



**TUGAS AKHIR – MO 141326**

**ANALISIS ON-BOTTOM STABILITY DAN LOCAL  
BUCKLING: STUDI KASUS PIPA BAWAH LAUT DARI  
PLATFORM ULA MENUJU PLATFORM UW**

**CLINTON SIBUEA  
NRP. 4312 100 115**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.  
Ir. Imam Rochani, M.Sc**

**JURUSAN TEKNIK KELAUTAN  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya**



*FINAL PROJECT – MO 141326*

*ON-BOTTOM STABILITY AND LOCAL BUCKLING  
ANALYSIS: CASE STUDY – SUBMARINE PIPELINE FROM  
ULA PLATFORM TO UW PLATFORM*

**CLINTON SIBUEA**  
**REG. 4312 100 115**

**Supervisors**

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

**Ir. Imam Rochani, M.Sc**

**DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING**  
**Faculty of Marine Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute Of Technology**  
**Surabaya 2016**

**ANALISIS ON-BOTTOM STABILITY DAN LOCAL BUCKLING:  
STUDI KASUS PIPA BAWAH LAUT DARI PLATFORM ULA  
MENUJU PLATFORM UW**

**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 Surabaya

Oleh :

**CLINTON SIBUEA**

NRP. 4312 100 115

Disetujui oleh :

1. Dr. Yeyes Mulyadi, ST, M.Sc (Pembimbing 1)

2. Ir. Imam Rochani, M.Sc (Pembimbing 2)

3. Yoyok Setyo Hadiwidodo, ST, MT, Ph.D (Penguji 1)

4. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T (Penguji 2)

5. Agro Wisudawan, S.T., M.T (Penguji 3)

SURABAYA, MARET 2016

**ANALISIS ON-BOTTOM STABILITY DAN LOCAL BUCKLING:  
STUDI KASUS PIPA BAWAH LAUT DARI PLATFORM ULA  
MENUJU PLATFORM UW**

**Nama Mahasiswa** : Clinton Sibuea  
**NRP** : 4312100115  
**Jurusan** : Teknik Kelautan FTK – ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Yeyes Mulyadi, ST, M.Sc  
Ir. Imam Rochani, M.Sc

**ABSTRAK**

*Pipa bawah laut merupakan suatu teknologi transportasi yang digunakan untuk mengangkut produk hidrokarbon. Industri minyak dan gas telah membuktikan bahwa menggunakan pipa bawah laut merupakan cara yang paling ekonomis untuk memindahkan fluida dalam skala besar. Pada penelitian ini, dilakukan analisis on-bottom stability dan local buckling pada pipa bawah laut dari platform ULA menuju platform UW milik PT.PHE ONWJ. Analisis on-bottom stability bertujuan untuk mengetahui apakah pipa bawah laut stabil secara vertikal dan lateral di dasar laut pada saat terkena beban hidrodinamis. Analisis local buckling bertujuan untuk menentukan panjang maksimum free span yang diijinkan agar pipa tidak mengalami buckling. Besar gaya horizontal pada kondisi instalasi dan operasi masing-masing adalah 405 N/m dan 1119 N/m. Besar gaya vertikal pada kondisi instalasi dan operasi masing-masing adalah 138 N/m dan 1058 N/m. Besar gaya tahanan tanah pada kondisi instalasi dan operasi masing-masing adalah 111 N/m dan 121 N/m. Berdasarkan kriteria absolute lateral static, pipa bawah laut tidak stabil secara lateral pada kondisi instalasi dan operasi karena berat terendam aktual lebih kecil dari berat terendam minimum yang harus dipenuhi agar stabil. Berdasarkan kriteria generalized parameter pipa bawah laut tidak stabil secara lateral pada kondisi operasi, namun stabil secara lateral pada kondisi instalasi. Panjang free span pipa bawah laut maksimum yang diijinkan agar tidak terjadi local buckling adalah 50 m.*

**Kata Kunci** : Pipeline, On-bottom Stability, Local Buckling

***ON-BOTTOM STABILITY AND LOCAL BUCKLING ANALYSIS:  
CASE STUDY – SUBMARINE PIPELINE FROM ULA  
PLATFORM TO UL PLATFORM***

**Student Name** : Clinton Sibuea  
**Reg. Number** : 4312100115  
**Department** : Teknik Kelautan FTK – ITS  
**Supervisors** : Dr. Yeyes Mulyadi, ST, M.Sc  
Ir. Imam Rochani, M.Sc

**ABSTRACT**

*Submarine pipeline is a transportation technology that is used for transporting hydrocarbon. Oil and gas industry has proven that the use of submarine pipelines is the most economical to transport fluids in a large scale. In this study, an analysis of on-bottom stability and local buckling on a submarine pipeline from the platform to the ULA platform belonging PT.PHE UW ONWJ. On-bottom stability analysis aims to determine whether the submarine pipeline vertically and laterally stable on the seabed when exposed to hydrodynamic loads. Local buckling analysis aims to determine allowable free span length of the pipeline in order to avoid pipeline buckling. Horizontal hydrodynamic force on the condition of the installation and operation is 405 N / m and 1119 N / m respectively. Vertical hydrodynamic force on the condition of the installation and operation is 138 N / m and 1058 N / m respectively. Soil passive resistance on the conditions of installation and operation is 111 N / m and 121 N / m respectively. Based on the criteria of absolute lateral static, submarine pipelines unstable laterally on installation and operating conditions for the actual submerged weight is smaller than the minimum submerged weight that must be fulfilled in order to be stable. Based on the criteria for generalized parameter submarine pipeline unstable laterally on the operating condition, but stable laterally on the installation conditions. Allowable pipeline free span length to avoid local buckling is 50 m.*

**Keyword** : Pipeline, On-bottom Stability, Local Buckling

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK .....	iv
KATA PENGANTAR.....	vi
UCAPAN TERIMAKASIH .....	vii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR NOTASI.....	xiv
DAFTAR SIMBOL.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xviii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1.    Latar Belakang Masalah .....	1
1.2.    Perumusan Masalah .....	3
1.3.    Tujuan Penelitian.....	3
1.4.    Manfaat Penelitian.....	3
1.5.    Batasan Masalah.....	3
1.6.    Sistematika Penulisan .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....	5
2.1.    Tinjauan Pustaka .....	5
2.2.    Teori Gelombang dan Beban Hidrodinamis.....	7
2.2.1.    Gambaran Umum .....	7

2.2.2	Gelombang dan Arus .....	7
2.2.3	Beban Hidrodinamis dan Kondisi Tanah .....	16
2.3	<i>On-bottom Stability</i> .....	23
2.3.1	Kombinasi Beban .....	23
2.3.2	Absolute Lateral Static.....	24
2.3.3	Generalized Parameter .....	27
2.3.4	Analisis Stabilitas Lateral Dinamis .....	28
2.3.5	Stabilitas Vertikal .....	29
2.4	Global Buckling .....	29
2.5	Local Buckling .....	30
2.5.1	Load Controlled Condition .....	31
2.5.2	Displacement Controlled Condition .....	33
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....		35
3.1.	Diagram Alir Metodologi Penelitian .....	35
3.2.	Prosedur Penelitian .....	37
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....		41
4.1.	Data Pipa dan Lingkungan .....	41
4.2	Gaya Hidrodinamis.....	44
4.3	Tahanan Tanah .....	45
4.4.	Stabilitas Vertikal .....	46
4.5	Absolute Lateral Static Stability.....	46
4.6	Generalized Parameter Stability .....	48
4.7	Local Buckling .....	48

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	51
5.1.    Kesimpulan .....	51
5.2.    Saran .....	52
DAFTAR PUSTAKA .....	53
LAMPIRAN A	
LAMPIRAN B	
BIODATA PENULIS	



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1: Kekasaran dasar laut (DnV RP F109, 2010) .....	15
Tabel 2.2: Koefisien beban puncak horizontal .....	25
Tabel 2.3: Koefisien beban puncak vertikal .....	26
Tabel 2.4: Faktor keamanan di North Sea .....	26
Tabel 2.5: Faktor keamanan di Gulf of Mexico dan Southern Ocean .....	26
Tabel 2.6: Faktor keamanan, kondisi siklon di North Sea .....	26
Tabel 2.7: Faktor keamanan, kondisi siklon di Gulf of Mexico .....	26
Tabel 4.1 : Data pipa .....	42
Tabel 4.2 : Data lingkungan.....	43
Tabel 4.3 : Data tanah .....	43
Tabel 4.4 : Gaya hidrodinamis horizontal (Instalasi dan Operasi).....	44
Tabel 4.5 : Gaya hidrodinamis vertikal (Instalasi dan operasi ) .....	45
Tabel 4.6 : Gaya tahanan tanah (Instalasi dan operasi ) .....	46
Tabel 4.7 : Hasil analisis stabilitas vertikal pipa bawah laut .....	46
Tabel 4.8 : Berat terendam minimum <i>Absolute Lateral Static</i> .....	47
Tabel 4.9 : Berat terendam minimum <i>Generalized Parameter</i> .....	48
Tabel 4.10 : Hasil analisis <i>local buckling</i> pada <i>free span</i> .....	49

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Penggunaan pipa bawah laut .....	7
Gambar 2.2: Grafik validitas teori gelombang .....	9
Gambar 2.3: Kecepatan amplitudo signifikan, $U_s$ , pada dasar laut. ....	12
Gambar 2.4: Mean zero up-crossing period osilasi aliran, $T_u$ , pada dasar laut. ....	13
Gambar 2.5: Keulegan-Carpenter number, $K$ .....	14
Gambar 2.6: Definisi penetrasi .....	18
Gambar 2.7: Reduksi beban akibat penetrasi.....	19
Gambar 2.8: Parameter <i>trenching</i> .....	19
Gambar 2.9: Reduksi beban akibat <i>trenching</i> .....	20
Gambar 2.10: Tahanan pasif.....	21
Gambar 2.11: Gaya yang bekerja pada pipa .....	23
Gambar 2.26: Global buckling.....	30
Gambar 2.27: Local buckling .....	30
Gambar 4.1 : Lokasi <i>UL field</i> di Laut Jawa.....	41
Gambar 4.2 : Lokasi platform ULA dan UW di <i>UL field</i> .....	42
Gambar 4.3 : Model pipa dan arah pembebanan lingkungan .....	43
Gambar 4.4 : Grafik gaya hidrodinamis horizontal .....	44
Gambar 4.5 : Grafik gaya hidrodinamis vertikal .....	45
Gambar 4.6 : Grafik Berat Terendam Minimum ( $W_{s,min}$ ) <i>Absolute Lateral Static</i> .....	47
Gambar 4.7 : Grafik Berat Terendam Minimum ( $W_{s,min}$ ) <i>Generalized Parameter</i> .....	48

## DAFTAR NOTASI

$A_p$	: Area luar pipa
$b$	: <i>Buoyancy</i> pipa
$d$	: Kedalaman air
$d_{50}$	: Ukuran butiran tanah rata-rata
$D$	: Diameter luar pipa
$g$	: Percepatan gravitasi
$G$	: <i>Transfer function</i>
$G_c$	: Parameter kekuatan tanah ( <i>clay</i> )
$G_s$	: Parameter kekuatan tanah ( <i>sand</i> )
$F_Y$	: Beban hidrodinamis horizontal ( <i>drag</i> dan <i>inertia</i> )
$F_z$	: Beban hidrodinamis vertikal ( <i>lift</i> )
$F_R$	: Gaya tahanan pasif tanah
$F_C$	: Interaksi gaya vertikal antara pipa dan tanah
$H_s$	: Tinggi gelombang signifikan
$H^*$	: Tinggi gelombang maksimum
$k$	: Angka gelombang
$k_T$	: Rasio antara periode maksimum dan periode rata-rata
$k_U$	: Rasio antara kecepatan osilasi maksimum dan rata-rata
$K$	: Angka <i>Keulegan-Carpenter</i>
$K^*$	: Angka <i>Keulegan-Carpenter</i> pada kondisi ekstrim
$L$	: Parameter berat signifikan
$L^*$	: Parameter berat pada kondisi ekstrim
$M$	: Rasio kecepatan arus dan kecepatan orbital gelombang
$M^*$	: Rasio kecepatan arus dan kecepatan orbital gelombang pada kondisi ekstrim.
$M_{sd}$	: <i>Design moment</i>

$N$	: Faktor percepatan spektra
$p_i$	: Tekanan internal
$p_e$	: Tekanan eksternal
$p_b$	: <i>Burst pressure</i>
$p_{min}$	: Tekanan internal minimum
$r_{tot}$	: Faktor reduksi beban
$r_{pen}$	: Faktor reduksi beban karena penetrasi
$r_{tr}$	: Faktor reduksi beban karena <i>trenching</i>
$r_{perm}$	: Faktor reduksi beban karena <i>permeable seabed</i> .
$R_D$	: Faktor reduksi akibat sudut spektra
$S_{sd}$	: <i>Design effective axial force</i>
$s_g$	: <i>pipe specific density</i>
$s_u$	: <i>Un-drained clay shear strength</i>
$S_{\eta\eta}$	: <i>Wave spectral density</i>
$T_u$	: <i>zero up-crossing period</i>
$T_u$	: Periode rata-rata
$T_n$	: <i>Reference period</i>
$T^*$	: Periode maksimum
$T_p$	: <i>Peak period</i>
$U_w$	: Kecepatan rata-rata partikel air akibat gelombang
$U^*$	: Kecepatan maksimum partikel air akibat gelombang
$V$	: Kecepatan rata-rata arus
$V^*$	: Kecepatan maksimum arus
$w_s$	: Berat terendam pipa satuan panjang
$y$	: Perpindahan lateral pipa
$z$	: Elevasi di atas dasar laut
$z_r$	: Tinggi referensi dari dasar laut
$z_0$	: <i>Bottom roughness parameter</i>

$z_p$  : Kedalaman penetrasi

$z_t$  : Kedalaman *trenching*

## DAFTAR SIMBOL

$\alpha$	: Konstanta philips
$\mu$	: Koefisien gesek
$\theta$	: <i>Shields parameter</i>
$\theta_c$	: Sudut antara arah arus dan pipa
$\theta_w$	: Sudut antara arah gelombang dan pipa
$\rho_w$	: Massa jenis air laut
$\gamma_{SC}$	: Faktor keamanan
$\gamma_w$	: Faktor keamanan
$\gamma'_s$	: Berat terendam tanah
$\tau$	: Jumlah osilasi pada spektra kecepatan di dasar laut
$\omega$	: Frekuensi gelombang
$\omega_p$	: Frekuensi maksimum gelombang
$\gamma_\epsilon$	: Faktor tahanan regangan
$\alpha_{gw}$	: <i>Girth weld factor</i>

## DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A      *ON BOTTOM STABILITY*

LAMPIRAN B      *LOCAL BUCKLING*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang Masalah**

PT. Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java (PHE ONWJ) adalah anak perusahaan PT. Pertamina Hulu Energi. Perusahaan ini menyelenggarakan usaha hulu di bidang minyak dan gas bumi. Wilayah kerja PHE ONWJ mencakup area sekitar 8.300 kilometer persegi di Laut Jawa yang terletak di utara Kepulauan Seribu sampai perairan utara Cirebon. Hingga Juni 2015, PHE ONWJ berhasil mencapai rata-rata produksi sebesar 40.400 barel minyak per hari (BOPD). Sedangkan produksi gas bumi PHE ONWJ mencapai 173 MMSCFD. Produksi minyak dan gas bumi PHE ONWJ disalurkan seluruhnya untuk kebutuhan strategis nasional seperti BBM, pembangkit listrik dan bahan baku pembuatan pupuk.

Wilayah kerja yang terletak di laut lepas membuat perusahaan memerlukan banyak teknologi canggih untuk menjalankan kegiatan operasi hulu minyak dan gas. Fasilitas yang dimiliki PHE ONWJ terdiri dari lebih dari 200 struktur platform, 404 jaringan pipa bawah laut sepanjang 1900 kilometer.

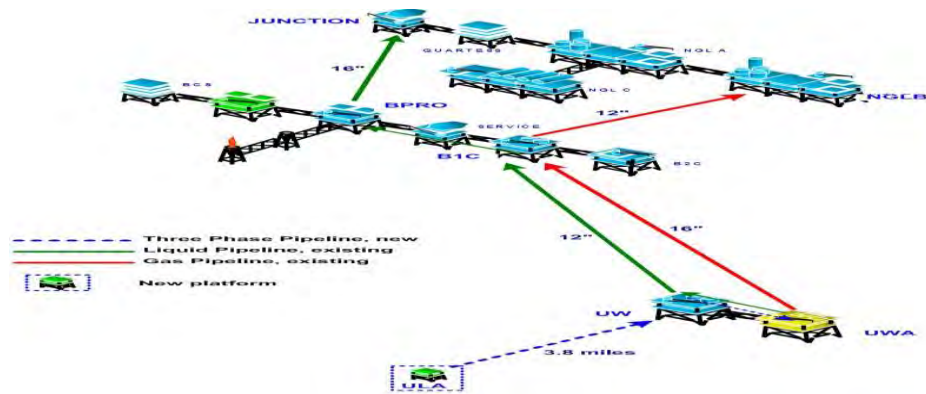
Pipa bawah laut merupakan suatu teknologi transportasi yang digunakan untuk mengangkut produk hidrokarbon seperti minyak mentah, gas alam bertekanan tinggi, dan kondensat yang relative rendah. Fluida yang dibawa pipa bawah laut dalam jumlah besar dan jarak yang jauh dilewatkan melalui jalur laut atau lepas pantai. Pipa bawah laut dapat bekerja 24 jam sehari, 265 hari dalam setahun selama umur pipa yang bisa mencapai 30 tahun atau bahkan lebih (Soegiono, 2007).

Industri minyak dan gas telah membuktikan bahwa menggunakan pipa bawah laut merupakan cara yang paling ekonomis untuk memindahkan fluida dalam skala besar. Hal tersebut dikarenakan operasi penyaluran fluida dengan pipa bawah laut bersifat kontiniu dan handal. Pipa bawah laut telah menunjukkan kemampuan untuk bertahan pada berbagai macam kondisi lingkungan yang buruk (Guo *et al*, 2005). Namun, jika pipa bawah laut mengalami kegagalan akan menimbulkan



kerugian ekonomi dan lingkungan yang sangat besar, sehingga perancangannya memerlukan banyak analisis (Tian *et al.*, 2015).

Analisis *on-bottom stability* merupakan salah satu analisis utama pada perancangan pipa bawah laut. Analisis *on-bottom stability* bertujuan untuk menentukan berat minimum pipa agar dapat stabil di dasar laut (Bai dan Bai, 2005). Pipa bawah laut dikatakan stabil apabila gaya tahanan tanah lebih besar daripada gaya akibat beban hidronamis yang bekerja pada pipa (Teh *et al.*, 2006).



Gambar 2.1 : UL Field PHE ONWJ

Saat ini, DnV RP F109 adalah code yang sering digunakan untuk analisis stabilitas pipa bawah laut. Sehingga, pada penelitian ini dilakukan analisa stabilitas pipa bawah laut dari platform ULA ke UW sepanjang 3,8 mil dengan menggunakan DnV RP F109 revisi tahun 2010.

Pada kondisi operasional pipa bawah laut, sering terjadi scouring tanah di bawah pipa yang menyebabkan free span pada pipa bawah laut. Sehingga perlu juga dilakukan analisis local buckling pada free span pipa bawah laut.

## 1.2 Perumusan Masalah

Adapun perumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Berapa besar gaya eksternal yang bekerja pada pipa di dasar laut berdasarkan DnV?
2. Apakah pipa bawah laut memenuhi kriteria *on-bottom stability* berdasarkan DnV?
3. Berapa panjang maksimum *free span* agar tidak terjadi *local buckling* pada pipa bawah laut berdasarkan DnV?

## 1.3 Tujuan

Adapun tujuan penelitian ini adalah :

1. Mengetahui besarnya gaya eksternal yang bekerja pada pipa bawah laut berdasarkan DnV.
2. Mengetahui apakah pipa bawah laut memenuhi kriteria *on-bottom stability* berdasarkan DnV.
3. Mengetahui panjang maksimum *free span* agar tidak terjadi *local buckling* berdasarkan DnV.

## 1.4 Manfaat

Setelah hasil dari analisis didapatkan, diharapkan dapat menjadi suatu acuan dalam menghitung berat minimum pipa agar dapat stabil di dasar laut dan menghitung panjang maksimum *free span* .

## 1.5 Batasan Masalah

1. Studi kasus pada UL field PHE ONWJ.
2. Kode yang dipakai adalah DNV RP F109 (2010), DNV OS F101 (2013).
3. Pipa bawah laut yang analisis adalah pada kondisi setelah instalasi (kosong) dan operasi (berisi fluida).
4. Kondisi arus dalam keadaan *steady flow*.
5. Pipa bawah laut dalam keadaan meletak bebas atau tidak ditambah.
6. Dasar laut diasumsikan datar.
7. Tidak ada *trenching*.

8. Tidak ada arbsorbsi air pada *concrete*.

### **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

#### **Bab I Pendahuluan**

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang penulisan, permasalahan yang dibahas dalam penulisan, tujuan yang ingin dicapai, manfaat, serta batasan masalah yang digunakan dalam Tugas Akhir ini .

#### **Bab II Tinjauan Pustaka dan Landasan Teori**

Pada bab ini penulis akan membahas tinjauan pustaka dan dasar teori yang menjadi sumber referensi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Secara rinci bab ini berisikan tinjauan pustaka yang menjadi acuan dari penelitian tugas akhir, dasar-dasar teori, rumus-rumus dan *code/rules* yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini dicantumkan dalam bab ini.

#### **Bab III Metodologi Penelitian**

Pada bab ini menerangkan langkah-langkah pengerjaan yang dilakukan, diawali dari studi literatur, pengumpulan data, kemudian analisis.

#### **Bab IV Hasil dan Pembahasan**

Pada bagian ini akan menampilkan hasil yang telah didapat dari perhitungan yang dilakukan, evaluasi dari *code/rule* yang dipakai serta membahas hasil yang telah didapat

#### **Bab V Kesimpulan dan Saran**

Bab ini berisi kesimpulan yang dapat ditarik dari keseluruhan hasil analisa dan pembahasan. Pada bab ini juga berisikan saran sebagai tindak lanjut penelitian untuk permasalahan terkait.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Analisis *on-bottom stability* merupakan analisis yang sangat kompleks dengan banyak bidang yang harus diintegrasikan, yaitu karakteristik tanah, *seabed liquefaction*, scouring, *sediment transport*, arus laut, gelombang laut. Namun, salah satu permasalahan utama pada pipa bawah laut adalah ketidakstabilan akibat gelombang laut (Herbich, 1985).

Ghebreghiorghis (2014) mengatakan jika pipa bawah laut terlalu ringan, maka pipa akan bergerak secara lateral dan vertikal karena gaya hidronamis dan gaya apung. Ketidakstabilan dapat menimbulkan regangan dan tegangan yang bersifat siklis pada pipa yang selanjutnya menyebabkan pipa mengalami kegagalan. Jika pipa bawah laut terlalu berat, maka proses instalasinya menjadi sulit dan mahal karena keterbatasan kapal instalasi dan *tensioner*.

Teori *Coulomb friction* menjelaskan interaksi pipa dan tanah untuk memastikan pipa tidak berpindah secara lateral. Sampai tahun 1970-an, teori *Coulomb friction* merupakan satu-satunya cara untuk memperkirakan tahanan tanah terhadap perpindahan pipa bawah laut akibat beban hidrodinamis. Pada teori ini, efek tahanan tanah karena tumpukan tanah yang terbentuk pada proses perpindahan pipa diabaikan (Jeng *et al.*, 2013).

Dalam beberapa dekade terakhir, seiring dengan pesatnya perkembangan industri minyak dan gas yang menggunakan pipa bawah laut sebagai alat untuk menyalurkan hidrokarbon, telah banyak peneliti yang fokus menyelesaikan permasalahan stabilitas pipa akibat gelombang laut (Brennodden *et al.*, 1989; Allen *et al.*, 1989; Foda *et al.*, 1990). Namun, permasalahan tidak sepenuhnya terselesaikan karena kompleksitas karakteristik tanah dan geometri pipa (Lawlor and Flynn, 1991).

Sejak tahun 1980-an, banyak studi eksperimen mengenai stabilitas pipa bawah laut yang tidak tertanam. Wagner *et al.* (1987) mengembangkan teori *Coulomb*

*friction* menjadi model empiris perilaku pipa terhadap tanah, dimana tahanan lateral total diasumsikan sebagai penjumlahan komponen *Coulomb friction* dan komponen *soil passive resistance*. Penelitian menunjukkan bahwa metode desain berdasarkan teori *Coulomb friction* terlalu konservatif. Pada studi eksperimen diatas, beban gelombang tidak dimodelkan dengan metode hidrodinamis tetapi digantikan dengan aktuator mekanis dan tidak diisi air ke dalam tangki.

Verley *et al.* (1987) mengembangkan model baru dalam memprediksi gaya hidrodinamis pada pipa bawah laut, yaitu dengan studi perbandingan pemodelan hidrodinamis di laboratorium dan di lapangan. Berdasarkan banyak hasil pemodelan dengan program komputer PONDUS didapatkan parameter non-dimensional yang dapat digunakan untuk memprediksi perpindahan lateral pipa bawah laut (Lambrakos *et al.*, 1987).

Verley dan Sotberg (1992) menggunakan tiga sumber data uji coba pipa, PIPESTAB AGA dan DHI untuk mengembangkan dan validasi model tahanan tanah terhadap pipa. Dari penelitian tersebut didapatkan formula *passive resistance* untuk memperhitungkan tahanan tanah karena tumpukan tanah yang terbentuk pada proses perpindahan pipa.

DNV RP E305 (1988) diterbitkan untuk analisis *on-bottom stability* berdasarkan studi hidrodinamis di lapangan pada proyek *pipeline stability* yang dilakukan oleh SINTEF (1983-1987). Analisis pada *code* ini tidak memperhitungkan efek penetrasi pipa bawah laut ke dalam tanah, sedangkan perpindahan lateral maksimal yang diijinkan adalah 20 meter.

DNV RP F109 (2007) diterbitkan untuk menggantikan DNV RP E305. Pada *code* ini efek penetrasi pipa diperhitungkan, namun tidak bisa digunakan untuk pipa yang sepenuhnya tertanam. Perpindahan lateral maksimal yang diijinkan pada *code* ini adalah 10 kali diameter. Revisi terbaru DNV RP F109 diterbitkan oleh DNV pada tahun 2010.

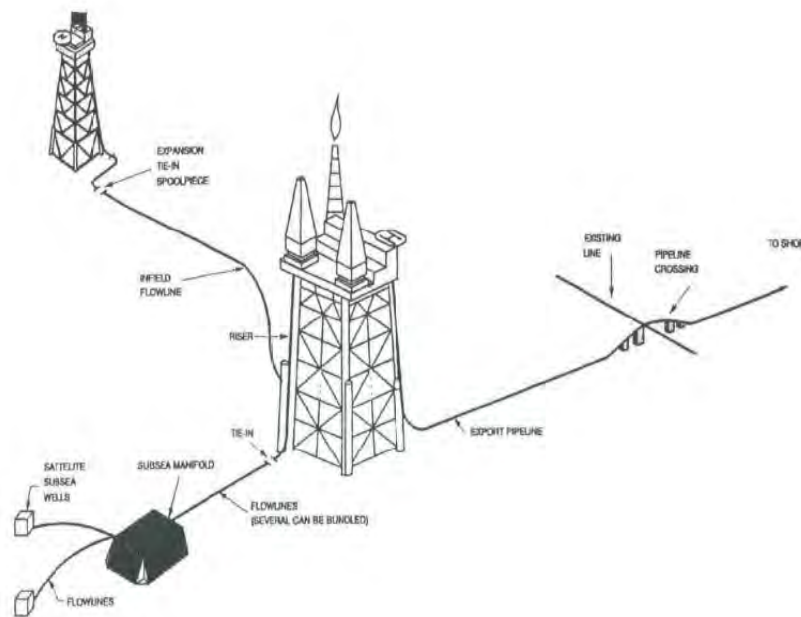
Dong *et al.* (2015) mengatakan *local buckling* adalah kegagalan yang sering terjadi pada free span. Beberapa penelitian tentang local buckling pada free span telah dilakukan. Contohnya, *imperfect pipeline on lateral buckling* berdasarkan

teori *thermal buckling* dan keandalan pipa bawah laut yang terkubur pada tanah lempung terhadap upheaval buckling.

## 2.2 Teori Gelombang dan Beban Hidronamis

### 2.2.1 Gambaran umum

Pipa bawah laut sudah digunakan secara luas untuk menyalurkan minyak dan gas dari sumur di lepas pantai ke fasilitas di darat. Pada banyak proyek pipa bawah laut, pipa yang tidak tertanam lebih dipilih dibandingkan dengan pipa yang tertanam secara keseluruhan untuk menghemat biaya dan efisiensi instalasi. Meskipun menguntungkan, pilihan ini menghadirkan beberapa tantangan desain. Penempatan pada kondisi laut dangkal membuat pipa rentan terhadap ketidakstabilan karena arus dan gelombang laut pada kondisi ekstrim (Jeng, 2013).



Gambar 2.1. Penggunaan pipa bawah laut (Bai dan Bai, 2005)

### 2.2.2 Gelombang dan Arus

#### a) Gelombang

Data gelombang berguna untuk prediksi gelombang ekstrim dengan metode statistik. Ketika data gelombang tidak mencukupi, desain gelombang menggunakan data angin. Model numerik gelombang dan arus menghasilkan

akurasi yang lebih handal untuk prediksi gelombang ekstrim di masa yang akan datang daripada pengukuran langsung. Kegunaan data pengukuran adalah untuk validasi model numerik (Palmer et al., 2008).

### **Teori Gelombang**

Gelombang laut merupakan gelombang acak. Namun, sekelompok data gelombang acak dapat dibentuk menjadi gelombang reguler yang dijelaskan dengan teori deterministik.

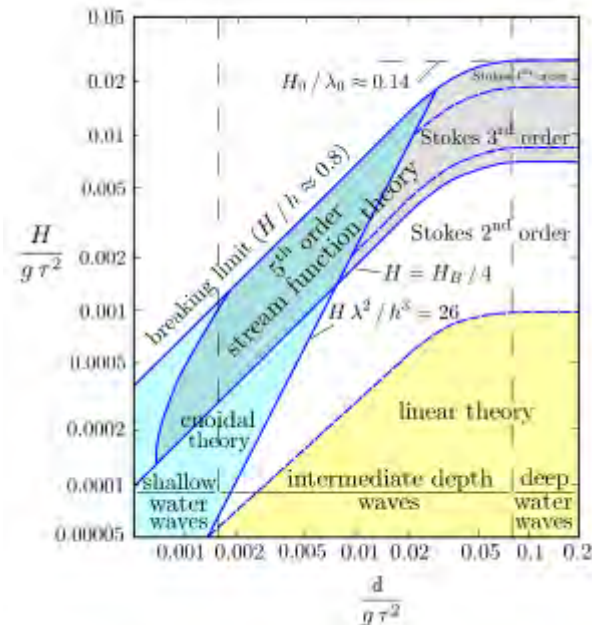
Penentuan teori gelombang yang akan digunakan dapat dilakukan dengan menggunakan grafik validitas yang disebut "*Region of Validity of Wave Theories*" dengan menggunakan parameter-parameter gelombang yang ada seperti tinggi gelombang (H) , periode gelombang (T), dan kedalaman air (d). Dengan pendekatan formulasi matematika (Mehaute, 1976), sehingga rumusan sebagai berikut :

$$\frac{H}{gT^2} \text{ dan } \frac{d}{gT^2} \tag{2.1}$$

Keterangan:

- H : Tinggi gelombang
- d : Kedalaman laut
- g : Percepatan gravitasi
- T : Periode gelombang

Hasil dari formulasi matematika tersebut kemudian disesuaikan dengan grafik Daerah Aplikasi Teori Gelombang seperti terlihat pada gambar 2.2, sehingga dapat diketahui teori gelombang yang digunakan.



Gambar 2.2: Grafik validitas teori gelombang (Mehaute, 1976)

Teori gelombang reguler digolongkan menjadi:

- Teori gelombang linear (Airy)
- Teori gelombang Stoke's orde 2 sampai 5
- Teori gelombang Solitary
- Teori gelombang Cnoidal
- Teori gelombang *Stream Function*

### Gelombang Kurun Waktu Pendek

Gelombang laut acak dalam kurun waktu pendek dapat dijelaskan dengan spektra gelombang. Spektra gelombang diberikan dalam bentuk tabel atau dengan parameterisasi formula analitis. Spektra *Pierson-Moskowitz* (PM) dan *JONSWAP* merupakan spektra yang sering digunakan. Spektra PM ditujukan untuk laut terbuka, sedangkan spektra *JONSWAP* merupakan formulasi yang dimodifikasi dari spektra PM untuk laut dengan batas *fetch*.

Spektrum *JONSWAP* didasarkan pada percobaan yang dilakukan di *North Sea*. Formula atau persamaan untuk spektrum *JONSWAP* dapat ditulis dengan modifikasi dari persamaan spektrum *Pierson-Moskowitz*, yaitu :



$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-4}\right] \gamma^{\exp\left[-0,5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma \cdot \omega_p}\right)^2\right]} \quad (2.1)$$

Keterangan:

- $\alpha$  : Konstanta Generalized Philips'
- $g$  : Percepatan gravitasi
- $\omega$  : Frekuensi gelombang
- $\gamma$  : *Peakness parameter*
- $\sigma$  : Parameter lebar spektra

Konstanta Generalized Philips' diberikan dengan:

$$\alpha = \frac{5}{16} \cdot \frac{H_s^2 \cdot \omega_p^4}{g^2} \cdot (1 - 0,287 \cdot \ln \gamma) \quad (2.2)$$

Keterangan:

- $\alpha$  : Konstanta Generalized Philips'
- $H_s$  : Tinggi gelombang signifikan
- $g$  : Percepatan gravitasi
- $\omega$  : Frekuensi gelombang
- $\gamma$  : *Peakness parameter*

Parameter lebar spektra diberikan dengan:

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{jika } \omega > \omega_p \end{cases} \quad (2.3)$$

*Peakness* yang digunakan adalah:

$$\gamma = \begin{cases} 5 & \text{jika } \phi \leq 3,6 \\ \exp(5,75 - 1,15\phi) & \text{jika } 3,6 \leq \phi \leq 5,0 ; \phi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \\ 1 & \text{jika } \phi \geq 5,0 \end{cases} \quad (2.4)$$

Spektrum PM menggunakan  $\gamma=1,0$ , sedangkan  $\gamma= 3,3$  biasanya diterapkan untuk analisis gelombang di Laut Utara. Suatu hal yang menarik, persamaan *JONSWAP* ini sekarang banyak dipakai oleh perusahaan-perusahaan minyak yang beroperasi di Indonesia dalam merancang anjungan dan fasilitas lautan lainnya, tetapi dengan mengambil harga  $\gamma$  yang lebih rendah yaitu berkisar 2,5 atau 2,0 ( Djatmiko, 2012).

Spektra kecepatan gelombang pada dasar laut  $S_{UU}(\omega)$  ditentukan dengan transformasi gelombang pada permukaan menggunakan:

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

Keterangan:

$S_{UU}$  : Spektra kecepatan air akibat gelombang di dasar laut

$G(\omega)$  : *Transfer function*

$S_{\eta\eta}$  : Spektra JONSWAP

Fungsi transfer  $G$  mentransformasi elevasi permukaan laut menjadi kecepatan gelombang pada dasar laut diberikan dengan:

$$G(\omega) = \frac{\omega}{\sinh(k \cdot d)}$$

dengan

$$\frac{\omega^2}{g} = k \cdot \tanh(k \cdot d) \quad (2.6)$$

Keterangan:

$\omega$  : Frekuensi gelombang

$g$  : Percepatan gravitasi

$k$  : angka gelombang

$d$  : Kedalaman laut

Momen spektra pada orde ke- $n$  didefinisikan dengan:

$$M_n = \int_0^\infty \omega^n \cdot S_{UU}(\omega) d\omega \quad (2.7)$$

Keterangan:

$M_n$  : Momen spektra

$\omega$  : Frekuensi gelombang

$S_{UU}$  : Spektra kecepatan air akibat gelombang di dasar laut

Kecepatan aliran signifikan pada pipa adalah:

$$U_s = 2\sqrt{M_0} \quad (2.8)$$

Keterangan:

$U_s$  : Kecepatan rata-rata di dasar laut

$M_0$  : Momen pertama spektra

Tidak direkomendasikan untuk mempertimbangkan efek *boundary layer* pada kecepatan gelombang. Mean zero up-crossing period dari osilasi aliran pada pipa adalah:

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \quad (2.9)$$

Keterangan:

$T_u$  : Periode rata-rata di dasar laut

$M_0$  : Momen pertama spektra

$M_2$  : Momen kedua spektra

Dengan asumsi teori gelombang linear,  $U_s$  bisa diambil dari Gambar 2.3 dan  $T_u$  dari gambar 2.4, dimana:

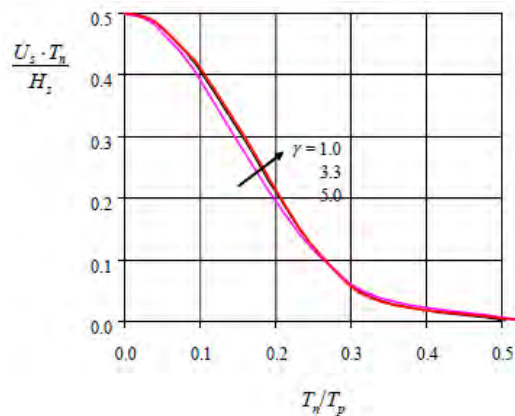
$$T_n = \sqrt{\frac{d}{g}} \quad (2.10)$$

Keterangan:

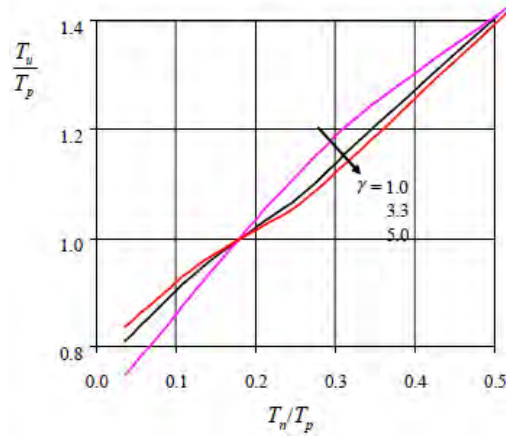
$T_n$  : *Reference period*

$d$  : Kedalaman laut

$g$  : Percepatan gravitasi



Gambar 2.3: Kecepatan amplitudo signifikan,  $U_s$ , pada dasar laut. (Dnv F109, 2010)



Gambar 2.4: Mean zero up-crossing period osilasi aliran,  $T_u$ , pada dasar laut (DnV F109, 2010).

Rasio antara kecepatan osilasi amplitudo ekstrim dan kecepatan yang didapatkan dari spektra pada osilasi  $\tau$  adalah:

$$k_U = \frac{U^*}{U_s} = \frac{1}{2} \cdot \left( \sqrt{2 \cdot \ln \tau} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \cdot \ln \tau}} \right) \quad (2.11)$$

Keterangan:

$k_U$  : Rasio antara kecepatan maksimum dan kecepatan rata-rata di dasar laut

$\tau$  : Jumlah osilasi pada keadaan badai

Rasio antara periode osilasi kecepatan ekstrim dan *average zero up-crossing period* (keduanya berada pada dasar laut) adalah:

$$k_T = \frac{T^*}{T_u} = \begin{cases} k_t - 5 \cdot (k_t - 1) \cdot T_n/T_u & \text{untuk } T_n/T_u \leq 0,2 \\ 1 & \text{untuk } T_n/T_u > 0,2 \end{cases} \quad (2.12)$$

dimana,

$$k_t = \begin{cases} 1,25 & \text{for } \gamma = 1,0 \\ 1,21 & \text{for } \gamma = 3,3 \\ 1,17 & \text{for } \gamma = 5,0 \end{cases}$$

Keterangan:

$k_T$  : Rasio antara periode maksimum dan periode rata-rata di dasar laut

$T_u$  : Periode rata-rata di dasar laut

$T_u$  : *Reference period*

$\gamma$  : *Peakness parameter*

### Ukuran Gelombang

Ukuran gelombang dapat dijelaskan dengan Keulegan-Carpenter number,  $K$ . Partikel air bergerak dengan lintasan berbentuk elips, nilai  $K$  menunjukkan perbandingan besar elips dibandingkan dengan diameter pipa. Fenomena ini ditunjukkan pada Gambar 2.5.

$$K = \frac{U_s \cdot T_u}{D} \quad (2.13)$$

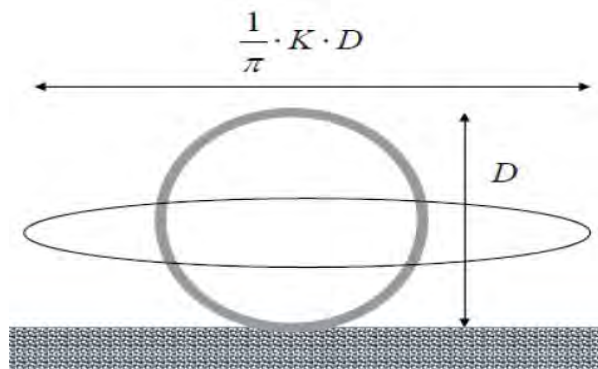
Keterangan:

$K$  : Angka gelombang

$U_s$  : Kecepatan rata-rata gelombang di dasar laut

$T_u$  : Periode rata-rata gelombang di dasar laut

$D$  : Diameter pipa



Gambar 2.5: Keulegan-Carpenter number,  $K$  (Ghebregiorghis, 2014)

### b) Arus Laut

Arus ditentukan dari analisis statistik data yang direkam dan simulasi model numerik. Arus *steady* pada pipa mempunyai keterkaitan dengan:

- Pasang surut
- Angin
- Gelombang akibat badai
- Densitas

Kecepatan arus rata-rata yang melewati pipa adalah:

$$V_c = V_c(z_r) \cdot \left( \frac{\left(1 + \frac{z_0}{D}\right) \cdot \ln\left(\frac{D}{z_0} + 1\right) - 1}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0} + 1\right)} \right) \cdot \sin \theta_c \quad (2.14)$$

Keterangan:

$V_c$  : Kecepatan arus pada pipa

$V_c(z_r)$  : Kecepatan arus acuan

$Z_0$  : Parameter kekasaran

$D$  : Diameter pipa

$\theta_c$  : Sudut antara arah datang arus dan pipa

Arah kecepatan arus diperhitungkan melalui  $\theta_c$  yang merupakan sudut antara kecepatan arus dan sumbu pipa. Jika tidak ada informasi yang tersedia mengenai  $\theta_c$ , maka arus diasumsikan bekerja tegak lurus dengan pipa.

Arus acuan,  $V_c(z_r)$ , diukur pada kedalaman yang variasi kecepatannya kecil pada arah horizontal. Pada dasar laut yang relatif datar, tinggi acuan bisa lebih besar 1 meter, tergantung dari kekasaran dasar lautnya.

Kecepatan arus dapat tereduksi karena efek dasar laut dan arah arus. Kecepatan arus yang tereduksi dijelaskan dengan:

$$V(z) = V(z_r) \cdot \left( \frac{\ln(z+z_0)}{\ln(z_r+z_0)} \right) \cdot \sin \theta_c \quad (2.15)$$

Keterangan:

$V_c$  : Kecepatan arus pada pipa

$V_c(z_r)$  : Kecepatan arus acuan

$Z_0$  : Parameter kekasaran

$\theta_c$  : Sudut antara arah datang arus dan pipa

Tabel 2.1: Kekasaran dasar laut (DnV F109, 2010)

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

### 2.2.3 Beban Hidrodinamis dan Kondisi Tanah

Analisis *on-bottom stability* dilakukan untuk memastikan stabilitas pipa, ketika terkena gaya gelombang dan arus, serta terkena beban internal dan eksternal lainnya (misalnya: beban *buckling* pada bagian yang melengkung).

Pipa bawah laut mengalami gaya hidrodinamis dari gelombang dan arus seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.14. Stabilitas hidrodinamis menggunakan persamaan Morison, yang mengaitkan gaya angkat, gaya inersia dan gaya *drag* akibat kecepatan dan percepatan partikel air. Pada kenyataannya variasi gaya sangat kompleks, ekspresi analitis sederhana dapat menjelaskan variasi gaya dengan metode pendekatan (Braestrup et al., 2005).

#### a. Beban dan koefisien beban

##### 1. Gaya *drag*

Gaya *drag* dipengaruhi oleh gelombang dan arus laut. Gaya *drag* menghasilkan tekanan yang tinggi di depan pipa dan tekanan yang rendah di belakang pipa. Namun, gelombang juga menimbulkan pusaran air di belakang pipa yang mempengaruhi besarnya gaya *drag*.

##### 2. Gaya inersia

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

##### 3. Gaya angkat

Gaya angkat muncul karena ada aliran yang bekerja pada pipa. Keberadaan dasar laut di bawah pipa mengakibatkan perbedaan bentuk aliran air di atas dan di bawah pipa. Hal tersebut membuat aliran menjadi lambat/tidak ada di bagian bawah pipa (tekanan tinggi) dan aliran di atas pipa semakin cepat (tekanan rendah). Perbedaan tekanan di bagian bawah dan atas pipa akan menyebabkan pipa terangkat.

Beban hidrodinamis dari gelombang dan arus laut dijelaskan dengan persamaan Morison berikut:

Gaya *Drag*

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_D \cdot |(U_s \cdot \cos \theta + U_c)(U_s \cdot \cos \theta + U_c)| \quad (2.16)$$

Gaya Inersia

$$F_I = (\pi \cdot D^2)/4 \cdot \rho_w \cdot C_M \cdot A_S \cdot \sin \theta \quad (2.17)$$

Gaya Angkat

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_L \cdot (U_s \cdot \cos \theta + U_c)^2 \quad (2.18)$$

Percepatan partikel air:

$$A_S = \frac{(2\pi \cdot U_s)}{T_u} \quad (2.19)$$

Sudut fase antara kecepatan dan percepatan partikel air maksimum adalah 90 derajat. Gaya *drag* dan angkat maksimum terjadi pada saat gaya inersia sama dengan nol dan gaya inersia maksimum terjadi ketika gaya angkat minimum.

Koefisien *drag*, inersia dan angkat ditentukan dengan cara empiris, tergantung dari variasi aliran. Koefisien *drag* dan angkat dipengaruhi oleh:

- *Reynold's number*
- Kekasaran pipa
- *Keulegan-Carpenter number* gelombang
- Penanaman pipa di tanah
- Karakteristik dasar laut.

Biasanya koefisien *drag*, inersia dan angkat pada pipa di dasar laut memiliki nilai:  $C_D= 0,7$ ;  $C_M= 3,29$ ;  $C_L= 0,9$  (Dnv E305, 1988)

Eksperimen menunjukkan bahwa perhitungan gaya menggunakan persamaan Morison kecepatan dan koefisien yang tidak bervariasi terhadap waktu terbukti tidak akurat untuk perhitungan perpindahan lateral, yang menghasilkan estimasi terlalu tinggi untuk perpindahan lateral. Hal ini karena pembentukan pusaran air yang mendorong pipa ke arah datangnya gelombang sebanyak setengah siklus dari total siklus gelombang (Hale et al., 1989). Penggunaan koefisien yang tergantung waktu dan kecepatan di dekat pipa menghasilkan peningkatan perhitungan gaya yang signifikan pada beban gelombang osilasi. Sehingga, digunakan koefisien reduksi beban untuk perhitungan gaya hidrodinamis.



## b. Reduksi Beban akibat Interaksi Pipa-Tanah

Beban hidrodinamis dapat tereduksi karena:

- *Permeable seabed* ( $r_{perm,i}$ )
- Penetrasi pipa ke dalam tanah ( $r_{pen,i}$ )
- *Trenching* ( $r_{trench,i}$ )

Reduksi beban total adalah:

$$R_{tot,i} = r_{perm,i} \cdot r_{pen,i} \cdot r_{trench,i}$$

Simbol “ $i$ ” yang bernilai  $y$  untuk beban horizontal dan  $z$  untuk beban vertikal.

### Reduksi beban akibat *permeable seabed*

*Permeable seabed* mengakibatkan aliran dapat melalui bagian bawah pipa, sehingga mengurangi beban vertikal atau gaya angkat. Jika beban hidrodinamis vertikal yang digunakan dalam analisis adalah berdasarkan koefisien beban yang diturunkan dari asumsi *non-permeable seabed*, reduksi beban berikut ini dapat digunakan:

$$R_{perm,z} = 0,7 \quad (2.20)$$

### Reduksi beban akibat penetrasi

Faktor reduksi beban akibat penetrasi pada arah horizontal dan vertikal adalah:

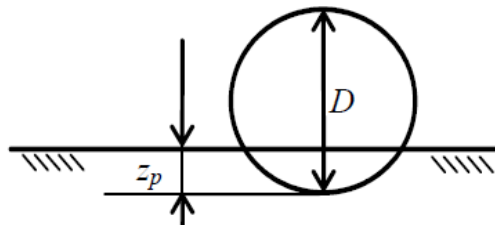
$$r_{pen,y} = 1,0 - 1,4 \cdot \frac{z_p}{D} \geq 0,3 \quad (2.21)$$

$$r_{pen,z} = 1,0 - 1,3 \cdot \left( \frac{z_p}{D} - 0,1 \right) \geq 0,0 \quad (2.22)$$

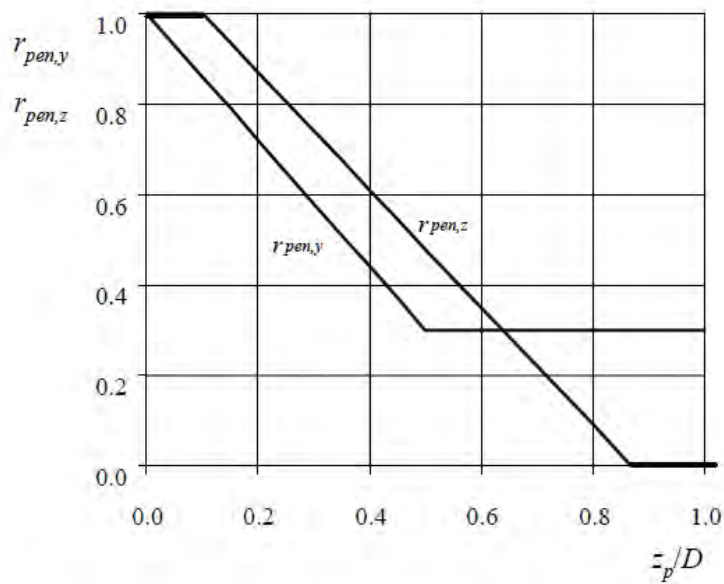
Keterangan:

$z_p$  : Kedalaman penetrasi pipa

$D$  : Diameter pipa



Gambar 2.6: Definisi penetrasi (DnV F109, 2010)



Gambar 2.7: Reduksi beban akibat penetrasi (DnV F109, 2010)

### Reduksi beban akibat *trenching*

Faktor reduksi beban akibat *trenching* pada arah horizontal dan vertikal adalah:

$$r_{tr,y} = 1,0 - 0,18 \cdot (\theta - 5)^{0,25} \cdot \left(\frac{z_t}{D}\right)^{0,42}, \quad 5 \leq \theta \leq 45 \quad (2.23)$$

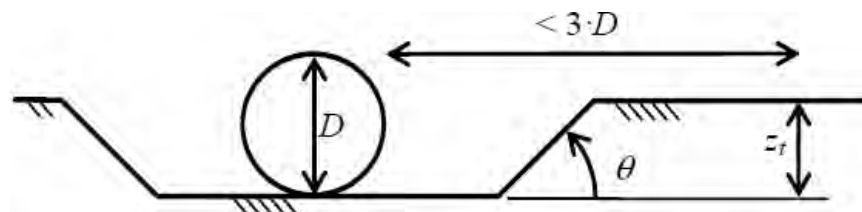
$$r_{tr,z} = 1,0 - 0,14 \cdot (\theta - 5)^{0,43} \cdot \left(\frac{z_t}{D}\right)^{0,46}, \quad 5 \leq \theta \leq 45 \quad (2.24)$$

Keterangan:

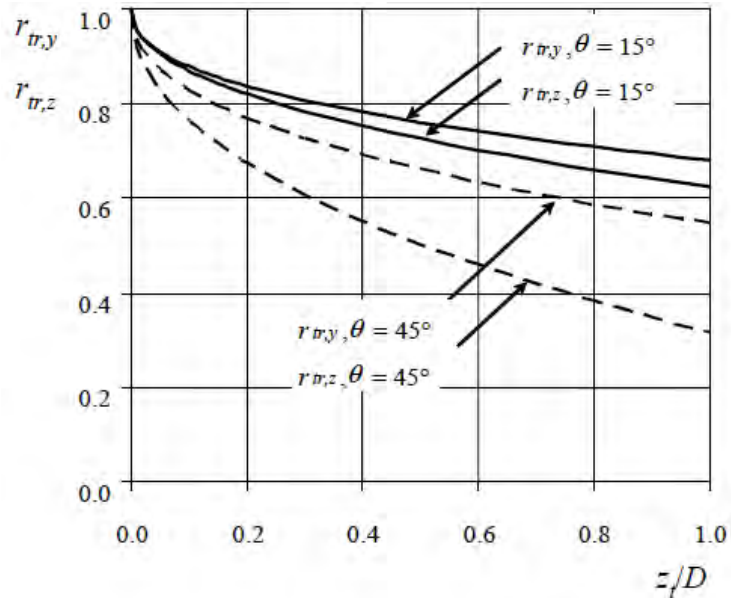
$Z_p$  : Kedalaman *trenching* pipa

$D$  : Diameter pipa

Kedalaman *trenching* dibuat relatif terhadap dasar laut dengan lebar tidak melebihi 3 kali diameter dari pipa.



Gambar 2.8: Parameter *trenching* (DnV F109, 2010)



Gambar 2.9: Reduksi beban akibat *trenching* (DnV F109, 2010)

### c. Tahanan Tanah

Untuk menghindari perpindahan lateral yang tidak diijinkan, tanah harus memiliki tahanan yang cukup untuk mengimbangi beban hidrodinamis. Sampai tahun 1970-an teori *Coulomb friction* digunakan untuk menghitung tahanan tanah pada pipa yang terkena beban hidrodinamis. Namun, percobaan menunjukkan bahwa teori *Coulomb friction* tidak sesuai untuk menjelaskan kompleksitas interaksi pipa dengan tanah.

Verley dan Sotberg (1992) mengembangkan pemodelan interaksi pipa dengan tanah. Hasilnya, tahanan tanah merupakan penjumlahan dari *Coulomb friction* dan tahanan pasif tanah.

Tahanan horizontal tanah adalah:

$$R = (W_s - F_L) \cdot \mu \quad (2.25)$$

Keterangan:

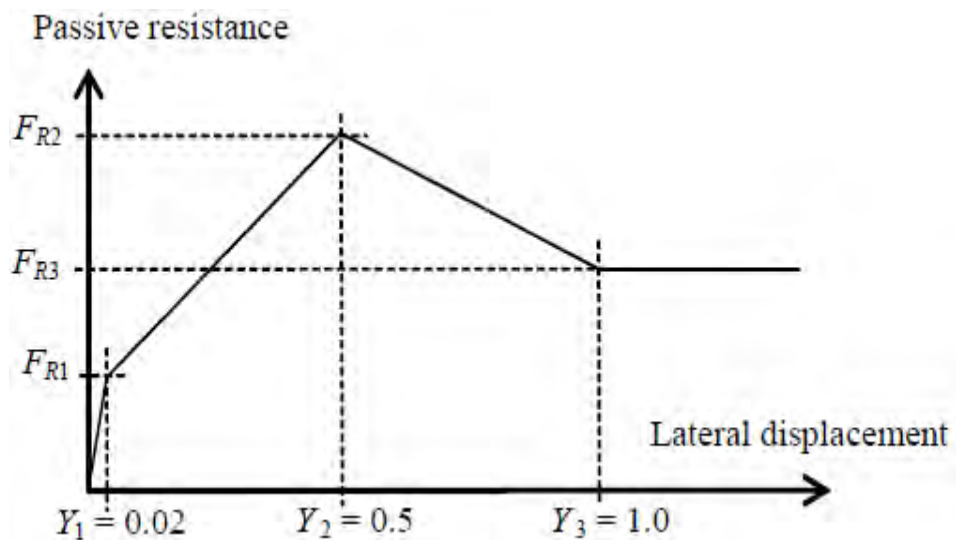
- $W_s$  : Berat terendam pipa
- $F_L$  : Gaya angkat pada pipa
- $\mu$  : Koefisien gesekan tanah

Koefisien gesekan,  $\mu$ , biasanya menggunakan 0,6 untuk pasir, 0,2 untuk lempung dan 0,6 untuk batu. Pasir didefinisikan sebagai tanah yang *permeable* dan tidak kohesif. Lempung didefinisikan sebagai tanah yang tidak *permeable* dan kkoheisif. Batu didefinisikan sebagai bebatuan yang 50 persen diameternya lebih besar dari 50 mm.

Tahanan pasif tanah terdiri dari 4 daerah yang berbeda:

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

Tahanan pasif tanah pada dasar laut yang berbatu diabaikan.



Gambar 2.10: Tahanan pasif tanah (DnV F109, 2010)

Tahanan pasif untuk tanah berpasir adalah:

$$\frac{F_R}{F_C} = \begin{cases} (5,0 \cdot \kappa_s - 0,15 \cdot \kappa_s^2) \cdot \left(\frac{z_p}{D}\right)^{1,25} & \text{jika } \kappa_s \leq 26,7 \\ \kappa_s \cdot \left(\frac{z_p}{D}\right)^{1,25} & \text{jika } \kappa_s > 26,7 \end{cases} \quad (2.26)$$

dimana,

$$\kappa_s = \frac{\gamma'_s \cdot D^2}{w_s - F_z} = \frac{\gamma'_s \cdot D^2}{F_C}, \quad F_C = w_s - F_z \quad (2.27)$$

Keterangan:

$Z_p$  : Kedalaman *trenching* pipa

$F_R$  : Tahanan pasif tanah

$F_C$  : Gaya kontak vertikal antara tanah dan pipa

$\gamma'_s$  : Berat terendam tanah

Tahanan pasif untuk tanah lempung adalah:

$$\frac{F_R}{F_C} = \frac{4,1 \cdot \kappa_c}{G_c^{0,39}} \cdot \left(\frac{z_p}{D}\right)^{1,31} \quad (2.28)$$

$$G_c = \frac{s_u}{D \cdot \gamma_s} \quad \text{dan} \quad \kappa_c = \frac{s_u \cdot D}{w_s - F_z} = \frac{s_u \cdot D}{F_C} \quad (2.29)$$

Keterangan:

$Z_r$  : Kedalaman *trenching* pipa

$F_R$  : Tahanan pasif tanah

$F_C$  : Gaya kontak vertikal antara tanah dan pipa

$\gamma_s$  : Berat tanah kering

Penetrasi total merupakan penjumlahan dari penetrasi awal dan penetrasi akibat perpindahan pipa:

$$z_p = z_{pi} + z_{pm} \quad (2.30)$$

Penetrasi awal pada tanah berpasir adalah:

$$\frac{z_{pi}}{D} = 0,037 \cdot \kappa_s^{-0,67} \quad (2.31)$$

Penetrasi awal pada tanah lempung adalah:

$$\frac{z_{pi}}{D} = 0,0071 \cdot \left(\frac{G_c^{0,3}}{\kappa_c}\right)^{3,2} + 0,062 \cdot \left(\frac{G_c^{0,3}}{\kappa_c}\right)^{0,7} \quad (2.32)$$

Keterangan:

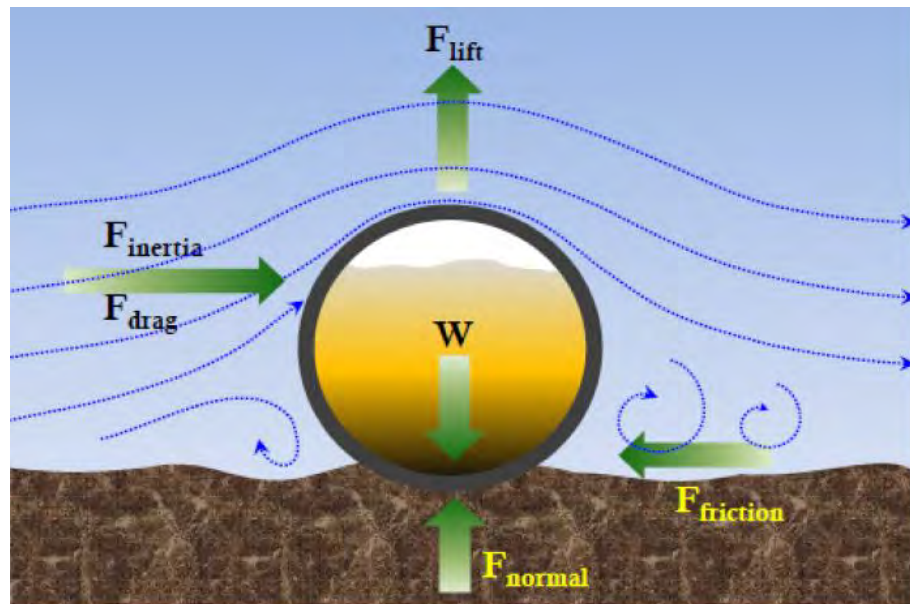
$Z_p$  : Kedalaman penetrasi total pipa

$Z_{pi}$  : Kedalaman penetrasi awal

$Z_{pm}$  : Kedalaman penetrasi akibat pergerakan pipa  
 $D$  : Diameter pipa  
 $G_c$  : Parameter kekuatan tanah

### 2.3 *On-bottom stability*

Pipa bawah laut dikatakan stabil jika mempunyai berat yang cukup, sehingga tahanan lateral tanah mencukupi untuk menghindari pipa bergerak secara lateral. Meningkatkan ketebalan baja pada pipa untuk meningkatkan berat pipa tidak akan ekonomis, sehingga *concrete* digunakan meningkatkan berat pipa untuk mencapai kestabilan.



Gambar 2.11: Gaya yang bekerja pada pipa (Ghebregiorghis, 2014)

#### 2.3.1 **Kombinasi Beban**

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

##### **a. Kondisi sementara (instalasi)**

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

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

Untuk kondisi sementara yang melebihi 12 bulan, digunakan kondisi permanen (operasi)

#### **b. Kondisi permanen (operasi)**

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

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

### **2.3.2 Absolute Lateral Static Stability**

Metode *Absolute Lateral Static Stability* memberikan tidak mengijinkan perpindahan lateral pipa didasar laut berdasarkan penyamaan gaya yang memastikan gaya tahanan pipa mencukupi untuk bertahan terhadap beban hidrodinamis maksimum.

Pada metode ini, koefisien *lift*, *drag*, dan inersia digantikan dengan koefisien beban vertikal dan horizontal. Koefisien didapatkan berdasarkan data eksperimen.

#### **a. Beban**

Beban horizontal dan vertikal adalah:

$$F_Y^* = r_{tot,y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_Y^* (U^* + V^*)^2 \quad (2.33)$$

$$F_z^* = r_{tot,z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_z^* (U^* + V^*)^2 \quad (2.34)$$

Keterangan:

$F_Y^*$  : Beban horizontal

$F_z^*$  : Beban vertikal

$r_{tot}$  : Faktor reduksi beban

$\rho_w$  : Massa jenis air laut

D : Diameter pipa

$C_Y^*$  : Koefisien reduksi beban horizontal

$C_z^*$  : Koefisien reduksi beban vertikal

$U^*$  dan  $T^*$  diambil dari pers. 2.11 dan 2.12,  $V^*$  diambil dari pers. 3.14. Reduksi beban akibat *permeable* seabed, penetrasi dan *trenching* dapat dihitung berdasarkan Bab 2.2.3. Keulegan-Carpenter number pada kondisi ekstrim dan rasio kecepatan osilasi gelombang dengan arus pada kondisi ekstrim, yang diperlukan untuk menentukan koefisien beban puncak, dihitung menggunakan Pers. 2.35 dan 2.36.

$$K^* = \frac{U^* \cdot T^*}{D} \quad (2.35)$$

$$M^* = \frac{V^*}{U^*} \quad (2.36)$$

Keterangan:

$K^*$  : Keulegan-carpenter pada kondisi ekstrim

$M^*$  : Rasio kecepatan arus dan gelombang pada kondisi ekstrim

Koefisien beban puncak  $C_Y^*$  dan  $C_z^*$  diambil dari Tabel 2.2 dan 2.3. Interpolasi digunakan jika nilai yang dicari tidak ada pada tabel.

Tabel 2.2: Koefisien beban puncak horizontal (DnV F109, 2010)

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



Tabel 2.3: Koefisien beban puncak vertikal (DnV F109, 2010).

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

### b. Faktor Keamanan

Faktor keamanan  $\gamma_{sc}$  yang digunakan untuk stabilitas absolut pada kondisi musim dingin terdaftar pada Tabel 2.4 dan 2.5.

Tabel 2.4: Faktor keamanan, badai musim dingin di North Sea (DnV F109, 2010).

	<i>Low</i>	<i>Normal</i>	<i>High</i>
Sand and rock	0.98	1.32	1.67
Clay	1.00	1.40	1.83

Tabel 2.5: Faktor keamanan, badai musim dingin di Gulf of Mexico dan Southern Ocean (DnV F109, 2010).

	<i>Low</i>	<i>Normal</i>	<i>High</i>
Sand and rock	0.95	1.41	1.99
Clay	0.97	1.50	2.16

Faktor keamanan  $\gamma_{sc}$  yang digunakan untuk stabilitas absolut pada kondisi siklon terdaftar pada Tabel 2.6 dan 2.7.

Tabel 2.6: Faktor keamanan, kondisi siklon di North Sea (DnV F109, 2010).

	<i>Low</i>	<i>Normal</i>	<i>High</i>
Sand and rock	0.95	1.50	2.16
Clay	0.95	1.56	2.31

Tabel 2.7: Faktor keamanan, kondisi siklon di Gulf of Mexico (DnV F109, 2010).

	<i>Low</i>	<i>Normal</i>	<i>High</i>
Sand and rock	0.95	1.64	2.46
Clay	0.93	1.64	2.54

### c. Desain Kriteria

Desain kriteria metode *absolute stability* adalah:

$$\gamma_{SC} \cdot \frac{F_Y^* + \mu \cdot F_Z^*}{\mu \cdot w_s + F_R} \leq 1,0 \quad (2.37)$$

dan

$$\gamma_{SC} \cdot \frac{F_Z^*}{w_s} \leq 1,0 \quad (2.38)$$

Keterangan:

$\gamma_{SC}$  : Faktor keamanan

$F_Y^*$  : Beban horizontal

$F_Z^*$  : Beban vertikal

$w_s$  : Berat terendam pipa

$F_R$  : Gaya tahanan pasif tanah

#### 2.3.3 *Generalized Lateral Stability*

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

$$Y = f(L, K, M, N, \tau, G_s, G_c) \quad (2.39)$$

Berat spesifik pipa dapat dihitung dengan:

$$S_g = 1 + \frac{2}{\pi} \cdot N \cdot K \cdot L, \quad 1,05 < S_g \leq 3 \quad (2.40)$$

dimana,

$$N = \frac{U_s \cdot R_D}{G \cdot T_u}, \quad K = \frac{U_s \cdot R_D \cdot T_u}{D}, \quad L = \frac{w_s}{0,5 \cdot \rho_w \cdot D \cdot U_s^2} \quad (2.41)$$

Keterangan:

$K$  : Keulegan-carpenter pada kondisi ekstrim

$L$  : Parameter berat

$M$  : Rasio kecepatan arus dan gelombang pada kondisi ekstrim

$N$  : Faktor percepatan spektra

$U_s$  : Kecepatan rata-rata gelombang

$\rho_w$  : Massa jenis air laut

- $R_D$  : Faktor reduksi karena arah arus dan gelombang  
 $G_s$  : *Soil (sand) density parameter*  
 $G_c$  : Parameter kekuatan tanah

*Generalized lateral stability* mengiinkan perpindahan lateral sebesar  $\frac{1}{2}$  sampai 10 kali diameter pipa.  $L_{stable}$  adalah berat yang diperlukan agar perpindahan lateral yang terjadi sebesar  $\frac{1}{2}$  kali diameter pipa (*virtually stable pipe*).  $L_{10}$  adalah berat yang diperlukan agar perpindahan lateral yang terjadi sebesar 10 kali diameter pipa.  $L_{stable}$  dan  $L_{10}$  didapatkan dari banyak analisis dinamis pipa bawah laut dengan asumsi dasar laut yang datar. Stabilitas pada tanah lempung adalah sebagai berikut:

Berat minimum yang diperlukan agar pipa berpindah maksimal sejauh  $\frac{1}{2}$  kali diameter pipa pada tanah lempung dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$L_{stable} = 90 \sqrt{\frac{G_c}{N^{0.67} \cdot K} \cdot f(M)} \quad (2.42)$$

dimana,

$$f(M) = [0,58(\log M)^2 + 0,60 \cdot (\log M) + 0,47]^{1,1} \leq 1,0 \quad (2.43)$$

Untuk perpindahan pipa maksimal sejauh 10 kali diameter, berat minimum yang diperlukan dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\frac{L_{10}}{(2+M)^2} = \begin{cases} c_1 + \frac{c_2}{K^{c_3}} & \text{untuk } K \geq K_b \\ c_1 + \frac{c_2}{K^{c_3}} & \text{untuk } K < K_b \end{cases} \quad (2.44)$$

Tabulasi koefisien terdapat pada Lampiran A DnV RP F109.

### 2.3.4 Analisis stabilitas lateral dinamis

Analisis stabilitas dinamis menggunakan simulasi respon pipa dengan metode *time domain* yang mencakup beban hidrodinamis dari gelombang acak dan tahanan tanah. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk menghitung perpindahan lateral pipa bawah laut akibat beban yang bekerja pada pipa.

Analisis ini menggunakan prosedur *Finite Element Analysis (FEA)* yang tidak biasa digunakan oleh *pipeline engineer* karena beberapa alasan. Salah satu alasan utamanya adalah sudah banyak lokasi di seluruh dunia yang stabilitasnya sudah

dianalisis dengan prosedur FEA, uji laboratotium, serta studi lapangan dan telah didapatkan metode yang disederhanakan untuk menentukan berat minimum pipa agar stabil. Tidak ada alasan kuat untuk menggantikan metode yang disederhanakan dengan metode *finite element* lebih lanjut. Selain itu, program untuk melakukan analisis dengan prosedur FEA sulit didapatkan (Tian et al., 2011).

### 2.3.5 Stabilitas Vertikal

Untuk menghindari pipa mengapung, berat terendam pipa harus memenuhi kriteria berikut:

$$\gamma_w \cdot \frac{b}{(w_s+b)} = \frac{\gamma_w}{S_g} \leq 1,0 \quad (2.45)$$

Keterangan:

- $\gamma_w$  : *Safety factor*
- $b$  : Gaya apung pipa
- $w_s$  : Berat terendam pipa
- $S_g$  : *Pipe specific gravity*

### 2.4 Global Buckling

Global buckling adalah deformasi yang terjadi pada sebagian besar dari panjang pipa, namun deformasi yang terjadi pada penampang pipa tidak cukup besar. Global buckling terjadi pada saat pipa mengalami kompresi akibat adanya tegangan aksial. Pengaruh internal dan eksternal dipertimbangkan pada perhitungan tegangan aksial.

Berdasarkan DnV OS F101, tegangan aksial dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma_l = \frac{N}{\pi \cdot (D-t_2) \cdot t_2} + \frac{M}{\frac{\pi \cdot (D^4 - (D-2 \cdot t_2)^4)}{32 \cdot D}} \quad (2.46)$$

Keterangan:

- $\sigma_l$  : Tegangan aksial
- $N$  : *Pipe wall force*
- $D$  : Diameter pipa

$M$  : Bending moment

$t_2$  : Tebal pipa

Tegangan aksial memenuhi kriteria ASD apabila:

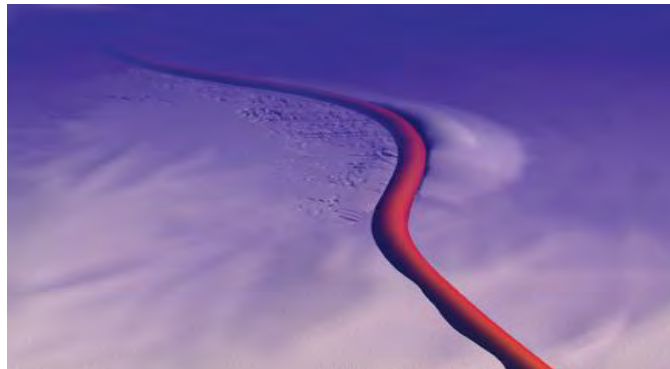
$$|\sigma_l| \leq \eta \cdot f_y \quad (2.47)$$

Keterangan:

$\sigma_l$  : Tegangan aksial

$\eta$  : Usage factor

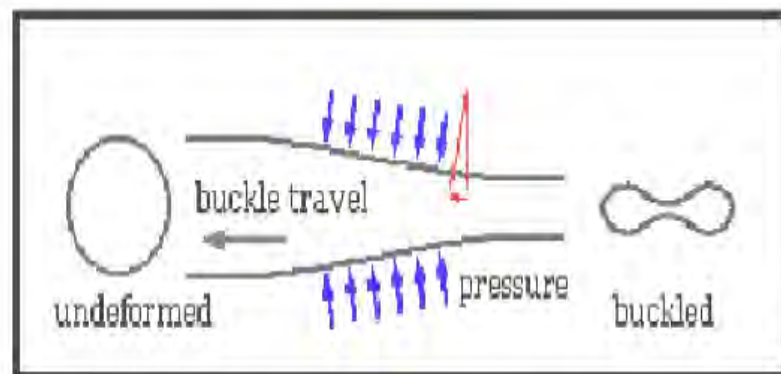
$f_y$  : Yield strength



Gambar 2.26: Global buckling (Guo, 2005)

## 2.5 Local Buckling

Local buckling adalah deformasi plastis pada sebagian kecil dari panjang pipa yang menyebabkan perubahan besar pada penampang pipa. Local buckling disebabkan oleh kombinasi tekanan eksternal, tekanan internal, gaya aksial, dan *bending moment*.



Gambar 2.27: Local buckling (Tawekal, 2012).

Local buckling (combined loading criteria) terbagi menjadi dua, yaitu:

- Load Controlled Condition (LCC)  
Kondisi saat respon struktur secara dominan dipengaruhi oleh beban.
- Displacement Controlled Condition (DCC)  
Kondisi saat respon struktur secara dominan dipengaruhi oleh perpindahan.

### 2.5.1 Load Controlled Condition

Member pipa yang mengalami bending moment, effective axial force dan internal overpressure harus didesain agar memenuhi kriteria berikut ini pada semua bagian:

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{sd}(p_i)}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 + \left( \alpha_p \cdot \frac{p_i - p_e}{\alpha_c \cdot p_b(t_2)} \right) \right\}^2 \leq 1 \quad (2.48)$$

Dimana:

$$S_p(t) = f_y \cdot \pi \cdot (D - t) \cdot t \quad (2.49)$$

$$M_p(t) = f_y \cdot \pi \cdot (D - t)^2 \cdot t \quad (2.50)$$

$$\alpha_c = (1 - \beta) + \beta \cdot \frac{f_u}{f_y} \quad (2.51)$$

$$\alpha_p = \begin{cases} 1 - \beta & \frac{p_i - p_e}{p_b} < \frac{2}{3} \\ 1 - 3\beta \left( 1 - \frac{p_i - p_e}{p_b} \right) & \frac{p_i - p_e}{p_b} \geq \frac{2}{3} \end{cases} \quad (2.52)$$

$$\beta = \frac{60 - D_s/t_2}{90} \quad (2.53)$$

Keterangan:

$S_p$  : Kapasitas plastis aksial pipa

$M_p$  : Kapasitas plastis momen pipa

$M_{sd}$  : *Design moment*

$S_{sd}$  : *Design effective axial force*

$p_i$  : Tekanan internal

$p_e$  : Tekanan eksternal

$p_b$  : *Burst pressure*

$f_y$  : *Yield strength*

- $f_u$  : *Ultimate strength*  
 $D$  : Diameter pipa  
 $t$  : Tebal pipa  
 $\gamma_m$  : *Material resistance factor*  
 $\gamma_{SC}$  : *Safety class resistance factor*  
 $\alpha_c$  : *Flow stress parameter*  
 $\alpha_p$  : Faktor tekanan  
 $\beta$  : Faktor pada kombinasi beban

Member pipa yang mengalami bending moment, effective axial force dan external overpressure harus didesain agar memenuhi kriteria berikut ini pada semua bagian:

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{sd}(p_i)}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 + \left( \alpha_p \cdot \frac{p_e - p_{min}}{\alpha_c \cdot P_b(t_2)} \right) \right\}^2 \leq 1 \quad (2.54)$$

Keterangan:

- $S_p$  : Kapasitas plastis aksial pipa  
 $M_p$  : Kapasitas plastis momen pipa  
 $M_{sd}$  : *Design moment*  
 $S_{sd}$  : *Design effective axial force*  
 $p_i$  : Tekanan internal  
 $p_e$  : Tekanan eksternal  
 $p_b$  : *Burst pressure*  
 $f_y$  : *Yield strength*  
 $D$  : Diameter pipa  
 $t$  : Tebal pipa  
 $\gamma_m$  : *Material resistance factor*  
 $\gamma_{SC}$  : *Safety class resistance factor*  
 $\alpha_c$  : *Flow stress parameter*

### 2.5.2 Displacement Controlled Condition

Member pipa yang mengalami bending moment, effective axial force dan internal overpressure harus didesain agar memenuhi kriteria berikut ini pada semua bagian:

$$\varepsilon_{Sd} \leq \varepsilon_{Rd} = \frac{\varepsilon_c(t_2, p_{min} - p_e)}{\gamma_\varepsilon} \quad (2.55)$$

dimana :

$$\varepsilon_{Sd} = \varepsilon_F \cdot \gamma_F \cdot \varepsilon_c + \varepsilon_E \cdot \gamma_E + \varepsilon_I \cdot \gamma_F \cdot \varepsilon_c + \varepsilon_A \cdot \gamma_A \cdot \varepsilon_c \quad (2.56)$$

$$\varepsilon_c(t, p_{min} - p_e) = 0,78 \cdot \left(\frac{t}{D} - 0,01\right) \cdot \left(1 + 5,75 \cdot \frac{p_{min} - p_e}{p_b(t)}\right) \cdot \alpha_h^{-1,5} \cdot \alpha_{gw} \quad (2.57)$$

$$\alpha_h = \left(\frac{R_{t0,5}}{R_m}\right)_{max} \quad (2.58)$$

Keterangan:

$\varepsilon_{Sd}$  : Design compressive strain

$\varepsilon_F$  : Accumulated plastic strain resistance

$\varepsilon_c$  : Characteritic bending strain resistance

$\varepsilon_I$  : Total nominal longitudinal strain

$\varepsilon_A$  : Axial strain

$\gamma_F$  : Load effect factor for functional load

$\gamma_E$  : Load effect factor for environmental load

$\gamma_A$  : Load effect factor for accidental load

$p_e$  : Tekanan eksternal

$p$  : Tekanan internal minimum

$t$  : Tebal pipa

$P_b$  : Bursting pressure

$\alpha_h$  : Train hardening

$R_m$  : Tensile strength

Member pipa yang mengalami bending moment, effective axial force dan external overpressure harus didesain agar memenuhi kriteria berikut ini pada semua bagian:

$$\left(\frac{\varepsilon_{Sd}}{\frac{\varepsilon_c(t_2, 0)}{\gamma_\varepsilon}}\right)^{0,8} + \frac{p_e - p_{min}}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}} \leq 1 \quad (2.59)$$



Keterangan:

$\varepsilon_{sd}$  : *Design compressive strain*

$\varepsilon_c$  : *Characteristic bending strain resistance*

$\gamma_E$  : *Load effect factor for environmental load*

$p_e$  : Tekanan eksternal

$p_{min}$  : Tekanan internal minimum

$p_c$  : *Collapse pressure*

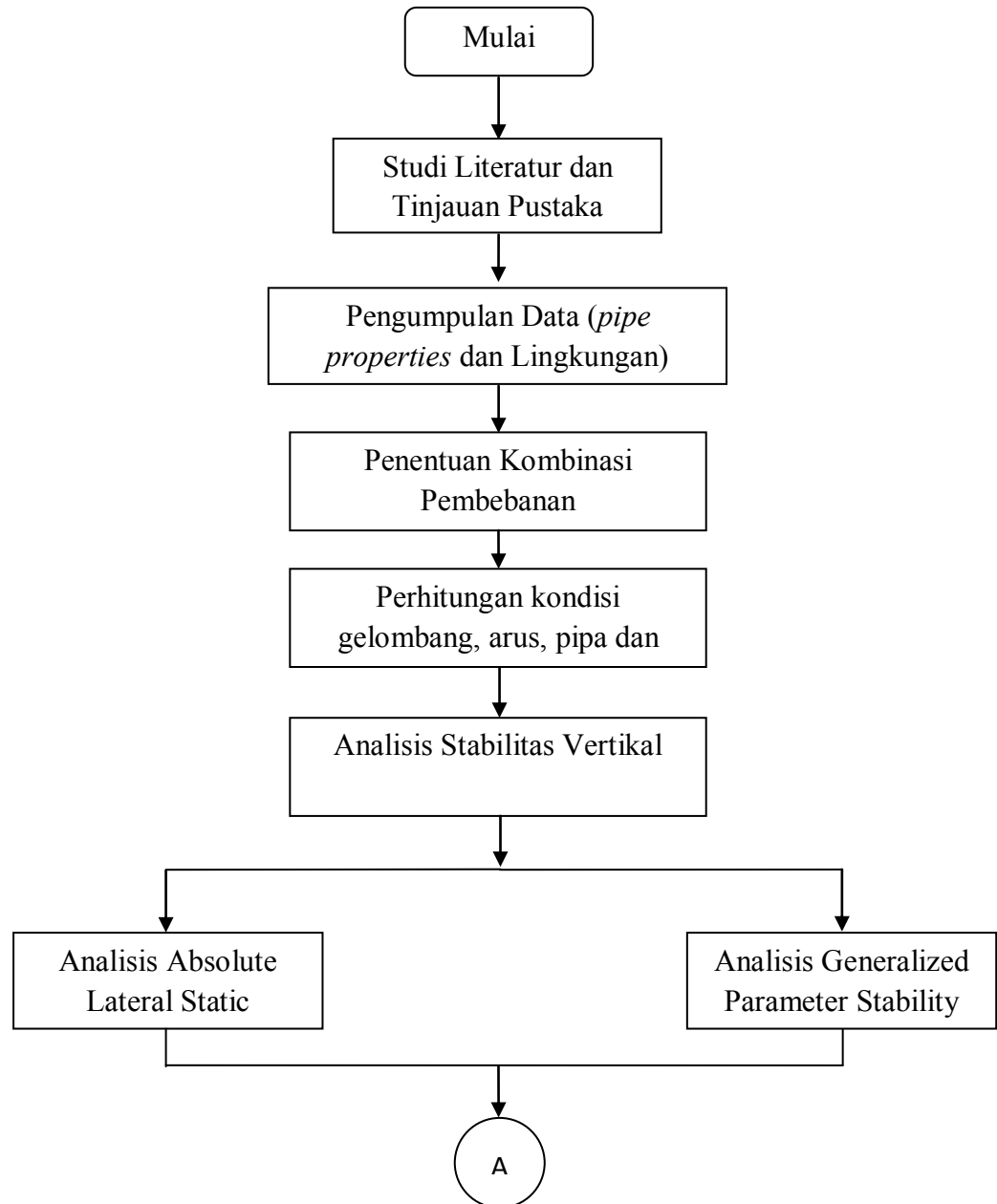
$P_b$  : *Bursting pressure*

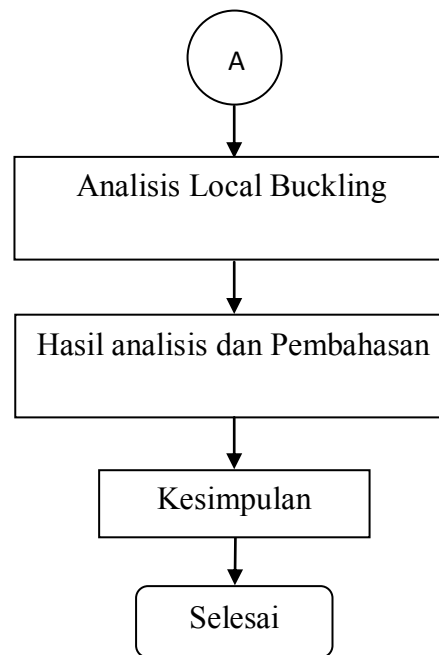
$\gamma_{sc}$  : *Safety class resistance factor*

# BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian





Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

### 3.2 Prosedur Penelitian

Adapun langkah-langkah penelitian dalam diagram alir dapat ditunjukkan pada gambar 3.1, yang dijelaskan sebagai berikut :

#### 1. Studi literatur

Tahap ini penulis akan mempelajari serta memahami teori – teori dasar tentang *on-bottom stability* dan *local buckling* pipa bawah laut dan penelitian yang berhubungan dengan stabilitas pipa bawah laut. Literatur berupa buku, tugas akhir, jurnal dll.

#### 2. Pengumpulan Data

Tahap ini, penulis mengumpulkan data-data yang diperlukan dalam pengerjaan penelitian seperti data pipa, tanah, gelombang dan arus.

Tabel 3.1: Data Pipa

Deskripsi	Nilai	Satuan
Material	API 5L Grade X52MO PSL2 CS	
<i>Nominal Outer Diameter</i>	323	mm
<i>Wallthickness</i>	14,27	mm
<i>Corrosion Allowance</i>	3	mm
<i>Steel Density</i>	7850	Kg/m <sup>3</sup>
<i>Content Density</i>	134	Kg/m <sup>3</sup>
<i>External Corrosion Coating Thickness</i>	4	mm
<i>External Corrosion Coating Density</i>	1281	Kg/m <sup>3</sup>
<i>Concrete Thickness</i>	38	mm
<i>Concrete Density</i>	3044	Kg/m <sup>3</sup>
<i>Elastic Module of Steel</i>	2x10 <sup>5</sup>	MPa
<i>Yield Strength</i>	360	MPa
<i>Tensile Strength</i>	440	MPa
<i>Operating Temperature</i>	44,4	°C
<i>Design Pressure</i>	1,01	MPa
<i>Effective Layer Tension</i>	230	MPa
<i>Thermal Expansion Coefficient</i>	11x10 <sup>-6</sup>	-
<i>Poisson Ratio</i>	0,3	-

Tabel 3.2: Data Lingkungan

Parameter	Nilai			Satuan
	1 year	10 year	100 year	
<i>Significant wave height, Hs</i>	1,9	3,1	3,9	m
<i>Peak period, Ts</i>	6,5	7,6	8,8	s
<i>Current Velocity</i>	0,366	0,421	0,518	m/s
<i>Water depth</i>	22,6-26,8			m
<i>Storm Surge</i>	0,244			m
<i>Highest Astronomical Tide (HAT)</i>	1,158			m
<i>Highest Temperature of Sea Water</i>	30			°C
<i>Lowest Temperature of Sea Water</i>	22,2			°C

Tabel 3.3: Data Tanah

Deskripsi	Nilai	Satuan
Jenis tanah	<i>soft clay</i>	-
<i>Friction factor</i>	0,2	-
Submerged weight	18000	N/m <sup>3</sup>
Undrained Shear Strength	6000	N/m <sup>2</sup>

### 3. Penentuan Kombinasi Pembebanan

Beban yang dikombinasikan adalah gelombang dan arus.

#### a. Kondisi Sementara (Instalasi)

Pendekatan untuk kondisi ini adalah menggunakan kondisi paling ekstrim diantara dua kondisi berikut:

- Periode ulang 10 tahun gelombang dikombinasikan dengan periode ulang 1 tahun arus.
- Periode ulang 1 tahun gelombang dikombinasikan dengan periode ulang 10 tahun arus.

#### b. Kondisi Permanen (Operasi)

Pendekatan kondisi permanen menggunakan beban paling ekstrim diantara dua kondisi berikut:

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

#### 4. Perhitungan Kondisi Gelombang, Arus, Pipa dan Tanah.

Perhitungan bertujuan untuk mendapatkan kecepatan gelombang, arus dan tahanan tanah yang bekerja pada pipa. Perhitungan kecepatan partikel air akibat gelombang di dasar laut menggunakan spektrum JONSWAP yang merupakan distribusi energi di permukaan laut, kemudian ditransfer menjadi kecepatan partikel air didasar laut menggunakan *transfer function*. Kecepatan arus rata-rata yang melewati pipa adalah:

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

Berat terendam pipa adalah berat pipa di udara dikurangi dengan *buoyancy*. Tahanan tanah terbagi menjadi dua, yaitu Coulomb friction dan tahanan pasif tanah.

#### 5. Analisis Stabilitas Vertikal

Perhitungan bertujuan untuk menentukan berat minimum pipa untuk memenuhi syarat stabilitas vertikal. Pipa dikatakan stabil secara vertikal menurut DnV RP F109 harus memenuhi kriteria berikut ini:

$$\gamma_m \frac{b}{w_s + b} \leq 1$$

#### 6. Analisis *Generalized Lateral Stability*

Pada perhitungan ini, perpindahan pipa yang diijinkan adalah 10 kali diameter. Berdasarkan DnV RP F109, untuk perpindahan pipa maksimal sejauh 10 kali diameter, berat minimum yang diperlukan dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$L = \frac{w_s}{0,5 \cdot \rho_w \cdot D \cdot U_s^2}$$

dan

$$L^* = \frac{w_s}{0,5 \cdot \rho_w \cdot D \cdot (U^* + V^*)^2}$$

#### 7. Analisis *Absolute Static Stability*

Perhitungan bertujuan untuk menentukan berat minimum pipa agar tidak berpindah saat terkena beban lingkungan pada kondisi setelah instalasi (kosong) dan operasi (berisi fluida).

Berdasarkan DnV RP F109 kriteria absolute lateral static stability adalah:

$$\gamma_{SC} \cdot \frac{F_Y^* + \mu \cdot F_Z^*}{\mu \cdot w_s + F_R} \leq 1,0$$

## 8. Analisis Local Buckling

Analisis *local buckling* bertujuan untuk mencari panjang span maksimum agar tidak terjadi *buckling* pada pipa. Berdasarkan DnV F105, *local buckling* pada *free span* dihitung menggunakan persamaan Load Controlled Condition:

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{sd}(p_i)}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 + \left( \alpha_p \cdot \frac{p_i - p_e}{\alpha_c \cdot P_b(t_2)} \right) \right\}^2 \leq 1$$

## 9. Hasil Analisis dan Pembahasan

Hasil analisis *on-bottom stability* dan *local buckling* pada *free span* akan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik serta dilakukan pembahasan terhadap hasil analisis yang didapat.

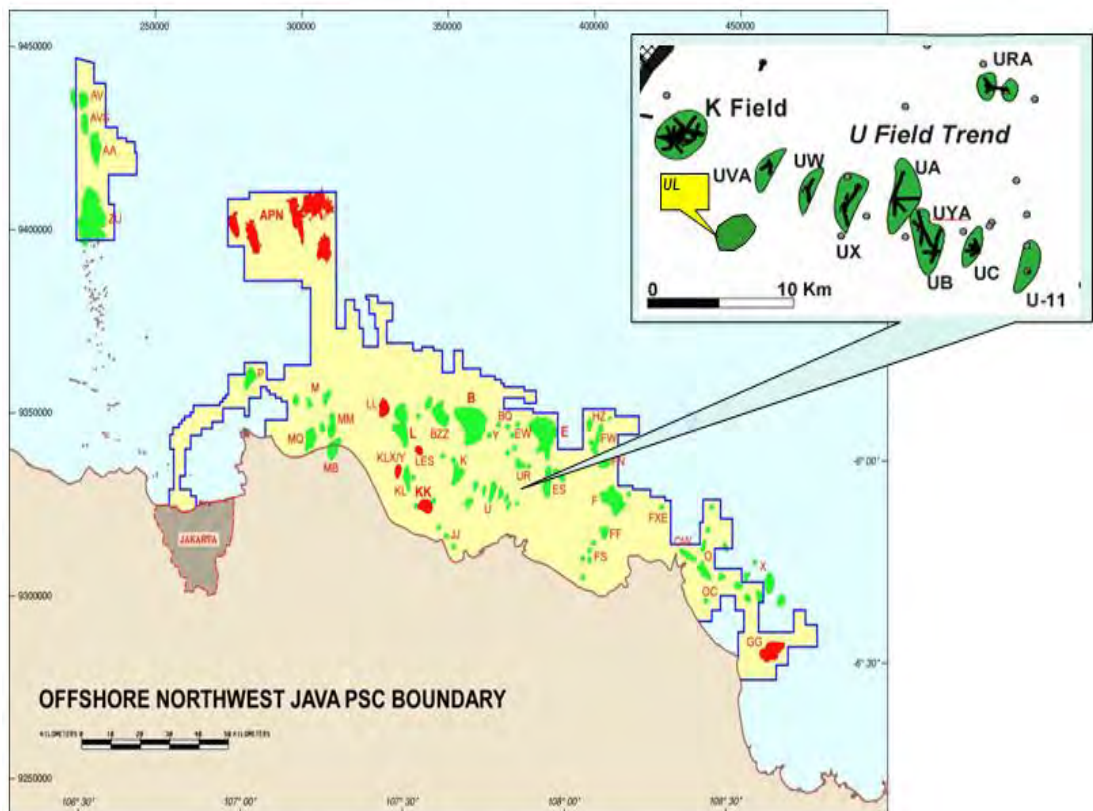
## 10. Kesimpulan

Pengambilan kesimpulan sesuai dengan permasalahan yang diangkat pada penelitian ini.

## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

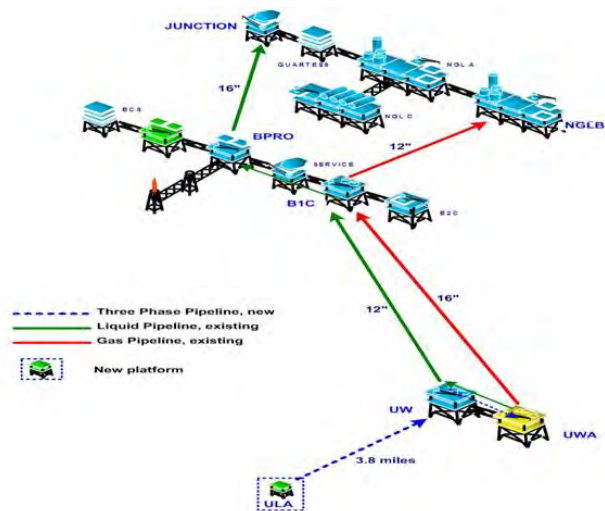
### 4.1 Data Pipa dan Lingkungan

Studi kasus yang digunakan adalah pipa bawah laut yang mengalirkan minyak dan gas dari *platform* ULA menuju *platform* UW di *UL field* milik PT. Pertamina ONWJ. Pipa bawah laut yang menghubungkan *platform* ULA dan *platform* UW adalah sepanjang 6,1 Km.



Gambar 4.1: Lokasi *UL field* di Laut Jawa





Gambar 4.2: Lokasi platform ULA dan UW di UL field

Data yang disajikan meliputi data material pipa dan dimensinya beserta data lingkungan yang diperoleh dari data desain pipa bawah laut milik PT. Pertamina Hulu Energi ONWJ. Data pipa, data lingkungan, dan model pipa bawah laut dapat dilihat pada tabel dan gambar di bawah ini.

Tabel 4.1: Data Pipa

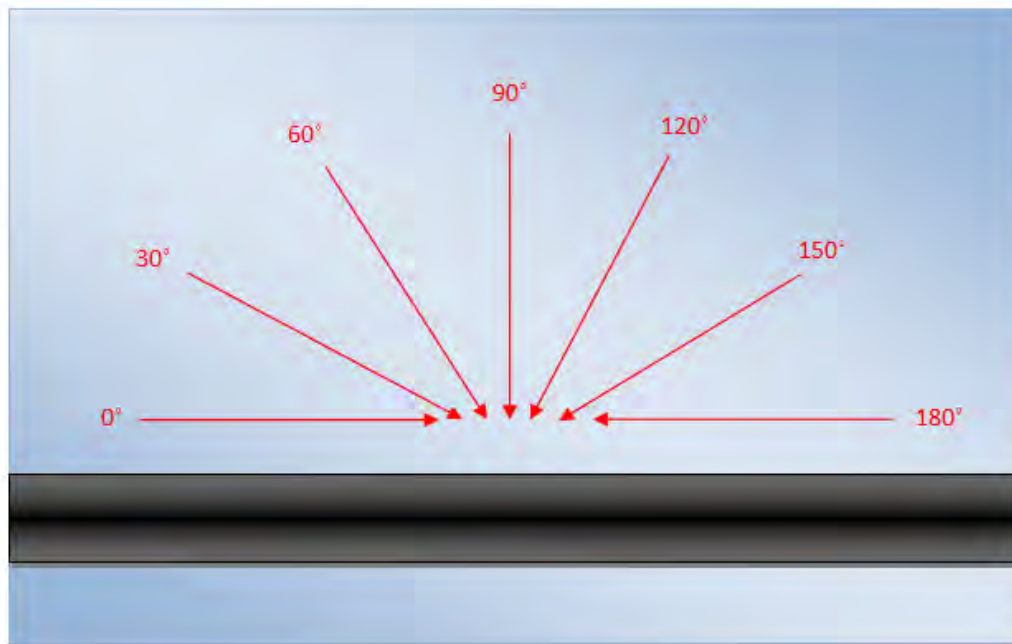
Deskripsi	Nilai	Satuan
Material	API 5L Grade X52MO PSL2 CS	
Nominal Outer Diameter	323	mm
Wallthickness	14,27	mm
Corrosion Allowance	3	mm
Steel Density	7850	Kg/m <sup>3</sup>
Content Density	134	Kg/m <sup>3</sup>
External Corrosion Coating Thickness	4	mm
External Corrosion Coating Density	1281	Kg/m <sup>3</sup>
Concrete Thickness	38	mm
Concrete Density	3044	Kg/m <sup>3</sup>
Elastic Module of Steel	2x10 <sup>5</sup>	MPa
Yield Strength	360	MPa
Tensile Strength	440	MPa
Operating Temperature	44,4	°C
Design Pressure	1,01	MPa
Effective Layer Tension	230	MPa
Thermal Expansion Coefficient	11x10 <sup>-6</sup>	-
Poison Ratio	0,3	-

Tabel 4.2: Data Lingkungan

Parameter	Nilai			Satuan
	1 year	10 year	100 year	
<i>Significant wave height, Hs</i>	1,9	3,1	3,9	m
<i>Peak period, Ts</i>	6,5	7,6	8,8	s
<i>Current Velocity</i>	0,366	0,421	0,518	m/s
<i>Water depth</i>	22,6-26,8			m
<i>Storm Surge</i>	0,244			m
<i>Highest Astronomical Tide (HAT)</i>	1,158			m
<i>Highest Temperature of Sea Water</i>	30			°C
<i>Lowest Temperature of Sea Water</i>	22,2			°C

Tabel 4.3: Data Tanah

Deskripsi	Nilai	Satuan
Jenis tanah	<i>soft clay</i>	-
<i>Friction factor</i>	0,2	-
<i>Submerged weight</i>	18000	N/m <sup>3</sup>
<i>Undrained Shear Strength</i>	6000	N/m <sup>2</sup>



Gambar 4.3: Model pipa dan arah pembebanan lingkungan

## 4.2 Gaya Hidrodinamis

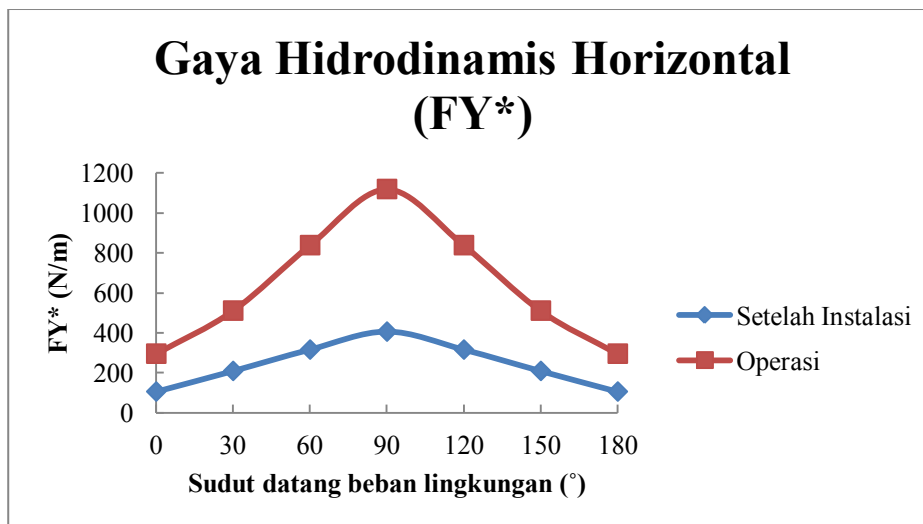
Berdasarkan DnV, koefisien gaya *drag*, gaya angkat, dan gaya inersia pada perhitungan gaya hidrodinamis digantikan dengan koefisien beban vertikal dan horizontal berdasarkan data eksperimen laboratorium dan data lapangan.

- Gaya hidrodinamis horizontal

Gaya hidrodinamis horizontal terjadi pada pipa bawah laut karena adanya pergerakan partikel air yang bekerja pada pipa bawah laut secara lateral. Gaya hidrodinamis horizontal yang dianalisis pada pipa bawah laut adalah pada kondisi setelah instalasi (kosong) dan kondisi operasi (berisi fluida). Hasil analisis beban horizontal dengan variasi sudut datang gelombang dan arus 0-180° terhadap pipa ditampilkan pada tabel dan grafik di bawah ini.

Tabel 4.4: Gaya hidrodinamis horizontal (FY\*) pada kondisi setelah instalasi dan operasi

$\theta$	FY* (N/m) (Setelah Instalasi)	FY* (N/m) (Operasi)
0	105	295
30	208	510
60	315	838
90	405	1119
120	315	838
150	208	510
180	105	295



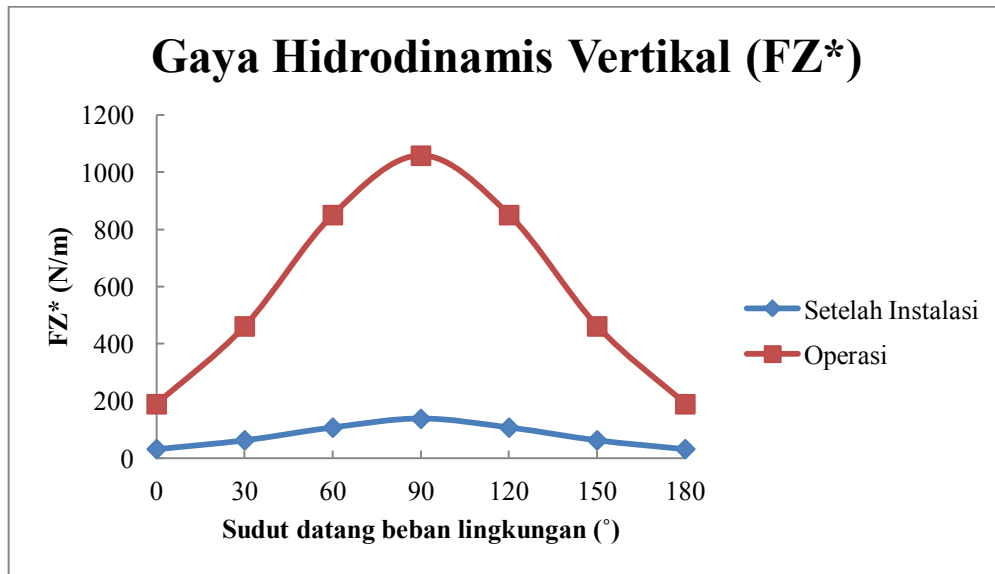
Gambar 4.4: Grafik gaya hidrodinamis horizontal pada kondisi setelah instalasi dan operasi.

- Gaya Hidrodinamis Vertikal

Gaya hidrodinamis horizontal terjadi pada pipa bawah laut karena adanya pergerakan partikel air yang bekerja pada pipa bawah laut secara vertikal. Gaya hidrodinamis vertikal yang dianalisis adalah pada pipa kondisi setelah instalasi (kosong) dan kondisi operasi (berisi fluida). Hasil analisis beban vertikal dengan variasi sudut datang gelombang dan arus 0-180° terhadap pipa ditampilkan pada tabel dan grafik di bawah ini.

Tabel 4.5: Gaya hidrodinamis vertikal (FZ\*) pada kondisi setelah instalasi dan operasi

$\theta$	FZ* (N/m) (Setelah Instalasi)	FZ* (N/m) (Operasi)
0	32	189
30	63	461
60	107	851
90	138	1058
120	107	851
150	63	461
180	32	189



Gambar 4.5: Grafik gaya hidrodinamis vertikal pada kondisi setelah instalasi dan operasi.

Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 menunjukkan beban hidrodinamis horizontal dan vertikal paling tinggi terjadi pada sudut pembebanan 90° karena tidak ada reduksi beban pada sudut 90°.

### 4.3 Tahanan Tanah

Tahanan tanah terbagi menjadi dua, yaitu *Coulomb friction* dan tahanan pasif karena tumpukan tanah yang terbentuk akibat penetrasi pipa ke dalam tanah. Pada

kondisi setelah instalasi (kosong), *Coulomb friction* dan tahanan pasif masing-masing bernilai 184 N/m dan 111 N/m. Pada kondisi operasi (berisi fluida), *Coulomb friction* dan tahanan pasif masing-masing bernilai 202 N/m dan 121 N/m. Tahanan tanah pada kondisi operasi lebih besar daripada kondisi instalasi karena pada kondisi operasi pipa terisi oleh hidrokarbon yang membuat pipa semakin berat, sehingga tahanan tanah juga lebih besar.

Tabel 4.6: Gaya tahanan tanah pada kondisi setelah instalasi dan operasi

Tahanan tanah	Setelah Instalasi (N/m)	Operasi (N/m)
<i>Coulomb friction</i>	184	202
Tahanan pasif	111	121

#### 4.4 Stabilitas Vertikal

Analisis stabilitas vertikal dilakukan untuk mengetahui apakah berat pipa di udara mampu melawan gaya apung ketika tercelup ke air laut. Pipa dikatakan stabil secara vertikal menurut DnV RP F109 harus memenuhi kriteria berikut ini:

$$\gamma_m \frac{b}{w_s + b} \leq 1$$

Setelah dilakukan perhitungan, didapatkan berat minimum pipa yang harus dipenuhi agar stabil secara vertikal adalah 150 N/m. Sedangkan, berat terendam aktual pipa pada saat kondisi instalasi dan operasi masing-masing adalah 918 N/m dan 1008 N/m. Sehingga, pipa stabil secara vertikal pada kondisi instalasi dan operasi.

Tabel 4.7: Hasil analisis stabilitas vertikal pipa bawah laut

Kondisi	Ws,min (N/m)	Ws, aktual (N/m)
Setelah Instalasi (Kosong)	150	918
Operasi (berisi fluida)	150	150

#### 4.5 Absolute Lateral Static Stability

Pada metode ini pipa tidak diijinkan untuk berpindah, sehingga berat terendam dan gaya tahanan tanah harus lebih besar dari gaya hidrodinamis.

Berdasarkan DnV RP F109 kriteria *absolute lateral static stability* adalah:

$$\gamma_{SC} \cdot \frac{F_Y^* + \mu \cdot F_Z^*}{\mu \cdot w_s + F_R} \leq 1,0$$

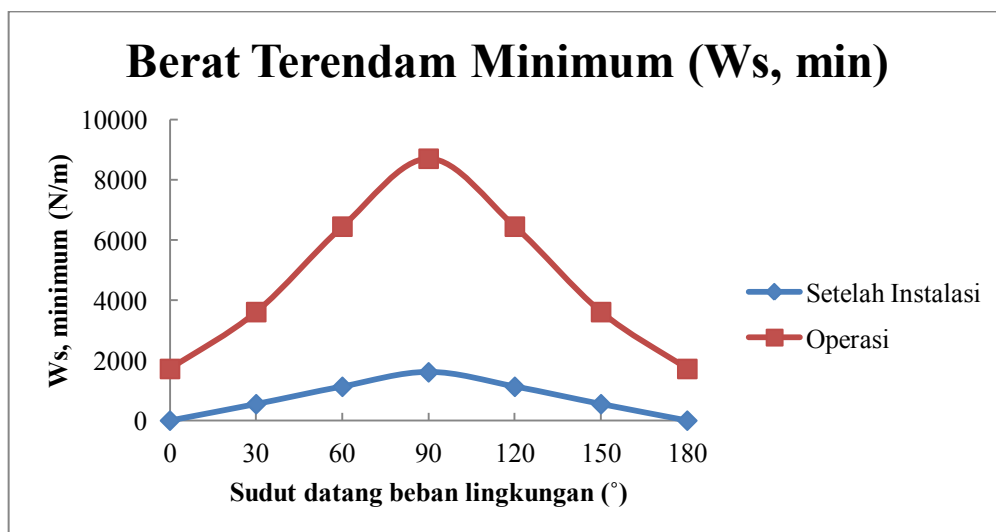
Pada kondisi instalasi, pipa masih dalam kondisi kosong atau tidak terisi fluida. Berdasarkan DnV RP F109 kombinasi pembebanan lingkungan pada kondisi operasi kombinasi pembebanan lingkungan menggunakan periode ulang 1 tahun gelombang dikombinasikan dengan periode ulang 10 tahun arus. Perhitungan dilakukan dengan variasi sudut datang beban lingkungan yaitu 0-180°.

Pada kondisi operasi, pipa terisi dengan fluida (hidrokarbon), sehingga menambah berat terendam aktual pipa. Berdasarkan DnV RP F109 kombinasi pembebanan lingkungan pada kondisi operasi menggunakan periode ulang 10 tahun gelombang dikombinasikan dengan periode ulang 100 tahun arus. Perhitungan dilakukan dengan variasi sudut datang beban lingkungan yaitu 0-180°.

Setelah dilakukan perhitungan maka didapatkan berat minimum pipa agar memenuhi kriteria *absolute lateral static* pada kondisi instalasi yang disajikan pada tabel dan grafik di bawah ini.

Tabel 4.8: Berat Terendam Minimum ( $W_{s,min}$ ) *Absolute Lateral Static* Kondisi Instalasi

$\theta$	$W_{s,min}$ (N/m) (Setelah Instalasi)	$W_{s,min}$ (N/m) (Operasi)
0	4	1722
30	550	3612
60	1129	6452
90	1610	8710
120	1129	6452
150	550	3612
180	4	1722



Gambar 4.6: Grafik Berat Terendam Minimum ( $W_{s,min}$ ) *Absolute Lateral Static*

Dari Tabel 4.8 dan Gambar 4.6 didapatkan berat terendam minimum pipa agar memenuhi kriteria *absolute lateral static* adalah 1610 N/m pada kondisi instalasi dan 8710 N/m pada kondisi operasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa pipa tidak memenuhi kriteria *absolute lateral static stability* pada kondisi instalasi maupun kondisi operasi karena berat terendam aktual pipa lebih kecil dari berat minimum yang harus dipenuhi untuk stabil. Sehingga, tebal *concrete* perlu

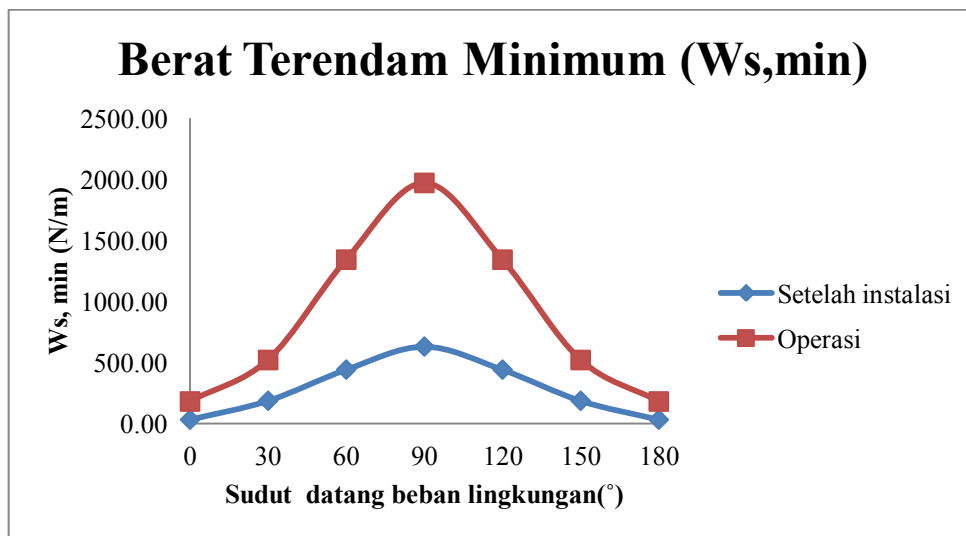
ditambah menjadi 60 mm dan 190 mm atau dilakukan *pipeline anchoring* agar stabil pada kondisi setelah instalasi dan operasi.

#### 4.6 Generalized Parameter Stability

Pada metode ini pipa diijinkan untuk berpindah secara lateral maksimal sejauh 10 kali diameter pipa. Tabel dan grafik berikut ini menunjukkan berat terendam minimum pipa agar memenuhi kriteria *generalized parameter* pada kondisi instalasi dan operasi.

Tabel 4.9: Tabel Berat Terendam Minimum ( $W_{s,min}$ ) *Generalized Parameter*

$\theta$ (°)	$W_{s,min}$ (N/m) (Setelah instalasi)	$W_{s,min}$ (N/m) (Operasi)
0	30.15	179.17
30	185.04	519.23
60	440.57	1341.34
90	629.60	1970.31
120	440.57	1341.34
150	185.04	519.23
180	30.15	179.17



Gambar 4.7: Grafik Berat Terendam Minimum ( $W_{s,min}$ ) *Generalized Parameter*

Grafik di atas menunjukkan bahwa pipa tidak stabil pada kondisi operasi, namun stabil pada kondisi instalasi. Sehingga, tebal *concrete* perlu ditambah menjadi 70 mm dilakukan *pipeline anchoring* agar stabil pada kondisi operasi.

#### 4.7 Local Buckling

Tegangan aksial yang terjadi pada pipa bawah laut adalah 12,39 MPa, sedangkan tegangan aksial maksimum yang diijinkan adalah 311,04 MPa, sehingga tegangan aksial masih memenuhi kriteria ASD (*allowable stress design*). Kemudian, selama proses operasi pipa bawah laut kemungkinan akan terjadi *free span* akibat

penggerusan tanah di bawah pipa oleh arus laut. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis *local buckling* pada *free span* untuk mengetahui berapa panjang *free span* yang diijinkan agar pipa tidak mengalami *buckling*. *Local buckling* pada *free span* dianalisis menggunakan kriteria *load controlled condition* pada DnV OS F101. Berikut ini adalah hasil analisis *local buckling* dengan panjang *free span* yang berbeda-beda:

Tabel 4.10: Hasil analisis *local buckling* pada *free span*

L(m)	Msd (N.m)	Mp(t2) (N.m)	Ssd (N)	Sp(t2) (N)	pi (MPa)	pe (MPa)	Pb(t2) (MPa)	Local buckling check
40	221760	470062	-136683	3812465	1.111	0.314	28.855	0.319
45	280665	470062	-136683	3812465	1.111	0.314	28.855	0.511
50	346500	470062	-136683	3812465	1.111	0.314	28.855	0.777
55	419265	470062	-136683	3812465	1.111	0.314	28.855	1.137
60	498960	470062	-136683	3812465	1.111	0.314	28.855	1.609

Tabel di atas menunjukkan semakin panjang *free span*, maka semakin besar *bending moment* pada pipa karena semakin bertambahnya panjang dan massa pipa yang tidak memiliki tumpuan. Berdasarkan kriteria *load controlled condition* pada DnV OS F101, panjang maksimum *free span* yang diijinkan adalah 50 m karena nilai *local buckling check* masih di bawah 1 yang berarti pipa bawah laut tidak akan mengalami *local buckling*.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN A

### On-Bottom Stability

#### 1. Stabilitas Lateral

##### a. Absolute Lateral static stability (Kondisi Setelah Instalasi)

Data pipa, lingkungan, tanah diambil dari Bab 4.1.

Diameter total pipa yang berada di dasar laut adalah:

$$D = 0,323 + 2 \cdot 0,004 + 2 \cdot 0,038$$

$$= 0,407 \text{ m}$$

Menggunakan Persamaan 2.4, didapatkan nilai peak enhancement factor ( $\gamma$ ):

$$\phi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} = \frac{6,5}{\sqrt{1,9}} = 4,7$$

$$\gamma = \exp(5,75 - 1,15\phi) = \exp(5,75 - 1,15 \cdot 4,7)$$

$$\gamma = 1,4$$

Menggunakan Persamaan 2.2, didapatkan nilai konstanta generalized Philips ( $\alpha$ ):

$$\alpha = \frac{5}{16} \cdot \frac{H_s^2 \cdot \omega_p^4}{g^2} \cdot (1 - 0,287 \cdot \ln \gamma); \omega_p = \frac{2\pi}{T_p} = \frac{2,3,14}{6,5} = 0,966 \text{ rad/s}$$

$$\alpha = \frac{5}{16} \cdot \frac{1,9^2 \cdot 0,966^4}{9,81^2} \cdot (1 - 0,287 \cdot 1,4)$$

$$\alpha = 0,01$$

Nilai spectral parameter diperoleh dari Persamaan 2.3:

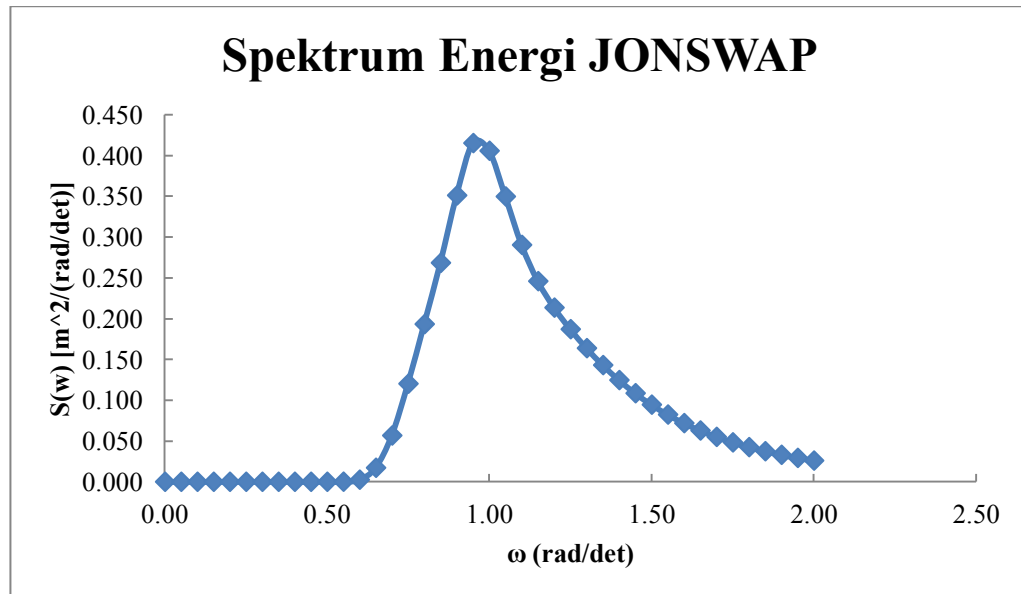
$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{jika } \omega > \omega_p \end{cases}$$

Parameter yang telah didapatkan, digunakan untuk menghitung spektrum energi dengan menggunakan persamaan spektrum energi JONSWAP yang disajikan dalam tabel berikut:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-4}\right] \gamma^{\exp\left[-0,5\left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \cdot \omega_p}\right)^2\right]}$$

$\omega$	$\sigma$	$S(\omega)$
		$\gamma=2.2$
0.00	0.07	0.000
0.05	0.07	0.000
0.10	0.07	0.000
0.15	0.07	0.000
0.20	0.07	0.000
0.25	0.07	0.000
0.30	0.07	0.000
0.35	0.07	0.000
0.40	0.07	0.000
0.45	0.07	0.000
0.50	0.07	0.000
0.55	0.07	0.000
0.60	0.07	0.003
0.65	0.07	0.017
0.70	0.07	0.057
0.75	0.07	0.120
0.80	0.07	0.193
0.85	0.07	0.269
0.90	0.07	0.351
0.95	0.07	0.415
1.00	0.09	0.406
1.05	0.09	0.350
1.10	0.09	0.290
1.15	0.09	0.246
1.20	0.09	0.214
1.25	0.09	0.187
1.30	0.09	0.164
1.35	0.09	0.143
1.40	0.09	0.125
1.45	0.09	0.109
1.50	0.09	0.095
1.55	0.09	0.082
1.60	0.09	0.072
1.65	0.09	0.063
1.70	0.09	0.055
1.75	0.09	0.048
1.80	0.09	0.042
1.85	0.09	0.037
1.90	0.09	0.033
1.95	0.09	0.029
2.00	0.09	0.026

Hasil perhitungan spektrum energi JONSWAP pada tabel kemudian diplot dalam grafik berikut:



Nilai  $k$  yang akan digunakan untuk transfer function  $G$  didapatkan melalui iterasi persamaan berikut ini:

$$\frac{\omega^2}{g} = k \cdot \tanh(k \cdot d)$$

Nilai  $\tanh(k \cdot d)$  diasumsikan bernilai 1 untuk menentukan  $k$  awal yang akan digunakan pada iterasi, sehingga:

$$k_{awal} = \frac{0,966^2}{9,81}$$

$$k_{awal} = \frac{0,966^2}{9,81}$$

$$k_{awal} = 0,095$$

Kemudian dilakukan iterasi untuk mendapatkan nilai k, seperti yang ditunjukkan pada tabel ini:

No	k (asumsi)	kh	tanh(kh)	k
1	0.0952	2.1505	0.9733	0.097768
2	0.0978	2.2096	0.9762	0.097473
3	0.0975	2.2029	0.9759	0.097505
4	0.0975	2.2036	0.9759	0.097502
5	0.0975	2.2035	0.9759	0.097502
6	0.0975	2.2035	0.9759	0.097502
7	0.0975	2.2035	0.9759	0.097502
8	0.0975	2.2035	0.9759	0.097502
9	0.0975	2.2035	0.9759	0.097502
10	0.0975	2.2035	0.9759	0.097502
11	0.0975	2.2035	0.9759	0.097502
12	0.0975	2.2035	0.9759	0.097502
13	0.0975	2.2035	0.9759	0.097502
14	0.0975	2.2035	0.9759	0.097502
15	0.0975	2.2035	0.9759	0.097502
16	0.0975	2.2035	0.9759	0.097502
17	0.0975	2.2035	0.9759	0.097502
18	0.0975	2.2035	0.9759	0.097502
19	0.0975	2.2035	0.9759	0.097502
20	0.0975	2.2035	0.9759	0.097502

Setelah iterasi maka diperoleh nilai k, yaitu 0,0975. Selanjutnya nilai k dimasukkan ke transfer function G.

$$G(\omega) = \frac{\omega}{\sinh(k \cdot d)}, \text{ dengan } \omega = 0 \text{ sampai dengan } 2$$

w	G(w)
0.00	0.0000
0.05	0.0112
0.10	0.0224
0.15	0.0335
0.20	0.0447
0.25	0.0559
0.30	0.0671
0.35	0.0782
0.40	0.0894
0.45	0.1006
0.50	0.1118
0.55	0.1230
0.60	0.1341
0.65	0.1453
0.70	0.1565
0.75	0.1677
0.80	0.1788
0.85	0.1900
0.90	0.2012
0.95	0.2124
1.00	0.2235
1.05	0.2347
1.10	0.2459
1.15	0.2571
1.20	0.2683
1.25	0.2794
1.30	0.2906
1.35	0.3018
1.40	0.3130
1.45	0.3241
1.50	0.3353
1.55	0.3465
1.60	0.3577
1.65	0.3689
1.70	0.3800
1.75	0.3912
1.80	0.4024
1.85	0.4136
1.90	0.4247
1.95	0.4359
2.00	0.4471

Setelah spektrum energy dan transfer function G diperoleh, nilainya akan digunakan untuk mencari spektrum kecepatan partikel air di dasar laut akibat gelombang di permukaan laut menggunakan persamaan:

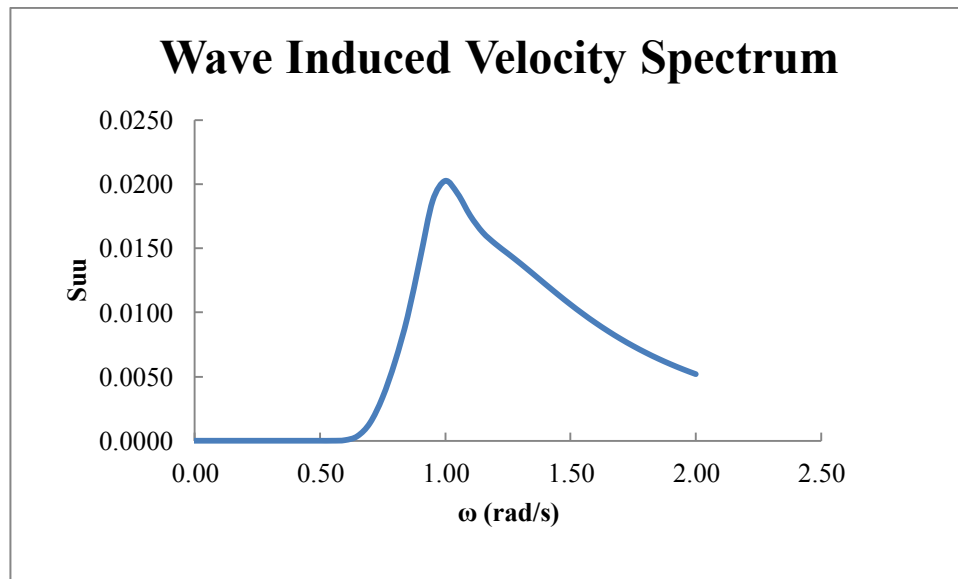
$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) \cdot S_{\eta\eta}(\omega)$$

w	S(w)	G(w)	G <sup>2</sup> (w)	Suu
0	0	0	0	0
0.05	0	0.0112	0.0001	0
0.1	0	0.0224	0.0005	0
0.15	0	0.0335	0.0011	0
0.2	0	0.0447	0.002	0
0.25	0	0.0559	0.0031	0
0.3	0	0.0671	0.0045	0
0.35	0	0.0782	0.0061	0
0.4	0	0.0894	0.008	0
0.45	0	0.1006	0.0101	0
0.5	0	0.1118	0.0125	0
0.55	0	0.123	0.0151	0
0.6	0.003	0.1341	0.018	0
0.65	0.017	0.1453	0.0211	0.0004
0.7	0.057	0.1565	0.0245	0.0014
0.75	0.12	0.1677	0.0281	0.0034
0.8	0.193	0.1788	0.032	0.0062
0.85	0.269	0.19	0.0361	0.0097
0.9	0.351	0.2012	0.0405	0.0142
0.95	0.415	0.2124	0.0451	0.0187
1	0.406	0.2235	0.05	0.0203
1.05	0.35	0.2347	0.0551	0.0193
1.1	0.29	0.2459	0.0605	0.0176
1.15	0.246	0.2571	0.0661	0.0163
1.2	0.214	0.2683	0.072	0.0154
1.25	0.187	0.2794	0.0781	0.0146
1.3	0.164	0.2906	0.0845	0.0138
1.35	0.143	0.3018	0.0911	0.013
1.4	0.125	0.313	0.0979	0.0122
1.45	0.109	0.3241	0.1051	0.0114
1.5	0.095	0.3353	0.1124	0.0106
1.55	0.082	0.3465	0.1201	0.0099
1.6	0.072	0.3577	0.1279	0.0092
1.65	0.063	0.3689	0.1361	0.0086
1.7	0.055	0.38	0.1444	0.008
1.75	0.048	0.3912	0.153	0.0074
1.8	0.042	0.4024	0.1619	0.0069
1.85	0.037	0.4136	0.171	0.0064
1.9	0.033	0.4247	0.1804	0.006
1.95	0.029	0.4359	0.19	0.0056
2	0.026	0.4471	0.1999	0.0052

w	S(w)	G(w)	G <sup>2</sup> (w)	Suu	FS	m <sub>0</sub>	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>4</sub>
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0.05	0	0.0112	0.0001	0	4	0	0	0	0
0.1	0	0.0224	0.0005	0	2	0	0	0	0
0.15	0	0.0335	0.0011	0	4	0	0	0	0
0.2	0	0.0447	0.002	0	2	0	0	0	0
0.25	0	0.0559	0.0031	0	4	0	0	0	0
0.3	0	0.0671	0.0045	0	2	0	0	0	0
0.35	0	0.0782	0.0061	0	4	0	0	0	0
0.4	0	0.0894	0.008	0	2	0	0	0	0
0.45	0	0.1006	0.0101	0	4	0	0	0	0
0.5	0	0.1118	0.0125	0	2	0	0	0	0
0.55	0	0.123	0.0151	0	4	0	0	0	0
0.6	0.003	0.1341	0.018	0	2	0	0	0	0
0.65	0.017	0.1453	0.0211	0.0004	4	0.001	0.001	0.001	0
0.7	0.057	0.1565	0.0245	0.0014	2	0.003	0.002	0.001	0.001
0.75	0.12	0.1677	0.0281	0.0034	4	0.014	0.01	0.008	0.004
0.8	0.193	0.1788	0.032	0.0062	2	0.012	0.01	0.008	0.005
0.85	0.269	0.19	0.0361	0.0097	4	0.039	0.033	0.028	0.02
0.9	0.351	0.2012	0.0405	0.0142	2	0.028	0.026	0.023	0.019
0.95	0.415	0.2124	0.0451	0.0187	4	0.075	0.071	0.068	0.061
1	0.406	0.2235	0.05	0.0203	2	0.041	0.041	0.041	0.041
1.05	0.35	0.2347	0.0551	0.0193	4	0.077	0.081	0.085	0.094
1.1	0.29	0.2459	0.0605	0.0176	2	0.035	0.039	0.043	0.051
1.15	0.246	0.2571	0.0661	0.0163	4	0.065	0.075	0.086	0.114
1.2	0.214	0.2683	0.072	0.0154	2	0.031	0.037	0.044	0.064
1.25	0.187	0.2794	0.0781	0.0146	4	0.058	0.073	0.091	0.143
1.3	0.164	0.2906	0.0845	0.0138	2	0.028	0.036	0.047	0.079
1.35	0.143	0.3018	0.0911	0.013	4	0.052	0.07	0.095	0.173
1.4	0.125	0.313	0.0979	0.0122	2	0.024	0.034	0.048	0.094
1.45	0.109	0.3241	0.1051	0.0114	4	0.046	0.066	0.096	0.202
1.5	0.095	0.3353	0.1124	0.0106	2	0.021	0.032	0.048	0.108
1.55	0.082	0.3465	0.1201	0.0099	4	0.04	0.061	0.095	0.229
1.6	0.072	0.3577	0.1279	0.0092	2	0.018	0.029	0.047	0.121
1.65	0.063	0.3689	0.1361	0.0086	4	0.034	0.056	0.093	0.254
1.7	0.055	0.38	0.1444	0.008	2	0.016	0.027	0.046	0.133
1.75	0.048	0.3912	0.153	0.0074	4	0.03	0.052	0.091	0.277
1.8	0.042	0.4024	0.1619	0.0069	2	0.014	0.025	0.045	0.144
1.85	0.037	0.4136	0.171	0.0064	4	0.026	0.047	0.088	0.3
1.9	0.033	0.4247	0.1804	0.006	2	0.012	0.023	0.043	0.156
1.95	0.029	0.4359	0.19	0.0056	4	0.022	0.043	0.085	0.322
2	0.026	0.4471	0.1999	0.0052	1	0.005	0.01	0.021	0.083
					Jumlah	0.867	1.111	1.512	3.29



Nilai Suu diplot dalam grafik berikut ini:



Kemudian dicari momen spektra dari luasan di bawah kurva spektra.

$$M_0 = \frac{1}{3} \cdot \Delta\omega \cdot \Sigma m_0$$

$$M_0 = \frac{1}{3} \cdot 0,05 \cdot 0,867$$

$$M_0 = 0,0145$$

$$M_1 = \frac{1}{3} \cdot \Delta\omega \cdot \Sigma m_1$$

$$M_1 = \frac{1}{3} \cdot 0,05 \cdot 1,111$$

$$M_1 = 0,0185$$

$$M_2 = \frac{1}{3} \cdot \Delta\omega \cdot \Sigma m_2$$

$$M_2 = \frac{1}{3} \cdot 0,05 \cdot 1,512$$

$$M_2 = 0,0252$$

$$M_4 = \frac{1}{3} \cdot \Delta\omega \cdot \Sigma m_4$$

$$M_4 = \frac{1}{3} \cdot 0,05 \cdot 3,29$$

$$M_4 = 0,0548$$

Kecepatan signifikan di dasar laut adalah:

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

$$U_s = 2\sqrt{0,0145}$$

$$U_s = 0,240 \text{ m/s}$$

Periode gelombang yang bekerja pada pipa adalah:

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

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{0,0145}{0,0252}}$$

$$T_u = 4,755 \text{ detik}$$

Single oscillation velocity (kecepatan ekstrim) di dasar laut didapatkan menggunakan persamaan:

$$k_U = \frac{U^*}{U_s} = \frac{1}{2} \cdot \left( \sqrt{2 \cdot \ln \tau} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \cdot \ln \tau}} \right)$$

dengan,  $\tau = T/T_u$

$$\tau = 3 \cdot 3600 / 4,755$$

$$\tau = 2271$$

$$k_U = \frac{U^*}{0,2473} = \frac{1}{2} \cdot \left( \sqrt{2 \cdot \ln (2271)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(2271)}} \right) = 2,039$$

$$U^* = 0,490 \text{ m/s}$$

Periode gelombang pada kondisi ekstrim dihitung dengan persamaan:

$$k_T = \frac{T^*}{T_u} = \begin{cases} k_t - 5 \cdot (k_t - 1) \cdot T_n/T_u & \text{untuk } T_n/T_u \leq 0,2 \\ 1 & \text{untuk } T_n/T_u > 0,2 \end{cases}$$

$$T_n/T_u = \frac{\sqrt{d/g}}{T_u} = \frac{\sqrt{22,6/9,81}}{4,755} = 0,319$$

Maka,

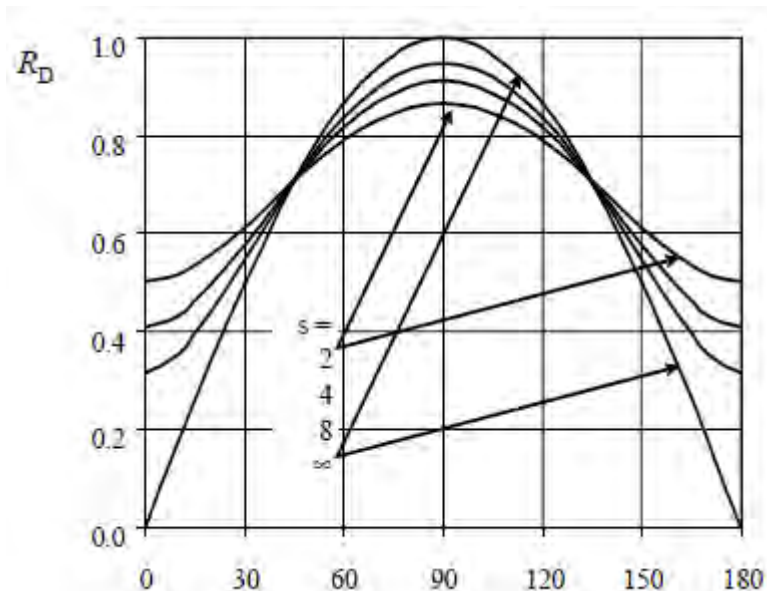
$$1 = \frac{T^*}{T_u}$$

$$T^* = T_u = 4,755 \text{ detik}$$

Kecepatan partikel gelombang pada berbagai arah.

$$U_w = R_D \cdot U_{w\theta}$$

Nilai  $R_D$  didapatkan dari grafik faktor reduksi.



$\theta$	R <sub>D</sub>	U <sub>w</sub> *
0	0.41	0.201
30	0.58	0.284
60	0.81	0.397
90	1	0.490
120	0.81	0.397
150	0.58	0.284
180	0.41	0.201

### **Kecepatan Arus**

Kecepatan arus dapat tereduksi karena efek dasar laut dan arah arus.

Kecepatan arus:

$$V(z) = V(z_r) \cdot \left( \frac{\ln(z+z_0)}{\ln(z_r+z_0)} \right) \cdot \sin \theta_c$$

$\Theta$	V
0	0.000
30	0.220
60	0.382
90	0.441
120	0.382
150	0.220
180	0.000

### **Berat Terendam Pipa**

a) *Steel Weight*  
 $W_{st} = 1065,298 \text{ N/m}$

b) *Coating 1 weight*  
 $W_{cs1} = 37,470 \text{ N/m}$

c) *Concrete weight*  
 $W_{conc} = 1313,053 \text{ N/m}$

*Pipe Weight on Air* = 2416 N/m

*Pipe Bouyancy* = 1497 N/m

*Pipe Submerged Weight* = 918 N/m

## Koefisien Reduksi

- Reduksi beban karena permeable seabed

$$R_{perm,z}=0,7$$

- Reduksi beban karena penetrasi pipa ke tanah

$$r_{pen,y} = 1,0 - 1,4 \cdot \frac{Z_p}{D} \geq 0,3$$

dengan,

$$\frac{Z_{pi}}{D} = 0,0071 \cdot \left( \frac{G_c^{0,3}}{\kappa_c} \right)^{3,2} + 0,062 \cdot \left( \frac{G_c^{0,3}}{\kappa_c} \right)^{0,7}$$

dengan,

$$\kappa_c = \frac{s_u \cdot D}{w_s - F_z} = \frac{6000 \cdot 0,407}{981} = 2,65$$

dan

$$G_c = \frac{6000}{0,407 \cdot 18000} = 0,81$$

Maka,

$$Z_{pi} = 0,01 \text{ meter}$$

Maka,

$$r_{pen,y} = 1,0 - 1,4 \cdot \frac{0,01}{0,407}$$

$$r_{pen,y} = 0,96$$

$$r_{pen,z} = 1,0 - 1,3 \cdot \left( \frac{Z_p}{D} - 0,1 \right)$$

$$r_{pen,z} = 1,0 - 1,3 \cdot \left( \frac{0,011}{0,407} - 0,1 \right)$$

$$r_{pen,z} = 1,09$$

r total:

$$r_{total,y} = 0,96$$

$$\begin{aligned} r_{\text{total},z} &= r_{\text{pen},z} \cdot r_{\text{perm},z} \\ &= 1,09 \cdot 0,7 \\ &= 0,76 \end{aligned}$$

### **Coulomb Friction**

$$\begin{aligned} \text{CF} &= \mu \cdot W_s \\ &= 0,2 \cdot 918 \\ &= 184 \text{ N/m} \end{aligned}$$

### **Soil Passive Resistance**

Tahanan pasif untuk tanah lempung adalah:

$$\frac{F_R}{F_C} = \frac{4,1 \cdot \kappa_c}{G_C^{0,39}} \cdot \left(\frac{Z_p}{D}\right)^{1,31}$$

$$\frac{F_R}{841} = \frac{4,1 \cdot 2,65}{0,81^{0,39}} \cdot \left(\frac{0,011}{0,407}\right)^{1,31}$$

$$F_R = 110,64 \text{ N/m}$$

### **Beban Gelombang dan Arus**

Keulegan-Carpenter Number adalah:

$$K^* = \frac{U_s^* \cdot T_U^*}{D}$$

$\theta$	$U_w^*$	$K^*$
0	0.201	2.35
30	0.284	3.32
60	0.397	4.64
90	0.490	5.73
120	0.397	4.64
150	0.284	3.32
180	0.201	2.35

Rasio kecepatan arus dan gelombang adalah:

$$M = \frac{V^*}{U^*}$$

$\theta$	$U_w^*$	$V$	$M^*$
0	0.201	0.000	0.0
30	0.284	0.220	0.8
60	0.397	0.382	1.0
90	0.490	0.441	0.9
120	0.397	0.382	1.0
150	0.284	0.220	0.8
180	0.201	0.000	0.0

Koefisien beban  $C_Y^*$  dan  $C_Z^*$  didapat dari DnV RP F109 yang ditampilkan pada Tabel 2.3 dan 2.4 dengan menggunakan interpolasi.

$\theta$	$C_Y^*$	$C_Z^*$
0	13	5
30	4.09	1.55
60	2.6	1.11
90	2.34	1
120	2.6	1.11
150	4.09	1.55
180	13	5

Beban maksimum arah horizontal dan vertikal adalah:

$$F_Y^* = r_{tot,y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_Y^* (U^* + V^*)^2$$

$$F_Z^* = r_{tot,z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_Z^* (U^* + V^*)^2$$

$\theta$	$C_Y^*$	$C_Z^*$	$F_Y^*$	$F_Z^*$
0	13	5	105	32
30	4.09	1.55	208	63
60	2.6	1.11	315	107
90	2.34	1	405	138
120	2.6	1.11	315	107
150	4.09	1.55	208	63
180	13	5	105	32

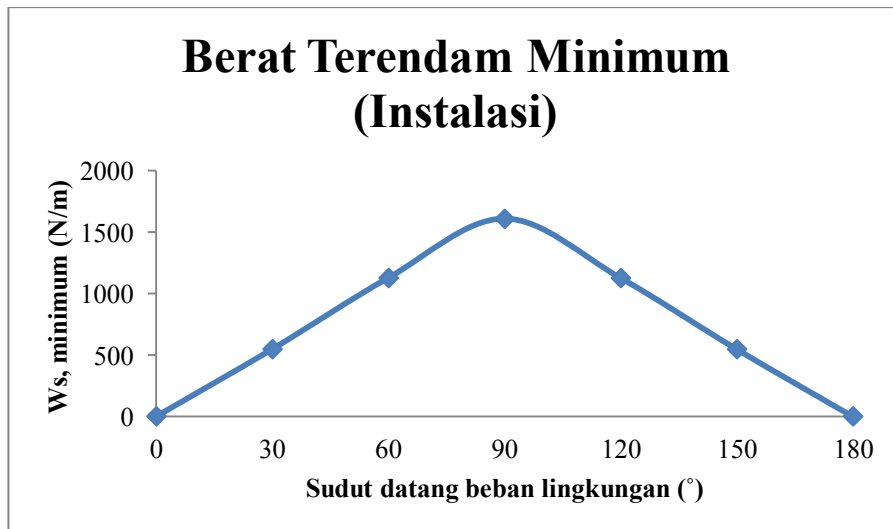
### Kriteria Stabilitas

Desain kriteria metode *absolute stability* adalah:

$$\gamma_{SC} \cdot \frac{F_Y^* + \mu \cdot F_Z^*}{\mu \cdot w_s + F_R} \leq 1,0$$

Dengan  $\gamma_{SC} = 1$ , dari tabel 2.4

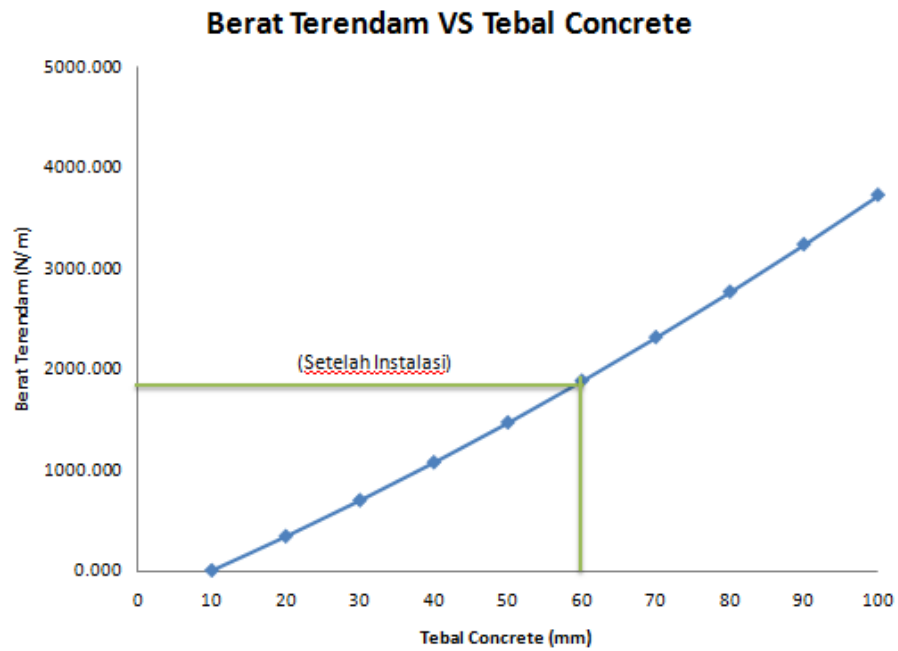
$\theta$	FY*	FZ*	Ws, min
0	105	32	4
30	208	63	550
60	315	107	1129
90	405	138	1610
120	315	107	1129
150	208	63	550
180	105	32	4





## Tebal Concrete VS Berat Terendam

Tebal Concrete (mm)	Berat Terendam (N/m)
10	14.229
20	352.278
30	709.055
40	1084.561
50	1478.795
60	1891.758
70	2323.449
80	2773.869
90	3243.017
100	3730.893



**b. Absolute Lateral static stability (Kondisi Operasi)**

Data pipa, lingkungan, tanah diambil dari Bab 4.1.

Diameter total pipa yang berada di dasar laut adalah:

$$D = 0,323 + 2 \cdot 0,004 + 2 \cdot 0,038$$

$$= 0,407 \text{ m}$$

Menggunakan Persamaan 2.4, didapatkan nilai peak enhancement factor ( $\gamma$ ):

$$\phi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} = \frac{7,6}{\sqrt{3,1}} = 4,3$$

$$\gamma = \exp(5,75 - 1,15\phi) = \exp(5,75 - 1,15 \cdot 4,3)$$

$$\gamma = 2,2$$

Menggunakan Persamaan 2.2, didapatkan nilai konstanta generalized Philips ( $\alpha$ ):

$$\alpha = \frac{5}{16} \cdot \frac{H_s^2 \cdot \omega_p^4}{g^2} \cdot (1 - 0,287 \cdot \ln \gamma); \omega_p = \frac{2\pi}{T_p} = \frac{2,3,14}{7,6} = 0,826 \text{ rad/s}$$

$$\alpha = \frac{5}{16} \cdot \frac{3,1^2 \cdot 0,826^4}{9,81^2} \cdot (1 - 0,287 \cdot \ln 2,2)$$

$$\alpha = 0,01$$

Nilai spectral parameter diperoleh dari Persamaan 2.3:

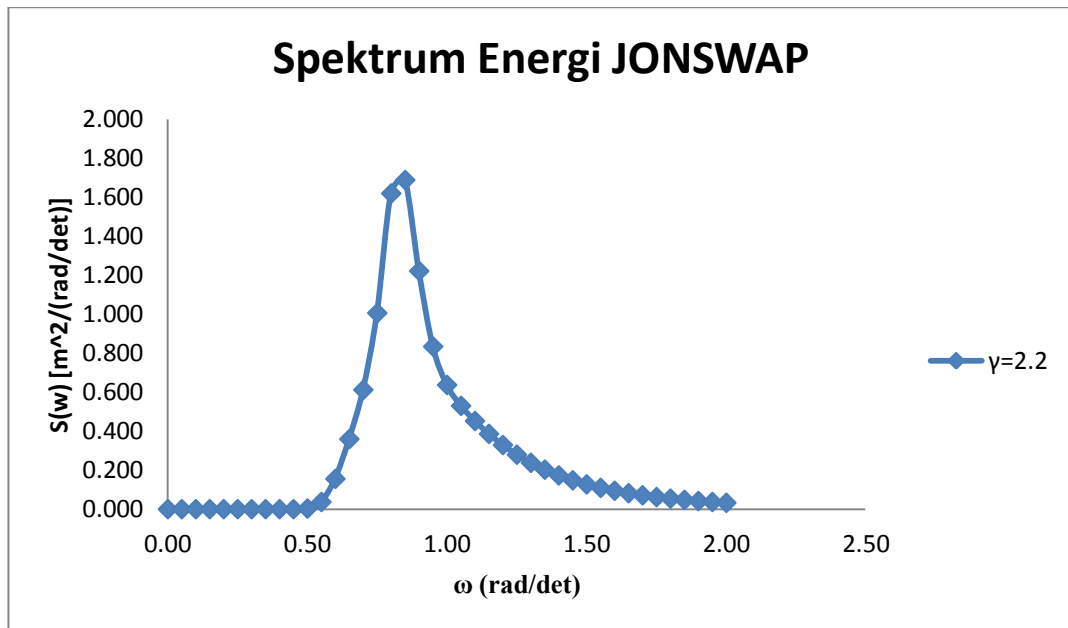
$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{jika } \omega > \omega_p \end{cases}$$

Parameter yang telah didapatkan, digunakan untuk menghitung spektrum energi dengan menggunakan persamaan spektrum energi JONSWAP yang disajikan dalam tabel berikut:

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

$\omega$	$\sigma$	$S(\omega)$
		$\gamma=2.2$
0	0.07	0
0.05	0.07	0
0.1	0.07	0
0.15	0.07	0
0.2	0.07	0
0.25	0.07	0
0.3	0.07	0
0.35	0.07	0
0.4	0.07	0
0.45	0.07	0
0.5	0.07	0.003
0.55	0.07	0.037
0.6	0.07	0.155
0.65	0.07	0.36
0.7	0.07	0.612
0.75	0.07	1.007
0.8	0.07	1.62
0.85	0.09	1.689
0.9	0.09	1.222
0.95	0.09	0.834
1	0.09	0.637
1.05	0.09	0.53
1.1	0.09	0.453
1.15	0.09	0.386
1.2	0.09	0.329
1.25	0.09	0.28
1.3	0.09	0.238
1.35	0.09	0.203
1.4	0.09	0.173
1.45	0.09	0.148
1.5	0.09	0.127
1.55	0.09	0.11
1.6	0.09	0.095
1.65	0.09	0.082
1.7	0.09	0.071
1.75	0.09	0.062
1.8	0.09	0.054
1.85	0.09	0.048
1.9	0.09	0.042
1.95	0.09	0.037
2	0.09	0.033

Hasil perhitungan spektrum energi JONSWAP pada tabel kemudian diplot dalam grafik berikut:



Nilai  $k$  yang akan digunakan untuk transfer function  $G$  didapatkan melalui iterasi persamaan berikut ini:

$$\frac{\omega^2}{g} = k \cdot \tanh(k \cdot d)$$

Nilai  $\tanh(k \cdot d)$  diasumsikan bernilai 1 untuk menentukan  $k$  awal yang akan digunakan pada iterasi, sehingga:

$$k_{awal} = \frac{0,826^2}{9,81}$$

$$k_{awal} = \frac{0,826^2}{9,81}$$

$$k_{awal} = 0,069$$

Kemudian dilakukan iterasi untuk mendapatkan nilai k, seperti yang ditunjukkan pada tabel ini:

No	k (asumsi)	kh	tanh(kh)	k
1	0.0696	1.5730	0.9175	0.07586
2	0.0759	1.7144	0.9372	0.074267
3	0.0743	1.6784	0.9327	0.074628
4	0.0746	1.6866	0.9337	0.074544
5	0.0745	1.6847	0.9335	0.074563
6	0.0746	1.6851	0.9335	0.074559
7	0.0746	1.6850	0.9335	0.07456
8	0.0746	1.6850	0.9335	0.074559
9	0.0746	1.6850	0.9335	0.074559
10	0.0746	1.6850	0.9335	0.074559
11	0.0746	1.6850	0.9335	0.074559
12	0.0746	1.6850	0.9335	0.074559
13	0.0746	1.6850	0.9335	0.074559
14	0.0746	1.6850	0.9335	0.074559
15	0.0746	1.6850	0.9335	0.074559
16	0.0746	1.6850	0.9335	0.074559
17	0.0746	1.6850	0.9335	0.074559
18	0.0746	1.6850	0.9335	0.074559
19	0.0746	1.6850	0.9335	0.074559
20	0.0746	1.6850	0.9335	0.074559

Setelah iterasi maka diperoleh nilai k, yaitu 0,746. Selanjutnya nilai k dimasukkan ke transfer function G.

$$G(\omega) = \frac{\omega}{\sinh(k \cdot d)}, \text{ dengan } \omega = 0 \text{ sampai dengan } 2$$

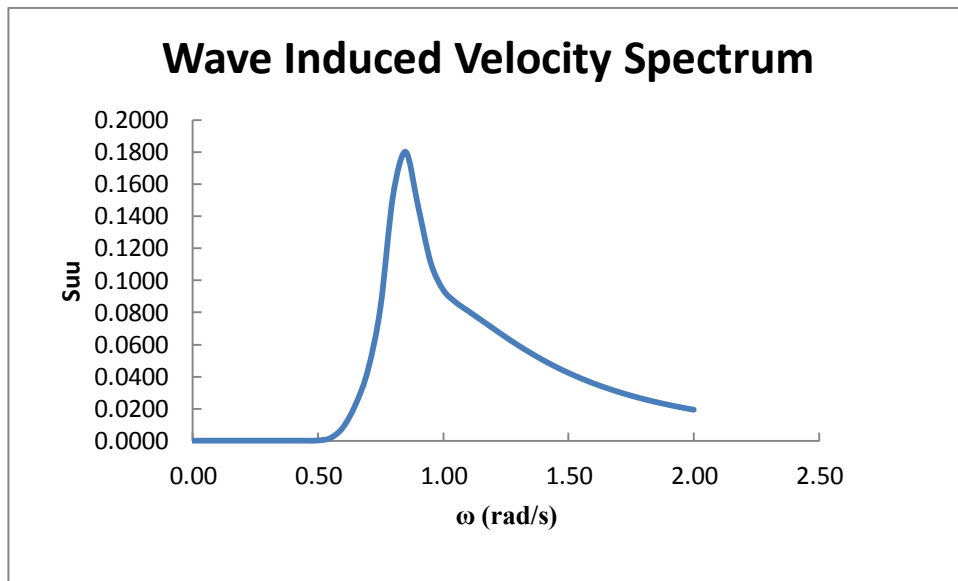
w	G(w)
0	0
0.05	0.0192
0.1	0.0384
0.15	0.0576
0.2	0.0768
0.25	0.096
0.3	0.1152
0.35	0.1344
0.4	0.1536
0.45	0.1728
0.5	0.192
0.55	0.2112
0.6	0.2304
0.65	0.2497
0.7	0.2689
0.75	0.2881
0.8	0.3073
0.85	0.3265
0.9	0.3457
0.95	0.3649
1	0.3841
1.05	0.4033
1.1	0.4225
1.15	0.4417
1.2	0.4609
1.25	0.4801
1.3	0.4993
1.35	0.5185
1.4	0.5377
1.45	0.5569
1.5	0.5761
1.55	0.5953
1.6	0.6145
1.65	0.6337
1.7	0.6529
1.75	0.6721
1.8	0.6913
1.85	0.7105
1.9	0.7298
1.95	0.749
2	0.7682

Setelah spektrum energy dan transfer function G diperoleh, nilainya akan digunakan untuk mencari spektrum kecepatan partikel air di dasar laut akibat gelombang di permukaan laut menggunakan persamaan:

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

w	S(w)	G(w)	G^2(w)	Suu
0	0	0	0	0
0.05	0	0.0192	0.0004	0
0.1	0	0.0384	0.0015	0
0.15	0	0.0576	0.0033	0
0.2	0	0.0768	0.0059	0
0.25	0	0.096	0.0092	0
0.3	0	0.1152	0.0133	0
0.35	0	0.1344	0.0181	0
0.4	0	0.1536	0.0236	0
0.45	0	0.1728	0.0299	0
0.5	0.003	0.192	0.0369	0.0001
0.55	0.037	0.2112	0.0446	0.0016
0.6	0.155	0.2304	0.0531	0.0083
0.65	0.36	0.2497	0.0623	0.0224
0.7	0.612	0.2689	0.0723	0.0443
0.75	1.007	0.2881	0.083	0.0835
0.8	1.62	0.3073	0.0944	0.153
0.85	1.689	0.3265	0.1066	0.18
0.9	1.222	0.3457	0.1195	0.146
0.95	0.834	0.3649	0.1331	0.1111
1	0.637	0.3841	0.1475	0.094
1.05	0.53	0.4033	0.1626	0.0863
1.1	0.453	0.4225	0.1785	0.0808
1.15	0.386	0.4417	0.1951	0.0754
1.2	0.329	0.4609	0.2124	0.0699
1.25	0.28	0.4801	0.2305	0.0645
1.3	0.238	0.4993	0.2493	0.0594
1.35	0.203	0.5185	0.2689	0.0545
1.4	0.173	0.5377	0.2891	0.0501
1.45	0.148	0.5569	0.3102	0.046
1.5	0.127	0.5761	0.3319	0.0422
1.55	0.11	0.5953	0.3544	0.0388
1.6	0.095	0.6145	0.3776	0.0357
1.65	0.082	0.6337	0.4016	0.0329
1.7	0.071	0.6529	0.4263	0.0304
1.75	0.062	0.6721	0.4518	0.028
1.8	0.054	0.6913	0.478	0.0259
1.85	0.048	0.7105	0.5049	0.024
1.9	0.042	0.7298	0.5325	0.0223
1.95	0.037	0.749	0.5609	0.0207
2	0.033	0.7682	0.5901	0.0193

Nilai  $S_{uu}$  diplot dalam grafik berikut ini:



Kemudian dicari momen spektra dari luasan di bawah kurva spektra.



w	S(w)	G(w)	G^2(w)	Suu	FS	m <sub>0</sub>	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>4</sub>
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0.05	0	0.0192	0.0004	0	4	0	0	0	0
0.1	0	0.0384	0.0015	0	2	0	0	0	0
0.15	0	0.0576	0.0033	0	4	0	0	0	0
0.2	0	0.0768	0.0059	0	2	0	0	0	0
0.25	0	0.096	0.0092	0	4	0	0	0	0
0.3	0	0.1152	0.0133	0	2	0	0	0	0
0.35	0	0.1344	0.0181	0	4	0	0	0	0
0.4	0	0.1536	0.0236	0	2	0	0	0	0
0.45	0	0.1728	0.0299	0	4	0	0	0	0
0.5	0.003	0.192	0.0369	0.0001	2	0	0	0	0
0.55	0.037	0.2112	0.0446	0.0016	4	0.007	0.004	0.002	0.001
0.6	0.155	0.2304	0.0531	0.0083	2	0.017	0.01	0.006	0.002
0.65	0.36	0.2497	0.0623	0.0224	4	0.09	0.058	0.038	0.016
0.7	0.612	0.2689	0.0723	0.0443	2	0.089	0.062	0.043	0.021
0.75	1.007	0.2881	0.083	0.0835	4	0.334	0.251	0.188	0.106
0.8	1.62	0.3073	0.0944	0.153	2	0.306	0.245	0.196	0.125
0.85	1.689	0.3265	0.1066	0.18	4	0.72	0.612	0.52	0.376
0.9	1.222	0.3457	0.1195	0.146	2	0.292	0.263	0.237	0.192
0.95	0.834	0.3649	0.1331	0.1111	4	0.444	0.422	0.401	0.362
1	0.637	0.3841	0.1475	0.094	2	0.188	0.188	0.188	0.188
1.05	0.53	0.4033	0.1626	0.0863	4	0.345	0.362	0.38	0.419
1.1	0.453	0.4225	0.1785	0.0808	2	0.162	0.178	0.195	0.237
1.15	0.386	0.4417	0.1951	0.0754	4	0.301	0.347	0.399	0.527
1.2	0.329	0.4609	0.2124	0.0699	2	0.14	0.168	0.201	0.29
1.25	0.28	0.4801	0.2305	0.0645	4	0.258	0.323	0.403	0.63
1.3	0.238	0.4993	0.2493	0.0594	2	0.119	0.154	0.201	0.339
1.35	0.203	0.5185	0.2689	0.0545	4	0.218	0.295	0.398	0.725
1.4	0.173	0.5377	0.2891	0.0501	2	0.1	0.14	0.196	0.385
1.45	0.148	0.5569	0.3102	0.046	4	0.184	0.267	0.387	0.813
1.5	0.127	0.5761	0.3319	0.0422	2	0.084	0.127	0.19	0.428
1.55	0.11	0.5953	0.3544	0.0388	4	0.155	0.241	0.373	0.896
1.6	0.095	0.6145	0.3776	0.0357	2	0.071	0.114	0.183	0.468
1.65	0.082	0.6337	0.4016	0.0329	4	0.132	0.217	0.358	0.976
1.7	0.071	0.6529	0.4263	0.0304	2	0.061	0.103	0.175	0.507
1.75	0.062	0.6721	0.4518	0.028	4	0.112	0.196	0.344	1.052
1.8	0.054	0.6913	0.478	0.0259	2	0.052	0.093	0.168	0.545
1.85	0.048	0.7105	0.5049	0.024	4	0.096	0.178	0.329	1.126
1.9	0.042	0.7298	0.5325	0.0223	2	0.045	0.085	0.161	0.581
1.95	0.037	0.749	0.5609	0.0207	4	0.083	0.162	0.315	1.198
2	0.033	0.7682	0.5901	0.0193	1	0.019	0.039	0.077	0.308
					Jumlah	5.224	5.902	7.253	13.84

$$M_0 = \frac{1}{3} \cdot \Delta\omega \cdot \Sigma m_0$$

$$M_0 = \frac{1}{3} \cdot 0,05 \cdot 5,224$$

$$M_0 = 0,0871$$

$$M_1 = \frac{1}{3} \cdot \Delta\omega \cdot \Sigma m_1$$

$$M_1 = \frac{1}{3} \cdot 0,05 \cdot 5,902$$

$$M_1 = 0,0984$$

$$M_2 = \frac{1}{3} \cdot \Delta\omega \cdot \Sigma m_2$$

$$M_2 = \frac{1}{3} \cdot 0,05 \cdot 7,253$$

$$M_2 = 0,1209$$

$$M_4 = \frac{1}{3} \cdot \Delta\omega \cdot \Sigma m_4$$

$$M_4 = \frac{1}{3} \cdot 0,05 \cdot 13,840$$

$$M_4 = 0,2307$$

Kecepatan signifikan di dasar laut adalah:

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

$$U_s = 2\sqrt{0,0871}$$

$$U_s = 0,590 \text{ m/s}$$

Periode gelombang yang bekerja pada pipa adalah:

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

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{0,0871}{0,1209}}$$

$$T_u = 5,329 \text{ detik}$$

Single oscillation velocity (kecepatan ekstrim) di dasar laut didapatkan menggunakan persamaan:

$$k_U = \frac{U^*}{U_s} = \frac{1}{2} \cdot \left( \sqrt{2 \cdot \ln \tau} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \cdot \ln \tau}} \right)$$

$$\text{dengan, } \tau = T/T_u$$

$$\tau = 3 \cdot 3600 / 5,329$$

$$\tau = 2026$$

$$k_U = \frac{U^*}{0,473} = \frac{1}{2} \cdot \left( \sqrt{2 \cdot \ln (2026)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \cdot \ln (2026)}} \right)$$

$$U^* = 1,195 \text{ m/s}$$

Periode gelombang pada kondisi ekstrim dihitung dengan persamaan:

$$k_T = \frac{T^*}{T_u} = \begin{cases} k_t - 5 \cdot (k_t - 1) \cdot T_n/T_u & \text{untuk } T_n/T_u \leq 0,2 \\ 1 & \text{untuk } T_n/T_u > 0,2 \end{cases}$$

$$T_n/T_u = \frac{\sqrt{d/g}}{T_u} = \frac{\sqrt{26/9,81}}{5,329} = 0,3$$

Maka,

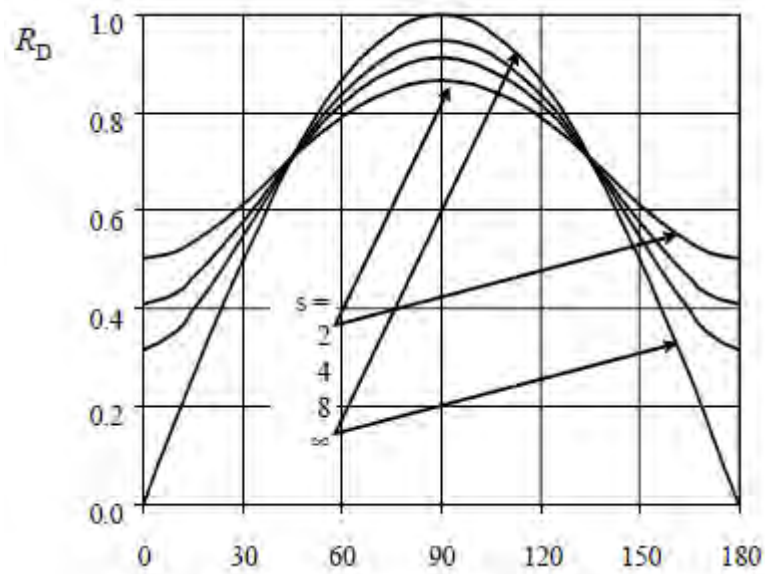
$$1 = \frac{T^*}{T_u}$$

$$T^* = T_u = 5,329 \text{ detik}$$

Kecepatan partikel gelombang pada berbagai arah.

$$U_w = R_D \cdot U_{w\theta}$$

Nilai  $R_D$  didapatkan dari grafik faktor reduksi.



$\theta$	$R_D$	$U_w^*$
0	0.41	0.490
30	0.58	0.693
60	0.81	0.968
90	1	1.195
120	0.81	0.968
150	0.58	0.693
180	0.41	0.490

### Kecepatan Arus

Kecepatan arus dapat tereduksi karena efek dasar laut dan arah arus.

Kecepatan arus:

$$V(z) = V(z_r) \cdot \left( \frac{\ln(z+z_0)}{\ln(z_r+z_0)} \right) \cdot \sin \theta_c$$

$\theta$	V
0	0.000
30	0.220
60	0.382
90	0.441
120	0.382
150	0.220
180	0.000

### **Berat Terendam Pipa**

a)	Steel Weight		
	W <sub>st</sub> =	1065,298	N/m
b)	Coating 1 weight		
	W <sub>cs1</sub> =	37,470	N/m
c)	Concrete weight		
	W <sub>conc</sub> =	1313,053	N/m
e)	Content Weight		
	W <sub>cont</sub> =	89,574	N/m
	Pipe Weight on Air =	2505	N/m
	Pipe Bouyancy=	1497	N/m
	Pipe Submerged Weight=	1008	N/m

## Koefisien Reduksi

- Reduksi beban karena permeable seabed  
 $R_{perm,z}=0,7$
- Reduksi beban karena penetrasi pipa ke tanah

$$r_{pen,y} = 1,0 - 1,4 \cdot \frac{Z_p}{D} \geq 0,3$$

dengan,

$$\frac{Z_{pi}}{D} = 0,0071 \cdot \left( \frac{G_c^{0,3}}{\kappa_c} \right)^{3,2} + 0,062 \cdot \left( \frac{G_c^{0,3}}{\kappa_c} \right)^{0,7}$$

dengan,

$$\kappa_c = \frac{s_u \cdot D}{w_s - F_z} = \frac{6000 \cdot 0,407}{1008} = 2,422$$

dan

$$G_c = \frac{6000}{0,407 \cdot 18000} = 0,81$$

Maka,

$$Z_{pi} = 0,01 \text{ meter}$$

Maka,

$$r_{pen,y} = 1,0 - 1,4 \cdot \frac{0,01}{0,407}$$

$$r_{pen,y} = 0,96$$

$$r_{pen,z} = 1,0 - 1,3 \cdot \left( \frac{Z_p}{D} - 0,1 \right)$$

$$r_{pen,z} = 1,0 - 1,3 \cdot \left( \frac{0,011}{0,407} - 0,1 \right)$$

$$r_{pen,z} = 1,09$$

r total:

$$r_{total,y} = 0,96$$

$$r_{total,z} = r_{pen,z} \cdot r_{perm,z}$$

$$= 1,09 \cdot 0,7$$

$$= 0,76$$

### **Soil Passive Resistance**

Tahanan pasif untuk tanah lempung adalah:

$$\frac{F_R}{F_C} = \frac{4,1 \cdot \kappa_c}{G_c^{0,39}} \cdot \left(\frac{z_p}{D}\right)^{1,31}$$

$$\frac{F_R}{841} = \frac{4,1 \cdot 2,42}{0,81^{0,39}} \cdot \left(\frac{0,011}{0,407}\right)^{1,31}$$

$$F_R = 120,84 \text{ N/m}$$

### **Coulomb Friction**

$$CF = \mu \cdot W_s$$

$$= 0,2 \cdot 1008$$

$$= 202 \text{ N/m}$$

### **Beban Gelombang dan Arus**

Keulegan-Carpenter Number adalah:

$$K^* = \frac{U_s^* \cdot T_u^*}{D}$$

Dengan,  $T_u^* = 5,329$  dan  $D = 0.407 \text{ m}$ , maka  $K^*$ :

$\theta$	$U_w^*$	$K^*$
0	0.490	6.42
30	0.693	9.08
60	0.968	12.68
90	1.195	15.65
120	0.968	12.68
150	0.693	9.08
180	0.490	6.42

Rasio kecepatan arus dan gelombang adalah:

$$M = \frac{V^*}{U^*}$$

$\theta$	$U_w^*$	V	$M^*$
0	0.490	0.000	0.0
30	0.693	0.220	0.3
60	0.968	0.382	0.4
90	1.195	0.441	0.4
120	0.968	0.382	0.4
150	0.693	0.220	0.3
180	0.490	0.000	0.0

Koefisien beban  $C_Y^*$  dan  $C_Z^*$  didapat dari Tabel 3.3 dan 3.4 dengan menggunakan interpolasi.

$\theta$	$C_Y^*$	$C_Z^*$
0	6.16	4.96
30	3.07	3.48
60	2.31	2.94
90	2.1	2.49
120	2.31	2.94
150	3.07	3.48
180	6.16	4.96

Beban maksimum arah horizontal dan vertikal adalah:

$$F_Y^* = r_{tot,y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_Y^* (U^* + V^*)^2$$

$$F_Z^* = r_{tot,z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_Z^* (U^* + V^*)^2$$

$\theta$	$F_Y^*$	$F_Z^*$
0	295	189
30	510	461
60	838	851
90	1119	1058
120	838	851
150	510	461
180	295	189

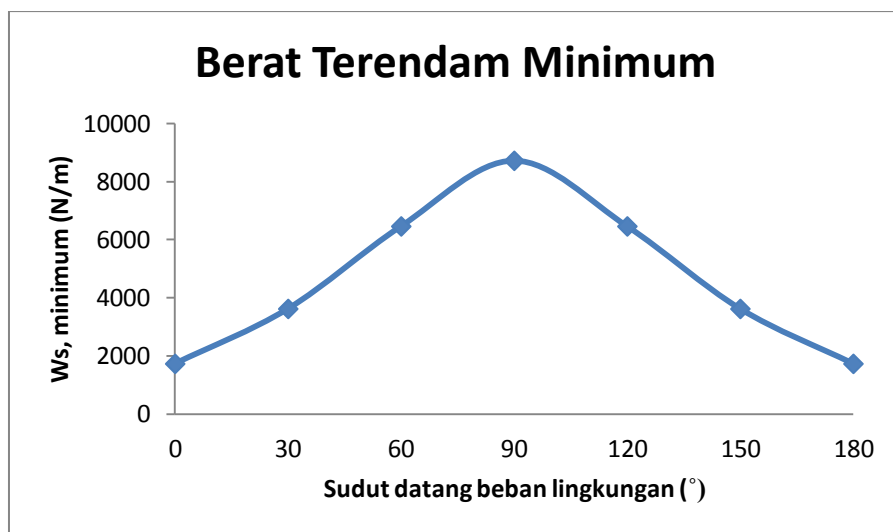


### Kriteria Stabilitas

Desain kriteria metode *absolute stability* adalah:

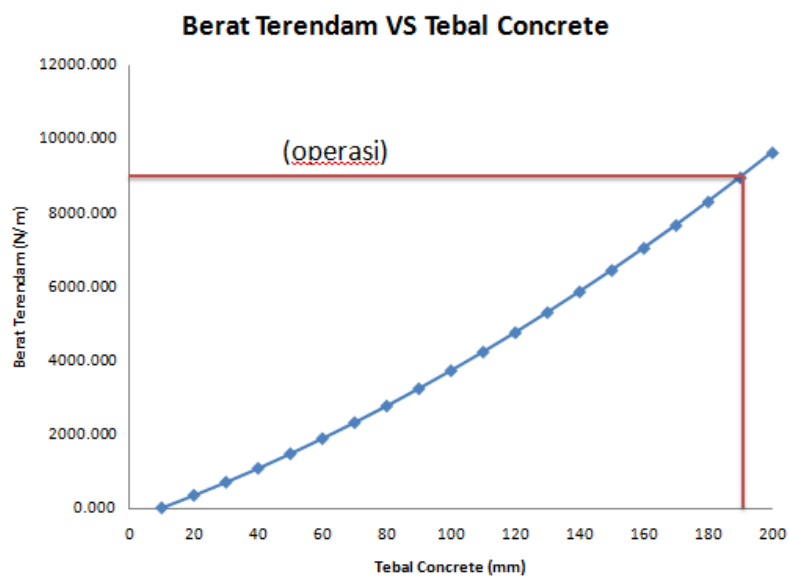
$$\gamma_{SC} \cdot \frac{F_Y^* + \mu \cdot F_Z^*}{\mu \cdot w_s + F_R} \leq 1,0$$

$\theta$	FY*	FZ*	Ws, min
0	295	189	1722
30	510	461	3612
60	838	851	6452
90	1119	1058	8710
120	838	851	6452
150	510	461	3612
180	295	189	1722



## Tebal Concrete VS Berat Terendam

Tebal Concrete (mm)	Berat Terendam (N/m)
10	14.229
20	352.278
30	709.055
40	1084.561
50	1478.795
60	1891.758
70	2323.449
80	2773.869
90	3243.017
100	3730.893
110	4237.498
120	4762.832
130	5306.894
140	5869.684
150	6451.203
160	7051.450
170	7670.426
180	8308.131
190	8964.563
200	9639.725



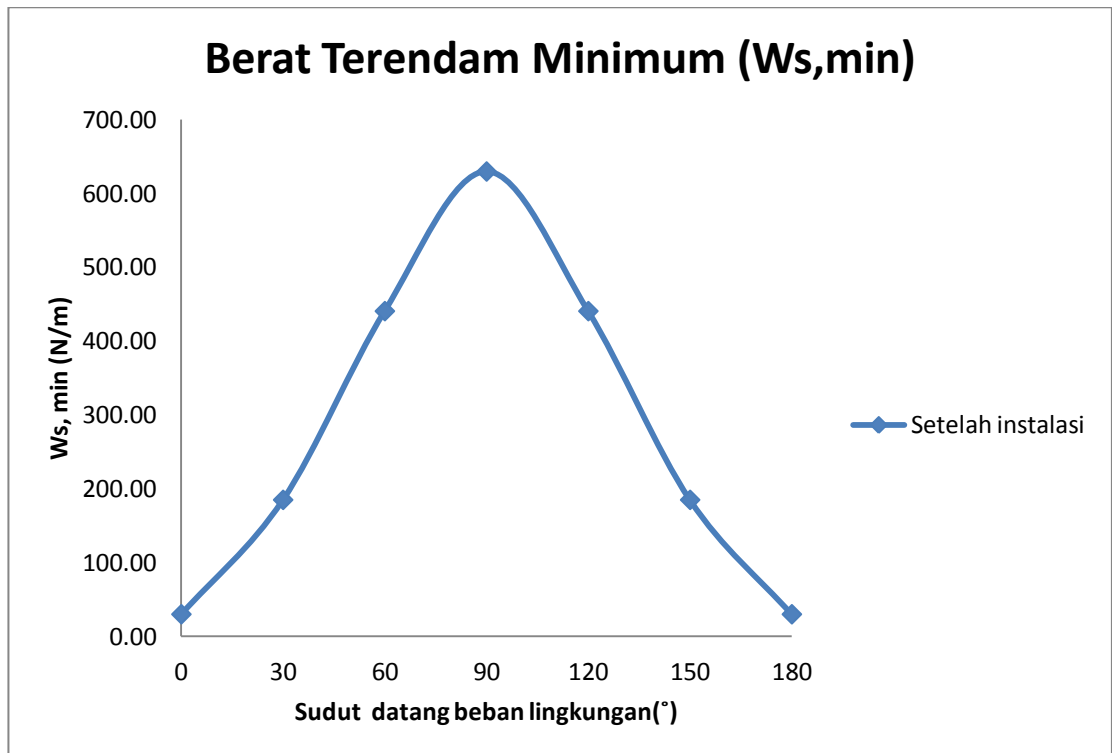
c. Generalized Parameter (Kondisi Instalasi)

$$\frac{L_{10}}{(2+M)^2} = \begin{cases} C_1 + \frac{C_2}{K^{C_3}} & \text{for } K \geq K_b \\ C_1 + \frac{C_2}{K_b^{C_3}} & \text{for } K < K_b \end{cases}$$

$$L \quad \text{Significant weight parameter} = \frac{w_z}{0.5 \cdot \rho_w \cdot D \cdot U_z^2}$$

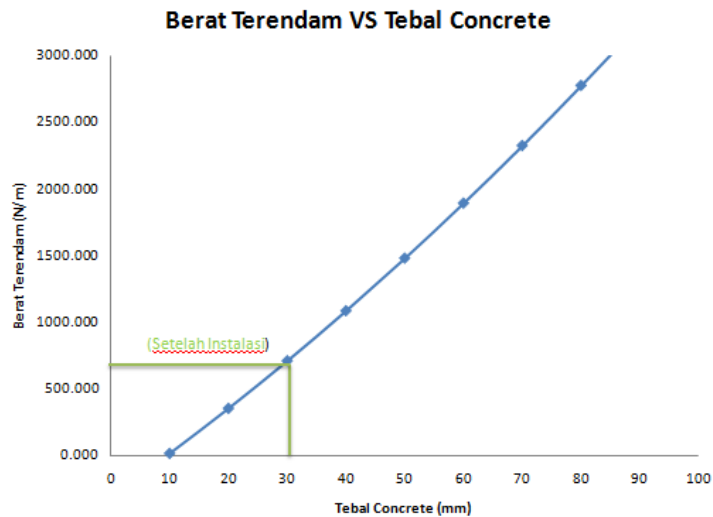
Nilai Kb, c1, c2, c3 diambil dari Tabel 2.13

$\theta$	Uw	V	M	N	Kb	c1	c2	c3	L	Ws
0	0.241	0	0.0	0.005187	10	0	8	0.5	3.577709	30.15
30	0.342	0.22	1.6	0.007337	10	0.8	6	0.5	3.483282	185.04
60	0.478	0.38	2.0	0.010247	10	0.8	6	0.5	3.483282	440.57
90	0.590	0.44	1.8	0.01265	10	0.8	6	0.5	3.483282	629.60
120	0.478	0.38	2.0	0.010247	10	0.8	6	0.5	3.483282	440.57
150	0.342	0.22	1.6	0.007337	10	0.8	6	0.5	3.483282	185.04
180	0.241	0	0.0	0.005187	10	0	8	0.5	3.577709	30.15



## Tebal Concrete VS Berat Terendam

Tebal Concrete (mm)	Berat Terendam (N/m)
10	14.229
20	352.278
30	709.055
40	1084.561
50	1478.795
60	1891.758
70	2323.449
80	2773.869
90	3243.017
100	3730.893



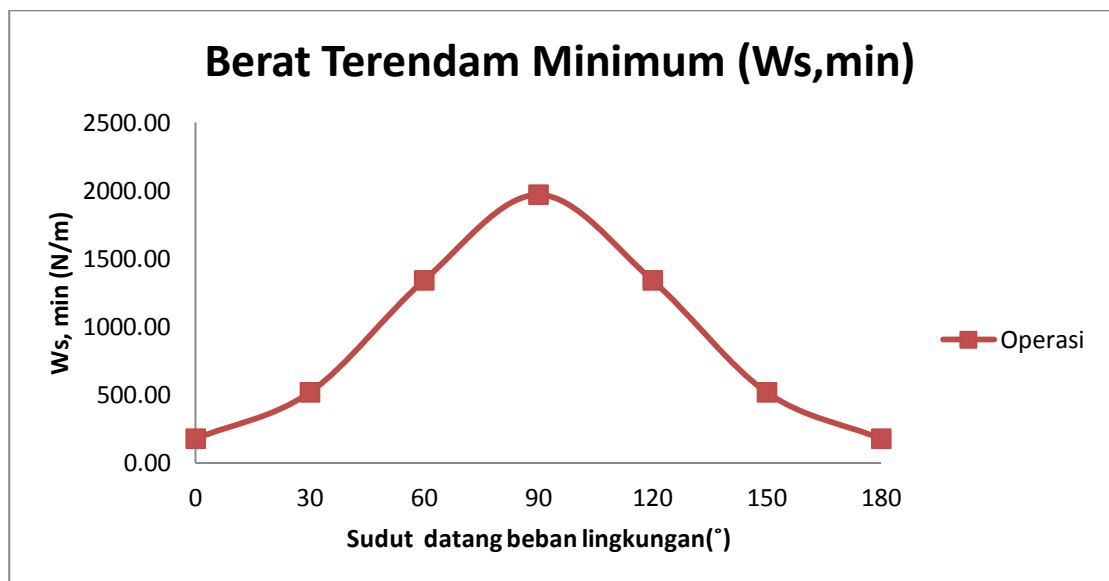
### d. Generalized Parameter (Kondisi Operasi)

$$\frac{L_{10}}{(2+M)^2} = \begin{cases} C_1 + \frac{C_2}{K^{C_3}} & \text{for } K \geq K_b \\ C_1 + \frac{C_2}{K_b^{C_3}} & \text{for } K < K_b \end{cases}$$

$$L^* \quad \text{Weight parameter related to single design oscillation} = \frac{w_s}{0.5 \cdot \rho_w \cdot D \cdot (U^* + V^*)^2}$$

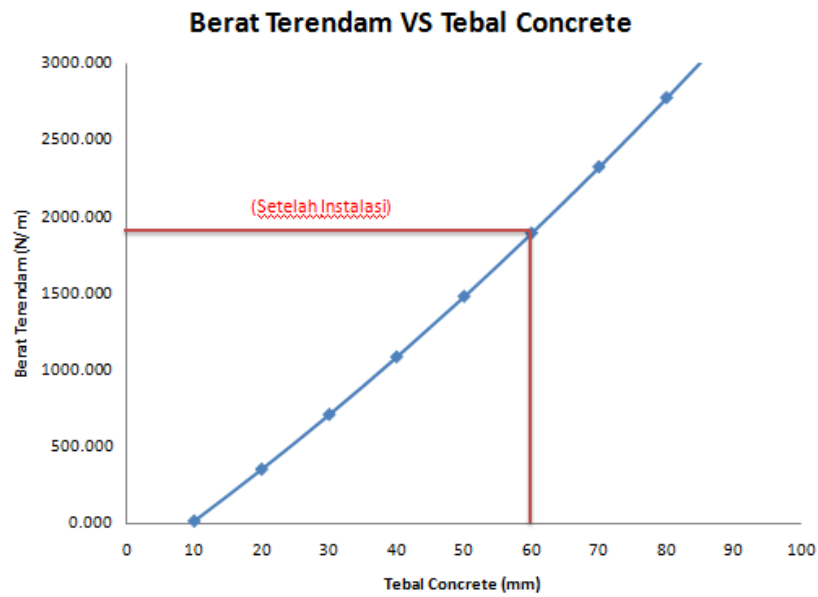
Nilai Kb, c1, c2, c3 diambil dari Tabel 2.13

$\theta$	$U_w^*$	V	M	N	Kb	c1	c2	c3	L	$W_s$
0	0.489	0	0.0	0.004628	10	0	8	0.5	3.577709	179.17
30	0.693	0.220	0.6	0.006547	5	0.3	6	0.5	2.983282	519.23
60	0.968	0.381	0.8	0.009143	5	0.4	7	0.5	3.530495	1341.34
90	1.195	0.440	0.7	0.011288	5	0.4	7	0.5	3.530495	1970.31
120	0.968	0.381	0.8	0.009143	5	0.4	7	0.5	3.530495	1341.34
150	0.693	0.220	0.6	0.006547	5	0.3	6	0.5	2.983282	519.23
180	0.489	0	0.0	0.004628	10	0	8	0.5	3.577709	179.17



### Tebal Concrete VS Berat Terendam

Tebal Concrete (mm)	Berat Terendam (N/m)
10	14.229
20	352.278
30	709.055
40	1084.561
50	1478.795
60	1891.758
70	2323.449
80	2773.869
90	3243.017
100	3730.893



## 2. Stabilitas Vertikal

Berdasarkan DnV RP F109 kriteria stabilitas vertikal pipa bawah laut adalah:

$$\gamma_m \frac{b}{w_s + b} \leq 1$$

Dengan  $\gamma_m=1,1$  dan  $b= 1497$  N/m, maka

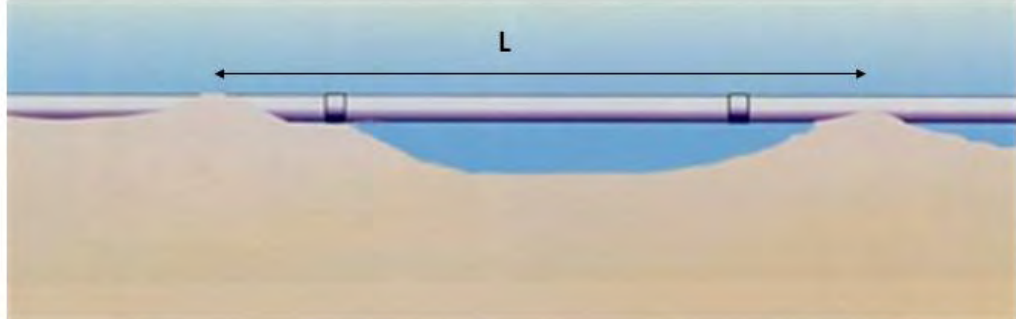
$$1,1 \frac{1497}{w_s + 1497} \leq 1$$

$$W_s, min = 150 \text{ N/m}$$

- Kondisi Instalasi  
 $W_s > W_{s,min}$   
 $918 \text{ N/m} > 150 \text{ N/m}$  **Memenuhi**
- Kondisi Operasi  
 $W_s > W_{s,min}$   
 $1008 \text{ N/m} > 150 \text{ N/m}$  **Memenuhi**

## LAMPIRAN B

### Local Buckling



Data pipa bawah laut dan lingkungan diambil dari Tabel 4.1 dan 4.2

Kriteria kegagalan local buckling pipa bawah laut akibat kombinasi beban tekanan eksternal, tekanan internal, momen bending dan effective axial force pada DnV OS F101 adalah:

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{sd}(p_i)}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 + \left( \alpha_p \cdot \frac{p_i - p_e}{\alpha_c \cdot P_b(t_2)} \right)^2 \right\} \leq 1$$

- **Langkah 1 (mencari safety class, material resistance dan)**

➤ Location= 1

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

➤ Fluid Type = B

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

➤ Safety Class= Medium

Phase	Fluid Category A, C		Fluid Category <u>B</u> , D and E	
	Location Class		Location Class	
	1	2	<u>1</u>	2
Temporary <sup>2,3</sup>	Low	Low	-	-
<u>Operational</u>	Low	Medium <sup>4</sup>	<u>Medium</u>	High

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

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

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

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

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

➤ Safety Class Resistance Factor = 1,138

Safety class	$\gamma_{SC}$		
	Low	<u>Medium</u>	High
Pressure containment <sup>1)</sup>	1.046 <sup>2),3)</sup>	<u>1.138</u>	1.308 <sup>4)</sup>
Other	1.04	1.14	1.26

1) The number of significant digits is given in order to comply with the ISO usage factors.

2) Safety class low will be governed by the system pressure test which is required to be 3% above the incidental pressure. Hence, for operation in safety class low, the resistance factor will effectively be minimum 3% higher.

3) For system pressure test,  $\alpha_T$  shall be equal to 1.00, which gives an allowable hoop stress of 96% of SMYS both for materials fulfilling supplementary requirement U and those not.

4) For parts of pipelines in location class 1, resistance safety class medium may be applied (1.138).



➤ Incidental Factor=1,1

Condition or pipeline system	$\gamma_{inc}$
Typical pipeline system	1.10
Minimum, except for below	1.05
When design pressure is equal to full shut-in pressure including dynamic effects	1.00

➤ Material Resistance Factor= 1,15

Limit state category <sup>1)</sup>	SLS/ <u>ULS</u> /ALS	FLS
$\gamma_m$	<u>1.15</u>	1.00

1) The limit states (SLS, ULS, ALS and FLS) are defined in D.

➤ Usage factor= 0,9

	Safety class		
	Low	Medium	High
$\eta$	1.00	0.90	0.80

- Langkah 2 (mencari pressure containment resistance)

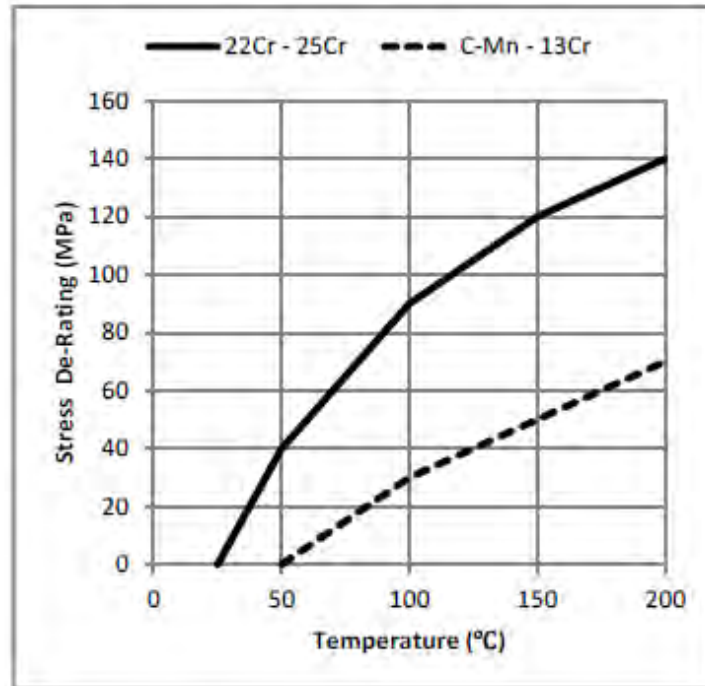
$$\begin{aligned}
 t_2 &= t - t_{corr} \\
 &= 14,27 - 3 \\
 &= 11,27 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

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

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

SMYS dan SMTS adalah yield strength dan tension strength,  $f_{y,temp}$ ,  $f_{u,temp}$  adalah derating pada yield strength dan tension strength akibat temperature operasi.

Namun karena temperature operasi di bawah 50 °C maka stress de-rating pipa



adalah 0.

Dari grafik di atas didapatkan nilai  $f_{y,temp}$  dan  $f_{u,temp}$  sebesar 0 MPa.

Berdasarkan standard,  $\alpha_U$  bernilai 0,96

<i>Factor</i>	<i>Normally</i>	<i>Supplementary requirement U</i>
$\alpha_U$	0.96	1.00

Sehingga,

$$\begin{aligned}
 f_y &= (SMYS - f_{y,temp}) \cdot \alpha_U \\
 &= (360 - 0) \cdot 0,96 \\
 &= 345,6 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_u &= (SMTS - f_{u,temp}) \cdot \alpha_U \\
 &= (460 - 0) \cdot 0,96 \\
 &= 441,6 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{cb} &= \min \left[ f_y; \frac{f_u}{1,15} \right] \\
 &= \min \left[ 345,6; \frac{441,6}{1,15} \right] \\
 &= \min[345,6; 384] \\
 &= 345,6
 \end{aligned}$$

Maka pressure containment resistance adalah,

$$\begin{aligned}
 P_b(t_2) &= \frac{2t_2}{D_s - t_2} \cdot f_{cb} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \\
 &= \frac{2 \cdot 11,27}{323 - 11,27} \cdot 345,6 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \\
 &= 28,85 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

- **Langkah 3 (mencari parameter  $\alpha_c$  dan  $\alpha_p$ )**

Selanjutnya akan dicari nilai parameter  $\alpha_c$  dan  $\alpha_p$

$$\beta = \begin{cases} 0,5 & D_s/t_2 < 15 \\ \left( \frac{60 - D_s/t_2}{90} \right) & 15 \leq D_s/t_2 \leq 60 \\ 0 & D_s/t_2 > 60 \end{cases}$$

Dengan,

$$D_s/t_2 = 323/11,27 = 28,66$$

Maka,

$$\beta = \frac{60 - D_s/t_2}{90}$$

$$= \frac{60 - 323/11,27}{90}$$

$$= 0,34$$

Setelah nilai parameter  $\beta$  didapatkan, selanjutnya akan digunakan untuk mencari nilai  $\alpha_c$

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

$$= (1 - 0,34) + 0,34 \cdot \frac{412,8}{316,8}$$

$$= 1,105$$

$$\alpha_p = \begin{cases} 1 - \beta & \frac{p_i - p_e}{p_b} < \frac{2}{3} \\ 1 - 3\beta \left(1 - \frac{p_i - p_e}{p_b}\right) & \frac{p_i - p_e}{p_b} \geq \frac{2}{3} \end{cases}$$

Dengan,

$$p_e = 1 \text{ atm} + \rho \cdot g \cdot h$$

$$= 101325 + 1025 \cdot 9,81 \cdot 21,198$$

$$= 314476 \quad \text{Pa}$$

$$= 0,314476 \quad \text{MPa}$$

$$p_i = p_a \cdot \gamma_{inc}$$

$$= 1,01 \cdot 1,1$$

$$= 1,111 \text{ MPa}$$

$$\frac{p_i - p_e}{p_b} = \frac{1,111 - 0,31}{22,65}$$

$$\frac{p_i - p_e}{p_b} = 0,03$$

$$\begin{aligned}\alpha_p &= 1 - \beta \\ &= 1 - 0,34 \\ &= 0,65\end{aligned}$$

- **Langkah 3 (mencari kapasitas plastis bending moment dan effective axial force)**

Kapasitas plastis bending moment adalah bending momen yang mampu ditahan pipa sebelum memasuki daerah plastis, yang bernilai:

$$\begin{aligned}M_{p(t)} &= f_y \cdot \pi \cdot (D - t)^2 \cdot t \\ &= 345,6 \cdot 3,14 \cdot (323 - 14,27)^2 \cdot 14,27 \\ &= 470062,248 \text{ N}\end{aligned}$$

Kapasitas plastis effective axial force adalah gaya axial yang mampu ditahan pipa sebelum memasuki daerah plastis, yang bernilai:

$$\begin{aligned}S_{p(t)} &= f_y \cdot \pi \cdot (D - t) \cdot t \\ &= 345,6 \cdot 3,14 \cdot (323 - 14,27) \cdot 14,27 \\ &= 3812465,28 \text{ N}\end{aligned}$$

- **Langkah 4 (mencari effective axial force dan axial stress)**

Effective axial force dipengaruhi oleh tekanan internal dan eksternal, thermal expansion.

$$\begin{aligned}S_{sd} &= H - \Delta p_i A_i (1 - 2\nu) - A_s E \Delta T \alpha_c \\ &= 230000 - 1,01 \cdot 10^6 \cdot 0,2722 (1 - 2 \cdot 0,3) - 0,0138 \\ &= -136683,38 \text{ N (axial force)}\end{aligned}$$

$$\sigma_l = \frac{N}{\pi \cdot (D - t_2) \cdot t_2} + \frac{M}{\frac{\pi \cdot (D^4 - (D - 2 \cdot t_2)^4)}{32 \cdot D}}$$

$$\sigma_l = \frac{136683,38}{\pi \cdot (323 - 11,27) \cdot 11,27}$$

$$\sigma_l = 12,39 \text{ Mpa (axial stress)}$$

ASD (Allowable Stress Design) untuk tegangan aksial adalah

$$|\sigma_l| \leq \eta \cdot f_y$$

$$12,39 \leq 0,9 \cdot 345,6$$

12,39 ≤ 311,04 (memenuhi)

• **Langkah 4 (mencari bending moment)**

Berdasarkan DnV OS F101, tegangan akibat berat terendam adalah beban fungsional. Ketika menghitung bending moment, beban fungsional dikalikan dengan koefisien  $\gamma_F$  dan  $\gamma_C$ . Nilai  $\gamma_F, \gamma_C$  masing-masing adalah 1,1 , 1,0.

**Table 4-4 Load effect factor combinations**

Limit State / Load combination	Load effect combination		Functional loads <sup>1)</sup>	Environmental load	Interference loads	Accidental loads
			$\gamma_F$	$\gamma_E$	$\gamma_F$	$\gamma_A$
ULS	a	System check <sup>2)</sup>	1.2	0.7		
	b	Local check	1.1	1.3	1.1	
FLS	c		1.0	1.0	1.0	
ALS	d		1.0	1.0	1.0	1.0

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

**Table 4-5 Condition load effect factors,  $\gamma_C$**

Condition	$\gamma_C$
Pipeline resting on uneven seabed	1.07
Reeling on and J-tube pull-in	0.82
System pressure test	0.93
Otherwise	1.00

$$M_{Sd} = \frac{(F_G - F_F) \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C \cdot L^2}{8}$$

Nilai bending moment dicari dengan panjang free span yang berbeda seperti ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

L1=	40	m	Msd1=	221760	N.m
L2=	45	m	Msd2=	280665	N.m
L3=	50	m	Msd3=	346500	N.m
L4=	55	m	Msd4=	419265	N.m
L5=	60	m	Msd5=	498960	N.m

• **Langkah 5 (Analisis Local Buckling)**

Analisis local buckling dilakukan dengan panjang free span yang berbeda seperti ditunjukkan pada tabel dibawah. Berdasarkan kriteria local buckling, maka panjang maksimum span yang diijinkan adalah 50 m.

L(m)	Msd (N.m)	Mp(t2) (N.m)	Ssd (N)	Sp(t2) (N)	pi (MPa)	pe (MPa)	Pb(t2) (MPa)	Hasil
40	221760	470062	-136683	3812465.3	1.111	0.314476	28.85482298	0.319
45	280665	470062	-136683	3812465.3	1.111	0.314476	28.85482298	0.511
50	346500	470062	-136683	3812465.3	1.111	0.314476	28.85482298	0.777
55	419265	470062	-136683	3812465.3	1.111	0.314476	28.85482298	1.137
60	498960	470062	-136683	3812465.3	1.111	0.314476	28.85482298	1.609

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Dari serangkaian analisis hasil dan pembahasan *on-bottom stability* dan *local buckling* pipa bawah laut yang telah dilakukan dalam penelitian tugas akhir ini, dapat diambil kesimpulan pada permasalahan yang diangkat. Adapun kesimpulan yang diperoleh adalah sebagai berikut :

1. Besar gaya hidrodinamis horizontal pada kondisi setelah instalasi (kosong) dan operasi (berisi fluida) masing-masing adalah 405 N/m dan 1119 N/m. Besar gaya hidrodinamis vertikal pada kondisi setelah instalasi (kosong) dan operasi (berisi fluida) masing-masing adalah 138 N/m dan 1058 N/m. Besar *Coulomb friction* pada kondisi setelah instalasi (kosong) dan operasi (berisi fluida) masing-masing adalah 184 N/m dan 202 N/m. Besar tahanan pasif pada kondisi setelah instalasi (kosong) dan operasi (berisi fluida) masing-masing adalah 111 N/m dan 121 N/m.
2. Berdasarkan kriteria *on-bottom stability* DnV, pipa bawah laut stabil secara vertikal pada kondisi setelah instalasi (kosong) dan operasi (berisi fluida). Pada metode *absolute lateral static* pipa bawah laut tidak stabil secara lateral pada kondisi setelah instalasi (kosong) dan operasi (berisi fluida). Sehingga, tebal *concrete* perlu ditambah menjadi 60 mm dan 190 mm agar stabil pada kondisi setelah instalasi dan operasi. Pada metode *generalized parameter* pipa bawah laut tidak stabil secara lateral pada kondisi operasi (berisi fluida), namun stabil secara lateral pada kondisi instalasi (kosong). Sehingga, tebal *concrete* perlu ditambah menjadi 70 mm agar stabil pada kondisi operasi.
3. Panjang *free span* pipa bawah laut maksimum yang diijinkan agar tidak terjadi *local buckling* adalah 50 m. Hasil analisis *local buckling* dapat digunakan untuk melakukan mitigasi pada *free span* pipa bawah laut.



## 5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan pada penelitian ini untuk penelitian lebih lanjut adalah:

1. Melakukan analisis biaya berdasarkan hasil analisis *on-bottom stability*.
2. Melakukan analisis mitigasi apabila terdapat panjang *free span* yang melebihi panjang *free span* yang diijinkan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Allen, D.W., Lammert, W.F., Hale, J.R., dan Jacobsen V. 1989. Submarine pipeline on-bottom stability: recent AGA research. Proceeding, **The 10th Offshore Technical Conference**, paper 6055.
- Bai, Y., Bai, Q. 2005. **Subsea Pipelines and Risers**. Elsevier Science, USA.
- Braestrup, M.W., Andersen, J.B., Andersen, L.W., Bryndum, M.B., Christensen, C.J., Rishoy, N. 2005. **Design and Installation of Marine Pipelines**. Blackwell Science Ltd, Oxford, UK.
- Brennodden, H., Sveggen, O., Wagner, D.A., dan Murff, J.D. 1986. Full-scale pipe-soil interaction tests. Proceeding, **Offshore Technology Conference**, OTC 5338, 433-440.
- Det norske Veritas. 1988. **DNV RP E305, On-bottom stability design of submarine pipelines**. Norway.
- Det norske Veritas. 2007. **DNV RP F109, On-bottom stability design of submarine pipelines**. Norway.
- Det norske Veritas. 2013. **DNV OS F101, Submarine pipeline systems**. Norway.
- Djarmiko, E.B. 2012. **Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut Di Atas Gelombang Acak**. Itspress.
- Dong, J., *et al.* 2015. Local Buckling Analysis of Free Span for Submarine Pipeline. Proceeding, **14<sup>th</sup> International Conference on Pressure Vessel Technology**. 130: 408-413.
- Foda, M.A., Chang, J., Law, A. 1990. Wave-induced breakout of half-buried marine pipes. **Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering**. 116:267-286.
- Ghebregiorghis, D.A. 2014. **On-Bottom Stability Analysis of Subsea Pipelines According to DNV-RP-F109**. Laporan Tugas akhir. UiS, Norwegia.
- Guo, B., Song, S, Chacko, J., dan Ghalambor, A. 2005. **Offshore Pipelines**. Gulf Professional Publishing, Burlington, USA.
- Hale, J.R., Lammert, W.F., Jacobsen, V. 1989. Improved Bases for Static Stability Analysis and Design of Marine Pipelines. **Offshore Technology Conference**.

- Herbich, J.B. 1985. Hydromechanics of submarine pipelines: Design problems. **Canadian Journal of Civil Engineering**. 12:863-874.
- Jeng, D.S., Ismail, A., Zhang L.L., dan Zhang J.S. 2013. Empirical model for the prediction of lateral stability coefficient for un-trenched submarine pipes based on self-evolving neural network (SEANN). **Ocean Engineering**. 72:167-175.
- Lawlor, C.D.F., Flynn, S.J.A. 1991. Subsea pipeline stability analysis: Still a black art?. Proceeding, **Ninth Australasian Conference on Coastal and Ocean Engineering, Australia**, 1989: 35-41.
- Lambrakos, K.F., Remseth, S., Sotberg, T. and Verley, R. 1987. Generalized Response of Marine Pipelines. **Proc. of Nineteenth Offshore Technology Conference**. Paper No. 5507, Houston.
- Mehaute, B.L. 1976. **An introduction to hydrodynamics and water waves**. Springer-Verlag, New York.
- Palmer, A.C., King, R.A. 2008. **Subsea Pipeline Engineering**. PenWell Corporation, Oklahoma.
- Soegiono. 2007. **Pipa Laut**. Surabaya : Airlangga University Press.
- Tawekal, J.R., Idris, K. 2012. **Desain dan Analisis Tegangan Pipeline Crossing**. Tugas Akhir, ITB.
- Teh, T., Palmer, A., Bolton, M., dan Damgaard, J. 2006. Stability of Submarine Pipelines on Liquefied Seabeds. **Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng**. 132: 244–251.
- Tian, Y., Youssef, B., Cassidy, M.J. 2015. Assessment of pipeline stability in the Gulf of Mexico during hurricanes using dynamic analysis. **Theoretical and Applied Mechanics Letters**.
- Verley, R., Lambrakos, K.F., dan Reed, K. 1987. Prediction of Hydrodynamic Forces on Seabed Pipelines", Proceeding, **Nineteenth Offshore Technology Conference**, Houston. Paper No. 5503.
- Verley, R. dan Sotberg, T. 1992. A Soil Resistance Model for Pipelines Placed on Sandy Soils. **OMAE**. Volume 5-A.
- Wagner, D.A., Murff, J.D., Brennoddin, H., Sveggen, O. 1987. Pipe-soil interaction model. **The 8th Offshore Technical Conference**. Paper 5504.

## BIODATA PENULIS



Clinton Sibuea Lahir di Porsea, 6 februari 1993 dan merupakan anak ke empat dari lima bersaudara. Pendidikan SD dan SMP ditempuh di SD dan SMP Swasta Bonapasogit Sejahtera, Sumatra Utara. SMA ditempuh di SMAN 1 Matauli, Pandan. Setelah lulus SMA, penulis melanjutkan pendidikannya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama berkuliah, Penulis pernah menjadi *Staff* Departemen Hubungan Luar BEM FTK tahun 2013-2014

Pada tahun 2015, penulis melaksanakan Kerja Praktek di PT Encona Inti Industri Jakarta selama dua bulan. Pada bulan November 2015, Penulis mulai mengerjakan Tugas Akhir sebagai syarat kelulusan Pendidikan Sarjana (S1) dengan mengambil Bidang Keahlian Perancangan dan Produksi Bangunan Laut. Judul Tugas Akhir penulis berjudul **“Analisis On-Bottom Stability dan Local Buckling: Studi Kasus Pipa Bawah Laut dari Platform ULA menuju Platform UW”**.

Kontak dengan penulis: [clintonsibuea@gmail.com](mailto:clintonsibuea@gmail.com)