TUGAS AKHIR – MO 184804

ANALISIS PENJADWALAN INSPEKSI PADA PIPA BAWAH LAUT YANG MENGALAMI BENTANGAN BEBAS MENGGUNAKAN METODE *RISK BASED INSPECTION* (RBI)

ABIZAR GIFFARI

NRP. 04311640000007

Dosen Pembimbing

Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D.

Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2019

FINAL PROJECT – MO 184804

ANALYSIS OF SCHEDULING INSPECTIONS ON FREE SPANNING SUBSEA PIPELINES USING RISK BASED INSPECTION (RBI)

ABIZAR GIFFARI

NRP. 04311640000007

Supervisors

Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D.

Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMENT OF OCEAN ENGINEERING

Faculty of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institut of Technology

Surabaya

2019

ANALISIS PENJADWALAN INSPEKSI PADA PIPA BAWAH LAUT YANG MENGALAMI BENTANGAN BEBAS MENGGUNAKAN METODE *RISK BASED INSPECTION* (RBI)

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 :

ABIZAR GIFFARI

NRP. 043 116 40000 007

Disetujui oleh :

1. Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D. (Pembimbing 1)
   .....
2. Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D. (Pembimbing 2)
   .....
3. Silvianita, S.T., M.Sc., Ph.D. (Penguji 1)
   .....
4. Dr. Eng. Shade Rahmawati, S.T., M.T. (Penguji 2)
   .....
5. Dr. Eng. Yeyes Mulyad, S.T., M.Sc. (Penguji 3)
   .....

ANALISIS PENJADWALAN INSPEKSI PADA PIPA BAWAH LAUT YANG MENGALAMI BENTANGAN BEBAS MENGGUNAKAN METODE *RISK BASED INSPECTION* (RBI)

Nama Mahasiswa : ABIZAR GIFFARI

NRP : 043 116 40000 007

Jurusan : Teknik Kelautan FTK -ITS

Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D

Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Jaringan pipa bawah laut PT. X terletak di utara Jawa Barat, yang mengaliri fluida gas alam dengan menggunakan pipa berukuran 16" sepanjang 19 Km. Dikarenakan Kontur dasar laut yang tidak merata mengakibatkan pipa mengalami permasalahan bentangan bebas. Hal ini menyebabkan jaringan pipa bawah laut terancam mengalami kegagalan kelelahan struktur akibat VIV dan local buckling. Dalam Tugas Akhir ini pipa bawah laut milik PT. X terdapat 136 bentangan bebas yang terjadi akibat permukaan dasar laut yang tidak merata. Sehingga perlu dilakukan screening untuk bentangan bebas pada pipa yang memiliki rasio L/D > 30 untuk mengetahui bentangan bebas mana yang tidak lolos screening, dan mengetahui tingkat risiko pipa bawah laut PT. X dalam menghadapi permasalahan bentangan bebas. Hasilnya untuk screening kelelahan akibat VIV, pipa yang mengalami bentangan bebas dengan panjang lebih dari 25 meter tidak lolos screening, sedangkan untuk local buckling terjadi pada bentangan bebas terpanjang, dengan panjang 62 meter. Untuk tingkat risiko pada kelelahan struktur akibat VIV memiliki nilai tertinggi dilihat daari segi bisnis dan lingkungan, yaitu pada kategori medium. Untuk tingkat risiko pada kegagalan local buckling untuk segi keamanan, lingkungan, dan bisnis berada pada katgori low.

Kata kunci : *free span, Risk Based Inspection, Subsea pipeline, VIV, Local buckling*

ANALYSIS OF SCHEDULING INSPECTIONS ON FREE SPANNING SUBSEA PIPELINES USING RISK BASED INSPECTION (RBI) METHOD

Name : **ABIZAR GIFFARI**

NRP : **043 116 40000 007**

Department : **Teknik Kelautan FTK -ITS**

Suvervisor : **Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D**

Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

The subsea pipeline of PT. X is located in the north of West Java, which overflows natural gas fluids using a 19-Km-sized pipe of 16". Due to the uneven seabed contour resulted in pipeline experiencing a free span problem. This causes the subsea pipeline to be threatened by a structural failure of fatigue due to VIV and local buckling. In this Final Task, the subsea pipeline of PT. X has 136 free spans that occurred due to uneven seabed. So it is necessary to do the screening for free spans on the pipes that has a ratio of L/D > 30, to figure out the free span where it doesn't pass screening, and know the risk level of the subsea pipeline of PT. X in the issue of free spans. The results of fatigue screening due to VIV, pipes are experiencing free spans with a length more than 25 meters doesn't pass the screening, while for local buckling occurs in the longest free span, with a length of 62 meters. The level of risk to structural failure caused fatigue due to VIV has the highest level in terms of business, namely in the high category. The level of risk to local buckling failures for safety, environmental, and business terms are in the low category.

Keywords: *free span, Risk Based Inspection, Subsea pipeline, VIV, Local buckling*

KATA PENGANTAR

Assalamualaiku Wr. Wb.

Puji syukur alhamdulillah penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan ramat hidayah dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini berserta laporanya, dengan cukup baik. Laporan Tugas Akhir ini berisi tentang tahapan proses dan hasil dari Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini berjudul "Analisis Penjadwalan Inspeksi Pada Pipa Bawah Laut yang Mengalami Bentangan Bebas Menggunakan Metode *Risk Based Inspection* (RBI)*".*

Tugas Akhir ini disusun dalam rangka memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan studi Kesarjanaan (S-1), di jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Tugas akhir ini membahas tentang mitigasi dan waktu inspeksi berkala menggunakan metode *Risk Based Inspection*.

Dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini, penulis memohon maaf jika terdapat kesalahan serta kekurangan. Untuk itu penulis memohon saran dan kritik sehingga analisis yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini menjadi lebih baik dan bermanfaat. Penulis berharap semoga laporan ini dapat bermanfaat, bagi pembaca dan penulis, dan penyempunaan analisis selanjutnya.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Surabaya, 26 Januari 2013

Penulis

UCAPAN TERIMAKASIH

Dalam Bagian ini penulis ingin mengucapan ungkapan terima kasih kepada beberapa pihak yang turut membantu kelancaran selama pengerjaan tugas akhir ini. Mungkin ucapan terima kasih ini tidak sebanding dengan apa yang mereka berikan. Namun penulis harap ini sebagai pembelajaran diri bagi penulis untuk selalu mengungkapkan rasa terima kasih untuk seluruh orang yang telah memberikan bantuan baik secara langsung dan tidak langsung untuk penulis. Beberapa pihak tersebut diantaranya:

1. Kepada Allah SWT, atas berkat, rahmat, dan anugerah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.
2. Kepada orang tua yang paling sempurna bagi saya, Ayahanda, Moch. Soheh dan Ibunda, Sri Rahayu . Terima kasih atas segala doa, kesabaran, bimbingan, kasih sayang, dukungan, kepercayaan, cinta, dan materil yang selalu diberikan dari saya kecil hingga sekarang ini. Terima kasih atas dedikasi penuh dan ikhlas selama mendidik saya sebagai seorang anak.
3. Kaka perempuan saya beserta suaminya yang saya sayangi. Nazila Aulia Az-zahra dan suaminya Bimasatya Mahendra , untuk apa yang telah diberikan selama ini. Terima kasih telah menjadi seorang panutan dan motivasi buat saya selain mama dan papa.
4. Bapak Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D dan Bapak Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D.,selaku dosen pembimbing Tugas Akhir ini, atas bantuan masukan, dukungan, dan ilmu yang sangat bermanfaat dalam mengerjakan dan Menyusun Tugas Akhir ini.
5. Seluruh Dosen, Karyawan, Tim tata usaha dan Administrasi Departemen Teknik Kelautan FTK ITS, yang telah memberikan ilmu, bantuan dan fasilitas kepada penulis selama menjalani perkuliahan.
6. Bapak Sujantoko, S.T., M.T., selaku dosean wali saya yang telah membantu dan mengarahkan selama saya berkuliab di Teknik Kelautan.
7. Terima kasih kepada Iftinaniffah Qonitah dan Ibudanya Afarina Hidayah yang telah memberikan dukungan, perhatian, dan kasih sayang kepada penulis.

8. Terima kasih untuk teman-teman satu kontrakan Bahsakara Selatan E-2 yang telah menjadi keluarga selama 3 tahun ini, selalu memberi kebahagiaan, bantuan, dan masukan untuk saya.
9. Terima kasih untuk teman-teman “Gerbong” karena telah memberikan bantuan, masukan, kebahagiaan, dan rasa pertemenana yang kuat selama ini.
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah turut berperan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

DAFTAR ISI

ABSTRAK iv

ABSTRACT v

KATA PENGANTAR vi

UCAPAN TERIMAKASIH vii

DAFTAR ISI ix

DAFTAR GAMBAR xiii

DAFTAR TABEL xiv

BAB I 1

PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 4

1.3 Tujuan 4

1.4 Manfaat 4

1.5 Batasan Masalah 5

1.6 Sistematika Penulisan Laporan 5

BAB II 7

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI 7

2.1 Tinjauan Pustaka 7

2.2 Dasar Teori 8

2.2.1. Bentangan Bebas 8

2.2.2. *Buckling* 9

2.2.3. Klasifikasi Respon Bentangan Bebas 13

2.2.4. Dimensi Pipa 13

2.2.5. Massa Efektif pipa 16

2.2.6. Berat terendam pipa 17

2.2.7. Beban Lingkungan 18
2.2.8. Gelombang 18
2.2.9. Arus 22
2.2.10. Kriteria Rasio Aliran Arus 23
2.2.11. Gaya Hidrodinamis 24
2.2.12. *Vortex Induced Vibration* 28
2.2.13. *Dynamic Soil Stiffness* 33
2.2.14. Frekuensi Natural Pipa 36
2.2.15. *Screening Fatigue Criteria* 41
2.2.16. Panjang Maksimum Bentangan bebas 42
2.2.17. *Rensponse Model* 42
2.2.18. *Bending Moment* 47
2.2.19. *Ultimate Limit State* 50
2.2.20. Mode Kegagalan 52
2.2.21. Analisis Keandalan *Monte Carlo* 52
2.2.22. Konsekuensi 53
2.2.23. Matriks Resiko 55
2.2.24. *Risk Based Inspection* 56
2.2.25. Metode Inspeksi 59
2.2.26. Mitigasi 61
BAB 3 64
METODOLOGI PENELITIAN 64
3.1. Diagram Alir 64
3.2. Prosedur Penelitian 66
3.3 Data Pipa dan Data Lingkungan 70
3.3.1 Data Pipa 71

3.3.2 Data Lingkungan 74
BAB IV 78
Analisis dan Pembahasan 78
4.1. *Screening* Klasifikasi Panjang Bentangan Bebas 78
4.2. Perhitungan Properti Pipa 79
4.2.1. Perhitungan massa efektif pipa 80
4.2.2. Perhitungan berat terendam pipa 81
4.3. Analisis Kecepatan Partikel Air 82
4.3.1 Perhitungan kecepatan arus pada pipa 82
4.3.2 Perhitungan kecepatan partikel air laut di pipa akibat gelombang 83
4.4. Analisis Parameter *Vortex Induced Vibration* 86
4.4.1 Current flow ratio 86
4.4.2 Stability parameter 88
4.4.3 Bilangan Keulegan-Carpenter dan Bilangan Reynolds 88
4.5. Analisis Gaya Hidrodinamis 90
4.5.1 Gaya *Drag* 90
4.5.1 Gaya angkat (*lift*) 92
4.6. Analisis Frekuensi Natural 93
4.6.1 *Effective Axial Force* 93
4.6.2 *Critical Buckling Load* 94
4.6.3 *Static Deflection* 94
4.6.4 Frekuensi Natural Pipa 96
4.7. Screening Kriteria VIV dan Kelelahan 97
4.8. Analisis *Response Model* 99
4.8.1 *In-line* 99
4.8.2 *Cross-flow* 101

4.9. *Screening* Kriteria Kelelahan 103
4.10. Analisa *Bending Moment* 104
4.9.1 *Bending* Momen Akibat Beban Fungsional 105
4.9.2 *Bending* Momen Akibat Beban Lingkungan 106
4.9.3 *Bending* Momen Total 107
4.11. *Ultimate Limit State check* 108
4.12. Evaluasi Panjang *Span* 110
4.13. Analisis Keandalan 111
4.14. *Risk Based Inspection* 113
4.15. Mitigasi 117
BAB V 118
Kesimpulan dan Saran 118
5.1. Kesimpulan 118
5.2. Saran 120
DAFTAR PUSTAKA 121
LAMPIRAN A 125
Screening Klasifikasi Bentangan Bebas bedasarkan Rasio L/D 125
LAMPIRAN B 127
Data pipa, *concrete coating*, *coatin* korosi. 127
Properti tanah, *safety factor, boundary condition,* data lingkungan 128
LAMPIRAN C 129
Perhitungan Angka Gelombang pada Masing-Masing Bentangan 129
Perhitungan *wave-induced velocity* 135
BIODATA PENULIS 161

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Ilustrasi Letak Jaringan Pipa 3
Gambar 2 Ilustrasi Jenis-Jenis span (Bai et al, 2014) 9
Gambar 3 General vs local buckling 10
Gambar 4 Lateral buckling atau biasa disebut bar buckling (Bai, 2014) 10
Gambar 5 Local buckling pada pipa yang mengalami bentangan bebas (Viotti, 2014) 11
Gambar 6 Collapse of pipes subject to combined bending and external pressure *(Kenny, 1993)* 12
Gambar 7 Propagation buckling 12
Gambar 8 Reduction factor akibat sudut datang gelombang dan sebaran gelombang (DNV GL RP F105, 2017) 21
Gambar 9 Faktor koreksi (DNV GL RP F105, 2017) 26
Gambar 10 Vortex Shedding (Bai, 2001) 28
Gambar 11 Vortex Induced Vibration (Mouselli, 1981) 29
Gambar 12 Regime Alirian Fluida Pada Silinder Halus (Lienhard, 1996 dalam Syahroni, 2018) 31
Gambar 13 Grafik hubungan turbulence intensity dengan reduction factor untuk masing-masing angle of attack (DNV GL RP F105, 2017) 44
Gambar 14 Grafik hubungan antara reduced velocity dengan respons amplitudo untuk kondisi in-line (DNV GL RP F105, 2017) 45
Gambar 15 Basic cross-flow response model (DNV GL RP F105, 2017) 46
Gambar 16 Matriks Resiko (DNV RP F116, 2016) 56
Gambar 17 Interval waktu inspeksi berdasarkan tingkatan resiko dalam matriks resiko (DNV RP 116, 2015) 58
Gambar 18 Bentuk-bentuk modifikasi pipa untuk mitigasi VIV (Blevins, dalam Bai et al, 2014) 62
Gambar 19 Diagram Alir Tugas Akhir (Lanjutan) 64
Gambar 20 Diagram Alir Tugas Akhir (Lanjutan) 65
Gambar 21 Diagram Alir Tugas Akhir (Lanjutan) 66
Gambar 22 Matriks resiko kegagalan VIV dan local buckling dalam berbagai segi konsekuensi 115

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Klasifikasi Respon Berdasarkan Ratio L/D (DNV GL RP F105, 2017). 13
Tabel 2 Parameter kekasaran dasar laut (DNV GL RP F105, 2017) 23
Tabel 3 Kriteria Rasio Aliran Arus terhadap respon pipa (DNV GL RP F105, 2017) 24
Tabel 4 Kekasaran Permukaan (DNV GL RP F105, 2017) 26
Tabel 5 Modal Soil Ratios for Sand (DNV GL RP F105, 2017) 32
Tabel 6 Modal Soil Ratios for Clay (DNV GL RP F105, 2017)..... 32
Tabel 7 Dynamic stiffness factor and stiffness for pipe-soil interaction in clay (DNV GL RP F105, 2017)..... 34
Tabel 8 Dynamic stiffness factor and Stiffness for pipe-soil interaction in sand (DNV GL RP F105, 2017)..... 35
Tabel 9 Tipikal geotechnical parameter untuk clay (DNV GL RP F105, 2017). 35
Tabel 10 Tipikal *geotechnical parameter* untuk pasir (DNV GL RP F105, 2017) 35
Tabel 11 Boundary condition coefficient (DNV GL RP F105, 2017) 39
Tabel 12 Safety factor untuk kriteria screening (DNV GL RP F105, 2017)..... 40
Tabel 13 Safety factor untuk parameter VIV (DNV GL RP F105, 2017) 40
Tabel 14 Faktor keamanan untuk frekuensi alami (DNV GL RP F105, 2017).... 41
Tabel 15 Load effect factor combinations (DNV OS F101, 2013) 48
Tabel 16 Faktor kondisi beban (DNV OS F101, 2013) 48
Tabel 17 Faktor Ketahanan Material (DNV OS F101,2013) 50
Tabel 18 Faktor keamanan resistance (DNV OS F101,2013)..... 51
Tabel 19 Deskripsi level konsekuensi segi keselamatan (DNV RP F116, 2015). 54
Tabel 20 Deskripsi level konsekuensi segi kerusakan lingkungan (DNV RP F116, 2015). 54
Tabel 21 Deskripsi level konsekuensi segi kerugian (DNV RP F116, 2015). 55
Tabel 22 Tingkatan peluang kegagalan (DNV RP F116, 2010) 57
Tabel 23 Confiedence factor dalam analisis (DNV RP F116, 2015) 58
Tabel 24 Development factor dalam analisis (DNV RP F116, 2015)..... 59

Tabel 25 Inspeksi berdasarkan kemampuan alat dan operator untuk jaringan pipa bawah laut (DNV RP F116, 2015)..... 59
Tabel 26 Kategori inspeksi pada jaringan pipa bawah laut (DNV GL RP F11, 2015) 60
Tabel 27 Desain data pipeline PT.X..... 71
Tabel 28 Data free span pada pipeline PT. X..... 72
Tabel 29 Data lingkungan pada rata-rata kedalaman 14 meter. 74
Tabel 30 Data lingkungan pada rata - rata kedalaman 23 Meter..... 75
Tabel 31 Hasil klasifikasi rasio panjang bentangan bebas terhadap diameter. 78
Tabel 32 Hasil perhitungan properti pipa. 79
Tabel 33 Hasil perhitungan massa pipa tanpa massa tambah..... 80
Tabel 34 Hasil perhitungan massa efektif pipa 80
Tabel 35 Hasil perhitungan berat terendam pipa..... 81
Tabel 36 Kecepatan arus di inner zone pada elevasi pipa. 82
Tabel 37 Data gelombang dan parameter JONSWAP kedalaman rata-rata 23 m.83
Tabel 38 Data gelombang dan parameter JONSWAP kedalaman rata-rata 14 m.84
Tabel 39 Perhitungan wave - induced velocity spectrum pada KP 0.78. 84
Tabel 40 Hasil perhitungan kecepatan aliran pada KP 0.78..... 85
Tabel 41 Kecepatan aliran partikel air di elevasi pipa. 86
Tabel 42 Perhitungan current flow ratio pada masing-masing bentangan bebas. 87
Tabel 43 Hasil perhitungan parameter stabilitas pada masing-masing bentangan bebas..... 88
Tabel 44 Hasil perhitungan bilangan Reynolds dan Bilangan Keulegan-Carpenter disekitar pipa. 89
Tabel 45 Hasil perhitungan koefisien drag..... 90
Tabel 46 Hasil perhitungan gaya drag pada masing-masing bentangan bebas. ... 91
Tabel 47 Hasil perhitungan gaya angkat pada pipa. 92
Tabel 48 Hasil perhitungan effective axial force pada masing-masing bentangan bebas..... 93
Tabel 49 Hasil perhitungan critical buckling load pada masing-masing bentangan. 94
Tabel 50 Hasil perhitungan static deflection untuk kondisi in-line..... 95

Tabel 51 Hasil perhitungan static deflection untuk kondisi cross-flow. 95
Tabel 52 Hasil Perhitungan frekuensi natural pipa untuk masing-masing bentangan bebas..... 97
Tabel 53 Hasil screening kriteria VIV kondisi ekstrim..... 98
Tabel 54 Hasil screening kriteria VIV untuk kondisi cross-flow..... 98
Tabel 55 Hasil Perhitungan parameter-parameter response model kondisi in-line pada masing-masing bentangan bebas. 100
Tabel 56 Hasil perhitungan stress range kondisi in-line. 101
Tabel 57 Hasil perhitungan response model untuk kondisi cross-flow..... 102
Tabel 58 Hasil perhitungan rentang tegangan yang terjadi kondisi cross-flow. 102
Tabel 59 Hasil screening kriteria kelelahan untuk masing-masing bentangan dan masing-masing kondisi. 103
Tabel 60 Hasil perhitungan Bending momen akibat beban fungsional..... 105
Tabel 61 Hasil perhitungan bending momen akibat beban lingkungan kondisi *in-line.*..... 106
Tabel 62 Hasil perhitungan bending momen untuk kondisi cross-flow..... 107
Tabel 63 Hasil perhitungan total bending moment yang terjadi pada pipa..... 108
Tabel 64 Hasil perhitungan dan screening local buckling..... 109
Tabel 65 Hasil perhitungan panjang span maksimum..... 110
Tabel 66 Hasil perhitungan jumlah support dan hasil screening L/D untuk span yang telah dievaluasi. 111
Tabel 67 Distribusi variabel acak 112
Tabel 68 Hasil simulasi metode Monte Carlo 113
Tabel 69 Perhitungan total gas alam. 114
Tabel 70 Total kerugian 115
Tabel 71 Interval waktu inspeksi berdasarkan tingkatan resiko yang terjadi..... 116
Tabel 72 keandalan pipa bawah laut PT. X setelah melakukan mitigasi 117

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jaringan pipa merupakan alat transportasi paling efektif dalam mengirim minyak, gas, air, dan bahan kimia (Dey dkk., 2004). Menurut sogieono (2007), penggunaan jaringan pipa bawah laut dapat mengurangi biaya transportasi hingga seperlima, dan jaringan pipa dapat mengirim hidrokarbon secara *real time.* Jaringan pipa juga alat transportasi yang sangat ramah lingkungan, namun sangat membahayakan untuk lingkungan sekitar jika terjadi kegagalan (Dey dkk., 2004).

Pada masa operasinya pipa bawah laut mengalami berbagai tantangan yang dapat mengakibatkan terganggunya proses pengiriman dan produksi hidrokarbon. Menurut Kriswidanto (2013), dalam proses desain pipa bawah laut masalah penting yang harus diperhatikan adalah kestabilan pipa pada saat berada di dasar laut. Pipa bawah laut juga harus memenuhi kriteria stabilitas secara vertikal maupun lateral agar melekat di dasar laut (Danendra, 2018). Selain masalah stabilitas pipa di dasar laut juga terdapat masalah lain yaitu akibat dari *profile* dasar laut yang tidak selalu rata dan mulus. Kontur permukaan dasar laut sama halnya dengan kontur permukaan di daratan, dimana terdapat perbedaan elevasi yang beragam. Hal ini dapat menyebabkan pipa bawah laut kehilangan daya dukung dari dasar laut, fenomena ini biasa disebut dengan bentangan bebas (*free span*). Bukan hanya kontur permukaan, namun bentangan bebas dapat terbentuk dari hasil gerusan arus laut disekitar pipa terutama dibagian bawah pipa, yang biasa disebut dengen *scouring* (Rahayu 2017).

Jaringan pipa bawah laut umunya memiliki panjang hingga puluhan kilometer dan dapat menghubungkan antar pulau. Dengan ukuran pipa yang sepanjang itu ditambah dengan kondisi dasar laut yang tidak merata mengakibatkan permasalahan bentangan bebas pada jaringan pipa tidak dapat dihindari. Bentangan bebas pada jaringan pipa bawah laut dapat

menimbulkan resiko kegagalan struktur berupa *buckling* dan kelelahan akibat vibrasi yang terjadi. Menurut Bai *et al* (2001), *local buckling* dapat terjadi ketika pipa bawah laut mengalami *combined pressure, longitudinal force* dan *bending.* Sedangkan kelelahan pada struktur pipa bawah laut dapat terjadi ketika frekeuensi aliran *vortex* yang terbentuk di sekitaran pipa mendekati frekuensi natural pipa itu sendiri. Vibrasi ini dapat mengakibatkan *fatigue damage* yang tidak dapat dibiarkan pada struktur (Yttervik dkk., 2003)

Menurut Hussen (2009), penjadwalan adalah pengalokasian waktu yang tersedia untuk melaksanakan masing-masing pekerjaan dalam rangka menyelesaikan suatu proyek hingga tercapai hasil optimal dengan mempertimbangkan keterbatasan-keterbasan yang ada. Sedangkan Inspeksi merupakan suatu kegiatan yang melakukan pemeriksaan pada suatu peralatan, atau sistem agar dapat bekerja secara efisien dan aman. Sehingga selama masa operasinya, penjadwalan inspeksi perlu dilakukan untuk mencegah kegagalan struktur yang mungkin akan terjadi. Menanggapi kondisi ini telah dikembangkan suatu metode inspeksi berbasis keandalan (*Risk Based Inspection*) dengan megidentifikasi kegagalan yang akan terjadi. Menurut (Rudiyanto 2014), *Risk Based Inspection* (RBI) adalah sebuah pendekatan sistematis tentang metode pengelolaan inspeksi atas peralatan atau unit kerja pada suatu sistem yang didasarkan pada tingkat resiko yang dimiliki.

Sebelumnya Syaroni (2018) dan Pratama (2018) telah melakukan Analisis umur kelelahan pada jaringan pipa bawah laut akibat fenomena *vortex induced vibration*. Untuk permasalahan *local buckling* dengan pendekatan ULS juga telah banyak yang melakukan analisis ini pada pengerjaan Tugas Akhir.seperti yang dilakukan Khanifudin (2015), Wahyuni (2018) dan Lomantoro (2018). Untuk studi keandalan *freespan* pada pipa bawah laut akibat fenomena *vortex induced vibration* telah dilakukan oleh Purnamasari (2010). Namun sayangnya kebanyakan dari analisis pada Tugas Akhir diatas tidak melakukan analisis lanjutan, dimana pipa yang beroperasi tersebut harus dilakukan inspeksi akibat adanya

bentangan bebas. Sehingga hasil analisis kegagalan struktur akibat adanya bentangan bebas dapat digunakan sebagai acuan penjadwalan inspeksi berbasis resiko.

Pada Tugas Akhir ini akan dilakukan analisis pada jaringan pipa bawah laut yang terdapat bentangan bebas untuk merencakan jadwal inspeksi berbasis resiko akibat *vortex induced vibration* dan *local buckling*. Data yang digunakan merupakan data jaringan pipa PT.X yang mengalirkan fluida gas dari Platform A ke Platform B. Jaringan pipa yang menghubungkan Platform A ke Platform B memiliki diameter 16 inch dengan panjang 19 km dan terdapat 136 bentangan bebas pada sepanjang jaringan pipa. Jaringan pipa ini terletak di laut Jawa disebalah utara Bekasi, untuk ilustrasi letak jaringan pipa akan ditampilkan pada Gambar 1 seperti dibawah ini.

Gambar 1 Ilustrasi Letak Jaringan Pipa

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan menjadi kajian dari tugas akhir ini adalah :

1. Bentangan bebas mana saja yang harus dikaji lebih jauh mengenai VIV dan *local buckling*?
2. Berapa keandalan pipa bawah laut PT. X untuk permasalahan VIV dan *local buckling*?
3. Bagaimana matriks resiko pipa bawah laut PT. X untuk permasalahan VIV dan *local buckling*?
4. Bagaimana rencana jadwal inspeksi pipa bawah laut PT.X menggunakan metode *risk based inspection*?
5. Apa mitigasi yang perlu dilakukan pada jaringan pipa bawah laut PT.X dan bentangan bebas pada pipa bawah laut PT. X yang tidak lolos *screening* kelelahan akibat VIV dan *Local buckling*?

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui dari sekian banyak bentangan bebas yang terjadi, bentagan bebas mana saja yang perlu dikaji lebih lanjut mengenai VIV dan *local buckling*.
2. Mengetahui keandalan pipa bawah laut PT.X untuk permasalahan VIV dan *local buckling*.
3. Mengetahui matriks resiko pipa bawah laut PT. X untuk permasalahan VIV dan *local buckling*.
4. Merencanakan jadwal inspeksi untuk pipa bawah laut PT. X dengan menggunakan metode *risk based inspection*.
5. Menyarankan bentuk mitigiasi yang perlu dilakukan untuk pipa bawah laut PT.X dan bentangan bebas yang tidak lolos *screening* kelelahan akibat VIV dan *local buckling*

1.4 Manfaat

Manfaat dari tugas akhir ini untuk mengetahui keandalan pipa bawah laut PT. X dalam menghadapi fenomena VIV dan *local buckling.* Kemudian

dengan mengetahui peluang kegagalan, dapat mengetahui matriks resiko akibat bentangan bebas pada pipa bawah laut PT. X dan nantinya dapat mengetahui jadwal inspeksi dengan menggunakan metode RBI. Dengan mengetahui bentangan bebas mana saja yang tidak lolos *screening* kelelahan akibat VIV dan *local buckling* maka adanya evaluasi panjang bentangan bebas, dan juga metode inspeksi sebagai salah satu cara mitigasi untuk meningkatkan keandalan pipa PT. X dalam menghadapi permasalahan bentangan bebas.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan sebagai batasan-batasan dalam tugas akhir ini akan disebutkan sebagai berikut:

1. Jenis bentangan bebas diasumsikan sebagai *single span.*
2. Analisis tegangan pipa, statis dan dinamis pada bentangan bebas hanya dilakukan pada kondisi operasi saja.
3. Pengaruh *scouring* dan *marine growth* diabaikan.
4. Aliran fluida didalam pipa dianggap *steady*.
5. Kondisi arus dalam keadaan steady
6. Aliran air laut yang mengenai pipa dianggap tegak lurus (90^0)
7. Tumpuan pada ujung-ujung bentangan bebas pipa diasumsukan sebagaian tumpuan (*pinned – pinned*)
8. Perhitungan lanjutan kondisi dinamis dan statis hanya dilakukan pada span-span yang ditinjau.
9. Tanah diasumsikan berjenis *very soft clay* dan homogen disepanjang jaringan pipa.
10. *Full fatigue analysis* tidak dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan Laporan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

Pada BAB I akan menjelaskan beberapa hal yang membuat analisis pada tugas akhir ini dilakukan, yaitu kondisi yang melatar belakangi

sehingga penelitian ini penting untuk dilakukan. Rumusan masalah yang menjadi permasalahan pada analisis dan perlu dijawab. Pencapaian yang digunakan untuk menawab permasalahan yang diangkat, manfaat yang diperoleh dari dilakukanya penelitian tugas akhir , dan batasan masalah yang menjadi batasan dari penelitian tugas akhir ini. Diakhir bab ini akan dijelaskan tentang gambaran dan sistematika laporan yang digunakan dalam tugas akhir ini.

Pada BAB II akan dijelaskan lebih lanjut tentang tinjauan pustaka dan dasar teori, sebagaimana tinjauan pustaka yakni penjelasan singkat hasil penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya yang menjadi acuan dari penelitian tugas akhir ini. Dasar teori berisi tentang tulisan dan cuplikan penemuan ilmu pengetahuan dari peneliti, persamaan – persamaan yang terkait, dan *code* yang digunakan dalam penelitian tugas akhir sebagai pedoman dalam analisis tugas akhir ini.

Pada BAB III akan menjelaskan langkah-langkah pengerjaan dlaam menyelesaikan tugas akhir ini, serta metode-meode yang digunakan di dalamnya. Menunjukan langkah-langkah sistematis dalam melakukan analisis statis maupun dinamis pada bentangan bebas, analisis mode kegagalan dan merencanakan inspeksi berbasis resiko. Serta akan ditampilkan data studi kasus yang digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

Pada BAB IV ini menjelaskan hasil perhitungan untuk analisis resiko dan perencanaan inspeksi berbasis resiko pada bentangan bebas.

Pada BAB V menjelaskan tentang kesimpulan dari tugas akhir, hasil dari analisis yang dilakukan, pembahasan yang telah dilakukan serta rekomendasi dan saran – saran penulis sebagai pertimbangan untuk keperluan penelitian selanjutnya.

Pada Daftar Pustaka berisi referensi yang digunakan dalam menyelesaikan permasalahan pada tugas akhir ini.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pada masa operasinya jaringan pipa bawah laut memerlukan analisis resiko kegagalan akibat bentangan bebas. Hal ini bertujuan untuk merencakan penjadwalan inspeksi. Inspkesi secara terjadwal dengan pendekatan berbasis resiko diperlukan guna mengurangi probabilitas kegagalan yang akan terjadi. Kegagalan yang umumnya terjadi disbebab kan oleh *vortex induced vibration* dan *local buckling.* Sebelumnya telah banyak yang membahas mengenai *vortex induced vibration* dan *local buckling* pada jaringan pipa yang terdapat bentangan bebas. Seperti yang telah dilakukan oleh Syahroni (2018), Pratama (2018) yang telah melakukan analisis umur kelelahan pipa bawah laut akibat fenomena *vortex induced vibration* pada pipa yang mengalami bentangan bebas. Analisis dilakukan dengan menganggap bentangan bebas yang terjadi merupakan tipe *single span,* dengan mengabaikan beban seismig dan *scouring*. Analisis ini hanya dilakukan tanpa memperhitungkan resiko kegagalan, hanya berhenti di umur kelelahan.

Untuk analisis *local buckling* telah banyak dilakukan seperti yang dilakukan Khanifuddin (2015), Wahyuni (2018) dan Lomantoro (2018) dalam Tugas Akhir. Analisis dilakukan dengan pendektan *Ultimate Limit State* dengan menggunakan *codes* DNV GL RP F105 (2017) dan DNV OS F101 (2013) untuk menghitung fenomena *local buckling*. Namun tugas akhir ini hanya mengecek menggunakan persamaan yang terdapat pada DNV OS F101.

Purnamasari (2010) telah melakukan studi keanadalan bentangan bebas pada pipa yang mengalami *vortex induced vibration.* Keandalan dicari dengan menggunakan metode simulasi *Monte-Carlo.* Dalam tugas akhir ini cukup baik dan detail dalam mencari keandalan. Shabani dkk. (2019) melakukan analisis probabilitas kegagalan struktur pada pipa yang

mengalami bentangan bebas dengan mempertimbangkan beberapa moda kegagalan yaitu *local buckling* dan VIV. Dengan berbagai variable acak yaitu tekanan, panjang bentangan, properti pipa, kekuatan material, kedalaman, arus, dan Kurva S-N. Analisis dilakukan dengan membandingkan dua metode yaitu monte carlo *simulation* dan *first order realibilit method* dan dapat dilihat untuk kedua metode menampilkan hasil yang hampir sama.

Namun analisis-analisis yang dilakukan tidak dilanjutkan dengan melakukan *risk assessment* dan RBI untuk hasil luaran yang dapat digunakan untuk acuan mitigasi agar permasalahan bentangan bebas dapat diatasi.

2.2 Dasar Teori

2.2.1. Bentangan Bebas

Secara definisi bentangan bebas merupakan fenomena ketika jaringan pipa bawah laut kehilangan kontak dengan *seabed*. Akibat kehilangan kontak dengan *seabed* menyebabkan jaringan pipa bawah laut kehilangan daya dukung dari tanah. Menurut DNV GL RP F105 (2017) *free span* dapat terjadi karena:

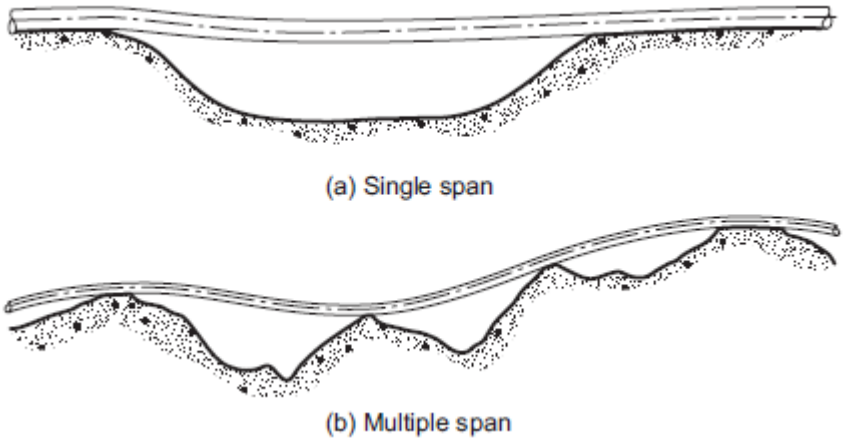
1. Permukaan dasar laut tidak merata.
2. Perubahan kontur dasar laut.
3. *Support* buatan.

Bentangan bebas dapat memberikan pengaruh besar terhadap keamanan dan integritas jaringan pipa saat beroperasi. Menurut Bai *et al* (2014), Jaringan pipa yang mengalami bentangan bebas harus mampu melawan:

1. *Excessive yield*
2. *Fatigue*
3. *Buckling*

Free span yang terjadi bukan hanya *single span* melainkan juga terdapat *multispan. Multispan* terjadi jika dua *span* yang berdekatan saling

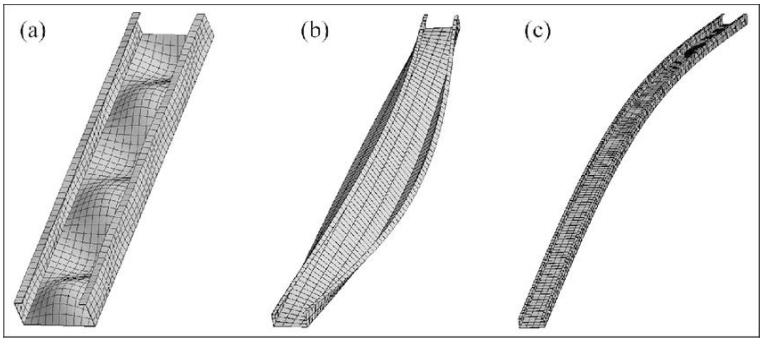
berinteraksi. Untuk Ilustrasi tipe *span* akan ditampilkan pada Gambar 2 dibawah ini



Gambar 2 Ilustrasi Jenis-Jenis span (Ba*i et al*, 2014)

2.2.2. *Buckling*

Secara umum ketika suatu member mengalami tegangan tarik (*tension*) dapat memperkuat matrial, namun berbeda ketika suatu member mengalami tegangan tekan (*compression*). Pada saat suatu member mengalami *compression* dapat menyebabkan tekukan secara plastis pada suatu material (*buckling*). Terdapat dua jenis *buckling* yang mungkin terjadi pada material baja, *general buckling* dan *local buckling* (Quimby, 2008). Karakteristik *general buckling* yaitu *member* baja mengalami distorsi atau deformasi plastis pada sumbu longitudinalnya. Sedangkan karakteristik *local buckling* sumbu longitudinal *member* baja tidak mengalami distorsi, namun sebagaian penampang suatu member mengalami deformasi plastis. Untuk lebih detailnya akan ditampilkan pada Gambar 3 seperti dibawah ini.

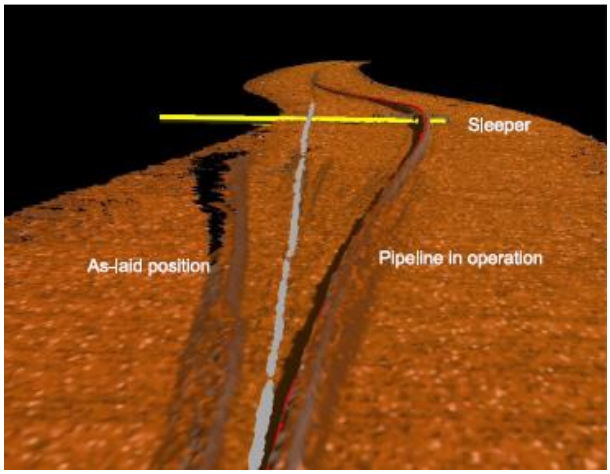


Gambar 3 *General vs local buckling*

(sumber : *https://www.researchgate.net/figure/Buckling-shapes-of-C-section-member-a-a-1000-mm-local-buckling-b-a-3750-mm_fig5_303397396*)

Pada Gambar 3 di atas (a) merupakan *local buckling*, (b) Torsional *buckling* (c) *global bending* atau *global buckling*. Menurut Kenny (1993), *buckling* dapat dibedakan berdasarkan penyebabnya yaitu:

- ***Axial compression*** pada pipa dapat membentuk lateral deformasi yang besar yang biasa disebut dengan *bar buckling*. Untuk ilustrasi *bar bucling* akan ditampilkan pada Gambar 4. Namun untuk *buckling* ini tidak terjadi pada pipa yang mengalami bentangan bebas. Untuk *buckling* yang disebabkan oleh *axial compression* saja, rasio D/t < 50 biasanya tidak akan terjadi berdasarkan dari eksperiment.



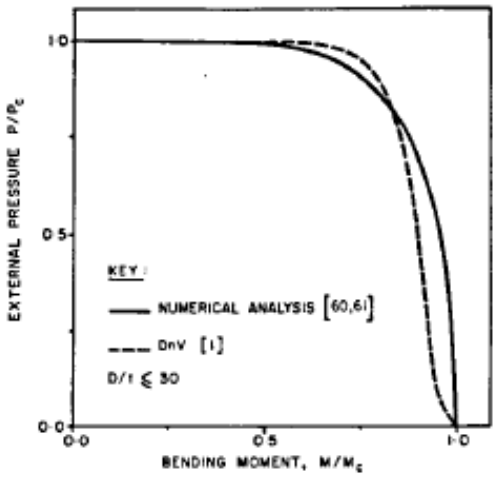
Gambar 4 *Lateral buckling* atau biasa disebut *bar buckling* (Bai, 2014)

- ***Pure bending*** merupakan salah satu penyebab *buckling* pada pipa bawah laut. Biasanya ini terjadi pada pipa yang mengalami bentangan bebas. Pipa dapat penyek (*collapse*) akibat momen maksimum yang disebabkan efek kombinasi ovalisasi dan sifat plastis, atau akibat *local buckling,* bergantung pada geometri pipa dan properti material. Untuk *local buckling* akan ditampilkan pada Gambar 5. Pada *buckling* yang disebabkan oleh *bending* saja, untuk rasio D/t < 25 berdasarkan dari eksperimen 95% pipa yang diuji memiliki nilai momen yang melebihi kapasitas *bending* material tersebut.

Gambar 5 *Local buckling* pada pipa yang mengalami bentangan bebas (Viotti, 2014)

- **Kombinasi tekanan eksternal*, bending,* dan *axial compression***

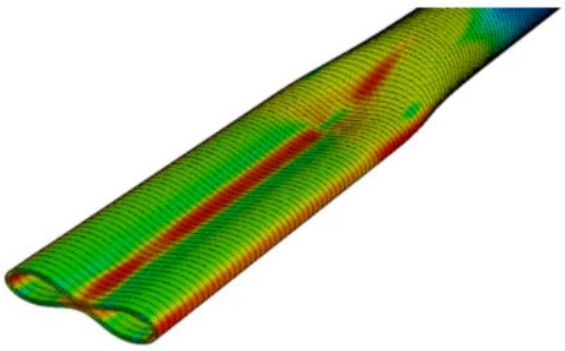
  Untuk pipa yang mengalami ini sesuai yang telah direkomendasikan DNV dengan menggunakan pendekatan teoritis untuk pipa yang memiliki rasio D/t < 30 akan ditampilkan pada Gambar 6 seperti dibawah ini.



Gambar 6 Collapse of pipes subject to combined bending and external pressure *(Kenny, 1993)*

- ***Propagation buckling***

  Untuk pipa bawah laut yang tidak mengalami *local buckling* atau tidak terdapat *defects* maka *propagation buckling* tidak perlu diperhitungkan. Hal ini dikarenakan tekanan yang dapat menyebabkan *buckle* selalu lebih rendah dari penyebab *local buckling* (Kenny, 1993). Namun, ketika kondisi kombinasi beban terjadi, dimana terdapat bending dan tekanan eksternal dan bending yang terjadi dapat menyebabkan *local buckle* maka tidak menutup kemungkinan akan terjadi *propagation buckling* yang disebabkan oleh tekanan eksternal. Untuk ilustrasi *propagation buckling* ditampilkan pada Gambar 7 seperti dibawah ini.



Gambar 7 *Propagation buckling*

(Sumber:https://youshouldknowoceanengineering.wordpress.com/2016/01/30/pipeline-buckling-and-collapse-checking-the-resistance/)

2.2.3. Klasifikasi Respon Bentangan Bebas

Panjang bentangan bebas dapat diklasifikasikan berdasarkan ratio panjang *free span* dengan diameter pipa. Ratio panjang *free span* dengan diameter pipa akan menunjukan respon yang akan terjadi. Menurut DNV GL RP F105 (2017) ratio panjang *free span* dengan diameter pipa dijadikan dalam 4 kelas seperti Tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1 Klasifikasi Respon Berdasarkan Ratio L/D (DNV GL RP F105, 2017)

L/D	*Response Description*
L/D < 30	**Amplifikasi respon dinamis sangat kecil** Biasanya tidak diperlukan analisis *fatigue limit state design check.* Respon dinamis yang terjadi dari beban lingkungan tidak signifikan, dan tidak mengalami *vortex induced vibration*
30 < L/D < 100	**Respon dinamis didominasi oleh *beam behaviour*** Tipikal panjang *span* untuk kondisi operasi. Frekuensi natural sensitive terhadap *boundary conditions* (dan *effective axial force*)
100 < L/D < 200	**Respons didominasi oleh kombinasi *beam* dan *cable behaviour.*** Relevan untuk *free span* di dasar laut yang tidak rata pada kondisi tertentu. Frekuensi natural sensitive terhadap *boundary conditions* dan *effective axial force* (termasuk *intial deflection,geometric stiffness*)
L/D > 200	**Respons didominasi oleh *cable behavior.*** Relevan untuk pipa berdiamter kecil pada kondisi tertentu.

2.2.4. Dimensi Pipa

Jaringan pipa bawah laut tidak hanya terdiri dari pipa baja saja, melainkan gabungan dari beberapa bagian yaitu pipa baja, lapisan anti korosi, dan selimut beton. Dimensi keseluruhan dari gabungan beberapa lapisan ini harus dihitung sebagai langkah awal dalam melakukan analisis

jaringan pipa bawah laut. Persamaan untuk menghitung dimensi pipa diuraikan pada persamaan 2.1 – 2.8 sebagai berikut :

a) Tebal dinding pipa

Tebal dinding pipa yang dimaksud adalah ketebalan pipa tanpa ada tambahan perlindungan korosi, Persamaan tebal dinding pipa dirumuskan dalam DNV OS F101 2013 pada Persamaan 2.1 sebagai berikut :

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

b) Diameter total pipa

Diameter total pipa merupakan diameter terluar jaringan pipa termasuk seluruh lapisan yang terdapat pada pipa. Diamter total pipa dirumuskan pada Persamaan 2.2 sebagai berikut:

$$D_t = D_s + 2t_{cc} + 2t_{conc} + 2t_{mg} \quad (2.2)$$

Dengan,

D_t = Diameter total pipa (m)

D_s = Diameter luar pipa baja (m)

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

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

t_{mg} = Tebal *marine growth* (m)

c) Diameter Dalam Pipa

Diameter dalam pipa merupakan suatu ukuran atau dimensi dimana nantinya fluida akan di alirkan didalam pipa. Perhitungan diameter dalam pipa akan ditampilkan pada Persamaan 2.3 sebagai berikut:

$$D_i = D_s - 2(t_{nom} + t_{int}) \quad (2.3)$$

Dengan,

D_i = Diameter dalam pipa (m)

t_{int} = Tebal lapisan anti-korosi internal (m)

d) Diameter Selimu Beton

Selimut beton merupakan lapisan terluar dari pipa. Lapisan beton berfungsi sebagai pemberat sekaligus pelindung untuk pipa didalamnya. Diameter selimut beton dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.4 seperti dibawah ini:

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

Dengan,

D_i = Diameter dalam pipa (m)

t_{int} = Tebal lapisan anti-korosi internal (m)

e) Diameter Lapisan Anti Korosi

Lapisan anti korosi merupakan lapisan yang bersentuhan langsung dengan pipa baja. Lapisan ini berfungsi untuk menutupi lapisan baja sehingga tidak terpengaruh oleh lingkungan sehingga dapat mengurangi laju korosi yang akan terjadi. Diamter lapisan anti korosi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.5 sebagai berikut:

$$D_{cc} = D_s + 2.t_{cc} \quad (2.5)$$

Dengan,

D_{cc} = Diamter lapisan anti korosi (m)

f) Momen Inersia Pipa Baja

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

Dengan,

I_{st} = Momen inersia pipa baja (m^4)

g) Momen Inersia Selimut Beton

$$I_{conc} = \pi \frac{(D_t^4 - D_{conc}^4)}{64} \quad (2.7)$$

Dengan,

I_{conc} = Momen Inersia Selimut Beton (m^4)

h) Luas Penampang Internal Pipa Baja

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

Dengan,

A_I = Luas penampang interal pipa baja (m^2)

i) Luas Penampang Pipa baja

$$A_{st} = \pi \frac{(D_s^2 + D_i^2)}{4} \quad (2.9)$$

Dengan,

A_{st} = Luas penampang baja (m^2)

2.2.5. Massa Efektif pipa

Massa efektif pipa merupakan massa keseluruhan pipa termasuk massa struktur pipa, massa konten pipa, dan massa tambah. Menurut Bai (204) massa efektif dapat dihitung dengan Persamaan 2.10, dengan asumsi pipa mengalami osilasi dan *vortex dhedding* terjadi disepanjang pipa. Persamaan 2.10 untuk menghitung massa efektif akan ditampilkan seperti dibawah ini:

$$m_e = m_{str} + m_c + m_a \qquad (2.10)$$

Dengan,

m_a = Massa tambah pipa (Kg/m)

m_{str} = Massa struktur pipa (Kg/m)

m_c = Massa konten pipa (Kg/m)

m_e = Massa Efektif pipa (Kg/m)

Untuk lebih detailnya cara perhitungan massa struktur pipa, massa konten pipa, massa tambah pipa akan dijelaskan pada Persamaan 2.11 – 2.17 seperti dibawah ini.

a) Massa Struktur Pipa

Massa struktur pipa merupakan hasil perjumlahan dari semua bagian yang terdapat pada pipa termasuk selimut beton, lapisan anti korosi, dan pipa baja. Untuk lebih detailnya akan dijelaskan pada persamaan 2.10 – 2.13:

$$m_{str} = m_{st} + m_{cc} + m_{conc} \qquad (2.11)$$

$$m_{st} = A_{st} \cdot \rho_{st} \qquad (2.12)$$

$$m_{cc} = \pi \frac{\left(D_{cc}^2 - D_0^2\right)}{4} \rho_{cc} \qquad (2.13)$$

$$m_{conc} = \pi \frac{\left(D_{wc}^2 - D_0^2\right)}{4} \rho_{conc} \qquad (2.14)$$

Dengan.

m_{str} = Massa struktur pipa (Kg/m)

m_{st} = Massa pipa baja (Kg/m)

m_{cc} = Massa lapisan anti korosi (Kg/m)

m_{conc} = Massa selimut beton (Kg/m)

ρ_{st} = Massa Jenis baja (Kg/m^3)

ρ_{cc} = Massa jenis lapisan anti korosi (Kg/m^3)

ρ_{conc} = Massa jenis selimut beton (Kg/m^3)

b) Massa Konten Pipa

$$m_c = A_i \,.\, \rho_c \tag{2.15}$$

Dengan,

ρ_c = Massa jenis konten pipa (Kg/m^3)

c) Massa Tambah Pipa

$$M_a = \frac{\pi}{4} D_t^2 \rho_w \,.\, C_a \tag{2.16}$$

Dengan,

ρ_w = Massa jenis air laut (Kg/m^3)

C_a = Koefisien massa tambah

Untuk koefiesien massa tambah sesuai yang diatur DNV GL RP F105 (2017) koefisien massa tambah dapat ditentukan dengan Persamaan 2.16 sebagai berikut

$$C_a = \begin{cases} 0.68 + \frac{1.6}{1+5\left(\frac{e}{D_t}\right)} & Untuk\ \left(\frac{e}{D_t}\right) < 0.8 \\ 1 & Untuk\ \left(\frac{e}{D_t}\right) > 0.8 \end{cases} \tag{2.17}$$

Dengan,

e/D_t = Rasio gap *span*

e = kedalaman *span* (m)

2.2.6. Berat terendam pipa

Berat pipa saat di dalam air dan di udara berbeda. Hal ini disebabkan ketika berada di dalam air terdapat gaya vertikal ke atas yang biasa disebut dengan gaya apung. Sehingga berat terendam pipa akan lebih ringan dibandingkan saat berada di darat. Persamaan untuk menghitung berat terendam pipa ditampilkan pada Persmaan 2.18 sebagai berikut:

$$W_{sub} = (m_{st} + m_{cc} + m_c + m_{wc}).g - F_b \tag{2.18}$$

Dengan,

F_b = Gaya apung (N/m)

Untuk lebih detailnya, gaya apung akan dijelaskan pada Persamaan 2.19 dan 2.20 sebagai berikut:

$$F_b = m_{disp} \cdot g \quad (2.19)$$

$$m_{disp} = \frac{\pi}{4} Dt^2 \cdot \rho_w \quad (2.20)$$

Dengan,

M_{disp} = Massa air yang dipindahkan (Kg/m)

2.2.7. Beban Lingkungan

Beban lingkungan merupakan beban yang terbentuk akibat interaksi pipa dengan lingkungan disekitarnya. Beban lingkungan yang memberikan efek besar dalam analisis bentangan bebas yaitu beban yang diakibatkan oleh arus, gelombang, dan tekanan hidrostatis. Akibat gelombang dan arus merupakan variable yang memiliki nilai sangat beragam dan acak, maka nilai yang digunakan berupa periode ulang. Periode ulang merupakan data statistik yang menggambarkan rerata suatu data yang telah terjadi dan mungkin akan terjadi lagi kedepanya.

2.2.8. Gelombang

Gelombang laut dikondisi riil nya tidak lah selalu sama nilainya dan benar-benar variable acak yang sulit untuk diprediksi secara pasti dan tidak memiliki pola linear. Untuk gelombang acak dalam kurun waktu pendek dapat dijelaskan dalam pendekatan *spectra* gelombang JONSWAP seperti yang telah dianjurkan pada DNV GL RP F105 (2017). Spektra gelombang JONSWAP menurut Djatmiko (2012), spektra gelombang ini hasil modifikasi dari spectra P-M, dengan memasukan parameter-parameter yang akan mengakomodasi karakteristik gelombang peraritan tertutup, atau kepulauan. Maka dari itu penggunaan spektra JONSWAP cocok untuk perairan di Indonesia dimana seperti yang kita ketahui perairan Indonesia

merupakan perairan tertutup, atau kepulauan. Berikut Persamaan 2.21 mengenai spectra gelombang JONSWAP:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha . \ g^2 . \omega^{-5} . \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) . \gamma^{\exp(-0.5(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma.\omega_p})^2)} \qquad (2.21)$$

Dengan,

$S_{\eta\eta}$ = Spektra gelombang JONSWAP

α = Konstanta *generalized phillips*

ω = Frekuensi gelombang (rad/s)

γ = *Peak-enhancement factor*

ω_p = Frekuensi puncak gelombang (rad/s)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

σ = Parameter lebar spektra

Persamaan 2.22 mengenai konstanta *Generalized Philip* yaitu,

$$\alpha = \frac{5}{16} \frac{Hs^2 \omega p^4}{g^2} (1 - 0{,}287 \ln \gamma) \qquad (2.22)$$

Dengan,

H_s = Tinggi gelombang signifikan (m)

Persamaan 2.23 mengenai paramarter lebar spektra

$$\sigma = \begin{cases} 0{,}07 & jika \ \omega \leq \omega p \\ 0{,}09 & Jika \ \omega > \omega p \end{cases} \qquad (2.23)$$

Persamaan 2.24 mengenai *peak-enhancement factor* yang digunakan yaitu :

$$\gamma = \begin{cases} 5{,}0 & \varphi < 3{,}6 \\ \exp(5{,}75 - 1{,}15\,\varphi) , 3{,}6 < \varphi < 5{,}0; \ \varphi = \frac{Tp}{\sqrt{Hs}} \\ 1{,}0 & \varphi \geq 5{,}0 \end{cases} \qquad (2.24)$$

Setelah itu, spektrum kecepatan yang terinduksi gelombang pada ketinggian pipa dapat dihitung dengan mentransformasikan spektra

gelombang dipermukaan air laut menggunakan teori gelombang orde pertama ditampilkan pada Persamaan 2.25 sebagai berikut:

$$SUU\ (\omega) = G^2(\omega)\ .\ S\eta\eta\ (\omega) \qquad (2.25)$$

Dengan,

$G\ (\omega)$ = *frequency transfer function from sea surface elevation to wave-induced flow velocities at pipe level*

Persamaan 2.26 akan menjelaskan perhitungan *transfer function* seperti dibawah ini:

$$G^2(\omega) = \frac{\omega\ \cosh(k(D+e))}{\sinh(k.h)} \qquad (2.26)$$

Dengan, nilai k diiterasi dari Persamaan 2.27 *transcendental* sebagai berikut:

$$k\,.\,h = \frac{\omega^2\ h}{g}\ \coth(k.\,h) \qquad (2.27)$$

Dengan,

ω = Frekuensi gelombang (rad/s)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

k = Angka gelombang

h = Kedalaman perairan (m)

Kecepatan aliran di luar pipa yang diakibatkan oleh gelombang signifikan pada elevasi pipa (U_s) dan *mean zero-up crossing* dari osilasi aliran pipa (T_u) dijelaskan pada Persamaan 2.28 dan persamaan 2.29:

$$U_s = 2\sqrt{M_0} \qquad (2.28)$$

Dengan

M_O = Momen Spektra orde pertama

$$T_u = 2\ \pi\ \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \qquad (2.29)$$

Dengan,

M_2 = Momen spektra orde ke-2

T_U = *Mean zero-up crossing period*

M_0 dan M_2 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.30 dengan mengintegrasikan spektra momen ke-n sebagai berikut:

$$M_n = \int_0^\infty \omega_n \; S_{UU}(\omega) \; d(\omega) \qquad (2.30)$$

Kecepatan aliran gelombang signifikan akan mengalami penurunan yang diakibatkan oleh arah dan persebaran gelombang. Pada DNV GL RP F105 (2017) kecepatan aliran gelombang normal pada pipa pengaruh sebaran gelombang akan dijabarkan pada Persamaan 2.31 sebagai berikut:

$$U_W = U_s \, . \, R_D \qquad (2.31)$$

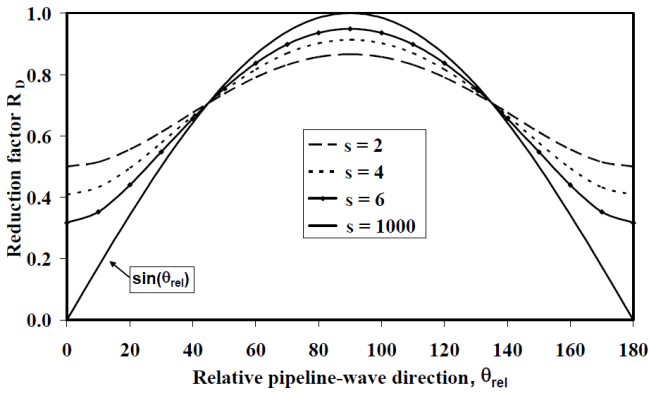
Dengan,

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

U_s = Kecepatan arus akibat gelombang (m/s)

R_D = Faktor reduksi, akibat efek arah dan sebaran gelombang

Menurut DNV GL RP F105 (2017) perhitungan faktor reduksi akibat efek arah dan sebaran gelombang dapat menggunakan grafik seperti yang diberikan NORSOK N-003. Grafik faktor reduksi akan ditampilkan pada Gambar 8 seperti dibawah ini.



Gambar 8 *Reduction factor* akibat sudut datang gelombang dan sebaran gelombang (DNV GL RP F105, 2017)

2.2.9. Arus

Arus yang terjadi di *free span level* biasanya terdiri dari berbagai arus, Menurut DNV GL RP F105 (2017) gabungan arus yang terjadi biasanya terdiri dari:

1. *Tidal current.*
2. *Wind induced current* diabaikan pada Tugas Akhir ini.
3. *Storm surge induced current* diabaikan pada Tugas Akhir ini.
4. *Density driven current* diabaikan pada tugas akhir ini.

Arus pada kedalaman lebih dari 100 m, arus memiliki dua karakteristik yang berbeda yaitu, *driving agent* dan *steering agent.* Arus yang memiliki karakteristik sebagai *driving agent* adalah arus pasang surut, gradien tekanan akibat elevasi permukaan atau perubahan densitas, angin dan gaya *storm surge*. Sedangkan untuk arus yang memiliki karakteristik sebagai *steering agent* adalah arus yang terjadi akibat topografi dan rotasi bumi. Aliran yang disebabkan oleh arus dapat dibagi menjadi dua berdasarkan zonasinya yaitu:

1. ***Outer zone***

   Outer zone terletak jauh dari dasar laut, dimana rata-rata kecepatan arus dan turbulensi aliran berada tidak jauh dari arah horizontal. *Outer zone* terletak berada diatas suatu dasar laut yang membentuk puncak. Sedangkan untuk dasar laut yang rata *outer zone* terletak kira-kira 3600 Z_0 dimana Z_0 adalah parameter kekasaran dasar laut lihat pada Tabel 2.

2. ***Inner zone***

   Inner zone terletak tidak jauh dari dasar laut dimana rata-rata kecepatan arus dan turbulensi aliran menunjukan variasi yang signifikan dari arah *horizontal.* Pada *inner zone* kecepatan aliran fluida dianggap logaritmik karena tidak terdapat pemisah arus, Menurut DNV GL RP F105 (2017) kecepatan aliran fluida di *inner zone* dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.32 sebagai berikut:

   $$U_c = R_c \, . \, U(z_r) \frac{(\ln(z) - \ln(z_0))}{(\ln(z_r) - \ln(z_0))} \qquad (2.32)$$

   Dengan,

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

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

R_c = Faktor reduksi kecepatan arus

$R_c = sin\ (\theta_{rel})$ (2.33)

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

Z = Elevasi diatas dasar laut

$Z = e + \frac{D_t}{2}$ (2.34)

Z_r = Elevasi referensi (m)

Z_0 = Parameter kekasaran dasar laut (untuk nilai parameter sesuai DNV GL RP F105 (2017) ditampilkan pada Tabel 2)

Tabel 2 Parameter kekasaran dasar laut (DNV GL RP F105, 2017)

Seabed	*Roughness z_0 (m)*
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	$\approx 4 \cdot 10^{-2}$

2.2.10. Kriteria Rasio Aliran Arus

Kriteria rasio aliran arus mengelompokan arus yang terjadi berdasarkan penyebab arus terbentuk. Dalam DNV GL RP F105 (2017) rasio aliran arus dapat diperhitungkan dengan menggunakan Persamaan 2.35 sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{U_{c100tahun}}{U_{w,1tahun} + U_{c100tahun}} \quad (2.35)$$

Dengan,

U_c = Kecepatan arus (m/s)

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

Pada DNV GL RP F105 (2017) rasio aliran arus dikelasifikasikan menjadi 3 berdasarkan *flow regimes* untuk menjelaskan penyebab dominan pada aliran arus. Untuk lebih lanjut akan dijelaskan pada Tabel 3 sebagai berikut.

Tabel 3 Kriteria Rasio Aliran Arus terhadap respon pipa (DNV GL RP F105, 2017)

$\alpha < 0.5$	**Gelombang dominan.** **Arah *In-line* :** Pembebanan pada arah *in-line* dapat diperhitungkan menggunakan persamaan Morison's. *vortex induced vibration* arah *in-line* akibat *vortex shedding* dapat diabaikan. **Arah *cross-flow* :** Pembebanan pada arah *cross-flow* biasanya terjadi akibat ketidak simetrisan *vortex shedding.*
$0.5 < \alpha < 0.8$	**Gelombang dominan.** **Arah *in-line* :** Pembebanan pada arah *in-line* dapat diperhitungkan menggunakan persamaan Morison's. *Vortex induced vibration* pada arah *in-line* terjadi akibat *vortex shedding* berkurang akibat adanya gelombang **Arah *cross-flow* :** Pembebanan pada arah *cross-flow* terjadi akibat ketidak simterisan *vortex shedding* dan dan menyerupai kondisi dimana didominasi oleh arus.
$\alpha > 0.8$	**Arus dominan.** **Arah *in-line* :** Pembebanan arah *in-line* terdiri dari beberapa komponen: - *Steady drag* mendominasi komponen pembebanan - Komponen *oscillatory* akibat dari *regular vortex shedding* **Arah *cross-flow* :** Pembebanan arah *cross-flow* bersifat siklik dan disebabkan oleh *vortex shedding*.

2.2.11. Gaya Hidrodinamis

Pipa bawah laut akan menerima gaya hidrodinamis akibat interaksi pipa bawah laut dengan lingkungan yaitu gelombang dan arus laut. Gaya hidrodinamis yang dialami jaringan pipa bawah laut terdiri dari gaya *drag*, gaya inersia, dan gaya *lift.*

1. Gaya *Drag*

Menurut Bai *et al* (2014), gaya *drag* (geser) disebabkan oleh kecepatan arus yang stabil, dimana kecepatan aliran dipengaruhi oleh arus dan gelombang . Gaya geser terjadi akibat adanya perbedaaan tekanan antara didepan pipa (tempat dimana arus menubruk permukaann pipa) dan dibelakang pipa (tempat dimana terjadinya *vortex*). Untuk persamaan gaya *drag* akan ditampilkan pada Persamaan 2.36 sebagai berikut:

$$F_D = \frac{1}{2}\rho_w . D_t . C_D . (U_W + U_C)^2 \quad (2.36)$$

Dengan,

F_D = Gaya *drag* (N/m)

ρ_w = Densitas air laut (Kg/m^3)

D_t = Diameter total pipa (m)

C_D = Koefisien *drag* pipa

U_W = Kecepatan Aliran akibat gelombang (m/s)

U_C = Kecepatan Aliran akibat arus (m/s)

Untuk nilai koefisien *drag* dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.37 seperti yang terdapat pada DNV GL RP F105 (2017) sebagai berikut:

$$C_D = C_D^0 \left(\frac{k}{D_t}\right) . \Psi_{KC,a}^{CD} \Psi_{proxi}^{CD} \Psi_{trench}^{CD} \Psi_{VIV}^{CD} \quad (2.37)$$

Dengan penjelasan lebih lanjut untuk masing-masing parameter untuk menghitung koefisien *drag* akan dijelaskan dibawah ini.

Untuk koefisien *drag* dasar merupakan koefisien yang menggambarkan kekasaran permukaan pipa. Untuk koefisien *drag* dasar akan dijelaskan dalam Persamaan 2.38 sebagai berikut:

$$C_D^0 \left(\frac{k}{D_t}\right) = \begin{cases} 0{,}65 & ; \frac{k}{Dt} < 10^{-4} \quad (smooth) \\ 0{,}65\left(\frac{29}{13} + \frac{4}{13}\log 10\ (\frac{k}{D_t})\right) & ; 10^{-4} < \frac{k}{D_t} < 10^{-2} \\ 1{,}05 & ; \frac{k}{D_t} < 10^{-2} \end{cases} \quad (2.38)$$

Dengan,

k = Kekasaran permukaan (Tabel 5)

Tabel 4 Kekasaran Permukaan (DNV GL RP F105, 2017)

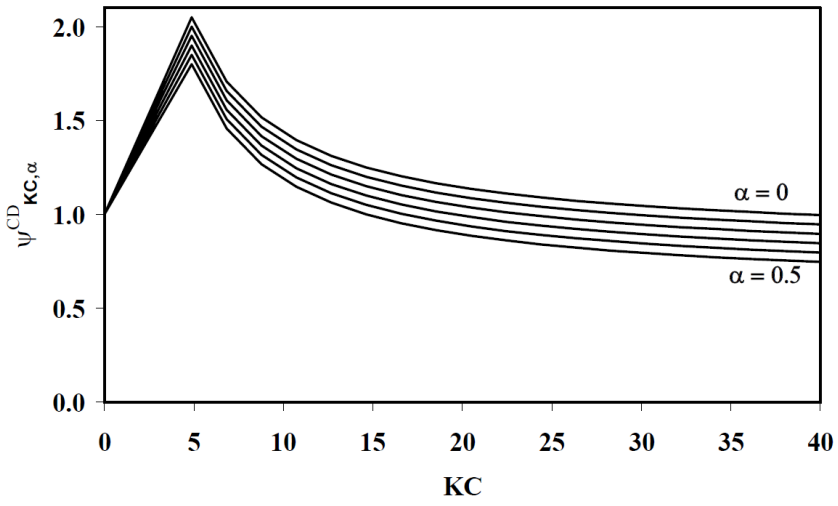
Permukaan Pipa	*k (metres)*
Steel, painted	10^{-6}
Steel, un-coated (not rusted)	10^{-5}
Concrete	1/300
Marine Growth	1/200 < k < 1/20

Untuk faktor koreksi diperhitungkan untuk mempertimbangkan efek *unsteadiness* aliran, termasuk efek Keulegan-Carpenter dan rasio aliran arus. Untuk faktor koreksi ($\Psi_{KC,\alpha}^{CD}$) akan dijelaskan dalam Persamaan 2.39 sebagai berikut:

$$\Psi_{KC,\alpha}^{CD} = \begin{cases} 0{,}85 + \frac{6}{KC} - \frac{\alpha}{2} & ;\ \alpha \leq 0{,}5 \\ & 5 < KC < 40 \\ 0{,}6 + \frac{6}{KC} & ;\quad \alpha > 0{,}5 \end{cases} \qquad (2.39)$$

Untuk nilai faktor koreksi dengan nilai Keulugan-Carpenter (KC) lebih dari 40, ketentuan 6/KC di persamaan harus disubtitusi dengan 0.15. sedangkan untuk nilai 5 < KC < 4 dapat menggunakan grafik pada Gambar 9 seperti dibawah ini.:

Gambar 9 Faktor koreksi (DNV GL RP F105, 2017)



Untuk parameter faktor koreksi yang memperhitungkan jarak dasar laut dari pipa (*gap height*) akan dijelaskan dalam Persamaan 2.40 sebagai berikut:

$$\Psi_{proxi}^{CD} = \begin{cases} 0{,}9 + \frac{0{,}5}{1+5\frac{e}{D_t}} - \frac{\alpha}{2} & ; untuk\ \frac{e}{Dt} \leq 0{,}8 \\ 1 & ; Lainya \end{cases} \quad (2.40)$$

Dengan,

e = *gap height* (jarak pipa kedasar laut) (m)

Ψ_{proxi}^{CD} = Faktor koreksi *gap height*

Untuk parameter faktor koreksi yang mempertimbangkan efek dari pipa yang dipendam didalam parit buatan akan dijelaskan dalam Persamaan 2.41 sebagai berikut:

$$\Psi_{trench}^{CD} = 1 - \frac{2}{3} . \frac{\Delta}{D_t} \quad (2.41)$$

Dengan,

$\frac{\Delta}{D_t}$ = kedalaman relatif parit

Untuk faktor tambahan yang dikarenakan pipa mengalami amplifikasi akibat getaran *cross-flow* akan dijelaskan dalam Persamaan 2.42 sebagai berikut :

$$\Psi_{VIV}^{CD} = 1 + 1.043 \left(\sqrt{2}\frac{A_Z}{D_t}\right)^{0.65} \quad (2.42)$$

Dengan,

$\frac{A_Z}{D_t}$ = *Normalised cross-flow VIV amplitude*

2. Gaya *Lift* (angkat)

Gaya angkat terjadi karena perbedaan dan kecepatan pada bagian atas dan bawah pipa. Menurut Bai *et al* (2014), keberadaan dasar laut menyebabkan ketidak simetrisan antara alira diatas pipa dan dibawah pipa. Fluida yang memiliki kecepatan yang tinggi menyebabkan

tekanan pada fluida tersebut menurun, dan sebaliknya. Kasus pada pipa dimana aliran fluida diatas pipa memiliki kecepatan aliran arus yang lebih cepat dibandingkan dibawah pipa (pengaruh dasar laut). Hal ini mengakibatkan tekanan fluida diatas pipa lebih kecil dibandingkan tekanan fluida dibawah pipa. Hal tersebut menyebabkan terciptanya gaya angkat, untuk perhitungan gaya angkat akan dijelaskan pada Persamaan 2.43 sebagai berikut:

$$F_L = \frac{1}{2}. \rho_w \, . \, D_t \, . \, C_L \, . \, (U_W + U_C)^2 \qquad (2.43)$$

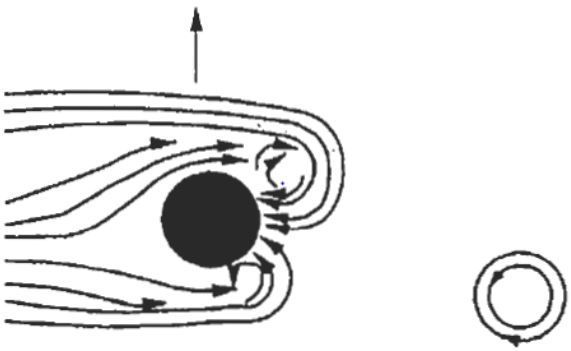
Dengan,

F_L = Gaya angkat (N/m)

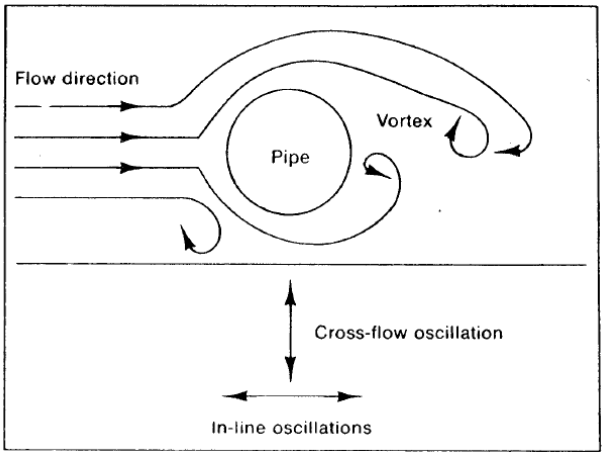
C_L = Koefisien gaya angkat

2.2.12. *Vortex Induced Vibration*

Ketika aliran arus air laut melewati jaringan pipa bawah laut, *vortices* muncul dibelakang jaringan pipa. *Vortices* yang terjadi diakibatkan oleh turbulensi dan ketidakstabilan aliran dibelakang pipa (Mouselli,1981). Menurut Bai (2001), arus balik yang terjadi akibat *vortex shedding* akan menimbulkan pembebanan siklik pada pipa yang menyebabkan vibrasi. Untuk ilustrasi *vortex induced vibration* akan ditampilkan pada Gambar 10 dan Gambar 11 seperti dibawah ini:



Gambar 10 Vortex Shedding (Bai, 2001)



Gambar 11 Vortex Induced Vibration (Mouselli, 1981)

Dahulu, selama masa operasinya jaringan pipa bawah laut tidak boleh mengalami *vortex induced vibration* sama sekali. Dewasa ini, telah ditemukan pendekatan sehingga vibrasi pada pipa bawah laut akibat VIV dapat diterima selama tidak melebihi *allowable fatigue damage* (Bai, 2001).

Dalam DNV RP F105 2017 masing-masing bentangan bebas harus dilakukan *screening* VIV untuk mengetahui apakah pipa yang mengalami bentangan bebas mengalami bentangan bebas atau tidak. Menurut DNV RP F105 untuk *screening* VIV untuk masing-masing arah gerak vibrasi (*in-line* dan *cross-flow*) dapat dilakukan menggunakan Persamaan 2.44 dan 2.46 sebagai berikut :

- Untuk *in-line*

  $$f_{IL,1} > \frac{U_{extreme}\,\gamma_{f,IL}}{V_{R,onset}^{IL}\,D_t} \qquad (2.44)$$

  Dengan,

  $\gamma_{f,IL}$ = *safety factor*

  D_t = Diameter total pipa (termasuk *coating*)

  $f_{IL,1}$ = frekuensi natural *in-line*

- Untuk *cross-flow*

  $$f_{CF,1} > \frac{U_{extreme}\,\gamma_{f,CF}}{2\,D_t} \qquad (2.45)$$

  Dengan,

$\gamma_{f,CF}$ = *safety factor*

$f_{CF,1}$ = frekuensi natural *in-line*

$U_{extreme}$ = Max ($U_{c,100\text{-}year} + U_{w,10\text{-}year}$, $U_{c,10\text{-}year} + U_{w,100\text{-}year}$) (2.46)

1. **Frekuensi *Vortex Shedding***

Frekuesin *vortex shedding* merupakan suatu nilai penting dalam analisis *free span.* Kenyataanya kegagalan struktur akibat kelelahan yang ditimbulkan oleh VIV terjadi ketika nilai frekuensi *vortex shedding* mendekati frekuensi natural pipa (Mouselli, 1981). Menurut Rudiyanto (2014), pipa akan mulai mengalami vibrasi arah *in-line* ketika frekuensi *vortex shedding* memiliki nilai 1/3 dari frekuensi natural pipa. Frekuensi *vortex shedding* akan dijelaskan pada Persamaan 2.47 seperti dibawah ini:

$$f_s = S_t\left(\frac{U_{tot}}{D_t}\right) \quad (2.47)$$

Dengan,

S_t = *Strouhal number* (Menurut Mouselli (1981), Secara praktikal untuk jaringan pipa *strouhal number* bernilai 0.2)

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

2. ***Reynolds Number***

Untuk Persamaan 2.48 akan menjelaskan bilangan *Reynolds* sebagai berikut :

$$Re = Utot\,.\frac{Dt}{v} \quad (2.48)$$

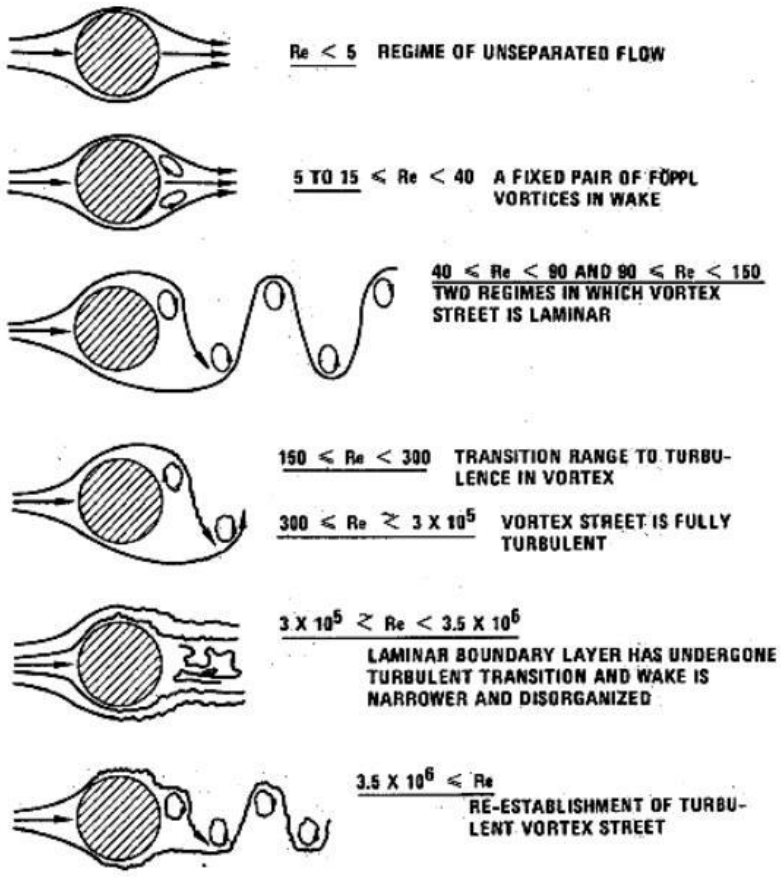
Dengan,

Re = Bilangan *Reynolds*

v = Viskositas kinematis air laut (m^2/s)

= 9,3 x 10^{-3}

Menurut Syahroni (2018), bentuk bentuk aliran fluida berbeda-beda untuk setiap *range* harga bilangan *Reynolds*. Hal ini dapat ditunjukan pada Gambar 12 seperti dibawah ini.



Gambar 12 Regime Alirian Fluida Pada Silinder Halus (Lienhard, 1996 dalam Syahroni, 2018)

3. *Stability parameter*

Stability parameter (K_s), menjadi salah satu parameter utama yang mengontrol Gerakan VIV (Bai *et al*, 2014). Persamaan 2.49 akan menjelaskan *stability parameter* sebagai berikut:

$$K_s = \frac{4\,\pi\, m_e \zeta_T}{\rho_w\, {D_t}^2} \qquad (2.49)$$

Dengan,

M_e = Massa efektif pipa (Kg/m)

ζ_T = Total modal *damping ratio*

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

- *Structural damping* (ζ_{str}) disebabkan oleh gesekan antar internal matrial pipa, jika tidak terdapat data yang detail dapat diasumsikan 0.005. Jika terdapat lapisan *concrete coating*, pergeseran antara

lapisan anti korosi dengan lapisan *concrete* dapat meningkat nilai *structural damping* menjadi 0.01-0.02

- *Soil damping* (ζ_{soil}) dapat dilihat dalam Tabel 5 dan Table 6 seperti dibawah ini

Tabel 5 *Modal Soil Ratios for Sand* (DNV GL RP F105, 2017)

Modal soil ratios (*in* 100%) *for sand*						
Sand type	*Horizontal in-line direction L/D*			*Vertical cross-flow direction L/D*		
	< 40	100	> 160	< 40	100	> 160
Loose	3	2	1	2	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

Tabel 6 *Modal Soil Ratios for Clay* (DNV GL RP F105, 2017)

Modal soil ratios (*in* 100%) *for clay*						
Clay type	*Horizontal in-line direction L/D*			*Vertical cross-flow direction L/D*		
	< 40	100	> 160	< 40	100	> 160
Very soft - soft	3	2	1	2	1,4	0,8
Firm - Stiff	1,5	1,5	1,5	1,2	1,0	0.8
Very stiff - Hard	1,5	1,5	1,5	1,2	1,0	0,8

- *Hydrodinamic dampin* ζ_h untuk VIV yang terletak didaerah *lockin* biasanya digunakan $\zeta_h = 0$ (diabaikan)
- Di dalam DNV GL RP F105 (2017), *stability parameter* dibagi dengan faktor keamaan untuk meningkatkan keamanan

$$K_{SD} = \frac{K_S}{\gamma_k} \tag{2.50}$$

4. *Reduced velocity*

Reduced velocity merupakan besaran *non-dimensional* yang dapat menandakan terjadinya VIV. Menurut DNV GL RP F105 (2017) terjadinya VIV dan arah terjadinya dapat didentifikasi dengan mengetahui nilai *reduced velocity* dengan ketentuan sebagai berikut :

$V_{Rd,CF}$ > akan terjadi osilasi arah *cross-flow.*

$V_{Rd,IL}$ > akan terjadi osilasi arah *in-line.*

Reduced velocity dapat diperhitungkan menggunakan Persamaan 2.51 sebagai berikut :

$$V_R = \frac{Uc+Uw}{fn\ Dt} \quad (2.51)$$

Dengan,

f_n = Frekuensi natural pipa (Hz)

5. *Keulegan Carpenter*

Menurut DNV GL RP F105 (2017) bilangan *Keulegan-Carpenter* pada pipa dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.52 sebagai berikut:

$$KC = \frac{Uw}{fw\ Dt} \quad (2.52)$$

Dengan,

f_w = Frekuensi gelombang signifikan ($1/T_u$)

2.2.13. *Dynamic Soil Stiffness*

Dynamic soil stiffness terjadi akibat interaksi pipa dengan tanah di dasar laut lokasi pipa. *Dynamic soil stiffness* terdapat dua jenis berdasarkan interaksi tanah dengan pipa yaitu *dynamic soil stiffness* vertikal dan *dynamic soil stiffness* horisontal. *Dynamic soil stiffness* vertikal dipengaruhi gaya vertikal dinamis pipa, dan *displacement* vertikal pipa. Sedangkan untuk arah horisontal dipengaruhi gaya horisontal dinamis antara pipa dengan tanah dan *displacement* horisontal pipa. Menurut DNV GL RP F105 (2017) *dynamic soil stiffness* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.53 dan Persamaan 2.54, jika kondisi topologi tidak *complex*, ketika tanah bersifat homogen, dan ketika tidak adanya detail analisis yang diperlukan.

- ***Dynamic Soil Stiffness Vertical***

$$K_V = \frac{C_v}{1-v}\left(\frac{2}{3}\frac{\rho_s}{\rho}+\frac{1}{3}\right)\sqrt{D_t} \quad (2.53)$$

Dengan,

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

C_V = Koefisien *dynamic soil stiffness vertical* (kN/$m^{\frac{5}{2}}$)

$\frac{\rho_s}{\rho}$ = Rasio massa spesifik antara massa pipa (tanpa massa tambah) dan massa air yang dipindahkan.

- ***Dynamic Soil Stiffness Horizontal***

$$K_L = C_L(1+v)\left(\frac{2}{3}\frac{\rho_s}{\rho}+\frac{1}{3}\right)\sqrt{D_t} \quad (2.54)$$

Dengan,

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

C_L = Koefisien *dynamic soil stiffness horizontal* (kN/$m^{\frac{5}{2}}$)

Untuk koefisien *dynamic soil stiffness* dapat dilihat dari DNV GL RP F105 (2017). dengan sifat dan jenis tanah berbeda. Untuk lebih detailnya nilai koefisien *dynamic soil stiffness* akan ditampilkan pada Tabel 7 dan Tabel 8 seperti dibawah ini.

Tabel 7 *Dynamic stiffness factor and stiffness for pipe-soil interaction in clay* (DNV GL RP F105, 2017)

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

Tabel 8 *Dynamic stiffness factor and Stiffness for pipe-soil interaction in sand* (DNV GL RP F105, 2017)

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

Untuk *poisson's ratio* tanah dan parameter lainya dalam DNV GL RP F105 (2017) telah ditetapkan dari hasil *geotechnical test* pada *undisturbed samples* dan dapat dijadikan parameter acuan karena hasil ini dapat merepresentasikan geografis tertentu dilikasi jaringan pipa. Untuk parameter-parameter tanah akan ditampilkan ada Tabel 9 dan Tabel 10 seperti dibawah ini.

Tabel 9 Tipikal *geotechnical* parameter untuk *clay* (DNV GL RP F105, 2017)

Soil type	S_u (kN/m^2)	γ_{soil}' (kN/m^3)	v	e_s
Very soft	< 12.5	4 - 7	0.45	1 - 3
Soft	12.5 – 25	5 – 8	0.45	0.8 – 2.5
Firm	25 – 50	6 – 11	0.45	0.5 – 2
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 10 Tipikal *geotechnical parameter* untuk pasir (DNV GL RP F105, 2017)

Soil type	φ_S	γ_{soil}' (kN/m^3)	v	e_s
Loose	$28 – 30^0$	8.5 – 11	0.35	0.7 - 0.9
Medium	$30 – 36^0$	9 – 12.5	0.35	0.5 – 0.8
Dense	$36 - 41^0$	10 – 13.5	0.35	0.4 – 0.6

2.2.14. Frekuensi Natural Pipa

Pada dasarnya setiap benda akan terus bergetar tanpa perlu ada pemicu dari luar. Namun amplitudo getaran alami yang terjadi pada suatu benda tidak menunjukan nilai yang besar. Setiap benda memiliki frekuensi getaran alami yang berbeda. Frekuensi alami (natural) pipa telah dijelaskan pada DNV GL RP F105 (2017) pada Persamaan 2.55. Perhitungan frekuensi natural pipa dilakukan guna mengetahui apakah frekuensi natural pipa yang terdapat *span* mendekati frekuensi *vortex shedding* yang terjadi. Jika frekuensi *vortex shedding* mendekati atau sama frekuensi natural pipa, pipa akan mulai mengalami vibrasi. Menurut Mouselli (1981), pipa bawah laut akan mulai bergetar jika nilai frekuensi natural pipa 1/3 dari frekuensi *vortex shedding.* Untuk perhitungan frekuensi natural akan ditampilkan pada Persamaan 2.55 sebagai berikut:

$$f_1 \approx C_1\sqrt{1+CSF}\ \sqrt{\frac{E_{st}\,I_{st}}{M_e\,{L_{eff}}^4}\ (1+\frac{S_{eff}}{P_{cr}}+C_3\ \left(\frac{\delta}{D_t}\right)^2} \qquad (2.55)$$

Dengan,

f_1 = *Fundamental natural frequency* (Hz)

C_1,C_3 = *Boundary condition coefficient*

CSF = *Concrete stiffness factor*

E_{st} = *Young's modulus pipa* (N/m^2)

I_{st} = Momen inersia pipa baja (m^4)

L_{eff} = Panjang *free span* efefktif (m)

S_{eff} = *Effective axial force* (N)

P_{cr} = *Critical buckling load* (N)

δ = *Static deflection* (m)

1. *Effective Axial Force*

Effective axial force digunakan untuk menjelaskan gaya aksial pipa yang dipengaruhi oleh tekanan internal dan eksternal pada pipa. Menurut Bai *et al* (2014) *effective axial force* mempunyai pengaruh dalam respons struktur pipa dalam segala prespektif, memengaruhi *lateral buckling, upheaval buckling, anchor fores,* dan frekuensi natural pada bentangan bebas. Pada DNV GL RP F105 (2017), *Effective axial force* dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.56 sebagai berikut :

$$S_{eff} = N_{tr} - p_i \, . \, A_i + p_e \, . \, A_e \qquad (2.56)$$

Dengan,

S_{eff} = *Effective axial force* (N)

N_{tr} = *"True" steel wall axial force* (N)

p_i = *Internal pressure* (Pa)

p_e = *External pressure* (Pa)

A_i = *Internal cross section area of the pipe* (m^2)

A_e = *External cross section area of the steel pipe* (m^2)

2. *Critical Buckling Load*

Menurut DNV GL RP F105 (2017) *critical buckling load* akan dijelaskan pada Persamaan 2.57 seperti dibawah ini :

$$P_{cr} = (1 + CSF)\, C_2\, \pi^2 \frac{E_{st}\, I_{st}}{{L_{eff}}^2} \qquad (2.57)$$

Dengan,

C_2 = *Boundary condition*

3. *Static Deflection*

Static deflection terjadi pada pipa yang mengalami bentangan bebas. Lendutan terjadi karena pipa kehilangan daya dukung dari tanah, *Static deflection* terjadi dua arah *in-line* dan *cross-flow*. Untuk arah *in-line* defleksi terjadi akibat dari beban hidrodinamis. Untuk arah *cross-flow* defleksi terjadi akibat berat terandam pipa. Defleksi yang terjadi dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya *buckling*. Dalam DNV GL RP F105 (2017) untuk memperhitungkan besar defleksi yang terjadi dijelaskan pada Persamaan 2.58 sebagai berikut:

$$\delta = C_6 \frac{q\, L_{eff}^4}{E_{st}\, I_{st}\, (1+CSF)} \frac{1}{(1+\frac{S_{eff}}{P_{cr}})} \quad (2.58)$$

Dengan,

q = *Deflection load per unit length* (N/m)

4. *Concrete Stiffness Factor*

Penambahan *concrete coating* bukan sesuatu yang tidak ada gunanya. Penambahan *concrete coating* bertujuan untuk menambah berat pipa. Hal ini bertujuan pipa menjadi lebih stabil di dasar laut. Penambahan *concrete coating* juga menyebabkan meningkatnya kekakuan pipa. Dalam DNV GL RP F105 (2017) *concrete stiffness factor* dijelaskan dengan Persamaan 2.59 sebagai berikut :

$$CSF = K_C \left(\frac{EI_{conc}}{EI_{steel}}\right)^{0.75} \quad (2.59)$$

Dengan,

K_c = Konstanta empiris

= *0.33* untuk *asphalt* dan 0.25 untuk *PP/PE coating*

EI_{CONC} =*Bending stiffness* selimut beton

5. *Boundary Condition*

Untuk melakukan anlisis *free span,* diharuskan untuk menentukan *boundary condition* pada *free span* yang ditinjau. Dalam DNV GL RP F105 (2017) terdapat 3 *boundary condition* yaitu:

- ***Pinned – pinned*** *:* menurut Guo *et al* (2005), biasa digunakan untuk *free span* yang kondisi perletakannya diperbolehkan untuk rotasi dalam sumbu axis pipa.
- ***Fixed – fixed*** : menurut Guo *et al* (2005), digunakan hanya untuk jenis *span* yang kondisi perletakannya digunakan semacam jangkar untuk kedua ujungnya.
- ***Pinned*** – ***fixed*** : Menurut Boi *et al* (2005), sebagai jenis perletakan yang paling umum digunakan, digunakan ketika *span* tidak memasuki kedua kategori diatas.

Dalam DNV GL RP F105 (2017) untuk masing-masing *boundary condition* memiliki nilai-nilai koefisien yang berbeda. Untuk lebih detailnya akan ditampilkan pada Tabel 11 seperti dibawah ini.

Tabel 11 *Boundary condition coefficient* (DNV GL RP F105, 2017)

	Pinned – Pinned	*Fixed – fixed*	*Single span on seabed*
C_1	1.57	3.56	3.56
C_2	1.0	4.0	4.0
C_3	0.8	0.2	0.4
C_4	4.93	14.1	*Shoulder:* $14.1(L/L_{eff})^2$ Mid-span : 8.6
C_5	1/8	1/12	Shoulder : $\frac{1}{18\left(\frac{L_{eff}}{L}\right)^2 - 6}$ Mid-span : 1/24
C_6	5/384	1/384	1/384

6. Panjang Bentangan Bebas Efektif

Panjang bentangan bebas efektif merupakan parameter yang diguanakan alam analisis bentangan bebas dalam DNV GL RP F105 (2017). Panjang bentangan bebas efektif merupakan panjang bentangan bebas yang di-idealkan dengan tumpuan *fix-fix* pada kondisi pipa yang bertumuan tanah. Dalam DNV GL RP F105 (2017) untuk mengihitung panjang bentangan bebas efektif akan dijelaskan pada Persamaan 2.60 sebagai berikut :

$$\frac{L_{eff}}{L} = \begin{cases} \frac{4{,}73}{-0.66\,\beta^2 + 1.02\beta + 0.63\beta} \; untuk\; \beta \geq 2{,}7 \\ \frac{4{,}73}{0{,}036\,\beta^2 + 0{,}61\,\beta + 1} \; untuk\; \beta < 2{,}7 \end{cases} \qquad (2.60)$$

Dengan,

β = *Relative soil stiffnes parameter*

$$\beta = Log_{10}\left(\frac{K.L^4}{(1+CSF)E_{st}\,I_{st}}\right) \qquad (2.61)$$

L_{eff} = Panjang span efektif (m)

L = Panjang aktual *free span* (m)

K = *Relevant soil stiffness*

CSF = Faktor kekakuan *concrete coating*

E_{st} = *Young's modulus* pipa baja (N/m^2)

I_{st} = Momen inersia pipa baja (m^4)

7. *Safety Factor*

Menurut Guo *et al* (2005),faktor keamanan digunakan dalam analisis untuk meningkatkan keamanan dalam proses desain. Faktor keamanan bertujuan untuk mempertimbangkan ketidak pastian *soil factor, environmental data,* kecepatan dan percepatan partikel, dan koefisien hidrodinamis. Dalam DNV GL RP F105 (2017) untung angka faktor keamanan dalam analisis telah ditentukan dimana akan ditampilkan pada Tabel 12, Tabel 13, dan Tabel 14 seperti dibawah ini.

Tabel 12 *Safety factor* untuk kriteria *screening* (DNV GL RP F105, 2017)

γ_{IL}	1,4
γ_{CF}	1,4

Tabel 13 *Safety factor* untuk parameter VIV (DNV GL RP F105, 2017)

Safety factor	*Safety Class*		
	Low	*Normal*	*High*
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		

Tabel 14 Faktor keamanan untuk frekuensi alami (DNV GL RP F105, 2017)

Free span type	*Safety Class*					
	Low		*Medium*		*High*	
	$\gamma_{f,IL}$	$\gamma_{f,CF}$	$\gamma_{f,IL}$	$\gamma_{f,CF}$	$\gamma_{f,IL}$	$\gamma_{f,CF}$
Verry well def.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Well to very well defined	1.0	1.05	1.0	1.1	1.0	1.15
Well def.	1.05	1.05	1.1	1.1	1.15	1.15
Not well def.	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3

2.2.15. *Screening Fatigue Criteria*

Dalam DNV GL RP F105 (2017) terdapat kriteria *fatigue screening* yang harus dipenuhi. *Screening fatigue* dalan DNV GL RP F105 telah di kalibrasi terhadap *full fatigue analysis* untuk mendapatkan umur kelelahan lebih darii 50 tahun. Jika tidak dipenuhi maka perlu dilakukan *fatigue analisis* untuk mengetahui lebih lanjut mengenai umur pipa yang mengalami bentangan bebas. *Screening* ini dilakukan dengan membandingkan frekuensi natural pipa dengan frekuensi alam yang tercipta akibat interaksi aliran arus dengan pipa. Persamaan 2.62 dan Persamaan 2.63 akan menjelaskan kriteria *screening* untuk masing-masing kondisi vibrasi yang terjadi. Persamaan 2.62 – 2.63 akan dijelaskan lebih lanjut seperti dibawah ini :

- Untuk arah *in-line,* harus memenuhi Persamaan 2.60 sebagai berikut :

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{c,100tahun}}{V_{R,onset}^{IL}.D} . \left(1 - \frac{\frac{L}{D}}{250}\right) . \frac{1}{\alpha} \qquad (2.62)$$

γ_{IL} = *Screening factor for in-line*

$V_{R,onset}^{IL}$ = *In-line onset value for the reduced velocity*

$f_{n,IL}$ = Frekuensi natural arah *in-line*

- Untuk arah *cross-flow,* harus memenuhi Persamaan 2.63 sebagai berikut :

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100tahun}+U_{w,1tahun}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D} \quad (2.63)$$

γ_{CF} = *Screening factor for cross-flow*

$V_{R,onset}^{CF}$ = *Cross-flow onset value for the reduced velocity*

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

2.2.16. Panjang Maksimum Bentangan bebas

Dalam analisis VIV dan *local buckling* pada bentangan bebas. Panjang bentangan bebas menjadi salah satu faktor paling berpengaruh, Perhitungan panjang maksimum bentangan bebas diperhitungkan untuk mengetahui panjang bentangan kritis dimana nantinya fenomena VIV dan *local buckling* akan terjadi. Untuk fenomena VIV panjang bentangan bebas kritis terbagi menjadi dua yaitu kondisi *in-line* dan *cross-flow*. Untuk pemilihan panjang bentangan kritis yang menjadi acuan dalam evaluasi panjang span diambil untuk panjang *span* kritis yang paling pendek. Untuk panjang *span* kritis untuk kondisi *in-line* dan *cross-flow* akan dijelaskan pada Persamaan 2.65 dan Persamaan 2.65 sebagai berikut.

$$L_{cr,in-line} = \sqrt{\frac{C_1 \cdot (1+CSF)E.I}{f_{n,IL}.M_{eff}}} \quad (2.64)$$

$$L_{cr,cross-flow} = \sqrt{\frac{C_1 \cdot (1+CSF)E.I}{f_{n,cf}^2.M_{eff}}} \quad (2.65)$$

Dengan,

C_1 = *Boundary condition*

M_{eff} = Massa effektif pipa

f_n = Natural frekuensi kondisi *in-line* dan *cross-flow*

$$f_n = \frac{U_{c100} + U_{airy}}{V_{R,onset}\, D} \quad (2.66)$$

2.2.17. *Rensponse Model*

1. *In-line Respons Model*

Respons *in-line* yang terjadi pada jaringan pipa yang mengalami bentangan bebas penyebab utamanya adalah arus terkait dengan

symmetric vortex shedding. Amplitudo pada respons *in-line* tergantung pada *reduced velocity*, parameter stabilitas, *turbulence intencity,* dan sudut datang aliran terhadap axis pipa. Getaran yang terjadi menyebabkan terbentuknya rentang tegangan, dimana dalam DNV GL RP F105 (2017) rentang tegangan yang terjadi pada pipa saat kondisi *in-line* dapat dijelaskan dalam Persamaan 2.67 sebagai berikut :

$$S_{IL} = 2.\, A_{IL}\, (A_Y/D_t)\, \psi_{\bar{\alpha},IL}\, \gamma_S \qquad (2.67)$$

Dengan,

S_{IL} = *Stress range* pada arah *in-line* (N/m^2)

A_{IL} = *Unit stress amplitude* arah *in-line*

(A_y/D_t) = Amplitudo maksimum dari vibrasi

$\psi_{\bar{\alpha},IL}$ = Faktor koreksi rasio kecapatan alran arus

γ_S = Faktor Keamanan

(A_y/D_t) merupakan amplitudo maksimum yang terjadi (*normalised with D*) merupakan fungsi dari K_{Sd} dan V_{Rd} . Respons amplitude maksimum dan parameter lainya akan dijelaskan dalam Persamaan 2.68 – 2.73 sebagai berikut :

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_{on,IL}} \; for\; K_{sd} < 0.4 \\ \frac{0.6+K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} \; for\; 0.4 \leq K_{sd} \geq 1.6 \\ \frac{2.2}{\gamma_{on,IL}} \; for\; K_{sd} > 1.6 \end{cases} \qquad (2.68)$$

$$V_{R,1}^{IL} = 10\,.\frac{A_{y,1}}{D_t} + V_{R,onset}^{IL} \qquad (2.69)$$

$$V_{R,2}^{IL} = V_{R,end}^{IL} - 2.\frac{A_{y,2}}{D_t} \qquad (2.70)$$

$$V_{R,end}^{IL} = \begin{cases} 4.5 - 0.8\,.K_{sd}\; for\; K_{sd} < 1 \\ 3.7\; for\; K_{sd} \geq 1 \end{cases} \qquad (2.71)$$

$$\frac{A_{y,1}}{D_t} = \max\,(0.18(1 - \frac{K_{sd}}{1.2}).R_{I\theta,1};\, \frac{A_{y,2}}{D_t}) \qquad (2.72)$$

$$\frac{A_{y,2}}{D_t} = 0.13\,\left(1 - \frac{K_{sd}}{1.2}\right).R_{I\theta,2} \qquad (2.73)$$

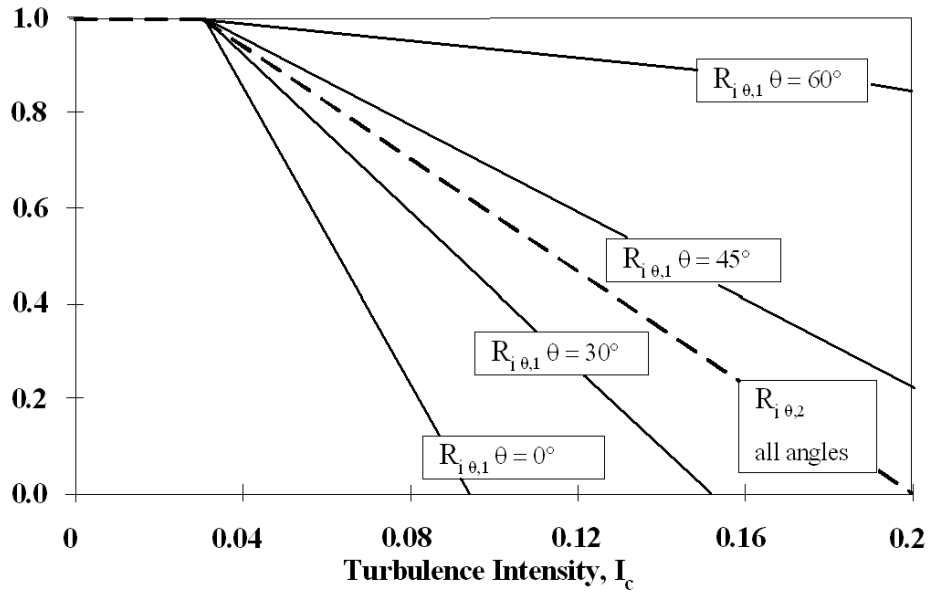
Untuk faktor reduksi, dihitung untuk mempertimbangkan efek dari *turbulence intensity* dan *angle of attack* untuk aliraN. Menurut DNV GL RP F105 (2017) faktor redukusi dapat dihtung dengan Persamaan 2.74 -2.75 sebagai berikut :

$$R_{I\theta,1} = 1 - \pi^2 \left(\frac{\pi}{2} - \sqrt{2 \,.\, \theta_{rel}}\right)(I_c - 0.03)\ 0 \leq R_{I\theta,1} \geq 1 \qquad (2.74)$$

$$R_{I\theta,2} = 1 - \pi^2 \left(\frac{I_c - 0.03}{0.17}\right)\ 0 \leq R_{I\theta,2} \geq 1 \qquad (2.75)$$

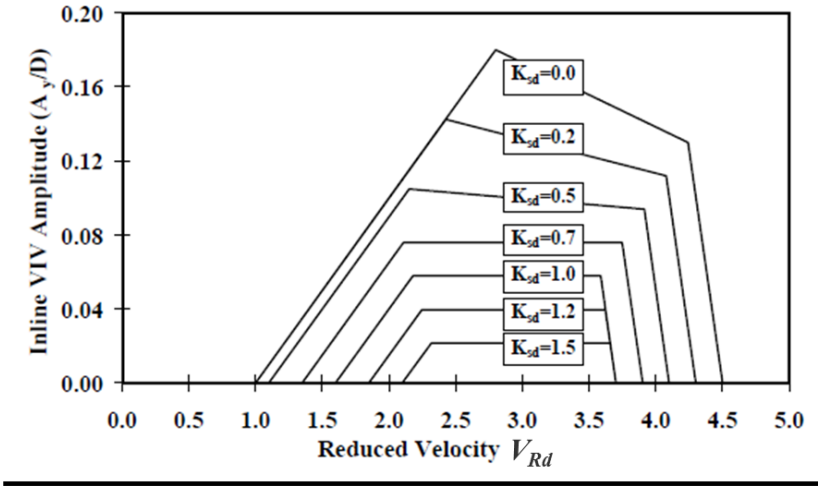
$$I_c \quad = \frac{\sigma_c}{U_c} \qquad (2.76)$$

Gambar 13 menampilkan grafik hubungan antara *turbulene intensity* dengan *reduction factor* untuk masing-masing *angle of attack.*



Gambar 13 Grafik hubungan *turbulence intensity* dengan *reduction factor* untuk masing-masing *angle of attack* (DNV GL RP F105, 2017)

Sehingga didapatkan koordinat untuk masing-masing ampltudo respons model dari kondisi *in-line* terhadap *reduced velocity.* Seperti pada Gambar 14 yang akan menampilkan grafik hubungan antara *reduced velocity* dengan respons amplitude untuk masing-masing *factored stability.*



Gambar 14 Grafik hubungan antara *reduced velocity* dengan respons amplitudo untuk kondisi *in-line* (DNV GL RP F105, 2017)

2. *Cross-flow Respons Model*

Kondisi VIV untuk arah *cross-flow* dipengaruhi oleh beberapa parameter, seperti *reduced velocity*, bilangan *Keulegan-Carpenter*, rasio aliran arus, parameter stabilitas, *seabed gap ratio,* bilangan *strouhal,* dan kekasaran permukaan pipa. Pada aliran arus yang didominasi oleh gelombang, terlpeas dari *KC regime,* VIV pada kondisi *cross-flow* berelasi dengan rasio frekuensi (f_{cf}/ f_w)

Untuk kondisi *steady current* mendominasi aliran, VIV untuk arah *cross-flow* terjadi ketika nilai *reduced velocity* berikisar antara 3 sampai 4, dimana vibrasi maksimum terjadi ketika nilai *reduced vibrasi* meningkat lebih jauh.

Akibat dari getaran yang terjadi, timbul beban siklik yang dapat mengakibatkan kegagalan struktur. Menurut DNV GL RP F105 (2017) rentang tegangan yang terjadi akibat beban siklik dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.77 sebagai berikut:

$$S_{CF} = 2.\, A_{CF}\, (A_Z/D_t)\, R_k\, \gamma_s \qquad (2.77)$$

Dengan,

S_{CF} = *Stress range* pada arah *cross-flow* (N/m^2)

A_{CF} = *Unit stress amplitude* arah *cross-flow*

(A_Z/D_t) = Amplitudo maksimum dari vibrasi

R_k = Faktor reduksi amplitude akibat adanya redaman

γ_S = Faktor Keamanan

Menurut DNV GL RP F105 (2017) respons amplitudo sebagai fungsi dari *current flow ratio* dan KC dijelaskan pada Persamaan 2.78-2.83 sebagai berikut:

$$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3.\psi_{trench,onset}\psi_{proxi,onset}}{\gamma_{on,CF}} \quad (2.78)$$

$$V_{R,1}^{CF} = 7 - \frac{(7 - V_{R,onset}^{CF})}{1.15}.(1.3 - \frac{A_{Z,1}}{D_t}) \quad (2.79)$$

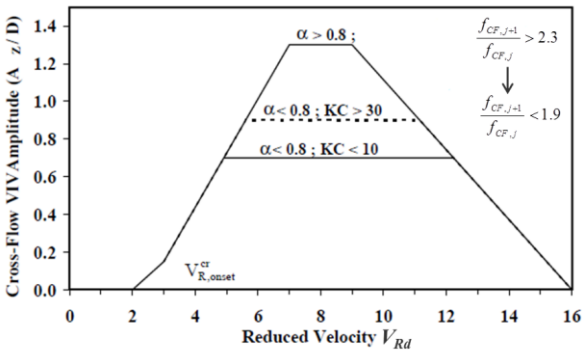
$$V_{R,2}^{CF} = V_{R,end}^{CF} - \frac{7}{1.3}.\left(\frac{A_{Z,1}}{D_t}\right) \quad (2.80)$$

$$V_{R,end}^{CF} = 16 \quad (2.81)$$

$$\left(\frac{A_{Z,1}}{D_t}\right) = \begin{cases} 0.9 \; for \; \alpha > 0.8\,, \;\; f_{ratio} < 1.5 \\ 0.9 + 0.5\,.(f_{ratio} - 1.5) \; for \; \alpha > 0.8\,, 1.5 \le f_{ratio} \le 2.3 \\ 1.3 \; for \; \alpha > 0.8\,, \;\; f_{ratio} > 2.3 \\ 0.9 \; for \; \alpha \le 0.8\,, \;\; 30 \le KC \le 40 \\ 0.7 + 0.01\,(KC - 10) \; for \; \alpha \le 0.8\,, \;\; 10 \le KC < 30 \\ 0.7 \; for \; \alpha \le 0.8\,, \;\; KC < 10 \end{cases} \quad (2.82)$$

$$\left(\frac{A_{Z,2}}{D_t}\right) = \left(\frac{A_{Z,1}}{D_t}\right) \quad (2.83)$$

Cross-flow amplitudo dalam kombinasi arus dan aliran gelombang didapatkan dari Gambar 15 seperti dibawah ini.



Gambar 15 *Basic cross-flow response model* (DNV GL RP F105, 2017)

Untuk amplitudo getaran maksimum pada kondisi *in-line* maupun *cross-flow* dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.84 seperti yang terdapat pada DNV GL RP F105 (2017) seperti dibawah ini.

$$A_{IL/CF,1}^{max} = 2c_4(1 + CSF)\frac{DEr}{L_{eff}^2} \quad (2.84)$$

Dengan,

E = *Young modulus* pipa (Mpa)

C_4 = *Boundary coefficient*

CSF = *concrete stiffness factor*

r = $D_s/2$ (2.85)

2.2.18. *Bending Moment*

Untuk semua bentangan bebas, penilaian integritas struktur pipa yang terjadi bentangan bebas harus mempertimbangkan *local buckling* (ULS). Perhitungan *local buckling* harus mempertimbangkan *combine loading criteria* untuk *load controlled condition* (DNV GL RP F105, 2017). Dalam DN OS F101 *bending moment* dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.86 sebagai berikut :

$$M_{sd} = M_F.\gamma_F.\ \gamma_C + M_E\ .\ \gamma_E + M_I\ .\ \gamma_F\ .\ \gamma_C + M_F\ .\ \gamma_A\ .\ \gamma_C \quad (2.86)$$

Dengan,

M_{sd} = *Bending moment total* (N.m)

M_F = Momen karena beban fungsional (N.m)

M_E = Momen karena beban lingkungan (N.m)

M_I = Momen karena *interference load* (N.m)

γ_F = Faktor pembebanan

γ_E = Faktor pembebanan beban lingkungan

γ_C = Faktor pengaruh kondisi beban

γ_A = Faktor pembebanan *accidental load*

Untuk faktor-faktor diatas dapat menggunakan nilai yang terdapat pada DNV OS F101 (2013) seperti yang akan ditampilkan pada Tabel 15 dan Tabel 16 seperti dibawah ini:

Tabel 15 *Load effect factor combinations* (DNV OS F101, 2013)

Limit state / Load combination	*Load Effect Combination*		*Funtional Load*	*Environmental Load*	*Interference Load*	*Accidental Loads*
			γ_F	γ_e	γ_F	γ_A
ULS	*A*	*System Check*	1.2	0.7		
	B	*Local Check*	1.1	1.3		
FLS	*C*		1.0	1.0	1.0	
ALS	*D*		1.0	1.0	1.0	1.0

Tabel 16 Faktor kondisi beban (DNV OS F101, 2013)

Condition	γ_C
Pipeline resting on unven seabed	1.07
Reeling on and J-tube pull-in	0.82
System pressure test	0.93
otherwise	1.00

Untuk momen karena beban fungsional pada pipa yang mengalami bentangan bebas disebabkan oleh berat terendam pipa itu sendiri. Dalam Bai *et al* untuk bentangan bebas akan mengalami *bending moment* maksimum dengan nilai yang berbeda tergantung dari *boundary condition* pada ujung-ujung bentangan bebas. Untuk lebih detailnya akan dijelaskan dalam Persamaan 2.87 – 2.89 seabagai berikut:

- *Pinned – pinned*

$$M_{max} = \frac{qL^2}{8} \quad (2.87)$$

- *Fixed – fixed*

$$M_{max} = \frac{qL^2}{12} \quad (2.88)$$

- *Fixed -pinned*

$$M_{max} = \frac{qL^2}{10} \quad (2.89)$$

Sehingga untuk *bending moment* karena beban fungsional pada pipa yang mengalami bentangan bebas dalam analisis Tugas Akhir ini dijelaskan dalam Persamaan 2.90 sebagai berikut :

$$M_F = \frac{W_{sub} .L^2}{8} \quad (2.90)$$

Untuk *bending moment* akibat beban lingkungan dapat dihtung menggunakan persamaan yang terdapat dalam DNV GL RP F105 (2017), dimana untuk *bending moment* akibat beban lingkungan terjadi dalam dua arah yg berbeda disebabkan dari vibrasi arah *in-line* dan *cross-flow*. Untuk *bending moment* dijelaskan dalam Persamaan 2.91 sebagai berikut :

$$M_e = \sigma_e \frac{2I_{steel}}{Ds} \quad (2.91)$$

Dengan,

σ_e = *envirometnal stress* (Pa)

Untuk *environmental stress* (beban lingkungan) yang terjadi pada pipa telah dijelaskan di dalam DNV GL RP F105 (2017). Untuk lebih detailnya akan dijelaskan dalam Persamaan 2.92 - Persamaan 2.95

In-line $\sigma_{e,IL} = \frac{1}{2}\max S_{comb,IL} + \sigma_{FM,max}$ (2.92)

Cross-flow $\sigma_{e,CF} = \frac{1}{2} S_{comb,CF}$ (2.93)

Dimana,

$\sigma_{FM,max}$ = *environmental stress due to direct wave loading*

$$= M_{FM,\max} \frac{D_S}{2I_{steel}} \quad (2.94)$$

$$M_{FM,max} = C_5 \left(\frac{q . L_{eff}^2}{1+\frac{S_{eff}}{P_{cr}}} \right) \quad (2.95)$$

Pada pipa yang mengalami bentangan bebas, untuk melakukan *screening* ULS untuk *local buckling combined loading* untuk *bending moment* hanya terdapat M_F dan M_E dan maka untuk *bending moment* total akan dijelaskan pada Persamaan 2.96 sebagai berikut:

$$M_{sd} = \sqrt{(M_F . \gamma_F . \gamma_C)^2 + (M_{E(CF)} . \gamma_E)^2 + (M_{E(IL)} . \gamma_E)^2} \qquad (2.96)$$

2.2.19. *Ultimate Limit State*

Menurut DNV GL RP F105 (2017), pengecekan *local buckling* untuk jaringan pipa bawah laut yang terdapat bentangan bebas harus sesuai dengan *combined loading* dan kondisi *load controlled.* Sesuai dengan yang terdapat pada DNV OS F101 (2011) dimana untuk kondisi *combined loading* dan *load controlled* pengecekan terhadap *local buckling* dijelaskan pada Persamaan 2.97 – 2.98 sebagai berikut :

$$\left\{\gamma_m . \gamma_{SC} . \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c . M_p(t_2)} + \left\{\frac{\gamma_m . \gamma_{sc} . S_{sd}(p_i)}{\alpha_c . S_p(t_2)}\right\}^2\right\}^2 + \left(\alpha_p . \frac{P_i - P_e}{\alpha_c . P_b(t_2)}\right)^2 \leq 1 \qquad (2.97)$$

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

$$\left\{\gamma_m . \gamma_{SC} . \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c . M_p(t_2)} + \left\{\frac{\gamma_m . \gamma_{sc} . S_{sd}}{\alpha_c . S_p(t_2)}\right\}^2\right\}^2 + \left(\alpha_p . \frac{P_e - P_{min}}{P_c(t_2)}\right)^2 \leq 1 \qquad (2.98)$$

Untuk : $15 \leq D/t \leq 45$, $P_i < P_e$, $|S_{sd}| / S_p < 0.4$

Dengan,

γ_m = Faktor tahanan material

γ_{sc} = Faktor keamanan *resistance*

Untuk nilai γ_m dan γ_{sc} sesuai dengan *codes* DNV OS F101 (2013) akan ditampilkan pada Tabel 17 dan Tabel 18sebagai berikut:

Tabel 17 Faktor Ketahanan Material (DNV OS F101,2013)

Limit State Category	*SLS/ULS/ALS*	FLS
γ_m	1.15	1.00

Tabel 18 Faktor keamanan resistance (DNV OS F101,2013)

	γ_{sc}		
Safety Class	*Low*	*Medium*	*High*
Pressure containment	1.046	1.138	1.308
Other	1.04	1.14	1.26

M_{sd} = *Bending moment* (N.m)

S_{sd} = *Desain effective axial force* (N)

$= S_{eff} . \gamma_{F.} \gamma c$ (2.99)

M_p = *Denote plastic moment capacities* (N.m)

$= f_y . (D_S - t)^2 . t$ (2.100)

S_p = *Denote plastic axial force capacities* (N.m)

$= f_y . \pi . (D_S - t) . t$ (2.101)

f_y = Karakteristik kekuatan material (Pa)

$= (SMYS - f_{y,temp}) . \alpha_U$ (2.102)

f_y = Karakteristik kekuatan material (Pa)

$= (SMTS - f_{u,temp}) . \alpha_U$ (2.103)

t = Tebal dinding pipa

α_c = Parameter aliran tegangan

$= (1 - \beta) + \beta . \frac{f_u}{f_y}$ (2.104)

α_p = Faktor tekanan untuk beban kombinasi

$$= \begin{cases} 1 - \beta \, untuk \frac{P_i - P_e}{P_b} < \frac{2}{3} \\ 1 - 3\beta \left(1 - \frac{P_i - P_e}{P_b}\right) \, untuk \frac{P_i - P_e}{P_b} \geq \frac{2}{3} \end{cases} \quad (2.105)$$

β = Faktor untuk kriteria kombinasi beban

$$= \frac{60 - \frac{D_s}{t}}{90} \quad (2.106)$$

P_{min} = Tekanan internal minimum (Pa)

P_b = Tekanan *bursting* (Pa)

$$= \frac{2t}{D_s - t} f_{cb} \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (2.107)$$

$$f_{cb} = \min \left(f_y . \frac{f_u}{1.15}\right) \quad (2.108)$$

2.2.20. Mode Kegagalan

Mode kegagalan merupakan suatu persamaan yang menggambarkan kondisi dimana struktur mengalami kegagalan. Persamaan ini nantinya akan digunakan dalam simulasi *Monte-Carlo* untuk mencari jumlah kejadian kegagalan dari struktur tersebut. Dengan simulasi ini diharapkan nantinya dapat menggambarkan kondisi riil dimana struktur ini akan mengalami kegagalan. Untuk mode kegagalan VIV dan *local buckling* akan dijelaskan dalam Persamaan 2.109 – 2.111 seperti dibawah ini :

Untuk arah *in-line*

$$F_k(x) = \frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} - \frac{U_{c,100tahun}}{V_{R,onset}^{IL} . D} . \left(1 - \frac{\frac{L}{D}}{250}\right) . \frac{1}{\alpha} \leq 0 \quad (2.109)$$

Untuk arah *cross-flow*

$$F_k(x) = \frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} - \frac{U_{c,100tahun} + U_{w,1tahun}}{V_{R,onset}^{CF} . D} \leq 0 \quad (2.110)$$

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

$$F_k(x) = 1 - \left\{ \gamma_m . \gamma_{SC} . \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c . M_p . (t)} + \left\{ \frac{\gamma_m . \gamma_{sc} . S_{sd}(p_i)}{\alpha_c . S_p . (t)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p . \frac{P_i - P_e}{\alpha_c . P_b . (t)} \right)^2 \leq 0 \quad (2.111)$$

2.2.21. Analisis Keandalan *Monte Carlo*

Dalam mencari keandalan suatu sistem dimana terdapat variabel atau parameter yang memiliki nilai *random* (acak), maka dapat digunakan simulasi Monte Carlo dalam memecahkan persoalan dalam suatu sistem.

Simulasi Monte Carlo dapat dengan mudah dilakukan dengan bantuan computer, dimana komputer telah terdapat RNG (*Random Number Generator*) yang nantinya bilangan yang dikeluarkan oleh RNG digunakan sebagai probabilitas dari bilangan atau parameter acak pada suatu sistem. Namun distribusi peluang dari perubah acak yang terdapat dalam suatu sitem harus diketahui terlebih dahulu atau dapat diasumsikan (Rosyid, 2007). Perubah acak yang telah diketahui distribusi peluangnya lalu dimasukan dalam fungsi kinerja suatu sistem $F_k(x)$, dan harga $F_k(x)$ dihitung. Ketika fungsi kinerja memiliki nilai kurang dari sama dengan nol maka suatu sistem yang ditinjau dianggap gagal ($F_k(x) \leq 0$). Ketika simulasi dilakukan maka jumlah sampel yang didapati akan sebanyak N kali. Sedangkan ketika $F_k(x) \leq 0$ maka banyak sampel kegagalan yang terjadi dicatat n kali. Dengan demikian peluang kegagalan suatu sistem dapat diketauhui yaitu rasio kejadian gagal dengan jumlah sampel atau replikasi (Rosyid, 2007) seperti pada Persamaan 2.112 sebagai berikut :

$$P_g = \frac{n}{N} \tag{2.112}$$

Dengan,

P_g = Peluang kegagalan

n = Kejadian gagal

N = Jumlah sampel

2.2.22. Konsekuensi

Konsekuensi merupakan suatu kerugian yang diakibatkan jika terjadi suatu kegagalan. Dalam tugas akhir ini analisis konsekuensi dilakukan untuk menghitung kerugian yang terjadi. Kerugian yang terjadi dibagi menjadi 3 kategori konsekuensi yaitu :

1. Keselamatan

Konsesukensi yang mempertimbangkan segi keselamatan dalam DNV RP F116 (2015) telah diatur dimana untuk masing-masing

ranking dengan penilaian secara *qualitative.* Untuk lebih detail akan ditampilkan pada Tabel 19 sebagai berikut :

Tabel 19 Deskripsi level konsekuensi segi keselamatan (DNV RP F116, 2015).

Severity	*Safety*
E	*Multiple fatalities*
D	*Single fatality or permanent distability*
C	*Major injury, absence > 2 days*
B	*Minor injury, absence < 2 days*
A	*No or superficial injuries*

2. Lingkungan

Untuk konsekuensi yang mempertimbangkan segi lingkungan telah diatur dalam DNV RPF116 (2015). Konsekuensi yang terjadi di *ranking* dengan penelian secara *semi-quantitative.* Untuk lebih detailnya akan ditampilkan pada Tabel 20 sebagai berikut :

Tabel 20 Deskripsi level konsekuensi segi kerusakan lingkungan (DNV RP F116, 2015).

Severity	*Environment*
E	*Pollution that can cause massive and irreparable damage to ecosystem*
D	*Pollution has significant effect upon the surrounding ecosystem*
C	*Significant local effect. Will take more than 1 man week to remove.*
B	*Minor local effect. Can be cleaned up easily.*
A	*No pollution.*

3. *Business*

Untuk konsekuensi yang mempertimbangkan segi kerusakan aset telah diatur dalam DNV RP F116 (2015). Konsekuensi yang terjadi di *ranking* dengan penelian secara *semi-quantitative.* Untuk lebih detailnya akan ditampilkan pada Tabel 21 sebagai berikut :

Tabel 21 Deskripsi level konsekuensi segi kerugian (DNV RP F116, 2015).

Severity	*Business* (*Million Euro*)
E	> 10 *damage or downtime one year.*
D	< 1 *damage or down time < one month*
C	< 0.1 *damage or downtime < 4 shifts*
B	< 0.01 *damage or downtime < one shift*
A	*No downtime or asset damage*

2.2.23. Matriks Resiko

Matriks resiko merupakan matriks yang memberikan gambaran dari suatu resiko yang terjadi. Untuk mendapatkan detail tingkatan resiko, matriks resiko 5x5 disarankan (Bai *et al,* 2014). Resiko sendiri didapati dari hasil perkalian peluang kegagalan (POF) dengan konsekuensi dari kegagalan (COF). Untuk lebih detailnya akan ditampilkan pada Persamaan 2.113 sebagai berikut :

$$Risk = POF \times COF \tag{2.113}$$

Dalam matriks resiko, resiko dibagi menjadi 3 tingkatan yaitu, *low risk* (*green*), *medium risk* (*yellow*), dan *high risk* (*red*). Untuk lebih jelasnya akan ditampilkan pada Gambar 16. Biasanya, untuk pada tingkat *low risk* masih

dapat diterima, dan perlu dilakukan inspeksi secara visual untuk tetap menjaga nilai resiko tetap pada tingkatan ini. Untuk *medium risk* juga masih dapat diterima, namun perlu diadakanya tindakan seperti, *nondestructive testing*, *functional test* dan lain-lain untuk menjaga agar resiko tidak meningkat. Untuk *high risk* harus segera dilakukan tindakan agar dapat mengurangi peluang kegagalan atau konsekuensi yang ditimbulkan, sehingga dapat menurunkan tingkat resikonya (Bai *et al*, 2014).

Gambar 16 Matriks Resiko (DNV RP F116, 2016)

Increasing consequences →	Severity	Consequence Categories			Increasing probability				
		Safety	Environment	Cost (million Euro)	1 Failure is not expected $< 10^{-5}$	2 Never heard of in the industry 10^{-5} - 10^{-4}	3 An accident has occurred in the industry 10^{-4} - 10^{-3}	4 Has been experienced by most operators 10^{-3} - 10^{-2}	5 Occurs several times per year 10^{-2} - 10^{-1}
	E	Multiple fatalities	Massive effect Large damage area, > 100 BBL	> 10	M	H	VH	VH	VH
	D	Single fatality or permanent disability	Major effect Significant spill response, < 100 BBL	1 - 10	L	M	H	VH	VH
	C	Major injury, long term absence	Localized effect Spill response < 50 BBL	0.1 - 1	VL	L	M	H	VH
	B	Slightly injury, a few lost work days	Minor effect Non-compliance, < 5 BBL	0.01- 0.1	VL	VL	L	M	H
	A	No or superficial injuries	Slightly effect on the environment, < 1BBL	< 0.01	VL	VL	VL	L	M

2.2.24. *Risk Based Inspection*

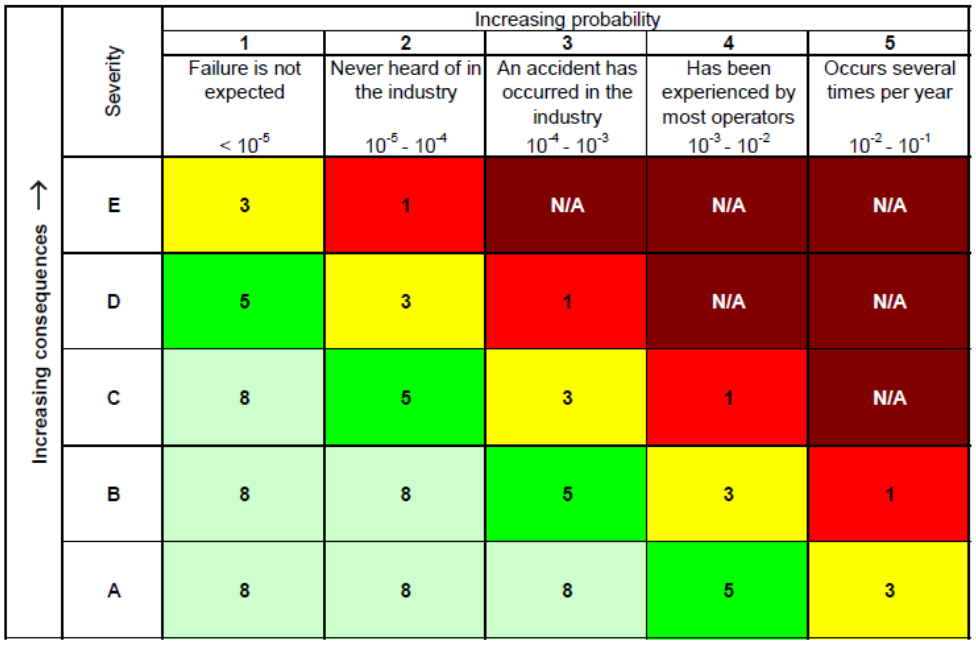
Risk based inspection merupakan suatu metode dalam menentukan jadwal inspeksi suatu sistem dengan berbasis resiko. Inspeksi menggunakan RBI dikembangkan untuk menjaga kestabilan antara kedua hal yang sangat kontradiksi, dengan cara mengurangi biaya yang dikeluarkan untuk inspeksi dan *maintenance* namun tetap menjaga *integrity* jaringan pipa bawah laut (Bai *et al*, 2014). *Risk based inspection* (RBI) berarti mendesain dan optimasi skema inspeksi berdasarkan performa hasil penilaian resiko yang menggunakan data terdahulu, metode analisis, dan *engineering judgement* (Bai *et al*, 2014). Dalam pengerjaanya metode RBI menentukan waktu interval jadwal inspeksi berdasarkan tingkatan resiko pada suatu sistem. Tingkatan resiko tedapat didalam matriks resiko 5x5 seperti pada Gambar

18. Untuk konsekuensi kegagalan berada pada axis horisontal dan untuk ketentuannya seperti yang telah dibahas dalam sub-bab sebelumnya. Untuk axis vertikal yaitu peluang sistem terjadi kegagalan. Untuk tingkatannya akan dijelaskan dalam Tabel 22. Perkalian akan peluang kegagalan dengan tingkatan tertentu dengan konsekuensi kegagalan tertentu menghasilkan tingkatan resiko. Sehingga dapat ditentukan jadwal inspeksi sesuai dengan tingkatan resiko yang terjadi. Dalam DNV RP F116 (2015), Penentuan interval jadwal inspeksi dapat ditentukan berdasarkan

Tabel 22 Tingkatan peluang kegagalan (DNV RP F116, 2010)

Cat.	*Annual failure probability*	
	Quantitative	*Qualitative*
5	$> 10^{-2}$	*Failure expected*
4	10^{-3} *to* 10^{-2}	*High*
3	10^{-4} *to* 10^{-3}	*Medium*
2	10^{-5} *to* 10^{-4}	*Low*
1	$< 10^{-5}$	*Negligible*

tingkatan resiko yang terjadi pada sistem tersebut. Untuk lebih detailnya interval jadwal berdasarkan tingkatan resiko akan ditampilkan pada Gambar 19 dengan menggunakan Persamaan 2.114 sebagai berikut:



Gambar 17 Interval waktu inspeksi berdasarkan tingkatan resiko dalam matriks resiko (DNV RP 116, 2015)

$$I = I_R \,.\, C \,.\, D \qquad (2.114)$$

I = Waktu inspeksi berbasis resiko (Tahun)

I_R = Waktu inspeksi maksimum (Tahun)

C = Confidence factor

D = *Development factor*

Untuk I_R nilainya telah ditetapkan dan bisa didapati dari Gambar 17, untuk nilai *C* dan *D* sudah ditetapkan pada DNV RP F116 seperti pada Tabel 23 dan Tabel 24 seperti dibawah ini :

Tabel 23 *Confiedence factor* dalam analisis (DNV RP F116, 2015)

Condition	*Confidience factor*
Start-up of production	0.5
Good agreement between design and observations	1.0

Tabel 24 *Development factor* dalam analisis (DNV RP F116, 2015)

Condition	*Development factor*
More buckles are expected	0.5
A fully expanded configuration is achived	1.0

2.2.25. Metode Inspeksi

Pada DNV GL RP F116 2015 telah diatur untuk inspeksi yang harus dilakukan pada masing-masing kondisi. Contohnya untuk inspeksi struktural pada jaringan pipa bawah laut untuk berbagai permasalahan maka perlu dilakukan inspeksi tertentu. Untuk lebih detailnya akan ditampilkan pada Tabel 25 seperti dibawah ini.

Tabel 25 Inspeksi berdasarkan kemampuan alat dan operator untuk jaringan pipa bawah laut (DNV RP F116, 2015)

Structural			*Threat Group*	
Upheavel buckling	*Lateral Buckling*	*Free Span*	*Threat*	
X	X	X	*Visual/ Video/ Photo*	ROV
X	X	X	*Sidescan Sonar*	
X	X	X	*Multibeam*	
X			*Pipetracker*	
			Sub bottom profiler	
			CP inspection	
X	X	X	*Sidescan sonar*	ROTV
X	X	X	*Multibeam*	
X			*Pipetracker*	
X			*Sub bottom profiler*	
X	X	X	*Sidescan Sonar*	*Tow-fish*
X			*Pipetracker*	
X			*Sub bottom profiler*	
			MFL	*Pig (ILI)*
			UT	
X			GEO	
			Calliper	
			UT	*Crawl*
			MFL	
			GVI	*Diver*
			CVI	
			UT	
			Eddy Current	

Secara umum didalan DNV GL RP F116 inspeksi dibagi menjadi dua berdasarkan metode yaitu dari dalam dan dari luar. Inspeksi dari dalam maupun dari luar perlu dilakukan sepanjang pipa atau area tertentu untuk mendapatkan data yang cukup detail mengenai jaringan pipa keseluruhan atau area tertentu.

Untuk inspeksi bagian dalam jaringan pipa biasa disebut dengan *In-line inspection* (ILI). Untuk ILI dilakukan menggunakan *pig* yang dimasukan kedalam pipa dan digerakan oleh aliran fluida didalamnya atau ditarik menggunakan mesin atau kabel.

Untuk inspeksi bagian luar jaringan pipa biasanya dilakukan dengan berbagai jenis alat. Inspeksi dari luar dilakukan untuk visual inspeksi (foto dan video) dan pengukutan.

Inspeksi yang biasa digunakan untuk jaringan pipa akan dijelaskan dalam Tabel 26 seperti yang terdapat dalam DNV GL RP F116 seperti dibawah ini.

Tabel 26 Kategori inspeksi pada jaringan pipa bawah laut (DNV GL RP F11, 2015)

Metode	Deskripsi
GVI	*General visual inspection* - inspeksi secara visual yang baisa dilakukan menggunakan ROV atau penyelam. GVI tidak dapat melakukan pembershian namun akan menampilkan kondisi diluar pipa termasuk kondisi *coating*, kondisi anoda, kebocoran dan lain-lain.
GVI XTD	*Extended visual pipeline* survei - inspeksi ini biasanya menggunakan ROV dimana biasanya termasuk video, kamrea digital, profile dasar laut (multibeam sonar), CP (*Gradient* dan *Stab*) dan *pipe tracker* (Kedalaman pipa dipendam).

Tabel 26 Kategori inspeksi pada jaringan pipa bawah laut lanjutan (DNV GL RP F11, 2015)

CVI	*Close visual inspection* – inspeksi ini dapat dilakukan dengan membersihkan *marine growth* dan kontoran lainya. Hal ini dilakukan untuk mendapat detail spesifik kondisi pipa pada area tertentu.
HPS	*High precision survey* - survei yang dilakukan untuk mendapatkan posisi relative jaringan pipa dari tahun-ketahun dalam arah lateral akibat pergerakan pipa di dasar laut.
ILI	*In-line Inspection* - Inspeksi ini menggunakan *pigging* dimana jaringan pipa dilakukan uji NDT dari ujung ke ujung jaringan pipa, untuk mengetahui ketebelan pipa dan mengindikasi pipa yang mengalami kecacatan (penyok).
Monitoring	Menindak lanjuti hasil dari inspeksi yang telah dilakukan.
Testing	Uji yang dilakukan pada system atau ungsi dari suatu peralatan atau sistem pengatur

Intelligent pigging merupakan alat yang digunakan dalam metode *in-line inspection*. *Intelligent pigging* berfungsi untuk membersihkan kotoran yang mengendap pada bagian dalam pipa, mendeteksi kepenyokan dan *buckles* pada pipa, menambahkan inhibitor pada pipa, dan membersihkan genangan air yang diakibatkan *hydrotest.*

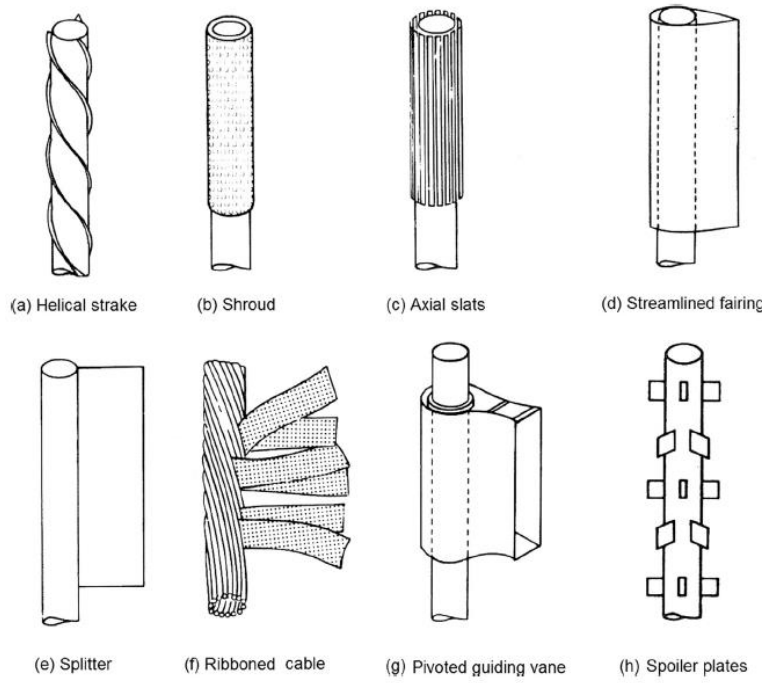
2.2.26. Mitigasi

Mitigasi perlu dilakukan pada pipa yang mengalami bentangan bebas yang dapat menyebabkan kegagalan. Penilaian dalam pengambilan keputusan untuk melakukan mitigasi diambil dalam hasil analisis *screening* ULS, FLS, dan anlisis resiko kegagalan. Dalam tahap desain solusi untuk menghindari permasalahan bentangan bebas dapat dengan merubah rute jaringan pipa. Jika tidak memungkinakn untuk merubah rute atau bentangan bebas tetap terjadi maka dapat dengan menambahkan modifikasi pada pipa agar tidak terjadi VIV, koreksi bentangan bebas dengan menggunakan pipa

fleksibel pada dasar laut yang sangat tidak merata, dan menambahkan *support* buatan. Dalam Bai *et al* (2014), mitigasi permasalahan yang ditimbulkan bentangan bebas terdapat dua cara yaitu :

1. Mitigasi VIV

Dalam mitigasi VIV dapat dilakukan dengan memodifikasi struktur pipa atau aliran yang terjadi disekitar pipa. Menurut Bai *et al* (2014), cara yang paling sering digunakan dalam mitigasi VIV dengan memodifikasi bentuk pipa yang disebut dengan *helical strakes*. Fungsi dari *helical strakes* adalah untuk memecah *vortex shedding* yang akan terjadi. Bukan hanya *helical strakes* namun masih banyak modifikasi yang terdapat untuk lebih detailnya akan ditampilkan pada Gambar 20 seperti dibawah ini.



Gambar 18 Bentuk-bentuk modifikasi pipa untuk mitigasi VIV (Blevins, dalam Bai *et al*, 2014*)*

2. Koreksi bentangan bebas

Kondisi ketika panjang bentangan bebas tidak dapat ditolerir dapat menyebabkan berbagai kegagalan maka perlu dilakukan perbaikan. Perbaikan bertujuan untuk membagi panjang span yang terjadi hingga panjang span yang diizinkan. Untuk lebih jelaskan akan dijelaskan untuk masing-masing jenis mitigasi untuk bentangan bebas seperti yang terdapat pada Bai *et al* (2014) sebagai berikut :

- ***Mattresses* dan *bags***

  Matras, karung pasir, dan tas nat diletakan oleh penyelam dibawah pipa untuk menjadi *support* buatan. Biasa digunakan untuk jaringan pipa diperairan dangkal. Karena untuk perairan dalam akan sulit pengerjaanya, memakan waktu, dan tidak ekonomis (Bai *et al*, 2014).

- ***Trenching***

  Pembuatan parit pada jalur jaringan pipa dapat digunakan untuk merubah profil jaringan pipa sehingga lengkungan dan bentangan bebas dapat dikurangi. Pembuatan parit biasanya dilakukan pada profil dasar laut yang lunak (Bai *et al, 2014*).

- ***Rock dumping***

  Ketika terdapat bentangan bebas mengisi ruang kosong dengan batu untuk merubah profil dasar laut salah satu cara untuk meniadakan bentangan bebas. Namun sayangnya akan diperlukan volume yang sangat besar (Bai *et al*, 2014).

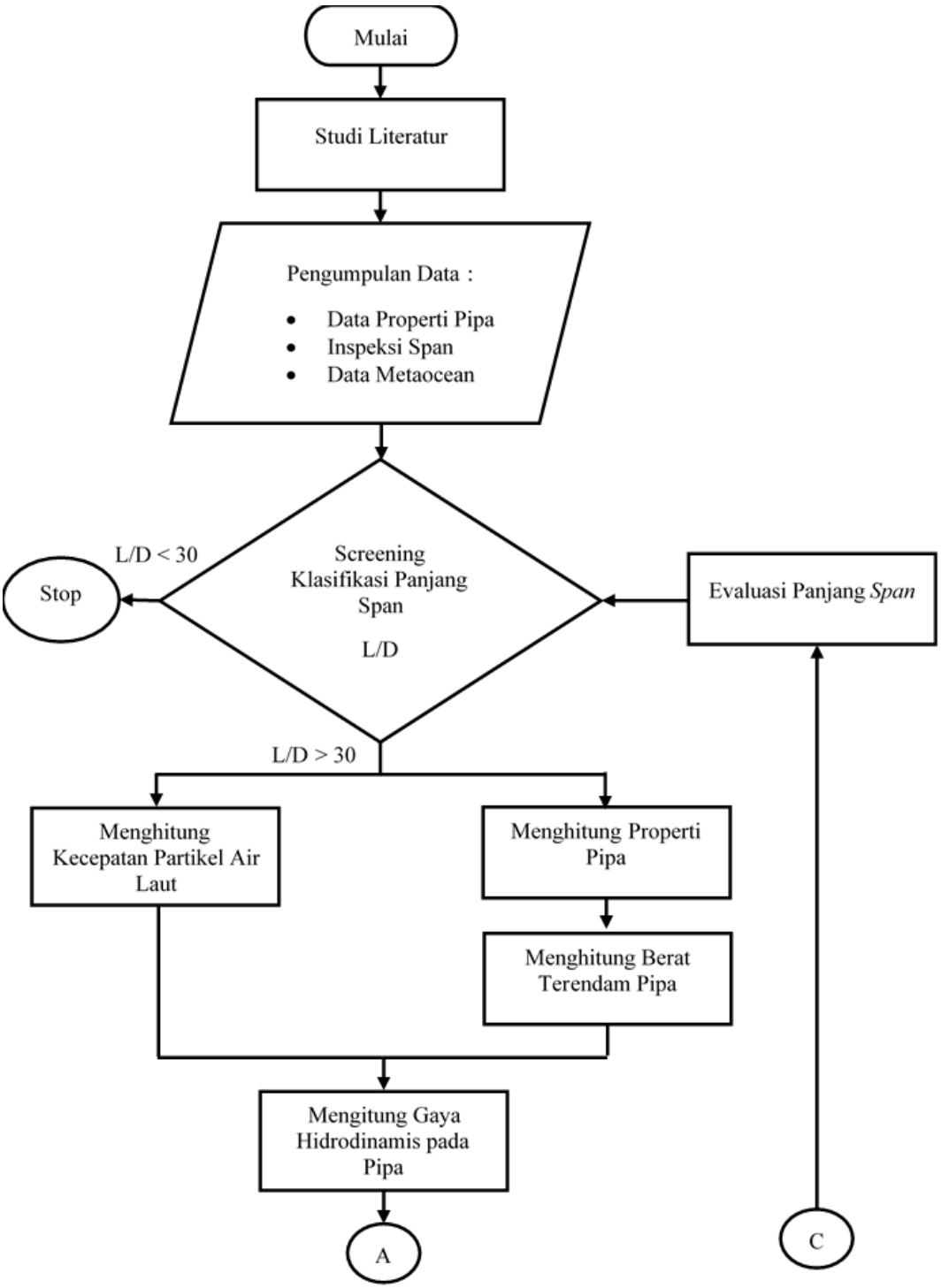
- ***Mechanical supports***

  Mechanical support dapat dipasang tanpa memerlukan penyelam, sehingga dapat digunakan dilaut dalam. *Mechanical support* memiliki dua kaki yang dipasang dibawah pipa pada bentangan bebas dengan terdapat penjepit diatasnya (tempat pipa diletakan). *Support* dibuat untuk menaikan elevasi pipa di bentangan bebasa sehingga dapat mengurangi lengkungan yang terjadi (Bai *et al*, 2014)

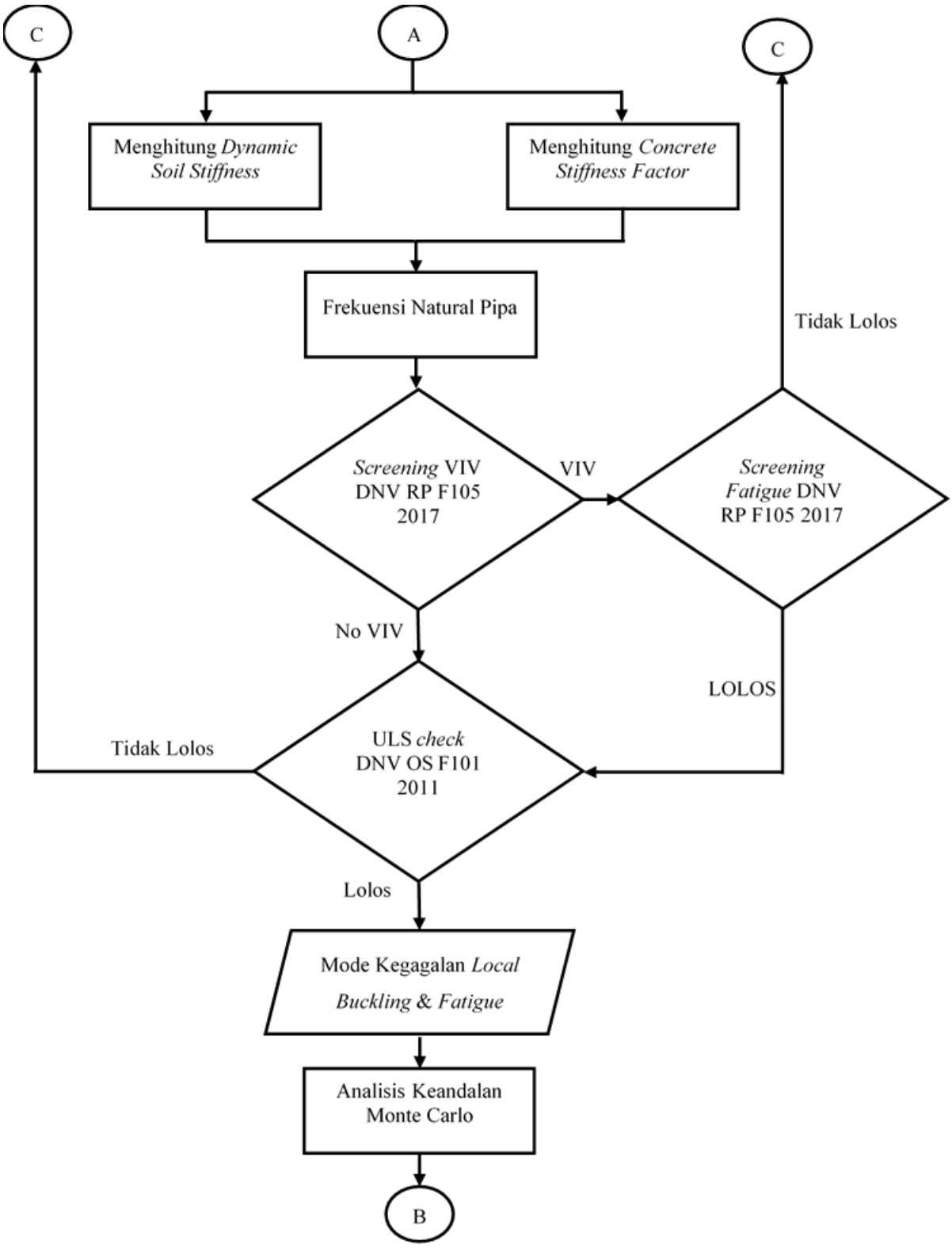
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir



Gambar 19 Diagram Alir Tugas Akhir (Lanjutan)



Gambar 20 Diagram Alir Tugas Akhir (Lanjutan)

Gambar 21 Diagram Alir Tugas Akhir (Lanjutan)

3.2. Prosedur Penelitian

Rumusan masalah yang telah dirumuskan sebelumnya diseleaikan dengan mengacu pada diagram alir. Diagram alir yang telah dibuat merupakan prosedur dalam melakukan analisis pada tugas akhir ini. Berikut penjelasan prosedur pengerjaan tugas akhir pada diagram alir:

1. Studi Literatur

Hal yang Pertama kali dilakukan dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini adalah dengan mengumpulkan literatur yang berasal dari buku, jurnal penelitian, laporan tugas akhir dan *codes.* Literatur yang dikumpulkan yang memiliki isi yang berkaitan dengan teori bentangan bebas, Keandalan jaringan pipa bawah laut, analisis bentangan bebas dan analisis kelelahan pipa bawah laut. *Codes* yang digunakan adalah DNV GL RP F105 (2017) & DNV RP C203 (2011) yang berisi tentang bentangan bebas dan analisis

fatigue, DNV OS F101 (2013) yang berkaitan dengan analisis ULS dan *local buckling*, DNV RP F116 (2015) yang berjudul *Integrity management of submarine pipeline systems.*

2. Pengumpulan Data

Langkah selanjutnya adalah mencari data-data yang diperlukan untuk melakukan analisis Tugas Akhir ini. Data yang digunakan merupakan data jaringan pipa bawah laut PT. X yang mengangkut fluida gas dari Platform A ke Platform B. Data *pipeline* berupa hasil survey ROV sepanjang jalur pipa bawah laut yang ditinjau, data desain properti pipa, data lingkungan (metaocean) dilokasi pipa beroperasi.

3. *Screening* Klasifikasi Panjang *Span*

Selanjutnya melakukan *screening* klasifikasi panjang bentangan bebas. Hal ini dilakukan guna mengeliminasi bentangan bebas yang memiliki peluang kegagalan sangat rendah. Sehingga pengerjaan analisis resiko pada bentangan bebas, dapat berfokus pada bentangan bebas yang memiliki peluang kegagalan. *Screening* klasifikasi panjang span dilakukan mengikuti ratio panjang span dengan diameter pipa yang telah dikelaskan pada DNV GL RP F105 (2017).

4. Perhitungan Properti dan Berat Terendam Pipa

Tahap pertama dengan memperhitungkan dimensi pipa. Dimensi pipa yang diperhitungkan meliputi Tebal diameter total pipa, diameter dalam pipa, diameter *concrete,* diameter *corrosion coating,* momen inesrsia, momen inersia *concrete,* dan luas penampang pipa. Kemudian dilakukan perhitungan massa efektif pipa.

Selanjutnya memperhitungkan berat terendam pipa dengan menjumlahkan seluruh berat struktur pipa yaitu berat pipa, berat konten pipa, berat *concrete* dan gaya apung pipa.

5. Perhitungan Kecepatan Partikel Air

Perhitungan kecepatan partikel air dilakukan dengan mengolah data lingkungan (metaocean) untuk mengetahui kecepatan partikel air di elevasi pipa. Kecepatan arus di dasar laut diakibatkan oleh arus, gelombang atau keduanya sekaligus. Hal ini sangat berbanding lurus dengan kedalaman

dasar laut, dimana jika semakin dalam pengaruh kecepatan partikel air pengaruh gelombang akan semakin kecil dan sebaliknya. Untuk kecepatan gelombang dapat dilakukan dengan analisis spectra untuk gelombang acak atau dengan menggunakan pendekatan berupa grafik yang terdapat pada *codes* DNV GL RP F105 (2017). Untuk efek arus perludilakukanya transformasi telebih dahulu menjadi kecepatan arus di elevasi pipa.

6. Perhitungan Gaya Hidrodinamis Pada Pipa

Gaya hidrodinamis pada pipa terjadi akibat adanya aliran air laut disekitar pipa. Gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa berupa gaya *drag* dan gaya inersia yang nantinya dapat mempengaruhi kestabilan pipa dalam beroperasi.

7. Perhitungan *Dynamic Soil Stiffness* dan *Concrete stiffness factor*

Dynamic soil stiffness terjadi akibat adanya interaksi antara pipa dengan tanah. Sedangkan *Concrete stiffness factor* adalah nilai kekakuan slimut beton yang menambah nilai kekakuan struktur pipa itu sendiri. Kedua-duanya sangat mempengaruhi dalam menentukan nilai β (*Relative Soil Stiffness parameter*) yang meruakan parameter yang mempengaruhi nilai panjang efeketif *freespan*.

8. Perhitungan Frekuensi Natural Pipa

Persamaan untuk memperhitungkan frekuensi natural pipa terdapat pada DNV GL RP F105 (2017). Sebelum menghitung frekuensi natural pipa terdapat parameter yang perlu dihitung terlebih dahulu seperti *effective axial load*, defleksi statis dan *critical bucling load.* Selain itu juga terdapat parameter CSF dan panjang *span* efektif yang menjadi salah satu pengaruh dalam frekuensi natural pipa.

9. *Screening Vortex Induced Vibration* (VIV)

Setelah melakukan perhitungan di atas langah selanjutnya menurut DNV RP F105 2017 melakukan pengecekan apakah bentangan bebas mengalami VIV atau tidak. Untuk bentangan bebas yang mengalami VIV maka perlu dilakukan *screening fatigue* sesuai yang terdapat pada DNV RP F105 2017. Untuk bentangan bebas yang tidak mengalami VIV maka

dilanjutkan dengan melakukan ULS *check* sesuai dengan *codes* DNV OS F101 2013.

10. ***Screening Fatigue***

    Hal ini dilakukan guna mengetahui *span* mana saja yang perlu dilakukanya analisis perhitungan umur kelelahan. Sesuai yang telah diatur pada *codes* DNV GL RP F105 (2017) parameter yang diperlukan untuk *screening* yaitu frekuensi natural pipa, *reduced velocity* dan *current flow ratio.* Jika syarat *screening* tidak terpenuhi maka perlu dilakukan *full fatigue analysis*.

    Setelah melakukan *screening* frekuensi natural, akan dilakukanya analisis umur kelelahan pada pipa yang mengalami bentangan bebas dan memenuhi kriteria *screening fatigue*. Analisis ini dilakukan agar mengetahui umur kelelahan pipa yang mengalami bentangan bebas

11. ***Ultimate Limit State Check***

    Selanjutnya melakukan *ultimate limit state check* untuk mengetahui tegangan-tegangan yang terjadi pada pipa memenuhi atau tidak memenuhi kriteria batas maksimum yang telah ditetapkan di DNV OS F101 (2013). Juga melekakukan analisis *local buckling* pada pipa-pipa yang mengalami bentangan bebas yang memiliki nilai tegangan kritis.

12. **Evaluasi Panjang Span**

    Tahapan ini dilakukan jika dalam proses analisis terdapat pipa yang mengalami kegagalan atau tidak memenuhi kriteria yang telah ditetapkan oleh DNV GL RP F105 (2017) dan DNV OS F101 (2013).

13. **Mode Kegagalan VIV dan *Local Buckling***

    Setelah Melakukan rangkaian analisis *fatigue* dan *local buckling.* Langkah selanjutnya merumuskan mode kegagalan untuk kedua jenis kegagalan yaitu kelelahan dan *local buckling.* Mode kegagalan nantinya akan menjadi kriteria yang digunakan dalam melakukan analisis keandalan menggunakan metode Monte Carlo.

14. **Analisis Keandalan Menggunakan Metode Monte Carlo**

    Anslisis keandalan menggunakan metode Monte Carlo dilakukan dengan cara mensimulasi mode kegagalan yang telah dirumuskan dilangkah

sebelumnya. Simulasi ini dilakukan dengan tujuan untuk menentukan peluang kegagalan pipa yang mengalami bentangan bebas.

15. **Perhitungan Konsekuensi Kegagalan**

    Pada langkah ini dilakukan perhitungan konsekuensi yang terjadi jika kegagalan terjadi. Konsekuensi yang diperhitungkan dalam analisis ini dalam segi *business* dan *safety*.

16. **Perhitungan Matriks Resiko**

    Pada langkah ini dilakukanya penilaian tingkat resiko kegagalan yang sesuai dengan *Risk Based Inspection.* Penilaian ini dilakukan dengan metode *semi-quantitative* untuk menentukan apakah resiko kegagalan dalam kategori rendah (*low*), sedang (*Medium*), dan tinggi (*High*).

17. **Perencanaan Inspeksi Berbasis Resiko**

    Selanjutnya merencanakan jadwal inspeksi yang sesuai dengan hasil analisis resiko untuk mengurangii probabilitas yang terjadi atau konsekuensi yang nantinya akan ditimbulkan. Perencanaan inspeksi pada jaringan pipa PT. X diarahkan pada bagian pipa yang mengalami bentangan bebas dan memiliki resiko kegagalan akibat *vortex induced vibration* dan *local buckling* yang cukup tinggi sesuai dengan DNV RP F105 (2017) dan DNV OS F101 (2013). Level resiko tertinggi dapat dilihat pada matriks resiko yang terdapat pada DNV RP F116 (2015).

18. **Saran Mitigasi**

    Saran mitigasi akan diberikan atau perlu dilakukan pada pipa yang memiliki nilai resiko kegagalan yang tinggi. Sehingga harapanya dapat mengurangi nilai resiko kegagalan itu sendiri baik dari segi peluang kegagalanya maupun konsekuensi yang ditimbulkannya.

19. **Kesimpulan dan Saran**

    Langkah terakhir dalam pengerjaan Tugas Akhir ini dengan menuliskan kesimpulan hasil analisis. Menuliskan saran untuk kepentingan penelitian selanjutnya agar dapat melakukan analisis ditingkat yang lebih tinggi lagi.

3.3 Data Pipa dan Data Lingkungan

Data yang digunakan dalam analisis pada Tugas Akhir ini merupakan data jaringan pipa yang mengangkut fluida gas dari Platform A ke Platform

B. Jaringan pipa ini memiliki diameter pipa baja sebesar 16 inch yang membentang sepanjang 19 km. Untuk lebih detailnya akan dijelaskan dalam sub-bab Data Pipa dan Data lingkungan Sebagai Berikut

3.3.1 Data Pipa

Berikut data pipa yang digunakan dalam analisis ini akan ditampilkan pada Tabel 27 dibawah ini :

Tabel 27 Desain data *pipeline* PT.X

PIPELINE ID NAME	16" MGL LLD - MMC
OD	16
SERVICE STATUS	PROD PIG
AREA	Lima
LENGTH (km)	19.07
YEAR BUILT	1997
DESIGN SERVICE	MGL
OD (INCH)	16
WT (INCH)	0.562
MATERIAL GRADE	API-5L-X60
SEAM TYPE	ERW
CORROSION COATING	5/32" D&W
CONCRETE COATING	2" THK 190 PCF
RATING	600
DESIGN PRESSURE (psi)	1350
DESIGN TEMPERATURE (°F)	200
OPERATING PRESSURE (psi)	200
OPERATING TEMPERATURE (°F)	90

Untuk data bentangan bebas yang terdapat pipeline ini akan ditampilkan pada Tabel 28 seperti dibawah ini:

Tabel 28 Data *free span* pada *pipeline* PT. X

Freespan Data		
KP	Length (m)	Max. Height (m)
0.099	6	1.65
0.463	7	0.25
0.78	18	0.3
0.84	7	0.15
0.935	13	0.3
1.043	6	0.15
1.271	7	0.15
1.483	8	0.3
1.514	12	0.25
1.535	9	0.15
1.55	19	0.3
1.587	13	0.3
1.653	5	0.2
1.785	10	0.15
1.83	11	0.2
1.861	8	0.2
1.992	6	0.15
2.009	7	0.2
2.101	12	0.3
2.163	20	0.3
2.264	7	0.2
2.28	4	0.1
2.305	8	0.3
2.32	7	0.3
2.343	26	0.3
2.381	25	0.35
2.421	10	0.25
2.445	9	0.35
2.523	10	0.35
2.552	18	0.25
2.578	13	0.25
2.639	15	0.25

Freespan Data		
KP	Length (m)	Max. Height (m)
9.372	6	0.1
9.527	5	0.1
10.04	9	0.2
10.313	11	0.15
10.651	7	0.15
11.205	14	0.3
11.249	10	0.15
11.297	8	0.15
11.307	8	0.15
11.336	9	0.2
11.488	7	0.1
11.556	10	0.1
11.611	12	0.2
11.638	13	0.2
11.701	13	0.1
11.727	13	0.1
11.764	12	0.15
11.869	10	0.15
11.889	12	0.2
11.974	18	0.3
12.101	9	0.05
12.133	7	0.05
12.176	9	0.05
12.197	4	0.05
12.229	13	0.1
12.252	8	0.05
12.295	11	0.1
12.319	5	0.05
12.383	5	0.05
12.485	17	0.35
12.516	9	0.2
12.537	14	0.2

Tabel 29 Data *free span* pada *pipeline* PT. X lanjutan.

Freespan Data		
KP	Length (m)	Max. Height (m)
2.665	12	0.15
2.698	12	0.3
2.723	5	0.2
2.737	18	0.4
2.763	4	0.15
2.775	6	0.3
2.837	7	0.15
2.853	12	0.25
2.882	17	0.25
2.912	8	0.2
2.932	12	0.45
3.023	13	0.15
3.04	5	0.15
3.053	7	0.2
3.07	24	0.25
3.155	20	0.2
3.194	21	0.35
3.249	12	0.25
3.268	6	0.2
3.299	12	0.2
3.332	13	0.2
3.353	14	0.15
3.389	11	0.25
3.406	23	0.25
3.543	4	0.1
3.574	10	0.15
3.657	9	0.15
3.75	9	0.2
3.883	10	0.2
4.165	14	0.15
4.63	7	0.15
5.241	6	0.01
6.393	6	0.05
8.657	11	0.05
8.944	5	0.1
8.986	11	0.4

Freespan Data		
KP	Length (m)	Max. Height (m)
12.557	14	0.25
12.638	10	0.15
12.683	7	0.2
12.695	12	0.2
12.762	10	0.15
12.803	7	0.15
12.837	14	0.2
12.874	6	0.15
14.113	15	0.2
14.385	17	0.3
14.433	5	0.2
15.085	10	0.2
15.566	4	0.15
15.594	11	0.2
15.924	10	0.2
16.056	8	0.2
16.365	26	0.6
16.392	34	0.5
16.431	16	0.4
16.457	15	0.15
16.538	5	0.1
16.564	10	0.15
16.605	7	0.15
16.718	10	0.25
16.736	12	0.2
16.811	17	0.2
16.842	13	0.15
16.865	11	0.15
17.032	12	0.15
17.167	12	0.15
17.287	10	0.15
17.309	9	0.15
17.353	10	0.15
17.665	25	0.55
17.913	62	0.6
18.922	36	0.5

Data *free span* didapati berdasarkan hasil survey menggunakan ROV. Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 16 dimana terdapat banyak sekali bentangan bebas pada *pipeline* ini. Dengan jumlah 136 *free span,* bahkan terdapat panjang bentangan sepanjang 62 m pada KP 17.913. Demi menjaga faktor keamanan dalam beroperasi *pipeline* ini, perlu dilakukan analisis resiko bentangan bebas sehingga nantinya dapat dilakukan inspeksi dengan penjadwalan inspeksi menggunakan metode *Risk Based Inspection.*

3.3.2 Data Lingkungan

Data lingkungan digunakan untuk menunjang analisis resiko bentangan bebas pada jaringan pipa PT.X. Untuk lebih detailnya data lingkungan yang digunakan dalam analisis Tugas akhir ini akan ditampilkan pada Tabel 29 30 dibawah ini:

Tabel 29 Data lingkungan pada rata-rata kedalaman 14 meter.

MGRID 2-8 5^0 50' S – 5^0 55' S / 107^0 09' E – 107^0 22' E Average Water *Depth* 14 Meters				
Meta Ocean Parameter			Return Period (years)	
Item	*Not*ation	Unit	1	100
Wind Speed				
60 minute mean	U_{60}	m/s	9.9	20.6
1 minute mean	U_1	m/s	12.3	25.7
3 second gust	U_{gust}	m/s	14.9	31.2
Wave Height				
Significant Wave Height	H_s	Meters	2	3.1
Significant Wave Periode	T_S	S	7.1	8.5
Significant Wave *Length*	L_S	Meters	67.8	86.6
Maximum Individual Wave Height	H_{max}	Meters	3.5	5.5
Maximum Individual wave Wave Period	T_{max}	S	7	8.7
Maximum Individual Wave *Length*	L_{max}	Meters	66.2	89.7
Wave Steepness				
Significant Wave Steepness	$(H/L)_s$		0.029	0.035
Maximum Individual Wave Steepness	$(H/L)_{max}$		0.053	0.062

Tabel 29 Data lingkungan pada rata-rata kedalaman 14 meter lanjutan.

MGRID 2-8 5^0 50' S – 5^0 55' S / 107^0 09' E – 107^0 22' E Average Water *Depth* 14 Meters				
Meta Ocean Parameter			Return Period (years)	
Item	*Not*ation	Unit	1	100
Water Level				
Astronomical Tide :				
Highest (Above MSL)	HHWL	Meters	0.57	
Lowest (Below MSL)	LLWL	Meters	0.47	
Storm Surge (Above MSL)	η	Meters	0.05	0.22
Current Speed				
at 0% of *depth*	V_0	m/s	0.87	1.3
10% of *depth*	V_{10}	m/s	0.77	1.08
20% of *depth*	V_{20}	m/s	0.69	0.92
30% of *depth*	V_{30}	m/s	0.63	0.8
40% of *depth*	V_{40}	m/s	0.59	0.71
50% of *depth*	V_{50}	m/s	0.56	0.65
60% of *depth*	V_{60}	m/s	0.54	0.6
70% of *depth*	V_{70}	m/s	0.52	0.57
80% of *depth*	V_{80}	m/s	0.51	0.54
90% of *depth*	V_{90}	m/s	0.5	0.53
100% of *depth*	V_{100}	m/s	0.49	0.51
Soil Type	Very Soft Clay			

Tabel 30 Data lingkungan pada rata - rata kedalaman 23 Meter.

MGRID 3-4 5^0 60' S – 6^0 00' S / 107^0 22' E – 107^0 35' E Average Water *Depth* 23 Meters				
Meta Ocean Parameter			Return Period (years)	
Item	*Not*ation	Unit	1	100
Wind Speed				
60 minute mean	U_{60}	m/s	9.9	20.6
1 minute mean	U_1	m/s	12.3	25.7
3 second gust	U_{gust}	m/s	14.9	31.2
Wave Height				
Significant Wave Height	H_s	Meters	1.8	3.6
Significant Wave Periode	T_S	S	6.3	8.3
Significant Wave *Length*	L_S	Meters	60.9	97.1

Tabel 30 Data lingkungan pada rata - rata kedalaman 23 meter lanjutan.

MGRID 3-4 5^0 60' S – 6^0 00' S / 107^0 22' E – 107^0 35' E Average Water *Depth* 23 Meters				
Meta Ocean Parameter			Return Period (years)	
Item	Notation	Unit	1	100
Maximum Individual Wave Height	H_{max}	Meters	3.2	6.4
Maximum Individual wave Wave Period	T_{max}	S	6.6	9.4
Maximum Individual Wave *Length*	L_{max}	Meters	67	116.7
Wave Steepness				
Significant Wave Steepness	$(H/L)_s$		0.029	0.035
Maximum Individual Wave Steepness	$(H/L)_{max}$		0.048	0.055
Astronomical Tide :				
Highest (Above MSL)	HHWL	Meters	0.53	
Lowest (Below MSL)	LLWL	Meters	0.61	
Storm Surge (Above MSL)	η	Meters	0.04	0.18
Current Speed				
at 0% of *depth*	V_0	m/s	0.79	1.22
10% of *depth*	V_{10}	m/s	0.69	1
20% of *depth*	V_{20}	m/s	0.61	0.84
30% of *depth*	V_{30}	m/s	0.55	0.72
40% of *depth*	V_{40}	m/s	0.51	0.63
50% of *depth*	V_{50}	m/s	0.48	0.57
60% of *depth*	V_{60}	m/s	0.46	0.52
70% of *depth*	V_{70}	m/s	0.44	0.49
80% of *depth*	V_{80}	m/s	0.43	0.46
90% of *depth*	V_{90}	m/s	0.42	0.45
100% of *depth*	V_{100}	m/s	0.42	0.43
Soil Type	Very Soft Clay			

Terdapat dua data lingkungan hal ini dikarenakan jaringan pipa membentang sepanjang 19 km. Hal ini menyebabkan jaringan pipa memasuki dua grid data *metaocean* yang berbeda.

BAB IV
Analisis dan Pembahasan

4.1. *Screening* Klasifikasi Panjang Bentangan Bebas

Screening klasifikasi *span* dilakukan untuk mengetahui bentangan bebas mana saja yang harus di tinjau lebih jauh. Dalam DNV RP F105 2017 klasifikasi *span* seperti pada Tabel 1 di atas bertujuan untuk mengklasifikasikan panjang bentangan bebas berdasarkan perilaku respon dinamisnya. Dalam pengerjaan analisis ini bentangan bebas yang ditinjau lebih lanjut adalah bentangan bebas yang memiliki rasio L/D > 30. Hal ini bertujuan untuk mempermudah pengerjaan sehingga bentangan bebas yang memiliki amplifikasi respon dinamis yang kecil tidak perlu ikut dianalisis.

Dari *screening* klasifikasi panjang bentangan bebas ini dari 136 bentangan bebas yang terjadi pada jaringan pipa PT. X terdapat 22 bentangan bebas yang memiliki rasio L/D > 30. Untuk lebih detailnya akan ditampilkan pada Tabel 31 seperti dibawah ini.

Tabel 31 Hasil klasifikasi rasio panjang bentangan bebas terhadap diameter.

KP	Length (m)	Max. Height (m)	Depth (m)	L/D
0.78	18	0.3	29.3	34.9
1.55	19	0.3	25	36.8
2.163	20	0.3	21.8	38.8
2.343	26	0.3	20.9	50.4
2.381	25	0.35	20.7	48.5
2.552	18	0.25	19.8	34.9
2.737	18	0.4	19.2	34.9
2.882	17	0.25	18.5	32.9
3.07	24	0.25	18	46.5
3.155	20	0.2	17.5	38.8
3.194	21	0.35	17.3	40.7
3.406	23	0.25	16.5	44.6
11.974	18	0.3	19.2	34.9
12.485	17	0.35	18.3	32.9
14.385	17	0.3	16.1	32.9
16.365	26	0.6	16.7	50.4
16.392	34	0.5	17	65.9

Tabel 35 Hasil klasifikasi rasio panjang bentangan bebas terhadap diameter (Lanjutan).

KP	Length (m)	Max. Height (m)	Depth (m)	L/D
16.431	16	0.4	17	31.0
16.811	17	0.2	17.3	32.9
17.665	25	0.55	16.8	48.5
17.913	62	0.6	17	120.2
18.922	36	0.5	15.3	69.8

Dari hasil klasifikasi di atas, 22 bentangan bebas yang memiliki rasio L/D > 30 dapat dianggap amplifikasi respons dinamis terjadi maka perlu dilakukanya analisis lebih lanjut. Bentangan bebas tersebut akan di analisis lebih lanjut dalam Tugas Akhir ini untuk permasalahan *vortex induced vibration* (VIV) dan *local buckling*.

4.2. Perhitungan Properti Pipa

Perhitungan properti pipa dilakukan untuk menghitung diameter total pipa itu sendiri, *cross section area,* dan *moment inertia.* Hal ini digunakan sebagai dasar perhitungan analisis bentangan bebas selanjutnya. Berikut Tabel 32 menampilkan hasil perhitungan properti pipa.

Tabel 32 Hasil perhitungan properti pipa.

Paremeter	**Satuan**	**Simbol**	**Nilai**
Diameter Pipa	m	D_s	0.406
Tebal dinding pipa	m	t_{nom}	0.014
Corrosion allowance	m	t_{intcor}	0.003
Tebal dinding pipa	m	t_2	0.011
Ketebalan *coating* korosi	m	t_{cor}	0.004
Ketebalan *coating* beton	m	$t_{concrete}$	0.051
Diameter total Pipa	m	D_t	0.516
Luasan lingkar dalam pipa	m^2	A_i	0.116
Luasan *cross section* pipa baja	m^2	A_{pipa}	0.014
Luasan *cross section coating* korosi	m^2	A_{korosi}	0.005
Luasan *cross section coating* baja	m^2	$A_{concrete}$	0.074
Moment inersia pipa	m^4	I_{st}	2.74E-04
Moment inersia beton	m^4	I_{conc}	2.03E-03

Perhitungan properti pipa akan digunakan untuk menghitung massa efektif dan berat terendam pipa pada subbab selanjutnya

4.2.1. Perhitungan massa efektif pipa

Massa efektif pipa merupakan penjumlahan dari massa seluruh struktur pipa dengan massa fluida yang dialirkan dan massa tambah. Hasil penjumlahan seluruh massa pipa tanpa massa tambah akan ditampilkan pada Tabel 38 sebagai berikut.

Tabel 33 Hasil perhitungan massa pipa tanpa massa tambah.

Perhitungan Massa	Satuan	Simbol	Nilai
Massa fluida	Kg/m	M_c	3.39
Massa pipa baja	Kg/m	M_{st}	110.10
Massa *coating* korosi	Kg/m	M_{cc}	6.55
Massa *coating* beton	Kg/m	M_{conc}	225.93
Massa struktur jaringan pipa	Kg/m	M_{str}	342.58

Massa tambah merupakan massa yang bertambah akibat fluida disekitar pipa. Untuk perhitungan massa tambah diperlukan koefisien massa tambah yang perlu dicari terlebih dahulu. Koefisien massa tambah dapat dicari dengan menggunakan persamaan yang terdapat dalam DNV GL RP F105 2017 seperti pada Persamaan 2.16 di atas. Hasil perhitungan koefisien massa tambah dan massa efektif akan ditampilkan pada Tabel 39 sebagai berikut.

Tabel 34 Hasil perhitungan massa efektif pipa

Massa Tambah Pipa Tiap Bentangan Bebas					
KP	**Max. Height (m)**	**e/D_t**	**C_a**	**M_a (Kg/m)**	**M_e (Kg/m)**
0.78	0.3	0.58	1.09	233.47	579.44
1.55	0.3	0.58	1.09	233.47	579.44
2.163	0.3	0.58	1.09	233.47	579.44
2.343	0.3	0.58	1.09	233.47	579.44
2.381	0.35	0.68	1.04	223.79	569.76
2.552	0.25	0.48	1.15	245.89	591.86

Tabel 34 Hasil perhitungan massa efektif pipa (lanjutan).

KP	Max. Height (m)	e/D_t	C_a	M_a (Kg/m)	M_e (Kg/m)
2.737	0.4	0.78	1.01	216.03	562.00
2.882	0.25	0.48	1.15	245.89	591.86
3.07	0.25	0.48	1.15	245.89	591.86
3.155	0.2	0.39	1.22	262.41	608.38
3.194	0.35	0.68	1.04	223.79	569.76
3.406	0.25	0.48	1.15	245.89	591.86
11.974	0.3	0.58	1.09	233.47	579.44
12.485	0.35	0.68	1.04	223.79	569.76
14.385	0.3	0.58	1.09	233.47	579.44
16.365	0.6	1.16	1	214.29	560.27
16.392	0.5	0.97	1	214.29	560.27
16.431	0.4	0.78	1.01	216.03	562.00
16.811	0.2	0.39	1.22	262.41	608.38
17.665	0.55	1.07	1	214.29	560.27
17.913	0.6	1.16	1	214.29	560.27
18.922	0.5	0.97	1	214.29	560.27

4.2.2. Perhitungan berat terendam pipa

Analisis berat terendam pipa diperlukan untuk mengetahui berat pipa saat berada di dasar laut. Berat pipa saat berada di udara berbeda dengan berat pipa saat berada di dalam air. Hal ini diakibatkan oleh gaya apung. Hasil perhitungan berat terendam pipa disajikan dalam Tabel 35 sebagai berikut.

Tabel 35 Hasil perhitungan berat terendam pipa.

Perhitungan Berat	Satuan	Simbol	Nilai
Berat pipa	N/m	W_{st}	1080.12
Berat *coating* korosi	N/m	W_{cc}	64.25
Berat *coating* beton	N/m	W_{conc}	2216.35
Berat fluida	N/m	W_{fluida}	33.25
Gaya apung	N/m	F_{buoy}	2102.22
Berat Terendam Pipa	N/m	W_{sub}	1291.76

4.3. Analisis Kecepatan Partikel Air

Analisis kecepatan partikel air dilakukan untuk mengetahui kecepatan partikel air laut pada elevasi pipa. Kecepatan partikel di elevasi pipa disebabkan oleh arus dan gelombang. Sehingga nantinya dapat diketahui kecepatan partikel air laut akibat arus, gelombang dan total keduanya.

4.3.1 Perhitungan kecepatan arus pada pipa

Arus yang dianalisis dalam Tugas Akhir ini adalah arus yang tegak lurus dengan sumbu axis pipa dikarenakan memiliki pengaruh paling besar. Pada pengerjaan Tugas akhir ini kecepatan arus yang digunakan adalah kecepeatan arus pada *inner zone* dimana kecepatan arus menjadi berbeda-beda di dasar laut akibat geometri dasar laut. Perhitungan kecepatan arus pada *inner zone* akan ditampilkan pada Tabel 36 seperti dibawah ini.

Tabel 36 Kecepatan arus di *inner zone* pada elevasi pipa.

KP	e (m)	Elevasi diatas dasar laut (m)	Uc (m/s)	
			1 tahun	100 tahun
0.78	0.3	0.558	0.40	0.41
1.55	0.3	0.558	0.40	0.41
2.163	0.3	0.558	0.40	0.41
2.343	0.3	0.558	0.40	0.41
2.381	0.35	0.608	0.40	0.41
2.552	0.25	0.508	0.40	0.41
2.737	0.4	0.658	0.41	0.42
2.882	0.25	0.508	0.40	0.41
3.07	0.25	0.508	0.40	0.41
3.155	0.2	0.458	0.39	0.40
3.194	0.35	0.608	0.40	0.41
3.406	0.25	0.508	0.40	0.41
11.974	0.3	0.558	0.40	0.41
12.485	0.35	0.608	0.40	0.41
14.385	0.3	0.558	0.40	0.41
16.365	0.6	0.858	0.41	0.42
16.392	0.5	0.758	0.41	0.42
16.431	0.4	0.658	0.41	0.42
16.811	0.2	0.458	0.39	0.40

Tabel 36 Kecepatan arus *di inner zone* pada elevasi pipa lanjutan.

KP	e (m)	Elevasi diatas dasar laut (m)	Uc (m/s)	
			1 tahun	100 tahun
17.665	0.55	0.808	0.41	0.42
17.913	0.6	0.858	0.41	0.42
18.922	0.5	0.758	0.41	0.42

4.3.2 Perhitungan kecepatan partikel air laut di pipa akibat gelombang

Kecepatan partikel air laut di elevasi pipa akibat gelombang dapat dicari dengan mengolah data geloombang acak menggunakan *spectrum* gelombang. Seperti yang telah dibahas di atas dikarenakan spektra JONSWAP dapat digunakan di perairan di Indonesia maka dalam Tugas Akhir ini menggunakan spektra gelombang JONSWAP. Dalam Tugas akhir ini terdapat 2 blok data metaocean yang berbeda dikarenakan pipa membentang sepanjang 19 km. data gelombang dan parameter JONSWAP akan ditampilkan pada Tabel 37 dan Tabel 38 seperti dibawab ini.

Tabel 37 Data gelombang dan parameter JONSWAP kedalaman rata-rata 23 m.

Average depth 23 m				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahunan	100 tahunan	
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	1.8	3.6	m
Periode Gelombang Signifikan	T_s	6.3	8.3	s
frekuensi Gelombang Signifikan	ω_s	1.00	0.76	rad/s
Percepatan Gravitasi	g	9.81	9.81	m/s
Periode Puncak Gelombang	T_p	6.66	8.77	s
Frekuensi Puncak Gelombang	ω_p	0.94	0.72	rad/s
Fungsi Distribusi	φ	4.96	4.62	
Peakness Parameter	γ	1.04	1.54	
Konstanta Generalised philips	α	0.01	0.01	
Parameter Lebar Spektra	σ	0.09	0.09	

Tabel 38 Data gelombang dan parameter JONSWAP kedalaman rata-rata 14 m.

Average depth 14 m				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahunan	100 tahunan	
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	2	3.1	m
Periode Gelombang Signifikan	T_s	7.1	8.5	s
frekuensi Gelombang Signifikan	ω_s	0.88	0.74	rad/s
Percepatan Gravitasi	g	9.81	9.81	m/s
Periode Puncak Gelombang	T_p	7.47	8.95	s
Frekuensi Puncak Gelombang	ω_p	0.84	0.70	rad/s
Fungsi Distribusi	φ	5.28	5.08	
Peakness Parameter	γ	1	1	
Konstanta Generalised philips	α	0.01	0.01	
Parameter Lebar Spektra	σ	0.09	0.09	

Langkah selanjutnya mencari angka gelombang, angka gelombang dicari untuk masing-masing bentangan bebas karena memiliki kedalaman yang berbeda. Angka gelombang dihitung menggunakan Persamaan *transcendental* dengan menggunakan metode Newton-Rhapson. Setelah angka gelombang diperoleh, selanjutnya menghitung spektrum gelombang dengan metode Simpson. Spektrum gelombang dapat digunakan untuk menentukan momen spektrum yang nantinya dapat digunakan untuk mengetahui nilai kecepatan aliran partikel air akibat gelombang pada elevasi pipa seperti pada Tabel 39.

Tabel 39 Perhitungan *wave - induced velocity spectrum* pada KP 0.78.

Spektra Gelombang 1 tahunan						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0E+00	1E-06	0E+00	0E+00	0E+00
0.1	4	0E+00	1E-04	0E+00	0E+00	0E+00
0.2	2	4E-266	4E-04	1E-269	3E-269	1E-270
0.3	4	3E-51	9E-04	2E-54	1E-53	9E-55
0.4	2	1E-15	2E-03	2E-18	4E-18	6E-19
0.5	4	3E-06	3E-03	9E-09	3E-08	9E-09
0.6	2	5E-03	4E-03	2E-05	4E-05	1E-05
0.7	4	8E-02	5E-03	4E-04	2E-03	8E-04

Tabel 39 Perhitungan *wave - induced velocity spectrum* pada KP 0.78 (lanjutan).

ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	SM*S_{UU}	ω^2 * SM * SUU
0.8	2	2E-01	7E-03	1E-03	3E-03	2E-03
0.9	4	3E-01	8E-03	3E-03	1E-02	8E-03
1	2	3E-01	1E-02	3E-03	6E-03	6E-03
1.1	4	3E-01	1E-02	3E-03	1E-02	2E-02
1.2	2	2E-01	1E-02	3E-03	6E-03	8E-03
1.3	4	2E-01	2E-02	3E-03	1E-02	2E-02
1.4	2	1E-01	2E-02	2E-03	5E-03	9E-03
1.5	4	9E-02	2E-02	2E-03	8E-03	2E-02
1.6	2	6E-02	3E-02	2E-03	3E-03	9E-03
1.7	4	5E-02	3E-02	1E-03	6E-03	2E-02
1.8	2	4E-02	3E-02	1E-03	3E-03	8E-03
1.9	4	3E-02	4E-02	1E-03	4E-03	2E-02
2	1	2E-02	4E-02	1E-03	1E-03	4E-03
				SUM	0.079885798	0.139645763

Nilai kecepatan aliran pada elevasi pada pipa juga dipengaruhi oleh *reduction factor*. Untuk nilai *reduction factor* dapat ditentukan menggunakan grafik pada Gambar 8. Untuk nilai *spreading parameter* sesuai yang dengan saran yang terdapat di DNV GL RP F105 (2017) terhadap *seastate* adalah 6. Hasil perhitungan untuk kecepatan aliran pada KP 0.78 dapat dilihat pada Tabel 40 sebagai berikut.

Tabel 40 Hasil perhitungan kecepatan aliran pada KP 0.78

Parameter	Simbol	Nilai
Momen Spektra	M_0	0.003
Momen Spektra	M_2	0.005
Amplitudo Kecepatan aliran pada pipa	U_s	0.103
Mean Zero Up-crossing period	T_u	4.752
Reduction Factor	R_D	0.950

Kecepatan arus dan gelombang yang telah dihitung dijumlahkan untuk mengetahui kecepatan aliran air laut di elevasi pipa total. Penjumlahan kecepatan total dilakukan dengan penambahan antara $U_{c,1\ year}$ dengan $U_{w,100years}$ atau sebaliknya kondisi ini untuk menggambarkan kondisi ekstrim

yang mungkin terjadi. Untuk kecepatan aliran pada elevasi pipa akan ditampilkan pada Tabel 41 seperti dibawah ini.

Tabel 41 Kecepatan aliran partikel air di elevasi pipa.

KP	Uc (m/s)		U_w (m/s)		U_{tot} (m/s)	
	1 tahun	100 tahun	1 tahun	100 tahun	$U_{c100} + U_{w1}$	$U_{C1} + U_{W100}$
0.78	0.40	0.41	0.10	0.52	0.51	0.92
1.55	0.40	0.41	0.15	0.66	0.56	1.06
2.163	0.40	0.41	0.20	0.79	0.61	1.19
2.343	0.40	0.41	0.22	0.83	0.63	1.23
2.381	0.40	0.41	0.23	0.84	0.64	1.24
2.552	0.40	0.41	0.25	0.88	0.65	1.28
2.737	0.41	0.42	0.26	0.91	0.68	1.32
2.882	0.40	0.41	0.28	0.95	0.69	1.35
3.07	0.40	0.41	0.29	0.98	0.70	1.37
3.155	0.39	0.40	0.31	1.01	0.71	1.40
3.194	0.40	0.41	0.31	1.02	0.73	1.42
3.406	0.40	0.41	0.34	1.07	0.75	1.46
11.974	0.40	0.41	0.40	0.83	0.81	1.23
12.485	0.40	0.41	0.42	0.87	0.84	1.27
14.385	0.40	0.41	0.50	0.99	0.91	1.39
16.365	0.41	0.42	0.48	0.95	0.90	1.37
16.392	0.41	0.42	0.47	0.94	0.89	1.35
16.431	0.41	0.42	0.47	0.94	0.88	1.34
16.811	0.39	0.40	0.46	0.92	0.86	1.31
17.665	0.41	0.42	0.48	0.95	0.90	1.36
17.913	0.41	0.42	0.47	0.94	0.89	1.35
18.922	0.41	0.42	0.53	1.03	0.95	1.44

4.4. Analisis Parameter *Vortex Induced Vibration*

Parameter *vortex induced vibration* (VIV) yang digunakan dalam analisis Tugas Akhir ini rasio aliran arus, *staility parameter, keulegan carpenter,* bilangan Reynolds, *reduced velocity*, dan *dynamic soil stiffness.*

4.4.1 Current flow ratio

Current flow ratio adalah salah satu parameter penting dalam analisis VIV. *Current flow ratio* sendiri di dalam DNV GL RP F105 menjadi parameter yang menggambarkan pengaruh dominan kecepatan aliran

partikel air laut di elevasi pipa. Pengaruh kecepatan aliran partikel air laut disebabkan oleh dua penyebab, yaitu arus dan gelombang. Untuk hasil perhitungan *current flow ratio* akan ditampilkan pada Tabel 42 sebagai berikut.

Tabel 42 Perhitungan *current flow ratio* pada masing-masing bentangan bebas.

KP	Uc (m/s)		U_w (m/s)		α
	1 tahun	100 tahun	1 tahun	100 tahun	
0.78	0.40	0.41	0.10	0.52	0.81
1.55	0.40	0.41	0.15	0.66	0.73
2.163	0.40	0.41	0.20	0.79	0.67
2.343	0.40	0.41	0.22	0.83	0.65
2.381	0.40	0.41	0.23	0.84	0.64
2.552	0.40	0.41	0.25	0.88	0.62
2.737	0.41	0.42	0.26	0.91	0.61
2.882	0.40	0.41	0.28	0.95	0.59
3.07	0.40	0.41	0.29	0.98	0.58
3.155	0.39	0.40	0.31	1.01	0.57
3.194	0.40	0.41	0.31	1.02	0.57
3.406	0.40	0.41	0.34	1.07	0.55
11.974	0.40	0.41	0.40	0.83	0.51
12.485	0.40	0.41	0.42	0.87	0.49
14.385	0.40	0.41	0.50	0.99	0.45
16.365	0.41	0.42	0.48	0.95	0.47
16.392	0.41	0.42	0.47	0.94	0.47
16.431	0.41	0.42	0.47	0.94	0.47
16.811	0.39	0.40	0.46	0.92	0.47
17.665	0.41	0.42	0.48	0.95	0.47
17.913	0.41	0.42	0.47	0.94	0.48
18.922	0.41	0.42	0.53	1.03	0.44

Untuk $\alpha > 0.8$ berarti aliran fluida di luar pipa didominasi oleh arus pasang surut, sedangkan untuk $0.5 < \alpha < 0.8$ aliran fluida di luar pipa didominasi oleh alirian partikal air akibat gelombang namun kondisinya aliran arus pasang surut yang terjadi ditumpukan dengan gelombang, dan untuk $\alpha < 0.5$ aliran partikel air di luar pipa didominasi oleh gelombang dengan kondisi aliran partikel akibat gelombang ditumpukan dengan arus.

4.4.2 Stability parameter

Parameter stabilitas mempengaruhi *reduced velocity* terutama keaadaan *in-line*. Parameter stabilitas sendiri dipengaruhi oleh massa efektif pipa dan total modal *damping.* Dimana total modal *damping* sendiri terdiri dari *structural damping, soil damping,* dan *hydrodynamic damping*. Dalam DNV GL RP F105 2017 demi menjamin keamanan jaringan pipa nantinya parameter stabilitas diabagi dengan *safety factor*. Untuk hasil perhitungan parameter stabilitas ditampilkan pada Tabal 43 seperti dibawah ini.

Tabel 43 Hasil perhitungan parameter stabilitas pada masing-masing bentangan bebas.

KP	M_e (Kg/m)	K_S	K_{SD}
0.78	579.44	0.80	0.92
1.55	579.44	0.80	0.92
2.163	579.44	0.80	0.92
2.343	579.44	0.80	0.92
2.381	569.76	0.79	0.91
2.552	591.86	0.82	0.94
2.737	562.00	0.78	0.89
2.882	591.86	0.82	0.94
3.07	591.86	0.82	0.94
3.155	608.38	0.84	0.97
3.194	569.76	0.79	0.91
3.406	591.86	0.82	0.94
11.974	579.44	0.80	0.92
12.485	569.76	0.79	0.91
14.385	579.44	0.80	0.92
16.365	560.27	0.77	0.89
16.392	560.27	0.77	0.89
16.431	562.00	0.78	0.89
16.811	608.38	0.84	0.97
17.665	560.27	0.77	0.89
17.913	560.27	0.77	0.89
18.922	560.27	0.77	0.89

4.4.3 Bilangan Keulegan-Carpenter dan Bilangan Reynolds

Bilangan Keulegan-Carpenter dan bilangan Reynolds merupakan parameter yang menggambarkan perubahan jenis aliran partikel air

(laminar/turbulen) disekitar pipa. Bilangan ini dipengaruhi oleh kecepatan partikel air, dan diameter pipa bawah laut. Hasil perhitungan bilangan Keulegan-Carpenter dan bilangan Reynolds akan ditampilkan pada Tabel 44 seperti dibawah ini.

Tabel 44 Hasil perhitungan bilangan Reynolds dan Bilangan Keulegan-Carpenter disekitar pipa.

KP	U_w (m/s)		Re	KC	
	1 tahun	100 tahun		1 tahun	100 tahun
0.78	0.10	0.52	4.54E+05	0.90	8.43
1.55	0.15	0.66	5.22E+05	1.38	10.66
2.163	0.20	0.79	5.85E+05	1.88	12.71
2.343	0.22	0.83	6.05E+05	2.05	13.36
2.381	0.23	0.84	6.11E+05	2.10	13.51
2.552	0.25	0.88	6.29E+05	2.28	14.20
2.737	0.26	0.91	6.48E+05	2.42	14.70
2.882	0.28	0.95	6.62E+05	2.58	15.29
3.07	0.29	0.98	6.76E+05	2.71	15.74
3.155	0.31	1.01	6.88E+05	2.84	16.19
3.194	0.31	1.02	6.99E+05	2.90	16.39
3.406	0.34	1.07	7.20E+05	3.12	17.18
11.974	0.40	0.83	6.04E+05	3.89	13.65
12.485	0.42	0.87	6.26E+05	4.16	14.35
14.385	0.50	0.99	6.81E+05	4.91	16.25
16.365	0.48	0.95	6.73E+05	4.70	15.72
16.392	0.47	0.94	6.62E+05	4.59	15.44
16.431	0.47	0.94	6.60E+05	4.59	15.44
16.811	0.46	0.92	6.45E+05	4.48	15.17
17.665	0.48	0.95	6.69E+05	4.66	15.62
17.913	0.47	0.94	6.65E+05	4.59	15.45
18.922	0.53	1.03	7.10E+05	5.22	17.04

Dari hasil perhitungan diatas, dapat dilihat bahwa bilangan Reynolds yang terjadi memiliki nilai 10^5 sehingga dapat dikatakan bahwa aliran yang semula laminar bertransisi menjadi aliran turbulen. Sehingga dapat dikatakan fenomena *Vortex induced vibration* dapat terjadi.

4.5. Analisis Gaya Hidrodinamis

Analisis gaya hidrodinamis dilakukan guna mengetahui besaran gaya-gaya yang terjadi akibat pergerakan fluida disekitar pipa. Gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa adalah gaya *drag* dan gaya angkat (*lift*).

4.5.1 Gaya *Drag*

Gaya *drag* yang terjadi pada pipa yang mengalami bentangan bebas memberikan pengaruh pada defleksi yang terjadi. Gaya drag umumnya menjadi variabel yang memiliki peranan yg cukup penting dalam analisis *vortex induced vibration* kondisi *in-line*. Sebelum dapat memperhitungkan gaya *drag* perlu memperhitungkan koefisien *drag.* Koefisien *drag* yang terjadi dipengaruhi berbagai factor salah satunya adalah rasio kekasaran permukaan dasar laut dengan diameter pipa.

Untuk menghitung koefisien *drag* yang terjadi pada pipa bawah laut perlu dikalikan dengan beberapa faktor koreksi. Dalam DNV GL RP F105 (2017) *basic drag coefficient* perlu dikalikan dengan faktor koreksi yaitu, Efek aliran yang tidak stabil, efek *trench,* efek VIV, dan efek *gap ratio.* Hasil parameter-parameter koefisien *drag* dan besar koefisien *drag* ditampilkan pada Tabel 45 seperti dibawah ini.

Tabel 45 Hasil perhitungan koefisien *drag.*

KP	KC	e/D_t	$\psi^{CD}{}_{KC,a}$	$\psi^{CD}{}_{proxi}$	$\psi^{CD}{}_{trench}$	$\psi^{CD}{}_{VIV}$	C_D
0.78	8.43	0.58	1.31	1.03	1	1	1.36
1.55	10.66	0.58	1.16	1.03	1	1	1.21
2.163	12.71	0.58	1.07	1.03	1	1	1.12
2.343	13.36	0.58	1.05	1.03	1	1.11	1.21
2.381	13.51	0.68	1.04	1.01	1	1.11	1.19
2.552	14.20	0.48	1.02	1.05	1	1	1.08
2.737	14.70	0.78	1.01	1.00	1	1	1.02
2.882	15.29	0.48	0.99	1.05	1	1.0	1.05
3.07	15.74	0.48	0.98	1.05	1	1.11	1.15
3.155	16.19	0.39	0.97	1.07	1	1.11	1.17
3.194	16.39	0.68	0.97	1.01	1	1.11	1.10
3.406	17.18	0.48	0.95	1.05	1	1.11	1.12
11.974	13.65	0.58	1.04	1.03	1	1	1.08
12.485	14.35	0.68	1.0 2	1.01	1	1	1.05

Tabel 45 Hasil perhitungan koefisien *drag* (lanjutan).

KP	KC	e/D_t	$\psi^{CD}_{KC,a}$	ψ^{CD}_{proxi}	ψ^{CD}_{trench}	ψ^{CD}_{VIV}	C_D
14.385	16.25	0.58	0.99	1.03	1	1	1.03
16.365	15.72	1.16	1.00	1	1	1.11	1.12
16.392	15.44	0.97	1.00	1	1	1.11	1.13
16.431	15.44	0.78	1.00	1.00	1	1	1.02
16.811	15.17	0.39	1.01	1.07	1	1	1.10
17.665	15.62	1.07	1.00	1	1	1.11	1.12
17.913	15.45	1.16	1.00	1	1	1	1.01
18.922	17.04	0.97	0.98	1	1	1.11	1.11

Setelah nilai koefisien *drag* sudah diketahui maka dapat dihitung besar gaya *drag* yang terjadi. Untuk perhitungan gaya *drag* digunakan kondisi arus dengan kondisi ekstrim untuk mengetahui besaran gaya maksimum yang mungkin terjadi. Untuk hasil perhitungan akan ditampilkan pada Tabel 46 seperti dibawah ini.

Tabel 46 Hasil perhitungan gaya *drag* pada masing-masing bentangan bebas.

KP	$U_{C1} + U_{W100}$ (m/s)	C_D	F_D (N/m)
0.78	0.92	1.36	308.1
1.55	1.06	1.21	361.2
2.163	1.19	1.12	417.5
2.343	1.23	1.21	484.1
2.381	1.24	1.19	484.9
2.552	1.28	1.08	468.6
2.737	1.32	1.02	470.9
2.882	1.35	1.05	504.2
3.07	1.37	1.15	577.3
3.155	1.40	1.17	605.8
3.194	1.42	1.10	589.6
3.406	1.46	1.12	634.7
11.974	1.23	1.08	431.6
12.485	1.27	1.05	449.8
14.385	1.39	1.03	525.5
16.365	1.37	1.12	555.7
16.392	1.35	1.13	541.4
16.431	1.34	1.02	485.4
16.811	1.31	1.10	499.9
17.665	1.36	1.12	550.4
17.913	1.35	1.01	489.9
18.922	1.44	1.11	610.6

Untuk gaya *drag* nantinya digunakan untuk perhitungan *static deflection* untuk arah arah horizontal untuk memperhitungkan frekuensi natural pipa untuk kondisi *in-line*.

4.5.1 Gaya angkat (*lift*)

Gaya angkat yang terjadi pada pipa secara harfiah memiliki konsep yang sama pada sayap pesawat. Namun perbedaanya jika sayap pesawat dikarenakan bentuk dibagian atas dan bawah sayap yang berbeda sedangkan pipa bawah laut dikarenakan kontur dasar laut yang menyebabkan perbedaan kecepatan aliran di atas dan di bawah pipa. Menurut Bai *et al* (2014) untuk nilai koefisien gaya angkat pada pipa bawah laut bernilai 0.9. Untuk hasil perhitungan gaya angkat yang terjadi akan ditampilkan pada Tabel 47 seperti dibawah ini.

Tabel 47 Hasil perhitungan gaya angkat pada pipa.

KP	$U_{C1} + U_{W100}$ (m/s)	C_L	F_L (N/m)
0.78	0.92	0.9	203.27
1.55	1.06	0.9	268.67
2.163	1.19	0.9	336.87
2.343	1.23	0.9	360.18
2.381	1.24	0.9	367.49
2.552	1.28	0.9	389.66
2.737	1.32	0.9	414.32
2.882	1.35	0.9	431.91
3.07	1.37	0.9	449.83
3.155	1.40	0.9	466.32
3.194	1.42	0.9	481.17
3.406	1.46	0.9	510.29
11.974	1.23	0.9	359.22
12.485	1.27	0.9	386.14
14.385	1.39	0.9	457.21
16.365	1.37	0.9	445.84
16.392	1.35	0.9	432.34
16.431	1.34	0.9	428.95
16.811	1.31	0.9	410.67
17.665	1.36	0.9	440.82
17.913	1.35	0.9	435.37
18.922	1.44	0.9	496.73

Gaya angkat yang terjadi pipa nantinya digunakan untuk mengurangi berat pipa terendam untuk perhitungan defleksi statis dimana digunakan untuk perhitungan frekuensi natural pipa kondisi *cross-flow.*

4.6. Analisis Frekuensi Natural

4.6.1 *Effective Axial Force*

Effective axial force digunakan untuk menggambarkan gaya aksial pipa yang dipengaruhi oleh terkanan internal dan eksternal (hidrostatis) pada pipa. Perbedaan tekanan pada pipa merupakan selisih tekanan internal pipa (saat operasi). Untuk hasil perhitungan *effective axial force* ditampilkan pada Tabel 48 sebagai berikut.

Tabel 48 Hasil perhitungan *effective axial force* pada masing-masing bentangan bebas.

KP	P_h (Pa)	ΔP (Pa)	S_{eff} (N)
0.78	2.95E+05	1.08E+06	-2.17E+05
1.55	2.51E+05	1.13E+06	-2.19E+05
2.163	2.19E+05	1.16E+06	-2.20E+05
2.343	2.10E+05	1.17E+06	-2.21E+05
2.381	2.08E+05	1.17E+06	-2.21E+05
2.552	1.99E+05	1.18E+06	-2.21E+05
2.737	1.93E+05	1.19E+06	-2.22E+05
2.882	1.86E+05	1.19E+06	-2.22E+05
3.07	1.81E+05	1.20E+06	-2.22E+05
3.155	1.76E+05	1.20E+06	-2.22E+05
3.194	1.74E+05	1.20E+06	-2.22E+05
3.406	1.66E+05	1.21E+06	-2.23E+05
11.974	1.93E+05	1.19E+06	-2.22E+05
12.485	1.84E+05	1.19E+06	-2.22E+05
14.385	1.62E+05	1.22E+06	-2.23E+05
16.365	1.68E+05	1.21E+06	-2.23E+05
16.392	1.71E+05	1.21E+06	-2.23E+05
16.431	1.71E+05	1.21E+06	-2.23E+05
16.811	1.74E+05	1.20E+06	-2.22E+05
17.665	1.69E+05	1.21E+06	-2.23E+05
17.913	1.71E+05	1.21E+06	-2.23E+05
18.922	1.54E+05	1.23E+06	-2.23E+05

4.6.2 *Critical Buckling Load*

Critical buckling load merupakan nilai gaya maksimum yang dapat menyebabkan pipa mengalami deformasi. *Critical buckling load* dipengaruhi oleh CSF dan panjang bentangan merupakan salah satu variabel yang memiliki peranan besar dalam analisis bentangan bebas. Hasil perhitungan *critical buckling load* ditampilkan dalam Tabel 49 seperti dibawah ini.

Tabel 49 Hasil perhitungan *critical buckling load* pada masing-masing bentangan.

KP	L (m)	P_{cr} (N)
0.78	18	2.30E+06
1.55	19	2.07E+06
2.163	20	1.87E+06
2.343	26	1.10E+06
2.381	25	1.19E+06
2.552	18	2.30E+06
2.737	18	2.30E+06
2.882	17	2.58E+06
3.07	24	1.30E+06
3.155	20	1.87E+06
3.194	21	1.69E+06
3.406	23	1.41E+06
11.974	18	2.30E+06
12.485	17	2.58E+06
14.385	17	2.58E+06
16.365	26	1.10E+06
16.392	34	6.46E+05
16.431	16	2.92E+06
16.811	17	2.58E+06
17.665	25	1.19E+06
17.913	62	1.94E+05
18.922	36	5.76E+05

Seperti yang dapat dilihat dari hasil perhitungan *critical buckling load* untuk KP 16.392, 17.9123, dan KP 18.922 memiliki nilai *critical buckling* load paling rendah hal ini disebabkan panjang span yang terjadi.

4.6.3 *Static Deflection*

Static deflection dipengaruhi oleh panjang bentangan bebas pipa dan beban defleksi. Beban defleksi untuk arah inline adalah gaya *drag*,

sedangkan untuk arah *cross-flow* adalah berat terendam pipa yang dikurangin dengan gaya angkat. Untuk hasil perhitungan *static deflection* untuk masing-masing keadaaan (*in-line* dan *cross-flow*) akan ditampilkan pada Tabel 50-51 seperti dibawah ini.

Tabel 50 Hasil perhitungan *static deflection* untuk kondisi *in-line.*

KP	L (m)	P_{cr} (N)	F_D (N/m)	$\delta_{\text{in-line}}$ (m)
0.78	18	2.30E+06	308.1	6.15E-03
1.55	19	2.07E+06	361.2	9.06E-03
2.163	20	1.87E+06	417.5	1.30E-02
2.343	26	1.10E+06	484.1	4.76E-02
2.381	25	1.19E+06	484.9	4.00E-02
2.552	18	2.30E+06	468.6	9.37E-03
2.737	18	2.30E+06	470.9	9.42E-03
2.882	17	2.58E+06	504.2	7.93E-03
3.07	24	1.30E+06	577.3	3.98E-02
3.155	20	1.87E+06	605.8	1.90E-02
3.194	21	1.69E+06	589.6	2.27E-02
3.406	23	1.41E+06	634.7	3.63E-02
11.974	18	2.30E+06	431.6	8.63E-03
12.485	17	2.58E+06	449.8	7.08E-03
14.385	17	2.58E+06	525.5	8.27E-03
16.365	26	1.10E+06	555.7	5.48E-02
16.392	34	6.46E+05	541.4	1.90E-01
16.431	16	2.92E+06	485.4	5.93E-03
16.811	17	2.58E+06	499.9	7.87E-03
17.665	25	1.19E+06	550.4	4.55E-02
17.913	62	1.94E+05	489.9	-8.50E+00
18.922	36	5.76E+05	610.6	2.89E-01

Tabel 51 Hasil perhitungan *static deflection* untuk kondisi *cross-flow.*

KP	L (m)	P_{cr} (N)	W_{sub} (N/m)	$\delta_{cross\text{-}flow}$ (m)
0.78	18	2.30E+06	1088.5	2.17E-02
1.55	19	2.07E+06	1023.1	2.57E-02
2.163	20	1.87E+06	954.9	2.98E-02
2.343	26	1.10E+06	931.6	9.16E-02
2.381	25	1.19E+06	924.3	7.63E-02

Tabel 51 Hasil perhitungan *static deflection* untuk kondisi *cross-flow* (lanjutan).

KP	L (m)	P_{cr} (N)	W_{sub} (N/m)	$\delta_{cross-flow}$ (m)
2.552	18	2.30E+06	902.1	1.80E-02
2.737	18	2.30E+06	877.4	1.75E-02
2.882	17	2.58E+06	859.9	1.35E-02
3.07	24	1.30E+06	841.9	5.81E-02
3.155	20	1.87E+06	825.4	2.58E-02
3.194	21	1.69E+06	810.6	3.13E-02
3.406	23	1.41E+06	781.5	4.47E-02
11.974	18	2.30E+06	932.5	1.87E-02
12.485	17	2.58E+06	905.6	1.43E-02
14.385	17	2.58E+06	834.6	1.31E-02
16.365	26	1.10E+06	845.9	8.34E-02
16.392	34	6.46E+05	859.4	3.02E-01
16.431	16	2.92E+06	862.8	1.05E-02
16.811	17	2.58E+06	881.1	1.39E-02
17.665	25	1.19E+06	850.9	7.04E-02
17.913	62	1.94E+05	856.4	-1.49E+01
18.922	36	5.76E+05	795.0	3.76E-01

Untuk bentangan bebas pada KP 17.913 mengalami defleksi statis yang cukup besar, maka dari itu perlu dilakukanya mitigasi atau *span intervention* untuk mengurangi panjang bentangan yang terjadi.

4.6.4 Frekuensi Natural Pipa

Frekuensi natural pipa merupakan salah satu parameter penting dalam analisis bentangan bebas. Frekuensi natural pipa sendiri dipengaruhi oleh panjang bentangan dan *static deflection*. Frekuensi natural pipa nantinya menjadi suatu tolak ukur dimana pipa yang mengalami bentangan bebas mengalami VIV atau tidak. Untuk mengetahui dimana pipa mengalami vibrasi yaitu dengan cara membandingkan nilai frekuensi natural pipa dengan frekuensi *vortex shedding*, dimana jika frekuensi natural pipa mendekati frekuensi *vortex shedding* maka pipa akan mengalami amplifikasi getaran.

Untuk hasil perhitungan frekuensi natural pipa untuk kondisi *in-line* maupun *cross-flow* akan ditampilkan pada Tabel 52 seperti di bawah ini.

Tabel 52 Hasil Perhitungan frekuensi natural pipa untuk masing-masing bentangan bebas.

KP	L (m)	S_{eff} (N)	P_{cr} (N)	$\delta_{cross\text{-}flow}$ (m)	$\delta_{in\text{-}line}$ (m)	$f_{cross\text{-}flow}$	$f_{in\text{-}line}$
0.78	18	-2.17E+05	2.30E+06	2.17E-02	6.15E-03	1.67	1.67
1.55	19	-2.19E+05	2.07E+06	2.57E-02	9.06E-03	1.49	1.49
2.163	20	-2.20E+05	1.87E+06	2.98E-02	1.30E-02	1.33	1.33
2.343	26	-2.21E+05	1.10E+06	9.16E-02	4.76E-02	0.76	0.75
2.381	25	-2.21E+05	1.19E+06	7.63E-02	4.00E-02	0.83	0.83
2.552	18	-2.21E+05	2.30E+06	1.80E-02	9.37E-03	1.65	1.65
2.737	18	-2.22E+05	2.30E+06	1.75E-02	9.42E-03	1.69	1.69
2.882	17	-2.22E+05	2.58E+06	1.35E-02	7.93E-03	1.86	1.86
3.07	24	-2.22E+05	1.30E+06	5.81E-02	3.98E-02	0.89	0.89
3.155	20	-2.22E+05	1.87E+06	2.58E-02	1.90E-02	1.30	1.30
3.194	21	-2.22E+05	1.69E+06	3.13E-02	2.27E-02	1.21	1.21
3.406	23	-2.23E+05	1.41E+06	4.47E-02	3.63E-02	0.98	0.98
11.974	18	-2.22E+05	2.30E+06	1.87E-02	8.63E-03	1.67	1.66
12.485	17	-2.22E+05	2.58E+06	1.43E-02	7.08E-03	1.89	1.89
14.385	17	-2.23E+05	2.58E+06	1.31E-02	8.27E-03	1.88	1.88
16.365	26	-2.23E+05	1.10E+06	8.34E-02	5.48E-02	0.77	0.77
16.392	34	-2.23E+05	6.46E+05	3.02E-01	1.90E-01	0.48	0.44
16.431	16	-2.23E+05	2.92E+06	1.05E-02	5.93E-03	2.16	2.16
16.811	17	-2.22E+05	2.58E+06	1.39E-02	7.87E-03	1.83	1.83
17.665	25	-2.23E+05	1.19E+06	7.04E-02	4.55E-02	0.84	0.84
17.913	62	-2.23E+05	1.94E+05	-1.49E+01	-8.50E+00	0.01	0.01
18.922	36	-2.23E+05	5.76E+05	3.76E-01	2.89E-01	0.45	0.41

Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 52 bahwa nilai natural frekuensi pipa yang mengalami bentangan bebas sangat bergantung pada panjang bentangan yang terjadi. Nilai frekuensi natural pipa bawah laut yang mengalami bentangan bebas akan semakin kecil seiring dengan bertambahnya panjang bentangan yang terjadi.

4.7. Screening Kriteria VIV dan Kelelahan

Dalam DNV GL RP F105 sebelum melakukan *screening* kelelahan (*fatigue*) maka perlu dilakukan *screening* untuk mengetahui bentangan bebas mana saja yang mengalami fenomena VIV. Pengecekan dilakukan guna mengetahui jika kondisi ekstreme bentangan bebas mana yang tidak

mengalami VIV maka untuk kondisi normal fenomena VIV-pun tidak akan terjadi. Kondisi ekstrim yang digunakan berupa hasi penjumlahan $U_{w100tahun}$ + $U_{c1tahun.}$ Untuk hasil *screening* kriteria VIV untuk kondisi *in-line* maupun *cross-flow* ditampilkan pada Tabel 53 seperti dibawah ini.

Tabel 53 Hasil *screening* kriteria VIV kondisi ekstrim.

KP	$f_{in\text{-}line}$	$U_{extreme}$	Ruas kanan	*Screening*
0.78	1.67	0.92	1.49	No VIV
1.55	1.49	1.06	1.71	VIV
2.163	1.33	1.19	1.92	VIV
2.343	0.75	1.23	1.98	VIV
2.381	0.83	1.24	2.02	VIV
2.552	1.65	1.28	2.04	VIV
2.737	1.69	1.32	2.17	VIV
2.882	1.86	1.35	2.14	VIV
3.07	0.89	1.37	2.19	VIV
3.155	1.30	1.40	2.19	VIV
3.194	1.21	1.42	2.32	VIV
3.406	0.98	1.46	2.33	VIV
11.974	1.66	1.23	1.98	VIV
12.485	1.89	1.27	2.07	VIV
14.385	1.88	1.39	2.23	VIV
16.365	0.77	1.37	2.25	VIV
16.392	0.44	1.35	2.22	VIV
16.431	2.16	1.34	2.20	VIV
16.811	1.83	1.31	2.06	VIV
17.665	0.84	1.36	2.24	VIV
17.913	0.01	1.35	2.23	VIV
18.922	0.41	1.44	2.38	VIV

Tabel 54 Hasil *screening* kriteria VIV untuk kondisi *cross-flow*.

KP	$f_{cross\text{-}flow}$	$U_{extreme}$	Ruas kanan	*Screening*
0.78	1.67	0.92	1.03	No VIV
1.55	1.49	1.06	1.18	No VIV
2.163	1.33	1.19	1.33	No VIV
2.343	0.76	1.23	1.37	VIV
2.381	0.83	1.24	1.38	VIV
2.552	1.65	1.28	1.43	No VIV

Tabel 54 Hasil *screening* kriteria VIV untuk kondisi *cross-flow* (Lanjutan).

KP	$f_{cross-flow}$	$U_{extreme}$	Ruas kanan	*Screening*
2.737	1.69	1.32	1.47	No VIV
2.882	1.86	1.35	1.50	No VIV
3.07	0.89	1.37	1.53	VIV
3.155	1.30	1.40	1.56	VIV
3.194	1.21	1.42	1.58	VIV
3.406	0.98	1.46	1.63	VIV
11.974	1.67	1.23	1.37	No VIV
12.485	1.89	1.27	1.42	No VIV
14.385	1.88	1.39	1.54	No VIV
16.365	0.77	1.37	1.53	VIV
16.392	0.48	1.35	1.50	VIV
16.431	2.16	1.34	1.50	No VIV
16.811	1.83	1.31	1.46	No VIV
17.665	0.84	1.36	1.52	VIV
17.913	0.01	1.35	1.51	VIV
18.922	0.45	1.44	1.61	VIV

Dari hasil *screening* diatas dapat dilihat bahwa hampir semua bentangan bebas kecuali KP 0.78 mengalami fenomena VIV untuk kondisi *in-line.* Untuk kondisi *cross-flow* lebih banyak bentangan bebas yang tidak mengalami fenomena VIV untuk kondisi *cross-flow*.

4.8. Analisis *Response Model*

4.8.1 *In-line*

Analsisi *response model* untuk kondisi *in-line* dilakukan guna mengetahui nilai $V_{R,onset}$ dan amplitudo tegangan vibrasi yang terjadi. Untuk $V_{R,onset}$ nantinya kan menjadi parameter yang digunakan untuk *screening* kelelahan sedangkan amplitude tegangan vibrasi nantinya *stress range* untuk kondisi *in-line* dapat diketetahui. Untuk parameter – parameter *response model* kondisi *in-line* ditampilkan pada Tabel 55 seperti dibawah ini.

Tabel 55 Hasil Perhitungan parameter-parameter *response model* kondisi *in-line* pada masing-masing bentangan bebas.

KP	α	K_{sd}	$V^{IL}_{R,onset}$	$V^{IL}_{R,1}$	$V^{IL}_{R,2}$	$V^{IL}_{R,end}$	$A^{y,1}/D$	$A^{y,2}/D$	$R_{I\theta,1}$	$R_{I\theta,2}$
0.78	0.81	0.92	1.38	1.69	3.65	3.76	0.03	0.06	0.73	0.88
1.55	0.73	0.92	1.38	1.69	3.65	3.76	0.03	0.06	0.73	0.88
2.163	0.67	0.92	1.38	1.69	3.65	3.76	0.03	0.06	0.73	0.88
2.343	0.65	0.92	1.38	1.69	3.65	3.76	0.03	0.06	0.73	0.88
2.381	0.64	0.91	1.37	1.69	3.66	3.78	0.03	0.06	0.73	0.88
2.552	0.62	0.94	1.40	1.69	3.64	3.75	0.03	0.05	0.73	0.88
2.737	0.61	0.89	1.36	1.70	3.67	3.79	0.03	0.06	0.73	0.88
2.882	0.59	0.94	1.40	1.69	3.64	3.75	0.03	0.05	0.73	0.88
3.07	0.58	0.94	1.40	1.69	3.64	3.75	0.03	0.05	0.73	0.88
3.155	0.57	0.97	1.42	1.68	3.62	3.73	0.03	0.05	0.73	0.88
3.194	0.57	0.91	1.37	1.69	3.66	3.78	0.03	0.06	0.73	0.88
3.406	0.55	0.94	1.40	1.69	3.64	3.75	0.03	0.05	0.73	0.88
11.974	0.51	0.92	1.38	1.69	3.65	3.76	0.03	0.06	0.73	0.88
12.485	0.49	0.91	1.37	1.69	3.66	3.78	0.03	0.06	0.73	0.88
14.385	0.45	0.92	1.38	1.69	3.65	3.76	0.03	0.06	0.73	0.88
16.365	0.47	0.89	1.35	1.70	3.67	3.79	0.03	0.06	0.73	0.88
16.392	0.47	0.89	1.35	1.70	3.67	3.79	0.03	0.06	0.73	0.88
16.431	0.47	0.89	1.36	1.70	3.67	3.79	0.03	0.06	0.73	0.88
16.811	0.47	0.97	1.42	1.68	3.62	3.73	0.03	0.05	0.73	0.88
17.665	0.47	0.89	1.35	1.70	3.67	3.79	0.03	0.06	0.73	0.88
17.913	0.48	0.89	1.35	1.70	3.67	3.79	0.03	0.06	0.73	0.88
18.922	0.44	0.89	1.35	1.70	3.67	3.79	0.03	0.06	0.73	0.88

Dengan mengetahui *response model* untuk kondisi *in-line* maka *stress range* dapat dihitung. Dalam Tugas Akhir ini *stress range* yang dicari hanya kondisi *stress range* maksimum. Hal ini dilakukan untuk mengetahui tegangan maksimum yang diakibatkan oleh lingkungan, yang nantinya akan digunakan untuk analisis ULS. Untuk hasil perhitungan *stress range* pada kondisi *in-line* akan ditampilkan pada Tabel 56 seperti dibawah ini.

Tabel 56 Hasil perhitungan *stress range* kondisi *in-line*.

KP	$A_{IL/cf,j}$	$\psi_{\alpha,IL}$	$S^{P}_{IL,j}$ (x)
0.78	8.81E+08	1.00E+00	1.28E+08
1.55	7.90E+08	7.73E-01	8.91E+07
2.163	7.13E+08	5.56E-01	5.78E+07
2.343	4.22E+08	4.91E-01	3.02E+07
2.381	4.57E+08	4.82E-01	3.26E+07
2.552	8.81E+08	4.04E-01	5.06E+07
2.737	8.81E+08	3.75E-01	4.96E+07
2.882	9.87E+08	3.05E-01	4.29E+07
3.07	4.95E+08	2.67E-01	1.88E+07
3.155	7.13E+08	2.21E-01	2.18E+07
3.194	6.47E+08	2.25E-01	2.16E+07
3.406	5.39E+08	1.50E-01	1.16E+07
11.974	8.81E+08	2.57E-02	3.29E+06
12.485	9.87E+08	0.00E+00	0.00E+00
14.385	9.87E+08	0.00E+00	0.00E+00
16.365	4.22E+08	0.00E+00	0.00E+00
16.392	2.47E+08	0.00E+00	0.00E+00
16.431	1.11E+09	0.00E+00	0.00E+00
16.811	9.87E+08	0.00E+00	0.00E+00
17.665	4.57E+08	0.00E+00	0.00E+00
17.913	7.42E+07	0.00E+00	0.00E+00
18.922	2.20E+08	0.00E+00	0.00E+00

Seperti yang dapat dilihat untuk Kilometer Point 12.485 sampai Kilometer Point 18.922 tidak memiliki nilai *stress range* hal ini diakibatkan untuk *current flow ratio* kurang dari 0.5 yang berarti kecepatan aliran air laut di elevasi pipa didominasi oleh pengaruh gelombang, untuk kondisi *in-line* dapat diabaikan.

4.8.2 *Cross-flow*

Sama hal-nya dengan kondisi *in-line*. Untuk *response model* kondisi *cross-flow* harus diperhitungkan, untuk mengetahui $V_{R,onset}$ dan maksimum rentang tegangan yang mungkin terjadi akibat beban lingkungan. Untuk parameter-parameter *response model* untuk kondisi *cross-flow* ditampilkan pada Tabel 57 seperti dibawah ini.

Tabel 57 Hasil perhitungan *response model* untuk kondisi *cross-flow*.

KP	KC	$V^{CF}_{R,onset}$	$V^{CF}_{R,1}$	$V^{CF}_{R,2}$	$V^{CF}_{R,end}$	$(A_{z,1}/D)$	(Az/D)
0.78	8.43	2.36	4.58	12.23	16	0.70	0.07
1.55	10.66	2.36	4.61	12.20	16	0.71	0.07
2.163	12.71	2.36	4.69	12.09	16	0.73	0.07
2.343	13.36	2.36	4.72	12.05	16	0.73	0.07
2.381	13.51	2.42	4.75	12.04	16	0.74	0.07
2.552	14.20	2.30	4.72	12.00	16	0.74	0.07
2.737	14.70	2.48	4.83	11.98	16	0.75	0.07
2.882	15.29	2.30	4.77	11.95	16	0.75	0.08
3.07	15.74	2.30	4.78	11.92	16	0.76	0.08
3.155	16.19	2.24	4.77	11.90	16	0.76	0.08
3.194	16.39	2.42	4.87	11.89	16	0.76	0.08
3.406	17.18	2.30	4.84	11.84	16	0.77	0.08
11.974	13.65	2.36	4.73	12.03	16	0.74	0.07
12.485	14.35	2.42	4.79	12.00	16	0.74	0.07
14.385	16.25	2.36	4.83	11.89	16	0.76	0.08
16.365	15.72	2.50	4.88	11.92	16	0.76	0.08
16.392	15.44	2.50	4.87	11.94	16	0.75	0.08
16.431	15.44	2.48	4.86	11.94	16	0.75	0.08
16.811	15.17	2.24	4.73	11.95	16	0.75	0.08
17.665	15.62	2.50	4.87	11.93	16	0.76	0.08
17.913	15.45	2.50	4.87	11.94	16	0.75	0.08
18.922	17.04	2.50	4.93	11.85	16	0.77	0.08

Setelah mengetahui nilai dari parameter-parameter *response model* untuk kondisi *cross-flow*. Maka dapat diketahui besar rentang tegangan yang mungkin terjadi akibat beban lingkungan. Untuk hasil perhitungan rentang tegangan yang terjadi ditampilkan di Tabel 58 sebagai berikut.

Tabel 58 Hasil perhitungan rentang tegangan yang terjadi kondisi *cross-flow*.

KP	$A_{IL/cf,j}$	R_k	$S^{RM}_{CF,j}$
0.78	8.81E+08	0.862	6.91E+08
1.55	7.90E+08	0.862	6.26E+08
2.163	7.13E+08	0.862	5.81E+08
2.343	4.22E+08	0.862	3.47E+08
2.381	4.57E+08	0.864	3.77E+08
2.552	8.81E+08	0.859	7.30E+08
2.737	8.81E+08	0.866	7.41E+08
2.882	9.87E+08	0.859	8.30E+08

Tabel 58 Hasil perhitungan rentang tegangan yang terjadi kondisi *cross-flow* (lanjutan).

KP	$A_{IL/cf,j}$	R_k	$S^{RM}_{CF,j}$
3.07	4.95E+08	0.859	4.19E+08
3.155	7.13E+08	0.855	6.04E+08
3.194	6.47E+08	0.864	5.55E+08
3.406	5.39E+08	0.859	4.65E+08
11.974	8.81E+08	0.862	7.27E+08
12.485	9.87E+08	0.864	8.25E+08
14.385	9.87E+08	0.862	8.44E+08
16.365	4.22E+08	0.866	3.60E+08
16.392	2.47E+08	0.866	2.10E+08
16.431	1.11E+09	0.866	9.47E+08
16.811	9.87E+08	0.855	8.25E+08
17.665	4.57E+08	0.866	3.89E+08
17.913	7.42E+07	0.866	6.31E+07
18.922	2.20E+08	0.866	1.91E+08

4.9. *Screening* Kriteria Kelelahan

Setelah mengetahui nilai $V_{R,onset}$ untuk masing-masing kondisi *in-line* maupun *cross*-flow. Selanjutnya melakukan *screening* kriteria kelelahan. *Screening*, hal ini bertujuan untuk menjamin bahwa bentangan bebas pada pipa yang mengalami fenomena VIV dapat bertahan lebih dari 50 tahun masa operasinya. Kriteria yang digunakan untuk *screening fatigue* diambil dari *codes* DNV GL RP F105 dimana, kriteria tersebut telah dikalibrasi dengan *full fatigue analysis.* Untuk hasil *screening* kriteria kelelahan ditampilkan pada Tabel 59 seperti dibawah ini

Tabel 59 Hasil *screening* kriteria kelelahan untuk masing-masing bentangan dan masing-masing kondisi.

KP	F_{nIL}/γ_{IL}	sisi kanan	*Screening*
0.78	1.19	0.32	lolos
1.55	1.06	0.34	lolos
2.163	0.95	0.38	lolos
2.343	0.54	0.37	lolos
2.381	0.59	0.38	lolos
2.552	1.18	0.40	lolos
2.737	1.21	0.43	lolos

KP	F_{nCF}/γ_{cf}	sisi kanan	*Screening*
0.78	1.19	0.42	lolos
1.55	1.06	0.46	lolos
2.163	0.95	0.50	lolos
2.343	0.54	0.52	lolos
2.381	0.60	0.51	lolos
2.552	1.18	0.55	lolos
2.737	1.21	0.53	lolos

Tabel 59 Hasil *screening* kriteria kelelahan untuk masing-masing bentangan dan masing-masing kondisi (lanjutan).

KP	F_{nIL}/γ_{IL}	sisi kanan	*Screening*
2.882	1.33	0.43	lolos
3.07	0.64	0.41	lolos
3.155	0.93	0.42	lolos
3.194	0.86	0.44	lolos
3.406	0.70	0.44	lolos
11.974	1.19	0.50	lolos
12.485	1.35	0.53	lolos
14.385	1.34	0.57	lolos
16.365	0.55	0.53	lolos
16.392	0.31	0.48	tidak
16.431	1.54	0.57	lolos
16.811	1.31	0.52	lolos
17.665	0.60	0.53	lolos
17.913	0.01	0.34	tidak
18.922	0.30	0.51	tidak

KP	F_{nCF}/γ_{cf}	sisi kanan	*Screening*
2.882	1.33	0.58	lolos
3.07	0.64	0.59	lolos
3.155	0.93	0.61	lolos
3.194	0.86	0.58	lolos
3.406	0.70	0.63	lolos
11.974	1.19	0.66	lolos
12.485	1.35	0.67	lolos
14.385	1.34	0.75	lolos
16.365	0.55	0.70	tidak
16.392	0.34	0.69	tidak
16.431	1.54	0.69	lolos
16.811	1.31	0.74	lolos
17.665	0.60	0.70	tidak
17.913	0.01	0.69	tidak
18.922	0.32	0.74	tidak

Dari hasil *sreening* di atas terdapat 2 bentangan bebas yang tidak lolos *screening* untuk kondisi *in-line* yaitu KP 16.392, 17.913 dan 18.922. Untuk kondisi *cross-flow* terdapat 5 bentangan bebas yang tidak lolos *screening* kelelahan yaitu KP 16.365, 16.392, 17.665, 17.913, dan 18.922.Langkah selanjutnya yang harus dilakukan jika kriteria kelelahan tidak terpenuhi maka perlu dilakukanya *full fatigue analysis.* Namun dalam Tugas Akhir ini untuk bentangan bebas yang tidak memenuhi kriteria maka dianggap gagal. Maka dari itu untuk kriteria kelelahan menjadi acuan untuk mode kegagalan untuk fenomena VIV pada pipa yang mengalami bentangan bebas.

4.10. Analisa *Bending Moment*

Perhitungan *bending* momen dilakukan untuk memenuhi analisis *local buckling* dimana harus memperimbangkan *combine loading criteria* dan *load controlled condition*. Dalam DNV OS F101 (2010) *bending moment* yang terjadi pada pipa bawah laut diakibbatkan oleh momen akibat beban fungsional, beban lingkungan, beban *interfetence*, dan beban *accidental*. Namun dalam analisis bentangan bebas hanya terdapat momen akibat beban fungsional dan lingkungan saja. Pada subbab di bawah ini akan

menampilkan hasil perhitungan *bending* momen yang terjadi pada masing-masing bentangan bebas.

4.9.1 *Bending* Momen Akibat Beban Fungsional

Beban fungsional pada jaringan pipa diakibatkan oleh berat terendam pipa itu sendiri. Untuk perumusan *bending* momen nilainya berbeda-beda tergantung dari *boundary condition* pada ujung-ujung bentangan bebas. Untuk hasil perhitungan *bending* momen akibat beban fungsional ditampilkan pada Tabel 60 seperti dibawah ini.

Tabel 60 Hasil perhitungan *Bending* momen akibat beban fungsional.

KP	W_{sub} (N/m)	M_F (N.m)
0.78	1088.5	4.41E+04
1.55	1023.1	4.62E+04
2.163	954.9	4.77E+04
2.343	931.6	7.87E+04
2.381	924.3	7.22E+04
2.552	902.1	3.65E+04
2.737	877.4	3.55E+04
2.882	859.9	3.11E+04
3.07	841.9	6.06E+04
3.155	825.4	4.13E+04
3.194	810.6	4.47E+04
3.406	781.5	5.17E+04
11.974	932.5	3.78E+04
12.485	905.6	3.27E+04
14.385	834.6	3.01E+04
16.365	845.9	7.15E+04
16.392	859.4	1.24E+05
16.431	862.8	2.76E+04
16.811	881.1	3.18E+04
17.665	850.9	6.65E+04
17.913	856.4	4.11E+05
18.922	795.0	1.29E+05

Dalam momen akibat beban fungsional, moment terbesar terjadi pada KP 17.913 sebesar 4.11 x 10^5 N.m hal ini disebabkan pada KP ini terdapat bentanga bebas terpanjang yaitu sepanjang 62 m.

4.9.2 *Bending* Momen Akibat Beban Lingkungan

Bending momen akibat beban lingkungan disebabkan oleh tiga kondisi yaitu, beban akibat *directional wave*, akibat vibrasi kondisi *in-line*, dan vibrasi kondisi *cross-flow*. Untuk hasil perhitungan *bending* moment akibat beban lingkungan akan ditampilkan pada Tabel 61-72, untuk masing-masing kondisi *in-line* dan *cross-flow* sebagai berikut.

Tabel 61 Hasil perhitungan bending momen akibat beban lingkungan kondisi *in-line.*

KP	$S^{P}_{IL,j}$ (x) (Pa)	$M_{FM,MAX}$ (N.m)	$\sigma_{FM,max}$ (Pa)	$\sigma_{e,IL}$ (Pa)	Me,IL (N.m)
0.78	1.28E+08	1.38E+04	1.02E+07	1.02E+07	1.38E+04
1.55	8.91E+07	1.82E+04	1.35E+07	5.81E+07	7.83E+04
2.163	5.78E+07	2.37E+04	1.76E+07	4.65E+07	6.26E+04
2.343	3.02E+07	5.11E+04	3.79E+07	5.30E+07	7.15E+04
2.381	3.26E+07	4.65E+04	3.45E+07	5.08E+07	6.85E+04
2.552	5.06E+07	2.10E+04	1.56E+07	4.09E+07	5.51E+04
2.737	4.96E+07	2.11E+04	1.57E+07	4.05E+07	5.46E+04
2.882	4.29E+07	1.99E+04	1.48E+07	3.62E+07	4.89E+04
3.07	1.88E+07	5.02E+04	3.72E+07	4.66E+07	6.29E+04
3.155	2.18E+07	3.44E+04	2.55E+07	3.64E+07	4.91E+04
3.194	2.16E+07	3.74E+04	2.78E+07	3.85E+07	5.19E+04
3.406	1.16E+07	4.98E+04	3.70E+07	4.28E+07	5.76E+04
11.974	3.29E+06	1.93E+04	1.43E+07	1.60E+07	2.16E+04
12.485	0.00E+00	1.78E+04	1.32E+07	1.32E+07	1.78E+04
14.385	0.00E+00	2.08E+04	1.54E+07	1.54E+07	2.08E+04
16.365	0.00E+00	5.88E+04	4.36E+07	4.36E+07	5.88E+04
16.392	0.00E+00	1.19E+05	8.86E+07	8.86E+07	1.19E+05
16.431	0.00E+00	1.68E+04	1.25E+07	1.25E+07	1.68E+04
16.811	0.00E+00	1.98E+04	1.47E+07	1.47E+07	1.98E+04
17.665	0.00E+00	5.29E+04	3.92E+07	3.92E+07	5.29E+04
17.913	0.00E+00	-1.61E+06	-1.19E+09	-1.19E+09	-1.61E+06
18.922	0.00E+00	1.62E+05	1.20E+08	1.20E+08	1.62E+05

Tabel 62 Hasil perhitungan *bending* momen untuk kondisi *cross-flow.*

KP	$S^{RM}_{CF,j}$ (Pa)	$\sigma_{e,CF}$ (Pa)	$Me,_{CF}$ (N.m)
0.78	6.91E+08	0.00E+00	0.00E+00
1.55	6.26E+08	0.00E+00	0.00E+00
2.163	5.81E+08	0.00E+00	0.00E+00
2.343	3.47E+08	1.73E+08	2.34E+05
2.381	3.77E+08	1.89E+08	2.54E+05
2.552	7.30E+08	0.00E+00	0.00E+00
2.737	7.41E+08	0.00E+00	0.00E+00
2.882	8.30E+08	0.00E+00	0.00E+00
3.07	4.19E+08	2.09E+08	2.82E+05
3.155	6.04E+08	3.02E+08	4.07E+05
3.194	5.55E+08	2.78E+08	3.74E+05
3.406	4.65E+08	2.32E+08	3.13E+05
11.974	7.27E+08	0.00E+00	0.00E+00
12.485	8.25E+08	0.00E+00	0.00E+00
14.385	8.44E+08	0.00E+00	0.00E+00
16.365	3.60E+08	1.80E+08	2.43E+05
16.392	2.10E+08	1.05E+08	1.41E+05
16.431	9.47E+08	0.00E+00	0.00E+00
16.811	8.25E+08	0.00E+00	0.00E+00
17.665	3.89E+08	1.94E+08	2.62E+05
17.913	6.31E+07	0.00E+00	0.00E+00
18.922	1.91E+08	9.55E+07	1.29E+05

Untuk niliai *stress* atau *bending* momen bernilai nol. Hal ini dikarenakan pada *screening* kriteria VIV, bentangan bebas tersebut tidak mengalami fenomena VIV.

4.9.3 *Bending* Momen Total

Setelah memiliki nilai *bending* momen yang terjadi untuk masing-masing pembebanan yang terjadi. Langkah selanjutnya adalah untuk mencari nilai total *bending* momen yang terjadi. Bending momen total dapat dicari dengan menjumlahkan akar kuadrat masing-masing bending momen yang terjadi. Untuk hasil perhitungan total *bending* momen yang terjadi ditampilkan pada Tabel 63 sebagai berikut.

Tabel 63 Hasil perhitungan total *bending* moment yang terjadi pada pipa.

KP	M_F (N.m)	$M_{e,IL}$ (N.m)	$M_{e,CF}$ (N.m)	M_{sd} (N.m)
0.78	4.41E+04	1.38E+04	0.00E+00	5.49E+04
1.55	4.62E+04	7.83E+04	0.00E+00	1.15E+05
2.163	4.77E+04	6.26E+04	0.00E+00	9.89E+04
2.343	7.87E+04	7.15E+04	2.34E+05	1.31E+05
2.381	7.22E+04	6.85E+04	2.54E+05	1.23E+05
2.552	3.65E+04	5.51E+04	0.00E+00	8.36E+04
2.737	3.55E+04	5.46E+04	0.00E+00	8.23E+04
2.882	3.11E+04	4.89E+04	0.00E+00	7.33E+04
3.07	6.06E+04	6.29E+04	2.82E+05	1.08E+05
3.155	4.13E+04	4.91E+04	4.07E+05	8.02E+04
3.194	4.47E+04	5.19E+04	3.74E+05	8.56E+04
3.406	5.17E+04	5.76E+04	3.13E+05	9.65E+04
11.974	3.78E+04	2.16E+04	0.00E+00	5.26E+04
12.485	3.27E+04	1.78E+04	0.00E+00	4.49E+04
14.385	3.01E+04	2.08E+04	0.00E+00	4.46E+04
16.365	7.15E+04	5.88E+04	2.43E+05	1.14E+05
16.392	1.24E+05	1.19E+05	1.41E+05	2.13E+05
16.431	2.76E+04	1.68E+04	0.00E+00	3.92E+04
16.811	3.18E+04	1.98E+04	0.00E+00	4.54E+04
17.665	6.65E+04	5.29E+04	2.62E+05	1.04E+05
17.913	4.11E+05	-1.61E+06	0.00E+00	2.14E+06
18.922	1.29E+05	1.62E+05	1.29E+05	2.59E+05

Seperti yang dapat dilihat bahwa total bending moment yang terjadi paling besar terjadi pada KP 17.913. hal ini desebabkan bentangan bebas pada kilometer point ini merupakan bentangan bebas terpanjang. Sehingga bending moment akibat beban fungsional menjadi sangat besar.

4.11. *Ultimate Limit State check*

Dalam DNV RP F105 (2017) setiap bentangan bebas harus dilakukan analisis ULS yaitu *local buckling.* Dimana untuk analisis ULS dapat menggunakan *codes* DNV OS F101 (2013). Analisis *local buckling* perlu dilakukan karena pipa yang mengalami *local buckling* memiliki peluangWk yang tinggi untuk mengalami *global buckling, collapse,* dan *propagation buckling*.

Selanjutnya dilakukan ULS *check.* Hal ini dilakukan untuk mencari tau jika ada pipa yang mengalami *local buckling.* Untuk hasil ULS *check* ditampilkan pada Tabel 64 seperti dibawah ini.

Tabel 64 Hasil perhitungan dan *screening local buckling.*

KP	d (m)	L (m)	M_{sd} (N.m)	*Ratio Local buckling*	Screening *Local Buckling*
0.78	29.3	18	5.49E+04	0.01	lolos
1.55	25	19	1.15E+05	0.04	lolos
2.163	21.8	20	9.89E+04	0.03	lolos
2.343	20.9	26	1.31E+05	0.06	lolos
2.381	20.7	25	1.23E+05	0.05	lolos
2.552	19.8	18	8.36E+04	0.02	lolos
2.737	19.2	18	8.23E+04	0.02	lolos
2.882	18.5	17	7.33E+04	0.02	lolos
3.07	18	24	1.08E+05	0.04	lolos
3.155	17.5	20	8.02E+04	0.02	lolos
3.194	17.3	21	8.56E+04	0.03	lolos
3.406	16.5	23	9.65E+04	0.03	lolos
11.974	19.2	18	5.26E+04	0.01	lolos
12.485	18.3	17	4.49E+04	0.01	lolos
14.385	16.1	17	4.46E+04	0.01	lolos
16.365	16.7	26	1.14E+05	0.04	lolos
16.392	17	34	2.13E+05	0.15	lolos
16.431	17	16	3.92E+04	0.01	lolos
16.811	17.3	17	4.54E+04	0.01	lolos
17.665	16.8	25	1.04E+05	0.04	lolos
17.913	17	62	2.14E+06	14.69	tidak
18.922	15.3	36	2.59E+05	0.22	lolos

Seperti yang dapat dilihat, untuk bentangan bebas yang terjadi pada KP 17.913 satu-satunya yang mengalami kegagalan *local buckling.* Hal ini dikarenakan pada KP 17.1913 memiliki panjang bentangan bebas hingga 62 m. Dapat diambil kesimpulan penyebab utama pipa mengalami *local buckling* dikarenaan beban fungsional pipa itu sendiri, bukan disebabkan oleh beban lingkungan.

4.12. Evaluasi Panjang *Span*

Evaluasi panjang span dilakukan untuk bentangan bebas yang tidak lolos *screening* kelelahan struktur akibat VIV baik kondisi *in-line* maupun *cross-flow* dan juga tidak lolos *screening* ULS (*local buckling*). Evaluasi dilakukan dengan mencari panjang *span* maksimum untuk masing-masing Kilometer Point yang tidak lolos *screening.* Panjang *span* maksimum dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 2.64 untuk kondisi *in-line* dan Persamaan 2.65 untuk kondisi *cross-flow.* Hasil perhitungan panjang *span maksimum* akan ditampilkan pada Tabel 65 sebagai berikut.

Tabel 65 Hasil perhitungan panjang *span* maksimum.

KP	gap (m)	L (m)	$f_{n,in\text{-}line}$	$f_{n,cross\text{-}flow}$	$L_{cr,in\text{-}line}$	$L_{cr,\ cross\text{-}flow}$
16.365	0.6	26	1.64	0.89	14.23	20.49
16.392	0.5	34	1.61	0.87	14.35	20.85
17.665	0.55	25	1.63	0.88	14.28	20.63
17.913	0.6	62	1.62	0.88	14.32	20.74
18.922	0.5	36	1.73	0.94	13.86	19.44

Seperti yang dapat dilihat bahwa panjang maksimum *span* untuk kondisi *in-line* jauh lebih pendek dibandingkan untuk kondisi *cross-flow*. Maka dari itu untuk evaluasi panjang span dilakukan dengan memilih panjang maksimums *span* kondisi *in-line* untuk sebagai acuan. Hal ini dilakukan untuk mencegah pipa yang telah di evaluasi panjang *span* tidak mengalami kegagalan pada kondisi *in-line* dan untuk kondisi *cross-flow* otomatis tidak mengalami kegagalan. Untuk merubah panjang *span* awal agar dapat kurang dari panjang maksimum *span* pada kondisi *in-line* perlu ditambahkan *support* buatan. Dalam Tugas Akhir ini, *support* buatan yang dibuat dengan cara membagi sama rata panjang *span* awal menjadi beberapa bagian hingga memiliki nilai panjang *span* kurang dari $L_{max\text{-}inline.}$ Untuk hasil perhitungan banyak *support* yang diperlukan dan hasil *screening* L/D ratio untuk *span* yang telah dievaluasi panjang bentanganya akan ditampilkan pada Tabel 66 seperti dibawah ini.

Tabel 66 Hasil perhitungan jumlah *support* dan hasil *screening* L/D untuk *span* yang telah dievaluasi.

KP	gap (m)	$L_{cr,in-line}$	n support	L_{now}	L/D
16.365	0.6	14.23	1	13.00	25.20
16.392	0.5	14.35	2	11.33	21.97
17.665	0.55	14.28	1	12.50	24.23
17.913	0.6	14.32	4	12.40	24.03
18.922	0.5	13.86	2	12.00	23.26

Seperti yang dapat dillihat pada Tabel 66 untuk masing-masing bentangan bebas yang tidal lolos *screening* kelelahan akibat VIV dan *local buckling.* Sekarang sudah lolos untuk *screening* L/D rasio, dimana sekarang rasio L/D untuk masing-masing bentangan sudah memiliki nilai dibawah 30.

4.13. Analisis Keandalan

Analisis keandalan dilakukan dengan menggunakan metode Monte Carlo. Hal ini dilakukan untuk mengetahui nilai PoF (*probability of failure*) jaringan pipa bawah laut PT.X dalam menghadapi fenomena VIV dan *local buckling*. Mode kegagalan yang digunakan dalam metode Monte Carlo menggunakan perumusah untuk *screening* kelelahan akibat fenomena VIV untuk kedua kondisi yaiut *in-line* dan *cross-flow*. Untuk ULS mode kegagalan yang digunakan berupa perumusan untuk pengecekan *local buckling* yang terdapat dalam DNV OS F101 2013. Unsur pokok yang diperlukan dalam Monte Carlo adalah sebuah *random number generator* (RNG). Dimana nantinya angka acak yang dikeluarkan diasumsikan sebagai nilai dari PDF (*Probability density function*) suatu distrubusi variabel acak.

Langkah awal dalam melakukan analisis keandalan menggunakan metode Monte Carlo yaitu dengan menentukan variabel acak dan menentukan distribusinya. Dalam analisis keandalan pipa bawah laut PT. X dalam menghadapi permasahalan bentangan bebas yang dapat mengakibatkan kegagalan berupa kelelahan struktur akibat fenomena VIV dan *local buckling*. Variabel acak dalam analisis keandalan ini yaitu panjang bentangan bebas, *gap height,* Kecepatan partikel arus akibat pasang surut

dan gelombang di elevasi pipa, dan kedalaman. Penentuan distribusi dilakukan dengan bantuan *software* EasyFit. Easyfit membantu proses penentuan distribusi suatu data dengan pengujian *goodness of fit* menggunakan 3 metode yaitu Kolmogorov-Smirnov, Anderson Darling, dan Chi-squared. EeasyFit melakukan uji *goodness of fit* hingga kedalam 61 jenis distribusi. Hasil uji *goodness of fit* distribusi untuk masing-masing variabel acak menggunakan bantuan EasyFit akan ditampilkan pada Tabel 67 seperti dibawah ini.

Tabel 67 Distribusi variabel acak

Variabel acak	Distribusi	Mean	C.O.V	Parameter
Panjang Span	LogLogistic	11.413	0.577	α= 3.72; β=10.106
Gap Height	Burr	0.214	0.615	k= 0.70728; α= 5.9754; β=0.264; γ= −0.09856
Depth	Burr	18.991	0.172	k= 0.42796; α= 18.314; β=17.001; γ= 0
Uc1tahun	Pearson 5	0.396	0.024	α= 3.72; β=10.106; γ= 0.36645
Uc100tahun	LogLogistic	0.405	0.018	α= 98.434; β=0.40447
Uw1tahun	Gen. Extreme	0.294	0.414	k= −0.29765; σ= 0.12298; μ= 0.25188
Uw100tahun	Dagum	0.900	0.129	k= 0.17083; α= 42.5254; β=1.0166; γ= 0

Setelah mengetahui jenis distribusi masing-masing variabel acak, dengan merubah nilai PDF yang didapati dari RNG menjadi suatu nilai variabel acak dengan nilai PDF tersebut. Analisis keandalan untuk fenomena VIV menggunakan Persamaan 2.109 dan 2.110 dan *local buckling* menggunakan Persamaan 2.111. Analisis keandalan melakukan simulasi dari 1000 hingga 100000 percobaan. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui angka pasti keandalan dimana perubahan keandalan tidak berubah secara signifikan. Untuk hasil analisis keandalan menggunakan metode Monte Carlo akan ditampilkan pada Tabel 68 seperti dibawah ini.

Tabel 68 Hasil simulasi metode Monte Carlo

Keterangan / Nomor	VIV			Local Buckling		
	Jumlah simulasi	Keandalan	Pof	Jumlah simulasi	Keandalan	PoF
5	100,000	0.99277	0.00721	100,000	0.99827	0.00171

Dari hasil analisis keandalan dapat dilihat bahwa pipa bawah laut PT. X cukup handal dalam menghadapi permasalahan bentangan bebas. Dimana nilai PoF untuk fenomena VIV mencapai 0.0072, sedangkan untuk *local buckling* pipa PT.X lebih handal dalam permasalahan ini dengan nilai PoF sebesar 0.0017.

4.14. *Risk Based Inspection*

Risk based inspection adalah suatu metode yang dikembangkan untuk memberikan penjadwalan yang didasari dari resiko yang terjadi. Semakin tinggi resiko yang diprediksi maka semakin cepat waktu inspksi yang dilaksanakan. Matriks resiko adalah suatu alat untuk menggambarkan tingkatan resiko yang terjadi. Resiko sendiri secara matematis adalah hasi perkalian dari PoF dengan CoF. Penentuan CoF harus dilakukan guna mengetahui tingkat resiko yang terjadi. Untuk konsekuensi masing-masing akan dijelaskan lebih detail dalam sub-sub bab berikut:

a. Konsekuensi *Safety*

Pipa bawah laut PT. X terletak di laut Jawa, dapat diketahui bahwa jika terjadi kegagalan maka tidak akan menimbulkan korban jiwa. Dikarenakan pipa berada didasar laut sehingga aktifitas manusia bisa dikatakan tidak ada, atau hanya kapal yang melintas. Berbeda jika kegagalan pada jaringan pipa bawah laut terjadi pada *riser,* hal ini dikarenakan *riser* berada di *Platform* maka mungkin menimbulkan korban jiwa. Berdasarkan Tabel 21 yang mengacu pada DNV RP F116 (2015) untuk konsekuensi segi keselamatan dimana tidak ada korban, maka konsekuensi yang terjadi termasuk dalam kategori A.

b. Environment

Jaringan pipa bawah laut PT.X menyalurkan gas alam dari Platform A ke Platform B. Kegagalan akibat kelelehan dapat

menyebabkan gas *leaking*, sedangkan untuk *local buckling* dikarenakan pipa hanya mengalami deformasi maka tidak terjadi gas *leaking*. Untuk konsekuensi segi *environment* dibagi menjadi 5 katergori pada Tabel 22 mengacu pada DNV RP F116 (2015. Dimana untuk kegagalan *local buckling* dimana hanya terjadi deformasi maka tidak ada gas yang keluar dari pipa. Sehingga dapat disimpulkan bahwa konsekuensi untuk lingkungan bisa dikatakan tidak ada sehingga dapat dikategorikan pada kategori A. Untuk kegagalan akibat VIV karena pipa mengalami kelelahan maka ada kemungkinan mengalami kebocoran gas. Menurut Surapto (2007) dalam Tugas Akhir Alamsyah (2003) untuk daerah Jawa Barat Gas alam mengandung kandungan CO_2 medium dan kandungan H_2S yang rendah. Hal ini dapat disimpulkan jika terjadi kebocoran maka akan mengotori lingkungan dengan CO_2 dan H_2S dapat membahayakan kehidupan biota laut, Bagarinao (1993). Namun kandungan H_2S dalam gas alam di Jawa Barat rendah. Maka untuk konsekuensi segi lingkungan akibat fenomena VIV dapat dikategorikan B.

c. Bisnis

Kegagalan pipa bawah laut dapat menyebabkan proses produksi terhenti. Dan juga kehilangan banyak fluida isi jaringan pipa bawah laut jika mengalami kebocoran. Hal ini dapat menyebabkan kerugian yang cukup besar. Berdasarkan harga gas hari ini di Indonesia (26 April 2020) untuk 1 MMBTU berada pada angka 6 USD sesuai dengan pasal 3 ayat 1 dalam Permen ESDM8/2020. Diketahui *flow rate* jaringan pipa PT .X sekitar 36.823 MMBTU. Sehingga perhitungan kerugian yang ditaksir akan ditampilkan pada Tabel 69 sebagai berikut.

Tabel 69 Perhitungan total gas alam.

Gas dalam pipa		*Flow rate*		Total Gas
M^3	MMBTU	MMSCFD	MMBTU	MMBTU
2198.13	77.62	35.28	36823	36900.62

Tabel 70 Total kerugian

Total Gas	Total kerugian	
MMBTU	USD	Euro
36900.62	221404	205905

Perhitungan skenario kerugian yang terjadi berupa jika megalami *down time* selama 1 hari dimana PT. X gagal menjual gas alam sebanyak 36823MMBTU ditambah kehilangan gas alam akibat bocor sebanyak 77.62 MMBTU maka dapat ditaksir kerugian hingga menjadi 205,905 euro. Berdasarkan Tabel 23 yang mengacu pada DNV RP F116 (2015) konsekuensi dari segi bisnis termasuk dalam kategori C. Namun jumlah kerugian dapat berurang dan bertambah sesuai dengan harga jual gas alam.

Setelah mengetahui masing-masing kategori konsekuensi berdasarkan DNV RP F116 (2015) dan nilai PoF untuk VIV dan *local buckling* maka dapat diketahui matriks resiko untuk masing-masing kegagalan yang terjadi dari berbagai segi keselamatan, lingkungan, dan bisnis. Untuk matriks resiko untuk masing-masing kegagalaan dan masing-masing segi konsekuensi akan ditampilkan pada Gambar 22 sebagai berikut.

Increasing consequences →	Severity	Consequence Categories: Safety	Environment	Cost (million Euro)	Increasing probability: 1 — Failure is not expected < 10^{-5}	2 — Never heard of in the industry 10^{-5} - 10^{-4}	3 — An accident has occurred in the industry 10^{-4} - 10^{-3}	4 — Has been experienced by most operators 10^{-3} - 10^{-2}	5 — Occurs several times per year 10^{-2} - 10^{-1}
	E	Multiple fatalities	Massive effect Large damage area, > 100 BBL	> 10	M	H	VH	VH	VH
	D	Single fatality or permanent disability	Major effect Significant spill response, < 100 BBL	1 - 10	L	M	H	VH	VH
	C	Major injury, long term absence	Localized effect Spill response < 50 BBL	0.1 - 1	VL	L	M		VH
	B	Slightly injury, a few lost work days	Minor effect Non-compliance, < 5 BBL	0.01- 0.1	VL	VL	L		H
	A	No or superficial injuries	Slightly effect on the environment, < 1BBL	< 0.01	VL	VL	VL	L	M

Gambar 22 Matriks resiko kegagalan VIV dan *local buckling* dalam berbagai segi konsekuensi

Pada Gambar 22 simbol lingkaran untuk VIV dan bintang untuk *local buckling,* warna untuk menunjukan kategori konsekuensi dimana merah untuk *safety,* hijau untu *environment* dan kunging untuk bisnis.

Dalam menentukan interval waktu inspeksi berdasarkan DNV RP F116 dapat dihitung dari Persamaan 2.114 dimana dalam persamaan terdapat faktor pengali sesuai dengan keyakinan dalam analisis dan fabrikasi. Untuk hasil perhitungan waktu interval inspeksi dan detail kategori PoF dan konsekuensinya akan ditampilkan pada Tabel sebagai berikut

Tabel 71 Interval waktu inspeksi berdasarkan tingkatan resiko yang terjadi.

Aspek	PoF VIV	PoF *local buckling*	Konsekuensi VIV	Konsekuensi local bucking	Interval Inspeksi VIV	Interval Inspeksi *local buckling*
Safety	High (4)	High (4)	A	A	5 tahun	5 tahun
Environment	High (4)	High (4)	B	A	3 tahun	5 tahun
Bisnis	High (4)	High (4)	C	A	1 tahun	5 tahun

Metode inspeksi yang disarankan untuk VIV adalah menggunakan ROV. ROV sendiri sudah lama digunakan dan bahkan untuk data-data yang digunakan dalam Tugas Akhir ini juga menggunakan data hasil inspeksi menggunakan ROV. ROV digerakan oleh *operator* dari *survey vessel* dimana nantinya ROV akan merekam, mengambbil gambar, megecek katodik proteksi, benda – benda yang menyangkut disekitar jaringan pipa bawah laut, panjang bentangan yang terjadi beserta tinggi *gap* yang terjadi. Nantinya hasil *survey* ROV dapat digunakan untuk analisis selanjutnya guna monitoring resiko bentangan bebas yang terjadi. Untuk metode inspeksi yang disarankan untuk *local buckling* menggunakan *in-line inspection* yaitu menggunakan alat *intelligent pigging*. Dimana nantinya *intelligent pigging* dapat memberi tahu jika terdapat *dent* atau *deformasi* pada pipa bawah laut akibat *local buckling*, dan juga dapat memeberikan informasi tentang ketebalan dinding pipa. Untuk *local buckling* lebih baik mengikuti dari hasil

RBI untuk pipa yang terkorosi dikarenakan risikonya yang masih rendah untuk permsalahan *local buckling*.

4.15. Mitigasi

Untuk mitigasi yang dilakukan pada pipa bawah laut PT.X dikarenakan untuk kedua kondisi parameter utama yang menyebabkan kegagalan adalah panjang bentangan bebas, baik di VIV yang mempengaruhi frekuensi natural pipa dan *local buckling* yang mempengaruhi paling singnifikan pada beban fungsional. Kedalaman perairan yang dilalui pipa bawah laut PT.X sangat berakam dengan kontur yang tidak rata, dimana kedalamannya bervariasi dari kedalaman kurang lebih 15 meter hingga kedalamana 30 meteran. Jenis *support* buatan yang cocok untuk pipa bawah laut PT. X berupa matras atau kantung pasir. Dikarenakan *gap height* yang terjadi dominan terjadi dengan ketinggian kurang dari 1 m. Sehingga dapat menekan biaya untuk mitigasi.

Dengan penambahan *support* pada pipa bawah laut yang tidak lolos *screening* kelelahan akibat fenomena VIV atau *local buckling*. Jaringan pipa bawah laut PT. X memiliki peningkatan dalam keandalan yang lebih tinggi dibandingkan keandalanya sebelum melakukan evaluasi panjang span. Untuk keandalan jaringan pipa bawah laut PT. X setelah dilakukan evaluasi panjang span akan ditampilkan pada Tabel 72 sebagai berikut.

Tabel 72 keandalan pipa bawah laut PT. X setelah melakukan mitigasi

Keterangan / Nomor	VIV			Local Buckling		
	Jumlah simulasi	Keandalan	Pof	Jumlah simulasi	Keandalan	PoF
5	100000	0.99807	0.00191	100000	0.99986	0.00012

Seperti yang dapat dilihat dari Tabel 72 bahwa keandalan pipa bawah laut PT. X mengalami peningkatan dibandingkan dengan keandalan pipa PT. X pada Tabel 68. Peningkatan keandalan akan lebih meingkat lagi jikalau semua bentangan bebas yang mengalami VIV di evaluasi panjangnya agar tidak terjadi VIV lagi.

BAB V

Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Dari hasil *screening* nilai L/D terdapat 22 bentangan bebas yang harus di lakukan *screening* lanjutan untuk mengetahui keamanan bentangan bebas yang terjadi. Dari hasil *screening* kelelahan akibat VIV terdapat 5 bentangan bebas yang tidak mampu bertahan lebih dari 50 tahun yaitu KP 16.365, KP 16.392, KP 17.665, KP 17.913 dan KP 18.922. Untuk bentangan bebas yang tidak lolos *screening local buckling* merupakan bentangan bebas terpanjang dengan panjang bentangan hingga 62 m pada KP 17.913.
2. Untuk keandalan jaringan pipa bawah laut PT. X dilakukan dengan menggunakan metode analisis keandalan Monte Carlo. Analisis dilakukan dengan melakukan simulasi dari 1000 hingga 100000 untuk memastikan bahwa keandalan sudah stabil atau tidak berubah secara signifikan. Dari hasil analisis keandalan pipa bawah laut PT. X dalam mengahadapi permasalahan bentangan bebas untuk fenomenam VIV keandalanya 0.99277 dan untuk permasalahan *local buckling* keandalanya 0.99827.
3. Dari hasil analisis keandalan yang dilakukan maka dapat diketahui untuk masing-masing nilai PoF untuk kegagalan kelelahan struktur akibat VIV dan *local buckling* berada pada kategori "*High*". Untuk konsekuensi kegagalan yang terjadi mempertimbangkan segi keselamatan, lingkungan, dan bisnis. Nilai PoF untuk kegagalan akibat VIV dan *local* buckling termasuk dalam kategori *high* sesuai dengan yang ada dalam DNV RP F116 (2016). Untuk tingkat resiko yang dihasilkan dari perkalian nilai PoF dan CoF yang mengikuti kategori yang terdapat pada DNV RP F116 (2015) dari ketiga segi konsekuensi akan dijelaskan sebagai berikut:

- Tingkat resiko kegagalan struktur dalam segi keamanan, untuk kegagalan kelelahan akibat VIV maupun *local buckling* adalah *low*.
- Tingkat resiko kegagalan struktur dalam segi lingkungan, untuk kegagalan akibat VIV adalah *medium* hal ini dikarenakan kelelahan struktur dapat menyebabkan pencemaran lingkungan disebabkan oleh gas CO_2 dan H_2S. Sedangkan untuk kegagalan struktur *local buckling* adalah *low* karena kegagalan hanya berupa *dent* atau deformasi plastis pada di lokasi tertentu dan tidak menyebabkan gas keluar dari pipa bawah laut.
- Tingkat resiko kegagalan struktur dalam segi bisnis, untuk kegagalan akibat VIV barada pada tingkat *hight* dan untuk *local buckling* berada pada tingkat *low*. Untuk kegagalan akibat kelelahan struktur dapat menyebabkan gas *leaking* dan terhentinya produksi. Sedangkan untuk *local buckling* dapat menyebabkan pipa mengalami *collapse* dan produksi menjadi terhenti.

4. Rencana jadwal dilakukan dengan mengiktui ketetapan yang ada pada DNV RP F115 (2015) berdasarkan tingkat resiko yang terjadi dalam matriks resiko. Untuk pembobotan masing-masing segi konsekuensi sama maka untuk interval waktu inspeksi diambil untuk waktu interval yang paling kecil. Hal ini dilakukan untuk mencegah kerugian dari segi keamanan, lingkungan, dan bisnis. Interval waktu inspeksi pipa bawah laut PT.X dilakukan dalam jangka waktu 3 tahun sekali untuk kegagalan akibat VIV dan *local buckling.*
5. Mitigasi yang perlu dilakukan adalah dengan menambahkan *support* buatan pada bentangan bebas yang tidak lolos *screening* kelelahan akibat VIV dan *local buckling*, bentangan bebas yang perlu ditambahkan *support* buatan yaitu KP 16.365, KP 16.392, KP 17.665, KP 17.913, dan KP 18.922 dengan jumlah *support* yang telah diperhitungan mengaju dari panjang bentangan kritis untuk kondisi VIV *in-line*. Sehingga natntinya bentangan bebas yang terbentuk pada KP tersebut menjadi memiliki rasio L/D dibawah 30 dimana nantinya respon dinamis menjadi sangat kecil. Untuk mitigasi yang dilakukan lainya adalah inspeksi pada

jaringan pipa bawah laut PT. X mengikuti interval waktu yang telah ditentukan berdasarkan tingkat resiko yang ada. Untuk permasalahan *local buckling* dilakukan setiap 3 tahun sekali untuk permasalahan kelelahan struktur akibat VIV setiap 1 tahun. Untuk inspeksi yang disarankan yaitu menggunakan ROV untuk mengetahui perubahan kontur permukaan dasar laut, bentangan detail perubahan bentangan bebas yang terjadi, dan benda-benda yang menyangkut atau berada disekitar jaringan pipa bawah laut PT. X. Dikarenakan faktor terbesar dalam kegagalan pada pipa bawah laut akibat panjang bentangan bebas itu sendirii pada pipa bawah laut PT. X. Perlu dilakukan inspeksi metode *in-line inspection* menggunalan *intelligent pigging* untuk mengetahui *dent* atau deformasi yang terjadi akibat *local buckling* dan *crack* yang mungkin terjadi akibat kelelahan. Namun untuk *in-line inspection* dapat menggunakan interval waktu inspeksi yang didapati dari RBI untuk laju korosi pada pipa bawah laut.

5.2. Saran

Saran yang dapat disampaikan dari pengerjaan Tugas Akhir ini untuk penelitian lebih lanjut adalah :

1. Melakukan *full fatigue analysis* untuk bentangan bebas yang tidak lolos *screening* kelelahan.
2. Memperhitungkan desain *support* tambahan untuk bentangan bebas yang tidak lolos *screening*.
3. Melakukan perhitungan respon dinamis untuk bentangan yang ditambahkan *support* untuk mengetahui respon yang terjadi ketika bentangan bebas saling berinteraksi satu sama lain.
4. Melakukan analisis RBI pada pipa bawah laut PT. X untuk permasalahan korosi agar interval waktu inspeksi metode *in-line inspection* dapat diketahui.

DAFTAR PUSTAKA

ASME B31.8: **Gas Transmission and Distribution Piping System.** American Steel Mechanical Engineering, USA

Alamsyah, M. Furqon. 2013. **Analisa Risk Based Inspection Pada Pipeline 16" Jalur Sukowati – CPA yang Mengalami Upheaval Buckling.** Tugas Akhir, Departemen Teknik Kelautan ITS. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Bagarinao, T.U. 1993. Sulfide as a Toxicant in Aquatic Habitats. **SEAFDEC Asian Aquaculture.** Vol. XV No. 3

Bai, Yong. 2001. **Pipeline and Risers**. Elsevier, USA

Bai, Young dan Qiang Bai. 2014. **Subsea Pipeline Integrity and Risk Management**. Elseveir, USA

Bai, Qiang dan Young Bai. 2014. **Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation**. Elseveir, USA

Danendra, P. R. 2018. **Analisis On-Bottom Stability: Studi Kasus Infield Flowline Dari Platform MMF Menuju Platform LPRO**. Tugas Akhir, Departemen Teknik Kelautan ITS. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Dey, Prasanta Kumar, dkk. 2004. Risk Based Maintenance Model for Offshore Oil and Gas Pipelines : A Case Study. **Journal of Quality in Maintenance Engineering.** Volume 10, Number 3, Page 169-183

DNV GL RP F105. 2017. **Free Spanning Pipeline**. Recommended Practice. Det Norske Veritas.

DNV RP C203. 2011. **Fatigue Design of Offshore Steel Structures.** Recommended Practice. Det Norske Veritas.

DNV OS F101. 2013. **Submarine Pipeline System.** Recommended Practice. Det Norske Veritas.

DNV RP F116. 2015. **Integrity Management of Submarine Pipeline Systems.** Recommended Practice. Det Norske Veritas.

Djatmiko, Eko, B., 2012. **Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak.** Surabaya: Intitut Teknologi Sepuluh Nopember Press.

Guo, Buyon, S. Song, Chako. J, dan Ali Ghakambor. 2005. **Offshore Pipeline.** Newyork: Elseveir

Kenny, J. P. dkk. 1993. **Structural Analysis of Pipeline Spans.** Sheffield: Health and Safety Executive-Offshore Technology Information.

Khanifudin, I. 2015. **Analisis Ultimate Limit State (ULS) Pada Free Span (Studi Kasus: South Sumatera – West Java Gas Pipeline Project Phase II Labuhan Maringgai-muara Bekasi Offshore Pipeline**. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan ITS. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

Kriswidanto, O. 2013. **Analisis On-Bottom Stability Pipa Bawah Laut Pada Kondisi Sloping Seabed**. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan ITS. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Lomantoro, Nonnia, D., P. 2018. **Analisis Ultimate Limit State (ULS) Pada Pipa Bawah Laut Yang Mengalami Free Span.** Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan ITS. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Mouselli, A. H. 1981. **Offshore Pipeline Design, Analysis and Methods.** Oklahoma: PennWell Books.

Pratama, Fauzan A. 2018. **Analisis Umur Kelelahan Akibat Free Span Yang Terjadi Pada Export Pipeline Saat Kondisi Operasi**. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan ITS. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

Purnamasari, N. D. 2010. **Studi Kenadalan *Freespan* Pada Pipa Bawah Laut Dengan Adanya Fenomena Vortex Induced Vibration (VIV)**. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan ITS. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

Quimby, T. Barlett. 2008. **A Beginer's Guide To The Steel Constuction Manual, 14th ed.** Alaska: Quimby&Associates

Rahayu, D .N. 2017. **Studi Eksperimen Scouring Pada Pipa Meletak dan In-Trench Akibat Gelombang Reguler**. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan ITS. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

Rosyid, Daniel, M. 2007. **Pengantar Rekayasa Keandalan.** Surabaya: Airlangga University Press.

Rudiyanto, A., Rosyid, D., dan Hadiwidodo, Yoyok, S. 2014. Analisa Risiko Pada Offshore Pipeline Milik PT. Trans Pacific Petrochemical Indotama (PT. TPPI) Tuban Akibat Free Span dengan Menggunakan Metode Risk Based Inspection. **Jurnal Teknik Pomits.** Vol. 1, No.2.

Shabani, Mahdi, dkk. 2019. Probabilistic modelling of free spanning pipelines considering multiple failure modes. **Elsevier : Engineering Failure Analysis.** Vol 106.

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

Syahroni, A. 2018. **Analisis Umur Kelelahan Akibat Vortex Induced Vibration Pada Pipa Bawah Laut Saat Kondisi Operasi Studi Kasus: *Export Pipeline* 14" Jalur *Central Processing Platform – Onshore Receiving Facility*, Pertamina Hulu Energi *West Madura Offshore***. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan ITS. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

Wahyuni, Novia, C. 2019. **Analisis Local Buckling Pada Pipa Bawah Laut Dengan Free Span Pada Kriteria Ultimate Limit State (Studi Kasus: Meliwis Subsea Pipeline).** Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan ITS. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

Yttervik, Rune dkk. 2003. Fatigue from Vortex-Induced Vibrations of Free Span Pipelines Using Statistics of Current Speed and Direction. **Proceedings of 22nd Internation Conference on Offshore Mechanics and Artictic Engineering.** Cancun Mexico : 8 – 13 juni.

LAMPIRAN A

Screening Klasifikasi Bentangan Bebas bedasarkan Rasio L/D

Screening klasifikasi f*ree span*			
KP	Length (m)	L/D	*Screening*
0.099	6	12	Lolos
0.463	7	14	Lolos
0.78	18	35	Tidak
0.84	7	14	Lolos
0.935	13	25	Lolos
1.043	6	12	Lolos
1.271	7	14	Lolos
1.483	8	16	Lolos
1.514	12	23	Lolos
1.535	9	17	Lolos
1.55	19	37	Tidak
1.587	13	25	Lolos
1.653	5	10	Lolos
1.785	10	19	Lolos
1.83	11	21	Lolos
1.861	8	16	Lolos
1.992	6	12	Lolos
2.009	7	14	Lolos
2.101	12	23	Lolos
2.163	20	39	Tidak
2.264	7	14	Lolos
2.28	4	8	Lolos
2.305	8	16	Lolos
2.32	7	14	Lolos
2.343	26	50	Tidak
2.381	25	48	Tidak
2.421	10	19	Lolos
2.445	9	17	Lolos
2.523	10	19	Lolos
2.552	18	35	Tidak
2.578	13	25	Lolos
2.639	15	29	Lolos
2.665	12	23	Lolos
2.698	12	23	Lolos
2.723	5	10	Lolos
2.737	18	35	Tidak
2.763	4	8	Lolos

Screening klasifikasi f*ree span*			
KP	Length (m)	L/D	*Screening*
9.372	6	12	Lolos
9.527	5	10	Lolos
10.04	9	17	Lolos
10.313	11	21	Lolos
10.651	7	14	Lolos
11.205	14	27	Lolos
11.249	10	19	Lolos
11.297	8	16	Lolos
11.307	8	16	Lolos
11.336	9	17	Lolos
11.488	7	14	Lolos
11.556	10	19	Lolos
11.611	12	23	Lolos
11.638	13	25	Lolos
11.701	13	25	Lolos
11.727	13	25	Lolos
11.764	12	23	Lolos
11.869	10	19	Lolos
11.889	12	23	Lolos
11.974	18	35	Tidak
12.101	9	17	Lolos
12.133	7	14	Lolos
12.176	9	17	Lolos
12.197	4	8	Lolos
12.229	13	25	Lolos
12.252	8	16	Lolos
12.295	11	21	Lolos
12.319	5	10	Lolos
12.383	5	10	Lolos
12.485	17	33	Tidak
12.516	9	17	Lolos
12.537	14	27	Lolos
12.557	14	27	Lolos
12.638	10	19	Lolos
12.683	7	14	Lolos
12.695	12	23	Lolos
12.762	10	19	Lolos

Screening klasifikasi f*ree span*			
KP	Length (m)	L/D	*Screening*
2.775	6	12	Lolos
2.837	7	14	Lolos
2.853	12	23	Lolos
2.882	17	33	Tidak
2.912	8	16	Lolos
2.932	12	23	Lolos
3.023	13	25	Lolos
3.04	5	10	Lolos
3.053	7	14	Lolos
3.07	24	47	Tidak
3.155	20	39	Tidak
3.194	21	41	Tidak
3.249	12	23	Lolos
3.268	6	12	Lolos
3.299	12	23	Lolos
3.332	13	25	Lolos
3.353	14	27	Lolos
3.389	11	21	Lolos
3.406	23	45	Tidak
3.543	4	8	Lolos
3.574	10	19	Lolos
3.657	9	17	Lolos
3.75	9	17	Lolos
3.883	10	19	Lolos
4.165	14	27	Lolos
4.63	7	14	Lolos
5.241	6	12	Lolos
6.393	6	12	Lolos
8.657	11	21	Lolos
8.944	5	10	Lolos
8.986	11	21	Lolos

Screening klasifikasi f*ree span*			
KP	Length (m)	L/D	*Screening*
12.803	7	14	Lolos
12.837	14	27	Lolos
12.874	6	12	Lolos
14.113	15	29	Lolos
14.385	17	33	Tidak
14.433	5	10	Lolos
15.085	10	19	Lolos
15.566	4	8	Lolos
15.594	11	21	Lolos
15.924	10	19	Lolos
16.056	8	16	Lolos
16.365	26	50	Tidak
16.392	34	66	Tidak
16.431	16	31	Tidak
16.457	15	29	Lolos
16.538	5	10	Lolos
16.564	10	19	Lolos
16.605	7	14	Lolos
16.718	10	19	Lolos
16.736	12	23	Lolos
16.811	17	33	Tidak
16.842	13	25	Lolos
16.865	11	21	Lolos
17.032	12	23	Lolos
17.167	12	23	Lolos
17.287	10	19	Lolos
17.309	9	17	Lolos
17.353	10	19	Lolos
17.665	25	48	Tidak
17.913	62	120	Tidak
18.922	36	70	Tidak

LAMPIRAN B

Data pipa, *concrete coating*, *coatin* korosi.

Data Pipa	**Satuan**	**Simbol**	**Nilai**
Material Grade	API-5L-X60		
Diameter Pipa	m	D_s	0.406
Tebal dinding pipa	m	t_{nom}	0.014
Corrosion allowance	m	t_{intcor}	0.003
Tebal dinding pipa	m	t_2	0.011
Densitas pipa	Kg/m^3	ρ_{pipa}	7850
Modululus elastisitas pipa	N/m^2	E_{pipa}	2.07E+11
Poison ratio		ν	0.30
SMYS	Pa	SMYS	4.14E+08
SMTS	Pa	SMTS	4.86E+08
Koefisien ekspansi suhu	$/^0C$	a_e	1.1E+6

Data *coating*	**Satuan**	**Simbol**	**Nilai**
Ketebalan *coating* korosi	m	t_{cor}	0.004
Densitas *coating* korosi	Kg/m^3	ρ_{cor}	1280
Ketebalan *coating* beton	m	$t_{concrete}$	0.051
Densitas beton	Kg/m^3	$\rho_{concrete}$	3043.51
Modulus elstisitas beton	Pa	$E_{concrete}$	4.10E+10
Surface roughness	m	K	0.003

Data Operasi	**Satuan**	**Simbol**	**Nilai**
Densitas fluida	Kg/m^3	ρ_{fluida}	29.3
Operating Pressure	N/m^2	P_i	1.38E+06
Operating Temperature	^0C	T_i	32.22
Suhu air laut	^0C	T	27

Properti tanah, *safety factor, boundary condition,* data lingkungan

Safety Factor		
Untuk *Fatigue*	Simbol	Nilai
Frekuensi Natural	γ_f	1.2
Sabilitas parameter	γ_k	1.15
Safety faktor *stress range*	γ_s	1.3
VIV *onset in-line*	$\gamma_{on\ il}$	1.1
VIV *onset cross-flow*	$\gamma_{on\ CF}$	1.2
Untuk Kriteria *screening*	Simbol	Nilai
Arah *in-line*	γ_{iL}	1.4
Arah *cross-flow*	γ_{CF}	1.4
Arah *in-line*	$\gamma_{f,iL}$	1.15
Arah *cross-flow*	$\gamma_{f,CF}$	1.15

	Symbol	**Value**
Boundary Condition Coefficient (Pinned-Pinned)	c1	1.57
	c2	1
	c3	0.8
	c4	4.93
	c5	0.125
	c6	0.013021

Environmental data	**Satuan**	**Symbol**	**Value**
Sea water density	Kg/M^3	ρ *sea water*	1025
Percepatan gravitasi	m/s^2	g	9.81
Viskositas kinematis air laut	m^2/s	ν	1.05E-06

LAMPIRAN C

Perhitungan Angka Gelombang pada Masing-Masing Bentangan

Angka Gelombang KP 0.78(1 tahunan)						Angka Gelombang KP 0.78 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	1.00	14.65	1.00	0.10	-0.40	0.50	0.76	14.65	1.00	0.06	-0.44
0.10	1.00	2.97	1.01	0.10	0.00	0.06	0.76	1.71	1.07	0.06	0.00
0.10	1.00	2.99	1.01	0.10	0.00	0.06	0.76	1.80	1.06	0.06	0.00
0.10	1.00	2.99	1.01	0.10	0.00	0.06	0.76	1.81	1.06	0.06	0.00
0.10	1.00	2.99	1.01	0.10	0.00	0.06	0.76	1.81	1.06	0.06	0.00
0.10	1.00	2.99	1.01	0.10	0.00	0.06	0.76	1.81	1.06	0.06	0.00

Angka Gelombang KP 1.55 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 1.55 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	1.00	12.50	1.00	0.10	-0.40	0.50	0.76	12.50	1.00	0.06	-0.44
0.10	1.00	2.53	1.01	0.10	0.00	0.06	0.76	1.46	1.11	0.06	0.01
0.10	1.00	2.56	1.01	0.10	0.00	0.06	0.76	1.58	1.09	0.06	0.00
0.10	1.00	2.57	1.01	0.10	0.00	0.06	0.76	1.59	1.09	0.06	0.00
0.10	1.00	2.57	1.01	0.10	0.00	0.06	0.76	1.59	1.09	0.06	0.00
0.10	1.00	2.57	1.01	0.10	0.00	0.06	0.76	1.59	1.09	0.06	0.00

Angka Gelombang KP 2.163 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 2.163 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	1.00	10.90	1.00	0.10	-0.40	0.50	0.76	10.90	1.00	0.06	-0.44
0.10	1.00	2.21	1.02	0.10	0.00	0.06	0.76	1.27	1.17	0.07	0.01
0.10	1.00	2.26	1.02	0.10	0.00	0.07	0.76	1.42	1.12	0.07	0.00
0.10	1.00	2.26	1.02	0.10	0.00	0.07	0.76	1.43	1.12	0.07	0.00
0.10	1.00	2.26	1.02	0.10	0.00	0.07	0.76	1.43	1.12	0.07	0.00
0.10	1.00	2.26	1.02	0.10	0.00	0.07	0.76	1.43	1.12	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 2.343 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 2.343(100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	1.00	10.45	1.00	0.10	-0.40	0.50	0.76	10.45	1.00	0.06	-0.44
0.10	1.00	2.12	1.03	0.10	0.00	0.06	0.76	1.22	1.19	0.07	0.01
0.10	1.00	2.17	1.03	0.10	0.00	0.07	0.76	1.38	1.14	0.07	0.00
0.10	1.00	2.17	1.03	0.10	0.00	0.07	0.76	1.38	1.13	0.07	0.00
0.10	1.00	2.17	1.03	0.10	0.00	0.07	0.76	1.38	1.13	0.07	0.00
0.10	1.00	2.17	1.03	0.10	0.00	0.07	0.76	1.38	1.13	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 2.381 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 2.381 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	1.00	10.35	1.00	0.10	-0.40	0.50	0.76	10.35	1.00	0.06	-0.44
0.10	1.00	2.10	1.03	0.10	0.00	0.06	0.76	1.21	1.20	0.07	0.01
0.10	1.00	2.16	1.03	0.10	0.00	0.07	0.76	1.36	1.14	0.07	0.00

K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.10	1.00	2.16	1.03	0.10	0.00	0.07	0.76	1.37	1.14	0.07	0.00
0.10	1.00	2.16	1.03	0.10	0.00	0.07	0.76	1.37	1.14	0.07	0.00
0.10	1.00	2.16	1.03	0.10	0.00	0.07	0.76	1.37	1.14	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 2.552 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 1.55 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	1.00	9.90	1.00	0.10	-0.40	0.50	0.76	9.90	1.00	0.06	-0.44
0.10	1.00	2.01	1.04	0.10	0.00	0.06	0.76	1.16	1.22	0.07	0.01
0.10	1.00	2.07	1.03	0.10	0.00	0.07	0.76	1.32	1.15	0.07	0.00
0.10	1.00	2.07	1.03	0.10	0.00	0.07	0.76	1.33	1.15	0.07	0.00
0.10	1.00	2.07	1.03	0.10	0.00	0.07	0.76	1.33	1.15	0.07	0.00
0.10	1.00	2.07	1.03	0.10	0.00	0.07	0.76	1.33	1.15	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 2.737 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 2.737 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	1.00	9.60	1.00	0.10	-0.40	0.50	0.76	9.60	1.00	0.06	-0.44
0.10	1.00	1.95	1.04	0.11	0.00	0.06	0.76	1.12	1.24	0.07	0.01
0.11	1.00	2.02	1.04	0.11	0.00	0.07	0.76	1.29	1.16	0.07	0.00
0.11	1.00	2.02	1.04	0.11	0.00	0.07	0.76	1.30	1.16	0.07	0.00
0.11	1.00	2.02	1.04	0.11	0.00	0.07	0.76	1.30	1.16	0.07	0.00
0.11	1.00	2.02	1.04	0.11	0.00	0.07	0.76	1.30	1.16	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 2.882 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 2.882 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	1.00	9.25	1.00	0.10	-0.40	0.50	0.76	9.25	1.00	0.06	-0.44
0.10	1.00	1.88	1.05	0.11	0.00	0.06	0.76	1.08	1.26	0.07	0.02
0.11	1.00	1.95	1.04	0.11	0.00	0.07	0.76	1.25	1.18	0.07	0.00
0.11	1.00	1.95	1.04	0.11	0.00	0.07	0.76	1.27	1.17	0.07	0.00
0.11	1.00	1.95	1.04	0.11	0.00	0.07	0.76	1.27	1.17	0.07	0.00
0.11	1.00	1.95	1.04	0.11	0.00	0.07	0.76	1.27	1.17	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 3.07 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 3.07 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	1.00	9.00	1.00	0.10	-0.40	0.50	0.76	9.00	1.00	0.06	-0.44
0.10	1.00	1.83	1.05	0.11	0.01	0.06	0.76	1.05	1.28	0.07	0.02
0.11	1.00	1.91	1.05	0.11	0.00	0.07	0.76	1.23	1.19	0.07	0.00
0.11	1.00	1.91	1.05	0.11	0.00	0.07	0.76	1.24	1.18	0.07	0.00
0.11	1.00	1.91	1.05	0.11	0.00	0.07	0.76	1.24	1.18	0.07	0.00
0.11	1.00	1.91	1.05	0.11	0.00	0.07	0.76	1.24	1.18	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 3.155 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 3.155 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	1.00	8.75	1.00	0.10	-0.40	0.50	0.76	8.75	1.00	0.06	-0.44
0.10	1.00	1.77	1.06	0.11	0.01	0.06	0.76	1.02	1.30	0.07	0.02

0.11	1.00	1.86	1.05	0.11	0.00	0.07	0.76	1.20	1.20	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 3.155 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 3.155 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.11	1.00	1.86	1.05	0.11	0.00	0.07	0.76	1.22	1.19	0.07	0.00
0.11	1.00	1.86	1.05	0.11	0.00	0.07	0.76	1.22	1.19	0.07	0.00
0.11	1.00	1.86	1.05	0.11	0.00	0.07	0.76	1.22	1.19	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 3.194 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 3.194 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	1.00	8.65	1.00	0.10	-0.40	0.50	0.76	8.65	1.00	0.06	-0.44
0.10	1.00	1.75	1.06	0.11	0.01	0.06	0.76	1.01	1.31	0.07	0.02
0.11	1.00	1.84	1.05	0.11	0.00	0.07	0.76	1.19	1.20	0.07	0.00
0.11	1.00	1.84	1.05	0.11	0.00	0.07	0.76	1.21	1.20	0.07	0.00
0.11	1.00	1.84	1.05	0.11	0.00	0.07	0.76	1.21	1.20	0.07	0.00
0.11	1.00	1.84	1.05	0.11	0.00	0.07	0.76	1.21	1.20	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 3.406 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 3.406 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	1.00	8.25	1.00	0.10	-0.40	0.50	0.76	8.25	1.00	0.06	-0.44
0.10	1.00	1.67	1.07	0.11	0.01	0.06	0.76	0.96	1.34	0.07	0.02
0.11	1.00	1.77	1.06	0.11	0.00	0.07	0.76	1.15	1.22	0.07	0.00
0.11	1.00	1.77	1.06	0.11	0.00	0.07	0.76	1.17	1.21	0.07	0.00
0.11	1.00	1.77	1.06	0.11	0.00	0.07	0.76	1.17	1.21	0.07	0.00
0.11	1.00	1.77	1.06	0.11	0.00	0.07	0.76	1.17	1.21	0.07	0.00

Angka Gelombang KP11.974 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 11.974 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	0.88	9.60	1.00	0.08	-0.42	0.50	0.74	9.60	1.00	0.06	-0.44
0.08	0.88	1.53	1.10	0.09	0.01	0.06	0.74	1.07	1.27	0.06	0.01
0.09	0.88	1.65	1.08	0.09	0.00	0.06	0.74	1.24	1.18	0.07	0.00
0.09	0.88	1.65	1.08	0.09	0.00	0.07	0.74	1.26	1.18	0.07	0.00
0.09	0.88	1.65	1.08	0.09	0.00	0.07	0.74	1.26	1.18	0.07	0.00
0.09	0.88	1.65	1.08	0.09	0.00	0.07	0.74	1.26	1.18	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 12.485 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 12.485 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	0.88	9.15	1.00	0.08	-0.42	0.50	0.74	9.15	1.00	0.06	-0.44
0.08	0.88	1.46	1.11	0.09	0.01	0.06	0.74	1.02	1.30	0.07	0.02
0.09	0.88	1.58	1.09	0.09	0.00	0.07	0.74	1.20	1.20	0.07	0.00
0.09	0.88	1.59	1.09	0.09	0.00	0.07	0.74	1.22	1.19	0.07	0.00
0.09	0.88	1.59	1.09	0.09	0.00	0.07	0.74	1.22	1.19	0.07	0.00
0.09	0.88	1.59	1.09	0.09	0.00	0.07	0.74	1.22	1.19	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 14.385 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 14.385 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	0.88	8.05	1.00	0.08	-0.42	0.50	0.74	8.05	1.00	0.06	-0.44
0.08	0.88	1.29	1.17	0.09	0.01	0.06	0.74	0.90	1.40	0.07	0.02
0.09	0.88	1.43	1.12	0.09	0.00	0.07	0.74	1.09	1.26	0.07	0.00
0.09	0.88	1.44	1.12	0.09	0.00	0.07	0.74	1.11	1.24	0.07	0.00
0.09	0.88	1.44	1.12	0.09	0.00	0.07	0.74	1.11	1.24	0.07	0.00
0.09	0.88	1.44	1.12	0.09	0.00	0.07	0.74	1.11	1.24	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 16.365 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 16.365 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	0.88	8.35	1.00	0.08	-0.42	0.50	0.74	8.35	1.00	0.06	-0.44
0.08	0.88	1.33	1.15	0.09	0.01	0.06	0.74	0.93	1.37	0.07	0.02
0.09	0.88	1.47	1.11	0.09	0.00	0.07	0.74	1.12	1.24	0.07	0.00
0.09	0.88	1.48	1.11	0.09	0.00	0.07	0.74	1.14	1.23	0.07	0.00
0.09	0.88	1.48	1.11	0.09	0.00	0.07	0.74	1.14	1.23	0.07	0.00
0.09	0.88	1.48	1.11	0.09	0.00	0.07	0.74	1.14	1.23	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 16.392 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 16.392 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	0.88	8.50	1.00	0.08	-0.42	0.50	0.74	8.50	1.00	0.06	-0.44
0.08	0.88	1.36	1.14	0.09	0.01	0.06	0.74	0.95	1.35	0.07	0.02
0.09	0.88	1.49	1.11	0.09	0.00	0.07	0.74	1.13	1.23	0.07	0.00
0.09	0.88	1.50	1.10	0.09	0.00	0.07	0.74	1.16	1.22	0.07	0.00
0.09	0.88	1.50	1.10	0.09	0.00	0.07	0.74	1.16	1.22	0.07	0.00
0.09	0.88	1.50	1.10	0.09	0.00	0.07	0.74	1.16	1.22	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 16.431 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 16.431 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	0.88	8.50	1.00	0.08	-0.42	0.50	0.74	8.50	1.00	0.06	-0.44
0.08	0.88	1.36	1.14	0.09	0.01	0.06	0.74	0.95	1.35	0.07	0.02
0.09	0.88	1.49	1.11	0.09	0.00	0.07	0.74	1.13	1.23	0.07	0.00
0.09	0.88	1.50	1.10	0.09	0.00	0.07	0.74	1.16	1.22	0.07	0.00
0.09	0.88	1.50	1.10	0.09	0.00	0.07	0.74	1.16	1.22	0.07	0.00
0.09	0.88	1.50	1.10	0.09	0.00	0.07	0.74	1.16	1.22	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 16.811 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 16.811 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	0.88	8.65	1.00	0.08	-0.42	0.50	0.74	8.65	1.00	0.06	-0.44
0.08	0.88	1.38	1.13	0.09	0.01	0.06	0.74	0.96	1.34	0.07	0.02
0.09	0.88	1.51	1.10	0.09	0.00	0.07	0.74	1.15	1.22	0.07	0.00
0.09	0.88	1.52	1.10	0.09	0.00	0.07	0.74	1.17	1.21	0.07	0.00
0.09	0.88	1.52	1.10	0.09	0.00	0.07	0.74	1.17	1.21	0.07	0.00
0.09	0.88	1.52	1.10	0.09	0.00	0.07	0.74	1.17	1.21	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 17.665 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 17.665 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	0.88	8.40	1.00	0.08	-0.42	0.50	0.74	8.40	1.00	0.06	-0.44
0.08	0.88	1.34	1.15	0.09	0.01	0.06	0.74	0.94	1.36	0.07	0.02
0.09	0.88	1.48	1.11	0.09	0.00	0.07	0.74	1.12	1.24	0.07	0.00
0.09	0.88	1.49	1.11	0.09	0.00	0.07	0.74	1.15	1.22	0.07	0.00
0.09	0.88	1.49	1.11	0.09	0.00	0.07	0.74	1.15	1.22	0.07	0.00
0.09	0.88	1.49	1.11	0.09	0.00	0.07	0.74	1.15	1.22	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 17.913 (1 tahunan)						Angka Gelombang KP 17.913 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	0.88	8.50	1.00	0.08	-0.42	0.50	0.74	8.50	1.00	0.06	-0.44
0.08	0.88	1.36	1.14	0.09	0.01	0.06	0.74	0.95	1.35	0.07	0.02
0.09	0.88	1.49	1.11	0.09	0.00	0.07	0.74	1.13	1.23	0.07	0.00
0.09	0.88	1.50	1.10	0.09	0.00	0.07	0.74	1.16	1.22	0.07	0.00
0.09	0.88	1.50	1.10	0.09	0.00	0.07	0.74	1.16	1.22	0.07	0.00
0.09	0.88	1.50	1.10	0.09	0.00	0.07	0.74	1.16	1.22	0.07	0.00

Angka Gelombang KP 18.922(1 tahunan)						Angka Gelombang KP 18.922 (100 tahunan)					
K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)	K	ω	K h	coth K h	K(i+1)	f(k)
0.50	0.88	7.65	1.00	0.08	-0.42	0.50	0.74	7.65	1.00	0.06	-0.44
0.08	0.88	1.22	1.19	0.09	0.02	0.06	0.74	0.85	1.44	0.07	0.02
0.09	0.88	1.38	1.14	0.09	0.00	0.07	0.74	1.05	1.28	0.07	0.00
0.09	0.88	1.38	1.13	0.09	0.00	0.07	0.74	1.08	1.26	0.07	0.00
0.09	0.88	1.38	1.13	0.09	0.00	0.07	0.74	1.08	1.26	0.07	0.00
0.09	0.88	1.38	1.13	0.09	0.00	0.07	0.74	1.08	1.26	0.07	0.00

Rekap Angka Gelombang Masing-Masing Bentangan					
KP	Length (m)	Max. Height (m)	Depth (m)	Angka Gelombang	
				1 tahun	100 tahun
0.78	18	0.3	29.3	0.10	0.06
1.55	19	0.3	25	0.10	0.06
2.163	20	0.3	21.8	0.10	0.07
2.343	26	0.3	20.9	0.10	0.07
2.381	25	0.35	20.7	0.10	0.07
2.552	18	0.25	19.8	0.10	0.07
2.737	18	0.4	19.2	0.11	0.07
2.882	17	0.25	18.5	0.11	0.07
3.07	24	0.25	18	0.11	0.07
3.155	20	0.2	17.5	0.11	0.07
3.194	21	0.35	17.3	0.11	0.07
3.406	23	0.25	16.5	0.11	0.07

Rekap Angka Gelombang Masing-Masing Bentangan					
KP	Length (m)	Max. Height (m)	Depth (m)	Angka Gelombang	
				1 tahun	100 tahun
11.974	18	0.3	19.2	0.09	0.07
12.485	17	0.35	18.3	0.09	0.07
14.385	17	0.3	16.1	0.09	0.07
16.365	26	0.6	16.7	0.09	0.07
16.392	34	0.5	17	0.09	0.07
16.431	16	0.4	17	0.09	0.07
16.811	17	0.2	17.3	0.09	0.07
17.665	25	0.55	16.8	0.09	0.07
17.913	62	0.6	17	0.09	0.07
18.922	36	0.5	15.3	0.09	0.07

Perhitungan *wave-induced velocity*

Spektra Gelombang KP 0.78 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	SM*S_{UU}	ω^2 * SM * SUU
0.01	1	0E+00	1E-06	0E+00	0E+00	0E+00
0.1	4	0E+00	1E-04	0E+00	0E+00	0E+00
0.2	2	4E-266	4E-04	1E-269	3E-269	1E-270
0.3	4	3E-51	9E-04	2E-54	1E-53	9E-55
0.4	2	1E-15	2E-03	2E-18	4E-18	6E-19
0.5	4	3E-06	3E-03	9E-09	3E-08	9E-09
0.6	2	5E-03	4E-03	2E-05	4E-05	1E-05
0.7	4	8E-02	5E-03	4E-04	2E-03	8E-04
0.8	2	2E-01	7E-03	1E-03	3E-03	2E-03
0.9	4	3E-01	8E-03	3E-03	1E-02	8E-03
1	2	3E-01	1E-02	3E-03	6E-03	6E-03
1.1	4	3E-01	1E-02	3E-03	1E-02	2E-02
1.2	2	2E-01	1E-02	3E-03	6E-03	8E-03
1.3	4	2E-01	2E-02	3E-03	1E-02	2E-02
1.4	2	1E-01	2E-02	2E-03	5E-03	9E-03
1.5	4	9E-02	2E-02	2E-03	8E-03	2E-02
1.6	2	6E-02	3E-02	2E-03	3E-03	9E-03
1.7	4	5E-02	3E-02	1E-03	6E-03	2E-02
1.8	2	4E-02	3E-02	1E-03	3E-03	8E-03
1.9	4	3E-02	4E-02	1E-03	4E-03	2E-02
2	1	2E-02	4E-02	1E-03	1E-03	4E-03
				SUM	7.99E-02	1.40E-01

Spektra Gelombang KP 1.55 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	SM*S_{UU}	ω^2 * SM * SUU
0.01	1	0.0E+00	2.4E-06	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	2.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	3.6E-266	9.6E-04	3.4E-269	6.9E-269	2.8E-270
0.3	4	2.6E-51	2.2E-03	5.6E-54	2.2E-53	2.0E-54
0.4	2	1.2E-15	3.9E-03	4.7E-18	9.4E-18	1.5E-18
0.5	4	3.3E-06	6.0E-03	2.0E-08	8.0E-08	2.0E-08
0.6	2	4.9E-03	8.7E-03	4.2E-05	8.5E-05	3.1E-05
0.7	4	7.6E-02	1.2E-02	9.0E-04	3.6E-03	1.8E-03
0.8	2	2.2E-01	1.5E-02	3.4E-03	6.7E-03	4.3E-03
0.9	4	3.1E-01	2.0E-02	6.0E-03	2.4E-02	1.9E-02
1	2	3.0E-01	2.4E-02	7.3E-03	1.5E-02	1.5E-02
1.1	4	2.5E-01	2.9E-02	7.4E-03	2.9E-02	3.6E-02
1.2	2	2.0E-01	3.5E-02	6.9E-03	1.4E-02	2.0E-02
1.3	4	1.5E-01	4.1E-02	6.2E-03	2.5E-02	4.2E-02
1.4	2	1.1E-01	4.7E-02	5.4E-03	1.1E-02	2.1E-02

ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
1.5	4	8.6E-02	5.4E-02	4.7E-03	1.9E-02	4.2E-02
1.6	2	6.5E-02	6.2E-02	4.0E-03	8.0E-03	2.1E-02
1.7	4	5.0E-02	7.0E-02	3.5E-03	1.4E-02	4.0E-02
1.8	2	3.8E-02	7.8E-02	3.0E-03	6.0E-03	1.9E-02
1.9	4	3.0E-02	8.7E-02	2.6E-03	1.0E-02	3.7E-02
2	1	2.3E-02	9.6E-02	2.2E-03	2.2E-03	9.0E-03
				SUM	1.87E-01	3.26E-01

Angka Gelombang KP 2.163 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	4.5E-06	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	4.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	3.6E-266	1.8E-03	6.4E-269	1.3E-268	5.1E-270
0.3	4	2.6E-51	4.0E-03	1.0E-53	4.1E-53	3.7E-54
0.4	2	1.2E-15	7.2E-03	8.8E-18	1.8E-17	2.8E-18
0.5	4	3.3E-06	1.1E-02	3.7E-08	1.5E-07	3.7E-08
0.6	2	4.9E-03	1.6E-02	7.9E-05	1.6E-04	5.7E-05
0.7	4	7.6E-02	2.2E-02	1.7E-03	6.7E-03	3.3E-03
0.8	2	2.2E-01	2.9E-02	6.3E-03	1.3E-02	8.0E-03
0.9	4	3.1E-01	3.6E-02	1.1E-02	4.5E-02	3.6E-02
1	2	3.0E-01	4.5E-02	1.4E-02	2.7E-02	2.7E-02
1.1	4	2.5E-01	5.4E-02	1.4E-02	5.5E-02	6.6E-02
1.2	2	2.0E-01	6.5E-02	1.3E-02	2.6E-02	3.7E-02
1.3	4	1.5E-01	7.6E-02	1.1E-02	4.6E-02	7.7E-02
1.4	2	1.1E-01	8.8E-02	1.0E-02	2.0E-02	3.9E-02
1.5	4	8.6E-02	1.0E-01	8.7E-03	3.5E-02	7.8E-02
1.6	2	6.5E-02	1.1E-01	7.5E-03	1.5E-02	3.8E-02
1.7	4	5.0E-02	1.3E-01	6.4E-03	2.6E-02	7.4E-02
1.8	2	3.8E-02	1.5E-01	5.6E-03	1.1E-02	3.6E-02
1.9	4	3.0E-02	1.6E-01	4.8E-03	1.9E-02	6.9E-02
2	1	2.3E-02	1.8E-01	4.2E-03	4.2E-03	1.7E-02
				SUM	3.5E-01	6.1E-01

Spektra Gelombang KP 2.343 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	5.3E-06	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	5.3E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	3.6E-266	2.1E-03	7.6E-269	1.5E-268	6.1E-270
0.3	4	2.6E-51	4.8E-03	1.2E-53	4.9E-53	4.4E-54
0.4	2	1.2E-15	8.5E-03	1.0E-17	2.1E-17	3.3E-18
0.5	4	3.3E-06	1.3E-02	4.4E-08	1.8E-07	4.4E-08
0.6	2	4.9E-03	1.9E-02	9.4E-05	1.9E-04	6.8E-05
0.7	4	7.6E-02	2.6E-02	2.0E-03	8.0E-03	3.9E-03
0.8	2	2.2E-01	3.4E-02	7.4E-03	1.5E-02	9.5E-03

ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.9	4	3.1E-01	4.3E-02	1.3E-02	5.3E-02	4.3E-02
1	2	3.0E-01	5.3E-02	1.6E-02	3.3E-02	3.3E-02
1.1	4	2.5E-01	6.5E-02	1.6E-02	6.5E-02	7.9E-02
1.2	2	2.0E-01	7.7E-02	1.5E-02	3.0E-02	4.4E-02
1.3	4	1.5E-01	9.0E-02	1.4E-02	5.4E-02	9.2E-02
1.4	2	1.1E-01	1.0E-01	1.2E-02	2.4E-02	4.7E-02
1.5	4	8.6E-02	1.2E-01	1.0E-02	4.1E-02	9.3E-02
1.6	2	6.5E-02	1.4E-01	8.9E-03	1.8E-02	4.6E-02
1.7	4	5.0E-02	1.5E-01	7.7E-03	3.1E-02	8.8E-02
1.8	2	3.8E-02	1.7E-01	6.6E-03	1.3E-02	4.3E-02
1.9	4	3.0E-02	1.9E-01	5.7E-03	2.3E-02	8.3E-02
2	1	2.3E-02	2.1E-01	5.0E-03	5.0E-03	2.0E-02
				SUM	4.1E-01	7.2E-01

Spektra Gelombang KP 2.381 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	5.6E-06	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	5.6E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	3.6E-266	2.2E-03	7.9E-269	1.6E-268	6.3E-270
0.3	4	2.6E-51	5.0E-03	1.3E-53	5.1E-53	4.6E-54
0.4	2	1.2E-15	8.9E-03	1.1E-17	2.2E-17	3.5E-18
0.5	4	3.3E-06	1.4E-02	4.6E-08	1.8E-07	4.6E-08
0.6	2	4.9E-03	2.0E-02	9.8E-05	2.0E-04	7.0E-05
0.7	4	7.6E-02	2.7E-02	2.1E-03	8.3E-03	4.1E-03
0.8	2	2.2E-01	3.6E-02	7.7E-03	1.5E-02	9.9E-03
0.9	4	3.1E-01	4.5E-02	1.4E-02	5.5E-02	4.5E-02
1	2	3.0E-01	5.6E-02	1.7E-02	3.4E-02	3.4E-02
1.1	4	2.5E-01	6.7E-02	1.7E-02	6.8E-02	8.2E-02
1.2	2	2.0E-01	8.0E-02	1.6E-02	3.2E-02	4.6E-02
1.3	4	1.5E-01	9.4E-02	1.4E-02	5.7E-02	9.6E-02
1.4	2	1.1E-01	1.1E-01	1.2E-02	2.5E-02	4.9E-02
1.5	4	8.6E-02	1.2E-01	1.1E-02	4.3E-02	9.7E-02
1.6	2	6.5E-02	1.4E-01	9.2E-03	1.8E-02	4.7E-02
1.7	4	5.0E-02	1.6E-01	8.0E-03	3.2E-02	9.2E-02
1.8	2	3.8E-02	1.8E-01	6.9E-03	1.4E-02	4.5E-02
1.9	4	3.0E-02	2.0E-01	6.0E-03	2.4E-02	8.6E-02
2	1	2.3E-02	2.2E-01	5.2E-03	5.2E-03	2.1E-02
				SUM	4.3E-01	7.5E-01

Spektra Gelombang KP 2.552 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	6.6E-06	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	6.6E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	3.6E-266	2.6E-03	9.4E-269	1.9E-268	7.5E-270

ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.3	4	2.6E-51	5.9E-03	1.5E-53	6.1E-53	5.5E-54
0.4	2	1.2E-15	1.1E-02	1.3E-17	2.6E-17	4.1E-18
0.5	4	3.3E-06	1.6E-02	5.5E-08	2.2E-07	5.5E-08
0.6	2	4.9E-03	2.4E-02	1.2E-04	2.3E-04	8.4E-05
0.7	4	7.6E-02	3.2E-02	2.5E-03	9.8E-03	4.8E-03
0.8	2	2.2E-01	4.2E-02	9.2E-03	1.8E-02	1.2E-02
0.9	4	3.1E-01	5.3E-02	1.6E-02	6.6E-02	5.3E-02
1	2	3.0E-01	6.6E-02	2.0E-02	4.0E-02	4.0E-02
1.1	4	2.5E-01	8.0E-02	2.0E-02	8.0E-02	9.7E-02
1.2	2	2.0E-01	9.5E-02	1.9E-02	3.8E-02	5.4E-02
1.3	4	1.5E-01	1.1E-01	1.7E-02	6.7E-02	1.1E-01
1.4	2	1.1E-01	1.3E-01	1.5E-02	2.9E-02	5.8E-02
1.5	4	8.6E-02	1.5E-01	1.3E-02	5.1E-02	1.1E-01
1.6	2	6.5E-02	1.7E-01	1.1E-02	2.2E-02	5.6E-02
1.7	4	5.0E-02	1.9E-01	9.4E-03	3.8E-02	1.1E-01
1.8	2	3.8E-02	2.1E-01	8.1E-03	1.6E-02	5.3E-02
1.9	4	3.0E-02	2.4E-01	7.1E-03	2.8E-02	1.0E-01
2	1	2.3E-02	2.6E-01	6.1E-03	6.1E-03	2.5E-02
				SUM	5.1E-01	8.9E-01

Spektra Gelombang KP 2.737 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	7.4E-06	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	7.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	3.6E-266	3.0E-03	1.1E-268	2.1E-268	8.5E-270
0.3	4	2.6E-51	6.7E-03	1.7E-53	6.8E-53	6.2E-54
0.4	2	1.2E-15	1.2E-02	1.4E-17	2.9E-17	4.6E-18
0.5	4	3.3E-06	1.9E-02	6.2E-08	2.5E-07	6.2E-08
0.6	2	4.9E-03	2.7E-02	1.3E-04	2.6E-04	9.4E-05
0.7	4	7.6E-02	3.6E-02	2.8E-03	1.1E-02	5.4E-03
0.8	2	2.2E-01	4.7E-02	1.0E-02	2.1E-02	1.3E-02
0.9	4	3.1E-01	6.0E-02	1.8E-02	7.4E-02	6.0E-02
1	2	3.0E-01	7.4E-02	2.3E-02	4.5E-02	4.5E-02
1.1	4	2.5E-01	9.0E-02	2.3E-02	9.0E-02	1.1E-01
1.2	2	2.0E-01	1.1E-01	2.1E-02	4.2E-02	6.1E-02
1.3	4	1.5E-01	1.3E-01	1.9E-02	7.6E-02	1.3E-01
1.4	2	1.1E-01	1.5E-01	1.7E-02	3.3E-02	6.5E-02
1.5	4	8.6E-02	1.7E-01	1.4E-02	5.7E-02	1.3E-01
1.6	2	6.5E-02	1.9E-01	1.2E-02	2.5E-02	6.3E-02
1.7	4	5.0E-02	2.1E-01	1.1E-02	4.2E-02	1.2E-01
1.8	2	3.8E-02	2.4E-01	9.2E-03	1.8E-02	5.9E-02
1.9	4	3.0E-02	2.7E-01	7.9E-03	3.2E-02	1.1E-01
2	1	2.3E-02	3.0E-01	6.9E-03	6.9E-03	2.8E-02
				SUM	5.7E-01	1.0E+00

Spektra Gelombang KP 2.882 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	SM*S_{UU}	ω^2 * SM * SUU
0.01	1	0.0E+00	8.4E-06	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	8.4E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	3.6E-266	3.4E-03	1.2E-268	2.4E-268	9.6E-270
0.3	4	2.6E-51	7.6E-03	1.9E-53	7.8E-53	7.0E-54
0.4	2	1.2E-15	1.4E-02	1.6E-17	3.3E-17	5.3E-18
0.5	4	3.3E-06	2.1E-02	7.0E-08	2.8E-07	7.0E-08
0.6	2	4.9E-03	3.0E-02	1.5E-04	3.0E-04	1.1E-04
0.7	4	7.6E-02	4.1E-02	3.2E-03	1.3E-02	6.2E-03
0.8	2	2.2E-01	5.4E-02	1.2E-02	2.4E-02	1.5E-02
0.9	4	3.1E-01	6.8E-02	2.1E-02	8.4E-02	6.8E-02
1	2	3.0E-01	8.4E-02	2.6E-02	5.1E-02	5.1E-02
1.1	4	2.5E-01	1.0E-01	2.6E-02	1.0E-01	1.2E-01
1.2	2	2.0E-01	1.2E-01	2.4E-02	4.8E-02	6.9E-02
1.3	4	1.5E-01	1.4E-01	2.2E-02	8.6E-02	1.5E-01
1.4	2	1.1E-01	1.7E-01	1.9E-02	3.8E-02	7.4E-02
1.5	4	8.6E-02	1.9E-01	1.6E-02	6.5E-02	1.5E-01
1.6	2	6.5E-02	2.2E-01	1.4E-02	2.8E-02	7.2E-02
1.7	4	5.0E-02	2.4E-01	1.2E-02	4.8E-02	1.4E-01
1.8	2	3.8E-02	2.7E-01	1.0E-02	2.1E-02	6.8E-02
1.9	4	3.0E-02	3.0E-01	9.0E-03	3.6E-02	1.3E-01
2	1	2.3E-02	3.4E-01	7.9E-03	7.9E-03	3.1E-02
				SUM	6.5E-01	1.1E+00

Spektra Gelombang KP 3.07 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	SM*S_{UU}	ω^2 * SM * SUU
0.01	1	0.0E+00	9.3E-06	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	9.3E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	3.6E-266	3.7E-03	1.3E-268	2.6E-268	1.1E-269
0.3	4	2.6E-51	8.4E-03	2.1E-53	8.6E-53	7.7E-54
0.4	2	1.2E-15	1.5E-02	1.8E-17	3.6E-17	5.8E-18
0.5	4	3.3E-06	2.3E-02	7.7E-08	3.1E-07	7.7E-08
0.6	2	4.9E-03	3.3E-02	1.6E-04	3.3E-04	1.2E-04
0.7	4	7.6E-02	4.5E-02	3.5E-03	1.4E-02	6.8E-03
0.8	2	2.2E-01	5.9E-02	1.3E-02	2.6E-02	1.7E-02
0.9	4	3.1E-01	7.5E-02	2.3E-02	9.3E-02	7.5E-02
1	2	3.0E-01	9.3E-02	2.8E-02	5.6E-02	5.6E-02
1.1	4	2.5E-01	1.1E-01	2.8E-02	1.1E-01	1.4E-01
1.2	2	2.0E-01	1.3E-01	2.6E-02	5.3E-02	7.6E-02
1.3	4	1.5E-01	1.6E-01	2.4E-02	9.5E-02	1.6E-01
1.4	2	1.1E-01	1.8E-01	2.1E-02	4.1E-02	8.1E-02
1.5	4	8.6E-02	2.1E-01	1.8E-02	7.2E-02	1.6E-01

ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
1.6	2	6.5E-02	2.4E-01	1.5E-02	3.1E-02	7.9E-02
1.7	4	5.0E-02	2.7E-01	1.3E-02	5.3E-02	1.5E-01
1.8	2	3.8E-02	3.0E-01	1.1E-02	2.3E-02	7.4E-02
1.9	4	3.0E-02	3.4E-01	9.9E-03	4.0E-02	1.4E-01
2	1	2.3E-02	3.7E-01	8.6E-03	8.6E-03	3.5E-02
				SUM	7.2E-01	1.3E+00

Spektra Gelombang KP 3.155 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	1.0E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	1.0E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	3.6E-266	4.1E-03	1.5E-268	2.9E-268	1.2E-269
0.3	4	2.6E-51	9.2E-03	2.4E-53	9.4E-53	8.5E-54
0.4	2	1.2E-15	1.6E-02	2.0E-17	4.0E-17	6.4E-18
0.5	4	3.3E-06	2.5E-02	8.5E-08	3.4E-07	8.5E-08
0.6	2	4.9E-03	3.7E-02	1.8E-04	3.6E-04	1.3E-04
0.7	4	7.6E-02	5.0E-02	3.8E-03	1.5E-02	7.5E-03
0.8	2	2.2E-01	6.5E-02	1.4E-02	2.8E-02	1.8E-02
0.9	4	3.1E-01	8.3E-02	2.5E-02	1.0E-01	8.2E-02
1	2	3.0E-01	1.0E-01	3.1E-02	6.2E-02	6.2E-02
1.1	4	2.5E-01	1.2E-01	3.1E-02	1.2E-01	1.5E-01
1.2	2	2.0E-01	1.5E-01	2.9E-02	5.8E-02	8.4E-02
1.3	4	1.5E-01	1.7E-01	2.6E-02	1.0E-01	1.8E-01
1.4	2	1.1E-01	2.0E-01	2.3E-02	4.6E-02	8.9E-02
1.5	4	8.6E-02	2.3E-01	2.0E-02	7.9E-02	1.8E-01
1.6	2	6.5E-02	2.6E-01	1.7E-02	3.4E-02	8.7E-02
1.7	4	5.0E-02	2.9E-01	1.5E-02	5.8E-02	1.7E-01
1.8	2	3.8E-02	3.3E-01	1.3E-02	2.5E-02	8.2E-02
1.9	4	3.0E-02	3.7E-01	1.1E-02	4.4E-02	1.6E-01
2	1	2.3E-02	4.1E-01	9.5E-03	9.5E-03	3.8E-02
				SUM	7.9E-01	1.4E+00

Spektra Gelombang KP 3.194 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	1.1E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	1.1E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	3.6E-266	4.2E-03	1.5E-268	3.0E-268	1.2E-269
0.3	4	2.6E-51	9.6E-03	2.5E-53	9.8E-53	8.8E-54
0.4	2	1.2E-15	1.7E-02	2.1E-17	4.1E-17	6.6E-18
0.5	4	3.3E-06	2.7E-02	8.8E-08	3.5E-07	8.8E-08
0.6	2	4.9E-03	3.8E-02	1.9E-04	3.7E-04	1.3E-04
0.7	4	7.6E-02	5.2E-02	4.0E-03	1.6E-02	7.8E-03
0.8	2	2.2E-01	6.8E-02	1.5E-02	3.0E-02	1.9E-02
0.9	4	3.1E-01	8.6E-02	2.6E-02	1.1E-01	8.6E-02

ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
1	2	3.0E-01	1.1E-01	3.2E-02	6.5E-02	6.5E-02
1.1	4	2.5E-01	1.3E-01	3.2E-02	1.3E-01	1.6E-01
1.2	2	2.0E-01	1.5E-01	3.0E-02	6.0E-02	8.7E-02
1.3	4	1.5E-01	1.8E-01	2.7E-02	1.1E-01	1.8E-01
1.4	2	1.1E-01	2.1E-01	2.4E-02	4.7E-02	9.3E-02
1.5	4	8.6E-02	2.4E-01	2.1E-02	8.2E-02	1.8E-01
1.6	2	6.5E-02	2.7E-01	1.8E-02	3.5E-02	9.0E-02
1.7	4	5.0E-02	3.1E-01	1.5E-02	6.1E-02	1.8E-01
1.8	2	3.8E-02	3.4E-01	1.3E-02	2.6E-02	8.5E-02
1.9	4	3.0E-02	3.8E-01	1.1E-02	4.5E-02	1.6E-01
2	1	2.3E-02	4.2E-01	9.9E-03	9.9E-03	4.0E-02
				SUM	8.2E-01	1.4E+00

Sepektra Gelombang KP 3.406 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	1.2E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	1.2E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	3.6E-266	4.9E-03	1.8E-268	3.5E-268	1.4E-269
0.3	4	2.6E-51	1.1E-02	2.8E-53	1.1E-52	1.0E-53
0.4	2	1.2E-15	2.0E-02	2.4E-17	4.8E-17	7.7E-18
0.5	4	3.3E-06	3.1E-02	1.0E-07	4.1E-07	1.0E-07
0.6	2	4.9E-03	4.4E-02	2.2E-04	4.3E-04	1.6E-04
0.7	4	7.6E-02	6.0E-02	4.6E-03	1.8E-02	9.0E-03
0.8	2	2.2E-01	7.9E-02	1.7E-02	3.4E-02	2.2E-02
0.9	4	3.1E-01	1.0E-01	3.1E-02	1.2E-01	1.0E-01
1	2	3.0E-01	1.2E-01	3.8E-02	7.5E-02	7.5E-02
1.1	4	2.5E-01	1.5E-01	3.8E-02	1.5E-01	1.8E-01
1.2	2	2.0E-01	1.8E-01	3.5E-02	7.0E-02	1.0E-01
1.3	4	1.5E-01	2.1E-01	3.1E-02	1.3E-01	2.1E-01
1.4	2	1.1E-01	2.4E-01	2.8E-02	5.5E-02	1.1E-01
1.5	4	8.6E-02	2.8E-01	2.4E-02	9.5E-02	2.1E-01
1.6	2	6.5E-02	3.2E-01	2.1E-02	4.1E-02	1.1E-01
1.7	4	5.0E-02	3.6E-01	1.8E-02	7.1E-02	2.0E-01
1.8	2	3.8E-02	4.0E-01	1.5E-02	3.0E-02	9.9E-02
1.9	4	3.0E-02	4.5E-01	1.3E-02	5.3E-02	1.9E-01
2	1	2.3E-02	4.9E-01	1.1E-02	1.1E-02	4.6E-02
				SUM	9.5E-01	1.7E+00

Spektra Gelombang KP 0.78 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	1.1E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	1.1E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	1.7E-86	4.6E-03	7.7E-89	1.5E-88	6.2E-90

ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.3	4	9.1E-16	1.0E-02	9.3E-18	3.7E-17	3.4E-18
0.4	2	2.4E-04	1.8E-02	4.4E-06	8.8E-06	1.4E-06
0.5	4	1.6E-01	2.9E-02	4.4E-03	1.8E-02	4.4E-03
0.6	2	1.0E+00	4.1E-02	4.3E-02	8.5E-02	3.1E-02
0.7	4	2.1E+00	5.6E-02	1.2E-01	4.8E-01	2.4E-01
0.8	2	1.5E+00	7.3E-02	1.1E-01	2.2E-01	1.4E-01
0.9	4	9.6E-01	9.3E-02	8.9E-02	3.6E-01	2.9E-01
1	2	6.7E-01	1.1E-01	7.7E-02	1.5E-01	1.5E-01
1.1	4	4.6E-01	1.4E-01	6.4E-02	2.6E-01	3.1E-01
1.2	2	3.2E-01	1.6E-01	5.3E-02	1.1E-01	1.5E-01
1.3	4	2.2E-01	1.9E-01	4.3E-02	1.7E-01	2.9E-01
1.4	2	1.6E-01	2.2E-01	3.6E-02	7.1E-02	1.4E-01
1.5	4	1.2E-01	2.6E-01	3.0E-02	1.2E-01	2.7E-01
1.6	2	8.5E-02	2.9E-01	2.5E-02	5.0E-02	1.3E-01
1.7	4	6.3E-02	3.3E-01	2.1E-02	8.3E-02	2.4E-01
1.8	2	4.8E-02	3.7E-01	1.8E-02	3.5E-02	1.1E-01
1.9	4	3.7E-02	4.1E-01	1.5E-02	6.1E-02	2.2E-01
2	1	2.9E-02	4.6E-01	1.3E-02	1.3E-02	5.2E-02
				SUM	2.3E+00	2.8E+00

Spektra Gelombang KP 1.55 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	1.8E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	1.8E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	1.7E-86	7.3E-03	1.2E-88	2.5E-88	9.9E-90
0.3	4	9.1E-16	1.6E-02	1.5E-17	6.0E-17	5.4E-18
0.4	2	2.4E-04	2.9E-02	7.0E-06	1.4E-05	2.3E-06
0.5	4	1.6E-01	4.6E-02	7.1E-03	2.8E-02	7.1E-03
0.6	2	1.0E+00	6.6E-02	6.8E-02	1.4E-01	4.9E-02
0.7	4	2.1E+00	8.9E-02	1.9E-01	7.7E-01	3.8E-01
0.8	2	1.5E+00	1.2E-01	1.8E-01	3.6E-01	2.3E-01
0.9	4	9.6E-01	1.5E-01	1.4E-01	5.7E-01	4.6E-01
1	2	6.7E-01	1.8E-01	1.2E-01	2.5E-01	2.5E-01
1.1	4	4.6E-01	2.2E-01	1.0E-01	4.1E-01	4.9E-01
1.2	2	3.2E-01	2.6E-01	8.4E-02	1.7E-01	2.4E-01
1.3	4	2.2E-01	3.1E-01	6.9E-02	2.8E-01	4.7E-01
1.4	2	1.6E-01	3.6E-01	5.7E-02	1.1E-01	2.2E-01
1.5	4	1.2E-01	4.1E-01	4.7E-02	1.9E-01	4.3E-01
1.6	2	8.5E-02	4.7E-01	4.0E-02	7.9E-02	2.0E-01
1.7	4	6.3E-02	5.3E-01	3.3E-02	1.3E-01	3.9E-01
1.8	2	4.8E-02	5.9E-01	2.8E-02	5.7E-02	1.8E-01
1.9	4	3.7E-02	6.6E-01	2.4E-02	9.7E-02	3.5E-01
2	1	2.9E-02	7.3E-01	2.1E-02	2.1E-02	8.3E-02
				SUM	3.6E+00	4.4E+00

Angka Gelombang KP 2.163 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	2.6E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	2.6E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	1.7E-86	1.0E-02	1.8E-88	3.5E-88	1.4E-89
0.3	4	9.1E-16	2.3E-02	2.1E-17	8.5E-17	7.6E-18
0.4	2	2.4E-04	4.1E-02	1.0E-05	2.0E-05	3.2E-06
0.5	4	1.6E-01	6.5E-02	1.0E-02	4.0E-02	1.0E-02
0.6	2	1.0E+00	9.3E-02	9.7E-02	1.9E-01	6.9E-02
0.7	4	2.1E+00	1.3E-01	2.7E-01	1.1E+00	5.3E-01
0.8	2	1.5E+00	1.7E-01	2.5E-01	5.1E-01	3.3E-01
0.9	4	9.6E-01	2.1E-01	2.0E-01	8.1E-01	6.6E-01
1	2	6.7E-01	2.6E-01	1.7E-01	3.5E-01	3.5E-01
1.1	4	4.6E-01	3.1E-01	1.5E-01	5.8E-01	7.0E-01
1.2	2	3.2E-01	3.7E-01	1.2E-01	2.4E-01	3.4E-01
1.3	4	2.2E-01	4.4E-01	9.8E-02	3.9E-01	6.6E-01
1.4	2	1.6E-01	5.1E-01	8.1E-02	1.6E-01	3.2E-01
1.5	4	1.2E-01	5.8E-01	6.7E-02	2.7E-01	6.0E-01
1.6	2	8.5E-02	6.6E-01	5.6E-02	1.1E-01	2.9E-01
1.7	4	6.3E-02	7.5E-01	4.7E-02	1.9E-01	5.5E-01
1.8	2	4.8E-02	8.4E-01	4.0E-02	8.0E-02	2.6E-01
1.9	4	3.7E-02	9.4E-01	3.4E-02	1.4E-01	5.0E-01
2	1	2.9E-02	1.0E+00	3.0E-02	3.0E-02	1.2E-01
				SUM	5.2E+00	6.3E+00

Spektra Gelombang KP 2.343 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	2.9E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	2.9E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	1.7E-86	1.1E-02	1.9E-88	3.9E-88	1.5E-89
0.3	4	9.1E-16	2.6E-02	2.3E-17	9.3E-17	8.4E-18
0.4	2	2.4E-04	4.6E-02	1.1E-05	2.2E-05	3.5E-06
0.5	4	1.6E-01	7.2E-02	1.1E-02	4.5E-02	1.1E-02
0.6	2	1.0E+00	1.0E-01	1.1E-01	2.1E-01	7.7E-02
0.7	4	2.1E+00	1.4E-01	3.0E-01	1.2E+00	5.9E-01
0.8	2	1.5E+00	1.8E-01	2.8E-01	5.6E-01	3.6E-01
0.9	4	9.6E-01	2.3E-01	2.2E-01	9.0E-01	7.3E-01
1	2	6.7E-01	2.9E-01	1.9E-01	3.8E-01	3.8E-01
1.1	4	4.6E-01	3.5E-01	1.6E-01	6.4E-01	7.8E-01
1.2	2	3.2E-01	4.1E-01	1.3E-01	2.6E-01	3.8E-01
1.3	4	2.2E-01	4.8E-01	1.1E-01	4.3E-01	7.3E-01
1.4	2	1.6E-01	5.6E-01	8.9E-02	1.8E-01	3.5E-01
1.5	4	1.2E-01	6.4E-01	7.4E-02	3.0E-01	6.7E-01
1.6	2	8.5E-02	7.3E-01	6.2E-02	1.2E-01	3.2E-01

ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
1.7	4	6.3E-02	8.3E-01	5.2E-02	2.1E-01	6.0E-01
1.8	2	4.8E-02	9.3E-01	4.4E-02	8.9E-02	2.9E-01
1.9	4	3.7E-02	1.0E+00	3.8E-02	1.5E-01	5.5E-01
2	1	2.9E-02	1.1E+00	3.3E-02	3.3E-02	1.3E-01
				SUM	5.7E+00	6.9E+00

Spektra Gelombang KP 2.381 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	2.9E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	2.9E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	1.7E-86	1.2E-02	2.0E-88	4.0E-88	1.6E-89
0.3	4	9.1E-16	2.6E-02	2.4E-17	9.6E-17	8.6E-18
0.4	2	2.4E-04	4.7E-02	1.1E-05	2.3E-05	3.6E-06
0.5	4	1.6E-01	7.3E-02	1.1E-02	4.6E-02	1.1E-02
0.6	2	1.0E+00	1.1E-01	1.1E-01	2.2E-01	7.9E-02
0.7	4	2.1E+00	1.4E-01	3.1E-01	1.2E+00	6.0E-01
0.8	2	1.5E+00	1.9E-01	2.9E-01	5.8E-01	3.7E-01
0.9	4	9.6E-01	2.4E-01	2.3E-01	9.2E-01	7.4E-01
1	2	6.7E-01	2.9E-01	2.0E-01	3.9E-01	3.9E-01
1.1	4	4.6E-01	3.5E-01	1.6E-01	6.6E-01	7.9E-01
1.2	2	3.2E-01	4.2E-01	1.4E-01	2.7E-01	3.9E-01
1.3	4	2.2E-01	5.0E-01	1.1E-01	4.4E-01	7.5E-01
1.4	2	1.6E-01	5.7E-01	9.1E-02	1.8E-01	3.6E-01
1.5	4	1.2E-01	6.6E-01	7.6E-02	3.0E-01	6.8E-01
1.6	2	8.5E-02	7.5E-01	6.4E-02	1.3E-01	3.3E-01
1.7	4	6.3E-02	8.5E-01	5.4E-02	2.1E-01	6.2E-01
1.8	2	4.8E-02	9.5E-01	4.5E-02	9.1E-02	2.9E-01
1.9	4	3.7E-02	1.1E+00	3.9E-02	1.6E-01	5.6E-01
2	1	2.9E-02	1.2E+00	3.3E-02	3.3E-02	1.3E-01
				SUM	5.9E+00	7.1E+00

Spektra Gelombang KP 2.552 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	3.2E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	3.2E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	1.7E-86	1.3E-02	2.2E-88	4.4E-88	1.8E-89
0.3	4	9.1E-16	2.9E-02	2.6E-17	1.1E-16	9.5E-18
0.4	2	2.4E-04	5.2E-02	1.3E-05	2.5E-05	4.0E-06
0.5	4	1.6E-01	8.1E-02	1.3E-02	5.0E-02	1.3E-02
0.6	2	1.0E+00	1.2E-01	1.2E-01	2.4E-01	8.7E-02
0.7	4	2.1E+00	1.6E-01	3.4E-01	1.4E+00	6.7E-01
0.8	2	1.5E+00	2.1E-01	3.2E-01	6.4E-01	4.1E-01
0.9	4	9.6E-01	2.6E-01	2.5E-01	1.0E+00	8.2E-01
1	2	6.7E-01	3.2E-01	2.2E-01	4.4E-01	4.4E-01

ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
1.1	4	4.6E-01	3.9E-01	1.8E-01	7.3E-01	8.8E-01
1.2	2	3.2E-01	4.7E-01	1.5E-01	3.0E-01	4.3E-01
1.3	4	2.2E-01	5.5E-01	1.2E-01	4.9E-01	8.3E-01
1.4	2	1.6E-01	6.4E-01	1.0E-01	2.0E-01	4.0E-01
1.5	4	1.2E-01	7.3E-01	8.4E-02	3.4E-01	7.6E-01
1.6	2	8.5E-02	8.3E-01	7.0E-02	1.4E-01	3.6E-01
1.7	4	6.3E-02	9.4E-01	5.9E-02	2.4E-01	6.8E-01
1.8	2	4.8E-02	1.0E+00	5.0E-02	1.0E-01	3.3E-01
1.9	4	3.7E-02	1.2E+00	4.3E-02	1.7E-01	6.2E-01
2	1	2.9E-02	1.3E+00	3.7E-02	3.7E-02	1.5E-01
				SUM	6.5E+00	7.9E+00

Spektra Gelombang KP 2.737 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	3.5E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	3.5E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	1.7E-86	1.4E-02	2.3E-88	4.7E-88	1.9E-89
0.3	4	9.1E-16	3.1E-02	2.8E-17	1.1E-16	1.0E-17
0.4	2	2.4E-04	5.6E-02	1.3E-05	2.7E-05	4.3E-06
0.5	4	1.6E-01	8.7E-02	1.3E-02	5.4E-02	1.3E-02
0.6	2	1.0E+00	1.2E-01	1.3E-01	2.6E-01	9.3E-02
0.7	4	2.1E+00	1.7E-01	3.7E-01	1.5E+00	7.2E-01
0.8	2	1.5E+00	2.2E-01	3.4E-01	6.8E-01	4.4E-01
0.9	4	9.6E-01	2.8E-01	2.7E-01	1.1E+00	8.8E-01
1	2	6.7E-01	3.5E-01	2.3E-01	4.7E-01	4.7E-01
1.1	4	4.6E-01	4.2E-01	1.9E-01	7.8E-01	9.4E-01
1.2	2	3.2E-01	5.0E-01	1.6E-01	3.2E-01	4.6E-01
1.3	4	2.2E-01	5.9E-01	1.3E-01	5.3E-01	8.9E-01
1.4	2	1.6E-01	6.8E-01	1.1E-01	2.2E-01	4.2E-01
1.5	4	1.2E-01	7.8E-01	9.0E-02	3.6E-01	8.1E-01
1.6	2	8.5E-02	8.9E-01	7.5E-02	1.5E-01	3.9E-01
1.7	4	6.3E-02	1.0E+00	6.3E-02	2.5E-01	7.3E-01
1.8	2	4.8E-02	1.1E+00	5.4E-02	1.1E-01	3.5E-01
1.9	4	3.7E-02	1.3E+00	4.6E-02	1.8E-01	6.6E-01
2	1	2.9E-02	1.4E+00	4.0E-02	4.0E-02	1.6E-01
				SUM	6.9E+00	8.4E+00

Spektra Gelombang KP 2.882 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	3.8E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	3.8E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	1.7E-86	1.5E-02	2.5E-88	5.1E-88	2.0E-89
0.3	4	9.1E-16	3.4E-02	3.1E-17	1.2E-16	1.1E-17
0.4	2	2.4E-04	6.0E-02	1.4E-05	2.9E-05	4.6E-06

ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.5	4	1.6E-01	9.4E-02	1.5E-02	5.8E-02	1.5E-02
0.6	2	1.0E+00	1.4E-01	1.4E-01	2.8E-01	1.0E-01
0.7	4	2.1E+00	1.8E-01	3.9E-01	1.6E+00	7.7E-01
0.8	2	1.5E+00	2.4E-01	3.7E-01	7.4E-01	4.7E-01
0.9	4	9.6E-01	3.0E-01	2.9E-01	1.2E+00	9.5E-01
1	2	6.7E-01	3.8E-01	2.5E-01	5.0E-01	5.0E-01
1.1	4	4.6E-01	4.5E-01	2.1E-01	8.4E-01	1.0E+00
1.2	2	3.2E-01	5.4E-01	1.7E-01	3.5E-01	5.0E-01
1.3	4	2.2E-01	6.3E-01	1.4E-01	5.7E-01	9.6E-01
1.4	2	1.6E-01	7.4E-01	1.2E-01	2.3E-01	4.6E-01
1.5	4	1.2E-01	8.4E-01	9.7E-02	3.9E-01	8.8E-01
1.6	2	8.5E-02	9.6E-01	8.1E-02	1.6E-01	4.2E-01
1.7	4	6.3E-02	1.1E+00	6.9E-02	2.7E-01	7.9E-01
1.8	2	4.8E-02	1.2E+00	5.8E-02	1.2E-01	3.8E-01
1.9	4	3.7E-02	1.4E+00	5.0E-02	2.0E-01	7.2E-01
2	1	2.9E-02	1.5E+00	4.3E-02	4.3E-02	1.7E-01
				SUM	7.5E+00	9.1E+00

Spektra Gelombang KP 3.07 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	4.0E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	4.0E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	1.7E-86	1.6E-02	2.7E-88	5.4E-88	2.1E-89
0.3	4	9.1E-16	3.6E-02	3.2E-17	1.3E-16	1.2E-17
0.4	2	2.4E-04	6.4E-02	1.5E-05	3.1E-05	4.9E-06
0.5	4	1.6E-01	9.9E-02	1.5E-02	6.2E-02	1.5E-02
0.6	2	1.0E+00	1.4E-01	1.5E-01	3.0E-01	1.1E-01
0.7	4	2.1E+00	1.9E-01	4.2E-01	1.7E+00	8.2E-01
0.8	2	1.5E+00	2.5E-01	3.9E-01	7.8E-01	5.0E-01
0.9	4	9.6E-01	3.2E-01	3.1E-01	1.2E+00	1.0E+00
1	2	6.7E-01	4.0E-01	2.7E-01	5.3E-01	5.3E-01
1.1	4	4.6E-01	4.8E-01	2.2E-01	8.9E-01	1.1E+00
1.2	2	3.2E-01	5.7E-01	1.8E-01	3.7E-01	5.3E-01
1.3	4	2.2E-01	6.7E-01	1.5E-01	6.0E-01	1.0E+00
1.4	2	1.6E-01	7.8E-01	1.2E-01	2.5E-01	4.9E-01
1.5	4	1.2E-01	8.9E-01	1.0E-01	4.1E-01	9.3E-01
1.6	2	8.5E-02	1.0E+00	8.6E-02	1.7E-01	4.4E-01
1.7	4	6.3E-02	1.1E+00	7.3E-02	2.9E-01	8.4E-01
1.8	2	4.8E-02	1.3E+00	6.2E-02	1.2E-01	4.0E-01
1.9	4	3.7E-02	1.4E+00	5.3E-02	2.1E-01	7.6E-01
2	1	2.9E-02	1.6E+00	4.5E-02	4.5E-02	1.8E-01
				SUM	8.0E+00	9.6E+00

Spektra Gelombang KP 3.155 (100 tahunan)

ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	4.2E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	4.2E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	1.7E-86	1.7E-02	2.8E-88	5.7E-88	2.3E-89
0.3	4	9.1E-16	3.8E-02	3.4E-17	1.4E-16	1.2E-17
0.4	2	2.4E-04	6.7E-02	1.6E-05	3.3E-05	5.2E-06
0.5	4	1.6E-01	1.1E-01	1.6E-02	6.5E-02	1.6E-02
0.6	2	1.0E+00	1.5E-01	1.6E-01	3.1E-01	1.1E-01
0.7	4	2.1E+00	2.1E-01	4.4E-01	1.8E+00	8.7E-01
0.8	2	1.5E+00	2.7E-01	4.1E-01	8.3E-01	5.3E-01
0.9	4	9.6E-01	3.4E-01	3.3E-01	1.3E+00	1.1E+00
1	2	6.7E-01	4.2E-01	2.8E-01	5.7E-01	5.7E-01
1.1	4	4.6E-01	5.1E-01	2.4E-01	9.4E-01	1.1E+00
1.2	2	3.2E-01	6.1E-01	1.9E-01	3.9E-01	5.6E-01
1.3	4	2.2E-01	7.1E-01	1.6E-01	6.4E-01	1.1E+00
1.4	2	1.6E-01	8.3E-01	1.3E-01	2.6E-01	5.2E-01
1.5	4	1.2E-01	9.5E-01	1.1E-01	4.4E-01	9.8E-01
1.6	2	8.5E-02	1.1E+00	9.1E-02	1.8E-01	4.7E-01
1.7	4	6.3E-02	1.2E+00	7.7E-02	3.1E-01	8.9E-01
1.8	2	4.8E-02	1.4E+00	6.5E-02	1.3E-01	4.2E-01
1.9	4	3.7E-02	1.5E+00	5.6E-02	2.2E-01	8.1E-01
2	1	2.9E-02	1.7E+00	4.8E-02	4.8E-02	1.9E-01
				SUM	8.4E+00	1.0E+01

Spektra Gelombang KP 3.194 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	4.3E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	4.3E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	1.7E-86	1.7E-02	2.9E-88	5.8E-88	2.3E-89
0.3	4	9.1E-16	3.9E-02	3.5E-17	1.4E-16	1.3E-17
0.4	2	2.4E-04	6.9E-02	1.7E-05	3.3E-05	5.3E-06
0.5	4	1.6E-01	1.1E-01	1.7E-02	6.7E-02	1.7E-02
0.6	2	1.0E+00	1.6E-01	1.6E-01	3.2E-01	1.2E-01
0.7	4	2.1E+00	2.1E-01	4.5E-01	1.8E+00	8.9E-01
0.8	2	1.5E+00	2.8E-01	4.2E-01	8.5E-01	5.4E-01
0.9	4	9.6E-01	3.5E-01	3.4E-01	1.3E+00	1.1E+00
1	2	6.7E-01	4.3E-01	2.9E-01	5.8E-01	5.8E-01
1.1	4	4.6E-01	5.2E-01	2.4E-01	9.7E-01	1.2E+00
1.2	2	3.2E-01	6.2E-01	2.0E-01	4.0E-01	5.7E-01
1.3	4	2.2E-01	7.3E-01	1.6E-01	6.5E-01	1.1E+00
1.4	2	1.6E-01	8.5E-01	1.3E-01	2.7E-01	5.3E-01
1.5	4	1.2E-01	9.7E-01	1.1E-01	4.5E-01	1.0E+00
1.6	2	8.5E-02	1.1E+00	9.4E-02	1.9E-01	4.8E-01
1.7	4	6.3E-02	1.2E+00	7.9E-02	3.2E-01	9.1E-01
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$

1.8	2	4.8E-02	1.4E+00	6.7E-02	1.3E-01	4.3E-01
1.9	4	3.7E-02	1.6E+00	5.7E-02	2.3E-01	8.3E-01
2	1	2.9E-02	1.7E+00	4.9E-02	4.9E-02	2.0E-01
				SUM	8.6E+00	1.0E+01

sepektra Gelombang KP 3.406 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	4.7E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	4.7E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	1.7E-86	1.9E-02	3.2E-88	6.4E-88	2.6E-89
0.3	4	9.1E-16	4.3E-02	3.9E-17	1.5E-16	1.4E-17
0.4	2	2.4E-04	7.6E-02	1.8E-05	3.7E-05	5.8E-06
0.5	4	1.6E-01	1.2E-01	1.8E-02	7.4E-02	1.8E-02
0.6	2	1.0E+00	1.7E-01	1.8E-01	3.5E-01	1.3E-01
0.7	4	2.1E+00	2.3E-01	5.0E-01	2.0E+00	9.8E-01
0.8	2	1.5E+00	3.0E-01	4.7E-01	9.3E-01	6.0E-01
0.9	4	9.6E-01	3.8E-01	3.7E-01	1.5E+00	1.2E+00
1	2	6.7E-01	4.7E-01	3.2E-01	6.4E-01	6.4E-01
1.1	4	4.6E-01	5.7E-01	2.7E-01	1.1E+00	1.3E+00
1.2	2	3.2E-01	6.8E-01	2.2E-01	4.4E-01	6.3E-01
1.3	4	2.2E-01	8.0E-01	1.8E-01	7.2E-01	1.2E+00
1.4	2	1.6E-01	9.3E-01	1.5E-01	3.0E-01	5.8E-01
1.5	4	1.2E-01	1.1E+00	1.2E-01	4.9E-01	1.1E+00
1.6	2	8.5E-02	1.2E+00	1.0E-01	2.1E-01	5.3E-01
1.7	4	6.3E-02	1.4E+00	8.6E-02	3.5E-01	1.0E+00
1.8	2	4.8E-02	1.5E+00	7.3E-02	1.5E-01	4.8E-01
1.9	4	3.7E-02	1.7E+00	6.3E-02	2.5E-01	9.1E-01
2	1	2.9E-02	1.9E+00	5.4E-02	5.4E-02	2.2E-01
				SUM	9.5E+00	1.1E+01

Spektra Gelombang KP11.974 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	1.6E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	1.6E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	6.3E-167	6.4E-03	4.0E-169	8.0E-169	3.2E-170
0.3	4	8.5E-32	1.4E-02	1.2E-33	4.9E-33	4.4E-34
0.4	2	1.6E-09	2.6E-02	4.0E-11	8.0E-11	1.3E-11
0.5	4	9.2E-04	4.0E-02	3.7E-05	1.5E-04	3.7E-05
0.6	2	6.5E-02	5.8E-02	3.7E-03	7.5E-03	2.7E-03
0.7	4	2.8E-01	7.8E-02	2.2E-02	8.6E-02	4.2E-02
0.8	2	4.1E-01	1.0E-01	4.2E-02	8.5E-02	5.4E-02
0.9	4	4.1E-01	1.3E-01	5.3E-02	2.1E-01	1.7E-01
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$

1	2	3.3E-01	1.6E-01	5.3E-02	1.1E-01	1.1E-01
1.1	4	2.5E-01	1.9E-01	4.9E-02	2.0E-01	2.4E-01
1.2	2	1.9E-01	2.3E-01	4.3E-02	8.5E-02	1.2E-01
1.3	4	1.4E-01	2.7E-01	3.6E-02	1.5E-01	2.5E-01
1.4	2	9.9E-02	3.1E-01	3.1E-02	6.2E-02	1.2E-01
1.5	4	7.3E-02	3.6E-01	2.6E-02	1.0E-01	2.4E-01
1.6	2	5.4E-02	4.1E-01	2.2E-02	4.4E-02	1.1E-01
1.7	4	4.1E-02	4.6E-01	1.9E-02	7.5E-02	2.2E-01
1.8	2	3.1E-02	5.2E-01	1.6E-02	3.2E-02	1.0E-01
1.9	4	2.4E-02	5.8E-01	1.4E-02	5.5E-02	2.0E-01
2	1	1.9E-02	6.4E-01	1.2E-02	1.2E-02	4.8E-02
				SUM	1.3E+00	2.0E+00

Spektra Gelombang KP 12.485 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	1.8E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	1.8E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	6.3E-167	7.3E-03	4.6E-169	9.1E-169	3.7E-170
0.3	4	8.5E-32	1.6E-02	1.4E-33	5.6E-33	5.0E-34
0.4	2	1.6E-09	2.9E-02	4.5E-11	9.1E-11	1.5E-11
0.5	4	9.2E-04	4.6E-02	4.2E-05	1.7E-04	4.2E-05
0.6	2	6.5E-02	6.6E-02	4.3E-03	8.5E-03	3.1E-03
0.7	4	2.8E-01	9.0E-02	2.5E-02	9.9E-02	4.8E-02
0.8	2	4.1E-01	1.2E-01	4.9E-02	9.7E-02	6.2E-02
0.9	4	4.1E-01	1.5E-01	6.0E-02	2.4E-01	2.0E-01
1	2	3.3E-01	1.8E-01	6.1E-02	1.2E-01	1.2E-01
1.1	4	2.5E-01	2.2E-01	5.6E-02	2.2E-01	2.7E-01
1.2	2	1.9E-01	2.6E-01	4.9E-02	9.8E-02	1.4E-01
1.3	4	1.4E-01	3.1E-01	4.2E-02	1.7E-01	2.8E-01
1.4	2	9.9E-02	3.6E-01	3.5E-02	7.1E-02	1.4E-01
1.5	4	7.3E-02	4.1E-01	3.0E-02	1.2E-01	2.7E-01
1.6	2	5.4E-02	4.7E-01	2.5E-02	5.1E-02	1.3E-01
1.7	4	4.1E-02	5.3E-01	2.2E-02	8.6E-02	2.5E-01
1.8	2	3.1E-02	5.9E-01	1.8E-02	3.7E-02	1.2E-01
1.9	4	2.4E-02	6.6E-01	1.6E-02	6.3E-02	2.3E-01
2	1	1.9E-02	7.3E-01	1.4E-02	1.4E-02	5.5E-02
				SUM	1.5E+00	2.3E+00

Spektra Gelombang KP 14.385 (1tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	2.5E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	2.5E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	6.3E-167	1.0E-02	6.4E-169	1.3E-168	5.1E-170
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$

0.3	4	8.5E-32	2.3E-02	1.9E-33	7.8E-33	7.0E-34
0.4	2	1.6E-09	4.1E-02	6.3E-11	1.3E-10	2.0E-11
0.5	4	9.2E-04	6.4E-02	5.8E-05	2.3E-04	5.8E-05
0.6	2	6.5E-02	9.2E-02	5.9E-03	1.2E-02	4.3E-03
0.7	4	2.8E-01	1.2E-01	3.4E-02	1.4E-01	6.7E-02
0.8	2	4.1E-01	1.6E-01	6.7E-02	1.3E-01	8.6E-02
0.9	4	4.1E-01	2.1E-01	8.4E-02	3.4E-01	2.7E-01
1	2	3.3E-01	2.5E-01	8.5E-02	1.7E-01	1.7E-01
1.1	4	2.5E-01	3.1E-01	7.8E-02	3.1E-01	3.8E-01
1.2	2	1.9E-01	3.7E-01	6.8E-02	1.4E-01	2.0E-01
1.3	4	1.4E-01	4.3E-01	5.8E-02	2.3E-01	3.9E-01
1.4	2	9.9E-02	5.0E-01	4.9E-02	9.8E-02	1.9E-01
1.5	4	7.3E-02	5.7E-01	4.2E-02	1.7E-01	3.7E-01
1.6	2	5.4E-02	6.5E-01	3.5E-02	7.0E-02	1.8E-01
1.7	4	4.1E-02	7.3E-01	3.0E-02	1.2E-01	3.5E-01
1.8	2	3.1E-02	8.2E-01	2.6E-02	5.1E-02	1.7E-01
1.9	4	2.4E-02	9.2E-01	2.2E-02	8.8E-02	3.2E-01
2	1	1.9E-02	1.0E+00	1.9E-02	1.9E-02	7.6E-02
				SUM	2.1E+00	3.2E+00

Spektra Gelombang KP 16.365 (1tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	SM*S_{UU}	ω^2 * SM * SUU
0.01	1	0.0E+00	2.3E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	2.3E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	6.3E-167	9.3E-03	5.8E-169	1.2E-168	4.7E-170
0.3	4	8.5E-32	2.1E-02	1.8E-33	7.1E-33	6.4E-34
0.4	2	1.6E-09	3.7E-02	5.8E-11	1.2E-10	1.9E-11
0.5	4	9.2E-04	5.8E-02	5.3E-05	2.1E-04	5.3E-05
0.6	2	6.5E-02	8.4E-02	5.4E-03	1.1E-02	3.9E-03
0.7	4	2.8E-01	1.1E-01	3.2E-02	1.3E-01	6.2E-02
0.8	2	4.1E-01	1.5E-01	6.2E-02	1.2E-01	7.9E-02
0.9	4	4.1E-01	1.9E-01	7.7E-02	3.1E-01	2.5E-01
1	2	3.3E-01	2.3E-01	7.8E-02	1.6E-01	1.6E-01
1.1	4	2.5E-01	2.8E-01	7.1E-02	2.9E-01	3.5E-01
1.2	2	1.9E-01	3.4E-01	6.2E-02	1.2E-01	1.8E-01
1.3	4	1.4E-01	3.9E-01	5.3E-02	2.1E-01	3.6E-01
1.4	2	9.9E-02	4.6E-01	4.5E-02	9.0E-02	1.8E-01
1.5	4	7.3E-02	5.2E-01	3.8E-02	1.5E-01	3.4E-01
1.6	2	5.4E-02	6.0E-01	3.2E-02	6.5E-02	1.7E-01
1.7	4	4.1E-02	6.7E-01	2.8E-02	1.1E-01	3.2E-01
1.8	2	3.1E-02	7.6E-01	2.4E-02	4.7E-02	1.5E-01
1.9	4	2.4E-02	8.4E-01	2.0E-02	8.1E-02	2.9E-01
2	1	1.9E-02	9.3E-01	1.8E-02	1.8E-02	7.0E-02
				SUM	1.9E+00	3.0E+00

Spektra Gelombang KP 16.392 (1 tahunan)

ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	2.2E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	2.2E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	6.3E-167	8.9E-03	5.6E-169	1.1E-168	4.5E-170
0.3	4	8.5E-32	2.0E-02	1.7E-33	6.8E-33	6.1E-34
0.4	2	1.6E-09	3.6E-02	5.5E-11	1.1E-10	1.8E-11
0.5	4	9.2E-04	5.6E-02	5.1E-05	2.0E-04	5.1E-05
0.6	2	6.5E-02	8.0E-02	5.2E-03	1.0E-02	3.7E-03
0.7	4	2.8E-01	1.1E-01	3.0E-02	1.2E-01	5.9E-02
0.8	2	4.1E-01	1.4E-01	5.9E-02	1.2E-01	7.6E-02
0.9	4	4.1E-01	1.8E-01	7.4E-02	2.9E-01	2.4E-01
1	2	3.3E-01	2.2E-01	7.4E-02	1.5E-01	1.5E-01
1.1	4	2.5E-01	2.7E-01	6.8E-02	2.7E-01	3.3E-01
1.2	2	1.9E-01	3.2E-01	6.0E-02	1.2E-01	1.7E-01
1.3	4	1.4E-01	3.8E-01	5.1E-02	2.0E-01	3.4E-01
1.4	2	9.9E-02	4.4E-01	4.3E-02	8.6E-02	1.7E-01
1.5	4	7.3E-02	5.0E-01	3.6E-02	1.5E-01	3.3E-01
1.6	2	5.4E-02	5.7E-01	3.1E-02	6.2E-02	1.6E-01
1.7	4	4.1E-02	6.4E-01	2.6E-02	1.1E-01	3.0E-01
1.8	2	3.1E-02	7.2E-01	2.2E-02	4.5E-02	1.5E-01
1.9	4	2.4E-02	8.0E-01	1.9E-02	7.7E-02	2.8E-01
2	1	1.9E-02	8.9E-01	1.7E-02	1.7E-02	6.7E-02
				SUM	1.8E+00	2.8E+00

Spektra Gelombang KP 16.431 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	2.2E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	2.2E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	6.3E-167	8.9E-03	5.6E-169	1.1E-168	4.4E-170
0.3	4	8.5E-32	2.0E-02	1.7E-33	6.8E-33	6.1E-34
0.4	2	1.6E-09	3.6E-02	5.5E-11	1.1E-10	1.8E-11
0.5	4	9.2E-04	5.6E-02	5.1E-05	2.0E-04	5.1E-05
0.6	2	6.5E-02	8.0E-02	5.2E-03	1.0E-02	3.7E-03
0.7	4	2.8E-01	1.1E-01	3.0E-02	1.2E-01	5.9E-02
0.8	2	4.1E-01	1.4E-01	5.9E-02	1.2E-01	7.6E-02
0.9	4	4.1E-01	1.8E-01	7.3E-02	2.9E-01	2.4E-01
1	2	3.3E-01	2.2E-01	7.4E-02	1.5E-01	1.5E-01
1.1	4	2.5E-01	2.7E-01	6.8E-02	2.7E-01	3.3E-01
1.2	2	1.9E-01	3.2E-01	5.9E-02	1.2E-01	1.7E-01
1.3	4	1.4E-01	3.8E-01	5.1E-02	2.0E-01	3.4E-01
1.4	2	9.9E-02	4.4E-01	4.3E-02	8.6E-02	1.7E-01
1.5	4	7.3E-02	5.0E-01	3.6E-02	1.5E-01	3.3E-01
1.6	2	5.4E-02	5.7E-01	3.1E-02	6.2E-02	1.6E-01
1.7	4	4.1E-02	6.4E-01	2.6E-02	1.0E-01	3.0E-01
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$

1.8	2	3.1E-02	7.2E-01	2.2E-02	4.5E-02	1.5E-01
1.9	4	2.4E-02	8.0E-01	1.9E-02	7.7E-02	2.8E-01
2	1	1.9E-02	8.9E-01	1.7E-02	1.7E-02	6.7E-02
				SUM	1.8E+00	2.8E+00

Spektra Gelombang KP 16.811 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	2.1E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	2.1E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	6.3E-167	8.5E-03	5.3E-169	1.1E-168	4.2E-170
0.3	4	8.5E-32	1.9E-02	1.6E-33	6.5E-33	5.8E-34
0.4	2	1.6E-09	3.4E-02	5.3E-11	1.1E-10	1.7E-11
0.5	4	9.2E-04	5.3E-02	4.8E-05	1.9E-04	4.8E-05
0.6	2	6.5E-02	7.6E-02	5.0E-03	9.9E-03	3.6E-03
0.7	4	2.8E-01	1.0E-01	2.9E-02	1.1E-01	5.6E-02
0.8	2	4.1E-01	1.4E-01	5.6E-02	1.1E-01	7.2E-02
0.9	4	4.1E-01	1.7E-01	7.0E-02	2.8E-01	2.3E-01
1	2	3.3E-01	2.1E-01	7.1E-02	1.4E-01	1.4E-01
1.1	4	2.5E-01	2.6E-01	6.5E-02	2.6E-01	3.1E-01
1.2	2	1.9E-01	3.1E-01	5.7E-02	1.1E-01	1.6E-01
1.3	4	1.4E-01	3.6E-01	4.8E-02	1.9E-01	3.3E-01
1.4	2	9.9E-02	4.2E-01	4.1E-02	8.2E-02	1.6E-01
1.5	4	7.3E-02	4.8E-01	3.5E-02	1.4E-01	3.1E-01
1.6	2	5.4E-02	5.4E-01	2.9E-02	5.9E-02	1.5E-01
1.7	4	4.1E-02	6.1E-01	2.5E-02	1.0E-01	2.9E-01
1.8	2	3.1E-02	6.9E-01	2.1E-02	4.3E-02	1.4E-01
1.9	4	2.4E-02	7.7E-01	1.8E-02	7.4E-02	2.7E-01
2	1	1.9E-02	8.5E-01	1.6E-02	1.6E-02	6.4E-02
				SUM	1.7E+00	2.7E+00

Spektra Gelombang KP 17.665 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	2.3E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	2.3E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	6.3E-167	9.2E-03	5.7E-169	1.1E-168	4.6E-170
0.3	4	8.5E-32	2.1E-02	1.8E-33	7.0E-33	6.3E-34
0.4	2	1.6E-09	3.7E-02	5.7E-11	1.1E-10	1.8E-11
0.5	4	9.2E-04	5.7E-02	5.3E-05	2.1E-04	5.3E-05
0.6	2	6.5E-02	8.3E-02	5.4E-03	1.1E-02	3.9E-03
0.7	4	2.8E-01	1.1E-01	3.1E-02	1.2E-01	6.1E-02
0.8	2	4.1E-01	1.5E-01	6.1E-02	1.2E-01	7.8E-02
0.9	4	4.1E-01	1.9E-01	7.6E-02	3.0E-01	2.5E-01
1	2	3.3E-01	2.3E-01	7.7E-02	1.5E-01	1.5E-01
1.1	4	2.5E-01	2.8E-01	7.0E-02	2.8E-01	3.4E-01
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$

1.2	2	1.9E-01	3.3E-01	6.1E-02	1.2E-01	1.8E-01
1.3	4	1.4E-01	3.9E-01	5.2E-02	2.1E-01	3.5E-01
1.4	2	9.9E-02	4.5E-01	4.4E-02	8.9E-02	1.7E-01
1.5	4	7.3E-02	5.2E-01	3.8E-02	1.5E-01	3.4E-01
1.6	2	5.4E-02	5.9E-01	3.2E-02	6.4E-02	1.6E-01
1.7	4	4.1E-02	6.6E-01	2.7E-02	1.1E-01	3.1E-01
1.8	2	3.1E-02	7.4E-01	2.3E-02	4.6E-02	1.5E-01
1.9	4	2.4E-02	8.3E-01	2.0E-02	8.0E-02	2.9E-01
2	1	1.9E-02	9.2E-01	1.7E-02	1.7E-02	6.9E-02
				SUM	1.9E+00	2.9E+00

Spektra Gelombang KP 17.913 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	2.2E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	2.2E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	6.3E-167	8.9E-03	5.6E-169	1.1E-168	4.5E-170
0.3	4	8.5E-32	2.0E-02	1.7E-33	6.8E-33	6.1E-34
0.4	2	1.6E-09	3.6E-02	5.5E-11	1.1E-10	1.8E-11
0.5	4	9.2E-04	5.6E-02	5.1E-05	2.0E-04	5.1E-05
0.6	2	6.5E-02	8.0E-02	5.2E-03	1.0E-02	3.8E-03
0.7	4	2.8E-01	1.1E-01	3.0E-02	1.2E-01	5.9E-02
0.8	2	4.1E-01	1.4E-01	5.9E-02	1.2E-01	7.6E-02
0.9	4	4.1E-01	1.8E-01	7.4E-02	2.9E-01	2.4E-01
1	2	3.3E-01	2.2E-01	7.5E-02	1.5E-01	1.5E-01
1.1	4	2.5E-01	2.7E-01	6.8E-02	2.7E-01	3.3E-01
1.2	2	1.9E-01	3.2E-01	6.0E-02	1.2E-01	1.7E-01
1.3	4	1.4E-01	3.8E-01	5.1E-02	2.0E-01	3.4E-01
1.4	2	9.9E-02	4.4E-01	4.3E-02	8.6E-02	1.7E-01
1.5	4	7.3E-02	5.0E-01	3.6E-02	1.5E-01	3.3E-01
1.6	2	5.4E-02	5.7E-01	3.1E-02	6.2E-02	1.6E-01
1.7	4	4.1E-02	6.4E-01	2.6E-02	1.1E-01	3.0E-01
1.8	2	3.1E-02	7.2E-01	2.2E-02	4.5E-02	1.5E-01
1.9	4	2.4E-02	8.0E-01	1.9E-02	7.7E-02	2.8E-01
2	1	1.9E-02	8.9E-01	1.7E-02	1.7E-02	6.7E-02
				SUM	1.8E+00	2.8E+00

Spektra Gelombang KP 18.922 (1tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	2.9E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	2.9E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	6.3E-167	1.2E-02	7.2E-169	1.4E-168	5.8E-170
0.3	4	8.5E-32	2.6E-02	2.2E-33	8.8E-33	7.9E-34
0.4	2	1.6E-09	4.6E-02	7.2E-11	1.4E-10	2.3E-11
0.5	4	9.2E-04	7.2E-02	6.6E-05	2.6E-04	6.6E-05
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$

0.6	2	6.5E-02	1.0E-01	6.7E-03	1.3E-02	4.8E-03
0.7	4	2.8E-01	1.4E-01	3.9E-02	1.6E-01	7.6E-02
0.8	2	4.1E-01	1.8E-01	7.6E-02	1.5E-01	9.8E-02
0.9	4	4.1E-01	2.3E-01	9.5E-02	3.8E-01	3.1E-01
1	2	3.3E-01	2.9E-01	9.6E-02	1.9E-01	1.9E-01
1.1	4	2.5E-01	3.5E-01	8.8E-02	3.5E-01	4.3E-01
1.2	2	1.9E-01	4.1E-01	7.7E-02	1.5E-01	2.2E-01
1.3	4	1.4E-01	4.9E-01	6.6E-02	2.6E-01	4.4E-01
1.4	2	9.9E-02	5.6E-01	5.6E-02	1.1E-01	2.2E-01
1.5	4	7.3E-02	6.5E-01	4.7E-02	1.9E-01	4.2E-01
1.6	2	5.4E-02	7.4E-01	4.0E-02	8.0E-02	2.0E-01
1.7	4	4.1E-02	8.3E-01	3.4E-02	1.4E-01	3.9E-01
1.8	2	3.1E-02	9.3E-01	2.9E-02	5.8E-02	1.9E-01
1.9	4	2.4E-02	1.0E+00	2.5E-02	1.0E-01	3.6E-01
2	1	1.9E-02	1.2E+00	2.2E-02	2.2E-02	8.6E-02
				SUM	2.4E+00	3.6E+00

Spektra Gelombang KP11.974 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	SM*S_{UU}	ω^2 * SM * SUU
0.01	1	0.0E+00	3.8E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	3.8E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	7.0E-80	1.5E-02	1.1E-81	2.2E-81	8.6E-83
0.3	4	1.5E-14	3.5E-02	5.2E-16	2.1E-15	1.9E-16
0.4	2	5.0E-04	6.1E-02	3.1E-05	6.1E-05	9.8E-06
0.5	4	1.8E-01	9.6E-02	1.7E-02	6.9E-02	1.7E-02
0.6	2	9.0E-01	1.4E-01	1.2E-01	2.5E-01	9.0E-02
0.7	4	1.2E+00	1.9E-01	2.3E-01	9.2E-01	4.5E-01
0.8	2	1.1E+00	2.5E-01	2.6E-01	5.2E-01	3.3E-01
0.9	4	7.8E-01	3.1E-01	2.4E-01	9.7E-01	7.8E-01
1	2	5.4E-01	3.8E-01	2.1E-01	4.1E-01	4.1E-01
1.1	4	3.7E-01	4.6E-01	1.7E-01	6.8E-01	8.3E-01
1.2	2	2.5E-01	5.5E-01	1.4E-01	2.8E-01	4.0E-01
1.3	4	1.8E-01	6.5E-01	1.1E-01	4.6E-01	7.8E-01
1.4	2	1.3E-01	7.5E-01	9.4E-02	1.9E-01	3.7E-01
1.5	4	9.1E-02	8.6E-01	7.8E-02	3.1E-01	7.0E-01
1.6	2	6.6E-02	9.8E-01	6.5E-02	1.3E-01	3.3E-01
1.7	4	5.0E-02	1.1E+00	5.5E-02	2.2E-01	6.4E-01
1.8	2	3.8E-02	1.2E+00	4.7E-02	9.3E-02	3.0E-01
1.9	4	2.9E-02	1.4E+00	4.0E-02	1.6E-01	5.8E-01
2	1	2.2E-02	1.5E+00	3.4E-02	3.4E-02	1.4E-01
				SUM	5.7E+00	7.2E+00

Spektra Gelombang KP 12.485 (100 tahunan)

ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	SM*S_{UU}	ω^2 * SM * SUU
0.01	1	0.0E+00	4.2E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	4.2E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	7.0E-80	1.7E-02	1.2E-81	2.4E-81	9.5E-83
0.3	4	1.5E-14	3.8E-02	5.8E-16	2.3E-15	2.1E-16
0.4	2	5.0E-04	6.8E-02	3.4E-05	6.7E-05	1.1E-05
0.5	4	1.8E-01	1.1E-01	1.9E-02	7.7E-02	1.9E-02
0.6	2	9.0E-01	1.5E-01	1.4E-01	2.7E-01	9.9E-02
0.7	4	1.2E+00	2.1E-01	2.5E-01	1.0E+00	5.0E-01
0.8	2	1.1E+00	2.7E-01	2.9E-01	5.8E-01	3.7E-01
0.9	4	7.8E-01	3.4E-01	2.7E-01	1.1E+00	8.7E-01
1	2	5.4E-01	4.2E-01	2.3E-01	4.6E-01	4.6E-01
1.1	4	3.7E-01	5.1E-01	1.9E-01	7.6E-01	9.1E-01
1.2	2	2.5E-01	6.1E-01	1.5E-01	3.1E-01	4.5E-01
1.3	4	1.8E-01	7.2E-01	1.3E-01	5.1E-01	8.6E-01
1.4	2	1.3E-01	8.3E-01	1.0E-01	2.1E-01	4.1E-01
1.5	4	9.1E-02	9.5E-01	8.6E-02	3.5E-01	7.8E-01
1.6	2	6.6E-02	1.1E+00	7.2E-02	1.4E-01	3.7E-01
1.7	4	5.0E-02	1.2E+00	6.1E-02	2.4E-01	7.0E-01
1.8	2	3.8E-02	1.4E+00	5.2E-02	1.0E-01	3.3E-01
1.9	4	2.9E-02	1.5E+00	4.4E-02	1.8E-01	6.4E-01
2	1	2.2E-02	1.7E+00	3.8E-02	3.8E-02	1.5E-01
				SUM	6.3E+00	7.9E+00

Spektra Gelombang KP 14.385 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	SM*S_{UU}	ω^2 * SM * SUU
0.01	1	0.0E+00	5.4E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	5.4E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	7.0E-80	2.2E-02	1.5E-81	3.1E-81	1.2E-82
0.3	4	1.5E-14	4.9E-02	7.4E-16	3.0E-15	2.7E-16
0.4	2	5.0E-04	8.7E-02	4.3E-05	8.6E-05	1.4E-05
0.5	4	1.8E-01	1.4E-01	2.5E-02	9.8E-02	2.5E-02
0.6	2	9.0E-01	2.0E-01	1.8E-01	3.5E-01	1.3E-01
0.7	4	1.2E+00	2.7E-01	3.3E-01	1.3E+00	6.4E-01
0.8	2	1.1E+00	3.5E-01	3.7E-01	7.4E-01	4.7E-01
0.9	4	7.8E-01	4.4E-01	3.4E-01	1.4E+00	1.1E+00
1	2	5.4E-01	5.4E-01	2.9E-01	5.9E-01	5.9E-01
1.1	4	3.7E-01	6.6E-01	2.4E-01	9.7E-01	1.2E+00
1.2	2	2.5E-01	7.8E-01	2.0E-01	4.0E-01	5.7E-01
1.3	4	1.8E-01	9.2E-01	1.6E-01	6.5E-01	1.1E+00
1.4	2	1.3E-01	1.1E+00	1.3E-01	2.7E-01	5.2E-01
1.5	4	9.1E-02	1.2E+00	1.1E-01	4.4E-01	1.0E+00
1.6	2	6.6E-02	1.4E+00	9.3E-02	1.9E-01	4.7E-01
1.7	4	5.0E-02	1.6E+00	7.8E-02	3.1E-01	9.0E-01
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	SM*S_{UU}	ω^2 * SM * SUU

1.8	2	3.8E-02	1.8E+00	6.6E-02	1.3E-01	4.3E-01
1.9	4	2.9E-02	2.0E+00	5.7E-02	2.3E-01	8.2E-01
2	1	2.2E-02	2.2E+00	4.9E-02	4.9E-02	1.9E-01
				SUM	8.1E+00	1.0E+01

Spektra Gelombang KP 16.365 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	5.1E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	5.1E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	7.0E-80	2.0E-02	1.4E-81	2.9E-81	1.1E-82
0.3	4	1.5E-14	4.6E-02	6.9E-16	2.8E-15	2.5E-16
0.4	2	5.0E-04	8.1E-02	4.0E-05	8.1E-05	1.3E-05
0.5	4	1.8E-01	1.3E-01	2.3E-02	9.2E-02	2.3E-02
0.6	2	9.0E-01	1.8E-01	1.6E-01	3.3E-01	1.2E-01
0.7	4	1.2E+00	2.5E-01	3.1E-01	1.2E+00	6.0E-01
0.8	2	1.1E+00	3.3E-01	3.5E-01	6.9E-01	4.4E-01
0.9	4	7.8E-01	4.1E-01	3.2E-01	1.3E+00	1.0E+00
1	2	5.4E-01	5.1E-01	2.7E-01	5.5E-01	5.5E-01
1.1	4	3.7E-01	6.2E-01	2.3E-01	9.1E-01	1.1E+00
1.2	2	2.5E-01	7.3E-01	1.9E-01	3.7E-01	5.3E-01
1.3	4	1.8E-01	8.6E-01	1.5E-01	6.1E-01	1.0E+00
1.4	2	1.3E-01	1.0E+00	1.3E-01	2.5E-01	4.9E-01
1.5	4	9.1E-02	1.1E+00	1.0E-01	4.1E-01	9.3E-01
1.6	2	6.6E-02	1.3E+00	8.7E-02	1.7E-01	4.4E-01
1.7	4	5.0E-02	1.5E+00	7.3E-02	2.9E-01	8.4E-01
1.8	2	3.8E-02	1.6E+00	6.2E-02	1.2E-01	4.0E-01
1.9	4	2.9E-02	1.8E+00	5.3E-02	2.1E-01	7.6E-01
2	1	2.2E-02	2.0E+00	4.6E-02	4.6E-02	1.8E-01
				SUM	7.6E+00	9.5E+00

Spektra Gelombang KP 16.392 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	4.9E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	4.9E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	7.0E-80	2.0E-02	1.4E-81	2.8E-81	1.1E-82
0.3	4	1.5E-14	4.4E-02	6.7E-16	2.7E-15	2.4E-16
0.4	2	5.0E-04	7.9E-02	3.9E-05	7.8E-05	1.2E-05
0.5	4	1.8E-01	1.2E-01	2.2E-02	8.9E-02	2.2E-02
0.6	2	9.0E-01	1.8E-01	1.6E-01	3.2E-01	1.1E-01
0.7	4	1.2E+00	2.4E-01	2.9E-01	1.2E+00	5.8E-01
0.8	2	1.1E+00	3.1E-01	3.3E-01	6.7E-01	4.3E-01
0.9	4	7.8E-01	4.0E-01	3.1E-01	1.2E+00	1.0E+00
1	2	5.4E-01	4.9E-01	2.6E-01	5.3E-01	5.3E-01
1.1	4	3.7E-01	5.9E-01	2.2E-01	8.8E-01	1.1E+00
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$

1.2	2	2.5E-01	7.1E-01	1.8E-01	3.6E-01	5.2E-01
1.3	4	1.8E-01	8.3E-01	1.5E-01	5.9E-01	9.9E-01
1.4	2	1.3E-01	9.6E-01	1.2E-01	2.4E-01	4.7E-01
1.5	4	9.1E-02	1.1E+00	1.0E-01	4.0E-01	9.0E-01
1.6	2	6.6E-02	1.3E+00	8.4E-02	1.7E-01	4.3E-01
1.7	4	5.0E-02	1.4E+00	7.0E-02	2.8E-01	8.1E-01
1.8	2	3.8E-02	1.6E+00	6.0E-02	1.2E-01	3.9E-01
1.9	4	2.9E-02	1.8E+00	5.1E-02	2.0E-01	7.4E-01
2	1	2.2E-02	2.0E+00	4.4E-02	4.4E-02	1.8E-01
				SUM	7.3E+00	9.2E+00

Spektra Gelombang KP 16.431 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.00E+00	4.91E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.1	4	0.00E+00	4.91E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.2	2	7.03E-80	1.96E-02	1.38E-81	2.76E-81	1.10E-82
0.3	4	1.51E-14	4.42E-02	6.68E-16	2.67E-15	2.40E-16
0.4	2	4.97E-04	7.85E-02	3.90E-05	7.80E-05	1.25E-05
0.5	4	1.80E-01	1.23E-01	2.21E-02	8.86E-02	2.21E-02
0.6	2	9.00E-01	1.77E-01	1.59E-01	3.18E-01	1.14E-01
0.7	4	1.23E+00	2.40E-01	2.95E-01	1.18E+00	5.77E-01
0.8	2	1.06E+00	3.14E-01	3.33E-01	6.67E-01	4.27E-01
0.9	4	7.78E-01	3.98E-01	3.09E-01	1.24E+00	1.00E+00
1	2	5.39E-01	4.91E-01	2.64E-01	5.29E-01	5.29E-01
1.1	4	3.68E-01	5.94E-01	2.19E-01	8.75E-01	1.06E+00
1.2	2	2.53E-01	7.07E-01	1.79E-01	3.58E-01	5.16E-01
1.3	4	1.77E-01	8.29E-01	1.47E-01	5.87E-01	9.92E-01
1.4	2	1.25E-01	9.62E-01	1.21E-01	2.41E-01	4.73E-01
1.5	4	9.06E-02	1.10E+00	1.00E-01	4.00E-01	9.00E-01
1.6	2	6.65E-02	1.26E+00	8.35E-02	1.67E-01	4.28E-01
1.7	4	4.96E-02	1.42E+00	7.03E-02	2.81E-01	8.13E-01
1.8	2	3.75E-02	1.59E+00	5.97E-02	1.19E-01	3.87E-01
1.9	4	2.88E-02	1.77E+00	5.11E-02	2.04E-01	7.37E-01
2	1	2.24E-02	1.96E+00	4.40E-02	4.40E-02	1.76E-01
				SUM	7.30E+00	9.15E+00

Spektra Gelombang KP 16.811 (1 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	4.7E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	4.7E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	7.0E-80	1.9E-02	1.3E-81	2.7E-81	1.1E-82
0.3	4	1.5E-14	4.3E-02	6.4E-16	2.6E-15	2.3E-16
0.4	2	5.0E-04	7.6E-02	3.8E-05	7.5E-05	1.2E-05
0.5	4	1.8E-01	1.2E-01	2.1E-02	8.5E-02	2.1E-02
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$

0.6	2	9.0E-01	1.7E-01	1.5E-01	3.1E-01	1.1E-01
0.7	4	1.2E+00	2.3E-01	2.8E-01	1.1E+00	5.6E-01
0.8	2	1.1E+00	3.0E-01	3.2E-01	6.4E-01	4.1E-01
0.9	4	7.8E-01	3.8E-01	3.0E-01	1.2E+00	9.7E-01
1	2	5.4E-01	4.7E-01	2.6E-01	5.1E-01	5.1E-01
1.1	4	3.7E-01	5.7E-01	2.1E-01	8.4E-01	1.0E+00
1.2	2	2.5E-01	6.8E-01	1.7E-01	3.5E-01	5.0E-01
1.3	4	1.8E-01	8.0E-01	1.4E-01	5.7E-01	9.6E-01
1.4	2	1.3E-01	9.3E-01	1.2E-01	2.3E-01	4.6E-01
1.5	4	9.1E-02	1.1E+00	9.7E-02	3.9E-01	8.7E-01
1.6	2	6.6E-02	1.2E+00	8.1E-02	1.6E-01	4.1E-01
1.7	4	5.0E-02	1.4E+00	6.8E-02	2.7E-01	7.8E-01
1.8	2	3.8E-02	1.5E+00	5.8E-02	1.2E-01	3.7E-01
1.9	4	2.9E-02	1.7E+00	4.9E-02	2.0E-01	7.1E-01
2	1	2.2E-02	1.9E+00	4.2E-02	4.2E-02	1.7E-01
				SUM	7.0E+00	8.8E+00

Spektra Gelombang KP 17.665 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	$SM*S_{UU}$	$\omega^2 * SM * SUU$
0.01	1	0.0E+00	5.0E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	5.0E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	7.0E-80	2.0E-02	1.4E-81	2.8E-81	1.1E-82
0.3	4	1.5E-14	4.5E-02	6.8E-16	2.7E-15	2.5E-16
0.4	2	5.0E-04	8.0E-02	4.0E-05	8.0E-05	1.3E-05
0.5	4	1.8E-01	1.3E-01	2.3E-02	9.1E-02	2.3E-02
0.6	2	9.0E-01	1.8E-01	1.6E-01	3.3E-01	1.2E-01
0.7	4	1.2E+00	2.5E-01	3.0E-01	1.2E+00	5.9E-01
0.8	2	1.1E+00	3.2E-01	3.4E-01	6.8E-01	4.4E-01
0.9	4	7.8E-01	4.1E-01	3.2E-01	1.3E+00	1.0E+00
1	2	5.4E-01	5.0E-01	2.7E-01	5.4E-01	5.4E-01
1.1	4	3.7E-01	6.1E-01	2.2E-01	9.0E-01	1.1E+00
1.2	2	2.5E-01	7.2E-01	1.8E-01	3.7E-01	5.3E-01
1.3	4	1.8E-01	8.5E-01	1.5E-01	6.0E-01	1.0E+00
1.4	2	1.3E-01	9.9E-01	1.2E-01	2.5E-01	4.8E-01
1.5	4	9.1E-02	1.1E+00	1.0E-01	4.1E-01	9.2E-01
1.6	2	6.6E-02	1.3E+00	8.6E-02	1.7E-01	4.4E-01
1.7	4	5.0E-02	1.5E+00	7.2E-02	2.9E-01	8.3E-01
1.8	2	3.8E-02	1.6E+00	6.1E-02	1.2E-01	4.0E-01
1.9	4	2.9E-02	1.8E+00	5.2E-02	2.1E-01	7.6E-01
2	1	2.2E-02	2.0E+00	4.5E-02	4.5E-02	1.8E-01
				SUM	7.5E+00	9.4E+00

Spektra Gelombang KP 17.913 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	SM*S_{UU}	ω^2 * SM * SUU
0.01	1	0.0E+00	4.9E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	4.9E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	7.0E-80	2.0E-02	1.4E-81	2.8E-81	1.1E-82
0.3	4	1.5E-14	4.4E-02	6.7E-16	2.7E-15	2.4E-16
0.4	2	5.0E-04	7.9E-02	3.9E-05	7.8E-05	1.3E-05
0.5	4	1.8E-01	1.2E-01	2.2E-02	8.9E-02	2.2E-02
0.6	2	9.0E-01	1.8E-01	1.6E-01	3.2E-01	1.1E-01
0.7	4	1.2E+00	2.4E-01	3.0E-01	1.2E+00	5.8E-01
0.8	2	1.1E+00	3.1E-01	3.3E-01	6.7E-01	4.3E-01
0.9	4	7.8E-01	4.0E-01	3.1E-01	1.2E+00	1.0E+00
1	2	5.4E-01	4.9E-01	2.6E-01	5.3E-01	5.3E-01
1.1	4	3.7E-01	5.9E-01	2.2E-01	8.8E-01	1.1E+00
1.2	2	2.5E-01	7.1E-01	1.8E-01	3.6E-01	5.2E-01
1.3	4	1.8E-01	8.3E-01	1.5E-01	5.9E-01	9.9E-01
1.4	2	1.3E-01	9.6E-01	1.2E-01	2.4E-01	4.7E-01
1.5	4	9.1E-02	1.1E+00	1.0E-01	4.0E-01	9.0E-01
1.6	2	6.6E-02	1.3E+00	8.4E-02	1.7E-01	4.3E-01
1.7	4	5.0E-02	1.4E+00	7.0E-02	2.8E-01	8.1E-01
1.8	2	3.8E-02	1.6E+00	6.0E-02	1.2E-01	3.9E-01
1.9	4	2.9E-02	1.8E+00	5.1E-02	2.0E-01	7.4E-01
2	1	2.2E-02	2.0E+00	4.4E-02	4.4E-02	1.8E-01
				SUM	7.3E+00	9.2E+00

Spektra Gelombang KP 18.922 (100 tahunan)						
ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	SM*S_{UU}	ω^2 * SM * SUU
0.01	1	0.0E+00	6.0E-05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.1	4	0.0E+00	6.0E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.2	2	7.0E-80	2.4E-02	1.7E-81	3.4E-81	1.3E-82
0.3	4	1.5E-14	5.4E-02	8.1E-16	3.3E-15	2.9E-16
0.4	2	5.0E-04	9.6E-02	4.8E-05	9.5E-05	1.5E-05
0.5	4	1.8E-01	1.5E-01	2.7E-02	1.1E-01	2.7E-02
0.6	2	9.0E-01	2.2E-01	1.9E-01	3.9E-01	1.4E-01
0.7	4	1.2E+00	2.9E-01	3.6E-01	1.4E+00	7.0E-01
0.8	2	1.1E+00	3.8E-01	4.1E-01	8.1E-01	5.2E-01
0.9	4	7.8E-01	4.8E-01	3.8E-01	1.5E+00	1.2E+00
1	2	5.4E-01	6.0E-01	3.2E-01	6.4E-01	6.4E-01
1.1	4	3.7E-01	7.2E-01	2.7E-01	1.1E+00	1.3E+00
1.2	2	2.5E-01	8.6E-01	2.2E-01	4.4E-01	6.3E-01
1.3	4	1.8E-01	1.0E+00	1.8E-01	7.1E-01	1.2E+00
1.4	2	1.3E-01	1.2E+00	1.5E-01	2.9E-01	5.8E-01
1.5	4	9.1E-02	1.3E+00	1.2E-01	4.9E-01	1.1E+00
1.6	2	6.6E-02	1.5E+00	1.0E-01	2.0E-01	5.2E-01
1.7	4	5.0E-02	1.7E+00	8.6E-02	3.4E-01	9.9E-01

ω	SM	S_{nn}	G^2	S_{uu}	SM*S_{UU}	ω^2 * SM * SUU
1.8	2	3.8E-02	1.9E+00	7.3E-02	1.5E-01	4.7E-01
1.9	4	2.9E-02	2.2E+00	6.2E-02	2.5E-01	9.0E-01
2	1	2.2E-02	2.4E+00	5.4E-02	5.4E-02	2.1E-01
				SUM	8.9E+00	1.1E+01

Rekapan Hasil Pehriutngan *wave-induced velocity* dan T_u										
KP	Length (m)	Max. Height (m)	Depth (m)	R_D	U_S (m/s)		T_U (s)		U_W (m/s)	
					1 tahun	100 tahun	1 tahun	100 tahun	1 tahun	100 tahun
0.78	18	0.3	29.3	0.95	0.10	0.55	4.75	5.71	0.10	0.52
1.55	19	0.3	25	0.95	0.16	0.70	4.75	5.71	0.15	0.66
2.163	20	0.3	21.8	0.95	0.22	0.83	4.75	5.71	0.20	0.79
2.343	26	0.3	20.9	0.95	0.23	0.87	4.75	5.71	0.22	0.83
2.381	25	0.35	20.7	0.95	0.24	0.88	4.75	5.71	0.23	0.84
2.552	18	0.25	19.8	0.95	0.26	0.93	4.75	5.71	0.25	0.88
2.737	18	0.4	19.2	0.95	0.28	0.96	4.75	5.71	0.26	0.91
2.882	17	0.25	18.5	0.95	0.30	1.00	4.75	5.71	0.28	0.95
3.07	24	0.25	18	0.95	0.31	1.03	4.75	5.71	0.29	0.98
3.155	20	0.2	17.5	0.95	0.32	1.06	4.75	5.71	0.31	1.01
3.194	21	0.35	17.3	0.95	0.33	1.07	4.75	5.71	0.31	1.02
3.406	23	0.25	16.5	0.95	0.36	1.12	4.75	5.71	0.34	1.07
11.974	18	0.3	19.2	0.95	0.42	0.87	5.05	5.61	0.40	0.83
12.485	17	0.35	18.3	0.95	0.45	0.92	5.05	5.61	0.42	0.87
14.385	17	0.3	16.1	0.95	0.53	1.04	5.05	5.61	0.50	0.99
16.365	26	0.6	16.7	0.95	0.50	1.00	5.05	5.61	0.48	0.95
16.392	34	0.5	17	0.95	0.49	0.99	5.05	5.61	0.47	0.94
16.431	16	0.4	17	0.95	0.49	0.99	5.05	5.61	0.47	0.94
16.811	17	0.2	17.3	0.95	0.48	0.97	5.05	5.61	0.46	0.92
17.665	25	0.55	16.8	0.95	0.50	1.00	5.05	5.61	0.48	0.95
17.913	62	0.6	17	0.95	0.49	0.99	5.05	5.61	0.47	0.94
18.922	36	0.5	15.3	0.95	0.56	1.09	5.05	5.61	0.53	1.03

BIODATA PENULIS

Abizar Giffari lahir di Jakarta pada tanggal 8 Mei 1998. Penulis menjalani Pendidikan formal SD selama 6 tahun di SDN 05 Slipi-Petamburan Jakarta Barat, kemudian melanjutkan pendidikan di SMPN 88 Jakarta Barat dan SMAN 78 Jakarta Barat. Setelah lulus pada tahun 2016. Penulis mengikuti Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri dan diterima di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menempuh masa perkuliahan, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan sebagai Staff Departemen Pengembangan Sumber Daya Manusia periode 2017 – 2018 dan menjadi anggota aktif Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan . Selain aktif di dalam Himpunan penulis juga aktif menjadi panitia dari kegiatan – kegiatan didalam Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan atau kegiatan diluat Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan, Penulis juga diberi kesempatan untuk menyelesaikan Kerja Praktek di PT. Dinamika Teknik Persada pada bulan Juni – Agustus 2019, Penulis ditempatkan di Departemen Pipeline Engineer dan Structure Engineer untuk menganalisis *freespan* yang terjadi pada pipa bawah laut di Laut Jawa, Utaraa Bekasi.

Kontak penulis :

Email : abizarg78@gmail.com