07	0.0000000	0.07306	0.00000	2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.164	0.07	0.0000000	0.1051038	7E-194	4	3E-193	5E-194	7E-195	2E-196
0.214	0.07	0.0000000	0.1371476	1.81E-66	2	3.6E-66	7.8E-67	1.7E-67	7.6E-69
0.264	0.07	0.0000000	0.1691915	1.62E-28	4	6.5E-28	1.7E-28	4.5E-29	3.2E-30
0.314	0.07	0.0000000	0.2012353	3.28E-14	2	6.6E-14	2.1E-14	6.5E-15	6.4E-16
0.364	0.07	0.0000012	0.2332792	6.31E-08	4	2.5E-07	9.2E-08	3.3E-08	4.4E-09
0.414	0.07	0.0010447	0.265323	7.35E-05	2	0.00015	6.1E-05	2.5E-05	4.3E-06
0.464	0.07	0.0339063	0.2973668	0.002998	4	0.01199	0.00556	0.00258	0.00056
0.514	0.07	0.2140590	0.3294107	0.023228	2	0.04646	0.02388	0.01227	0.00324
0.564	0.07	0.5705720	0.3614545	0.074545	4	0.29818	0.16817	0.09485	0.03017
0.614	0.07	0.9506848	0.3934983	0.147205	2	0.29441	0.18077	0.11099	0.04184
0.664	0.07	1.2362183	0.4255422	0.223862	4	0.89545	0.59458	0.3948	0.17407
0.714	0.07	1.3542978	0.457586	0.28357	2	0.56714	0.40494	0.28913	0.14739
0.764	0.09	1.2705187	0.4896299	0.304591	4	1.21836	0.93083	0.71115	0.4151
0.814	0.09	1.1041121	0.5216737	0.300477	2	0.60095	0.48918	0.39819	0.26384
0.864	0.09	0.9403240	0.5537175	0.288306	4	1.15323	0.99639	0.86088	0.64264
0.914	0.09	0.7943848	0.5857614	0.272566	2	0.54513	0.49825	0.4554	0.38044
0.964	0.09	0.6651183	0.6178052	0.253865	4	1.01546	0.9789	0.94366	0.87694
1.014	0.09	0.5533415	0.6498491	0.233678	2	0.46736	0.4739	0.48053	0.49408
1.064	0.09	0.4590353	0.6818929	0.213441	4	0.85377	0.90841	0.96654	1.09422
1.114	0.09	0.3807154	0.7139367	0.194053	2	0.38811	0.43235	0.48164	0.59771
1.164	0.09	0.3162398	0.7459806	0.175983	4	0.70393	0.81938	0.95376	1.29224
1.214	0.09	0.2633834	0.7780244	0.159432	2	0.31886	0.3871	0.46994	0.6926
1.264	0.09	0.2201052	0.8100683	0.144435	4	0.57774	0.73027	0.92306	1.47476
1.314	0.09	0.1846432	0.8421121	0.13094	2	0.26188	0.34411	0.45216	0.7807
1.364	0.09	0.1555268	0.8741559	0.118846	4	0.47538	0.64842	0.88445	1.64551
1.414	0.09	0.1315517	0.9061998	0.10803	2	0.21606	0.30551	0.43199	0.86372
1.464	0.09	0.1117424	0.9382436	0.098367	4	0.39347	0.57604	0.84332	1.80748
1.514	0.09	0.0953136	0.9702875	0.089734	2	0.17947	0.27171	0.41137	0.94295
1.564	0.09	0.0816343	1.0023313	0.082015	4	0.32806	0.51309	0.80247	1.96292
1.614	0.09	0.0701985	1.0343751	0.075108	2	0.15022	0.24245	0.39131	1.01936
1.664	0.09	0.0605993	1.066419	0.068916	4	0.27567	0.45871	0.76329	2.11347
1.714	0.09	0.0525092	1.0984628	0.063359	2	0.12672	0.21719	0.37227	1.09365
1.764	0.09	0.0456638	1.1305067	0.05836	4	0.23344	0.41179	0.7264	2.26034
1.814	0.09	0.0398493	1.1625505	0.053857	2	0.10771	0.19539	0.35444	1.16633
1.864	0.09	0.0348915	1.1945943	0.049792	4	0.19917	0.37125	0.69201	2.40439
1.914	0.09	0.0306488	1.2266382	0.046115	2	0.09223	0.17653	0.33788	1.23778
1.964	0.09	0.0270051	1.258682	0.042784	4	0.17113	0.33611	0.66012	2.54627
2.014	0.09	0.0238651	1.2907259	0.039759	2	0.07952	0.16015	0.32254	1.30828
2.064	0.09	0.0211502	1.3227697	0.037007	4	0.14803	0.30553	0.63061	2.68646
2.114	0.09	0.0187952	1.3548135	0.034499	2	0.069	0.14586	0.30835	1.37802
2.164	0.09	0.0167462	1.3868574	0.032209	4	0.12884	0.2788	0.60333	2.82533
2.214	0.09	0.0149581	1.4189012	0.030115	2	0.06023	0.13335	0.29523	1.44718
2.264	0.09	0.0133932	1.4509451	0.028196	4	0.11278	0.25534	0.57809	2.96314
2.314	0.09	0.0120198	1.4829889	0.026435	2	0.05287	0.12234	0.28309	1.51586
2.364	0.09	0.0108114	1.5150327	0.024816	4	0.09926	0.23466	0.55473	3.1001
2.414	0.09	0.0097453	1.5470766	0.023325	2	0.04665	0.11261	0.27185	1.58416
2.464	0.09	0.0088025	1.5791204	0.02195	4	0.0878	0.21634	0.53306	3.23637

Tabel B.8. Perhitungan arus akibat gelombang 100 tahun (lanjutan)

ω (rad/s)	s	Sw(Operasi)	Gw	Suu	FM	M0	M1	M2	M4
2.514	0.09	0.0079667	1.6111643	0.02068	2	0.04136	0.10398	0.26141	1.65215
2.564	0.09	0.0072241	1.6432081	0.019506	4	0.07802	0.20005	0.51294	3.37209
2.614	0.09	0.0065628	1.6752519	0.018418	2	0.03684	0.09629	0.2517	1.71988
2.664	0.09	0.0059726	1.7072958	0.017409	4	0.06964	0.18551	0.49421	3.50734
2.714	0.09	0.0054449	1.7393396	0.016472	2	0.03294	0.08941	0.24266	1.78741
2.764	0.09	0.0049720	1.7713834	0.015601	4	0.0624	0.17249	0.47675	3.64222
2.814	0.09	0.0045474	1.8034273	0.01479	2	0.02958	0.08324	0.23423	1.85477
2.864	0.09	0.0041656	1.8354711	0.014034	4	0.05613	0.16077	0.46044	3.77678
2.914	0.09	0.0038215	1.867515	0.013328	2	0.02666	0.07767	0.22634	1.92198
2.964	0.09	0.0035109	1.8995588	0.012668	4	0.05067	0.1502	0.44518	3.91107
3.014	0.09	0.0032301	1.9316026	0.012052	2	0.0241	0.07265	0.21896	1.98906
3.064	0.09	0.0029757	1.9636465	0.011474	4	0.0459	0.14063	0.43088	4.04514
3.114	0.09	0.0027450	1.9956903	0.010933	2	0.02187	0.06809	0.21203	2.05605
3.164	0.09	0.0025354	2.0277342	0.010425	4	0.0417	0.13194	0.41745	4.17902
3.214	0.09	0.0023447	2.059778	0.009948	2	0.0199	0.06394	0.20552	2.12295
3.264	0.09	0.0021709	2.0918218	0.009499	4	0.038	0.12402	0.40481	4.31273
3.314	0.09	0.0020124	2.1238657	0.009077	2	0.01815	0.06016	0.19939	2.18977
3.364	0.09	0.0018675	2.1559095	0.00868	4	0.03472	0.1168	0.39291	4.44631
3.414	0.09	0.0017349	2.1879534	0.008305	2	0.01661	0.05671	0.1936	2.25653
3.464	0.09	0.0016135	2.2199972	0.007952	4	0.03181	0.11018	0.38167	4.57977
3.514	0.09	0.0015021	2.252041	0.007618	2	0.01524	0.05354	0.18814	2.32323
3.564	0.09	0.0013998	2.2840849	0.007303	4	0.02921	0.10411	0.37105	4.71312
3.614	0.09	0.0013058	2.3161287	0.007005	2	0.01401	0.05063	0.18298	2.38988
3.664	0.09	0.0012192	2.3481726	0.006723	4	0.02689	0.09853	0.361	4.84639
3.714	0.09	0.0011394	2.3802164	0.006455	2	0.01291	0.04795	0.17809	2.45649
3.764	0.09	0.0010658	2.4122602	0.006202	4	0.02481	0.09338	0.35147	4.97957
3.814	0.09	0.0009979	2.4443041	0.005962	2	0.01192	0.04548	0.17345	2.52307
3.864	0.09	0.0009350	2.4763479	0.005734	4	0.02294	0.08862	0.34243	5.11269
3.914	0.09	0.0008769	2.5083918	0.005517	2	0.01103	0.04319	0.16904	2.58961
3.964	0.09	0.0008230	2.5404356	0.005311	4	0.02125	0.08422	0.33384	5.24575
4.014	0.09	0.0007730	2.5724794	0.005116	2	0.01023	0.04107	0.16485	2.65613
4.064	0.09	0.0007267	2.6045233	0.00493	4	0.01972	0.08013	0.32567	5.37876
4.114	0.09	0.0006836	2.6365671	0.004752	2	0.0095	0.0391	0.16086	2.72262
4.164	0.09	0.0006436	2.668611	0.004583	4	0.01833	0.07634	0.31788	5.51172
4.214	0.09	0.0006063	2.7006548	0.004422	2	0.00884	0.03727	0.15706	2.78909
4.264	0.09	0.0005716	2.7326986	0.004269	4	0.01708	0.07281	0.31046	5.64463
4.314	0.09	0.0005393	2.7647425	0.004122	2	0.00824	0.03557	0.15344	2.85554
4.364	0.09	0.0005091	2.7967863	0.003982	4	0.01593	0.06952	0.30337	5.77752
4.414	0.09	0.0004810	2.8288302	0.003849	2	0.0077	0.03398	0.14997	2.92197
4.464	0.09	0.0004546	2.860874	0.003721	4	0.01488	0.06644	0.2966	5.91036
4.514	0.09	0.0004300	2.8929178	0.003599	2	0.0072	0.03249	0.14666	2.98839
4.564	0.09	0.0004070	2.9249617	0.003482	4	0.01393	0.06357	0.29012	6.04318
4.614	0.09	0.0003854	2.9570055	0.00337	2	0.00674	0.0311	0.14349	3.05479
4.664	0.09	0.0003652	2.9890494	0.003263	4	0.01305	0.06087	0.28392	6.17598
4.714	0.09	0.0003463	3.0210932	0.00316	2	0.00632	0.0298	0.14046	3.12118
4.764	0.09	0.0003285	3.053137	0.003062	4	0.01225	0.05835	0.27797	6.30875
4.814	0.09	0.0003118	3.0851809	0.002968	2	0.00594	0.02857	0.13755	3.18756
4.864	0.09	0.0002961	3.1172247	0.002877	4	0.01151	0.05598	0.27227	6.4415
4.914	0.09	0.0002813	3.1492685	0.00279	1	0.00279	0.01371	0.06738	1.62697
Jumlah						15.2296	19.9572	34.4683	230.131
						$\Sigma 0$	$\Sigma 1$	$\Sigma 2$	$\Sigma 4$

M ₀	0.2538274
M ₁	0.3326204
M ₂	0.5744717
M ₄	3.8355176

Tabel B.9. Varian *spectral moment*

<i>Spectral moment</i>	Nilai	
	1 tahun	100 tahun
M ₀	0.06249391	0.2538274
M ₁	0.09712259	0.3326204
M ₂	0.19029864	0.5744717
M ₄	1.41242391	3.8355176

4. Perhitungan arus akibat gelombang di lokasi pipa

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

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

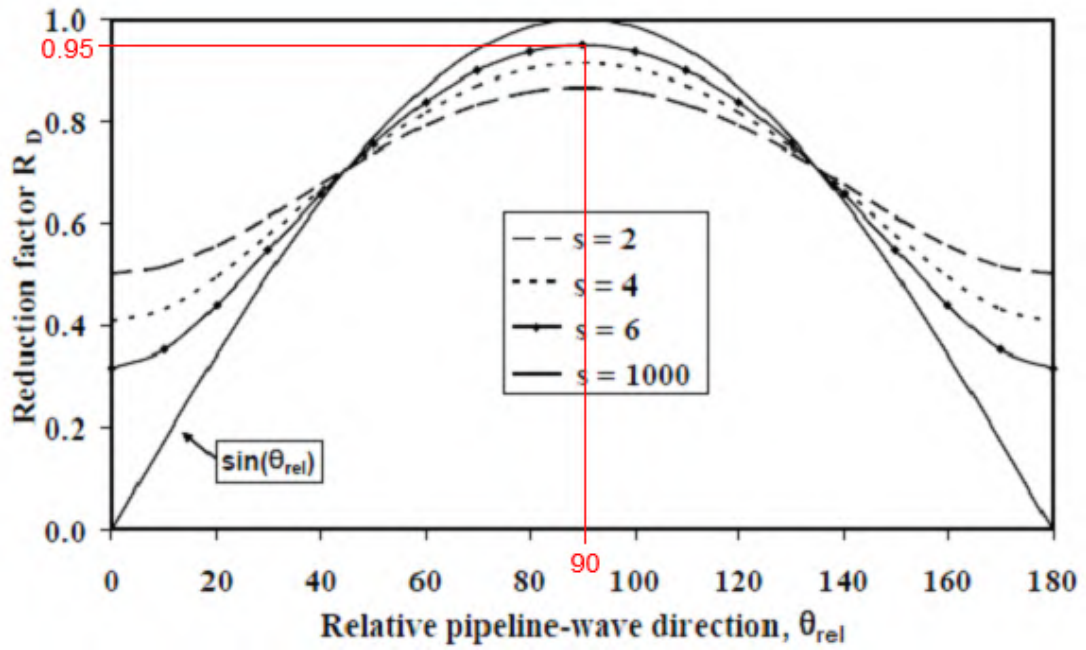
Tabel B.10. Kecepatan partikel gelombang pada *pipe level*

Kondisi	U _s (m/s)	T _u (s)
1 tahun	0.500	3.601
100 tahun	1.008	4.177

Akibat pengaruh arah dan sebaran gelombang maka perlu untuk diperhitungkan nilai *reduction factor*.

$$U_w = U_s \cdot R_D$$

➤ Menentukan *reduction factor*



Gambar B.1. Menentukan *reduction factor*

Tabel B.11. Kecepatan partikel gelombang yang digunakan

Kondisi	U_s (m/s)	s	R_D	U_w (m/s)	T_u (s)
1 tahun	0.500	6	0.95	0.475	3.601
100 tahun	1.008	6	0.95	0.957	4.177

LAMPIRAN C

KEKAKUAN TANAH

C.1. Perhitungan Kekakuan Tanah

Tabel C.1. Menentukan *poisson's ratio* tanah

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

Tabel C.2. Menentukan faktor kekakuan tanah

<i>Clay type</i>	C_V (kN/m ^{5/2})	C_L (kN/m ^{5/2})	$K_{V,S}$ (kN/m/m)
Very soft	600	500	50-100
Soft	1400	1200	160-260
Firm	3000	2600	500-800
Stiff	4500	3900	1000-1600
Very stiff	11000	9500	2000-3000
Hard	12000	10500	2600-4200

Diketahui:

$$\begin{aligned}
 W_{sub} &= 2998.839 && \text{N/m} \\
 F_b &= 4014.781 && \text{N/m} \\
 \nu_{soil} &= 0.45 && (\text{clay}) \\
 D_t &= 0.713 && \text{m} \\
 C_v &= 1400 \\
 C_L &= 1200
 \end{aligned}$$

Persamaan untuk menentukan kekakuan tanah :

$$K_v = \frac{C_v}{1 - \nu} \left(\frac{2\rho_s}{3\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D_t}$$

$$K_L = C_L(1 + \nu) \left(\frac{2\rho_s}{3\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D_t}$$

$$\frac{\rho_s}{\rho} = \frac{W_{sub} + F_b}{F_b}$$

$$\rho_s/\rho \quad 1.74695$$

$K_v =$	3219.676077	kN/m ²	3219676.08	N/m ²
$K_L =$	2200.878575	kN/m ²	2200878.58	N/m ²

LAMPIRAN D

PANJANG *FREE SPAN* EFEKTIF DAN *BOUNDARY CONDITION*

D.1. Panjang *Free Span* Efektif

a. Untuk $L = 17.55$ m

Cross flow

$$\begin{aligned} \beta &= \log 1672.83601 \\ \beta &= 3.223453369 \longrightarrow \beta \geq 2.7 \end{aligned}$$

$$\frac{L_{eff}}{L} = \frac{4.73}{0.036\beta^2 + 0.61\beta + 1} \qquad \frac{L_{eff}}{L} = \frac{4.73}{-0.066\beta^2 + 1.02\beta + 0.63}$$

$$\begin{aligned} L_{eff}/L &= 1.463426967 \\ L_{eff} &= 25.683 \quad \text{m} \end{aligned}$$

In-line

$$\begin{aligned} \beta &= \log 1143.5029 \\ \beta &= 3.058237271 \longrightarrow \beta \geq 2.7 \end{aligned}$$

$$\frac{L_{eff}}{L} = \frac{4.73}{0.036\beta^2 + 0.61\beta + 1} \qquad \frac{L_{eff}}{L} = \frac{4.73}{-0.066\beta^2 + 1.02\beta + 0.63}$$

$$\begin{aligned} L_{eff}/L &= 1.510161079 \\ L_{eff} &= 26.503 \quad \text{m} \end{aligned}$$

b. Untuk $L = 26.85$ m

Cross flow

$$\begin{aligned} \beta &= \log \frac{9164.78003}{3.962122045} \longrightarrow \beta \geq 2.7 \\ \beta &= \end{aligned}$$

$$\frac{L_{eff}}{L} = \frac{4.73}{0.036\beta^2 + 0.61\beta + 1} \qquad \frac{L_{eff}}{L} = \frac{4.73}{-0.066\beta^2 + 1.02\beta + 0.63}$$

$$\begin{aligned} L_{eff}/L &= 1.30114155 \\ L_{eff} &= 34.936 \quad \text{m} \end{aligned}$$

In-line

$$\begin{aligned} \beta &= \log \frac{6264.78178}{3.796905948} \longrightarrow \beta \geq 2.7 \\ \beta &= \end{aligned}$$

$$\frac{L_{eff}}{L} = \frac{4.73}{0.036\beta^2 + 0.61\beta + 1} \qquad \frac{L_{eff}}{L} = \frac{4.73}{-0.066\beta^2 + 1.02\beta + 0.63}$$

$$\begin{aligned} L_{eff}/L &= 1.331885844 \\ L_{eff} &= 35.761 \quad \text{m} \end{aligned}$$

D.2. Boundary Condition

Kondisi batas dalam tugas akhir ini adalah *pinned-pinned*, sehingga untuk nilai C_1 - C_6 dapat dilihat dalam tabel D.1 berikut, beserta beberapa keterangan yang harus dipahami dan digunakan dalam perhitungan:

Tabel D.1. *Boundary condition* yang digunakan

	Pinned-Pinned ²⁾	Fixed-Fixed ³⁾	Single span on seabed
C_1	1.57	3.56	3.56
C_2	1.0	4.0	4.0
C_3	0.8 ¹⁾	0.2 ¹⁾	0.4 ¹⁾
C_4	4.93	14.1	Shoulder: $14.1(L/L_{\text{eff}})^2$ Mid-span: 8.6
C_5	1/8	1/12	Shoulder: ⁴⁾ $\frac{1}{18(L_{\text{eff}}/L)^2 - 6}$ Mid-span: 1/24
C_6	5/384	1/384	1/384
1) Note that $C_3 = 0$ is normally assumed for in-line if the steady current is not accounted for.			
2) For pinned-pinned boundary condition L_{eff} is to be replaced by L in the above expressions also for P_{cr} .			
3) For fixed-fixed boundary conditions, $L_{\text{eff}}/L = 1$ per definition.			
4) C_5 shall be calculated using the static soil stiffness in the L_{eff}/L calculation.			

Jadi keterangan di atas menunjukkan bahwa untuk kondisi batas *pinned-pinned*, untuk semua perhitungan yang membutuhkan nilai panjang efektif *free span* (L_{eff}) diganti dengan panjang *free span* aktualnya (L). Karena kondisi batas dalam analisis adalah *pinned-pinned*, maka L_{eff} tidak perlu diperhitungkan.

LAMPIRAN E

PARAMETER HIDRODINAMIKA

E.1. Parameter Stabilitas

a. Menghitung *damping ratio*

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

1. Damping struktur (ζ_{str})

Dalam DNV RP F105, jika tidak ada detail informasi mengenai damping dapat diasumsikan bernilai :

ζ_{str} 0.005

Jika terdapat concrete, maka dapat meningkatkan damping 0.01-0.02

ζ_{str} 0.015 (yang digunakan)

2. Hydrodynamic damping (ζ_h)

ζ_h 0.00 (DNV-RP-F105)

3. Soil damping (ζ_{soil})

Untuk tujuan analisis untuk *screening*, nilai dari *soil damping* dapat dimasukkan 0.01 (ζ_{soil} : 0.01) sesuai pada DNV-RP-F105 (2006).

Tabel E.1. Total damping

Damping	Nilai
<i>Structural damping</i>	0.015
<i>Hydrodynamic damping</i>	0.000
<i>Soil damping</i>	0.010
<i>Total Damping</i>	0.025

b. Perhitungan parameter stabilitas

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

Diketahui:

m	1124.20	kg/m
ζ_T	0.025	
ρ_w	1025	kg/m ³
D_t	0.713	m
γ_k	1.3	

Didapatkan $K_s = 0.483$

➤ Dengan memperhatikan *safety factor* ($\gamma_k = 1.3$), sehingga:

$$K_{sd} = \frac{K_s}{\gamma_k}$$

Tabel E.2. Hasil perhitungan parameter stabilitas

Parameter	Hasil
Parameter stabilitas (K_{sd})	0.372

E.2. Current Flow Ratio

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

Tabel E.3. Nilai arus laut

Kondisi	U_c (m/s)	U_w (m/s)
1 tahun	0.214	0.475
100 tahun	0.267	0.957

$$\alpha = 0.3598$$

E.3. Reduce Velocity

1. In-line

In-line onset value reduced velocity

$$V_{R,onset}^{IL} = \left(\frac{1.0}{\gamma_{on,IL}} \right) \quad \text{untuk } K_{sd} < 0.4$$

$$V_{R,onset}^{IL} = \left(\frac{0.6+K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} \right) \quad \text{untuk } 0.4 < K_{sd} < 1.6$$

$$V_{R,onset}^{IL} = \left(\frac{2.2}{\gamma_{on,IL}} \right) \quad \text{untuk } K_{sd} > 1.6$$

$$K_{sd} = 0.3717 \quad K_{sd} < 0.4$$

$$V_{R,onset}^{IL} = \left(\frac{1.0}{\gamma_{on,IL}} \right) \quad \text{untuk } K_{sd} < 0.4$$

Tabel E.4. *Safety factor reduce velocity (in-line)*

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

$$V_{R,IL} = 0.9091$$

2. Cross-flow

Cross-flow onset value reduced velocity

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

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

$$e = 1$$

$$D_t = 0.713$$

$$e/D_t = 1.402524544$$

maka,

$$\Psi_{proxi,onset} = 1$$

b.
$$\Psi_{trench,onset} = 1 + 0.5 \frac{\Delta}{D}$$

$$\frac{\Delta}{D} = \frac{1.25 d_{trench} - e}{D_t} \text{ jika } d_{trench} > 0$$

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

Diketahui:

$$d_{trench} = 0 \quad \text{m}$$

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

$$D_t = 0.713 \quad \text{m}$$

$$\Delta/D_t = 0$$

Tabel E.5. *Safety factor reduce velocity (cross-flow)*

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

Sehingga,

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

$$\begin{aligned} \Psi_{proxi,onset} &= 1 \\ \Psi_{trench,onset} &= 1 \\ \gamma_{on, CF} &= 1.2 \\ V_{R,CF} &= 2.5 \end{aligned}$$

Tabel E.6. Hasil *reduce velocity*

<i>Reduced Velocity</i>	Hasil
<i>In-Line</i>	0.9091
<i>Cross-flow</i>	2.5

LAMPIRAN F

GAYA DRAG ARUS KOMBINASI

F.1. Perhitungan Gaya Drag

1. Menentukan koefisien gaya drag

Koefisien drag sesuai DNV RP F105

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

a. Koefisien drag umum untuk aliran *steady*

Tabel F.1. Menentukan faktor kekasaran permukaan pipa

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

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

$$k = 0.003333333$$

$$D_t = 0.713 \quad \text{m}$$

$$k/D_t = 0.004675082$$

$$C_{D0} = 0.983957843$$

b. Faktor koreksi untuk pengaruh aliran tidak *steady*

Menentukan *Keulegan-Carpenter Number*

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

$$U_w = 0.957 \quad \text{m/s}$$

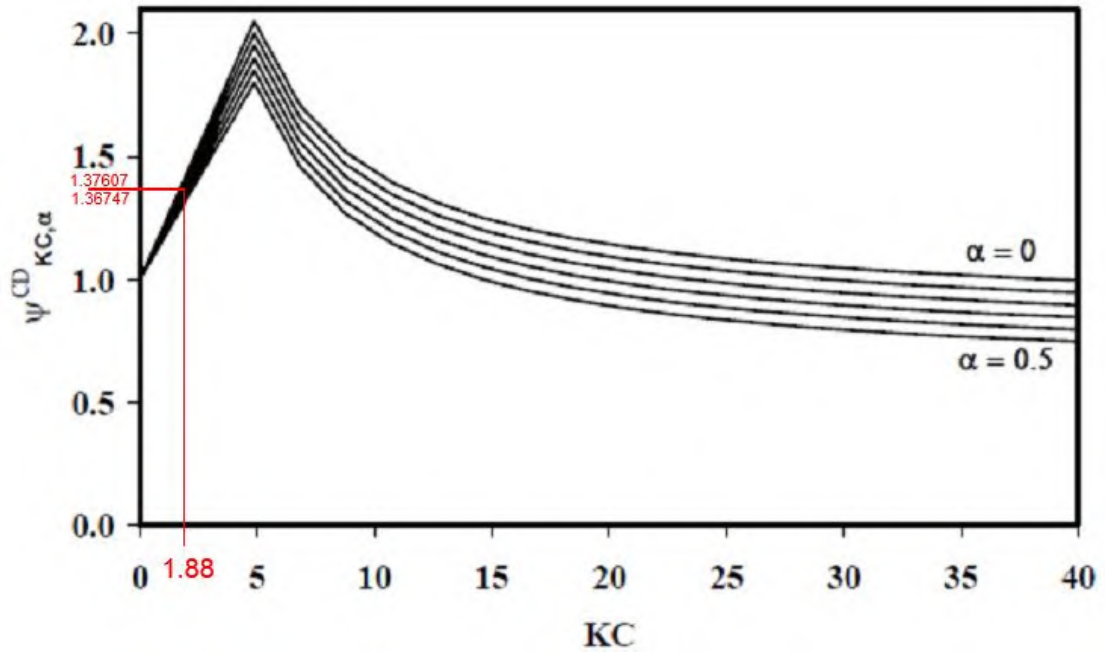
$$\omega_p = 0.714 \quad \text{rad/s}$$

$$D_t = 0.713 \quad \text{m/s}$$

$$\alpha = 0.3598$$

$$KC = 1.88033446$$

Karena $KC < 5$, maka dapat digunakan grafik berikut:



Gambar F.1. Penentuan faktor koreksi

Dari hasil tersebut, selanjutnya diinterpolasikan. Hasilnya pada tabel D.2 berikut:

Tabel F.2. Hasil interpolasi faktor koreksi aliran tidak *steady*

α	ψ KC	ψ KC
0.3	1.37607	1.37261
0.4	1.36747	

c. Faktor koreksi untuk pengaruh dasar laut

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

Diketahui

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

$$D_t = 0.713 \quad \text{m}$$

$$e/D_t = 1.402524544$$

$$\psi_{proxi} = 1$$

d. Faktor koreksi keberadaan *trench*

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

$$\begin{aligned} \Delta/D &= 0 \text{ (karena } d_{trench} = 0 \text{ m)} \\ \psi_{trench} &= 1 \end{aligned}$$

e. Faktor koreksi pengaruh gerakan *cross-flow*

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

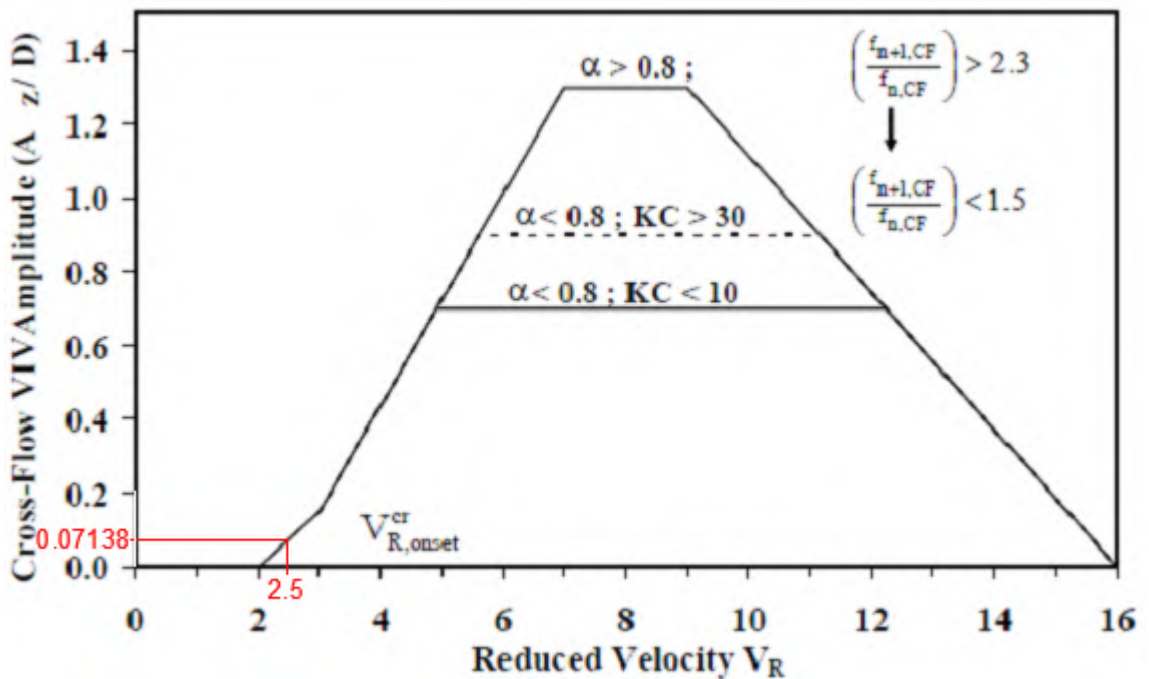
Diketahui

$$\begin{aligned} V_{R,CF} &= 2.5 \\ D_t &= 0.713 \text{ m} \end{aligned}$$

$$A_z/D = 0.071376536$$

$$\psi_{VIV} = 1.234925474$$

Nilai A_z/D di atas didapatkan dari grafik di bawah ini :



Gambar F.2. Menentukan nilai A_z/D

2. Menghitung gaya drag

Tabel F.3. Parameter gaya drag

Cd0	0.983957843	
ψ KC	1.369223484	operasi
ψ proxi	1	
ψ trench	1	
ψ VIV	1.234925474	

Koefisien drag sesuai DNV RP F105

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

$$C_D = 1.667882348$$

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

$$F_D = 913.373 \quad \text{N/m}$$

LAMPIRAN G

ANALISIS STRUKTUR

a. Untuk L = 17.55 m

1. Faktor kekakuan *concrete*

$$CSF = k_c \cdot \left(\frac{E_c \cdot I_{conc}}{E \cdot I_{steel}} \right)^{0.75}$$

$k_c =$	0.25	
$E_c =$	29054970000	Pa
$E =$	2070000000000	Pa
$I_{conc} =$	0.003531563	m ⁴
$I_{steel} =$	0.000744852	m ⁴
$CSF =$	0.184204457	

2. *Critical buckling load*

$$P_{cr} = \frac{(1 + CSF) \cdot C_2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_{steel}}{L_{eff}^2}$$


$CSF =$	0.184204457	
$C_2 =$	1	
$E =$	2070000000000	Pa
$I_{steel} =$	0.000744852	m ⁴
$L =$	17.55	m

$P_{cr} =$			
	↓		
Operasi	5850766.946	N	<i>in-line</i>
	5850766.946	N	<i>cross-flow</i>

3 Gaya efektif aksial

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

H _{eff} =	0	
ν =	0.3	
P _i =	1960000	(operasi)
D _i =	0.4762	
ΔT =	50	(operasi)
α _e =	0.000011	
E =	207000000000	Pa
A _s =	0.024581046	m ²


S_{eff} = 

Operasi	-2938184.0286	N
---------	---------------	---

4. Static Deflection

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

Diketahui

L =	17.55	M	
E =	207000000000	Pa	
I _{steel} =	0.000744852	m ⁴	
CSF =	0.184204457		
S _{eff} =			
	-2938184.029	N	operasi
P _{cr} =			
Operasi	5850766.94550939	N	in-line
	5850766.946	N	cross-flow
C ₆ =	0.013020833		
q =	W _{sub} (cross-flow)		
	2998.839	N/m	Operasi
q =	Drag force(in-line)		
	913.373	N/m	Operasi
δ =			
Operasi	0.0124 m		in-line
	0.0408 m		cross-flow

5. Frekuensi natural pipa *free span*

$$f_n = C_1 \sqrt{1 + CSF} \sqrt{\frac{EI_{steel}}{m_e L_{eff}^4} \left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}} + C_3 \left(\frac{\delta}{D_t} \right)^2 \right)}$$

C ₁ =	1.57		
C ₃ =	0.8		
CSF =	0.184204457		
E =	207000000000	Pa	
I _{steel} =	0.000744852	m ⁴	
m _e =	1124.1998	kg/m	
S _{eff} =	-2938184.029	N	
P _{cr} =	5850766.946	N	in-line
	5850766.946	N	cross-flow
δ =	0.012412598	m	in-line
	0.04075375	m	cross-flow
D _t =	0.713	m	

Tabel G.1. Rangkuman hasil analisis struktural

Parameter	<i>In-line</i>	<i>Cross-flow</i>	Satuan
L	17.55	26.85	m
W _{sub}	2998.83869	2998.83869	N/m
m _e	1124.199779	1124.199779	kg/m
CSF	0.184204457	0.184204457	
S _{eff}	-2938184.029	-2938184.029	N
P _{cr}	5850766.946	2499645.726	N
δ	0.012412598	-0.633538015	m
f _n	1.449758939	0.592776928	

LAMPIRAN H

SCREENING FREKUENSI NATURAL

1. Screening Frekuensi Natural

a. In-line

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

Tabel H.1. Parameter untuk *screening in-line*

Parameter	Nilai	Satuan
γ_{IL}	1.4	
$U_{c,100 \text{ tahun}}$	0.26695	m/s
$V_{R, IL}$	0.9091	
D_t	0.713	m
α	0.3598	

Tabel H.2. *Screening in-line*

L (m)	Frekuensi natural	Ruas kiri	Ruas kanan	Keterangan
5	24.7876	17.705	1.113	OK
10	5.7884	4.135	1.0804	OK
15	2.2377	1.598	1.0483	OK
17.55	1.44976	1.0355	1.032	OK
17.6	1.437	1.0267	1.0295	NOT OK

b. Cross-flow

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

Tabel H.3. Parameter untuk *screening cross-flow*

Parameter	Nilai	Satuan
γ_{CF}	1.4	
$U_{c,100 \text{ tahun}}$	0.266948019	m/s
$U_{w,1 \text{ tahun}}$	0.474976842	m/s
$V_{R, CF}$	2.5	
D_t	0.713	m

Tabel H.4. *Screening cross-flow*

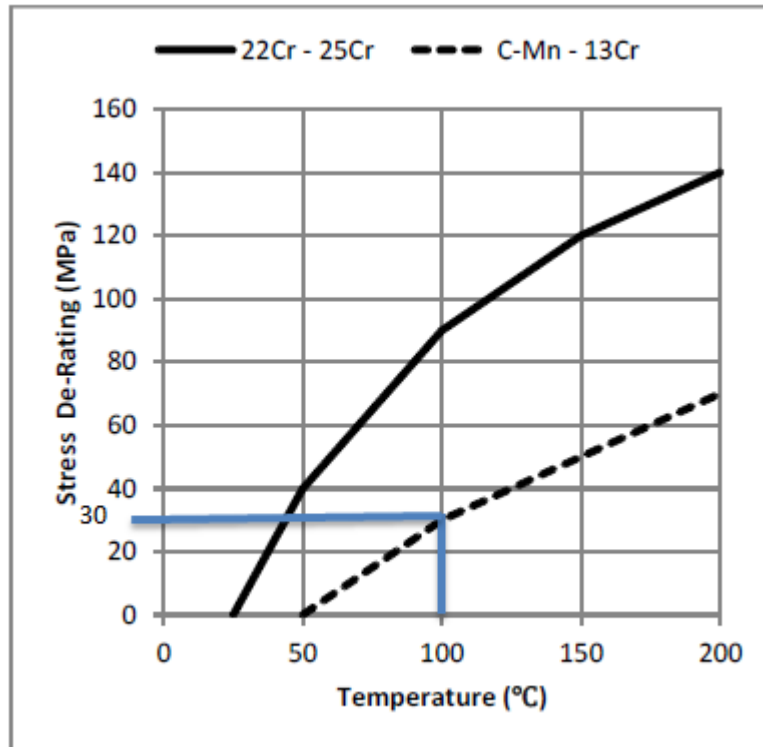
L (m)	Frekuensi natural	Ruas kiri	Ruas kanan	Keterangan
5	24.7876	17.705	0.4162	OK
10	5.7885	4.135	0.4162	OK
15	2.2384	1.599	0.4162	OK
20	0.953	0.681	0.4162	OK
26.85	0.593	0.4234	0.4162	OK
26.9	0.573	0.4097	0.4162	NOT OK

LAMPIRAN I

PARAMETER UNTUK ULS CHECK

I.1. Denote Plastic Capacities

1. Mendapatkan nilai *de-rating yield* dan *ultimate*



Gambar I.1. Grafik mendapatkan nilai *de-rating*

2. Menghitung *denote plastic capacities*

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

$$f_u = (SMTS - f_{u,temp}) \cdot \alpha_U$$

$$M_p(t_2) = f_y \cdot (D_0 - t_2)^2 \cdot t_2$$

$$S_p(t_2) = f_y \cdot \pi \cdot (D_0 - t_2) \cdot t_2$$

Karakteristik plastic moment resistance (Mp)

Diketahui

$$\begin{aligned}D_0 &= 0.508 \text{ m} \\t_2 &= 0.0129 \text{ m} \\f_y &= 330000000 \text{ Pa}\end{aligned}$$

$$M_p = 1043492.911 \text{ Nm}$$

Karakteristik plastic axial force resistance (Sp)

Diketahui

$$\begin{aligned}D_0 &= 0.508 \text{ m} \\t_2 &= 0.0129 \text{ m} \\f_y &= 330000000 \text{ Pa}\end{aligned}$$

$$S_p = 6621348.54 \text{ N}$$

I.2. Parameter Aliran Tegangan dan Faktor Tekanan

➤ Parameter aliran tegangan

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

➤ Faktor tekanan untuk beban kombinasi

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

$$\beta = \frac{60 - D_0/t_2}{90}$$

1. Parameter aliran tegangan

Menghitung β

$$D_0 = 0.508 \text{ m}$$

$$t_2 = 0.0129 \text{ m}$$

$$\beta = 0.2291128$$

Menghitung f_u

$$SMTS = 460 \text{ Mpa} \quad 460000000 \text{ Pa}$$

$$f_{u,temp} = 30 \text{ MPa} \quad 300000000 \text{ Pa}$$

$$\alpha_u = 1$$

$$f_u = 430000000 \text{ Pa} \quad f_u = (SMTS - f_{u,temp}) \cdot \alpha_u$$

Parameter aliran tekanan

Diketahui

$$\beta = 0.2291128$$

$$f_u = 430000000 \text{ Pa}$$

$$f_y = 330000000 \text{ Pa}$$

$$\alpha_c = 1.0694281$$

2. Faktor tekanan untuk beban kombinasi

Diketahui

$$t_2 = 0.0129 \text{ m}$$

operasi $p_i = 1.96 \text{ MPa} \quad 1960000 \text{ Pa}$

$$p_e = 0.2157253 \text{ Mpa} \quad 215725.3335 \text{ Pa}$$

$$\beta = 0.2291128$$

$$p_b = \frac{2 \cdot t}{D - t} \cdot f_{cb} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}$$

$$f_{cb} = \text{Min} \left[f_y, \frac{f_u}{1.15} \right]$$

$$f_{cb} = 330000000$$

$$p_b = 19856838 \text{ Pa}$$

$$\alpha_p = \begin{cases} 1 - \beta & \frac{p_i - p_e}{p_b} < \frac{2}{3} \\ 1 - 3\beta \left(1 - \frac{p_i - p_e}{p_b} \right) & \frac{p_i - p_e}{p_b} \geq \frac{2}{3} \end{cases}$$

$$\frac{p_i - p_e}{p_b} = 0.0878425 < 0.666666667 \quad \text{operasi}$$

$$\alpha_p = 0.7708872$$

LAMPIRAN J

STRESS RANGE DAN ENVIRONMENTAL STRESS

J.1. Stress Range In-Line dan Cross-Flow

1. Menghitung *stress amplitude*

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

Tabel J.1. Nilai parameter dan hasil *unit stress amplitude*

Parameter	Nilai	Satuan
C ₄	4.93	
CSF	0.1842	
D _t	0.713	m
D ₀	0.508	m
t _{nom}	0.0159	m
E	207000000	Pa
L _{eff}	17.55	m
A _{IL/CF}	1376678.8	Pa

2. Menghitung *stress range*

a. *In-line*

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

Tabel J.2. Nilai *stress range* untuk *in-line*

Parameter	Nilai	Satuan
α	0.3598	
(A _Y /D)	0	
ψ_{IL}	0	
γ_s	1.3	
A _{IL}	1376678.752	Pa
S _{IL}	0	Pa

b. *Cross-flow*

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

Tabel J.3. Nilai *stress range* untuk *cross-flow*

Parameter	Nilai	Satuan
K_{sd}	0.37173771	
(A_z/D)	0.07137654	
R_k	0.94423934	
γ_s	1.3	
A_{CF}	1376678.752	Pa
S_{CF}	241236.7779	Pa

J.2. Environmental Stress

1. In-Line

a. Menghitung momen akibat gaya *drag*

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

Tabel J.4. Perhitungan M_w

Parameter	Nilai	Satuan
C_5	0.13	
F_D	913.373	N/m
L	17.55	m
S_{eff}	-2938184.029	N
P_{cr}	5850766.946	N
M_w	70639.39324	Nm

b. Menghitung tegangan akibat beban arus langsung

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

Tabel J.5.. Perhitungan σ_{FM}

Parameter	Notasi	Satuan
D_0	0.508	m
t_2	0.0129	m
I_{steel}	0.000744852	m^4
M_w	70639.39324	Nm
σ_{FM}	23476839.58	Pa

c. Menghitung *environmental stress* untuk *in-line*

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

Tabel J.6. Hasil *environmental stress in-line*

Parameter	Nilai	Satuan
S _{CF}	241236.7779	Pa
A _{IL}	1376678.752	Pa
A _{CF}	1376678.752	Pa
S _{IL}	0	Pa
σ _{FM}	23476839.58	Pa
σ _{E,IL}	23525086.93	Pa

2. *Cross-flow*

Menghitung *environmental stress* untuk *cross-flow*

$$\sigma_E = \frac{1}{2} S_{CF}$$

Tabel J.7. Hasil *environmental stress cross-flow*

Parameter	Nilai	Satuan
S _{CF}	241236.7779	Pa
σ _{E,CF}	120618.389	Pa

LAMPIRAN K

BENDING MOMENT

K.1. Momen *Bending* Arah Vertikal

a. Momen *bending* akibat beban fungsional

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

Tabel K.1. Nilai *bending moment* akibat beban fungsional

Parameter	Nilai	Satuan
q (W_{sub})	2998.839	N/m
L	17.55	m
M_F	115456.2267	Nm

b. *Bending moment* untuk gerakan *cross-flow* pipa

$$M_E = \sigma_E \frac{2I_{steel}}{D_0 - t_{nom}}$$

Tabel K.2. Nilai *bending moment* gerakan *cross-flow*

Parameter	Nilai	Satuan
$\sigma_{E,CF}$	120618.389	Pa
I_{steel}	0.000744852	m ⁴
D_0	0.508	m
t_{nom}	0.0159	m
$M_E (CF)$	365.140842	Nm

K.2. *Bending Moment* Arah Horizontal

$$M_E = \sigma_E \frac{2I_{steel}}{D_0 - t_{nom}}$$

Tabel K.3. Nilai *bending moment* gerakan *in-line*

Parameter	Nilai	Satuan
$\sigma_{E,IL}$	23525086.93	Pa
I_{steel}	0.000744852	m ⁴
D_0	0.508	m
t_{nom}	0.0159	m
$M_E (IL)$	71216.09005	Nm

K.3. Bending Moment Total

a. Menentukan faktor-faktor akibat beban kombinasi

Tabel K.4. Faktor kondisi beban

Condition	γ_c
Pipeline resting on uneven seabed	1.07
Reeling on and J-tube pull-in	0.82
System pressure test	0.93
Otherwise	1.00

Tabel K.5. Faktor pembebanan untuk kombinasi beban

Limit State / Load combination	Load effect combination		Functional loads ¹⁾	Environmental load	Interference loads	Accidental loads
			γ_F	γ_E	γ_F	γ_A
ULS	a	System check ²⁾	1.2	0.7		
	b	Local check	1.1	1.3	1.1	
FLS	c		1.0	1.0	1.0	
ALS	d		1.0	1.0	1.0	1.0

1) If the functional load effect reduces the combined load effects, γ_F shall be taken as 1/1.1.
 2) This load effect factor combination shall only be checked when system effects are present, i.e. when the major part of the pipeline is exposed to the same functional load. This will typically only apply to pipeline installation.

b. Menghitung resultan *bending moment*

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

Tabel K.6. Nilai *bending moment* total

Parameter	Nilai	Satuan
M_F	115456.2267	Nm
$M_{E(IL)}$	71216.09005	Nm
$M_{E(CF)}$	365.140842	Nm
γ_F	1.1	
γ_C	1.07	
γ_E	1.3	
M_{Sd}	164824.43	Nm

LAMPIRAN L

ULS CHECK LOCAL BUCKLING

L.1. ULS Check Local Buckling DNV-OS-F101

Untuk *internal overpressure* (sesuai data)

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

a. Menentukan faktor tahanan material

Tabel L.1. Faktor tahanan material

Limit state category ¹⁾	SLS/ULS/ALS	FLS
γ_m	1.15	1.00
1) The limit states (SLS, ULS, ALS and FLS) are defined in D.		

b. Menentukan faktor keamanan *resistance*

Tabel L.2. Faktor keamanan *resistance*

Safety class	γ_{sc}		
	Low	Medium	High
Pressure containment ¹⁾	1.046 ^{2),3)}	1.138	1.308 ⁴⁾
Other	1.04	1.14	1.26
1) The number of significant digits is given in order to comply with the ISO usage factors. 2) Safety class low will be governed by the system pressure test which is required to be 3% above the incidental pressure. Hence, for operation in safety class low, the resistance factor will effectively be minimum 3% higher. 3) For system pressure test, α_T shall be equal to 1.00, which gives an allowable hoop stress of 96% of SMYS both for materials fulfilling supplementary requirement U and those not. 4) For parts of pipelines in location class 1, resistance safety class medium may be applied (1.138).			

c. Menghitung *unity check* dari ULS *check* DNV-OS-F101

Tabel L.3. Hasil ULS *check* sesuai DNV-RP-F101

Parameter	Nilai	Satuan
γ_m	1.15	
γ_{SC}	1.26	
α_c	1.069428131	
α_p	0.770887166	
M_p	1043492.911	Nm
S_p	6621348.54	N
S_{Sd}	-3458242.602	N
M_{Sd}	164824.43	Nm
P_i	1.96	MPa
P_e	0.215725334	MPa
P_b	19.85683778	MPa
UC	0.515	≤ 1

Bending moment maksimal (kritis) yang menghasilkan UC mendekati 1 =
382922.405 Nm

Oleh L = 21.83 m

LAMPIRAN M

TEGANGAN *VON-MISES* DAN *BUCKLING* KRITIS

M.1. Tegangan Von-mises

1. Tegangan *Hoop*

$$\sigma_h = (P_i - P_e) \frac{D_0 - t_2}{2 \cdot t_2}$$

Tabel M.1. *Hoop stress*

Parameter	Nilai	Satuan
P_i	1960000	Pa
P_e	215725.334	Pa
D_0	0.508	m
t_2	0.0129	m
σ_H	33472495.6	Pa

2. Tegangan *Thermal*

$$\sigma_T = -E \alpha_e \Delta T$$

Tabel M.2. *Thermal stress*

Parameter	Nilai	Satuan
E	207000000000	Pa
α	0.000011	
ΔT	50	°
σ_T	-113850000	Pa

3. Tegangan *Poissons*

$$\sigma_p = \nu \sigma_h$$

Tabel M.3. *Poisson stress*

Parameter	Nilai	Satuan
ν	0.3	
σ_H	33472495.64	Pa
σ_p	10041748.69	Pa

4. Tegangan *Bending*

$$\sigma_b = \frac{M_{sd} \cdot D_0}{2I_{steel}}$$

Tabel M.4. *Bending stress*

Parameter	Nilai	Satuan
M_{sd}	164824.4299	Nm
D_0	0.508	m
I_{steel}	0.000744852	m^4
σ_b	56206305.59	Pa

5. Tegangan Longitudinal

$$\sigma_L = \sigma_T + \sigma_p \pm \sigma_b$$

Tabel M.5. Perhitungan *longitudinal stress*

Tegangan	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Thermal stress</i>	σ_T	-113850000	Pa
<i>Poisson stress</i>	σ_p	10041748.69	Pa
<i>Bending stress</i>	σ_b	56206305.59	Pa
<i>Longitudinal stress</i>	σ_L	-160014556.9	Pa

6. Tegangan *Von-mises* atau *Equivalent*

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

Tabel M.6. Hasil *von-mises stress*

Tegangan	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Hoop stress</i>	σ_H	33472495.64	Pa
<i>Longitudinal stress</i>	σ_L	-160014556.9	Pa
<i>Von-mises stress</i>	σ_{eq}	163478030.9	Pa

M.2. Tegangan *Buckling* Kritis

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{steel}}{A_s L^2}$$

Tabel M.7. Hasil *buckling stress*

Parameter	Nilai	Satuan
E	207000000000	Pa
L	17.55	m
I _{steel}	0.000744852	m ⁴
A _s	0.024581046	m ²
σ _{cr}	200995227.6	Pa
σ _{cr}	200.9952276	Mpa

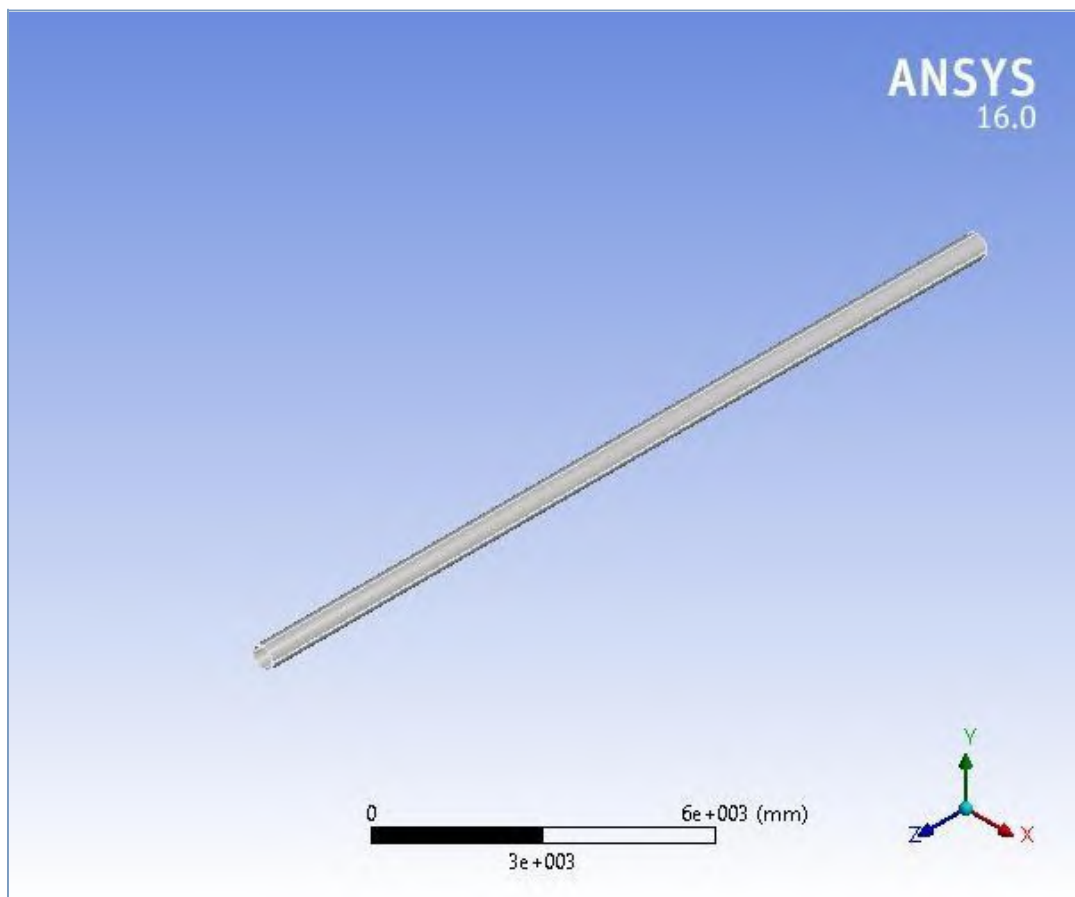
LAMPIRAN N
LAPORAN TEGANGAN VON-MISES SOFTWARE

N.1. Report Preview dari Software



Project

First Saved	Wednesday, June 8, 2016
Last Saved	Friday, July 15, 2016
Product Version	16.0 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



Contents

- Units
- Model (A4)
 - Pipeline Free Span
 - Part 1
 - Coordinate Systems
 - Mesh
 - Mesh Controls
 - Static Structural (A5)
 - Analysis Settings
 - Loads
 - Solution (A6)
 - Solution Information
 - Equivalent Stress
- Material Data
 - Structural Steel

Units

TABLE 1

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

Model (A4)

Pipeline Free Span

TABLE 2
Model (A4) > Geometry

Object Name	<i>Pipeline Free Span</i>
State	Fully Defined
Definition	
Source	D:\desain ansys kombinasi load\pipa revisi ramadhan.IGS
Type	Iges
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Length X	508. mm
Length Y	508. mm
Length Z	17550 mm
Properties	
Volume	4.3139e+008 mm ³
Mass	3.3864 t
Scale Factor Value	1.
Statistics	
Bodies	1
Active Bodies	1
Nodes	78784
Elements	11232
Mesh Metric	None

Basic Geometry Options	
Solid Bodies	Yes
Surface Bodies	Yes
Line Bodies	No
Parameters	Yes
Parameter Key	DS
Attributes	No
Named Selections	No
Material Properties	No
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	No
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	No
Compare Parts On Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\user1\AppData\Roaming\Ansys\lv160
Analysis Type	3-D
Mixed Import Resolution	None
Decompose Disjoint Geometry	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (A4) > Pipeline Free Span > Parts

Object Name	<i>Part 1</i>
State	Meshed
Graphics Properties	
Visible	Yes
Transparency	1
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Length X	508. mm
Length Y	508. mm
Length Z	17550 mm
Properties	
Volume	4.3139e+008 mm ³
Mass	3.3864 t
Centroid X	-2.3991e-010 mm
Centroid Y	-2.4956e-010 mm
Centroid Z	8795.4 mm
Moment of Inertia Ip1	8.6568e+007 t·mm ²
Moment of Inertia Ip2	8.6568e+007 t·mm ²
Moment of Inertia Ip3	2.0238e+005 t·mm ²
Statistics	
Nodes	78784
Elements	11232
Mesh Metric	None

Coordinate System

TABLE 4
Model (A4) > Coordinate Systems > Coordinate System

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

Mesh

TABLE 5
Model (A4) > Mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Coarse
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	15.90 mm
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Patch Independent Options	
Topology Checking	No
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define

Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default
Statistics	
Nodes	78784
Elements	11232
Mesh Metric	None

TABLE 6
Model (A4) > Mesh > Mesh Controls

Object Name	<i>MultiZone</i>	<i>Body Sizing</i>
State	Fully Defined	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	1 Body	
Definition		
Suppressed	No	
Method	MultiZone	
Mapped Mesh Type	Hexa	
Surface Mesh Method	Program Controlled	
Free Mesh Type	Not Allowed	
Element Midside Nodes	Use Global Setting	
Src/Trg Selection	Automatic	
Source Scoping Method	Program Controlled	
Source	Program Controlled	
Sweep Size Behavior	Sweep Element Size	
Sweep Element Size	Default	
Type		Element Size
Element Size		50. mm
Behavior		Soft
Advanced		
Preserve Boundaries	Protected	
Mesh Based Defeaturing	Off	
Minimum Edge Length	15.9 mm	
Write ICEM CFD Files	No	

Static Structural (A5)

TABLE 7
Model (A4) > Analysis

Object Name	<i>Static Structural (A5)</i>
State	Solved
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Environment Temperature	22. °C
Generate Input Only	No

TABLE 8
Model (A4) > Static Structural (A5) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	On

Define By	Substeps
Initial Substeps	50.
Minimum Substeps	50.
Maximum Substeps	1000.
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	No
Nonlinear Controls	
Newton-Raphson Option	Program Controlled
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	No
Contact Miscellaneous	No
General Miscellaneous	No
Store Results At	All Time Points
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	D:\desain ansys kombinasi load\Baru\Von-Mises Stress Analysis of Pipeline Free Span_files\dp0\SYS\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	Yes
Solver Units	Active System
Solver Unit System	nmm

TABLE 9
Model (A4) > Static Structural (A5) > Loads

Object Name	Internal Pressure (Pi)	External Pressure (Pe)	Axial Force (Seff)	Roll Support	Drag Force (Fd)	Pin Support	Submerged Weight without Steel (Wsub)
State	Fully Defined						
Scope							
Scoping Method	Geometry Selection						
Geometry	2 Faces	4 Faces			2 Faces	4 Faces	2 Faces
Definition							
Type	Pressure		Force	Displacement	Force	Displacement	Force
Define By	Normal To		Vector	Components			
Magnitude	1.96 MPa (ramped)	0.21573 MPa (ramped)	- 2.9382e+006 N (ramped)				

Suppressed	No				
Direction	Defined				
Coordinate System	Global Coordinate System				
X Component	0. mm (ramped)	-913.37 N (ramped)	0. mm (ramped)	0. N (ramped)	
Y Component	0. mm (ramped)	0. N (ramped)	0. mm (ramped)	-1105.9 N (ramped)	
Z Component	Free	0. N (ramped)	0. mm (ramped)	0. N (ramped)	

FIGURE 1
Model (A4) > Static Structural (A5) > Internal Pressure (Pi)

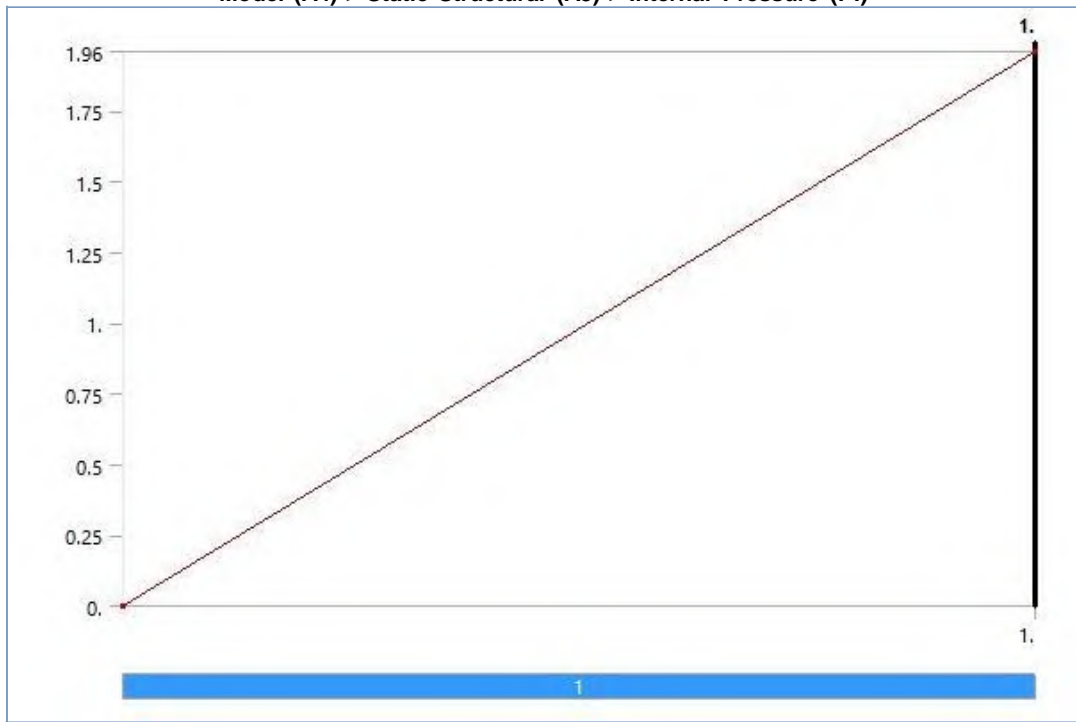


FIGURE 2
Model (A4) > Static Structural (A5) > External Pressure (Pe)

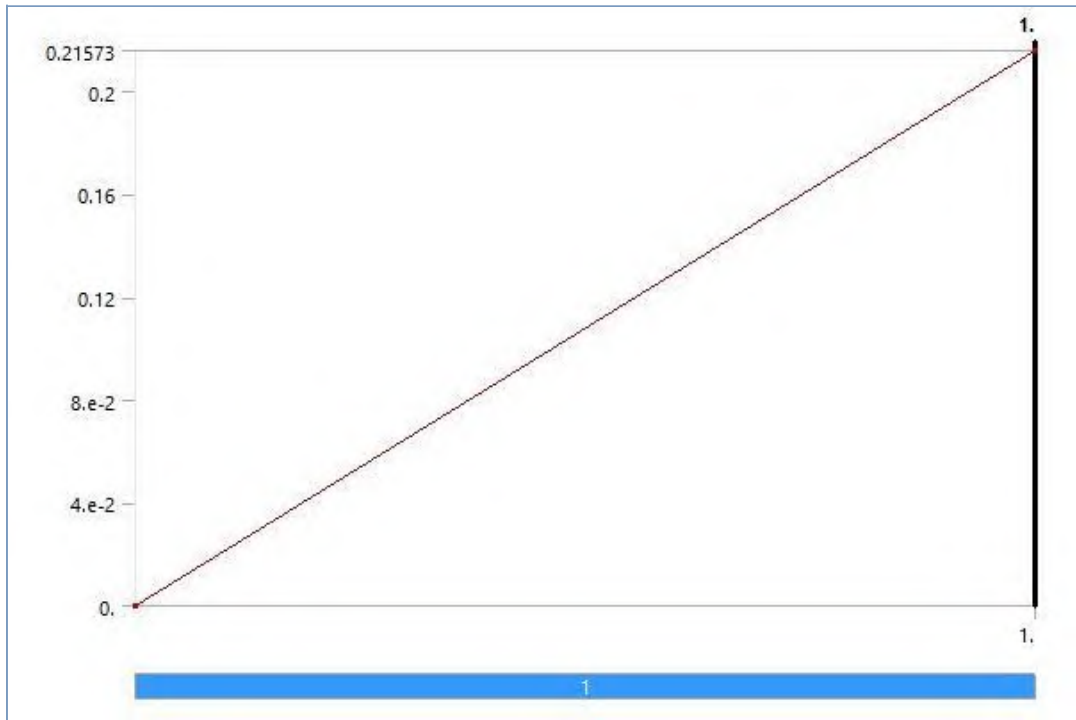


FIGURE 3
Model (A4) > Static Structural (A5) > Axial Force (Seff)

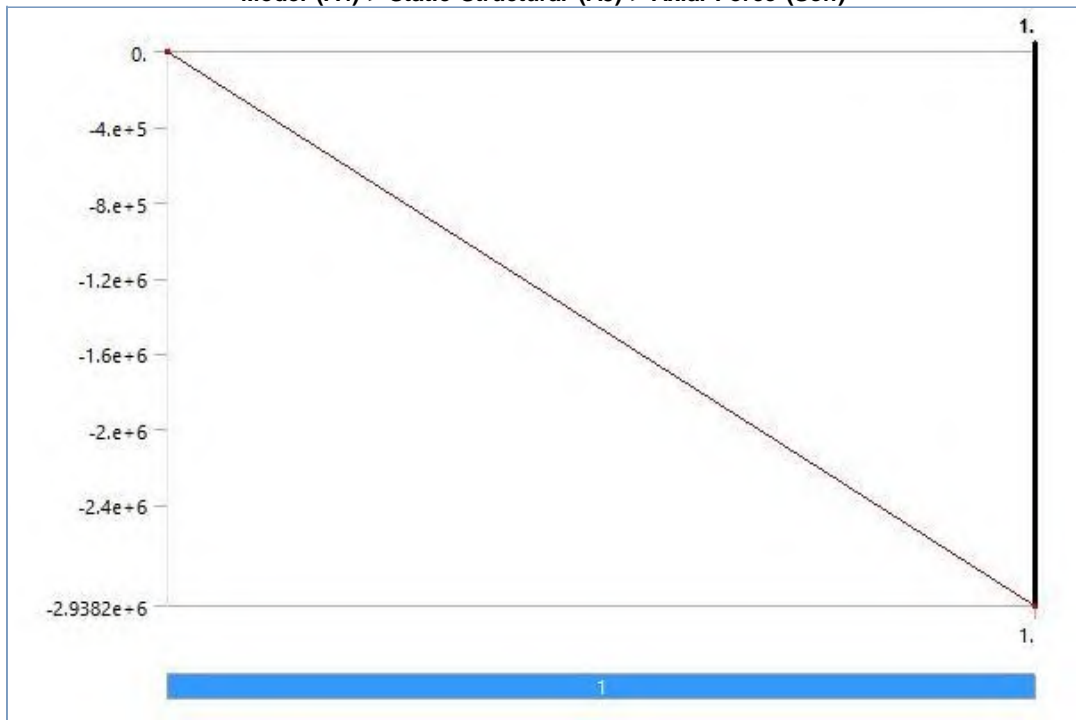


FIGURE 4
Model (A4) > Static Structural (A5) > Roll Support

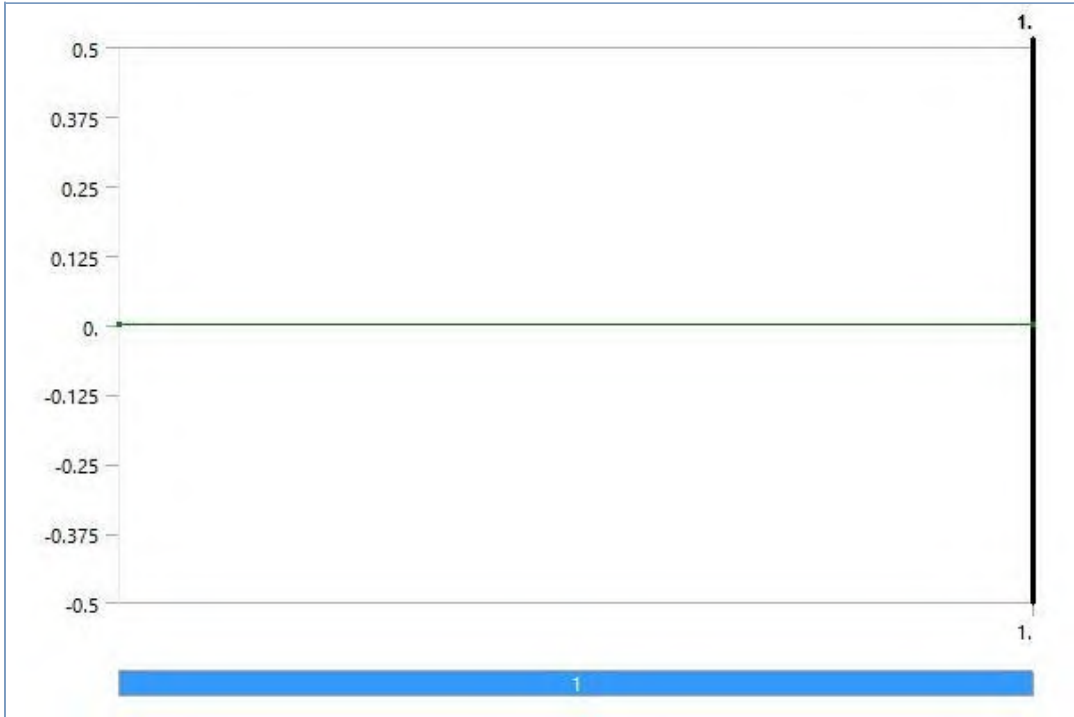


FIGURE 5
Model (A4) > Static Structural (A5) > Drag Force (F_d)

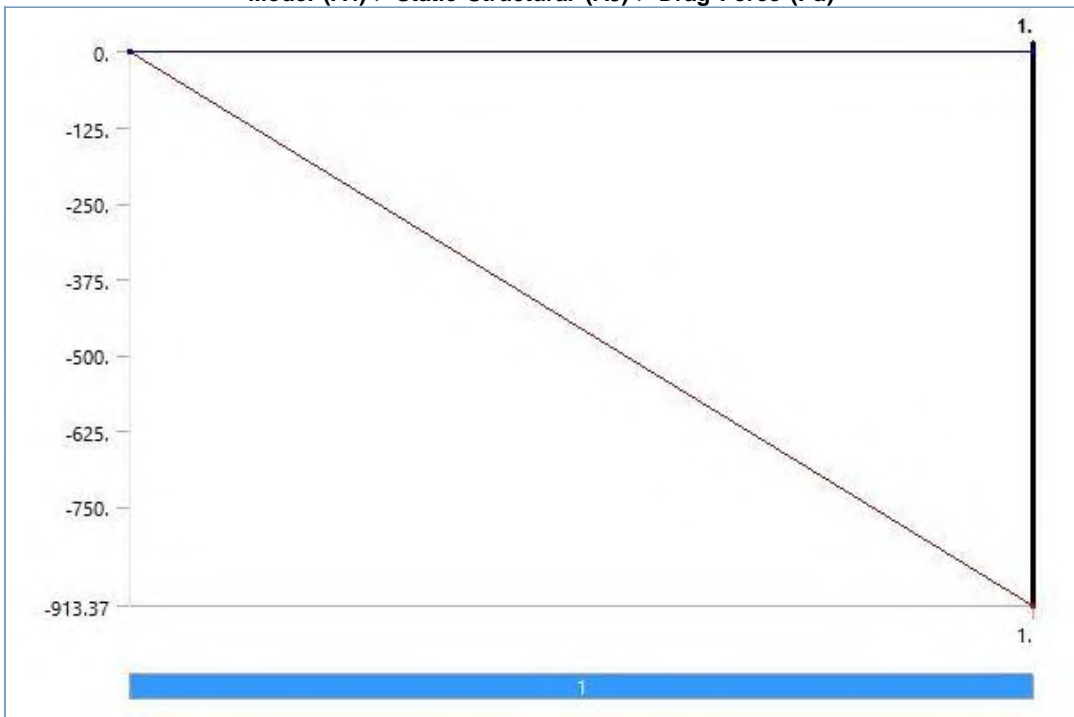


FIGURE 6
Model (A4) > Static Structural (A5) > Pin Support

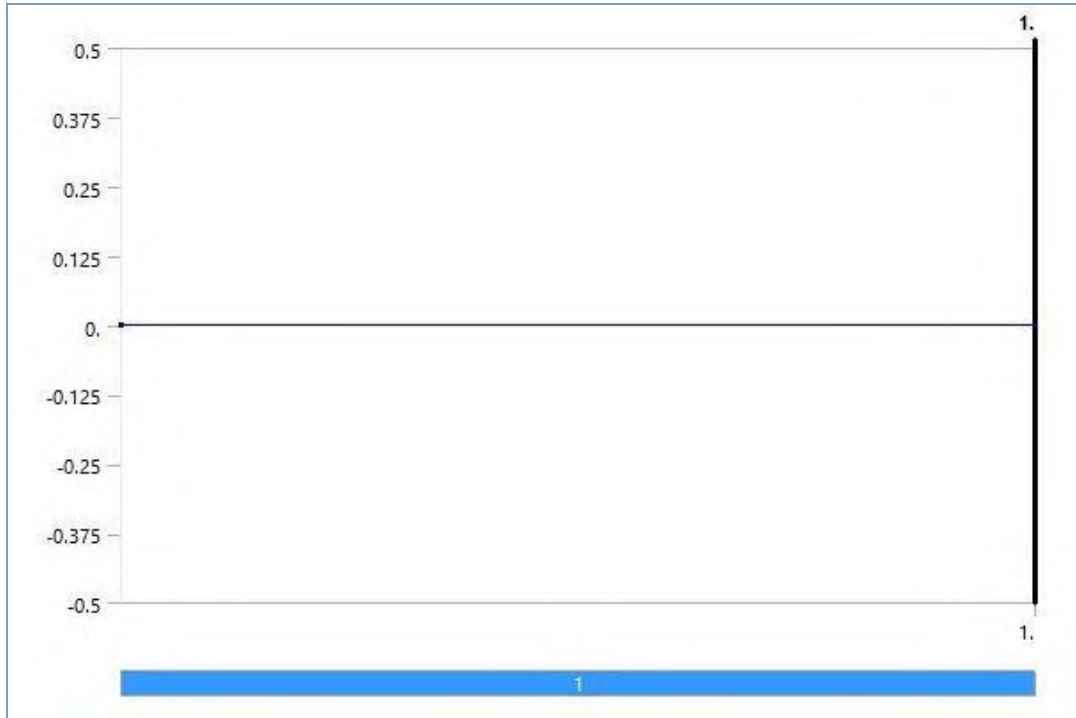
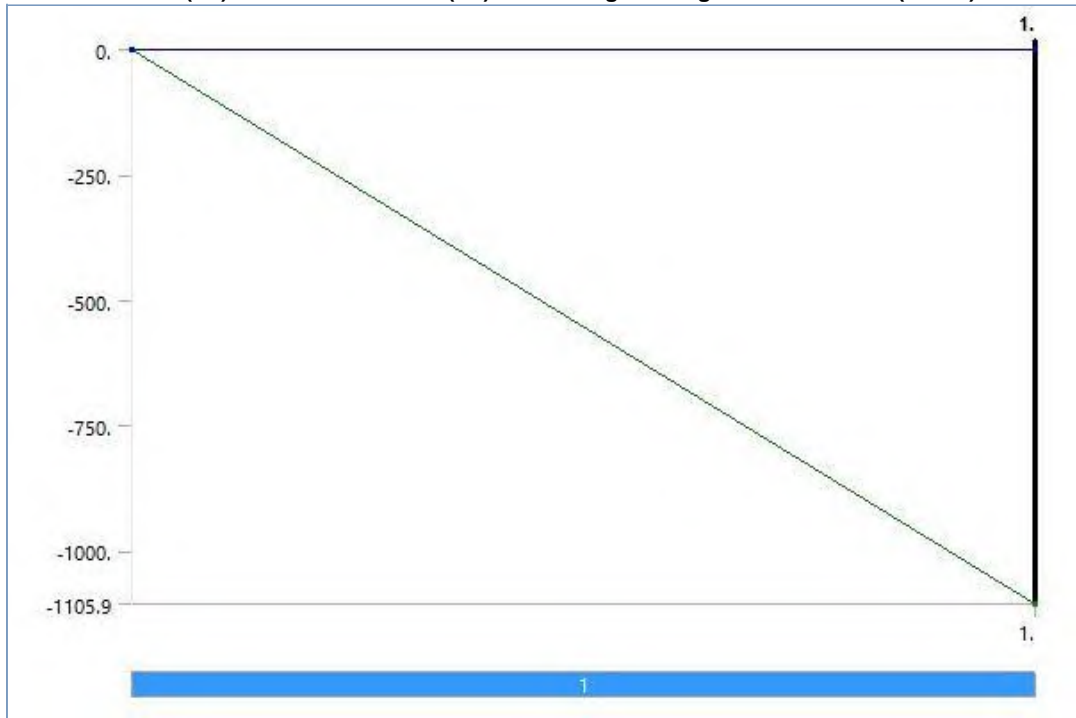


FIGURE 7
Model (A4) > Static Structural (A5) > Submerged Weight without Steel (Wsub)



Solution (A6)

TABLE 10
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution

Object Name	<i>Solution (A6)</i>
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1.

Refinement Depth	2.
Information	
Status	Done
Post Processing	
Calculate Beam Section Results	No

TABLE 11
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Force Convergence
Newton-Raphson Residuals	0
Update Interval	2.5 s
Display Points	All
FE Connection Visibility	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

FIGURE 8
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information

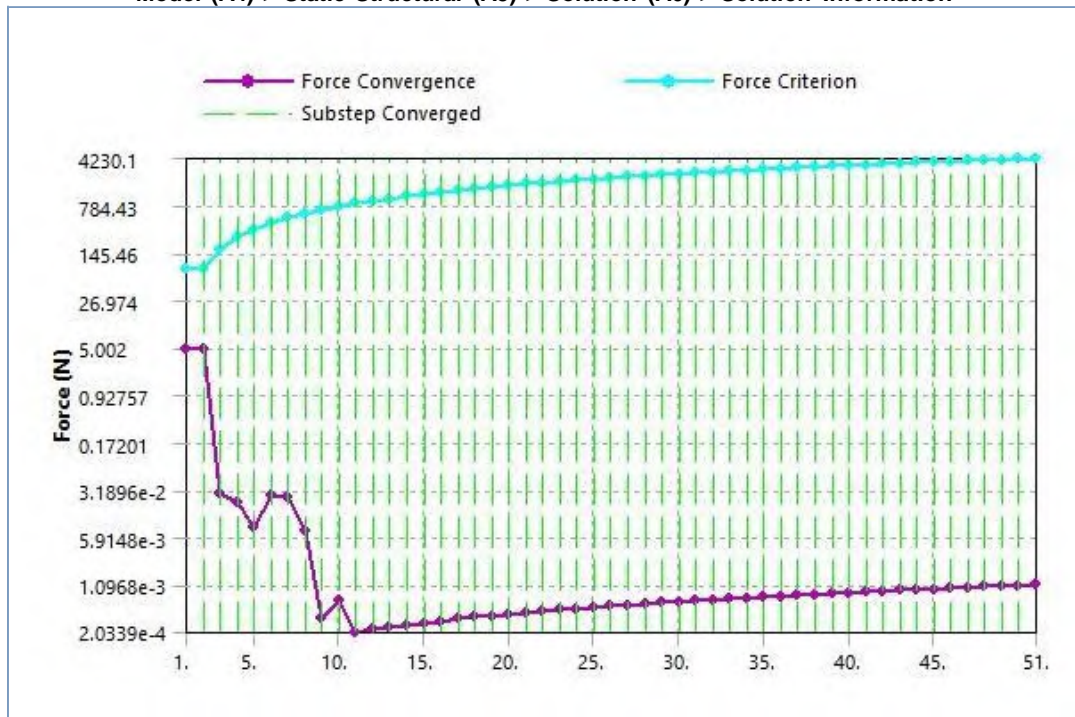


FIGURE 9
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information

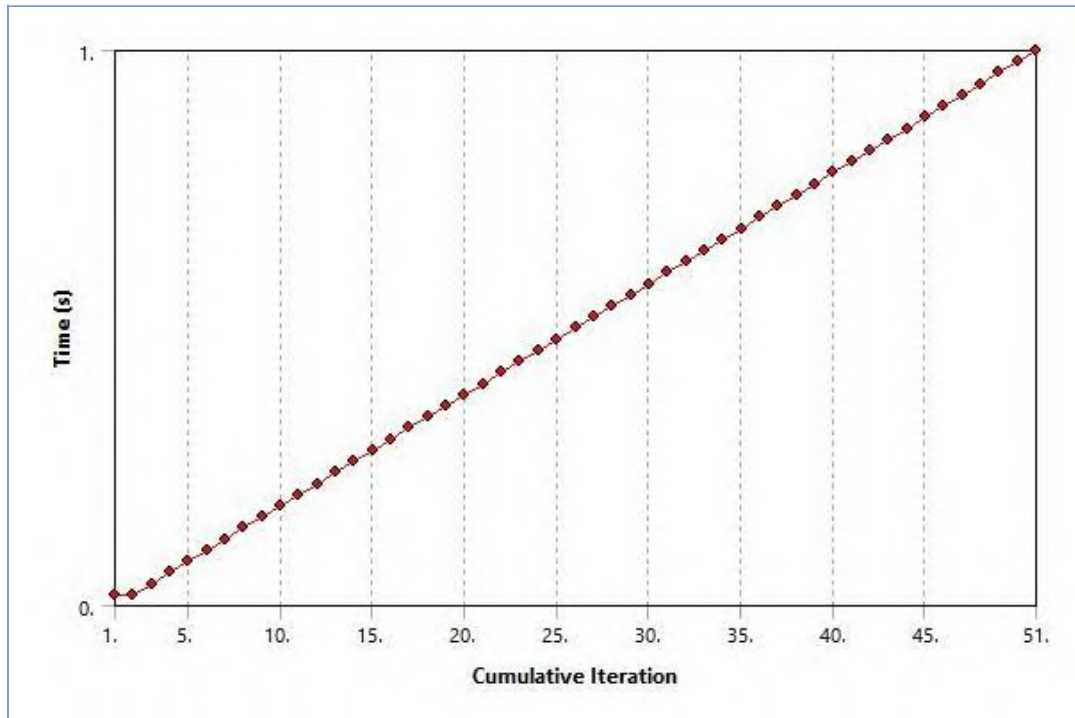


TABLE 12
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results

Object Name	<i>Equivalent Stress</i>
State	Solved
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
Results	
Minimum	40.133 MPa
Maximum	164.53 MPa
Minimum Value Over Time	
Minimum	0.80804 MPa
Maximum	40.133 MPa
Maximum Value Over Time	
Minimum	3.279 MPa
Maximum	164.53 MPa
Information	
Time	1. s
Load Step	1
Substep	50
Iteration Number	51

FIGURE 10
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress

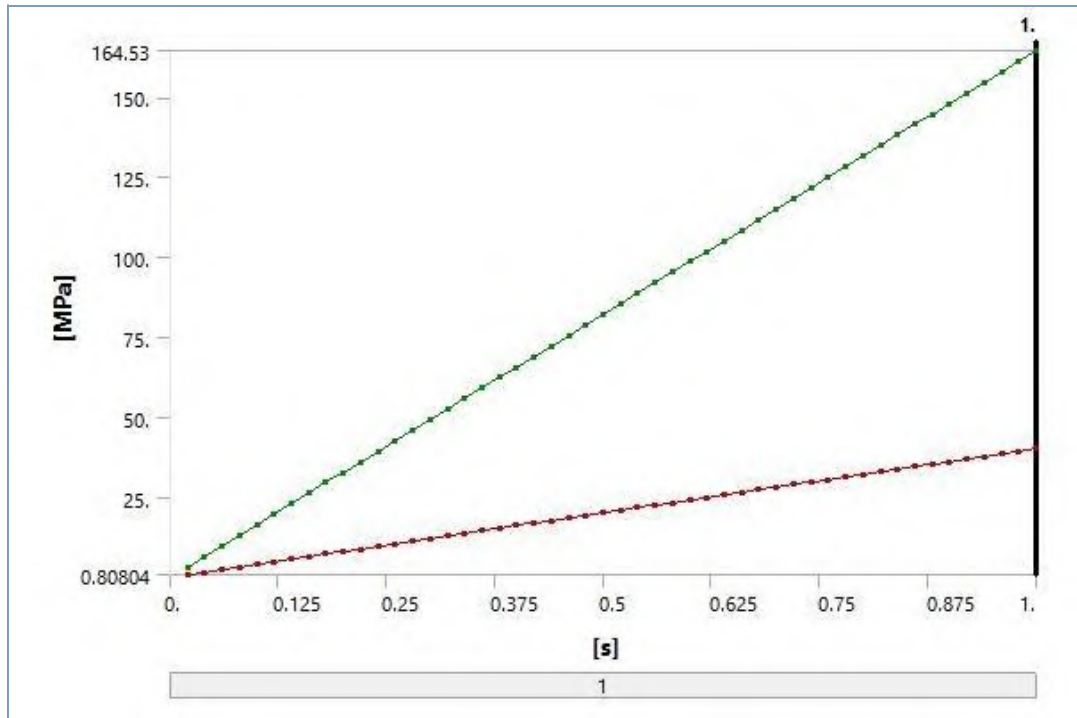


TABLE 13
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
2.e-002	0.80804	3.279
4.e-002	1.6159	6.5585
6.e-002	2.4236	9.8385
8.e-002	3.2311	13.119
0.1	4.0384	16.4
0.12	4.8455	19.681
0.14	5.6524	22.963
0.16	6.4592	26.245
0.18	7.2657	29.528
0.2	8.072	32.811
0.22	8.8782	36.095
0.24	9.6842	39.379
0.26	10.49	42.664
0.28	11.295	45.949
0.3	12.101	49.234
0.32	12.906	52.52
0.34	13.711	55.807
0.36	14.516	59.094
0.38	15.32	62.381
0.4	16.124	65.669
0.42	16.928	68.957
0.44	17.732	72.246
0.46	18.536	75.535
0.48	19.339	78.825
0.5	20.142	82.115
0.52	20.945	85.406
0.54	21.748	88.697
0.56	22.55	91.989
0.58	23.352	95.281
0.6	24.154	98.574
0.62	24.956	101.87
0.64	25.757	105.16

0.66	26.559	108.45
0.68	27.359	111.75
0.7	28.16	115.04
0.72	28.96	118.34
0.74	29.76	121.64
0.76	30.56	124.93
0.78	31.36	128.23
0.8	32.159	131.53
0.82	32.958	134.82
0.84	33.756	138.12
0.86	34.555	141.42
0.88	35.353	144.72
0.9	36.15	148.02
0.92	36.948	151.32
0.94	37.744	154.62
0.96	38.541	157.92
0.98	39.337	161.22
1.	40.133	164.53

Material Data

Structural Steel

TABLE 14
Structural Steel > Constants

Density	7.85e-009 tonne mm ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	1.1e-005 C ⁻¹
Specific Heat	4.34e+008 mJ tonne ⁻¹ C ⁻¹
Thermal Conductivity	6.05e-002 W mm ⁻¹ C ⁻¹
Resistivity	1.7e-004 ohm mm

TABLE 15
Structural Steel > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength MPa
460

TABLE 16
Structural Steel > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength MPa
360

TABLE 17
Structural Steel > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength MPa
360

TABLE 18
Structural Steel > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength MPa
460

TABLE 19
Structural Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

Reference Temperature C
50

TABLE 20
Structural Steel > Alternating Stress Mean Stress

Alternating Stress MPa	Cycles	Mean Stress MPa
------------------------	--------	-----------------

3999	10	0
2827	20	0
1896	50	0
1413	100	0
1069	200	0
441	2000	0
262	10000	0
214	20000	0
138	1.e+005	0
114	2.e+005	0
86.2	1.e+006	0

TABLE 21
Structural Steel > Strain-Life Parameters

Strength Coefficient MPa	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient MPa	Cyclic Strain Hardening Exponent
920	-0.106	0.213	-0.47	1000	0.2

TABLE 22
Structural Steel > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa
50	2.07e+005	0.3	1.725e+005	79615

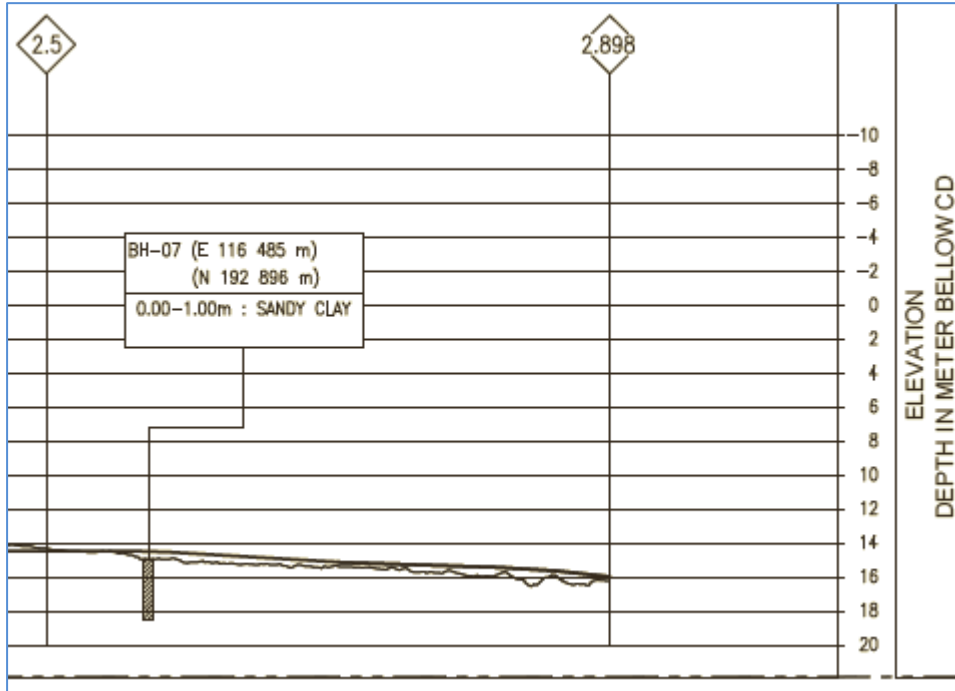
TABLE 23
Structural Steel > Isotropic Relative Permeability

Relative Permeability
10000

TABLE 24
Structural Steel > Bilinear Isotropic Hardening

Yield Strength MPa	Tangent Modulus MPa	Temperature C
360	0	

LAMPIRAN O
KONDISI DASAR LAUT KP 2.5 – KP 2.898



Gambar O.1. Dasar laut KP 2.5 – KP 2.898
(Sumber: PT Storindo Energi, 2014)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Setelah menyelesaikan analisis pembahasan, didapatkan beberapa kesimpulan yang menjawab rumusan masalah dalam tugas akhir ini diantaranya:

1. Nilai panjang *free span* maksimal yang diizinkan agar memenuhi kriteria frekuensi natural (DNV-RP-F105) adalah 17.55 m.
2. Nilai *bending moment* yang dihasilkan dari panjang *free span* 17.55 m adalah 164824.43 Nm, sedangkan untuk nilai *bending moment* maksimal yang masih diizinkan sesuai kriteria *local buckling* (DNV-OS-F101) adalah 382922.405 Nm.
3. Nilai panjang *free span* maksimal yang diizinkan agar memenuhi kriteria *local buckling* (DNV-OS-F101) adalah 21.83 m.

Dari beberapa panjang *free span* yang didapatkan, dipilih yang terpendek yaitu 17.55 m. Panjang tersebut kemudian dilakukan pengecekan dengan membandingkan tegangan *von-mises* yang dihasilkan (perhitungan manual dan *software*) dengan tegangan *buckling* kritis dan hasilnya masih lebih kecil dari tegangan *buckling* kritis. Sehingga hasil akhir untuk panjang *free span* maksimal yang diizinkan adalah 17.55 m. Jika panjang tersebut dibandingkan dengan panjang *free span* yang ada di lokasi rute pipa saat ini (saat pengambilan data *free span*), hasilnya adalah panjang *free span* yang ada masih lebih pendek dari batas maksimal yang diizinkan, sehingga tidak perlu untuk dilakukan evaluasi panjang *free span*.

5.2. Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan penulis untuk kegunaan penelitian selanjutnya, diantaranya:

1. Setelah melakukan *screening* frekuensi natural (DNV-RP-F105), analisis dapat dilanjutkan dengan melakukan perhitungan kelelahan *pipeline free span*.
2. Melakukan analisis *free span* dengan kondisi batas ujungnya adalah *fixed-fixed* atau *fixed-pinned*.
3. Jika ada data yang sesuai, dapat dilakukan analisis *free span* untuk jenis *multispan*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, Zenal. 2008. **Analisis *On-Bottom Stability* dan Instalasi Pipa Bawah Laut di Daerah *Shore Approach***. Tugas Akhir. Program Studi Teknik Kelautan, FTSL ITB.
- ANSYS. 2009. **Chapter 4: Static Structural Analysis. Training Manual**. ANSYS, Inc.
- ANSYS. 2013. **ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis Guide**. USA: ANSYS, Inc.
- Bai, Yong. 2003. **Marine Structural Design**. Oxford, UK: *British Library Elsevier*.
- Bai, Yong dan Bai, Qiang. 2014. **Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation**. Oxford, UK: *Gulf Professional Publishing Elsevier*.
- Bakhtiary, Abbas Yegeneh dkk. 2007. “*Analysis of Offshore Pipeline Allowable Free Span Length*”. **International Journal of Civil Engineering** 5 (Maret)
- Chakrabarti, Subrata K. 2005. **Handbook of Offshore Engineering. Vol 2**. Oxford, UK : Elsevier.
- Chen, Wen-Li dkk. 2015. “*An experimental investigation on vortex induced vibration of a flexible inclined cable under a shear flow*”. **Journal of Fluids and Structures** 54 : 297-311.
- Choi, H. S. 2000. “*Free spanning analysis of Offshore Pipelines*”. **Pergamon Journal of Ocean Engineering** 28 : 1325-1338.
- Djarmiko, Eko B. 2012. **Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak**. Surabaya : itspress.
- DNV-OS-F101. 2013. **Submarine Pipeline System. Offshore Standard**. Det Norske Veritas.
- DNV-RP-C205. 2010. **Environmental Conditions and Environmental Loads. Recommended Practice**. Det Norske Veritas.

- DNV-RP-F105. 2006. *Free Spanning Pipeline. Recommended Practice*. Det Norske Veritas.
- Dong, J dkk. 2015. “Local Buckling Analysis of Free Span for Submarine Pipeline”. *Procedia Engineering Elsevier* **130** : 408-413.
- Elshafey, Ahmed A. dkk. 2011. “Free spans monitoring of Subsea Pipelines”. *Ocean System Engineering* **1** : 59-72.
- Eton, Godwin. 2011. *An Innovative Approach to Increase Pipeline Stability on the Seabed. PhD Student’s PPT*. School of Civil Engineering, Faculty of Engineering. University of Leeds.
- Google Maps. 2016. *Google Maps. (Online)*. www.google.co.id/maps. (Diakses 24 February 2016).
- Guo, Boyun dkk. 2014. *Offshore Pipelines*. Edisi ke-2. Oxford, UK: *Gulf Professional Publishing Elsevier*.
- Indiyono, Paul. 2004. **Hidrodinamika Bangunan Lepas Pantai**. SIC, Surabaya.
- Kenny, J. P. dkk. 1993. *Structural Analysis of Pipeline Spans*. Sheffield : *Health and Safety Executive-Offshore Technology Information*.
- Khanifudin, Ibnu. 2015. **Analisis Ultimate Limit State (ULS) pada Free Span (Studi Kasus : South Sumatera-West Java Gas Pipeline Project Phase II Labuhan Maringgai-Muara Bekasi Offshore Pipeline)**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan FTK ITS, Surabaya.
- Koto, Jaswar dkk. 2014. “Local Buckling in End Expansion of Subsea Pipelines”. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)* **69** (7): 79-83.
- Lee, Jaeyoung. 2008. *Introduction to Offshore Pipelines and Risers*. Houston, Texas.
- Mathelin, L dan de Langre, E. 2005. “Vortex-induced vibrations and waves under shear flow with a wake oscillator model”. *European Journal of Mechanics B/Fluids* **24** (4) : 478–490.

- Orgill, G. dkk. 1992. “*Current Practice in Determining Allowable Pipeline free Spans*”. *Proc. 11th Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conf.*, June 7-11, Calgary, Canada, Pipeline Technology 5A : 139-145.
- Palmer, A. C., Martin, J.H. 1975. “*Buckle Propagation in Submarine Pipelines*”. *Nature* **254** : 46-48.
- PT Petro Storindo Energi. 2014. *Pipeline System Design Basis*. Dokumen Proyek 2591-EN-GR-BOS-1 Rev 0, No. Proyek : 13B1A29.
- PT Petro Storindo Energi. 2014. *Topographic, Bathymetric and Subsea Survey*. Dokumen Proyek 2591-EN-CEP-SUR-1 Rev 2, No. Proyek : 13B1A29.
- Ruby, Kristian dan Hartvig, Peres Akrawi. 2008. *Free-span Analyses of an Offshore Pipeline*. Master Project 2007-2008. Department of Civil Engineering, Aalborg University.
- Selker, Ruud. 2013. *Local Buckling Collapse of Marine Pipelines*. Msc thesis. Department of Maritime and Transportation Technology, Delf University of Technology.
- Sianturi, Fantri C. 2008. **Desain dan Analisa Instalasi Struktur Pipa Bawah Laut**. Tugas Akhir. Program Studi Teknik Kelautan, FTSL ITB.
- Soegiono. 2007. **Pipa Laut**. Surabaya : Airlangga University Press.
- Sumer, B. Mutlu dan Fredsøe, Jørgen. 2006. *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures*. Edisi Revisi. Singapore : World Scientific.
- Yaghoobi, Mehdi dkk. 2012. “*Determining natural Frequency of Free Spanning Offshore Pipelines by Considering the Seabed Soil Characteristic*”. *Journal of the Persian Gulf, Marine Science* **3** (June) : 25-34.
- Zhao, Z.H. dan Fernando, H.J.S. 2007. “*Numerical simulation of scour around pipelines using an Euler-Euler coupled two-phase model*”. *Environmental Fluid Mechanics* **7** : 121-42.
- Z-Subsea. 2013. *Free Span Assessment of Pipelines & Risers*.

BIODATA PENULIS



Hikmah Susetyo adalah nama lengkap dari penulis laporan tugas akhir ini. Penulis lahir pada tanggal 22 Februari 1995 di Dsn. Sumnyangan, Ds, Tanjungsari, Kec. Jogorogo, Kab. Ngawi yang juga merupakan alamat rumah penulis saat ini. Penulis merupakan anak pertama dari 2 bersaudara, dari pasangan Bapak Suwarto dan Ibu Soringatun. Penulis mengawali pendidikan formal di TK Dharmawanita, Ngawi, kemudian dilanjutkan di SDN Tanjungsari 3, Jogorogo, Ngawi. Setelah lulus dari sekolah dasar, kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 1 Jogorogo dan SMA Negeri 1 Jogorogo, Ngawi. Setelah lulus dari bangku SMA, penulis melanjutkan ke perguruan tinggi yaitu di Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui jalur Ujian Tulis SNMPTN khususnya Program Beasiswa Bidikmisi.

Di dalam dunia kampus, penulis juga aktif dalam berbagai kegiatan pelatihan, kepanitiaan dan organisasi. Beberapa pelatihan manajerial dan ilmu perkuliahan pernah diikuti oleh penulis diantaranya LKMM Pra-TD FTK-ITS, LKMM TD Teknik Kelautan FTK-ITS, LKMM TM FTK-ITS, dan beberapa pelatihan *software* yang digunakan di perkuliahan Teknik Kelautan. Untuk Kepanitiaan, penulis pada tahun 2015 diberi amanah sebagai Koordinator Sie Keamanan dan Perizinan untuk acara tahunan OCEANO 2014. Dalam hal organisasi, penulis juga pernah dipercaya menjadi Kepala Departemen Sosial Masyarakat di Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan (Himatekla) FTK ITS pada tahun kepengurusan 2014/2015.

Penulis sempat melakukan kerja praktek di PT. Dwisatu Mustika Bumi selama 2 bulan. Dari kerja praktek tersebut, penulis mendapatkan pengalaman tentang pipa bawah laut dan diberi kesempatan untuk observasi lapangan pada proyek instalasi pipa bawah laut di Sangatta, Kalimantan Timur. Pesan dari penulis adalah bahwa ilmu itu lebih berharga dari harta benda, ilmu itu bukan yang ditulis namun yang bermanfaat, jadi sebarkanlah ilmu untuk kebermanfaatannya dunia dan akhirat.

Email: hikmahsusetyo@gmail.com