



**TUGAS AKHIR - MO141326**

**ANALISIS STABILITAS DAN PENGARUH SCOURING PADA PIPA  
BAWAH LAUT**

**ADITYA RAMADHANI WIDIATMA**

**NRP. 4311 100 073**

**Dosen Pembimbing:**

**Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng.**

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

**JURUSAN TEKNIK KELAUTAN**

**Fakultas Tekonolgi Kelautan**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Surabaya 2015**



**FINAL PROJECT - MO141326**

**STABILITY ANALYSIS AND SCOURING EFFECT OF SUBSEA  
PIPELINE**

**ADITYA RAMADHANI WIDIATMA**

**REG. 4311 100 073**

**Supervisors:**

**Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng.**

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

**DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING**

**Faculty of Marine Technology**

**Sepuluh Nopember Institute of Technology**

**Surabaya 2015**

**ANALISIS STABILITAS DAN PENGARUH SCOURING  
PADA PIPA BAWAH LAUT**

**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 :

**Aditya Ramadhani Widiatma**

NRP. 4311 100 073

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng.  (Pembimbing 1)

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



SURABAYA, AGUSTUS 2015

## ANALISIS STABILITAS DAN PENGARUH SCOURING PADA PIPA BAWAH LAUT

**Nama Mahasiswa** : Aditya Ramadhani Widiatma  
**NRP** : 4311100073  
**Jurusan** : Teknik Kelautan FTK – ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng.  
Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

### Abstrak

Dalam sistem perpipaan bawah laut, banyak permasalahan yang dihadapi salah satunya adalah ketidakstabilan pipa akibat pengaruh gaya hidrodinamis dan juga fenomena *scouring* yang dapat menimbulkan bentangan bebas (*freespan*) yang bisa mengakibatkan terjadinya defleksi dan vibrasi yang biasa dikenal sebagai fenomena *Vortex Induced Vibration* (VIV). Tugas akhir ini adalah melakukan analisis stabilitas pipa bawah laut dan bagaimana pengaruh dari scour pada pipa bawah laut dari platform poleng di laut jawa menuju ORF di Gresik. Analisis stabilitas dan pengaruh *scour* ini penting untuk mengetahui apakah pipa tersebut stabil ketika beroperasi dan apa sajakah yang dampak yang diakibatkan oleh fenomena *scouring*. Code yang digunakan adalah DNV RP E305 *On-bottom Stability Design Of Submarine Pipeline* untuk menganalisis stabilitasnya dan DNV RP F105 *Free Spanning Pipelines* untuk menganalisis dampak dari *scour*-nya. Dari hasil perhitungan dan pemodelan menunjukkan bahwa semakin dekat letak pipa dengan permukaan laut maka semakin besar gaya yang diterima. Untuk stabilitas nilainya tidak boleh dibawah *safety factor* yang tertera di code yaitu harus diatas 1,1 . nilai *span* maksimum untuk span 1 sebesar 66,25 m pada span 2 sebesar 52,99 m dan untuk span 3 sebesar 37,86 m. Panjang maksimum tiap span tersebut berbeda karena nilai dari gaya yang bekerja pada masing masing zona tidaklah sama.

Kata kunci : stabilitas, *scouring*, *free span*, *span* maksimum.

## STABILITY ANALYSIS AND SCOURING EFFECT OF SUBSEA PIPELINE

**Name** : Aditya Ramadhani Widiatma  
**REG** : 4311100073  
**Department** : Teknik Kelautan FTK – ITS  
**Supervisor** : Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng.  
Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

### *ABSTRACT*

*In subsea pipeline, many faced problems which is the unstable pipe due to hydrodynamic force, and also scouring phenomenon that can cause freespan which could takes effect in deflection and vibration phenomenon that commonly known as Vortex Induced Vibration (VIV) . This final project analyze the stability of subsea pipeline and how the scour take effects in subsea pipeline from the platform at Java sea to ORF in Gresik. Stability analysis and scour effect are important to know whether the pipeline is stable when it's operate and what are the impacts caused by the scouring phenomenon. This analyzing used DNV RP E305 On-bottom Stability Design Of Submarine Pipeline code to calculate subsea pipe stability and DNV RP F105 Free Spanning Pipelines to analyze the impact of scour. From the calculation and modeling shows that the closer location between pipe to sea surface, the greater force that is acceptable. For the stability of its value should not be below the safety factor specified in the code which must be above 1.1. The maximum value for 1st span is 66.25 m . In 2nd span is 52.99 m and 3rd span is 37.86 m. The maximum length of each span is different because of forces acting value on each zone is not same.*

**Keywords** :stability, scouring, free span, maximum span

## KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah, tiada henti-hentinya penulis menghaturkan puji syukur atas kehadiran Allah SWT untuk segala nikmat, rahmat, dan hidayah-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik dan lancar. Adapun judul dari Tugas Akhir ini adalah "**Analisis Stabilitas dan Pengaruh Scouring Pada Pipa Bawah Laut**"

Perlu diketahui, penyusunan Tugas Akhir ini dilakukan sebagai pemenuhan persyaratan dalam menyelesaikan Studi sarjana (S-1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Dalam Tugas Akhir ini, Stabilitas pipa dan pengaruh *Scouring* terhadap suatu *pipeline* yang sedang beroperasi sehingga menyebabkan freespan dan dampak merupakan pembahasan utama dalam laporan ini.

Besar kesadaran penulis mengenai banyaknya kekurangan dalam laporan ini sehingga kritik dan saran sangat dibutuhkan dalam menyempurnakan laporan selanjutnya. Semoga, laporan ini dapat bermanfaat bagi perkembangan teknologi kemaritiman dan industri migas (minyak dan gas) di Indonesia terkhusus pada bidang *pipelines* untuk pembaca umumnya dan penulis khususnya.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Surabaya, July 2015

Aditya Ramadhani Widiatma

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>ABSTRAK</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vi
<b>UCAPAN TERIMAKASIH</b> .....	vii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	viii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	x
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xi
<b>DAFTAR NOTASI</b> .....	xiv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xv
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Manfaat.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI</b> .....	5
2.1 Tinjauan Pustaka .....	5
2.2 Dasar Teori.....	6
2.2.1 Konsep Umum .....	6
2.2.2 Kondisi Pembebanan.....	8
2.3 Teori Gelombang.....	9
2.3.1 Penentuan Teori Gelombang.....	10
2.3.2 Perhitungan Properti Gelombang.....	11
2.4 Kecepatan Arus Efektif yang Bekerja Pada Pipa .....	13
2.4.1 Kecepatan Arus Steady .....	13
2.4.2 Kecepatan Partikel Efektif dari Partikel Air .....	14
2.4.3 Reynold Number .....	15
2.4.4 Karpenster Ceulegan Number.....	15
2.4.5 Stability Parameter .....	15
2.5 Stabilitas Pipa Vertikal.....	16
2.5.1 Berat Minimum Pipa Terendam.....	16
2.5.2 Berat pipa Terendam.....	17
2.5.3 Gaya Hidrodinamis .....	19
2.6 Estimasi Perhitungan Kedalaman <i>Scouring</i> .....	20
2.6.1 Kedalaman <i>Scouring</i> Pada Steady Currents.....	22
2.6.2 Kedalaman <i>Scouring</i> Akibat Kombinasi Gelombang dan Arus .....	22
2.7 Lebar <i>Scouring</i> .....	24
2.8 Analisis <i>Free Span</i> Dinamik Pipa Bawah Laut.....	24
2.8.1 Frekuensi Natural dan Panjang Bentangan Maksimum.....	28
2.8.2 Tegangan Pada pipa .....	29

<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	33
3.1 Alur diagram Pelaksanaan Tugas Akhir .....	34
3.2 Prosedur Tugas Akhir .....	36
3.3 Pengumpulan Data.....	38
<b>BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN</b> .....	41
4.1 Analisa Data dan Lingkungan .....	41
4.1.1 Perhitungan Teori gelombang .....	41
4.1.2 Menghitung Panjang Gelombang .....	43
4.1.3 Perhitungan Kecepatan Arus Efektif .....	43
4.2 Perhitungan Stabilitas Pipa .....	44
4.2.1 Menghitung Gaya Gaya Yang Bekerja Pada Pipa.....	45
4.2.2 Menghitung Berat Minimum Pipa Terendam.....	47
4.2.3 Menghitung Stabilitas Pipa Dengan Lapisannya Secara Statis .....	48
4.3 Validasi Menggunakan Software.....	49
4.4 Perhitungan Kedalaman Scouring Maksimal .....	52
4.5 Perhitungan lebar Scouring .....	54
4.6 Perhitungan <i>Freespan</i> .....	55
4.6.1 Perhitungan Panjang Bentangan Bebas Maksimum .....	55
4.6.2 Perhitungan Nilai CSF dan Pcr.....	56
4.6.3 Perhitungan Defleksi .....	57
4.6.4 Perhitungan Frekuensi Natural .....	57
4.6.5 Penentuan Klasifikasi Respon <i>Freespan</i> .....	58
4.6.6. Perhitungan Tegangan .....	59
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	63
5.1 Kesimpulan .....	63
5.2 Saran .....	64
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	65
<b>LAMPIRAN</b>	
<b>BIODATA PENULIS</b>	



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Berat pipa saat kondisi operasi .....	18
<b>Tabel 2.2</b> Grain size untuk seabed materia .....	19
<b>Tabel 2.4</b> Koefisien Boundary Condition .....	29
<b>Tabel 2.5</b> Tegangan pada pipa .....	29
<b>Tabel 3.1</b> Data Pipa secara Umum.....	38
<b>Tabel 3.2</b> Data Arus dan gelombang.....	38
<b>Tabel 3.3</b> Sea Water Properties.....	39
<b>Tabel 3.4</b> Sea Bed Soil Properties .....	39
<b>Tabel 3.5</b> Bed Mattress Properties .....	39
<b>Tabel 4.1</b> Parameter gelombang 100 tahunan pada KP .....	41
<b>Tabel 4.2</b> Nilai Fungsi X dan Y Dalam Diagram Region of Validity .....	42
<b>Tabel 4.3</b> Panjang Gelombang di Setiap Area .....	43
<b>Tabel 4.4</b> Berat Pipa Pada Masing - Masing Area.....	47
<b>Tabel 4.5</b> Perhitungan Stabilitas Secara Statis.....	48
<b>Tabel 4.6</b> Komparasi Nilai FD dari Perhitungan Manual dengan Numerik .....	51
<b>Tabel 4.7</b> Nilai Scour Akibat Arus dan Gelombang.....	54
<b>Tabel 4.8</b> Panjang Span Aktual.....	55
<b>Tabel 4.9</b> Perhitungan Panjang Span Maksimum .....	55
<b>Tabel 4.10</b> Perbandingan Span Maksimum dan Span Aktual .....	56
<b>Tabel 4.11</b> Perhitungan CSF .....	56
<b>Tabel 4.12</b> Perhitungan Pcr.....	56
<b>Tabel 4.13</b> Perhitungan Defleksi .....	57
<b>Tabel 4.14</b> Defleksi dan Frekuensi Natural .....	57
<b>Tabel 4.15</b> Nilai L/D untuk mengklasifikasikan respon <i>freespan</i> .....	58
<b>Tabel 4.16</b> Klasifikasi Respon Free Span.....	59
<b>Tabel 4.17</b> Data Input Perhitungan Analisis Tegangan .....	60
<b>Tabel 4.18</b> Perhitungan Tegangan di Area Shallow Water.....	60
<b>Tabel 4.19</b> Perhitungan Tegangan di Area Intermediate Water.....	61
<b>Tabel 4.20</b> Perhitungan Tegangan di Area Deep Water .....	61
<b>Tabel 4.21</b> Validasi Hasil Perhitungan Tegangan.....	62

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b> Denah Lokasi Pipa Kodeco Energy Co. Ltd.....	2
<b>Gambar 2.1.</b> Ilustrasi <i>Scouring</i> (Nugroho,2011) .....	7
<b>Gambar 2.2</b> Parameter Gelombang .....	9
<b>Gambar 2.3</b> Grafik Region of Validity of Wave Theories (Mosselli 1981).....	10
<b>Gambar 2.4</b> Pola Gelombang Pada Daerah Tertentu .....	12
<b>Gambar 2.5</b> Diagram Current Rose.....	12
<b>Gambar 2.6</b> Tampak penampang pipa (Haniffah, 2007) .....	17
<b>Gambar 2.7</b> Sketsa Kategori Respon <i>Free Span</i> Dinamik (Pratama, 2007).....	24
<b>Gambar 2.8</b> Klasifikasi Morfologi Interaksi Free Span .....	25
<b>Gambar 2.9</b> Reduced Velocity for Crossflow Oscillation (Guo, 2005) .....	27
<b>Gambar 2.10</b> Reduced Velocity for Inline Oscillations (Guo, 2005).....	27
<b>Gambar 2.11</b> Tegangan hoop pada pipa (Guo, 2005).....	30
<b>Gambar 2.12</b> Tegangan longitudinal (Guo, 2005).....	30
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir pengerjaan Tugas Akhir .....	35
<b>Gambar 4.1</b> Grafik Region of Validity .....	42
<b>Gambar 4.3</b> Layout Pipa.....	44
<b>Gambar 4.4</b> Grafik Gaya yang Bekerja Pada Area Shallow Water.....	45
<b>Gambar 4.5</b> Grafik Gaya yang Bekerja Pada Area Intermediate Water.....	46
<b>Gambar 4.6</b> Grafik Gaya yang Bekerja Pada Area Deep Water .....	46
<b>Gambar 4.7</b> Grafik Berat Pipa Terendam.....	47
<b>Gambar 4.8</b> Grafik Hubungan Berat Pipa dan Kedalaman .....	48
<b>Gambar 4.9</b> Menggambar objek dengan software.....	49
<b>Gambar 4.10</b> Hasil simulasi kecepatan arus pada software.....	49
<b>Gambar 4.11</b> Hasil Simulasi Gaya Drag di Area Deep Pada Software.....	50
<b>Gambar 4.12</b> Hasil Simulasi Gaya Drag di Area Intermediate Pada Software ...	50
<b>Gambar 4.13</b> Hasil Simulasi Gaya Drag di Area Shallow Pada Software .....	51
<b>Gambar 4.14</b> Komparasi Nilai FD Perhitungan Manual dengan Numerik .....	52
<b>Gambar 4.15</b> Grafik Kedalaman Scouring Akibat Arus.....	52
<b>Gambar 4.16</b> Grafik Nilai $U_c/(U_c+U_m)$ .....	53
<b>Gambar 4.17</b> Grafik Kedalaman Scour Akibat Arus dan Gelombang .....	53
<b>Gambar 4.18</b> Grafik Lebar Lubang Scour .....	54
<b>Gambar 4.19</b> Sketsa Kategori Respon <i>Freespan</i> Dinamik (Pratama, 2007) .....	58

## DAFTAR NOTASI

$A_e$	= Luas permukaan luar penampang melintang pipa, (m <sup>2</sup> )
$A_i$	= Luas permukaan dalam penampang melintang pipa, (m <sup>2</sup> )
$A_s$	= Luas penampang pipa, (m <sup>2</sup> )
$C$	= Konstanta kondisi batas perletakan
$C_D$	= Koefisien <i>drag</i>
$C_L$	= Koefisien <i>lift</i>
$C_M$	= Koefisien inersia
$d$	= Kedalaman perairan, (m)
$D$	= Diameter pipa, (m)
$D_s$	= Kedalaman scour/lebar scour
$D_{max}$	= Diameter pipa terbesar yang diukur, (m)
$D_{min}$	= Diameter pipa terkecil yang diukur, (m)
$D_{icc}$	= Tebal dinding ( <i>coating+concrete</i> ), (m)
$E$	= Modulus elastisitas baja, (Pa)
$F_D$	= <i>Drag force</i> , (N)
$F_H$	= Beban hidrodinamik, (N/m)
$F_I$	= <i>Inertia force</i> , (N)
$F_\theta$	= Gaya tangensial, (N)
$g$	= Percepatan gravitasi, (m/s <sup>2</sup> )
$H$	= Ketinggian gelombang pada titik yang ditinjau, (m)
$h$	= Jarak antara titik referensi dengan permukaan air laut, (m)
$I$	= Momen inersia, (m <sup>4</sup> )
$ID$	= <i>Inside diameter</i> , (m)
$L$	= Panjang gelombang, (m)
$L_p$	= Panjang <i>span</i> , (m)
$M$	= Momen lentur, (Nm)
$M_B$	= Momen tekuk statik maksimum, (Nm)
$M_p(t_2)$	= Tahanan momen plastis, (Nm)
$M_{sd}$	= <i>Design bending moment</i> , (Nm)
$OD$	= <i>Outside diameter</i> , (m)

$P$	= Resultan tekanan yang mengelilingi pipa, (Pa)
$P_b(t)$	= <i>Pressure containment</i> , (Pa)
$P_c$	= Karakteristik tekanan <i>collapse</i> , (Pa)
$P_d$	= <i>Pressure design</i> , (Pa)
$P_e$	= Tekanan eksternal, (Pa)
$P_{el}$	= Tekanan <i>collapse</i> elastis, (Pa)
$P_i$	= Tekanan internal, (Pa)
$P_{li}$	= Tekanan lokal insidental, (Pa)
$P_{min}$	= Tekanan internal minimum, (Pa)
$P_p$	= Tekanan <i>collapse</i> plastis, (Pa)
$P_{pr}$	= <i>Propagation buckling</i> , (Pa)
$q$	= Beban total pipa, (N/m)
$r$	= Selisih antara diameter terluar dengan ketebalan dinding pipa, (m)
$R_e$	= <i>Reynolds number</i>
$s$	= Jarak vertikal titik yang ditinjau dari dasar laut, (m)
$S_{eff}$	= Gaya aksial efektif, (N)
$SMTS$	= <i>Specified Minimum Tensile Strength</i> , (Pa)
$SMYS$	= <i>Specified Minimum Yield Stress</i> , (Pa)
$S_p(t_2)$	= Karakteristik tahanan gaya aksial plastis, (N)
$S_{sd}(p_i)$	= Gaya aksial efektif desain, (N)
$T$	= Periode gelombang, (s)
$T_{max}$	= <i>Maximum Design Temperature</i> , (°C)
$T_{min}$	= <i>Installation Temperature</i> , (°C)
$t_{CA}$	= <i>Corrosion allowance</i> , (m)
$t_{cc}$	= Tebal selimut beton, (m)
$t$	= Waktu yang ditempuh untuk mencapai jarak horizontal titik yang ditinjau, (s)
$t_{corr}$	= Tebal lapisan anti korosi, (m)
$U$	= Kecepatan horizontal partikel air, (m/s)
$U_c$	= Kecepatan partikel arus efektif, (m/s)
$U_D$	= Kecepatan partikel arus, (m/s)
$U_e$	= Kecepatan arus dan gelombang efektif, (m/s)

$U_{eff}$	= kecepatan efektif partikel air pada ketinggian $y_o$ , (m/s)
$U_o$	= kecepatan horizontal partikel air yang diketahui pada $y_o$ , (m/s)
$U_r$	= kecepatan arus stabil, (m/s)
$U_w$	= Kecepatan partikel gelombang efektif, (m/s)
$\nu$	= <i>Poisson ratio</i>
$W/D$	= Lebar scour
$W$	= Beban terdistribusi merata, (N/m)
$W_{buoy}$	= Berat gaya apung, (N/m)
$W_{cc}$	= Berat selimut beton, (N/m)
$W_{cont}$	= Berat isi pipa, (N/m)
$W_{corr}$	= Berat lapisan anti korosi, (N/m)
$W_{st}$	= Berat pipa baja, (N/m)
$W_{sub}$	= Beban pipa terendam, (N/m)
$WT$	= <i>Wall thickness</i> , (m)
$x$	= Jarak horizontal titik yang ditinjau, (m)
$y$	= kedalaman titik yang ditinjau dari permukaan laut, (m)
$y_o$	= Ketinggian orbit partikel dari dasar laut, (m)
$y_{pipe}$	= <i>Height of pipe above seabed</i> , (m)
$Z_o$	= faktor kekasaran <i>seabed</i> , (m)
$Z_r$	= ketinggian arus di atas <i>seabed</i> , (m)
$\alpha_c$	= <i>Flow stress parameter</i>
$\alpha_{fab}$	= Faktor fabrikasi
$\alpha_p$	= Faktor tekanan untuk <i>combined loading criteria</i>
$\alpha_T$	= Koefisien <i>thermal expansion</i> , ( $C^{-1}$ )
$\alpha_u$	= <i>Material strength factor</i>
$\beta$	= <i>Combined loading criteria factor</i>
$\eta$	= <i>Usage factor</i>
$\rho$	= Densitas air laut, ( $N/m^3$ )
$\rho_{cc}$	= Densitas selimut beton, ( $N/m^3$ )
$\rho_{cont}$	= Densitas fluida dalam pipa, ( $N/m^3$ )
$\rho_{corr}$	= Densitas lapisan anti korosi, ( $N/m^3$ )
$\rho_s$	= Densitas baja, ( $N/m^3$ )

$\tau_x$	= Tegangan geser tangensial, (Pa)
$\nu$	= Viskositas kinematis air, (m <sup>2</sup> /s)
$\gamma_m$	= <i>Material resistance factor</i>
$\gamma_{inc}$	= <i>Incidental to design pressure ratios</i>
$\gamma_{SC}$	= <i>Safety class resistance factor</i>
$\omega$	= Frekuensi gelombang, (rad/s)
$\sigma_b$	= Tegangan longitudinal akibat momen lentur, (N/m <sup>2</sup> )
$\sigma_E$	= <i>Equivalent stress</i> , (Pa)
$\sigma_{ep}$	= <i>End cap effect stress</i> , (Pa)
$\sigma_H$	= <i>Hoop stress</i> , (Pa)
$\sigma_i$	= Tegangan longitudinal akibat beda tekanan, (N/m <sup>2</sup> )
$\sigma_L$	= <i>Longitudinal stress</i> , (Pa)
$\sigma_p$	= <i>Poisson stress</i> , (Pa)
$\sigma_T$	= <i>Thermal stress</i> , (Pa)
$\pi$	= <i>phi</i>
$\theta$	= Sudut fase (°)
$\Delta T$	= Perbedaan temperatur antara kondisi instalasi dan operasional, (C°)
$\frac{\partial u}{\partial t}$	= percepatan horizontal partikel air, (m/s <sup>2</sup> )

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>LAMPIRAN 1</b>	<b>PERHITUNGAN GELOMBANG DAN KECEPATAN ARUS</b>
<b>LAMPIRAN 2</b>	<b>PERHITUNGAN STABILITAS PIPA</b>
<b>LAMPIRAN 3</b>	<b>PERHITUNGAN <i>SCOURING</i></b>
<b>LAMPIRAN 4</b>	<b>PERHITUNGAN FREESPAN</b>

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

*Pipeline* mempunyai peranan penting dalam industri minyak dan gas lepas pantai. Perkembangan yang meningkat dari eksplorasi minyak dan gas lepas pantai juga meningkatkan konstruksi *Offshore Pipelines*. Beberapa teori telah menunjukkan bahwa *pipeline* merupakan alat transportasi migas yang paling efisien dan ekonomis, karena *pipeline* dapat bekerja 24 jam sehari, 365 hari dalam setahun selama umur pipa yang bisa sampai 30 tahun atau bahkan lebih. Instalasi pipa harus dirancang dan dipasang sedemikian rupa hingga dapat menjamin proses transportasi yang aman, efisien dan handal walaupun pada penerapannya ada beberapa masalah yang timbul.

*Offshore pipeline* merupakan sebuah jalur pipa yang berfungsi untuk menyalurkan aliran fluida dari fasilitas *offshore* ke fasilitas *onshore*, atau ke fasilitas *offshore* lainnya. *Offshore pipeline* biasanya dipendam di dasar laut agar terhindar dari aktivitas alur pelabuhan atau dermaga, serta dapat mengurangi pengaruh dari beban arus yang besar di sekitar konstruksi *pipeline*. Namun, ada alasan lain mengapa pipa tersebut tidak dipendam. Alasan yang paling utama adalah biaya untuk melakukan pemendaman pipa pada laut lepas adalah biaya yang tidak sedikit. dengan melakukan pemendaman didalam tanah akan muncul masalah baru yang harus dipertimbangkan dalam desain instalasi.

Pada saat proses instalasi pipa, struktur pipa tersebut akan mengalami tegangan yang dapat mengakibatkan pipa mengalami buckling. Setelah terpasang, pipa akan menerima gaya-gaya dari luar yang berupa gaya hidrostatik dan gaya hidrodinamik yang timbul akibat kondisi lingkungan. Sedangkan pada saat beroperasi, pipa akan menerima gaya tambahan berupa tekanan internal yang berasal dari aliran fluida di dalamnya dan tekanan longitudinal yang disebabkan oleh pemuaian pipa akibat meningkatnya suhu. Pemuaian tersebut dapat menyebabkan bentangan bebas pada pipa (*free span*), yang dapat mengakibatkan defleksi pada pipa. *Free span* dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya akibat kondisi batimetri yang tidak rata, akibat proses penggerusan dasar laut (*scouring*), dan juga akibat crossing dengan pipa lainnya yang telah ada pada



daerah eksplorasi migas tersebut. Daerah studi pada tugas akhir ini adalah perairan di Selat Madura, yang merupakan proyek Gas Expansion Phase II dari Kodeco Energy Co. Ltd, menghubungkan PP Platform di perairan Madura menuju Onshore Receiving Facilities (ORF). Untuk tugas akhir ini menganalisa scouring yang terjadi pada dasar laut di bawah pipa Kodeco Energy Co. Ltd dengan menggunakan 3D modelling untuk memperhitungkan laju terjadinya scouring pada pipa milik kodeco.



**Gambar 1.1** Denah Lokasi Pipa Kodeco Energy Co. Ltd.

Berdasarkan kondisi tanah dan kondisi lingkungan perairan di sepanjang rute pipa gas bawah laut Kodeco, ada kemungkinan terjadinya scouring yang mengenai tanah dimana pipa diletakkan. Scouring yang mengenai tanah di bawah atau di sekitar pipa dapat menyebabkan rongga di bawah pipa yang sangat mungkin mengakibatkan timbulnya bentangan bebas. Bentangan bebas (freespans) yang terjadi akan menimbulkan gerakan osilasi pipa sehingga menyebabkan kondisi *fatigue* pada saat tertentu jika frekuensinya melebihi frekuensi natural pipa (Narayanan, 2008). Disamping itu, dengan adanya

freespans akan memungkinkan terjadinya gangguan stabilitas (perubahan kedudukan) terhadap pipa gas bawah laut sebagai akibat dari perubahan gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja di lokasi *scouring* (Hermawan, 2001). Oleh karena itu, diperlukan suatu analisa yang dapat menentukan tingkat kelajuan *scouring* dengan permodelan 3 Dimensi terhadap pipa gas bawah laut Kodeco Energy, Co. Ltd.

## **1.2 Perumusan Masalah**

1. Bagaimana tabilitas pipa saat terendam di air?
2. Berapa kedalaman *scour* dan lebar *scour* yang terjadi pada pipa?
3. Berapa panjang maksimum span yang diijinkan oleh DNV RP F105?

## **1.3 Tujuan**

1. Mengetahui stabilitas pipa saat terendam dengan menggunakan code DNV RPE 305.
2. Menghitung kedalaman *scour* dan lebar *scour* yang terjadi pada pipeline.
3. Menghitung panjang maksimum span yang sesuai dengan code DNV RP F105.

## **1.4 Manfaat**

Manfaat tugas akhir ini akan mendapatkan sebuah hasil yaitu mengetahui stabilitas pipa, berapa kedalaman dan lebar *scour* yang terjadi pada pipeline, serta mengetahui kondisi panjang span aktual melebihi batas kritis atau tidak.. Sehingga hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi produksi minyak dan gas selama beroperasi.

## 1.5 Batasan Masalah

1. Struktur pipa yang akan dilakukan peninjauan adalah pipa gas bawah laut milik Kodeco Energy, Co. Ltd sepanjang 66,02 km dari Poleng Process Platform (PPP) sampai Onshore Receiving Facilities (ORF) yang memungkinkan terjadinya scouring berdasarkan pembagian ruas pipa.
2. Lokasi yang dianalisa dibagi menjadi 3 bagian. Deep water, Intermediate water dan shallow water
3. Pipa dimodelkan atau dianggap sebagai kolom yang dikenai beban aksial dengan ujung-ujung pipa dianggap dipasak (*pined-pined*).
4. Akibat korosi tidak dihitung (diabaikan).
5. Analisa scouring hanya untuk pipa gas bawah laut Kodeco yang terekspos di permukaan dasar laut.
6. Panjang span aktual diasumsikan sebagai akibat dari scouring
7. *Code* yang digunakan untuk menghitung stabilitas pipa terendam adalah DNV RPE 305
8. Standart yang dipakai untuk acuan dalam menentukan bentangan bebas adalah DNV code RP-F105
9. Laju aliran diasumsikan tetap (*steady flow*)

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Pipa bawah laut diinstalasi untuk transportasi gas dan minyak mentah dari platform lepas pantai menuju tempat penyulingan (refinery) selain itu pipa bawah laut juga berfungsi sebagai pembuangan air limbah industry dan kota ke laut atau biasa disebut dengan Ocean Outfall. Pipeline adalah suatu cara yang efektif untuk mengangkut minyak mentah dan gas alam di lingkungan lepas pantai, di kedalaman air kurang lebih 2000m. Struktur ini adalah salah satu alternative lain dalam hal penggunaan kapal tanker. Meskipun investasi modal awal yang lebih tinggi, biaya operasinya lebih murah dan ketika beroperasi pipa tidak terpengaruh oleh cuaca sehingga walau cuaca buruk penyaluran minyak dan gas akan tetap berlangsung.

Pipelines digunakan untuk berbagai jenis kegiatan dalam pengembangan sumber daya alam berupa minyak dan gas bumi di lepas pantai. Penggunaan pipelines pada lepas pantai diantaranya adalah pipa transportasi untuk ekspor, pipa penyalur untuk mengangkut produksi dari suatu platform ke pipa ekspor, pipa pengalir untuk mengangkut produksi antar suatu platform, subsea manifold dan *satellite welds* serta pipelines bundle. Dikarenakan fungsi pipa bawah laut yang vital, maka dalam perancangan, instalasi, dan perawatan dibutuhkan pertimbangan yang lebih seksama. Pertimbangan tersebut antara lain menganalisa freespans dilakukan seteah proses inspeksi pipa pasca instalasi. Freespans pipa bawah laut adalah suatu keadaan dimana terbentuk bentangan pipa dengan panjang tertentu yang memiliki jarak (gap) terhadap seabed. Bentangan bebas ini akan sangat berbahaya terhadap konstruksi pipa itu sendiri, dimana bisa mengakibatkan kerusakan. Beban statis yang timbul bisa mengakibatkan pipa terkena beban siklis. Beban dinamis bisa menimbulkan fenomena vortex shedding, dimana bisa menyebabkan getaran dan osilasi pada pipa.

Nugraha (2011) melakukan analisa freespan akibat scouring pada pipa milik HESS yang menghubungkan wellhead platform A – Gresik *onshore processing facilities*. Analisa ini dilakukan untuk mengetahui scouring yang terjadi dan span yang terjadi. Namun pada formula yang digunakan untuk

menghitung kedalaman scouring yang diakibatkan arus tidak memperhatikan Reynold Number (RE) sehingga menggunakan formula yang tidak valid dan efek dari scouring tidak dianalisa lebih lanjut.

## **2.2 Dasar Teori**

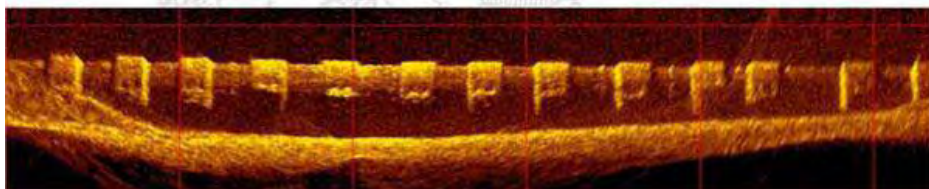
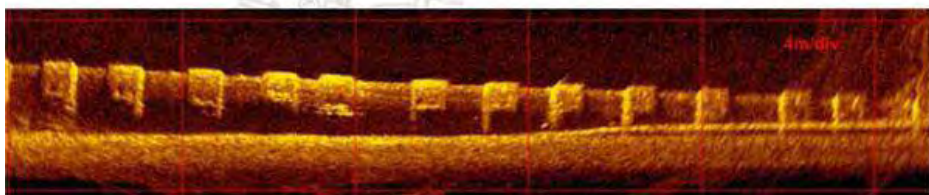
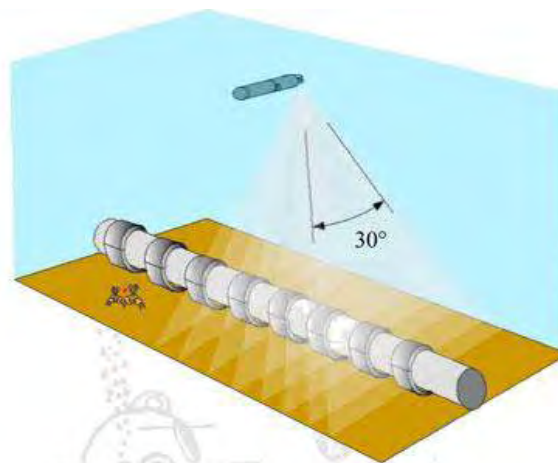
### **2.2.1 Konsep Umum**

Istilah scouring sering digunakan daripada erosi dengan tujuan untuk membedakan suatu proses penggerusan tanah yang terjadi akibat adanya suatu struktur (Coastal Engineering Manual, 2001). Scouring adalah suatu fenomena alam yang disebabkan oleh aliran laut. Peristiwa ini banyak terjadi pada material tanah, lumpur atau endapan, tetapi juga dapat terjadi pada keadaan berbatu atau berkarang pada suatu kondisi tertentu. Sehingga dapat disimpulkan pengertian dari scouring adalah pergerakan dari tanah dasar laut yang disebabkan oleh arus dan gelombang yang mana prosesnya sama seperti erosi dapat juga terjadi secara prose salami yang disebabkan oleh elemen struktur yang dekat dengan dasar laut.

Scouring padad struktur lepas pantai yang berdiri tegak dapat mengakibatkan *subseadance* sehingga gap antara dek dan tinggi gelombang tertinggi yang didesain menjadi berkurang sedangkan jika terjadi pada struktur yang terdapat pada permukaan dasar laut dapat mengakibatkan freespans. Freespans ini bisa terjadi ketika suatu struktur pipa tersebut mengalami kehilangan kontak antara seabed dengan permukaan pipa tersebut. (Guo, 2005). Freespans pada pipa terjadi karena permukaan seabed yang tidak merata, perubahan kontur dasar laut akibat scouring atau sand wave. (Summer dan Fredshoe, 1994)

Menurut Bijker dan Leeuwenstein (1984) serta Chew (1987) scouring terbagi menjadi tiga jenis. Yaitu :

1. Luff scour atau luff erosion pada upstream (bagian pipa yang berhadapan dengan arah daatangnya aliran) pipa akibat formulasi eddy pada upstream pipa.
2. Lee wake scour atau lee wake erosion. Penggerusan ini terjadi pada bagian downstream pipa karena airan melewati pipa yang menyebabkan terjadinya turbulensi pada bagian tersebut
3. Tunnel scour atau tunnel erosion, terjadi di bawah pipa dan merupakan pengaruh dari perubahan kecepatan aliran di bawah pipa.



**Gambar 2.1.** Ilustrasi *Scouring* (Nugroho,2011)

### 2.2.2 Kondisi Pembebanan

Selama umur operasi pipa bawah laut ada 4 jenis kondisi pembebanan.

Antara :

- Instalasi  
Kondisi ini untuk mewakili kondisi pipa sesaat setelah instalasi. Beban yang bekerja pada pipa saat kondisi ini anatara lain beban gelombang, arus serta beban dari pipa itu sendiri. Tegangan yang terjadi pada kondisi ini dipengaruhi oleh metode instalasi yang digunakan.
- Water filled  
Kondisi ini terjadi sebelum dan sesudah fase Hydrottest. Pada kondisi ini air laut masuk ke dalam pipa. Beban yang bekerja pada kondisi ini adalah beban dari pipa itu sendiri yang tentunya bertambah dengan adanya air laut yang masuk ke dalam pipa. Beban hidrodinamis juga bekerja pada fase ini.
- Hydrottest  
Kondisi hydrottest dilakukan untuk menguji kekuatan pipa dengan memberikan tekanan yang besar kedalam pipa. Beban yang memepengaruhi adalh tekanan dalam pipa (internal pressure) dan tentunya berat pipa yang bertambah akibat adanya air laut.
- Operasi  
Setelah instalasi dan hydrottest, berikutnya adalah fase operasi, dimana pipa mulai digunakan untuk mengalirkan fluida yang sudah ditentukan. Tekanan dalam pipa serta temperatur yang tinggi mempengaruhi formasi dan tegangan pipa.

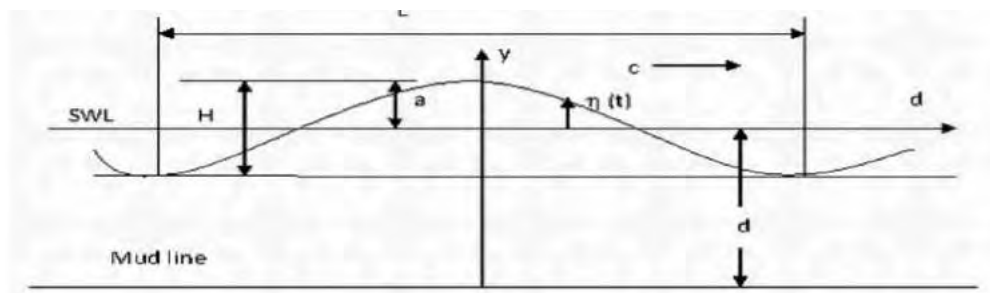
### 2.3. Teori Gelombang

Gelombang adalah suatu manifestasi dari gaya-gaya yang bekerja pada fluida. Tiupan angin dan jatuhnya batu pada permukaan air dapat menimbulkan gelombang. Ketika gelombang terbentuk, gaya gravitasi dan tegangan permukaan akan bereaksi untuk menimbulkan rambatan gelombang. Bentuk ideal gelombang beramplitudo kecil di perairan dalam adalah sinusoidal.

Parameter-parameter terpenting dalam menggambarkan gelombang adalah

1. Panjang gelombang  $L$  (jarak horizontal antara dua puncak gelombang atau dua lembah gelombang yang saling berurutan).
2. Tinggi gelombang  $H$  (jarak vertikal antara puncak gelombang dan lembah gelombang).
3. Periode gelombang  $T$ , (waktu yang ditempuh untuk mencapai satu lintasan gelombang).
4. Kedalaman perairan  $h$ , dimana gelombang tersebut dirambatkan.

Parameter yang lain seperti kecepatan serta percepatan partikel air, kecepatan dan panjang gelombang dapat diturunkan dari teori gelombang



**Gambar 2.2** Parameter Gelombang

- Dimana :
- $a$  = amplitudo gelombang
  - $c$  = kecepatan gelombang
  - $d$  = kedalaman permukaan air rata-rata dari dasar tanah
  - $H$  = tinggi gelombang dari lembah ke puncak
  - $L$  = panjang gelombang
  - $\eta$  = perpindahan arah horizontal dari puncak gelombang
  - $y$  = ketinggian gelombang dari SWL
  - $h(t)$  = profil permukaan gelombang pada saat diatas SWL



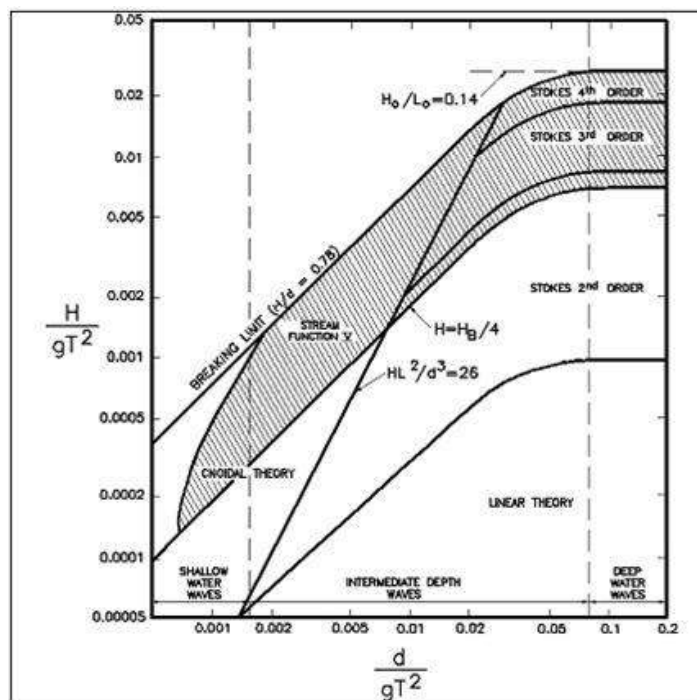
Dalam membangun suatu teori gelombang diperlukan suatu persamaan pengatur dalam teori gelombang adalah persamaan laplace. Persamaan pengatur bersifat umum, untuk mendapatkan persamaan yang bersifat khusus diperlukan syarat – syarat batas kinematis, dinamis serta syarat batas periodik.

### 2.3.1 Penentuan Teori Gelombang

Mouselli (1981) menyatakan bahwa teori gelombang yang akan digunakan dalam perancangan dapat ditentukan dengan menggunakan formulasi matematika dari teori gelombang linier sebagai berikut

$$\left[ \frac{H}{gt^2} \right] \text{ dan } \left[ \frac{d}{gt^2} \right] \quad (\text{Persamaan 2.1})$$

Hasil dari formulasi matematika tersebut kemudian disesuaikan dengan grafik daerah aplikasi teori gelombang “*Regions of Validity of Wave Theories*”, seperti terlihat pada gambar 2.3. sehingga dapat diketahui teori gelombang yang akan digunakan.



Gambar 2.3 Grafik Region of Validity of Wave Theories (Mosselli 1981)

### 2.3.2 Perhitungan Properti Gelombang

Menurut Triatmojo (1999) panjang gelombang sebagai fungsi dari kedalaman untuk teori gelombang stokes orde 3 diperoleh dari iterasi persamaan berikut

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh 2\pi d/L \quad (\text{Persamaan 2.2})$$

Panjang gelombang dari tingi mula mula diperoleh dari persamaan berikut (Triatmodjo, 1999)

$$L_0 = 1,56T^2 \quad (\text{Persamaan 2.3})$$

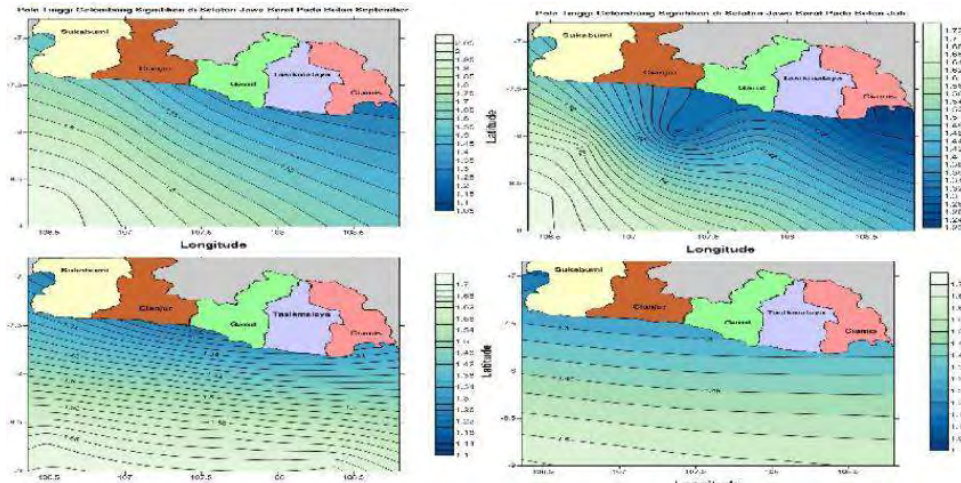
$$H = K_s H_0 \quad (\text{Persamaan 2.4})$$

Dimana :

- L = Panjang gelombang pada kedalaman tertentu
- L<sub>0</sub> = Panjang gelombang awal
- g = Percepatan gravitasi (m/dt<sup>2</sup>)
- T = Periode gelombang
- d = Kedalaman Perairan
- H = Tinggi kedalaman tertentu
- H<sub>0</sub> = Tinggi gelombang awal (m)
- K<sub>s</sub> = Koefisien shoaling/pendangkalan

### 2.3.3 Pola Gelombang

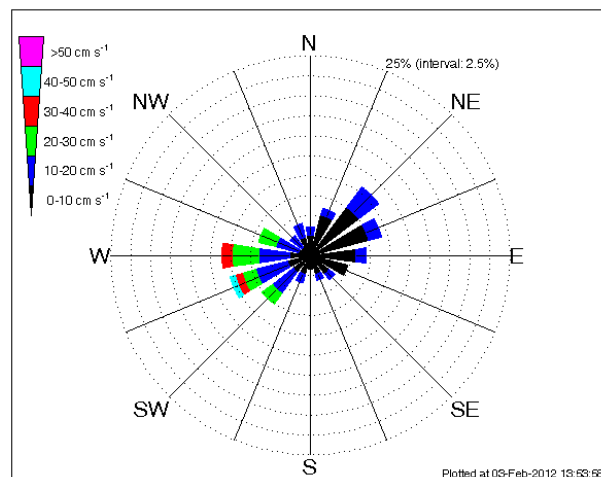
Penentuan pola gelombang dilakukan untuk mendeteksi bagaimana karakteristik gelombang laut pada periode tertentu. Pola gelombang ini dipengaruhi oleh angin yang bekerjadaerah tersebut. Pencatatan gelombang ini biasanya dilakukan pada setiap jam dalam kurun waktu tertentu. dalam pencatatan tersebut akan diketahui bagaimana karakteristik gelombang pada periode dan kurun waktu tertentu. untuk mempermudah pembacaan data maka dibuatlah ringkasan data gelombang menggunakan bantuan software.



**Gambar 2.4** Pola Gelombang Pada Daerah Tertentu

## 2.4 Distribusi Arus

Data distribusi kecepatan arus yang digunakan dalam perhitungan *scouring* kali ini adalah data yang didapat dari hasil survey pada lokasi pipa tersebut berada. Pencatatan kecepatan arus biasanya dilakukan pada setiap jam dalam kurun waktu tertentu. Dengan pencatatan tersebut akan dapat diketahui kecepatan arus maksimum, arah arus, dan dapat juga dihitung kecepatan arus rata-rata. Untuk mempermudah pembacaan data maka dibuatlah ringkasan kecepatan arus yang biasa disajikan dalam bentuk tabel yang biasa disebut dengan *current rose* atau diagram mawar arus. penyajian tersebut dapat diberikan dalam bentuk bulanan, tahunan atau untuk beberapa tahun pencatatan. Dengan tabel mawar arus, maka arah dan kecepatan arus dominan dapat dengan mudah dibaca.



**Gambar 2.5** Diagram Current Rose

#### 2.4.1 Kecepatan Efektif yang Bekerja Pada Pipa

Kecepatan efektif yang bekerja pada pipa merupakan kombinasi dari kecepatan arus dan kecepatan gelombang. Hal ini karena scouring disebabkan oleh arus dan gelombang, maka kecepatan partikel air relative efektif yang bekerja pada pipa diformulasikan :

$$V_e = V_w + V_c \quad (\text{Persamaan 2.5})$$

Dimana :  $V_w$  = kecepatan arus akibat gelombang normal terhadap pipa (m/s)

$V_c$  = Kecepatan arus steady normal terhadap pipa (m/s)

#### 2.4.2 Kecepatan Arus Steady

Kecepatan arus yang bekerja dihitung pada 1 m diatas dasar laut berdasarkan standard teori gelombang. Hukum pangkat 1/7 biasanyadigunakan untuk memperkirakan kecepatan horizontal partikel air. Seperti dinyatakan pada Mouselli (1981) :

$$\frac{U}{U_0} = \left(\frac{y}{y_0}\right)^{1/7} \quad (\text{Persamaan 2.6})$$

Dimana :  $U$  = Kecepatan Horizontal partikel air, ketinggian  $y$  dari dasar laut (m/s)

$U_0$  = Kecepatan Horizontal partikel air pada ketinggian  $y_0$  dari dasar laut

Pada persamaan diatas  $U_0$  biasanya dihitung pada ketinggian 1m diatas dasar laut.

Pada kenyataanya tergantung dari kekasaran dasar laut dan Reynold Number.

Sehingga kecepatan efektif ( $V_e$ ) pada Mouselli (1981) adalah :

$$V_e^2 = 1/D \int_0^D V^2(y) dy \quad (\text{Persamaan 2.7})$$

Setelah mensubstitusi persamaan 2.6 kedalam 2.7, maka diperoleh kecepatan arus efektif Mouselli (1981)

$$V_{ew}^2 = 0.778 x V_w^2 x \left(\frac{D}{y}\right)^{0.286} \quad (\text{Persamaan 2.8})$$

Dimana  $V_c$  dan  $y_0$  diperoleh dari data dengan harga  $D$  yang ditentukan maka harga  $V_e$  dapat dicari. Arah arus yang digunakan normal terhadap pipa. Apabila dalam data arah arus menunjukkan arah tertentu maka sudut datangnya perlu diketahui dengan garis normal pipa, sehingga didapat (Soegiono,1998) :

$$V_n = V_{ew} \cos \Theta \quad (\text{Persamaan 2.9})$$

### 2.4.3 Kecepatan Partikel Efektif dari Partikel Air

Dalam Mouselli (1981), penentuan kecepatan horizontal partikel air pada kedalaman tertentu serta kedalaman kecepatan efektif adalah sebagai berikut:

$$U_e^2 = 0,778 U_0^2 \left(\frac{D}{Y_0}\right)^{0.286} \quad (\text{Persamaan 2.10})$$

Dimana :

- $U_e$  = kecepatan efektif partikel air pada ketinggian  $y_o$  (m/s)
- $U_o$  = kecepatan horizontal partikel air yang diketahui pada  $y_o$
- $D$  = diameter luar pipa (m)
- $Y$  = kedalaman laut
- $Y_o$  = ketinggian orbit partikel dari seabed

Arah kecepatan partikel air yang digunakan adalah normal terhadap pipa sehingga jika kecepatan partikel air datang pada arah tertentu, maka perlu untuk mengetahui sudut datang tersebut terhadap arah normal pipa. Dengan demikian kecepatan normal pipa dapat dinyatakan dalam rumusan sebagai berikut :

$$V_N = V_{abs} \cos \Theta \quad (\text{Persamaan 2.11})$$

Dimana :

- $V_N$  = kecepatan normal (m/dt)
- $V_{abs}$  = kecepatan absolute

#### 2.4.4 Reynold Number

Bilangan reynold mengindikasikan bentuk aliran yang terbentuk dan berhubungan dengan tahanan suatu benda. Bilangan Reynold itu sendiri dirumuskan sebagai berikut :

$$Re = \frac{UeD}{\gamma} \quad (\text{Persamaan 2.12})$$

Dimana :

$\gamma$  = Viskositas kinematis fluida air laut berkisar  $1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

D = Diameter luar pipa (m)

Ue = Kecepatan efektif partikel (m/s)

#### 2.4.5 Karpenter Ceulegan Number

Pada dinamika fluida angka Keulegan Carpenter juga disebut angka periode, ialah suatu bilangan nondimensial yang mendeskripsikan hubungan antara gaya drag dengan gaya inertiya yang menggerakkan objek dalam aliran fluida. Untuk nilai KC yang kecil maka gaya inertiya yang dominan sedangkan jika nilai KC yang besar maka gaya drag yang dominan. Nilai KC dirumuskan sebagai :

$$KC = \frac{UmTw}{D} \quad (\text{Persamaan 2.13})$$

Dimana : Um = kecepatan maksimum partikel pada seabed

Tw = periode gelombang

D = Diameter pipa

## 2.5 Stabilitas Pipa Vertikal

Tahap instalasi berkaitan dengan periode waktu setelah instalasi pipa diletakkan di dasar laut sebelum commissioning. Kecuali pipa akan dialiri air setelah instalasi dilakukan, pipa biasanya diasumsikan berisi udara selama tahap ini. Untuk menghindari floatation di air, spesifik gravity pipa  $(W_s + b)/b=1.1$  diperlukan, dimana  $b = \text{buoyancy}$ .

### 2.5.1 Berat Minimum Pipa Terendam

Berat minimum pipa terendam diperlukan untuk mencegah gerakan horisontal dari pipa bawah laut dari beban lingkungan yang ekstrim, dihitung dengan keseimbangan kekuatan statis sederhana horizontal hidrodinamik dan gaya gesek tanah. kriteria stabilitas dapat dinyatakan sebagai berikut dengan berpedoman dari DNV RP E305

$$W_{sub} = \left[ \frac{(F_D + F_I) + \mu F_L}{\mu} \right] F_W \quad (\text{Persamaan 2.14})$$

Dimana :

- $W_{sub}$  : Berat pipa terendam (N/m)
- $F_L$  : Gaya angkat hidrodinamis per panjang unit (N/m)
- $F_D$  : Gaya drag hidrodinamis per panjang unit (N/m)
- $F_I$  : Gaya inersia hidrodinamis per panjang unit (N/m)
- $\mu$  : Koefisien friksi antara pipa dengan tanah (DNV RP E 305)
- $F_W$  : faktor kalibrasi (DNV RP E 305)

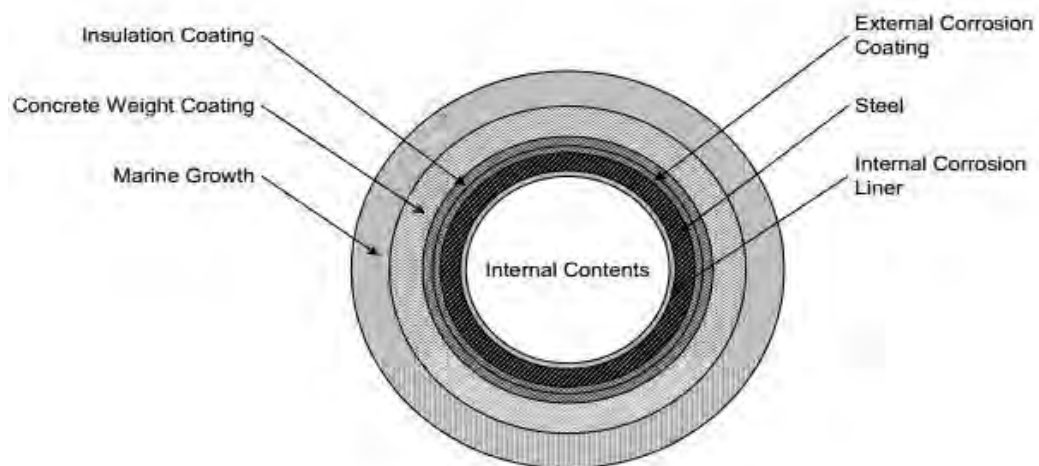
Desain stabilitas statis mengacu pada beberapa asumsi :

- i. Pergerakan pipa tidak diijinkan atau diabaikan, membutuhkan keseimbangan antara beban (gaya hidrodinamis) dan reaksi (gaya tahan tanah).
- ii. Aliran yang dekat dengan dasar laut adalah berbeda beda dan hanya gelombang yang tegak lurus terhadap sumbu pipa yang dianggap.
- iii. resistensi tanah dihitung berdasarkan asumsi dua dimensi dan mungkin termasuk gesekan sederhana serta resistensi tanah pasif

### 2.5.2 Berat pipa Terendam

Berat pipa terendam mempertimbangkan berat komponen berikut :

1. Baja
2. Korosi Internal Liner (Jika ada)
3. lapisan *coating* korosi (jika ada)
4. Insulation Coating (jika ada)
5. Lapisan *Concrete* (jika ada)
6. *Marine Growth* (Jika ada)
7. Konten internal
8. Korosi eksternal



**Gambar 2.6** Tampak penampang pipa (Haniffah, 2007)

Diameter hidrodinamis pada pipa dapat diperoleh dari

$$D = D_{st} + 2(t_{cc} + t_{ic} + t_c + t_{mg}) \quad (\text{Persamaan 2.15})$$

Berat dari komponen di udara dapat dikalkulasi dengan :

1. Berat baja karbon  $W_{es} = \pi (D_{st} - t) t \rho_{st}$  (Persamaan 2.16)

2. Berat korosi internal liner  $W_L = \pi (D_{st} - 2t - t_L) t_L \rho_L$  (Persamaan 2.17)

3. Berat coating korosi  $W_{cc} = \pi (D_{st} + t_{cc}) t_{cc} \rho_{cc}$  (Persamaan 2.18)

5. Berat concrete coating  $W_c = \pi (D_{st} + 2t_{cc} + 2t_{ic} + t_c) t_c \rho_c$  (Persamaan 2.19)



6. Berat Marine Growth  $W_{mg} = \pi (D_{st} + 2t_{cc} + 2t_{ic} + 2t_c + t_{mg}) t_{mg} \rho_{mg}$  (Persamaan 2.20)

7. Diameter internal pipa  $ID = D_{st} - 2t - 2t_L$  (Persamaan 2.21)

8. Berat dari konten  $W_i = \pi/4 (ID)^2 \rho_i$  (Persamaan 2.22)

9. Berat dari material terkorosi  $W_{corr} = (\pi (D - 2t + t_{CA}) t_{CA}) \rho_{st} \eta_{CA}$  (Persamaan 2.23)

dimana  $\eta_{CA}$  = faktor korosi yang diijinkan

**Tabel 2.1** Berat pipa saat kondisi operasi (DNV RPE 305, 1998)

Kasus	OD	Berat dari pipa, W
Operasi	$D + 2t_{cc} + 2t_{ic} + 2t_c$	$W_{cs} + W_L + W_{cc} + W_{ic} + W_c + W_i$

bouyancy pipa, berat terendam dan spesifik gravity dapat dikalkulasi dengan :

Bouyancy pipa  $B = \pi/4 OD^2 \rho_{sw}$  (Persamaan 2.24)

Berat pipa terendam  $W_s = W - B$  (Persamaan 2.25)

Spesifik Gravitasi pipa  $SG = W/B = W_s/B + 1$  (Persamaan 2.26)

**Tabel 2.2** Grain size untuk seabed material (DNV RP E 305)

Seabed	Grain Size d50 (mm)	Roughness zo (m)
Silt	0.0625	5.21E-06
Very Fine Sand	0.125	1.04E-05
Fine Sand	0.25	2.08E-05
Medium Sand	0.5	4.17E-05
Coarse Sand	1	8.33E-05
Very Coarse Sand	2	1.67E-04
Gravel	4	3.33E-04
Pebble	10	8.33E-04
	25	2.08E-03
	50	4.17E-03
Cobble	100	8.33E-03
	250	2.08E-02
Boulder	500	4.17E-02

Grain size (d50) dan kekerasan seabed (Zo) dideterminasikan pada tabel 2.2

### 2.5.3 Gaya Hidrodinamis

Ketika menggunakan faktor kalibrasi  $F_w$  untuk mengkalkulasi  $W_{sub}$  gaya hidrodinamis pada pipa dapat diuraikan sebagai berikut

Gaya drag  $F_D = \frac{1}{2} C_D \rho |U_n| U_n D$  (Persamaan 2.27)

Gaya Inersia  $F_I = C_M \rho \pi D^2 \dot{U}_n / 4$  (Persamaan 2.28)

Gaya angkat  $F_L = \frac{1}{2} C_L \rho U_n^2 D$  (Persamaan 2.29)

dimana  $|U_n| = \sqrt{(U_n^2 + V_n^2)}$  (Persamaan 2.30)

Keterangan :

D : Total keseluruhan diameter luar

$\rho$  : *Density* air laut

$C_L$  : 0,9. koefisien gaya angkat

$C_D$  : 0,7 . Koefisien gaya drag

$C_M$  : 3,29 . Koefisien gaya inersia

$U_n$  : Kecepatan *horizontal* partikel air

$V_n$  : Kecepatan *vertical* partikel air

$\dot{U}_N$  : Percepatan horizontal partikel air

## 2.6 Scouring

*Scouring* adalah pergerakan dari tanah dasar laut yang disebabkan arus dan gelombang dimana prosesnya sama dengan erosi. *Scouring* merupakan fenomena alam yang disebabkan oleh aliran air laut. Peristiwa ini terjadi pada material lumpur atau endapan, namun dapat juga terjadi pada batu dan karang dengan kondisi tertentu. Sedangkan menurut Sumer & Fredsoe (2002) dalam bukunya yang berjudul *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*, *scouring* adalah proses penggerusan atau pengikisan tanah di bawah struktur silinder bawah laut (pipa atau kabel) akibat fluktuasi tekanan dan kecepatan aliran fluida. Sebelum menghitung berapa besar nilai scour yang terjadi, kita harus menghitung tekanan hidrostatiknya dan stabilitas tanah.

### 2.6.1 Berat Vertikal Air

Berat vertikal air atau biasa dikenal sebagai tekanan hidrostatik adalah tekanan yang terjadi di bawah air. Tekanan ini terjadi karena adanya berat air yang membuat cairan tersebut mengeluarkan tekanan. Tekanan sebuah cairan bergantung pada kedalaman cairan di dalam sebuah ruang dan gravitasi juga menentukan tekanan air tersebut. Hubungan ini dirumuskan sebagai berikut :

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad \text{(Persamaan 2.31)}$$

dimana  $\rho$  adalah masa jenis cairan,  $g$  ( 9,81 m/s) adalah gravitasi, dan  $h$  adalah kedalaman.  $h$  dihitung dari permukaan air menuju ke kedalaman benda.

### 2.6.2 Stabilitas Tanah

Kekuatan geser tanah (soil shear strength) dapat didefinisikan sebagai kemampuan maksimum tanah untuk bertahan terhadap usaha perubahan bentuk pada kondisi tekanan (pressure) dan kelembapan tertentu. Kekuatan geser tanah dapat diukur di lapangan maupun di laboratorium. Pengukuran di lapangan antara lain menggunakan vane-shear, plate load, dan test penetrasi. Pengukuran di laboratorium meliputi penggunaan miniatur vane shear, direct shear, triaxial compression, dan unconfined compression dan fall-cone soil shear strength.

Data kekuatan geser tanah, pada awalnya hanya digunakan untuk keperluan teknik bangunan dalam mengevaluasi kemampuan tanah menopang konstruksi bangunan, seperti gedung dan bendungan.

### 2.6.2.1 Konsep Kekuatan Geser tanah

Coulomb pada tahun 1776 memperkenalkan teori geser maksimum, yaitu bahwa keruntuhan, nilai tekanan pada saat terjadinya perubahan bentuk tetap, terjadi jika tekanan geser yang diberikan mencapai nilai kritis dari kemampuan tanah. Teori ini kemudian disempurnakan oleh Mohr, sehingga kemudian dikenal dengan hukum Mohr-Coulomb. Hukum Mohr-Coulomb menyatakan bahwa kekuatan geser tanah,  $\tau$ , mempunyai hubungan fungsional dengan kohesi tanah,  $c$ , dan friksi antar partikel yang dikemukakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (\text{Persamaan 2.32})$$

dimana:

- $\tau$  = kekuatan geser (kPa) yang dibutuhkan sehingga keruntuhan terjadi
- $c$  = adalah kohesi tanah (kPa)
- $\sigma_n$  = adalah tekanan normal (normal stress; kPa) tegak lurus bidang
- $\phi$  = sudut friksi internal partikel (derajat).

Dari persamaan tersebut dapat dikemukakan bahwa  $\tau$  akan sama dengan  $c$  jika tidak ada tekanan normal (normal stress,  $\sigma_n$ ) yang diaplikasikan terhadap bidang keruntuhan. Pada tanah yang tidak kohesif seperti pasir, maka nilai  $\tau$  akan sama dengan nilai  $\sigma_n$ . Percikan partikel tanah dan kekuatan tanah dapat didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S = a + b \text{ KE}/\tau \quad (\text{Persamaan 2.33})$$

dimana :

- $S$  = percikan partikel tanah (mg drop-1)
- $\text{KE}$  = energi kinetik (J drop-1);
- $\tau$  = kekuatan geser tanah
- $a/b$  = konstanta

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa erosi ditentukan oleh kekuatan geser tanah. setelah mengetahui berapa besaran dari nilai stabilitas tanah langkah selanjutnya adalah perhitungan nilai *Scouring*.

Formula untuk menghitung kedalaman scouring pada pipa bawah laut memiliki variasi dimana tiap variasi digunakan tergantung pada penyebab dari scouring tersebut. Sumer & Fredsoe (2002) dalam bukunya yang berjudul *The Mechanics of Scour in the Marine Environment* membagi formula kedalaman scouring menjadi beberapa jenis yaitu :

### 2.6.1 Kedalaman Scouring Pada Steady Currents

Banyak ahli secara ekstensif mempelajari kedalaman scouring pada steady currents. Kjeldsen (1973) adalah orang yang pertama kali menemukan formula hubungan empirik antara kedalaman scouring  $S$ , diameter pipa  $D$ , dan kecepatan arus efektif yang bekerja pada pipa  $V$ .

$$d_s = 0,972 \left[ \frac{v_{et}^2}{2g} \right]^{u.z} \cdot D^{0.8} \quad (\text{Persamaan 2.34})$$

Dimana :

$d_s$  = Kedalaman scouring (m)

$V_{et}$  = Kecepatan arus efektif yang bekerja pada pipa (m/s)

$D$  = Diameter pipa (m)

$G$  = Percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

Persamaan tersebut digunakan untuk menghitung nilai kedalaman scouring pada kondisi arus steady

### 2.6.2 Kedalaman Scouring Akibat Kombinasi Gelombang dan Arus

Persamaan perhitungan kedalaman scouring telah banyak diteliti oleh beberapa peneliti seperti Bernetti (1990) dan Summer an Fredsoe (1996) pada kasus ini *scouring* dipengaruhi oleh dua hal, yaitu gelombang dan arus. Karena gelombang laut ikut mempengaruhi proses terjadinya *scouring* maka nilai *Keulegan Carpenter Number*,  $K_o$  menjadi sangat penting dalam kasus ini.

Summer and Fradsoe (1996) pada penelitiannya menjelaskan bahwa besar dan kecilnya nilai kedalaman *scouring* tergantung pada nilai *Keulegan – carpenter Number*,  $K_o$  dan nilai  $U_c/U_c+U_m$ . Dimana  $U_c$  adalah undisturbed current velocity pada titik tengah pipa,  $u_m$  adalah kecepatan orbital partikel gelombang

Dari penelitian yang dilakukan oleh Summer and Fredsoe (1996) dihasilkan persamaan untuk menghitung kedalaman scouring akibat kombinasi gelombang dan arus sebagai berikut

$$\frac{ds}{D} = \frac{ds_{cur}}{D} F \quad (\text{Persamaan 2.35})$$

Dimana  $ds_{cur}$  adalah kedalaman *scouring* pada kondisi gaya penyebab scouring adalah gaya arus saja sedangkan F adalah fungsi dari Keulegan – Carpenter number,  $Kc$  dan  $U_c/U_c+U_m$ . Hubungan ketiga variabel tersebut dapat dilihat pada persamaan dibawah ini

1. Untuk  $0, U_c/U_c+U_m \leq 0.7$

$$F = \frac{5}{3}(Kc)^a \exp(2.3b) \quad (\text{Persamaan 2.36})$$

2. Untuk  $0.7, U_c/U_c+U_m \leq 1$

$$F = 1 \quad (\text{Persamaan 2.37})$$

Koefisien a dan b pada persamaan tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

1. Untuk  $0 \leq U_c/U_c+U_m \leq 0.4$  :

$$a = 0.557 - 0.912 (U_c/U_c + U_m - 0.25)^2 \quad (\text{Persamaan 2.38})$$

$$b = -1,14 + 2,24 (U_c/U_c + U_m - 0.25)^2 \quad (\text{Persamaan 2.39})$$

2. Untuk  $0.4 \leq U_c/U_c+U_m \leq 0,7$

$$a = -2,14 U_c/U_c + U_m + 1.46 \quad (\text{Persamaan 2.40})$$

$$b = 3,3 U_c/U_c + U_m - 2,5 \quad (\text{Persamaan 2.41})$$

## 2.7 Lebar Scouring

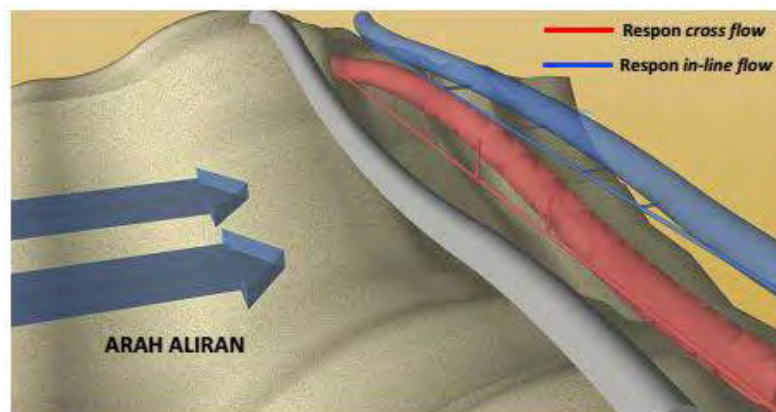
Sumer and Fredsoe (1990) telah mempelajari lebar span yang terjadi akibat scouring, dari percobaannya tersebut didapat formula empiric sebagai berikut

$$\frac{W}{D} = 0,35KC^{0,65} \quad (\text{Persamaan 2.42})$$

Dimana W adalah lebar yang dihitung dari tengah pipa sampai akhir lubang scour

## 2.8 Analisis *Free Span* Dinamik Pipa Bawah Laut

Telah dijelaskan sebelumnya, respon pipa pada suatu sistem *free span* dinamik diklasifikasikan menjadi dua jenis; yaitu dalam arah *in-line* (searah aliran) dan arah *cross-flow* (tegak lurus aliran) yang diperlihatkan pada gambar 25. Respon dinamik yang terjadi pada suatu *free span* adalah osilasi dalam dua arah tersebut. Osilasi ini terjadi akibat adanya resonansi *vortex shedding* yang terbentuk di sekitar pipa. *Vortex shedding* ini menyebabkan perubahan tekanan secara periodik pada sekitar pipa, sehingga pipa berosilasi, dengan terangkat atau bergeser dan kembali ke posisi awalnya. Fenomena ini dinamakan *Vortex Induced Vibration* (VIV).



**Gambar 2.7** Sketsa Kategori Respon *Free Span* Dinamik (Pratama, 2007)

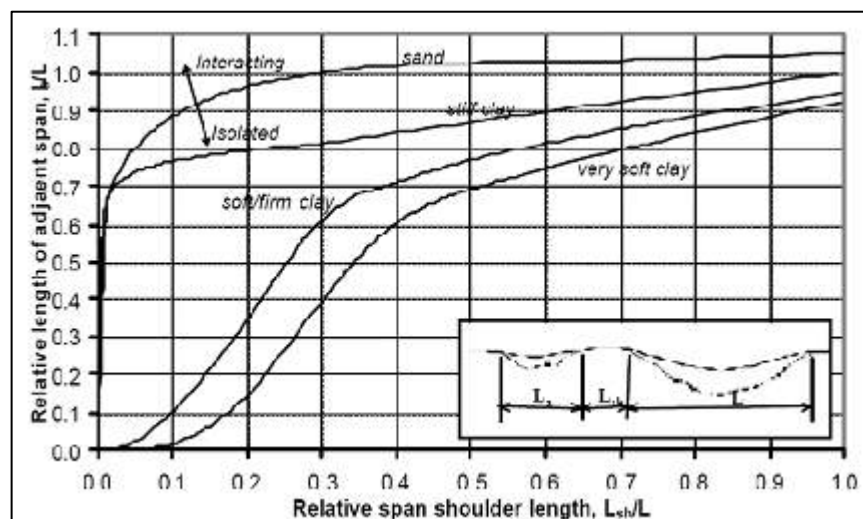
Dalam analisis dinamis untuk *free span*, berdasarkan DNV-RP-F105 tahun 2002 mengenai *Free Spanning Pipelines*, terdapat beberapa parameter yang harus diperhatikan, yaitu sebagai berikut :

a. Klasifikasi morfologi *seabed*

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

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

Klasifikasi morfologi ini harus ditentukan secara umum berdasarkan analisis statik dan dinamik. Gambar 2.15 dibawah ini mengklasifikasikan span dari jenis tanah *seabednya*.



**Gambar 2.8** Klasifikasi Morfologi Interaksi Free Span (DNV-RP-F105, 2002)

Untuk analisis yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini, digunakan asumsi bahwa hanya satu *span* tunggal yang akan dilakukan analisis.



b. Klasifikasi respon pipa pada *free span*

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

**Tabel 2.3** Klasifikasi Respon *Free Span* (DNV-RP-F105, 2002)

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

*Freespan* yang merupakan bentangan yang terjadi antara *pipeline* dengan seabed dipengaruhi gelombang dan arus laut, dimana akan menimbulkan beban dan getaran yang cukup besar pada pipa. Getaran yang terjadi dinamakan *Vortex Induced Vibration* (VIV) dikarenakan adanya *vortex* di sekitar pipa serta beban lingkungan lain. Getaran itu sendiri juga dibedakan menjadi 2 yaitu *inline* dan *crossflow*. *Inline* adalah getaran yang arahnya searah dengan aliran fluida saat melewati *pipeline*, dan *crossflow* adalah getaran yang terjadi saat arahnya tegak lurus dengan aliran fluida. Dalam buku Guo (2005), menuliskan bahwa parameter penting dalam analisa pergerakan akibat *vortex* adalah parameter kestabilan atau  $K_s$ , dimana bertujuan untuk menentukan maksimal beban hidrodinamis, yang dirumuskan :

$$K_s = 4 \pi \zeta_t M_{\text{eff}} / \rho_{\text{sw}} D^2 \quad (\text{Persamaan 2.43})$$

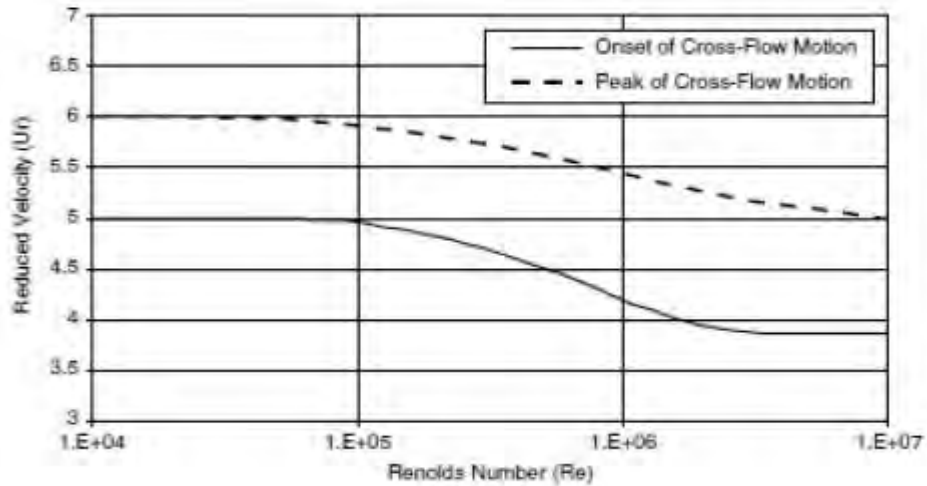
Dengan :

$K_s$  : parameter stabilitas

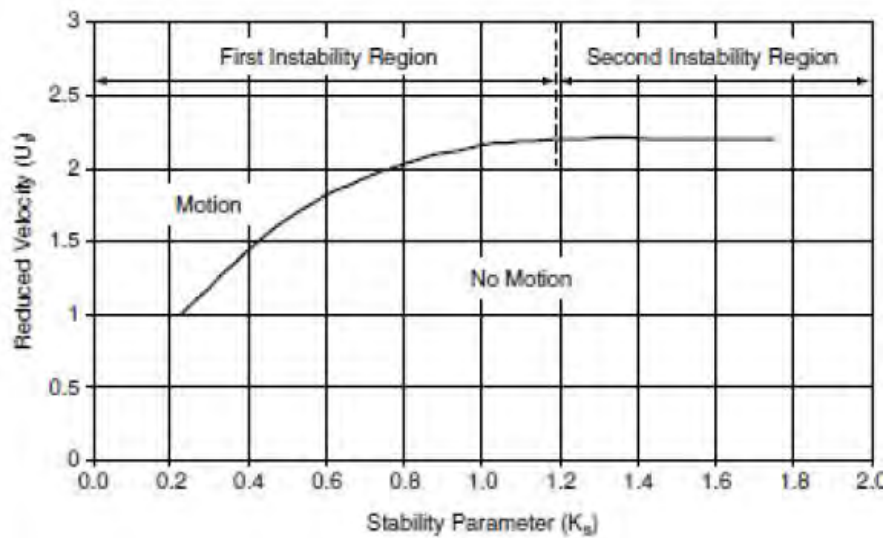
$\zeta_t$  : total damping ratio (0.015)

$M_{\text{eff}}$  : massa efektif pipa (kg/m)

Selain itu untuk mendapatkan *reduced velocity* ( $U_r$ ) dapat menggunakan nilai ( $Re$ ) untuk osilasi *crossflow*, serta nilai ( $K_s$ ) untuk menentukan *reduced velocity* ( $U_r$ ) untuk osilasi *inline* seperti pada gambar grafik 2.5 dan gambar 2.6.



**Gambar 2.9** Reduced Velocity for Crossflow Oscillation (Guo, 2005)



**Gambar 2.10** Reduced Velocity for Inline Oscillations (Guo, 2005)

Pada grafik diatas ada nilai Reynold dimana merupakan parameter tidak berdimensi yang merasiokan antara gaya inersia dengan gaya *viscous*.

### 2.8.1 Frekuensi Natural dan Panjang Bentangan Maksimum

Frekuensi natural pipa adalah getaran yang ditimbulkan akibat beban disekitar pipa, seperti kekakuan pipa, kondisi ujung span, dan massa efektif pipa, serta arah gaya atau beban yang dikenai oleh pipa baik arah vertikal ataupun horizontal. Saat frekuensi *vortex shedding* sebesar 1/3 dari frekuensi natural maka pipa akan mulai untuk berosilasi. Maka dari itu dalam mendesain pipa, *vortex shedding* harus lebih kecil dari pada 0.7 frekuensi naturalnya agar tidak terjadi osilasi, karena jika terjadi osilasi maka akan menyebabkan bertambahnya tegangan yang terjadi dan membuat kegagalan pada pipa. Sehingga dapat dirumuskan (DNV RP F105, 2002) :

$$f_n = C_1 \sqrt{1 + CSF} \sqrt{\frac{EI}{W_{eff} \times L^4} + (C_3 (\delta/D)^2)} \quad (\text{Persamaan 2.44})$$

$$CSF = K_c \times \left( \frac{E_c I_c}{E_{pipa} I_{pipa}} \right)^{0.75} \quad (\text{Persamaan 2.45})$$

$$K_c = U^* \left( \frac{2\pi}{T} \right) D t o t \quad (\text{Persamaan 2.46})$$

$$P_{cr} = (1 + CSF) \left( \frac{C_2 \pi^2 EI}{L^2} \right) \quad (\text{Persamaan 2.47})$$

$$\delta = C_6 \left( \frac{q L^4}{EI (1 + CSF)} \right) \quad (\text{Persamaan 2.48})$$

Keterangan :

$C_1, C_3$  = koefisien jenis tumpuan

$K_c$  = parameter deformasi *coating concrete*

$f_n$  = frekuensi natural pipa (Hz)

$CSF$  = faktor kekakuan *concrete*

$q$  = beban arah vertikal atau horizontal (N/m)

$P_{cr}$  = *critical buckling euler* (N/m)

$L$  = panjang *span* aktual (m)

$\delta$  = defleksi statis (m)

$E_{pipa}$  = modulus young struktur pipa (Mpa)

$I_{pipa}$  = momen inersia struktur pipa (m<sup>4</sup>)

$E_c$  = modulus young concrete (Mpa)

$I_c$  = momen inersia concrete (m<sup>4</sup>)

**Tabel 2.4** Koefisien Boundary Condition (DNV OS F 101, 2012)

	Pinned – Pinned	Fixed – Fixed	Single span on seabed
C1	1.57	3.56	3.56
C2	1	4	4
C3	0.8	0.2	0.4
C4	4.93	14.1	8.6
C5	1/8	1/12	1/24
C6	5/384	1/384	1/384

Menurut Guo (2005) panjang span maksimum atau *allowable span* adalah :

$$L_{max} = \sqrt{\frac{(1.57 U_r D_{tot})}{V * 2\pi}} \sqrt{\frac{E_{pipa} I_{pipa}}{W_{eff}}} \quad (\text{Persamaan 2. 49})$$

Keterangan :

$E_{pipa}$  = modulus Young pipa

$I_{pipa}$  = momen inersia pipa

$U_r$  = *reduced velocity*

### 2.8.2 Tegangan Pada pipa

Saat pipa beroperasi maka ada beberapa tegangan yang terjadi di sekitar pipa dan dapat membuat pipa kehilangan kekuatannya, pada ASME B31.4 2002 telah memberikan beberapa aturan terkait presentase izin nilai tegangan terhadap SMYS suatu material yang di pakai di pipa tersebut. Seperti :

**Tabel 2.5** Tegangan pada pipa (ASME B31.4 2002)

Design Condition	Hoop Stress	Longitudinal Stress	Combined Stress
Operasi	72 % SMYS	80 % SMYS	90 % SMYS
Hydrotest	90 % SMYS	-	96 % SMYS
Installasi	72 % SMYS	80 % SMYS	90 % SMYS

## 1. Tegangan Hoop

Merupakan tegangan yang terjadi akibat aliran fluida pada dalam pipa, dimana aliran tersebut memberikan tekanan kepada dinding pipa, dengan demikian akan terjadi tegangan pada pipa, seperti di rumuskan sebagai :

$$\sigma_h = \frac{(P_i - P_e)D}{2 t_{tot}} \quad (\text{Persamaan 2.50})$$

Keterangan :

$\sigma_h$  : *hoop stress* (Pa)

$P_i$  : tekanan internal (Pa)

$P_e$  : tekanan eksternal (Pa)

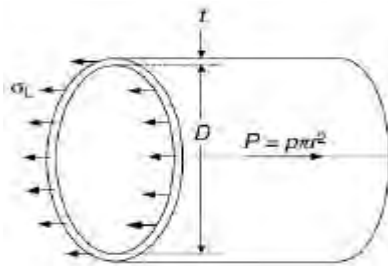
$t_{tot}$  : tebal total pipa (m)



**Gambar 2.11** Tegangan hoop pada pipa (Guo, 2005)

## 2. Tegangan Longitudinal

Merupakan tegangan aksial yang dialami oleh dinding pipa. Maka dari itu, *longitudinal stress* dipengaruhi dua tegangan yang terjadi pada pipa yaitu tegangan akibat termal dan tegangan pengaruh *poisson ratio*. Sehingga menimbulkan persamaan yang dirumuskan sebagai :



**Gambar 2.12** Tegangan longitudinal (Guo, 2005)

$$\sigma_L = \nu \sigma_h - E\alpha (T_2 - T_1) \quad (\text{Persamaan 2.51})$$

Keterangan :

$\sigma_L$  : *Longitudinal stress*

E : *modulus young* (MPa)

$\alpha$  : koefisien thermal ( $11,7E^{-6}$ )

$T_2$  : suhu saat operasi ( $^{\circ}\text{F}$ )

$T_1$  : suhu saat desain ( $^{\circ}\text{F}$ )

$\nu$  : *poisson ratio* (0,3)

### 3. Tegangan Ekivalen von Mises

Tegangan yang bekerja pada pipa secara menyeluruh dimana merupakan kombinasi dari tegangan hoop dan tegangan longitudinal.

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2} - (\sigma_h - \sigma_L) \quad (\text{Persamaan 2.52})$$

Keterangan :

$\sigma_L$  : *Longitudinal stress* (Pa)

$\sigma_h$  : *hoop stress* (Pa)

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Tugas akhir ini berupa penelitian *sengaruh kekasaran tanah pada laju scouring* pada *offshore pipeline*. Adapun metodologi dari langkah-langkah untuk pengerjaan dan penyelesaian tugas akhir ini dijelaskan dalam diagram alir sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi dan pengumpulan literature sebagai bahan – bahan acuan dan sumber teori teori yang diperlukan dalam Tugas Akhir kali ini.

2. Pengumpulan data

Data data yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini meliputi data desain pipeline (property pipa ) milik Kodeco Energy Co.Ltd

3. Data Lingkungan

Data kondisi lingkungan yang akan dianalisa. Data ini mencakup

- Data tanah meliputi tingkat kekasaran tanah, dan spesifik *gravity*
- Data Gelombang
- Peta bathimetri

4. Pengolahan Data

Dari data yang diperoleh dilakukan perhitungan sehingga data tersebut dapat digunakan dalam formulasi yang ditentukan dalam analisa.

Perhitungan meliputi :

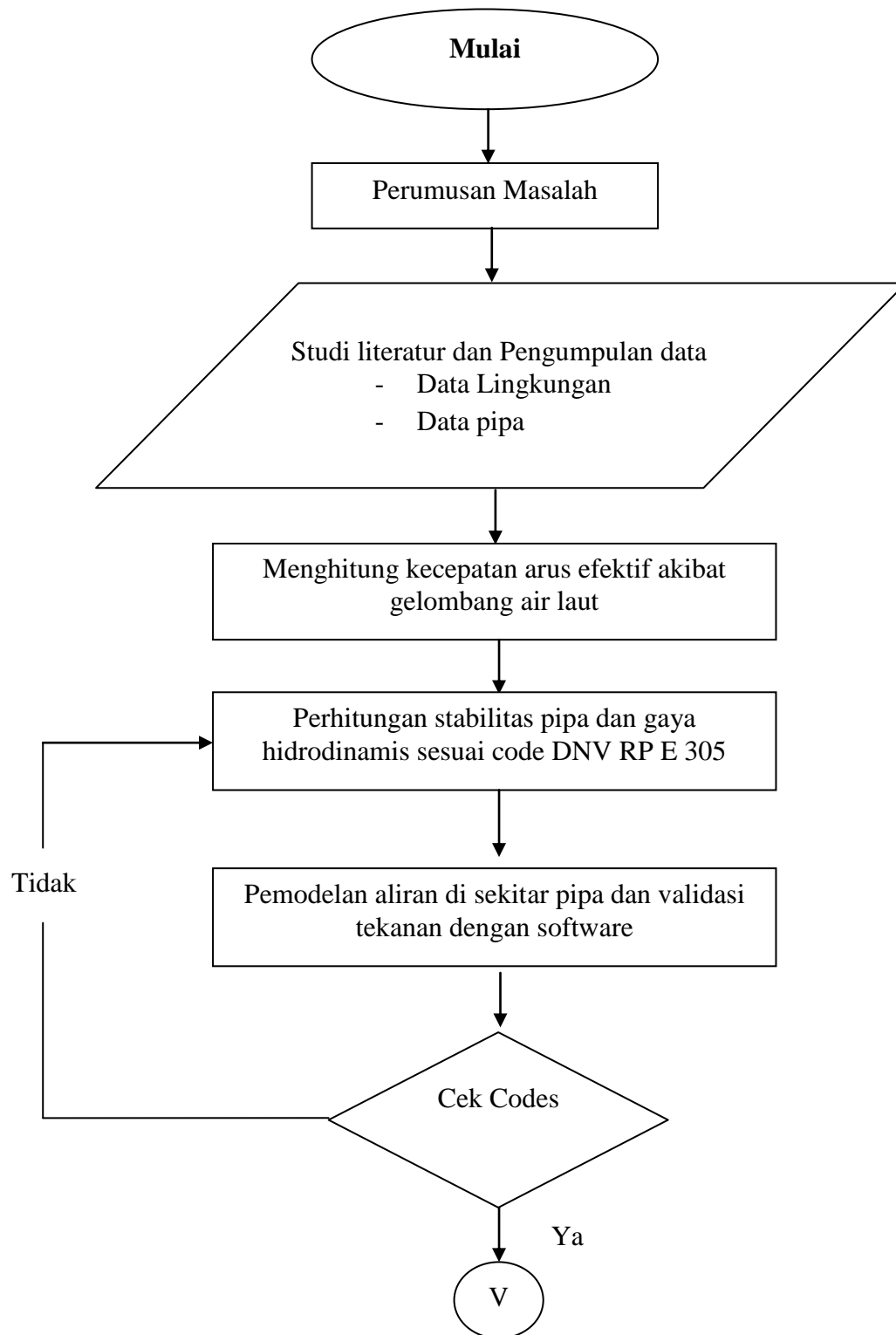
- Kecepatan arus efektif yang bekerja
- Kedalaman scouring maksimum
- Analisa dan simulasi aliran di sekitar pipeline
- Perhitungan panjang span maksimum
- Perhitungan defleksi statis dan perhitungan tegangan

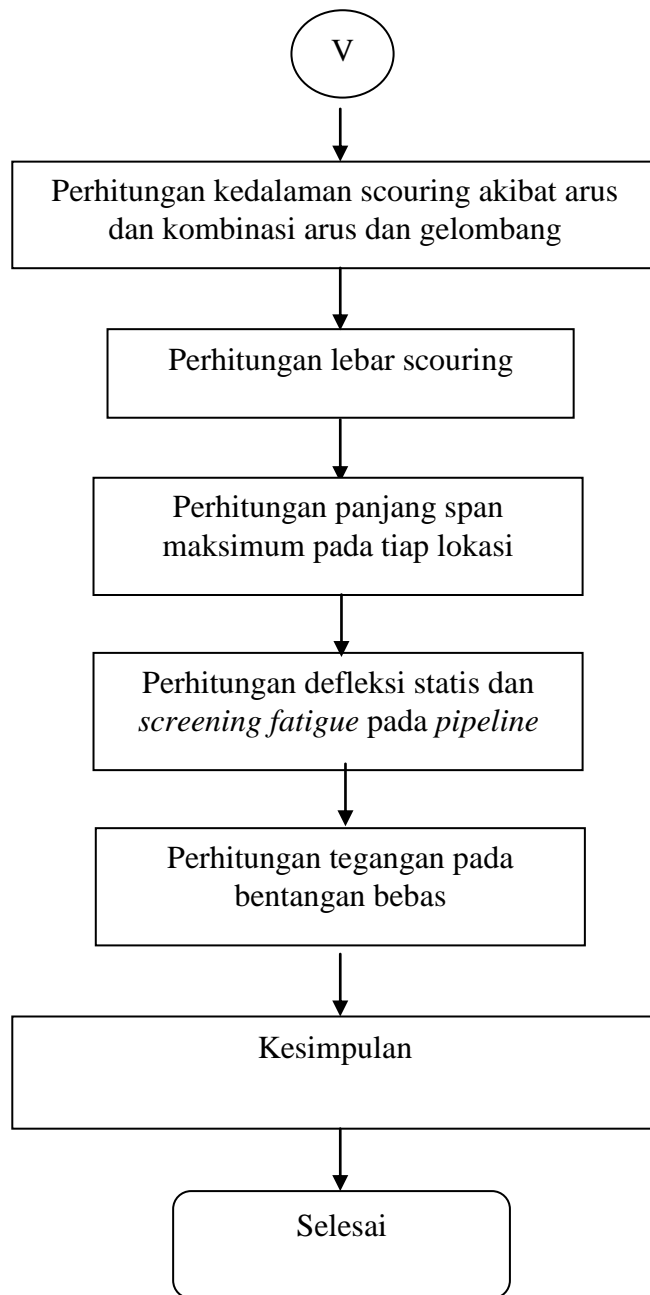
5. Kesimpulan dan Saran

Setelah dilakukan analisa dan perhitungan, kemudian langkah selanjutnya adalah menarik kesimpulan atas analisa yang telah dilakukan



### 3.1 Alur diagram Pelaksanaan Tugas Akhir





**Gambar 3.1** Diagram Alir pengerjaan Tugas Akhir

### 3.2 Prosedur Tugas Akhir

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini ada beberapa langkah yang sudah dibuat seperti diagram diatas, berikut penjabaran diagram :

1. Studi Literatur.

Dalam studi literature ini dapat digunakan panduan seperti buku, jurnal nasional maupun internasional yang berbasis penelitian, *standard* serta beberapa tugas akhir, maupun thesis yang sudah pernah ada sebelumnya. Studi ini bertujuan untuk mendasari hal yang terkait dalam tugas akhir ini seperti pembahasan *pipeline*, *scouring*, *freespan*, *vortex induced vibration*, *natural frequency*. *Rules* yang dipakai dalam tugas akhir ini adalah DNV (*Det Norske Veritas*) seperti DNV OS F101 untuk *pipeline*, DNV RP F105 untuk *freespan*, DNV RP E 305 untuk *stability*.

2. Pengumpulan data material dan lingkungan.

Setelah studi literatur dilanjutkan dengan pengumpulan data, dimana data material serta data lingkungan yang didapat merupakan data lapangan yang sudah diukur, jadi tinggal melakukan perhitungan. Data yang didapat berlokasi di daerah selat Madura.

3. Perhitungan stabilitas pipa dan gaya hidrodinamis.

Pada tahap ini akan diperhitungkan stabilitas pipa akibat dari beban lingkungan yang terjadi dilokasi tempat pipa dioperasikan sesuai dengan aturan yang diterapkan oleh DNV RP E 305 dan DNV RP F105. Stabilitas tersebut mencakup aspek tentang berat pipa terendam, gaya hidrodinamis. Bertujuan untuk melihat apakah pipa berada dalam kondisi stabil dan siap untuk dianalisa lebih lanjut.

#### 4. Perhitungan kedalaman scour dan lebar scour

Perhitungan kedalaman *scour* dan lebar *scour* berdasarkan formulasi Sumer and Fredsoe (2002). Pada langkah ini adalah dilakukan kalkulasi kedalaman scour yang diakibatkan oleh kecepatan arus dan kedalaman scour yang diakibatkan oleh gabungan kecepatan arus dan gelombang. Pada perhitungan lebar *scour*, nilai keulegen carpenter number memegang peranan penting.

#### 5. Perhitungan panjang span aktual

Perhitungan panjang aktual berdasarkan kontur batimetri yang didapatkan pada pengumpulan data. Perhitungan untuk panjang maksimum menggunakan perumusan dari buku Guo. Jika panjang span aktual melebihi dari panjang span yang diijinkan atau *allowable span*, maka mitigasi harus dilakukan.

#### 6. Perhitungan defleksi statis.

Perhitungan defleksi akan diperhitungkan akibat dari panjang span pada pipeline yang menahan beban lingkungan. Dengan demikian akan mendapatkan nilai dari defleksi statis yang terjadi, serta beban maksimal yang dapat diterima suatu span. Selain itu juga menghitung terkait frekuensi natural pipa serta frekuensi *vortex shedding*, dimana akan menunjukkan apakah pipa beresilasi atau tidak.

#### 7. Perhitungan tegangan akibat bentangan bebas.

Memperhitungkan tegangan yang terjadi pada saat kondisi pipa beroperasi, baik dari pengaruh fluida didalam pipa maupun diluar pipa.

#### 8. Kesimpulan dan saran

Dengan menggunakan support maka mitigasi untuk masalah yang ada dapat dikendalikan, namun perlu juga mitigasi lebih lanjut.

### 3.3 Pengumpulan Data

Pipa lepas pantai KODECO Energy Co.Ltd. yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah pipa transmisi dari PP Platform di perairan Madura menuju Gresik Onshore Receiving Facility (ORF). Jalur pipa ini memiliki panjang sejauh 66,95 km. berikut data pipa milik KODECO Energy Co. Ltd.

**Tabel 3.1** Data Pipa secara Umum

Parameter	Nilai	Satuan
Diameter pipa, OD	16	In
Ketebalan Pipa	0.562	
Design Pressure	960	Psi
Hydrotest Pressure	1440	
Maximum Operating Pressure	850	
Mechanical Design Temperature	200	°F
Massa Jenis Gas	0.04473	lb/ft <sup>3</sup>
Kelas Material Pipa	API 5L grd X52	
SMYS	52000	Psi
SMTS\	66000	
Fluida Isi	Natural Gas	
Modulus Young	30000000	Psi
Rasio Poisson	0.3	
Massa Jenis Pipa	490	lb/ft <sup>3</sup>
Koefisien Ekspansi Termal	0.0000211	in/in °F

**Tabel 3.2** Data Arus dan gelombang

Parameter	Nilai	Satuan
HAT Storm Surge	6	ft
Max. Wave height	16	
Spectral Peak Periode	7.6	Second
Bottom Current Speed	1.9	ft/s
LAT	177.9856	ft
MSL	181.857	
HAT	185.4593	

**Tabel 3.3** Sea Water Properties

<b>Parameter</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>
Density of Sea Water	64	lb/ft <sup>3</sup>
Max. Sea Floor Temperature	84	°F
Min. Sea Floor Temperature	59	
Kinematic Viscosity	1.033x10 <sup>-5</sup>	ft <sup>2</sup> /s
Sea Water Resistivity	60	Ohm.cm

**Tabel 3.4** Sea Bed Soil Properties

<b>Parameter</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>
Soil Type Dominant	Very Soft Clay	
Undrained Shear Strength	0.55	psi
Specific Gravity	2.61	
Grain Size (d <sub>50</sub> )	0.0625	
Axial Coefficient of Friction	0.5	
Lateral Coefficient of Friction	0.3	
Seabed Resistivity	150	Ohm.cm

**Tabel 3.5** Bed Mattress Properties

<b>Parameter</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>
<i>Thickness</i>	300	mm
Dimension	2,8 x 1 x 0,3	Meter
Weight	200	kg/m <sup>2</sup>
Kinematic Viscosity	1.033x10 <sup>-5</sup>	ft <sup>2</sup> /s
Sea Water Resistivity	60	Ohm.cm

matras diletakkan setiap 40 meter

Sumber : Kodeco 2009

***(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)***

**BAB IV**  
**ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

**4.1 Analisa Data dan Lingkungan**

Sesuai data yang telah diperoleh dari Kodeco Energy Co. Ltd (2009) dilakukan perhitungan awal untuk mendapatkan nilai laju scouring yang terjadi pada lokasi pipa Kodeco. Perhitungan tersebut meliputi penentuan teori gelombang yang akan dipakai, menghitung arus efektif untuk pipa tersebut, panjang gelombang mula mula dan lain sebagainya.

**4.1.1 Perhitungan Teori gelombang**

Penentuan teori gelombang yang akan digunakan pada masing masing kilometer poin dapat ditentukan melalui grafik Region of Validity dengan terlebih dahulu menentukan nilai  $\left[\frac{H}{gt^2}\right]$  dan  $\left[\frac{d}{gt^2}\right]$  sebagai axis Y dan X. Data data yang dipakai untuk mendapatkan kedua parameter tersebut ditunjukkan pada tabel berikut :

**Tabel 4.1** Parameter gelombang 100 tahunan pada KP

Area	Kedalaman perairan , d (m)	Tinggi gelombang, h (m)	Periode Gelombang, T (s)
<b>Shallow Water (Kp 50 - KP 30)</b>	<b>11,486- 16,27</b>	<b>1,828</b>	<b>7,6</b>
<b>Intermediate Water (KP 30 - KP 20)</b>	<b>16,27- 44,211</b>	<b>1.828</b>	<b>7,6</b>
<b>Deep Water (Kp 20 - Kp 0)</b>	<b>44,211 - 59,537</b>	<b>1,828</b>	<b>7,6</b>

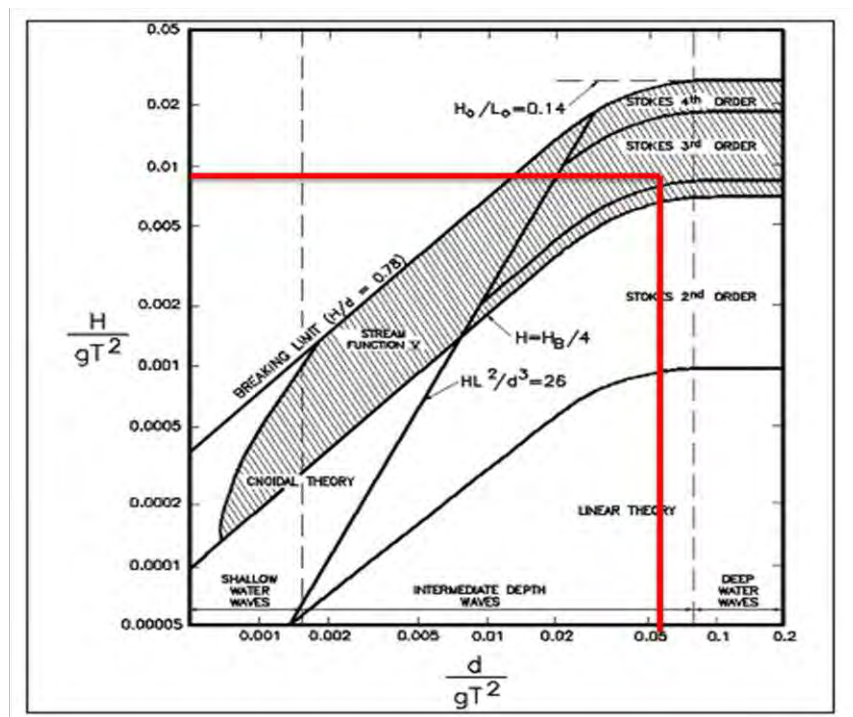
Dari data tersebut dapat digunakan untuk menghitung nilai  $\left[\frac{H}{gt^2}\right]$  dan  $\left[\frac{d}{gt^2}\right]$  Hasil perhitungan tersebut dapat dilihat dalam tabel dibawah



**Tabel 4.2** Nilai Fungsi X dan Y Dalam Diagram Region of Validity

Area	Fungsi Y	Fungsi X
Shallow Water (Kp 50 - KP 30)	0,0086	0,0565
Intermediate Water (KP 30 - KP 20)	0,0086	0,0535
Deep Water (Kp 20 - Kp 0)	0,0086	0,0503

Dari perhitungan pada tabel diatas selanjutnya dimasukkan pada grafik region of validity dibawah ini.



**Gambar 4.1** Grafik Region of Validity

Pada grafik *Region of Validity* diatas dapat diketahui bahwa teori gelombang yang digunakan adalah teori gelombang stokes orde 3.

#### 4.1.2 Menghitung Panjang Gelombang

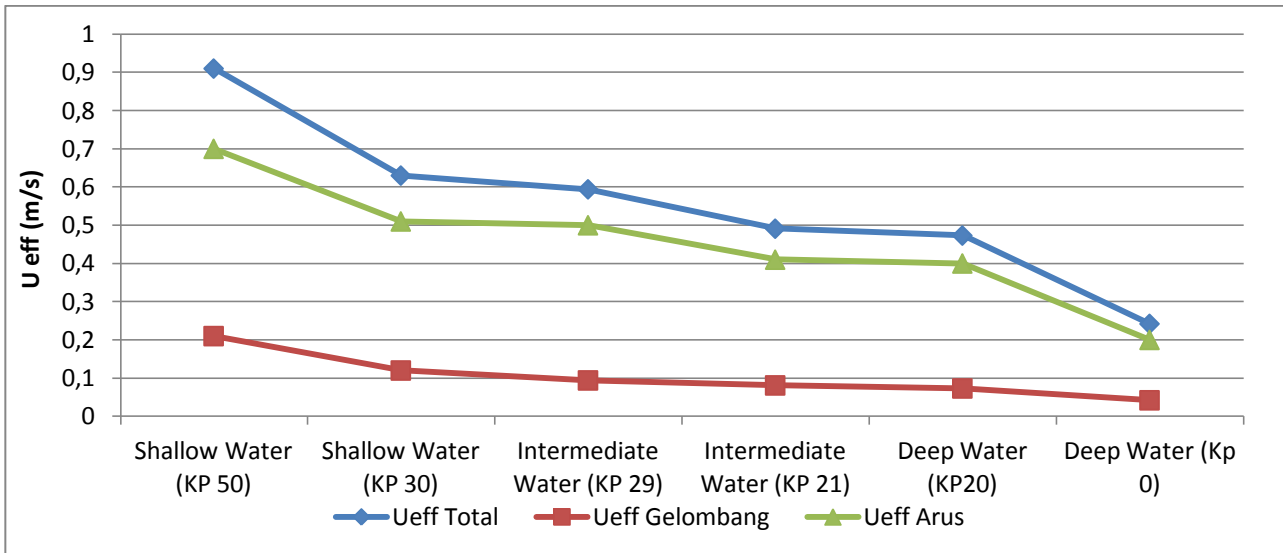
Dari data gelombang, maka panjang gelombang mula - mula dapat dihitung dengan persamaan (2.2) Setelah itu nilai L dapat digunakan untuk menghitung nilai cepat rambat gelombang. dari perhitungan panjang gelombang

**Tabel 4.3** Panjang Gelombang di Setiap Area

<b>Area</b>	<b>Panjang Gelombang (m)</b>
<b>Shallow Water (Kp 50 - KP 30)</b>	69,887 - 75,200
<b>Intermediate Water (KP 30 - KP 20)</b>	77,968 - 89,811
<b>Deep Water (Kp 20 - Kp 0)</b>	89,848 - 90,136

#### 4.1.3 Perhitungan Kecepatan Arus Efektif

Kecepatan partikel air,  $U_0$  akibat gelombang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.8) sesuai dengan teori gelombang yang yang digunakan. Perhitungan kecepatan partikel ini dilakukan pada  $0,5D$  yaitu setengah dari ukuran diameter ukuran pipa. Karena arah arus yang digunakan pada perhitungan ini tidak tegak lurus terhadap pipa maka kecepatan arus dikonversi terlebih dahulu dengan persamaan (2.9) agar didapatkan arah arus yang tegak lurus terhadap pipa. Nilai Kecepatan efektif dapat dilihat pada grafik berikut

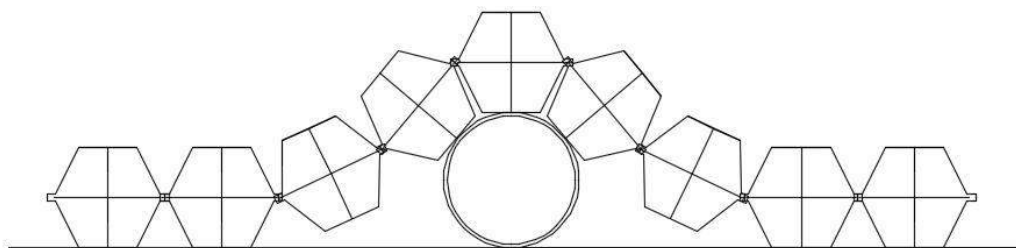


**Gambar 4.2** Nilai Kecepatan Arus Efektif

Pada grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai terbesar ada pada area *shallow water* . hal ini jelas diakibatkan karena nilai gelombang dan arus semakin dangkal perairan akan semakin besar. begitu pula sebaliknya jika semakin dalam perairan, maka semakin kecil nilai gelombang dan arus.

#### 4.2 Perhitungan Stabilitas Pipa

Menghitung berat minimum pipa terendam diperlukan untuk mencegah gerakan horisontal dari pipa bawah laut dari beban lingkungan yang ekstrim, dihitung dengan keseimbangan kekuatan statis sederhana horisontal hidrodinamik dan gaya gesek tanah. kriteria stabilitas dapat dinyatakan sebagai berikut dengan berpedoman dari DNV RP E305.

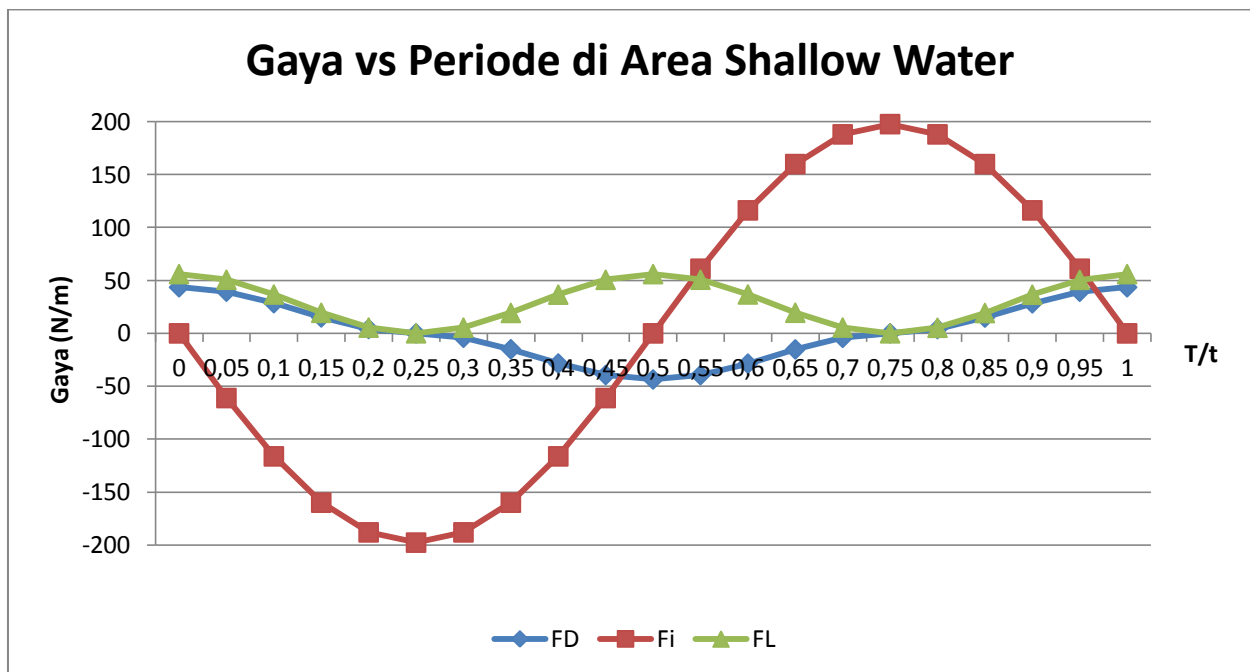


**Gambar 4.3** Layout Pipa

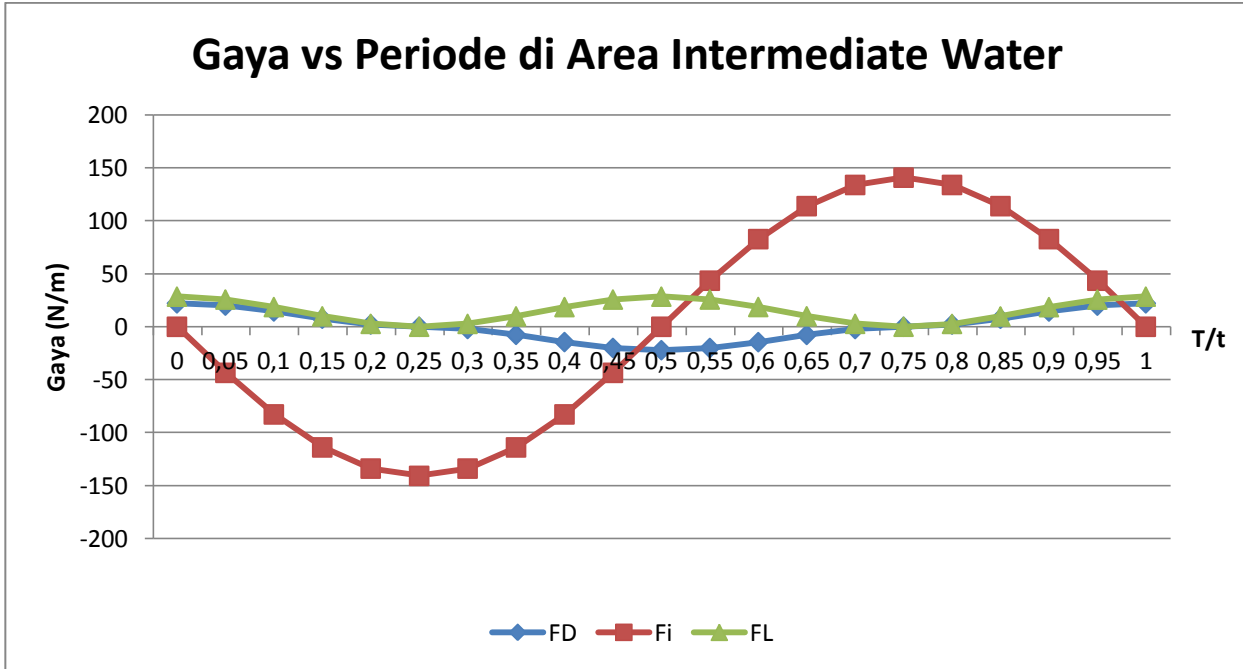
#### 4.2.1 Menghitung Gaya Gaya Yang Bekerja Pada Pipa

Sebelum mendapat berat pipa terendam terlebih dahulu menghitung gaya gaya yang bekerja dari kecepatan arus yang sudah dikalkulasi. Gaya gaya tersebut meliputi gaya drag (FD), gaya inersia (FI), gaya angkat (FL).

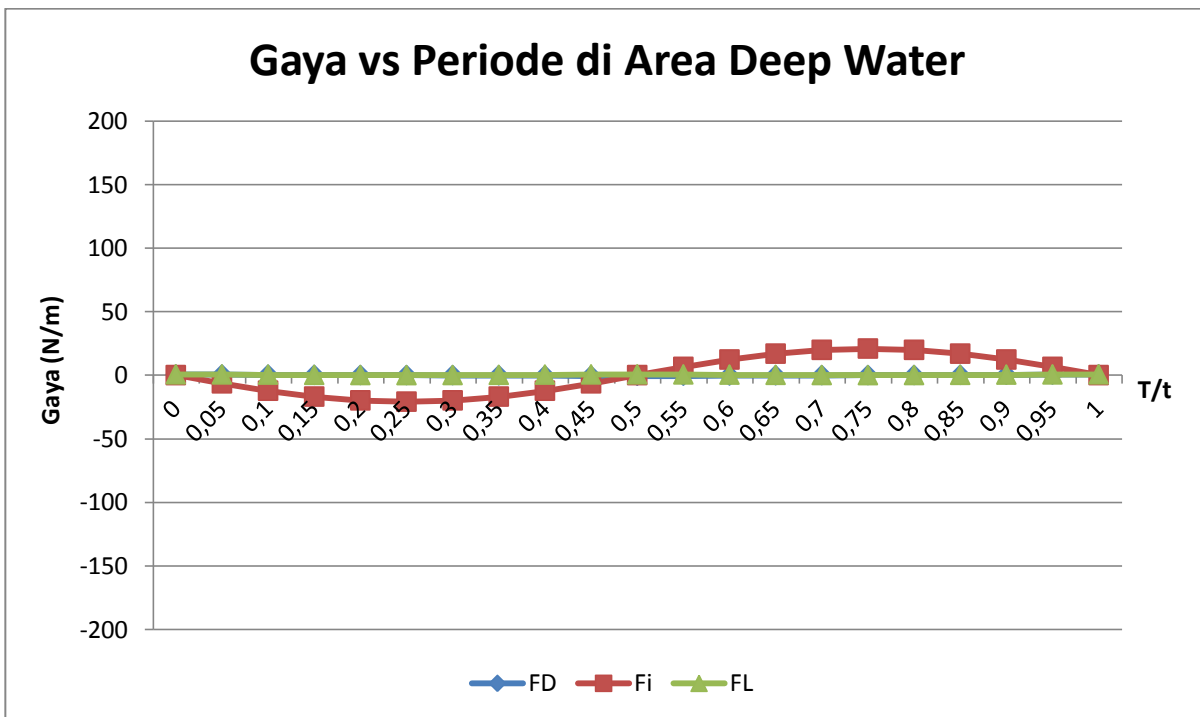
Menghitung gaya drag dengan menggunakan persamaan (2.30), setelah itu menentukan gaya inersia dengan persamaan (2.31) dan yang terakhir menentukan gaya angkat dengan menggunakan persamaan (2.32)



Gambar 4.4 Grafik Gaya yang Bekerja Pada Area Shallow Water



**Gambar 4.5** Grafik Gaya yang Bekerja Pada Area Intermediate Water



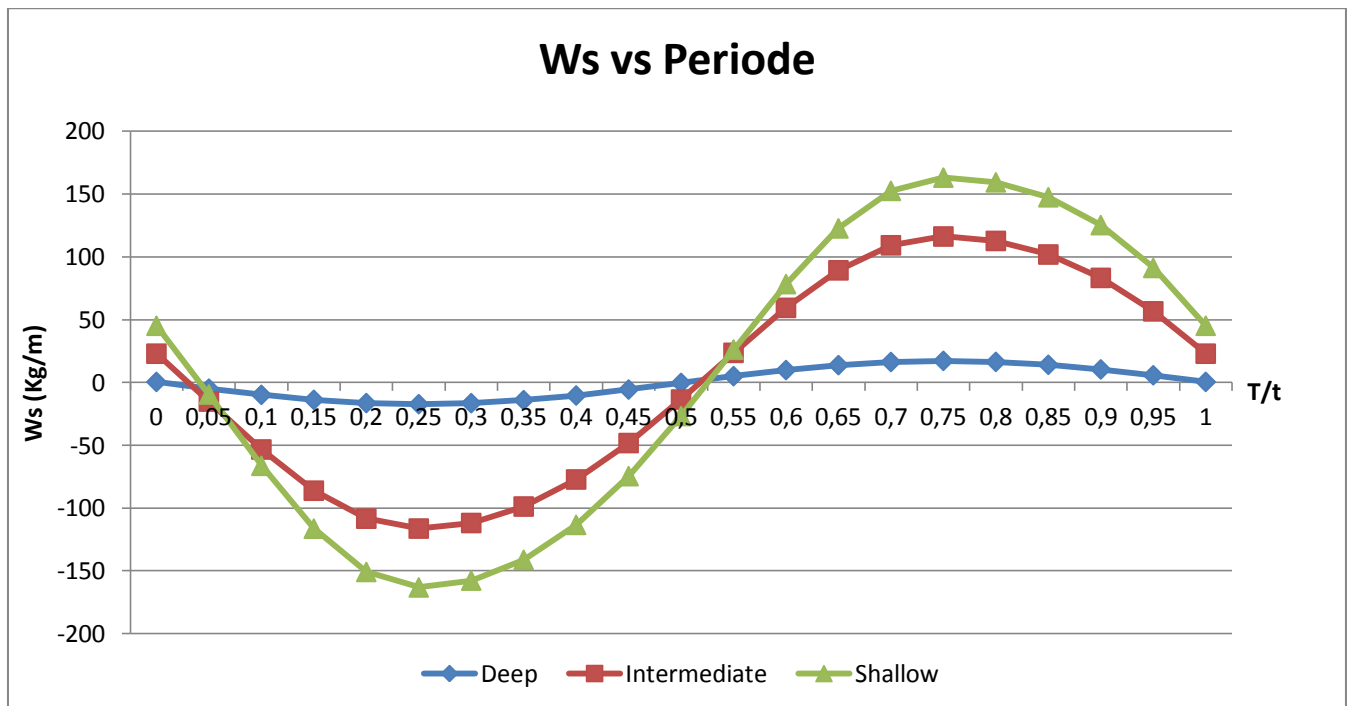
**Gambar 4.6** Grafik Gaya yang Bekerja Pada Area Deep Water

Dari ketiga grafik terlihat bahwa semakin dalam perairan semakin kecil pula gaya yang timbul pada pipa tersebut. hal ini disebabkan karena tekanan atmosfer. Apabila semakin rendah posisi suatu tempat dari permukaan laut, semakin besar tekanan atmosfernya. Sedangkan semakin tinggi posisi suatu tempat dari

permukaan laut, semakin kecil tekanan atmosfernya. Hal ini juga berbanding lurus terhadap kecepatan arus yang bekerja di sekitaran pipa. Semakin dalam letak pipa maka semakin kecil nilai kecepatan dan fungsi gaya yang bekerja pada pipa tersebut. sebaliknya jika semakin dangkal letak pipa maka akan semakin besar nilai kecepatan dan gaya yang bekerja terhadap pipa itu.

#### 4.2.2 Menghitung Berat Minimum Pipa Terendam

Setelah mengetahui nilai dari gaya gaya yang bekerja pada pipa perhitungan dilanjutkan dengan menghitung berat pipa ( $W$ ) dan berat pipa terendam ( $W_{sub}$ ). perhitungan ini adalah perhitungan stabilitas secara umum karena belum memperhitungkan berat concrete dan matrasnya.

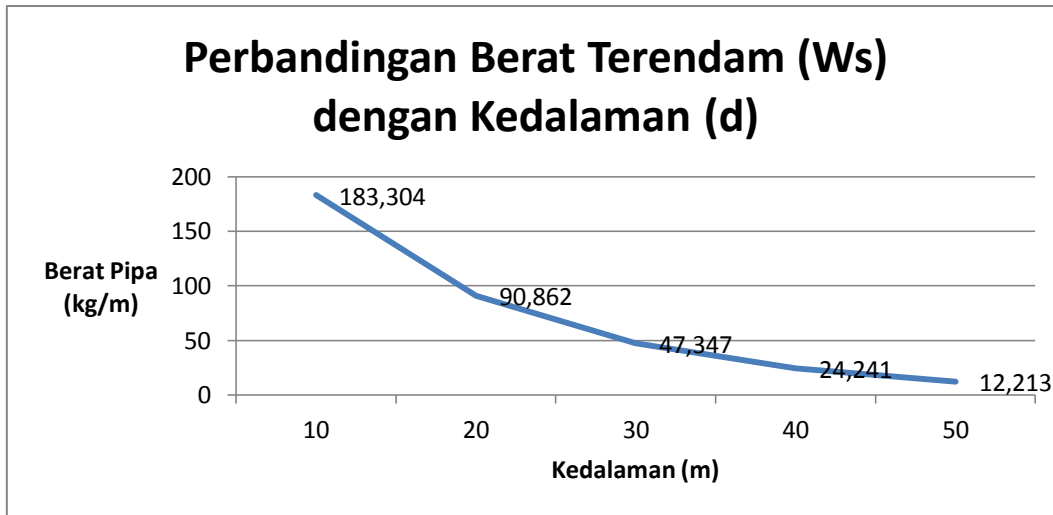


**Gambar 4.7** Grafik Berat Pipa Terendam

**Tabel 4.4** Berat Pipa Pada Masing - Masing Area

Area	Ws (Kg/m)
Shallow	183,3040036
Intermediate	116,2933276
Deep	17,24658304

Pada grafik terlihat bahwa berat pipa pada area shallow water memiliki nilai yang paling besar dari area intermediate dan area shallow water. Hal ini disebabkan karena gaya gaya yang bekerja pada area shallow water memiliki nilai yang paling besar ketimbang di area yang lain.



**Gambar 4.8** Grafik Hubungan Berat Pipa dan Kedalaman

Dari kalkulasi diatas maka dapat disimpulkan bahwa semakin dalam perairan tersebut semakin kecil pula  $W_s$  nya. hal tersebut dapat dilihat pada grafik (4.4)

#### 4.2.3 Menghitung Stabilitas Pipa Dengan Lapisannya Secara Statis

Pada tahap ini disertakan pula berat jenis penyusun pipa, density *coating*, juga matras. Perhitungan ini adalah hasil akhir ketika pipa tersebut sudah terendam di dalam air dan pada perhitungan ini dapat diketahui pula bahwa pipa tersebut stabil atau tidak.

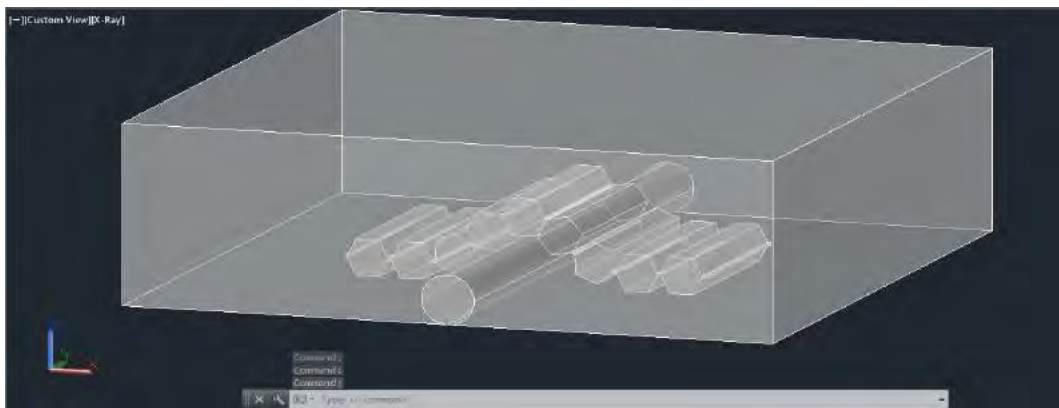
**Tabel 4.5** Perhitungan Stabilitas Secara Statis

Kondisi	D (mm)	W (kg/m)	B (kg/m)	$W_s$ (kg/m)	SG	MIN. SG
Shallow (KP 30 - KP 42)	587,40	580,68	277,77	302,92	2,09	1,1
Intermediate (KP 20 - Kp 30)	587,40	533,78	277,77	256,01	1,92	1,1
Deep (KP 0 - KP 20)	587,40	434,74	277,77	156,97	1,57	1,1

Mengacu pada tabel 4.5 pipa dapat dikatakan stabil karena syarat untuk kestabilan pipa adalah spesifik gravity yang lebih dari 1 menurut DNV RP E 305. dan pada tabel diatas semua spesifik gravity melebihi dari 1.

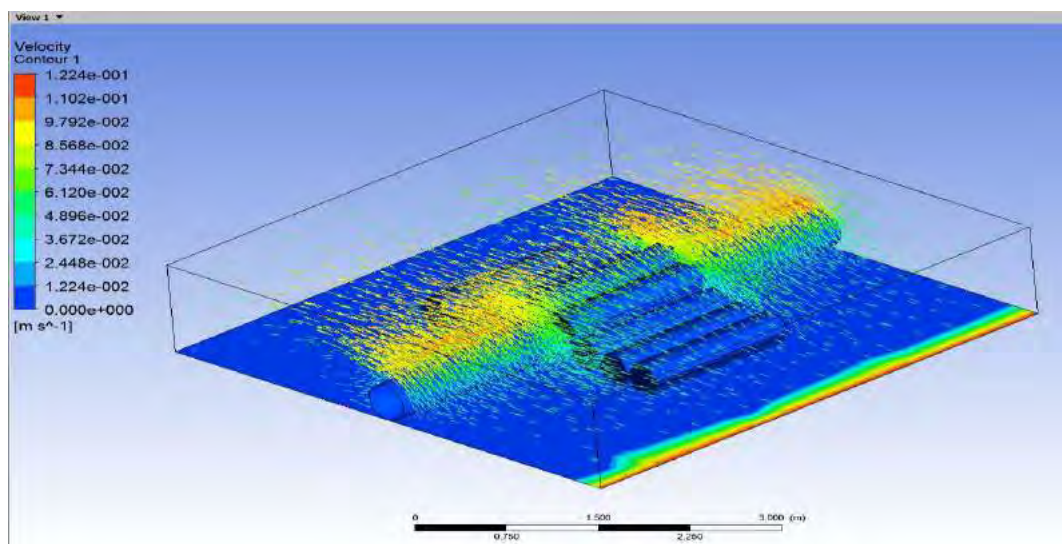
### 4.3 Validasi Menggunakan Software

Setelah dilakukan pengumpulan data dan perhitungan gelombang serta arus, maka dilakukan pemodelan awal pada software. Pada awalnya dimulai dengan menggambar pipa, matras serta *bondary conditionnya*.



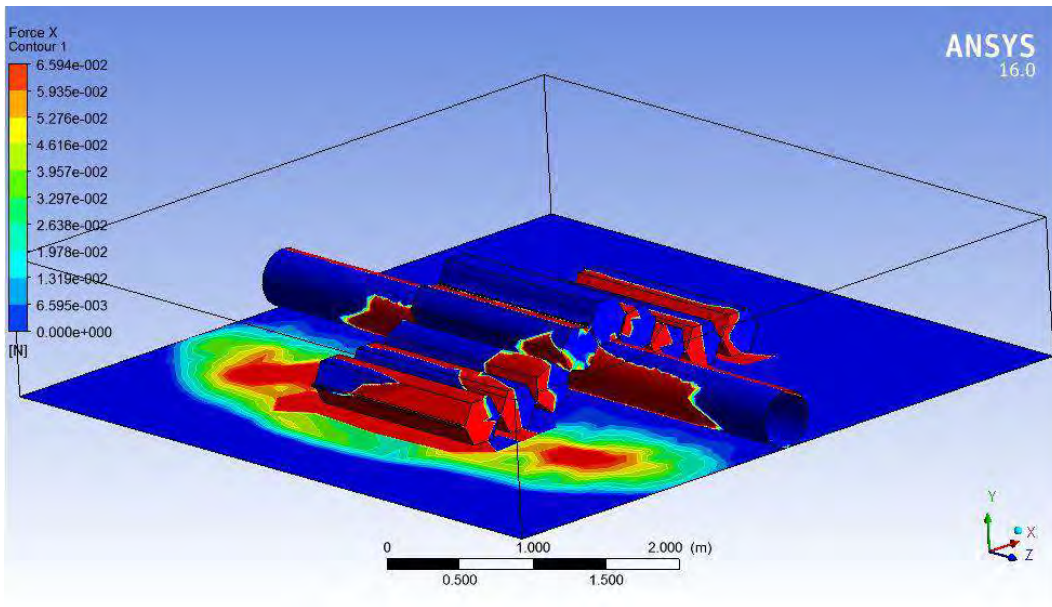
**Gambar 4.9** Menggambar objek dengan software

Setelah selesai menggambar objek maka objek tersebut dianalisa dengan bantuan software CFD

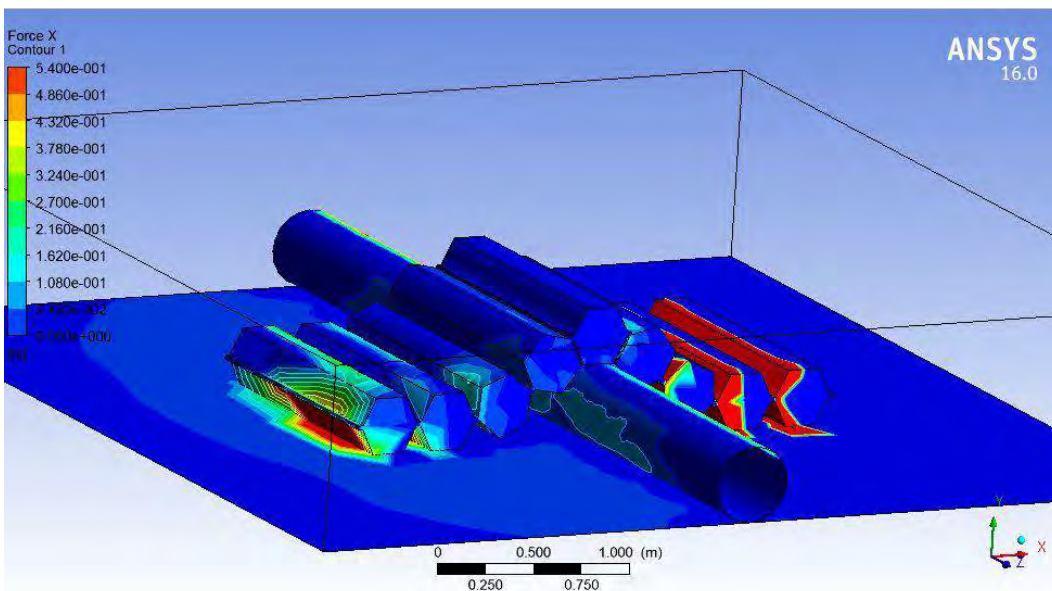


**Gambar 4.10** Hasil simulasi kecepatan arus pada software

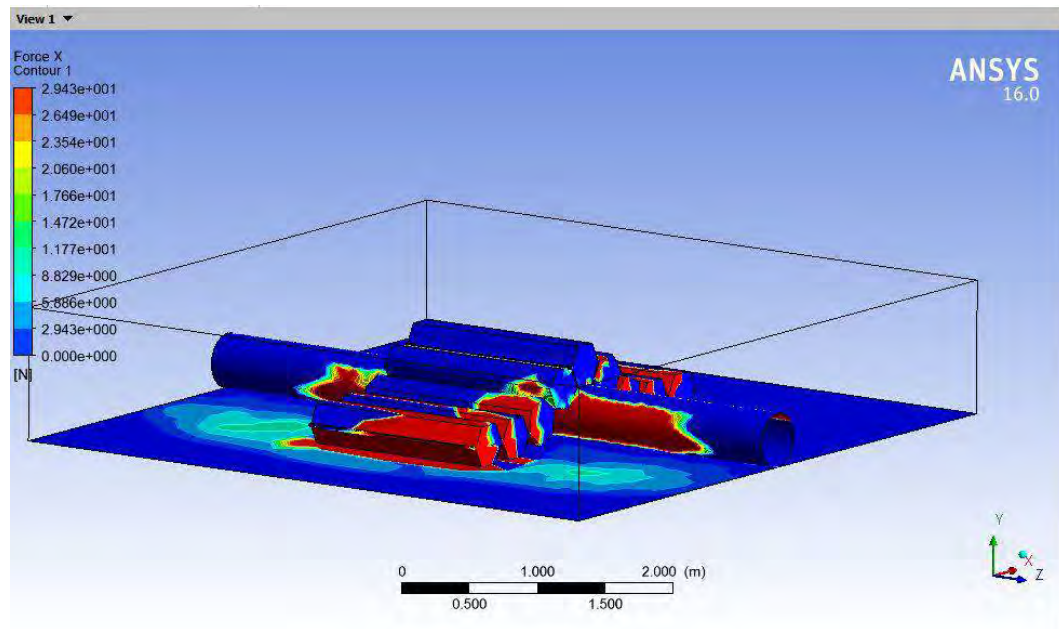




**Gambar 4.11** Hasil Simulasi Gaya Drag di Area Deep Pada Software



**Gambar 4.12** Hasil Simulasi Gaya Drag di Area Intermediate Pada Software

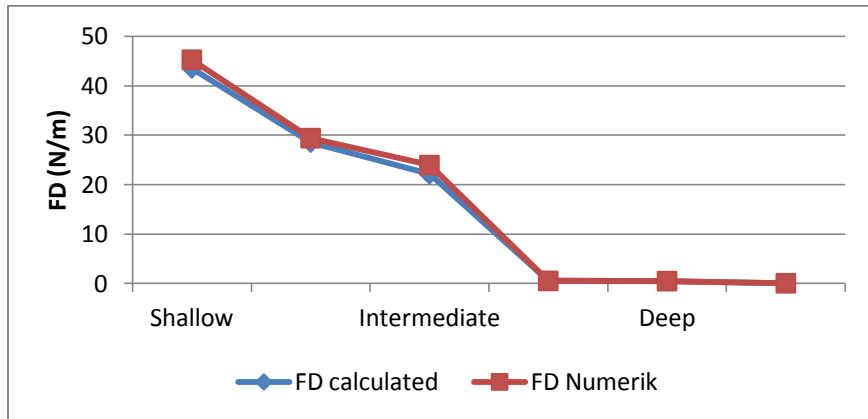


**Gambar 4.13** Hasil Simulasi Gaya Drag di Area Shallow Pada Software

Setelah dilakukan pemodelan dengan bantuan software, langkah selanjutnya adalah melakukan validasi atau perbandingan dari hasil perhitungan manual dengan hasil kalkulasi numerik yang dikeluarkan oleh software. Pada tahap ini akan memvalidasi gaya drag yang didapat dari perhitungan manual dengan hasil kalkulasi numerik. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.6

**Tabel 4.6** Komparasi Nilai FD dari Perhitungan Manual dengan Numerik

	FD calculated	FD Numerik
Shallow	43,555	45,3
	28,535	29,43
Intermediate	22,123	23,983
	0,54	0,54
Deep	0,48	0,497
	0,065	0,06594

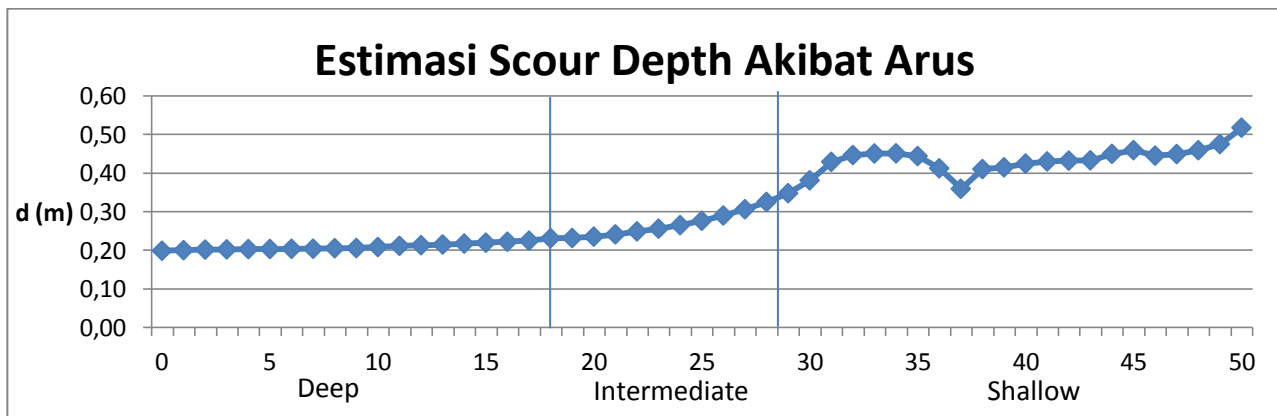


**Gambar 4.14** Komparasi Nilai FD Perhitungan Manual dengan Numerik

Pada grafik dan tabel diatas dapat dilihat bahwa nilai perhitungan manual dan numerik berbeda namun perbedaan tersebut sangat tipis. Hal tersebut dikarenakan pada perhitungan numerik nilai meshing kurang rapat atau bahkan terlalu rapat sehingga terjadilah perbedaan nilai diatas.

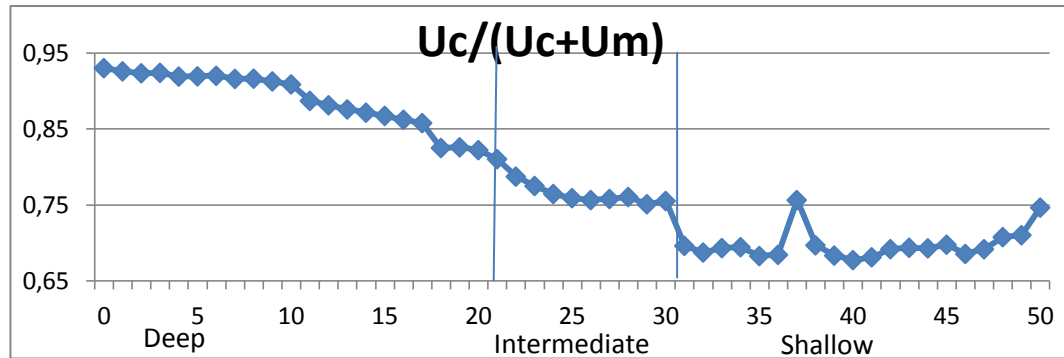
#### 4.4 Perhitungan Kedalaman Scouring Maksimal

Perhitungan kedalaman scouring yang terjadi pada pipa bawah laut ini diakibatkan oleh pengaruh gelombang dan arus. Oleh karena itu pada perhitungan kedalaman scouring maksimal ini digunakan parameter - parameter arus serta gelombang seperti persamaan (2.35). Pada persamaan tersebut terlebih dahulu harus diketahui kedalaman scour akibat pengaruh arus yang dikalkulasi dengan menggunakan persamaan (2.34). Hasil dari perhitungan scour akibat arus dapat dilihat pada grafik dibawah ini.



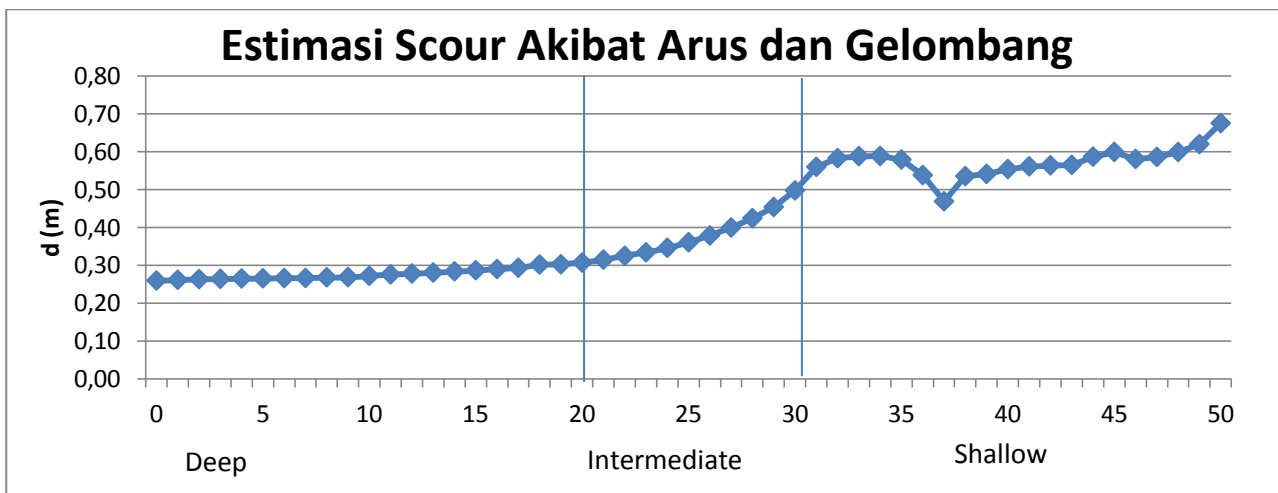
**Gambar 4.15** Grafik Kedalaman Scouring Akibat Arus

Setelah diketahui nilai kedalaman scouring akibat arus. dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai  $U_c/U_c+U_m$  sebagai parameter dalam penghitungan kedalaman scouring akibat arus dan gelombang dengan menggunakan persamaan (2.36) atau persamaan (2.37) tergantung dari nilai fungsi keulegen carpenter numbe. Hasil dari perhitungannya ditampilkan seperti pada grafik berikut :



**Gambar 4.16** Grafik Nilai  $U_c/(U_c+U_m)$

Hubungan antara nilai  $U_c/U_c+U_m$  dengan  $S/D$  memiliki nilai yang berbeda beda pada tiap kilometer poin. Nilai  $S/D$  dipengaruhi oleh nilai  $U_c/U_c+U_m$ . Semakin kecil nilai  $U_c/U_c+U_m$  maka semakin besar nilai  $S/D$ . Setelah diketahui nilai  $U_c/U_c+U_m$ , kemudian mencari nilai kedalaman scour akibat arus dan gelombang dengan menggunakan persamaan (2.35). Hasilnya seperti pada grafik dibawah ini



**Gambar 4.17** Grafik Kedalaman Scour Akibat Arus dan Gelombang

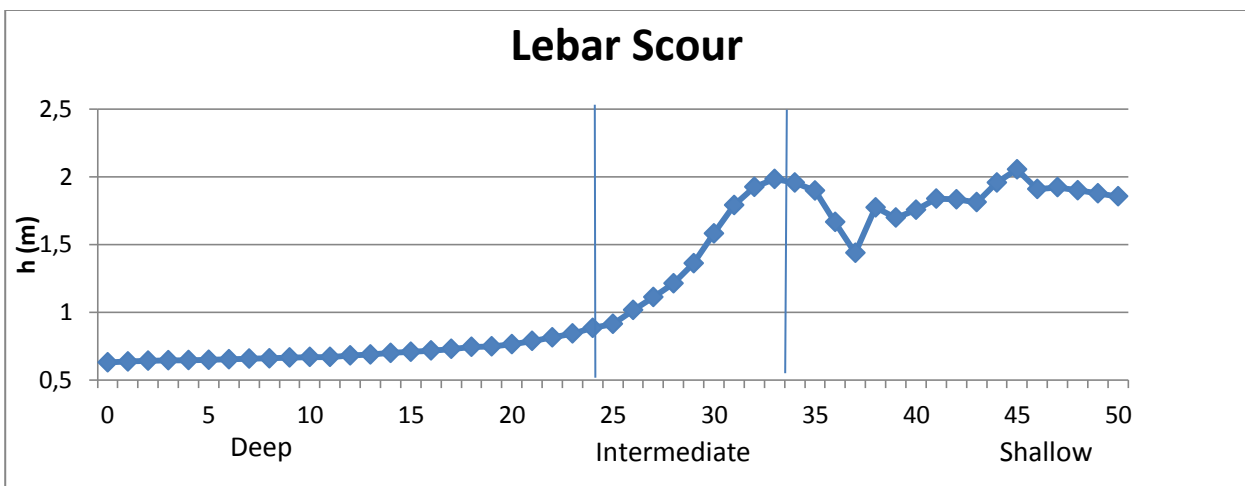
**Tabel 4.7** Nilai Scour Akibat Arus dan Gelombang

KP	dScurr	ds/D (m)
Shallow	0,5176	0,6753
Intermediate	0,3812	0,4974
Deep	0,2353	0,3070

Dari Perhitungan yang sudah dilakukan diketahui nilai scour terbesar terjadi pada area Shallow water sebesar 0,6753 m. Untuk perhitungan dan hasil yang lebih terperinci dapat dilihat pada lampiran. Mengacu pada Gambar 4.15 dan gambar 4.17, menunjukkan hubungan kedalaman air dengan kedalaman scouring yang terjadi dapat dikatakan bahwa kedalaman air sangat berpengaruh terhadap kedalaman scour yang terjadi. apabila kedalaman air semakin bertambah dalam maka kedalaman scour akan berkurang dan sebaliknya jika kedalaman air semakin berkurang maka kedalaman scour akan bertambah besar.

#### 4.5 Perhitungan lebar Scouring

Setelah mengetahui nilai dari kedalaman scour langkah selanjutnya adalah memperhitungkan berapa besar nilai dari lebar scour dengan menggunakan persamaan (2.42) yang dimana nilai lebar scour dihitung dari tengah pipa hingga akhir lubang scour. hasil kalkulasinya sebagai berikut :



**Gambar 4.18** Grafik Lebar Lubang Scour

Sama halnya dengan kedalaman scour, bahwa lebar scour yang terjadi juga dipengaruhi oleh kedalaman air. Semakin dalam kedalaman air tempat pipa berada maka semakin kecil lebar scour yang terjadi.

#### 4.6 Perhitungan *Freespan*

Panjang span aktual didapat melalui pengukuran dari data batimetri yang didapat.

**Tabel 4.8** Panjang Span Aktual

16 Inch Pipeline PP Platform To ORF								
Span No.	Start of Span			End of Span			Height (m)	Length (m)
	Easting	Northing	Kp	Easting	Northing	KP		
Span 1	707,895	9.276.030	10,455	707.888	9.276.049	10,475	0,50	20
Span 2	707,026	9.278.679	22,244	707.018	9.278.699	22,261	0,59	17
Span 3	706,220	9.281.491	35,179	706.216	9.281.505	35,23	0,90	51

##### 4.6.1 Perhitungan Panjang Bentangan Bebas Maksimum

Pada suatu *pipeline* yang sedang beroperasi mempunyai batasan panjang span atau bentangan bebas yang di ijinakan. Jika melewati bentangan yang di ijinakan hal tersebut bisa mengakibatkan kegagalan dan sangat berbahaya bagi pipa tersebut karena semakin panjang suatu span maka kemampuan pipa untuk menahan beban lingkungan dan berat pipa itu sendiri semakin kecil. Untuk menentukan berapa nilai panjang span maksimum digunakan persamaan (2.49)

**Tabel 4.9** Perhitungan Panjang Span Maksimum

Variabel	Nilai
C	1,57
Ur	5
Dtot	0,7664 m
Epipa	207000 Mpa
Ipipa	$3,3 \times 10^{-4} \text{ m}^4$
Meff	1552,82 N/m
Ueff Deep	0,4 m/s
Ueff Intermediate	0,5 m/s
Ueff Shallow	0,7 m/s

**Tabel 4.10** Perbandingan Span Maksimum dan Span Aktual

Span Aktual (m)	Span Maksimum (m)	Kondisi
20	66,249	Aman
17	52,999	Aman
51	37,857	Kritis

Pada hasil kalkulasi diatas diketahui ada perbedaan antara panjang span di area deep, Intermediate, dan shallow. hal ini disebabkan karena panjang maksimum span dipengaruhi oleh beban lingkungan disekitarnya juga yang dalam hal ini diwakili oleh kecepatan arus. semakin kecil arus maka semakin besar kemampuan pipa tersebut menopang atau menyangga beratnya itu sendiri yang dalam hal ini berarti panjang span semakin besar. sebaliknya jika kecepatan arus semakin deras maka kemampuan pipa untuk menopang dirinya sendiri semakin kecil.

#### 4.6.2 Perhitungan Nilai CSF dan Pcr

Akibat adanya dampak dari *freespan*, maka dimungkinkan akan terjadi osilasi. Jika terjadi osilasi maka akan timbul frekuensi natural serta defleksi pada setiap bentangan pipa. Untuk mencari nilai dari frekuensi natural serta defleksi, terlebih dahulu harus mencari nilai CSF serta Pcr. Dimana CSF itu sendiri bermakna *concrete stiffness factor* atau faktor kekakuan lapisan concrete pada pipa yang dihitung dengan menggunakan persamaan (2.45), serta Pcr bermakna kemampuan maksimum suatu bentangan untuk menahan beban serta tekanan sebelum terjadinya *buckling* yang dihitung dengan persamaan (2.47).

**Tabel 4.11** Perhitungan CSF

Variabel	Nilai
$E_c$	41000 Mpa
$I_c$	$1,4 \times 10^{-2} \text{ m}^4$
$E_{\text{pipa}}$	207000 Mpa
$I_{\text{pipa}}$	$3,3 \times 10^{-4} \text{ m}^4$
CSF	1,2493

**Tabel 4.12** Perhitungan Pcr

L span (m)	Pcr (N/m)	Beban terbesar (N/m)	Kondisi
20,000	15551545,405	1417342,672	Aman
17,000	21524630,318	2214597,925	Aman
51,000	2391625,591	4340611,932	Kritis

### 4.6.3 Perhitungan Defleksi

*Pipeline* akan terdefleksi jika terkena gaya, beban, maupun tekanan disekitar lokasi saat dioperasikan. Perhitungan defleksi dihitung dengan menggunakan persamaan (2.48). Pada defleksi dibagi menjadi 2 arah, yaitu *inline* serta *crossflow*. Dimana untuk *inline*, defleksi terjadi karena adanya arus yang terkonversi menjadi gaya. Dan untuk arah *crossflow*, defleksi terjadi akibat adanya tekanan hidrostatis, berat pipa, *bouyancy*, serta gaya *lift*.

**Tabel 4.13** Perhitungan Defleksi

L Span (m)	Defleksi Inline (cm)	Defleksi Cross (cm)	Defleksi Batas (m)	Kondisi
20	$6,439 * 10^{-6}$	0,0183	7,664	Aman
17	$5,473 * 10^{-6}$	0,0155	7,664	Aman
51	$1,642 * 10^{-6}$	0,0466	7,664	Aman

Dari perhitungan diatas untuk defleksi pada semua bentangan arah *inline* dan *crossflow* masih bisa dikatakan aman dikarenakan masih dibawah batas ijin.

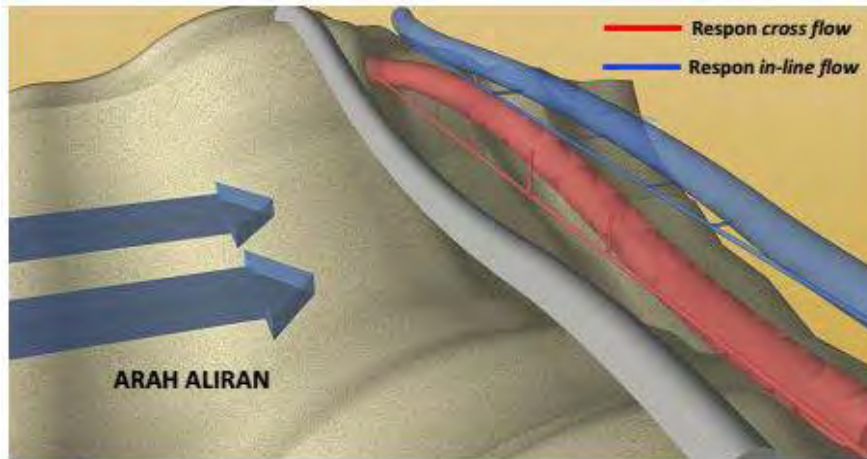
### 4.6.4 Perhitungan Frekuensi Natural

Pipa yang mengalami defleksi serta mengalami kriteria *freecspan* akan mengalami getaran atau frekuensi akibat adanya osilasi. Osilasi tersebut dikarenakan pengaruh dari beban lingkungan, defleksi, serta kekakuan dari material pipa. Frekuensi ini juga terbagi menjadi arah *inline* serta *crossflow* berdasar hasil perhitungan dari defleksi. Jika nilai dari 0,7 kali frekuensi natural ( $f_n$ ) lebih kecil daripada frekuensi *vortex shedding*, ( $v_s$ ), maka akan terjadi osilasi.

**Tabel 4.14** Defleksi dan Frekuensi Natural

L Span (m)	Defleksi In (cm)	Defleksi Cross (cm)	$f_n$ inline (Hz)	$f_n$ cross (Hz)	0,7 $f_n$ inline (Hz)	0,7 $f_n$ cross (Hz)	$V_s$	Kondisi
20	$6,439 * 10^{-6}$	0,0183	2,837	2,837	1,986	1,986	0,143	tidak osilasi
17	$5,473 * 10^{-6}$	0,0155	3,926	3,926	2,748	2,748	0,179	tidak osilasi
51	$1,642 * 10^{-6}$	0,0466	0,436	0,436	0,305	0,305	0,251	tidak osilasi





**Gambar 4.19** Sketsa Kategori Respon *Freespan* Dinamik (Pratama, 2007)

Pada tabel 4.14 dapat dilihat bahwa pipa tidak mengalami osilasi atau getaran karena tidak ada frekuensi natural pipa yang dibawah dari frekuensi *vortex shedding*. dari tabel diatas juga dapat dilihat bahwa semakin panjang bentangan bebas, semakin kecil pula frekuensi pipa. maka dapat disimpulkan bahwa semakin besar panjang bentangan bebas semakin besar resiko pipa tersebut mengalami osilasi / getaran.

#### 4.6.5 Penentuan Klasifikasi Respon *Freespan*

Dalam melakukan analisa dinamis *free span*, kriteria respon *free span* merupakan elemen penting karena merupakan langkah awal dalam melakukan mitigasi. Kriteria respon pipa ( $L/D$ ) bertujuan menjadi salah satu *screening* utama dalam mengetahui respon *free span* berdasarkan panjang aktual *span* ( $L$ ) dan  $D$  (diameter terluar pipa) yang sedang dianalisis. Untuk Tugas Akhir ini, untuk nilai respon pipa ( $L/D$ ) terhadap *free span* seprit pada tabel berikut :

**Tabel 4.15** Nilai  $L/D$  untuk mengklasifikasikan respon *freespan*

Span Aktual ( $L$ )	Diameter Pipa ( $D$ )	$L / D$ (m)	Kriteria Fatigue
20	0,7664	26,096	Tidak
17	0,7664	22,182	Tidak
51	0,7664	66,545	Fatigue

**Tabel 4.16** Klasifikasi Respon Free Span (DNV OS F105)

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

1) For hot pipelines (response dominated by the effective axial force) or under extreme current conditions ( $U_c > 1.0-2.0$  m/s) this L/D limit may be misleading.

Dari nilai diatas, dapat dikategorikan pada kelompok yang kedua berdasarkan tabel klasifikasi respon pipa terhadap *free span* (DNV-RP-F105), yaitu pada kriteria  $30 < L/D < 100$  yang mengatakan bahwa panjang *span* dikhususkan untuk kondisi operasi, serta *boundary condition* dan gaya efektif aksial menentukan frekuensi naturalnya.

#### 4.6.6. Perhitungan Tegangan

Perhitungan tegangan dari pipeline ini berpengaruh pada nilai dari aktual span. Adapun parameter-parameter yang dicari adalah hoop stress dengan persamaan (2.50), longitudinal stress (2.51), dan combined stress (von Mises) dengan persamaan (2.52). Untuk rules yang digunakan adalah ASME B 31.8.2000 mengenai Gas Transmission and Distributing Piping System. Selain itu, analisis tegangan ini hanya dilakukan pada kondisi operasi.

Adapun input yang digunakan dalam perhitungan tegangan pipa ini adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.17** Data Input Perhitungan Analisis Tegangan

Parameter	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
Diameter pipa, OD (D)	16	In	406,4	Mm
Ketebalan Pipa (t)	0,562	In	14,2748	Mm
Max Capacity	700 BPOD			
Hydrotest Pressure	1440,00	psi	9,92845008	MPa
Design Pressure (P <sub>i</sub> )	960,00	psi	6,61896672	MPa
Operating Pressure	850,00	psi	5,86054345	MPa
Mechanical Design Temp.	200	°F	93,3	°C
Operating Temperature (T)	85	°F	29,44	°C
Installation Temperature (T <sub>0</sub> )	105	°F	40,55	°C
Massa Jenis Gas	38,48	lb/ft <sup>3</sup>	616,390456	kg/m <sup>3</sup>
Kelas Material Pipa	API 5L Grade X52MO or X52QO PSL2 CS			
SMTS	66,00	ksi	455,053	MPa
SMYS	52,00	ksi	358,527	MPa
Fluida Isi	Gas			
Modulus Young (E)	30000	ksi	206842,71	MPa
Rasio Poisson(ν)	0,3		0,3	MPa
Massa Jenis Pipa	490,06	lb/ft <sup>3</sup>	7850	kg/m <sup>3</sup>
Koefisien Ekspansi Termal (α)	0,0000211	in/in °F	0,0000117	/°C

**Tabel 4.18** Perhitungan Tegangan di Area Shallow Water

Tegangan Hoop (σ <sub>h</sub> )	$\sigma_h = [(P)_i - P_e] D / 2t$	=	11984,96746	psi	=	82,633452	MPa
Tegangan Poisson (σ <sub>p</sub> )	$\sigma_p = \nu \sigma_h$	=	3595,490238	psi	=	24,790036	MPa
Tegangan Ekspansi Termal (σ <sub>T</sub> )	$\sigma_T = -E\alpha (T - T_0)$	=	3899,6088197	psi	=	26,886863	MPa
<b>Tegangan Longitudinal (σ<sub>L</sub>)</b>							
a. Untuk Kondisi <i>Restrained</i> (Tertahan)	$\sigma_L = \sigma_P + \sigma_p$	=	7495,099058	psi	=	51,676899	MPa
b. Untuk Kondisi <i>Unrestrained</i> (Tidak Tertahan)	$\sigma_L = PD / 4t = \sigma$	=	5992,483731	psi	=	41,316726	MPa
<b>Tegangan Ekuivalen (σ<sub>E</sub>)</b>							
a. Untuk Kondisi <i>Restrained</i> (Tertahan)	$\sigma_E = \sqrt{(\sigma_h)^2 - (\sigma_h \sigma_L)}$	=	10487,48953	psi	=	72,308704	MPa
b. Untuk Kondisi <i>Unrestrained</i> (Tidak Tertahan)	$\sigma_E = \sqrt{(\sigma_h)^2 - (\sigma_h \sigma_L)}$	=	10379,28629	psi	=	71,562669	MPa

**Tabel 4.19** Perhitungan Tegangan di Area Intermediate Water

<b>Tegangan Hoop (<math>\sigma_h</math>)</b>	$\sigma_h = [(P)_i - P_e] D / 2t$	=	7719,060432	psi	=	53,309609	MPa
<b>Tegangan Poisson (<math>\sigma_p</math>)</b>	$\sigma_p = \nu \sigma_h$	=	2315,71813	psi	=	15,992883	MPa
<b>Tegangan Ekspansi Termal (<math>\sigma_T</math>)</b>	$\sigma_T = -E\alpha (T - T_0)$	=	3899,6088197	psi	=	26,886863	MPa
<b>Tegangan Longitudinal (<math>\sigma_L</math>)</b>							
a. Untuk Kondisi <i>Restrain</i> (Tertahan)	$\sigma_L = \sigma_P + \sigma_T$	=	6215,326949	psi	=	42,879746	MPa
b. Untuk Kondisi <i>Unrestrain</i> (Tidak Tertahan)	$\sigma_L = PD / 4t = 0$	=	3859,530216	psi	=	26,654804	MPa
<b>Tegangan Ekuivalen (<math>\sigma_E</math>)</b>							
a. Untuk Kondisi <i>Restrain</i> (Tertahan)	$\sigma_E = \sqrt{(\sigma_h^2 + (\sigma_h \sigma_L))}$	=	7087,85572	psi	=	48,935514	MPa
b. Untuk Kondisi <i>Unrestrain</i> (Tidak Tertahan)	$\sigma_E = \sqrt{(\sigma_h^2 + (\sigma_h \sigma_L))}$	=	6684,902427	psi	=	46,167475	MPa

**Tabel 4.20** Perhitungan Tegangan di Area Deep Water

<b>Tegangan Hoop (<math>\sigma_h</math>)</b>	$\sigma_h = [(P)_i - P_e] D / 2t$	=	5263,355515	psi	=	36,284698	MPa
<b>Tegangan Poisson (<math>\sigma_p</math>)</b>	$\sigma_p = \nu \sigma_h$	=	1579,006655	psi	=	10,885409	MPa
<b>Tegangan Ekspansi Termal (<math>\sigma_T</math>)</b>	$\sigma_T = -E\alpha (T - T_0)$	=	3899,6088197	psi	=	26,886863	MPa
<b>Tegangan Longitudinal (<math>\sigma_L</math>)</b>							
a. Untuk Kondisi <i>Restrain</i> (Tertahan)	$\sigma_L = \sigma_P + \sigma_T$	=	5478,615474	psi	=	37,772273	MPa
b. Untuk Kondisi <i>Unrestrain</i> (Tidak Tertahan)	$\sigma_L = PD / 4t = 0$	=	2631,677758	psi	=	18,142349	MPa
<b>Tegangan Ekuivalen (<math>\sigma_E</math>)</b>							
a. Untuk Kondisi <i>Restrain</i> (Tertahan)	$\sigma_E = \sqrt{(\sigma_h^2 + (\sigma_h \sigma_L))}$	=	5374,219741	psi	=	37,050889	MPa
b. Untuk Kondisi <i>Unrestrain</i> (Tidak Tertahan)	$\sigma_E = \sqrt{(\sigma_h^2 + (\sigma_h \sigma_L))}$	=	4558,199586	psi	=	31,42347	MPa

Setelah dilakukan perhitungan diatas langkah selanjutnya adalah melakukan validasi perhitungan tegangan dengan kriteria yang sudah ditentukan berdasarkan ASME B31.8 tahun 2000 mengenai *Gas Transmission and Distributing Piping System*

**Tabel 4.21** Validasi Hasil Perhitungan Tegangan

Validasi Tegangan berdasarkan ASME 3.18 2000							
Design Condition	Criteria	Allowable Stress	psi	MPa	Result Calculation		Remark
					psi	MPa	
Operation (shallow)	Hoop Stress	90% SMYS	46992,2	259,2	11985,0	82,6	Pass
	Longitudinal Stress (restrain)	80% SMYS	41770,9	288,0	7495,1	51,7	Pass
	Longitudinal Stress (unrestrain)	80% SMYS	41770,9	288,0	5992,5	41,3	Pass
	Combined Stress (restrain)	96% SMYS	50125,0	324,0	10487,5	72,3	Pass
	Combined Stress (unrestrain)	96% SMYS	50125,0	324,0	10379,3	71,6	Pass
Operation (Intermediate)	Hoop Stress	90% SMYS	46992,2	259,2	7719,1	53,3	Pass
	Longitudinal Stress (restrain)	80% SMYS	41770,9	288,0	6215,3	37,8	Pass
	Longitudinal Stress (unrestrain)	80% SMYS	41770,9	288,0	2631,7	26,7	Pass
	Combined Stress (restrain)	96% SMYS	50125,0	324,0	7087,9	48,9	Pass
	Combined Stress (unrestrain)	96% SMYS	50125,0	324,0	6684,9	46,2	Pass
Operation (Deep)	Hoop Stress	90% SMYS	46992,2	259,2	5263,4	36,3	Pass
	Longitudinal Stress (restrain)	80% SMYS	41770,9	288,0	5478,6	37,8	Pass
	Longitudinal Stress (unrestrain)	80% SMYS	41770,9	288,0	2631,7	18,1	Pass
	Combined Stress (restrain)	96% SMYS	50125,0	324,0	5374,2	37,1	Pass
	Combined Stress (unrestrain)	96% SMYS	50125,0	324,0	4558,2	31,4	Pass

Dari hasil perhitungan didapatkan nilai *hoop stress* sebesar 82.6 MPa di area shallow water, 53.3 MPa di area Intermediate water dan 36.3 MPa di area Deep water. *Longitudinal stress* sebesar 41.3 MPa pada Shallow water, 37.8 MPa pada Intermediate water dan 37.8 MPa di area Deep water . *Combined stress (von Mises)* sebesar 72.3 MPa di area Shallow water, 48.9 MPa di area Intermediate water dan 37.1 MPa di area Deep water. Sedangkan nilai tegangan yang diijinkan masing-masing sebesar 259.2 MPa (*hoop stress*), 288 MPa (*longitudinal stress*), dan 324 MPa (*combined stress*). Berdasarkan perbandingan nilai tegangan yang menjadi kriteria terhadap nilai tiap tegangan yang dicari, didapatkan kesimpulan bahwa seluruh nilai tegangan tidak melebihi nilai kriteria tegangan yang diijinkan sehingga tegangan yang terjadi tidak membuat struktur gagal.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari proses analisa yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil perhitungan analisis stabilitas, gaya - gaya yang bekerja pada pipa antara lain gaya drag, gaya angkat dan gaya inersia. nilai gaya gaya tersebut berbeda beda akibat dari fungsi kedalaman pada masing masing zona yang berbeda kedalaman. Untuk berat terendam dari pipa sendiri memiliki nilai 302,92 kg/m dengan SG 2,09 . Untuk zona shalow water, 256,01 kg/m dengan SG 1,92 . Untuk zona Intermediate water dan 156,97 Kg/m dengan SG 1,57 untuk zona deep water. Menurut code yang digunakan yaitu DNV RP E305 nilai minimum stabilitas pipa adalah 1,1

2. Nilai maksimum scour dapat dilihat pada tabel berikut

Area	Scour Akibat Arus (m)	Scour Akibat Arus & Gelombang (m)	Lebar Scour (m)
Shallow	0,518	0,675	1,228
Intermediate	0,381	0,497	0,901
Deep	0,235	0,307	0,494

Pada tabel diatas dapat dilihat nilai scour berbeda beda, hal tersebut diakibatkan karena pengaruh kecepatan efektif yang berbeda beda.

3. Panjang bentangan bebas maksimum pada masing masing area berbeda. hal ini dipengaruhi oleh kecepatan arus yang berbeda beda pada masing masing zona. Pada zona deep water bernilai 66,25 m. untuk zona intermediate bernilai 52,99 m dan untuk zona shallow water bernilai 37,85 m.

4. Nilai respon pipa ( $L/D$ ) terhadap *free span* pada tugas akhir kali ini adalah 26,096 untuk bentangan dengan panjang 20m, 22,182 untuk span dengan panjang 17m dan 66,545 untuk span dengan panjang 51m. Nilai respon diatas menunjukkan bahwa pipa tersebut dapat dilanjutkan pada perhitungan fatigue apabila nilai tersebut bernilai lebih dari 30.

## 5.2 Saran

Beberapa hal yang dapat dijadikan saran yang sifatnya membangun penulisan ini diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Perlu adanya perhitungan stabilitas pipa dengan menggunakan code selain DNV RP E 305
2. Perlu dilakukan perhitungan propagasi scour sehingga dapat memperkirakan kelajuan scour nya tiap tahun
3. Perlu dilakukan analisis *Fatigue Limit State* dan *Ultimate Limite State* untuk memperhitungkan berapa umur kelelahan pipa tersebut.
4. Perlu dilakukan analisis resiko terhadap bentangan pipa yang melebihi panjang maksimumnya. dan dilakukan penambahan support untuk mitigasinya

## DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Mechanical Engineering (ASME) B31.8, 2002, **Gas Transmission and Distribution Piping System**, USA.
- Bai, Y. dan Qiang, B. 2001. **Subsea Pipelines and Risers**. New York: Elsevier.
- Det Norske Veritas. 2010. **DNV-RP-E305. On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines**. Norway.
- Det Norske Veritas. 2013. **DNV-OS-F101. Submarine Pipeline Systems**. Norway.
- Det Norske Veritas. 2006. **DNV-RP-F105. Free Spanning Pipelines**. Norway.
- Dianawati. 2008. **Analisis Free Span Pipa Bawah Laut Akibat Pengaruh Dinamika Dasar Laut Di Laut Cina Selatan**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan-FTSL, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Dey, S. dan N.P Singh. 2007 **Clean Water Scour Depth Below Underwater Pipelines**. Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology, India.
- Guo, B. Song, S. J, Chako. J, Galambhor. 2005. **Offshore Pipeline**. New York: Elsevier.
- Haniffah, Mohd. Ridza. 2007. **On - Bottom Stability Analysis And Design Of Submarine Pipeline**. Thesis. Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia
- Mouselli, A. H. 1981. **Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods**. Tulsa: PennWell Books.



Nugraha, Catur. 2012. **Analisis Pengaruh Scouring Pada Pipa Bawah Laut (Studi Kasus Pipa gas Transmisi SSWJ Jalur Pipa Gas Labuhan Maringgai - Muara Bekasi)**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan - FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Nugroho, Adi. 2011. **Analisa Scouring Pipa Bawah Laut Kodeco Jalur Poleng - Gresik Dengan Variasi Tipe Tanah**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan - FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Soegiono, 2004. **Pipa Bawah Laut**. Airlangga University Press, Surabaya

Sumer, B.M. and Fredsoe, J. (2002). **The Mechanics of Scour in the Marine Environment**. Technical University of Denmark. Denmark

Triatmodjo, Bambang. (1999). **Teknik Pantai**. Beta Offset, Yogyakarta

## PERHITUNGAN TEORI GELOMBANG

INPUT DATA UNTUK MENENTUKAN TEORI GELOMBANG :

$$H = 4,88 \text{ m} \qquad g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$T = 7,6 \text{ s} \qquad 59,53$$

Grafik *Region of Validity of Wave Theories*

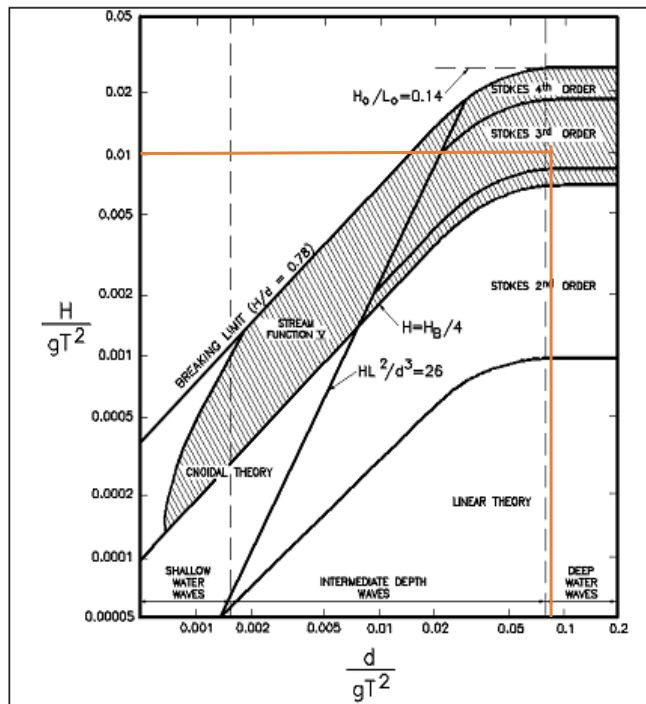


Figure II-1-20. Ranges of suitability of various wave theories (Le Méhauté 1976)

$$\frac{H}{gT^2} = \frac{4,88}{(9,8) \cdot (7,6)^2} = 0,00862$$

$$\frac{d}{gT^2} = \frac{52}{9,8 \cdot (9,45)^2} = 0,10517$$

>> berdasarkan grafik diatas, maka menggunakan Teori Gelombang  
**Stoke Orde Tiga**

KP	LAT (ft)	MSL (ft)	HAT(ft)	d (ft)	h (ft)	y	x
0	176,017	179,888	183,491	59,537	183,625	0,0086	0,104
1	175,115	178,986	182,589	58,63194	182,723	0,0086	0,1035
2	172,244	176,115	179,718	57,78673	179,852	0,0086	0,1020
3	172,244	176,115	179,718	57,36184	179,852	0,0086	0,1020
4	171,916	175,787	179,39	57,18688	179,524	0,0086	0,1018
5	170,85	174,721	178,323	56,93694	178,458	0,0086	0,1012
6	170,358	174,229	177,831	56,38617	177,966	0,0086	0,101
7	170,276	174,147	177,749	55,73695	177,884	0,0086	0,1009
8	169,455	173,327	176,929	55,5117	177,064	0,0086	0,1005
9	169,619	173,491	177,093	54,68691	177,228	0,0086	0,1006
10	168,143	172,014	175,617	54,15686	175,751	0,0086	0,0998
11	167,651	171,522	175,125	54,13797	175,259	0,0086	0,0995
12	166,667	170,538	174,14	52,78679	174,275	0,0086	0,099
13	166,0737	169,554	173,5471	51,98669	173,682	0,0086	0,098681
14	165,3968	168,57	172,8702	50,67696	173,0051	0,0086	0,098319
15	164,7199	167,586	172,1933	49,73696	172,3283	0,0086	0,0980
16	164,043	166,602	171,5163	48,68692	171,6514	0,0086	0,0976
17	163,3661	165,618	170,8394	47,46193	170,9745	0,0086	0,097232
18	162,6892	164,634	170,1625	46,01688	170,2977	0,0086	0,09687
19	162,0123	163,65	169,4855	45,68678	169,6208	0,0086	0,096508
20	161,3354	162,666	168,8086	44,21185	168,9439	0,0086	0,096146
21	160,6585	161,682	168,1317	42,13677	168,2671	0,0086	0,095784
22	159,9816	160,698	167,4548	40,08669	167,5902	0,0086	0,095422
23	159,3047	159,714	166,7778	37,98692	166,9133	0,0086	0,09506
24	158,6278	158,73	166,1009	35,30376	166,2365	0,0086	0,094698
25	157,9509	157,746	165,424	33,55482	165,5596	0,0086	0,094336
26	157,274	156,762	164,747	28,47594	164,8827	0,0086	0,093974
27	156,5971	155,778	164,0701	24,80371	164,2058	0,0086	0,093612
28	155,9202	154,794	163,3932	21,68682	163,529	0,0086	0,0932
29	155,2433	153,81	162,7163	18,16181	162,8521	0,0086	0,0929
30	154,5664	152,826	162,0393	14,41978	162,1752	0,0086	0,092525
31	153,8895	151,842	161,3624	11,90884	161,4984	0,0086	0,092163
32	153,2126	150,858	160,6855	10,65367	160,8215	0,0086	0,091801
33	152,5357	149,874	160,0085	10,17453	160,1446	0,0086	0,091439
34	151,8588	148,89	159,3316	10,38667	159,4678	0,0086	0,091077
35	151,182	147,906	158,6547	10,88685	158,7909	0,0086	0,090715
36	150,5051	146,922	157,9778	13,30391	158,114	0,0086	0,090353
37	149,8282	145,938	157,3008	16,68689	157,4372	0,0086	0,089991
38	149,1513	144,954	156,6239	12,08684	156,7603	0,0086	0,089629
39	148,4744	143,97	155,947	12,91742	156,0834	0,0086	0,089266
40	147,7975	142,986	155,27	12,26972	155,4066	0,0086	0,088904
41	147,1206	142,002	154,5931	11,43671	154,7297	0,0086	0,0885
42	146,4437	141,018	153,9162	11,48669	154,0528	0,0086	0,0882
43	145,7668	140,034	153,2393	11,68695	153,376	0,0086	0,087818
44	145,0899	139,05	152,5623	10,38667	152,6991	0,0086	0,087456
45	144,413	138,066	151,8854	9,636862	152,0222	0,0086	0,087094
46	143,7361	137,082	151,2085	10,78718	151,3454	0,0086	0,086732
47	143,0592	136,098	150,5315	10,67074	150,6685	0,0086	0,08637
48	142,3823	135,114	149,8546	10,871	149,9916	0,0086	0,086008
49	141,7054	134,13	149,1777	11,07125	149,3147	0,0086	0,085646
50	141,0285	133,146	148,5008	11,2715	148,6379	0,0086	0,085284

Persamaan yang digunakan pada teori stoke ini dapat diketahui dari persamaan berikut (Mouselli, 1981):

Kecepatan Steady:

$$U_E^2 = 0,778 U_0^2 \left(\frac{D}{Y_0}\right)^{0,286}$$

Maka :

$$U_E \text{ Tot} = U_{E \text{ wave}} + U_{E \text{ curr}}$$

KP	Yo	Y	U	Uo (m/s)	Ue curr (m/s)	Ue Wave	Ue Tot
0	0,66665	193,362	1,9	0,163	0,165	0,035	0,2
1	0,66665	192,46	1,9	0,169	0,171	0,039	0,21
2	0,66665	189,589	1,9	0,175	0,177	0,043	0,22
3	0,66665	189,589	1,9	0,181	0,183	0,047	0,23
4	0,66665	189,261	1,9	0,187	0,189	0,051	0,24
5	0,66665	188,195	1,9	0,193	0,195	0,055	0,25
6	0,66665	187,703	1,9	0,199	0,201	0,059	0,26
7	0,66665	187,621	1,9	0,205	0,207	0,063	0,27
8	0,66665	186,801	1,9	0,211	0,213	0,067	0,28
9	0,66665	186,965	1,9	0,217	0,219	0,071	0,29
10	0,66665	185,488	1,9	0,223	0,225	0,075	0,3
11	0,66665	184,996	1,9	0,229	0,231	0,079	0,31
12	0,66665	184,012	1,9	0,235	0,237	0,083	0,32
13	0,66665	183,419	1,9	0,241	0,243	0,087	0,33
14	0,66665	182,7421	1,9	0,247	0,249	0,091	0,34
15	0,66665	182,0653	1,9	0,253	0,255	0,095	0,35
16	0,66665	181,3884	1,9	0,259	0,261	0,099	0,36
17	0,66665	180,7115	1,9	0,265	0,267	0,103	0,37
18	0,66665	180,0347	1,9	0,271	0,273	0,107	0,38
19	0,66665	179,3578	1,9	0,277	0,279	0,111	0,39
20	0,66665	178,6809	1,9	0,283	0,285	0,115	0,4
21	0,66665	178,0041	1,9	0,289	0,291	0,119	0,41
22	0,66665	177,3272	1,9	0,295	0,297	0,123	0,42
23	0,66665	176,6503	1,9	0,301	0,303	0,127	0,43
24	0,66665	175,9735	1,9	0,307	0,309	0,131	0,44
25	0,66665	175,2966	1,9	0,313	0,315	0,135	0,45
26	0,66665	174,6197	1,9	0,319	0,321	0,139	0,46
27	0,66665	173,9428	1,9	0,325	0,327	0,143	0,47
28	0,66665	173,266	1,9	0,331	0,333	0,147	0,48
29	0,66665	172,5891	1,9	0,337	0,339	0,151	0,49
30	0,66665	171,9122	1,9	0,343	0,345	0,155	0,5
31	0,66665	171,2354	1,9	0,349	0,351	0,159	0,51
32	0,66665	170,5585	1,9	0,355	0,357	0,163	0,52
33	0,66665	169,8816	1,9	0,361	0,363	0,167	0,53
34	0,66665	169,2048	1,9	0,367	0,369	0,171	0,54
35	0,66665	168,5279	1,9	0,373	0,375	0,175	0,55
36	0,66665	167,851	1,9	0,379	0,381	0,179	0,56
37	0,66665	167,1742	1,9	0,385	0,387	0,183	0,57
38	0,66665	166,4973	1,9	0,391	0,393	0,187	0,58
39	0,66665	165,8204	1,9	0,397	0,399	0,191	0,59
40	0,66665	165,1436	1,9	0,403	0,405	0,195	0,6
41	0,66665	164,4667	1,9	0,409	0,411	0,199	0,61
42	0,66665	163,7898	1,9	0,415	0,417	0,203	0,62
43	0,66665	163,113	1,9	0,421	0,423	0,207	0,63
44	0,66665	162,4361	1,9	0,427	0,429	0,211	0,64
45	0,66665	161,7592	1,9	0,433	0,435	0,215	0,65
46	0,66665	161,0824	1,9	0,439	0,441	0,219	0,66
47	0,66665	160,4055	1,9	0,445	0,447	0,223	0,67
48	0,66665	159,7286	1,9	0,451	0,453	0,227	0,68
49	0,66665	159,0517	1,9	0,457	0,459	0,231	0,69
50	0,66665	158,3749	1,9	0,463	0,465	0,235	0,7

## Perhitungan Stabilitas Pipa

Input	Symbol	Value		
gravity	g (m/s <sup>2</sup> )	9,81		
wave height	H (m)	1,62		
spectral peak periode	T (s)	7,6		
mean water depth	d (m)	11,486	16,27	44,986
distance between pipe and SWL	y (m)	-11,0796		
outer diameter of pipe	OD (m)	0,4064		
density of seawater	ρ (kgm <sup>-3</sup> )	1025		
zero up crossing period	Tu (s)	7,91		
current velocity at bottom	Ur (ms <sup>-1</sup> )	0,7	0,5	0,4

wave length shallow area : 69,887 m

wave length intermediate area : 77,968 m

wave length deep area : 89,848 m

Perhitungan gaya yang bekerja pada pipa

$$U = \frac{H \pi \cosh [2 \pi (y + d) / L]}{T \sinh (2 \pi d / L)} \cdot \cos (2 \pi (\frac{x-t}{L T}))$$

Vertical velocity

$$V = \frac{H \pi \sinh [2 \pi (y - d) / L]}{T \sinh (2 \pi d / L)} \cdot \sin (2 \pi (\frac{x-t}{L T}))$$

Horizontal Acceleration

$$\dot{U} = \frac{2 H \pi^2 \cosh [2 \pi (y + d) / L]}{T^2 \sinh (2 \pi d / L)} \cdot \sin (2 \pi (\frac{x-t}{L T}))$$

T/t	U shallow	V shallow	U shallow	U Interm	V Interm	U Interm	U Deep	V Deep	U Deep
t/T = 0	0,547	0,000	0,000	0,390	0,000	0,000	0,058	0,000	0,000
t/T = 1/20	0,520	-0,006	-0,140	0,370	-0,004	-0,099	0,055	-0,001	-0,015
t/T = 2/20	0,442	-0,012	-0,266	0,315	-0,007	-0,189	0,047	-0,001	-0,028
t/T = 3/20	0,321	-0,016	-0,366	0,229	-0,010	-0,260	0,034	-0,001	-0,039
t/T = 4/20	0,169	-0,019	-0,430	0,121	-0,012	-0,306	0,018	-0,002	-0,045
t/T = 5/20	0,000	-0,020	-0,452	0,000	-0,013	-0,322	0,000	-0,002	-0,048
t/T = 6/20	-0,168	-0,019	-0,430	-0,120	-0,012	-0,306	-0,018	-0,002	-0,045
t/T = 7/20	-0,321	-0,016	-0,366	-0,229	-0,010	-0,260	-0,034	-0,001	-0,039
t/T = 8/20	-0,442	-0,012	-0,266	-0,315	-0,008	-0,189	-0,047	-0,001	-0,028
t/T = 9/20	-0,520	-0,006	-0,140	-0,370	-0,004	-0,099	-0,055	-0,001	-0,015
t/T = 10/20	-0,547	0,000	0,000	-0,390	0,000	0,000	-0,058	0,000	0,000
t/T = 11/20	-0,520	0,006	0,140	-0,371	0,004	0,099	-0,055	0,001	0,015
t/T = 12/20	-0,443	0,012	0,266	-0,316	0,007	0,189	-0,047	0,001	0,028
t/T = 13/20	-0,322	0,016	0,366	-0,230	0,010	0,260	-0,034	0,001	0,039
t/T = 14/20	-0,170	0,019	0,430	-0,121	0,012	0,306	-0,018	0,002	0,045
t/T = 15/20	-0,001	0,020	0,452	-0,001	0,013	0,322	0,000	0,002	0,048
t/T = 16/20	0,168	0,019	0,430	0,119	0,012	0,306	0,018	0,002	0,045
t/T = 17/20	0,320	0,016	0,366	0,228	0,010	0,260	0,034	0,001	0,039
t/T = 18/20	0,441	0,012	0,266	0,314	0,008	0,189	0,047	0,001	0,028
t/T = 19/20	0,519	0,006	0,140	0,370	0,004	0,099	0,055	0,001	0,015
t/T = 20/20	0,547	0,000	0,000	0,390	0,000	0,000	0,058	0,000	0,000

Un :

$$|U_n| = \sqrt{(U_n^2 + V_n^2)}$$

Inertia Force (FI) :

$$F_I = C_M \rho \pi D^2 \dot{U}_n / 4$$

Drag Force (FD) :

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho |U_n| U_n D$$

Lift Force (FL) :

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho U_n^2 D$$

Gaya pada Area Shallow

Periode	UN shall	FD shall	FI Shall	FL Shall
t/T = 0	0,546576	43,5559	0,000	56,000
t/T = 1/20	0,519888	39,40076	-61,072	50,665
t/T = 2/20	0,442447	28,5209	-116,166	36,695
t/T = 3/20	0,321885	15,06799	-159,889	19,422
t/T = 4/20	0,170292	4,175543	-187,961	5,436
t/T = 5/20	0,019956	2,76E-05	-197,634	0,075
t/T = 6/20	0,169471	-4,13479	-187,961	5,384
t/T = 7/20	0,321183	-15,002	-159,889	19,337
t/T = 8/20	0,441936	-28,4549	-116,166	36,611
t/T = 9/20	0,519619	-39,3599	-61,072	50,613
t/T = 10/20	0,546575	-43,5558	0,000	56,000
t/T = 11/20	0,520156	-39,4414	61,072	50,717
t/T = 12/20	0,442957	-28,5868	116,166	36,780
t/T = 13/20	0,322587	-15,134	159,889	19,507
t/T = 14/20	0,171114	-4,21648	187,961	5,489
t/T = 15/20	0,019994	-0,00025	197,634	0,075
t/T = 16/20	0,168649	4,094209	187,961	5,332
t/T = 17/20	0,320479	14,93614	159,889	19,253
t/T = 18/20	0,441424	28,38884	116,166	36,526
t/T = 19/20	0,519349	39,31889	61,072	50,560
t/T = 20/20	0,546573	43,55546	0,000	56,000

Gaya Pada Area Intermediate

Periode	UN Inter	FD Inter	FI Inter	FL Inter
t/T = 0	0,390	22,123	0,000	28,444
t/T = 1/20	0,371	20,013	-43,521	25,733
t/T = 2/20	0,315	14,486	-82,783	18,636
t/T = 3/20	0,229	7,653	-113,940	9,860
t/T = 4/20	0,121	2,121	-133,945	2,754
t/T = 5/20	0,013	0,000	-140,838	0,030
t/T = 6/20	0,121	-2,100	-133,945	2,728
t/T = 7/20	0,229	-7,620	-113,940	9,817
t/T = 8/20	0,315	-14,453	-82,783	18,593
t/T = 9/20	0,370	-19,992	-43,521	25,707
t/T = 10/20	0,390	-22,123	0,000	28,444
t/T = 11/20	0,371	-20,033	43,521	25,760
t/T = 12/20	0,316	-14,520	82,783	18,679
t/T = 13/20	0,230	-7,687	113,940	9,903
t/T = 14/20	0,122	-2,142	133,945	2,781
t/T = 15/20	0,013	0,000	140,838	0,031
t/T = 16/20	0,120	2,080	133,945	2,701
t/T = 17/20	0,228	7,586	113,940	9,774
t/T = 18/20	0,315	14,419	82,783	18,550
t/T = 19/20	0,370	19,971	43,521	25,680
t/T = 20/20	0,390	22,123	0,000	28,444

Gaya Pada Area Deep

Periode	UN Deep	FD deep	FI Deep	FL Deep
t/T = 0	0,058	0,487	0,000	0,627
t/T = 1/20	0,055	0,441	-6,455	0,567
t/T = 2/20	0,047	0,319	-12,277	0,411
t/T = 3/20	0,034	0,169	-16,898	0,217
t/T = 4/20	0,018	0,047	-19,865	0,061
t/T = 5/20	0,002	0,000	-20,887	0,001
t/T = 6/20	0,018	-0,046	-19,865	0,060
t/T = 7/20	0,034	-0,168	-16,898	0,216
t/T = 8/20	0,047	-0,318	-12,277	0,410
t/T = 9/20	0,055	-0,440	-6,455	0,566
t/T = 10/20	0,058	-0,487	0,000	0,627
t/T = 11/20	0,055	-0,441	6,455	0,568
t/T = 12/20	0,047	-0,320	12,277	0,411
t/T = 13/20	0,034	-0,169	16,898	0,218
t/T = 14/20	0,018	-0,047	19,865	0,061
t/T = 15/20	0,002	0,000	20,887	0,001
t/T = 16/20	0,018	0,046	19,865	0,059
t/T = 17/20	0,034	0,167	16,898	0,215
t/T = 18/20	0,047	0,318	12,277	0,409
t/T = 19/20	0,055	0,440	6,455	0,566
t/T = 20/20	0,058	0,487	0,000	0,627

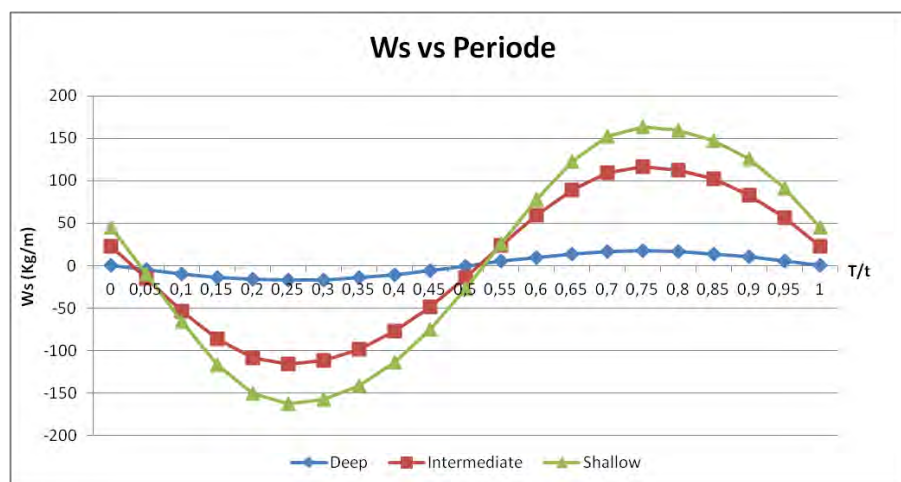
Ws (kg/m)	
friction calibration factor	
u =	0,2
calibration factor	
Fw =	1,62

Berat minimum pipa terendam :

$$W_{sub} = \left[ \frac{(F_D + F_I) + \mu F_L}{\mu} \right] F_w$$

Berat Pipa Minimum Pada Masing Masing Area

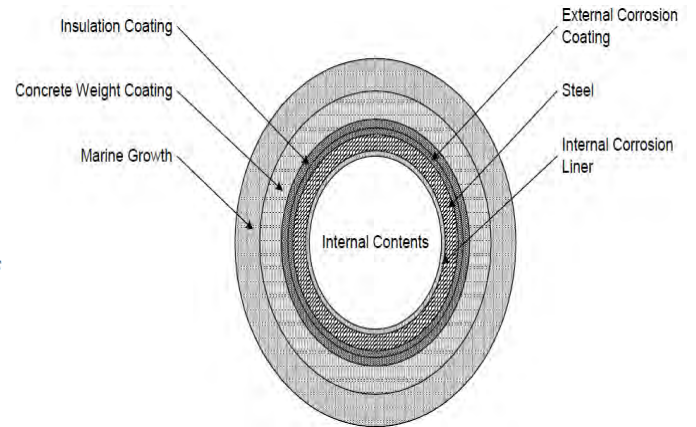
T/t	Ws (Shallow)	Ws (Inter)	Ws (Deep)
0	45,211	22,9639786	0,50594023
0,05	-9,527	-15,161341	-4,87177944
0,1	-66,308	-53,313781	-9,80591487
0,15	-116,370	-86,131686	-13,7776301
0,2	-150,852	-108,3908	-16,3538194
0,25	-163,171	-116,28333	-17,2464175
0,3	-157,722	-111,88044	-16,4307028
0,35	-141,212	-98,749782	-14,0556308
0,4	-113,366	-77,215832	-10,3325227
0,45	-74,568	-48,196984	-5,59961767
0,5	-26,716	-13,569589	-0,29896392
0,55	26,236	23,6477798	5,05874667
0,6	78,387	59,4482373	9,9410498
0,65	122,744	89,3676263	13,8488883
0,7	152,622	109,287737	16,3735312
0,75	163,196	116,293328	17,246583
0,8	159,458	112,759964	16,4500309
0,85	147,530	101,957357	14,1262639
0,9	125,389	83,3217942	10,4670296
0,95	91,241	56,6656723	5,78619371
1	45,211	22,9637457	0,5059351





## Perhitungan berat pipa dengan lapisannya

- i. Carbon Steel Weight  $W_{cs} = \pi (D_{st} - t) t \rho_{st}$
- ii. Internal Corrosion Liner Weight  $W_L = \pi (D_{st} - 2t - t_L) t_L \rho_L$
- iii. Corrosion Coating Weight  $W_{cc} = \pi (D_{st} + t_{cc}) t_{cc} \rho_{cc}$
- iv. Insulation Coating Weight  $W_{ic} = \pi (D_{st} + 2t_{cc} + t_{ic}) t_{ic} \rho_{ic}$
- v. Concrete Coating Weight  $W_c = \pi (D_{st} + 2t_{cc} + 2t_{ic} + t_c) t_c \rho_c$
- vi. Marine Growth Weight  $W_{mg} = \pi (D_{st} + 2t_{cc} + 2t_{ic} + 2t_c + t_{mg}) t_{mg} \rho_{mg}$
- vii. Internal Diameter of Pipe  $ID = D_{st} - 2t - 2t_L$
- viii. Weight of Contents  $W_i = \pi/4 (ID)^2 \rho_i$
- ix. Weight of Corroded Material  $W_{corr} = (\pi (D - 2t + t_{CA}) t_{CA}) \rho_{st} \eta_{CA}$



where,  $\eta_{CA}$  = corrosion allowance usage factor

<b>DATA FOR PIPELINE SUBMERGED WEIGHT</b>		
Diameter, Dst, mm		406,4
<b>THICKNESS (mm)</b>		
1	Carbon Steel, t	14,3
2	Internal Corrosion Linner, t <sub>L</sub>	0
3	Corrosion Coating, t <sub>cc</sub>	5,5
4	Insulation Coating, t <sub>ic</sub>	0
5	Concrete Coating, t <sub>c</sub>	85
6	Marine Growth, t <sub>mg</sub>	0
7	Corroded Material, t <sub>ca</sub>	0
<b>DENSITY (kgm<sup>-3</sup>)</b>		
1	Carbon Steel, ρ <sub>st</sub>	7850
2	Internal Corrosion Liner, ρ <sub>L</sub>	0
3	Corrosion Coating, ρ <sub>cc</sub>	1280
4	Insulation Coating, ρ <sub>ic</sub>	0
5	Concrete Coating, ρ <sub>c</sub>	3044
6	Marine Growth, ρ <sub>mg</sub>	1025
7	Content, ρ <sub>i</sub>	0,000022
8	Seawater, ρ <sub>sw</sub>	1025
9	Corrosion Allowance Usage Factor, U <sub>ca</sub>	3

Maka,

Kondisi	D (mm)	W (kg/m)	B (kg/m)	Ws (kg/m)	SG	MIN. SG
Shallow (KP 30 - KP 42)	587,40	580,68	277,77	302,92	2,09	1,1
Intermediate (KP 20 - Kp 30)	587,40	533,78	277,77	256,01	1,92	1,1
Deep (KP 0 - KP 20)	587,40	434,74	277,77	156,97	1,57	1,1

## Perhitungan scouring

Estimasi Kedalaman scouring akibat arus

$$ds = 0,972 \left[ \frac{v_{eff}^2}{2g} \right]^{0,2} \cdot D^{0,8}$$

Estimasi Kedalaman Scour Maksimum Akibat Arus						
KP	Depth	Ueff	D	Ueff^2	g	Scour depth
						S = 0,972 ((Ueff^2/2g)^0,2) D^0,8
0	59,537	0,2	0,7664	0,04	9,81	0,19882104
1	58,6319376	0,21	0,7664	0,0441	9,81	0,20037552
2	57,7867272	0,22	0,7664	0,0484	9,81	0,20180808
3	57,361836	0,23	0,7664	0,0529	9,81	0,20235672
4	57,1868808	0,24	0,7664	0,0576	9,81	0,20302728
5	56,9369448	0,25	0,7664	0,0625	9,81	0,20336256
6	56,3861712	0,26	0,7664	0,0676	9,81	0,20388072
7	55,7369472	0,27	0,7664	0,0729	9,81	0,20409408
8	55,5117	0,28	0,7664	0,0784	9,81	0,20540472
9	54,6869112	0,29	0,7664	0,0841	9,81	0,20574
10	54,156864	0,3	0,7664	0,09	9,81	0,20845272
11	54,1379664	0,31	0,7664	0,0961	9,81	0,21143976
12	52,786788	0,32	0,7664	0,1024	9,81	0,21317712
13	51,986688	0,33	0,7664	0,1089	9,81	0,2150364
14	50,6769624	0,34	0,7664	0,1156	9,81	0,2174748
15	49,7369592	0,35	0,7664	0,1225	9,81	0,21973032
16	48,6869232	0,36	0,7664	0,1296	9,81	0,22213824
17	47,461932	0,37	0,7664	0,1369	9,81	0,22488144
18	46,0168752	0,38	0,7664	0,1444	9,81	0,23125176
19	45,6867768	0,39	0,7664	0,1521	9,81	0,2318004
20	44,2118496	0,4	0,7664	0,16	9,81	0,2353056
21	42,1367712	0,41	0,7664	0,1681	9,81	0,2412492
22	40,0866864	0,42	0,7664	0,1764	9,81	0,24899112
23	37,9869192	0,43	0,7664	0,1849	9,81	0,256032
24	35,3037648	0,44	0,7664	0,1936	9,81	0,26508456
25	33,5548224	0,45	0,7664	0,2025	9,81	0,27639264
26	28,47594	0,46	0,7664	0,2116	9,81	0,29010864
27	24,8037096	0,47	0,7664	0,2209	9,81	0,306324
28	21,6868248	0,48	0,7664	0,2304	9,81	0,3252216
29	18,1618128	0,49	0,7664	0,2401	9,81	0,3477768
30	14,4197832	0,5	0,7664	0,25	9,81	0,38124384

31	11,9088408	0,51	0,7664	0,2601	9,81	0,42903648
32	10,6536744	0,52	0,7664	0,2704	9,81	0,44665392
33	10,1745288	0,53	0,7664	0,2809	9,81	0,45073824
34	10,3866696	0,54	0,7664	0,2916	9,81	0,45104304
35	10,8868464	0,55	0,7664	0,3025	9,81	0,44400216
36	13,3039104	0,56	0,7664	0,3136	9,81	0,41233344
37	16,6868856	0,57	0,7664	0,3249	9,81	0,35926776
38	12,086844	0,58	0,7664	0,3364	9,81	0,41023032
39	12,917424	0,59	0,7664	0,3481	9,81	0,41486328
40	12,269724	0,6	0,7664	0,36	9,81	0,4245864
41	11,4367056	0,61	0,7664	0,3721	9,81	0,4300728
42	11,4866928	0,62	0,7664	0,3844	9,81	0,4322064
43	11,6869464	0,63	0,7664	0,3969	9,81	0,4331208
44	10,3866696	0,64	0,7664	0,4096	9,81	0,44976288
45	9,6368616	0,65	0,7664	0,4225	9,81	0,45927264
46	10,7871768	0,66	0,7664	0,4356	9,81	0,4451604
47	10,6707432	0,67	0,7664	0,4489	9,81	0,44918376
48	10,8709968	0,68	0,7664	0,4624	9,81	0,45915072
49	11,0712504	0,69	0,7664	0,4761	9,81	0,47509176
50	11,271504	0,7	0,7664	0,49	9,81	0,5175504

Estimasi Scour Akibat Arus dan Gelombang

$$\frac{ds}{D} = \frac{ds_{cur}}{D} F$$

dengan

Untuk  $0, U_c/U_c+U_m \leq 0.7$

$$F = \frac{5}{3} (Kc)^a \exp(2.3b)$$

Untuk  $0.7, U_c/U_c+U_m \leq 1$

$$F = 1$$

		menghitung nilai kedalaman scour akibat arus dan gelombang					
		kp	Uc	Um	Uc/(Uc+Um)	Dscur	Ds/D
Deep	0	0,165	0,0036	0,9786	0,1988	0,2594	
	1	0,171	0,0039	0,9777	0,2004	0,2615	
	2	0,177	0,0041	0,9774	0,2018	0,2633	
	3	0,183	0,0041	0,9781	0,2024	0,2640	
	4	0,189	0,0044	0,9772	0,2030	0,2649	
	5	0,195	0,0044	0,9779	0,2034	0,2653	
	6	0,201	0,0044	0,9786	0,2039	0,2660	
	7	0,207	0,0047	0,9778	0,2041	0,2663	
	8	0,213	0,0047	0,9784	0,2054	0,2680	
	9	0,219	0,0050	0,9777	0,2057	0,2684	
	10	0,225	0,0053	0,9770	0,2085	0,2720	
	11	0,231	0,0068	0,9714	0,2114	0,2759	
	12	0,237	0,0073	0,9701	0,2132	0,2782	
	13	0,243	0,0078	0,9689	0,2150	0,2806	
	14	0,249	0,0083	0,9677	0,2175	0,2838	
15	0,255	0,0088	0,9666	0,2197	0,2867		

	16	0,261	0,0094	0,9652	0,2221	0,2898
	17	0,267	0,0100	0,9639	0,2249	0,2934
	18	0,273	0,0132	0,9539	0,2313	0,3017
	19	0,279	0,0132	0,9548	0,2318	0,3025
	20	0,285	0,0140	0,9532	0,2353	0,3070
Intermediate	21	0,291	0,0159	0,9482	0,2412	0,3148
	22	0,297	0,0193	0,9390	0,2490	0,3249
	23	0,303	0,0219	0,9326	0,2560	0,3341
	24	0,309	0,0250	0,9251	0,2651	0,3459
	25	0,315	0,0284	0,9173	0,2764	0,3606
	26	0,321	0,0324	0,9083	0,2901	0,3785
	27	0,327	0,0369	0,8986	0,3063	0,3997
	28	0,333	0,0452	0,8805	0,3252	0,4243
	29	0,339	0,0523	0,8663	0,3478	0,4538
	30	0,345	0,0644	0,8427	0,3812	0,4974
Shallow	31	0,351	0,1050	0,7697	0,4290	0,5598
	32	0,357	0,1223	0,7448	0,4467	0,5828
	33	0,363	0,1223	0,7480	0,4507	0,5881
	34	0,369	0,1223	0,7511	0,4510	0,5885
	35	0,375	0,1223	0,7541	0,4440	0,5793
	36	0,381	0,1050	0,7840	0,4123	0,5380
	37	0,387	0,0553	0,8750	0,3593	0,4688
	38	0,393	0,1031	0,7922	0,4102	0,5353
	39	0,399	0,1030	0,7948	0,4149	0,5413
	40	0,405	0,1112	0,7846	0,4246	0,5540

41	0,411	0,1112	0,7871	0,4301	0,5612
42	0,417	0,1111	0,7896	0,4322	0,5639
43	0,423	0,1111	0,7920	0,4331	0,5651
44	0,429	0,1223	0,7782	0,4498	0,5869
45	0,435	0,1222	0,7807	0,4593	0,5993
46	0,441	0,1223	0,7829	0,4452	0,5808
47	0,447	0,1223	0,7852	0,4492	0,5861
48	0,453	0,1222	0,7876	0,4592	0,5991
49	0,459	0,1323	0,7763	0,4751	0,6199
50	0,465	0,1433	0,7644	0,5176	0,6753

Estimasi Lebar Scour

$$\frac{W}{D} = 0,35KC^{0,65}$$

Prediksi Lebar Lubang scouring						
KP	depth	h/Lo	periode gelombang	Um	KC	lebar scour
0	59,537	0,743	7,6	0,132	1,306	0,416
1	58,632	0,732	7,6	0,134	1,326	0,420
2	57,787	0,722	7,6	0,136	1,345	0,424
3	57,362	0,716	7,6	0,137	1,355	0,426
4	57,187	0,714	7,6	0,137	1,359	0,427
5	56,937	0,711	7,6	0,138	1,365	0,428
6	56,386	0,704	7,6	0,139	1,378	0,431
7	55,737	0,696	7,6	0,141	1,395	0,434
8	55,512	0,693	7,6	0,141	1,400	0,436
9	54,687	0,683	7,6	0,143	1,421	0,440
10	54,157	0,676	7,6	0,145	1,435	0,443
11	54,138	0,676	7,6	0,145	1,436	0,443
12	52,787	0,659	7,6	0,148	1,472	0,450
13	51,987	0,649	7,6	0,151	1,495	0,455
14	50,677	0,633	7,6	0,155	1,534	0,462
15	49,737	0,621	7,6	0,158	1,563	0,468
16	48,687	0,608	7,6	0,161	1,596	0,474
17	47,462	0,593	7,6	0,165	1,638	0,482
18	46,017	0,575	7,6	0,170	1,689	0,492
19	45,687	0,571	7,6	0,172	1,701	0,494
20	44,212	0,552	7,6	0,177	1,758	0,505
21	42,137	0,526	7,6	0,186	1,845	0,521
22	40,087	0,501	7,6	0,196	1,939	0,538
23	37,987	0,474	7,6	0,206	2,046	0,557
24	35,304	0,441	7,6	0,222	2,202	0,585
25	33,555	0,419	7,6	0,234	2,316	0,604
26	28,476	0,356	7,6	0,275	2,730	0,672
27	24,804	0,310	7,6	0,316	3,134	0,735
28	21,687	0,271	7,6	0,361	3,584	0,802
29	18,162	0,227	7,6	0,432	4,280	0,901
30	14,420	0,180	7,6	0,544	5,390	1,046
31	11,909	0,149	7,6	0,658	6,527	1,185
32	10,654	0,133	7,6	0,736	7,296	1,274



33	10,175	0,127	7,6	0,770	7,639	1,312
34	10,387	0,130	7,6	0,755	7,483	1,295
35	10,887	0,136	7,6	0,720	7,140	1,256
36	13,304	0,166	7,6	0,589	5,842	1,102
37	16,687	0,208	7,6	0,470	4,658	0,951
38	12,087	0,151	7,6	0,648	6,431	1,173
39	12,917	0,161	7,6	0,607	6,017	1,124
40	12,270	0,153	7,6	0,639	6,335	1,162
41	11,437	0,143	7,6	0,685	6,796	1,216
42	11,487	0,143	7,6	0,682	6,767	1,213
43	11,687	0,146	7,6	0,671	6,651	1,199
44	10,387	0,130	7,6	0,755	7,483	1,295
45	9,637	0,120	7,6	0,813	8,066	1,360
46	10,787	0,135	7,6	0,727	7,205	1,263
47	10,671	0,133	7,6	0,735	7,284	1,272
48	10,871	0,136	7,6	0,721	7,150	1,257
49	11,071	0,138	7,6	0,708	7,021	1,242
50	11,272	0,141	7,6	0,695	6,896	1,228

### Perhitungan *Freespan*

Untuk menganalisa *freespan*, dibutuhkan data atau pengukuran secara visual untuk mendapatkan panjang span aktual berdasar batimetri yang ada. Dari batimetri yang ada didapatkan nilai span di tiap titik sepanjang jalur pipa.

#### Perhitungan span aktual

16 Inch Pipeline PP Platform To ORF								
Span No.	Start of Span			End of Span			Height	Length
	Easting	Northing	Kp	Easting	Northing	KP	(m)	(m)
Span 1	707,895	9.276.030	10,455	707.888	9.276.049	10,475	0,272	20
Span 2	707,026	9.278.679	22,244	707.018	9.278.699	22,261	0,325	17
Span 3	706,220	9.281.491	35,179	706.216	9.281.505	35,23	0,579	51

Setelah menghitung panjang span aktual serta gap, maka dilanjutkan untuk menghitung panjang span maksimum.

$$L_{max} = \sqrt{\frac{(C Ur Dtot)}{(V* + U*)2\pi}} \sqrt{\frac{E_{pipa} I_{pipa}}{W_{eff}}} =$$

$$L_{max} \text{ Shallow} = 37,86 \text{ m}$$

$$L_{max} \text{ Intermediate} = 52,99 \text{ m}$$

$$L_{max} \text{ Deep} = 66,25 \text{ m}$$

Dengan demikian akan terlihat span mana yang mengalami kondisi kritis, namun nilai lain harus juga dihitung seperti Pcr, defleksi, frekuensi natural untuk memastikan bahwa span tersebut berada di kondisi kritis.

#### Perhitungan span maksimum

Span Aktual (m)	Span Maksimum (m)	Kondisi
20	66,249	Aman
17	52,999	Aman
51	37,857	Kritis

## Perhitungan Pcr

Pcr adalah nilai kemampuan sebuah bentangan untuk menahan beban yang mengenai struktur tersebut, jika beban yang diterima melebihi nilai dari Pcr maka dapat dinyatakan bahwa struktur pipa akan mengalami *buckling*. Umumnya semakin panjang suatu bentangan maka nilai Pcr akan kecil. Sebelum menghitung nilai Pcr, dilakukan menghitung variabel yang lain.

$$Kc = 0,25 \text{ (aspalt)} \quad (\text{parameter deformasi concrete})$$

$$CSF = Kc \times \left( \frac{Ec \cdot Ic}{E_{pipa} \cdot I_{pipa}} \right)^{0.75} \quad (\text{faktor kekakuan concrete})$$

$$CSF = 0,33 \times \left( \frac{29990 \times 2,5 \cdot 10^{-5}}{207000 \times 1,5 \cdot 10^{-5}} \right)^{0.75} = 1,249$$

$$Pcr = (1 + CSF) \left( \frac{C2 \cdot \pi^2 EI}{L^2} \right)$$

$$Pcr = (1 + 1,249) \left( \frac{4 \times 3,14^2 \times 207000 \cdot 10^6 \times 1,5 \cdot 10^{-5}}{L^2} \right)$$

Beban terbesar untuk nilai Pcr adalah dari arah *crossflow*, yang dirumuskan sebagai berikut :

$$Pcr \text{ batas} = (\text{beban hidrostatik} + W_{tot}) - (B + F \cdot z)$$

$$Pcr \text{ batas span 20m} = 1417342,672$$

$$Pcr \text{ batas span 17m} = 2214597,925$$

$$Pcr \text{ batas span 51m} = 4340611,932$$

### Perhitungan nilai Pcr

L span (m)	Pcr (N/m)	Beban terbesar (N/m)	Kondisi
20,000	15551545,405	1417342,672	Aman
17,000	21524630,318	2214597,925	Aman
51,000	2391625,591	4340611,932	Kritis

## Perhitungan Defleksi

Perhitungan defleksi diperlukan untuk menghitung seberapa panjang defleksi yang terjadi baik dari *inline* maupun *crossflow*. Umumnya semakin panjang bentangan maka defleksi yang terjadi semakin panjang namun panjangnya defleksi juga bergantung pada beban yang diterima oleh bentangan. Untuk beban arah *inline* bergantung pada gaya drag serta inersia, dan untuk *crossflow* bergantung pada tekanan hidrostatis, berat pipa, gaya *lift*, serta *bouyancy*.

$$\delta = C_6 \left( \frac{q L^4}{EI (1+CSF)} \right)$$

$$\delta = 0,0026 \left( \frac{q L^4}{207000 \times 10^6 \times 1,5 \times 10^{-5} (1+0,95)} \right)$$

$$q \text{ untuk } inline = 195,006 \text{ N/m}$$

$$q \text{ untuk } crossflow = 553038,750 \text{ N/m}$$

### Perhitungan defleksi

L Span (m)	Defleksi Inline (cm)	Defleksi Cross (cm)	Defleksi Batas (m)	Kondisi
20	$6,439 \times 10^{-6}$	0,0183	7,664	Aman
17	$5,473 \times 10^{-6}$	0,0155	7,664	Aman
51	$1,642 \times 10^{-6}$	0,0466	7,664	Aman

Dari perhitungan diatas untuk defleksi pada semua bentangan arah *inline* dan *crossflow* masih bisa dikatakan aman dikarenakan masih dibawah batas ijin.

## Perhitungan Frekuensi Natural

Perhitungan frekuensi natural dilakukan karena adanya defleksi yang terjadi pada pipa, serta untuk memberi kepastian apakah pipa akan berosilasi atau tidak. Pipa akan berosilasi jika nilai dari frekuensi *vortex shedding* lebih besar dari 0,7 kali frekuensi natural pipa. Frekuensi natural dibagi menjadi 2 yaitu *inline* dan *crossflow* berdasar defleksi yang ada.

$$f_n = C_1 \sqrt{1 + CSF \sqrt{\frac{EI}{W_{eff} \times L^4} + (C_3 (\delta/D)^2)}} \quad (\text{Frekuensi natural})$$

**Tabel 7.** Perhitungan frekuensi natural

L Span (m)	Defleksi In (m)	Defleksi Cross (m)	fn inline (Hz)	fn cross (Hz)	0,7 fn inline (Hz)	0,7 fn cross (Hz)	Vs	Kondisi
20	$6,439 * 10^{-8}$	0,000183	2,837	2,837	1,986	1,986	0,143	tidak osilasi
17	$5,473 * 10^{-8}$	0,000155	3,926	3,926	2,748	2,748	0,179	tidak osilasi
51	$1,642 * 10^{-8}$	0,000466	0,436	0,436	0,305	0,305	0,251	tidak osilasi

## BIODATA PENULIS



Aditya Ramadhani Widiatma, anak pertama dari dua bersaudara dari Dian Trieratma S.E dan Wiwik Sulistyawati S.H., dilahirkan 22 tahun yang lalu, tepatnya pada tanggal 20 Maret 1993 di Surabaya, Jawa Timur. Penulis menyelesaikan pendidikan formal pertamanya pada jenjang pendidikan dasar di SDN Manukan Kulon 3, Surabaya pada tahun 2005 dan melanjutkannya di SMP Negeri 26 Surabaya hingga tahun 2008, serta menyelesaikan jenjang Pendidikan Menengahnya di SMA Negeri 9 Surabaya pada tahun 2011. Setelah lulus dari SMA, penulis melanjutkan pendidikan dengan mengambil jenjang Pendidikan Tinggi Strata 1 di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama menempuh masa perkuliahan, penulis cukup aktif di beberapa organisasi kemahasiswaan dan kepanitiaan, khususnya dalam bidang keilmiahan. Dalam bidang oraganisasi kemahasiswaan, penulis pernah menjadi staff Hubungan Luar BEM FTK pada tahun 2012/2013, menjadi anggota Dewan Perwakilan Mahasiswa FTK tahun 2012/2013 serta menjadi kadiv kompetisi dan delegasi Society of Petroleum Engineers ITS tahun 2013/2014. Penulis juga berkesempatan untuk melaksanakan kerja praktik selama 2 bulan di PT. Perusahaan Gas Negara SBU II , Surabaya, Jawa Timur. Selama masa studi, penulis sangat tertarik dengan bidang ahli perancangan dan produksi bangunan laut sehingga hal itulah yang mendasari penulis untuk membuat tugas akhir ini dengan fokus *offshore pipeline*. Penulis dapat dihubungi melalui [aditya.widiatma@gmail.com](mailto:aditya.widiatma@gmail.com).