

28845/H/07



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

RSKe
665.744
Pra
5-1
2007

TUGAS AKHIR - LL1327

**STUDI OPTIMASI PIPA BAWAH LAUT DI LAPANGAN GAS
UJUNG PANGKAH KABUPATEN GRESIK**

ARKA NOVIANTO PRASETYA

NRP. 430 1 100 060

Dosen Pembimbing

Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D.

Ir. Hasan Ikhwan, M.Sc.

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2007

| PERPUSTAKAAN ITS | |
|---------------------|-----------|
| Tgl. Terima | 28-2-2007 |
| Terima Dari | H |
| No. Agenda Prp. | 227361 |



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - LL1327

**OPTIMIZATION STUDY FOR SUB SEA PIPELINE ON
UJUNG PANGKAH GAS FIELD GRESIK**

ARKA NOVIANTO PRASETYA

NRP. 4301 100 060

Supervisors

Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D.

Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc.

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

Faculty of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya 2007

STUDI OPTIMASI PIPA BAWAH LAUT DI LAPANGAN GAS UJUNG PANGKAH KABUPATEN GRESIK

TUGAS AKHIR

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

Oleh :
ARKA NOVIANTO P
Nrp. 4301 100 060

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D(Pembimbing I)



2. Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc(Pembimbing II)



SURABAYA, FEBRUARI 2007

STUDI OPTIMASI PIPA BAWAH LAUT DI LAPANGAN GAS UJUNG PANGKAH KABUPATEN GRESIK

Nama Mahasiswa : Arka Novianto P
NRP : 4301 100 060
Jurusan : Teknik Kelautan
Dosen Pembimbing : Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D.
Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc.

Abstrak

Tugas akhir ini menghitung diameter dan pemilihan tebal pipa yang optimum di Lapangan Gas Ujung Pangkah Kabupaten Gresik yang dicari dengan berbagai macam kendala antara lain faktor desain, tegangan melingkar, tegangan longitudinal, tegangan gabungan, tekanan kritis buckling, dan perambatan buckling. Untuk menyelesaikan persoalan optimasi tersebut digunakan metode interior penalti. Setelah hasil optimasi didapat maka diperhitungkan syarat kestabilan pipa dengan menghitung gaya hidrostatik pipa. Dengan dibantu *software* LINGO yang divalidasi dengan SOLVER maka didapatkan nilai ketebalan sebesar 15,6 mm atau 0,618 inchi dengan diameter luar pipa sebesar 16 inchi dengan grade pipa X-65 (Standar API). Alternatif grade material lain adalah grade pipa X 60 (Standar API) dengan tebal pipa sebesar 16,89 mm atau 0,665 inchi dengan diameter pipa sebesar 18 inchi. Analisa lebih lanjut pada ketebalan memberikan hasil bahwa pipa relatif lebih aman terhadap stabilitas lateral serta hidrotest pipa.

Kata kunci : diameter, tebal pipa, interior penalti, *software* LINGO, stabilitas lateral.

OPTIMIZATION STUDY FOR SUBSEA PIPELINE ON UJUNG PANGKAH GAS FIELD GRESIK

Name of student : Arka Novianto P
NRP : 4301 100 060
Department : Ocean Engineering
Supervisor : Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D.
Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc.

Abstract

This Final Project is estimate diameter and optimum pipe wall thickness on Ujung Pangkah Gas Field Gresik which searched by many constraint such as design factor, hoop stress, longitudinal stress, equivalent stress, critical buckling stress, and propagation buckling. To get the optimization, the interior penalty method is being used . After the optimization gave the result then the pipe stability is calculated by estimated hydrostatic force of pipe it self. LINGO and SOLVER softwares are being used to analyse and validate. Pipe thickness of 15,6 mm (0,618 inch) with pipe diameter of 16 inch on X 65 (API Standard) of pipe grade is a result of this final project. Alternative of grade other material is grade X 60 (API Standard) with pipe thickness 16,89 mm (0,665 inch) and 18 inch of diameter .Further analyse of lateral stability and pipe hidrottest shows that the pipe is save.

Keyword : diameter, pipe thickness, interior penalty, LINGO software, lateral stability

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur kehadiran Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan lindungan-Nya kepada penulis, sholawat serta salam semoga selalu tercurah pada Nabi besar Muhammad SAW, serta kepada seluruh pihak yang telah membantu sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“STUDI OPTIMASI PIPA BAWAH LAUT DI LAPANGAN GAS UJUNG PANGKAH KABUPATEN GRESIK”**, sekaligus dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini tepat pada waktunya.

Tugas akhir ini disusun guna memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan studi kesarjanaan (S1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Dalam laporan Tugas Akhir ini penulis membahas tentang pemilihan diameter dan tebal pipa di Lapangan Gas Ujung Pangkah Gresik menggunakan *software* LINGO dimana kemudian juga dilakukan analisa stabilitas lateral.

Dalam pengerjaan penelitian ini, penulis tidak terlepas dari bantuan serta dorongan moral maupun material dari banyak pihak baik secara langsung maupun tidak. Sehingga pada kesempatan kali ini penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada pihak-pihak di bawah ini:

1. Ayahanda dan Ibunda tercinta atas doa, pengorbanan, keikhlasan, kesabaran dan bantuan lainnya kepada penulis.
2. Bapak Ir. Daniel M. Rosyid, PhD selaku dosen pembimbing tugas akhir atas bimbingan dan ilmu yang diberikan kepada penulis selama kuliah dan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
3. Bapak Ir. Hasan Ikhwani, MSc selaku dosen pembimbing tugas akhir atas bimbingan, arahan, nasehat, dan kesediaan meluangkan waktu membimbing penulis selama mengerjakan tugas akhir ini dan selama kuliah.

4. Ir. Sujantoko, MT selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan.
5. Ir. Imam Rochani, MSc selaku Ketua Jurusan dan dosen wali serta Dr. Ir. Handayanu, MSc selaku Sekretaris Jurusan Teknik Kelautan.
6. Seluruh Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Kelautan, atas ilmu dan bantuan yang diberikan selama penulis menjadi mahasiswa jurusan Teknik Kelautan FTK ITS.
7. Adikku tercinta Astri serta seluruh keluarga besar penulis.
8. Teman-teman angkatan 2001 atas dukungan, doa, dan nasehat selama penulis menempuh kuliah di Teknik Kelautan ITS Surabaya.
9. Teman-teman Laboratorium Dinamika Struktur atas doa dan kebersamaannya dalam penulisan Tugas Akhir ini.
10. Para pegawai Teknik Kelautan ITS atas bantuan administrasi dan doa selama penulis di bangku kuliah.
11. Semua pihak yang turut membantu, yang tidak dapat kami tulis satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan dan penulisan tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun guna menambah kelengkapan dan kesempurnaan untuk masa yang akan datang. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca, khususnya mahasiswa Teknik Kelautan FTK-ITS.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb

Surabaya, 2007

Arka Novianto P

DAFTAR ISI

| | |
|---------------------|------|
| Abstrak..... | i |
| Kata Pengantar..... | iii |
| Daftar Isi..... | v |
| Daftar Tabel..... | viii |
| Daftar Gambar..... | ix |
| Daftar Notasi | x |

BAB 1 PENDAHULUAN

| | |
|--------------------------------------|---|
| 1.1 Latar Belakang Permasalahan..... | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah..... | 2 |
| 1.3 Tujuan Penelitian..... | 3 |
| 1.4 Manfaat Penelitian..... | 4 |
| 1.5 Ruang Lingkup Penelitian..... | 4 |
| 1.6 Sistematika penulisan..... | 4 |

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

| | |
|-----------------------------------------------------|----|
| 2.1 Tinjauan Pustaka..... | 7 |
| 2.2 Prinsip Dasar Teori Optimasi..... | 7 |
| 2.2.1 Optimasi Dengan Kendala | 9 |
| 2.2.2 Optimasi Tanpa Kendala..... | 12 |
| 2.3 Analisa Dalam Perancangan Pipa Bawah Laut | 14 |
| 2.3.1 Analisa Tegangan Pipa Bawah Laut | 14 |
| 2.3.2 Analisa Buckling | 15 |
| 2.4 Beban Yang Diperhitungkan | 17 |
| 2.4.1 Tekanan Hidrostatik | 17 |
| 2.4.2 Beban Gelombang | 17 |
| 2.4.3 Perhitungan Properti Gelombang | 20 |
| 2.4.4 Teori Gelombang Cnoidal | 21 |
| 2.4.5 Teori Gelombang Stokes | 25 |
| 2.4.6 Kecepatan Partikel Efektif | 27 |
| 2.4.7 Gaya-Gaya Hidrodinamis..... | 28 |

| | |
|-----------------------------------------------|----|
| 2.4.8 Koefisien Hidrodinamis | 30 |
| 2.4.9 Konsep Stabilitas Pipa Bawah Laut | 32 |

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

| | |
|---------------------------------------------|----|
| 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian..... | 37 |
| 3.2 Penjelasan Diagram Alir | 37 |
| 3.3 Pengumpulan Data | 40 |
| 3.3.1 Data Lingkungan | 40 |
| 3.3.2 Data Desain Pipa | 42 |
| 3.3.3 Data Material Propertis Pipa | 42 |
| 3.4 Model Optimasi | 42 |
| 3.5 Program Optimasi Non Linier | 45 |

BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN

| | |
|-----------------------------------------------------|----|
| 4.1 Perhitungan Awal | 47 |
| 4.1.1 Perhitungan Tekanan Eksternal Pipa | 47 |
| 4.1.2 Perhitungan Tekanan Dalam Desain | 47 |
| 4.1.3 Perhitungan Tegangan Melingkar | 48 |
| 4.1.4 Perhitungan Tegangan Longitudinal | 49 |
| 4.1.5 Perhitungan Tegangan Gabungan | 49 |
| 4.1.6 Perhitungan Tegangan Kritis Buckling | 49 |
| 4.1.7 Perhitungan Perambatan Buckling | 50 |
| 4.2 Hasil Perancangan Optimasi dan Pembahasan | 50 |
| 4.2.1 Perhitungan Diameter Pipa..... | 51 |
| 4.2.2 Tebal dan Fungsi Obyektif | 52 |
| 4.2.3 Alternatif Material Pipa..... | 52 |
| 4.2.4 Alasan Pemilihan Material X 65..... | 53 |
| 4.3 Uji Hasil Perancangan | 53 |
| 4.3.1 Uji Stabilitas | 53 |

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan.....59

5.2 Saran.....59

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 Hubungan Angka Reynold dengan Beberapa Koefisien..... | 32 |
| 2.2 Nilai Koefisien Gesekan Berdasarkan Jenis Tanah..... | 34 |
| 3.1 Data Pembagian Zona..... | 41 |
| 3.2 Data Gelombang..... | 41 |
| 3.3 Data Arus..... | 41 |
| 3.4 Data Desain Pipa di Ujung Pangkah | 42 |
| 3.5 Data Material Propertis Pipa..... | 42 |
| 3.6 Harga Pipa Berdasar Ketebalan Pipa Jenis X 65..... | 43 |
| 4.1 Ringkasan Hasil Optimasi Tebal dan Diameter Pipa..... | 52 |
| 4.2 Teori Gelombang yang Digunakan untuk Setiap Zona..... | 54 |
| 4.3 Kecepatan dan Percepatan Partikel Gelombang pada Setiap Zona..... | 55 |
| 4.4 Kecepatan Efektif Arus pada Setiap Zona..... | 56 |
| 4.5 Kecepatan Efektif Total pada Setiap Zona..... | 56 |
| 4.6 Bilangan Reynold, C_D , C_M , dan C_L | 57 |
| 4.7 Variasi Kedalaman dengan F maksimum dan W pipa..... | 57 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 Pengelompokan Metode Optimasi..... | 9 |
| 2.2 Flow Chart Metode Interior Penalty | 11 |
| 2.3 Flow Chart Metode Steepest Descent | 13 |
| 2.4 Gelombang Progressive dan Gelombang Standing | 18 |
| 2.5 Grafik Region of Validity..... | 19 |
| 2.6 Bentuk Macam-Macam Profil Gelombang | 21 |
| 2.7 Profil Gelombang Cnoidal | 22 |
| 2.8 Variasi H/d dengan k^2 | 24 |
| 2.9 Variasi Fungsi Jacobian Elliptik dengan k | 24 |
| 2.10 Variasi cn^2q dan $cnqdnqsnq$ dengan Sudut Untuk Berbagai Nilai k | 25 |
| 2.11 Grafik Variasi Re dengan C_D Untuk Silinder Halus..... | 31 |
| 2.12 Grafik Variasi Re dengan C_M Untuk Silinder Halus..... | 32 |
| 2.13 Gaya-Gaya yang Bekerja pada Pipa..... | 33 |
| 2.14 Potongan Melintang Pipa Bawah Laut..... | 35 |
| 3.1 Diagram Alir Urutan Kerja Tugas Akhir..... | 39 |
| 3.2 Peta Jalur Pipa..... | 40 |
| 3.3 Grafik Perbandingan Tebal dan Harga Pipa..... | 44 |
| 3.4 Inputan dalam LINGO..... | 46 |
| 4.1 Grafik Hubungan SMYS dan Tebal Pipa..... | 48 |
| 4.2 Output Optimasi dengan LINGO ver.8..... | 52 |
| 4.3 Grafik Perbandingan Kecepatan dan Kecepatan Efektif Gelombang..... | 55 |
| 4.4 Grafik Stabilitas Pipa..... | 58 |

DAFTAR NOTASI

| | |
|------------------|---------------------------------------------|
| λ^* | = Panjang langkah optimal |
| S_i | = Vektor arah penelusuran |
| Pd | = Tekanan dalam desain |
| Pe | = Tekanan luar |
| $SMYS$ | = <i>Specified Minimum Yield Strength</i> |
| t | = tebal pipa |
| D | = Diameter pipa |
| F | = Faktor desain |
| E | = <i>Longitudinal joint factor</i> |
| T | = <i>Temperatur derating factor</i> |
| σ_l | = Tegangan longitudinal efektif |
| σ_a | = Tekanan aksial |
| A_o | = <i>External cross sectional area pipe</i> |
| A_i | = <i>Internal cross sectional area pipe</i> |
| A | = Area pipa |
| σ_e | = Tegangan gabungan |
| Pc | = Tekanan kritis <i>collapse</i> |
| E | = Modulus Young |
| ν | = <i>Poisson's ratio</i> |
| Pp | = Perambatan buckling |
| $\rho_{airlaut}$ | = Massa jenis air laut |
| Hs_{100} | = Tinggi gelombang signifikan 100 tahunan |
| g | = Percepatan gravitasi |
| d | = Kedalaman perairan/laut |
| L | = Panjang gelombang pada kedalaman tertentu |
| Lo | = Panjang gelombang awal |
| T | = Periode gelombang |
| H | = Tinggi gelombang pada kedalaman tertentu |

| | |
|-----------------|-------------------------------------------------------------|
| H_0 | = Tinggi gelombang awal |
| K_s | = Koefisien shoaling/pendangkalan |
| y_t | = Jarak dari dasar ke lembah gelombang |
| cn | = Fungsi cosinus elips |
| $K(k)$ | = Integral elips |
| k | = Modulus dari integral elips |
| ω | = Frekuensi gelombang |
| C | = Cepat rambat gelombang |
| s | = Jarak vertikal titik yang ditinjau dari dasar laut |
| y | = Jarak vertikal titik yang ditinjau terhadap muka air diam |
| F_D | = Gaya drag |
| C_D | = Koefisien drag |
| U_e | = Kecepatan efektif |
| F_I | = Gaya inersia |
| C_M | = Koefisien inersia |
| $\frac{du}{dt}$ | = Percepatan fluida |
| F_L | = Gaya angkat |
| C_L | = Koefisien angkat |
| Re | = Bilangan Reynold |
| KC | = Bilangan <i>Keulegan Carpenter</i> |
| W | = Berat pipa terbenam |
| F_r | = Gaya gesek |
| θ | = Sudut kemiringan dasar laut |
| W_{as} | = Berat baja di udara |
| W_{ac} | = Berat lapisan anti korosi di udara |
| W_{aw} | = Berat lapisan beton di udara |
| B | = Gaya apung |
| ρ_c | = Massa jenis lapisan anti korosi |
| ρ_w | = Massa jenis lapisan beton |



BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang Permasalahan

Kekayaan alam Indonesia yang termasuk potensial adalah minyak dan gas bumi. Minyak dan gas bumi ini merupakan sumber energi yang sangat menunjang untuk pembangunan nasional. Dengan banyaknya ladang minyak dan gas bumi yang ditemukan terutama yang berada di lepas pantai, eksplotasi terhadap minyak dan gas bumi ini akan meningkat. Dengan secara otomatis manusia segera memperbarui teknologi yang ada. Teknologi yang sangat modern yang dipakai salah satunya adalah teknologi perpipaan.

Pemakaian pipa bawah laut sebagai sarana transmisi dan distribusi gas bumi dari satu fasilitas ke fasilitas lainnya semakin meningkat karena pada kondisi tertentu sarana ini merupakan salah satu cara yang paling efektif dan efisien. Dalam membangun suatu struktur pipa pada umumnya melalui suatu tahapan yang penting yaitu tahapan perancangan. Hasil perancangan ini harus memenuhi kriteria yang diinginkan dengan sumber daya yang tersedia secara optimal. Untuk mendapatkan rancangan terbaik, biasanya tidak bisa dilakukan sekali, melainkan melalui proses berulang-ulang secara sistematis dan biasanya dibantu dengan komputer.

Pada perancangan konvensional, beberapa hal seperti pengalaman, intuisi, dan keputusan yang dibuat perancang sangat berpengaruh terhadap hasil rancangan. Dengan metode konvensional, ketergantungan pada kemampuan dan pengalaman perancang sangatlah tinggi. Hal ini berlawanan dengan perancangan menggunakan metode optimasi yang lebih berorientasi pada hasil rancangan dengan batasan-batasan yang ada. Rancangan didasarkan pada hasil rancangan sebelumnya yang diperbarui secara sistematis melalui perhitungan tertentu dengan jalan iterasi.

Pada perancangan pipa bawah laut, kekuatan struktur pipa sangat dipengaruhi oleh perbandingan antara diameter dan tebal pipa. Kesalahan memperhitungkan tebal pipa dapat menyebabkan terjadinya buckling yang disebabkan oleh tekanan hidrostatik

maupun tekanan internal. Ketebalan pipa juga mempengaruhi stabilitas pipa itu sendiri. Selain harus memenuhi faktor keamanan dan keselamatan lingkungan, aspek biaya harus diperhatikan oleh perancang dalam merancang pipa bawah laut. Pemilihan tebal yang optimum akan mempengaruhi aspek kekuatan struktur dan memiliki konsekuensi juga terhadap biaya instalasi.

Permasalahan yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah optimasi perancangan pipa bawah laut pada lapangan produksi Ujung Pangkah Kabupaten Gresik dimana Amerada Hess (Indonesia-Pangkah) Ltd, sebagai operator, berencana untuk membangun instalasi cadangan gas bumi di Ujung Pangkah untuk disalurkan ke pembangkit listrik milik PLN di Gresik, Jawa Timur. Lapangan gas Ujung Pangkah berlokasi antara 2 km dan 10 km di lepas pantai utara wilayah Jawa Timur kira-kira sekitar 35 km sebelah utara Gresik. Cadangan gas yang ada di lapangan ini sekitar 450 milyar kaki kubik dengan komposisi campuran gas (> 60 ppm H_2S dan 5% CO_2). Direncanakan produksi yang dihasilkan oleh lapangan gas ini sekitar 100 juta kaki kubik per hari selama 20 tahun.

I.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan diselesaikan dalam optimasi pipa bawah laut kali ini adalah :

1. Bagaimana mendapatkan tebal optimum dan biaya minimum serta alternatif *grade* material lain dengan mempertimbangkan kendala-kendala yang ada, yaitu :

- a. Faktor desain (G1)

$$G(1) : Pd \geq Pi$$

$$\frac{2 \cdot SMYS \cdot t}{D} \cdot F \cdot E \cdot T \geq Pi$$

- b. Tegangan melingkar (G2)

$$G(2) : \sigma_h \leq \eta_h \cdot SMYS \cdot k_t$$

$$(Pi - Pe) \frac{D}{2t} \leq \eta_h \cdot SMYS \cdot k_t$$

c. Tegangan longitudinal (G3)

$$G(3) : \quad \sigma_l \leq 0,6.SMYS$$

$$\sigma_u + \frac{\Delta P \cdot A_o}{A} + P_i \leq 0,6.SMYS$$

d. Tegangan gabungan (G4)

$$G(4) : \quad \sigma_{ec} \leq \eta_e.SMYS$$

$$\sqrt{(\sigma^2 + \sigma_h^2 - \sigma_h \cdot \sigma_l + 3\sigma_a^2)} \leq \eta_e.SMYS$$

e. Tekanan kritis buckling (G5)

$$G(5) : \quad P_c \geq P_e$$

$$\frac{2E}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{t}{D-t} \right)^3 \geq P_e$$

f. Perambatan buckling (G6)

$$G(6) : \quad 1,15 \cdot \pi \cdot SMYS \cdot \left(\frac{t}{D-t} \right)^2 \geq P_e$$

2. Bagaimana hasil uji hidrostatis dan stabilitas lateral dari pipa hasil permodelan optimasi

I.3. Tujuan Penelitian

Sebagaimana dengan permasalahan yang akan dibahas maka tujuan Tugas Akhir ini antara lain :

1. Memberikan informasi kuantitatif mengenai tebal pipa yang optimum untuk mendapatkan harga pipa minimum sesuai kendala-kendala antara lain faktor desain, tegangan melingkar, tegangan longitudinal, tegangan gabungan, tekanan kritis buckling, dan perambatan buckling beserta alternatif *grade* material yang ada

2. Memberikan informasi berupa data kuantitatif hasil uji hidrostatis dan stabilitas lateral dari pipa hasil permodelan optimasi dimana hasil uji ini untuk mengecek hasil perhitungan kelayakan optimasi

I.4. Manfaat Penelitian

1. Dapat memberikan informasi tentang biaya yang harus dikeluarkan seminimal mungkin namun memenuhi tebal pipa yang disyaratkan dalam perancangan dan alternatif grade material yang lain
2. Dapat memberikan informasi data kuantitatif sesuai hasil uji yang disyaratkan meliputi hasil uji hidrostatis dan stabilitas lateral yang terjadi pada pipa

I.5. Ruang Lingkup Penelitian

Untuk memfokuskan ruang lingkup dari permasalahan, maka permasalahan akan dibatasi pada hal – hal berikut :

1. Penentuan rute pipa dilakukan sesuai kondisi lapangan
2. Tebal yang dijadikan variabel adalah tebal pipa
3. Stabilitas yang ditinjau adalah stabilitas lateral
4. Analisa mengacu standar API 1111, API Spec 5L edisi 42 tahun 2000, ASME B31.8.
5. Pipa diasumsikan meletak pada seabed dan permukaan seabed diasumsikan sudut kemiringannya 0° merata sepanjang pipa
6. Permukaan tanah clay dengan koefisien gesek lateral tanah sebesar 0,5
7. Pipa yang dianalisa kedalaman minimal 1 meter dan maksimal 20 meter
8. Tebal *corrosion allowance* yang disyaratkan sebesar 0,010 m.
9. Pipa yang didapatkan pada hasil optimasi disediakan di pasaran.

I.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

Dalam penyelesaian laporan Tugas Akhir ini penulis melakukan tinjauan pustaka pada beberapa penelitian mengenai optimasi dan perancangan pipa bawah laut yang pernah dilakukan sebelumnya. Dasar teori yang digunakan antara lain adalah tentang teori optimasi, teori buckling, teori gelombang, dan gaya-gaya hidrodinamis.

Bab III Metodologi Penelitian

Pada bab ini menerangkan langkah-langkah pengerjaan yang dilakukan, diawali dari studi literatur, pengumpulan data, lalu penentuan formulasi persamaan non linier untuk mencari optimasi tebal pipa, optimasi dalam software, kemudian dilakukan uji hidrostatis dan pengujian stabilitas lateral.

Bab IV Hasil dan Pembahasan

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

2.1. Tinjauan Pustaka

Kecepatan perkembangan teknologi pipa bawah laut berjalan seiring dengan perkembangan pembangunan struktur lepas pantai. Pipa bawah laut pertama kali dikonstruksikan kurang lebih empat puluh tahun yang lalu dan menjadi sangat penting pada transportasi gas dan minyak seiring dengan perkembangan anjungan minyak lepas pantai.

Pipa bawah laut yang akan dipasang haruslah mengikuti standar keamanan yang berlaku. Kerusakan pada pipa dapat menyebabkan biaya perbaikan yang sangat besar, kehilangan produksi yang sangat tinggi, dan dapat menyebabkan polusi yang sangat besar (Halliwell, 1986). Kerusakan yang terjadi biasanya disebabkan oleh kesalahan perencanaan pipa atau kesalahan dalam memprediksi kondisi pada tempat operasi pipa (Strating dalam Putra, 2000).

Untuk memudahkan dalam proses perencanaan ketebalan pipa digunakan metode optimasi. Metode optimasi digunakan karena dalam pengambilan keputusannya digunakan pendekatan yang sangat terencana yaitu dengan menggunakan pendekatan saintifik (Rosyid, 1999).

Semedi (2005) telah melakukan optimasi pipa bawah laut pada lapangan gas Tunu di Kalimantan Timur. Optimasi yang dilakukan mencari ketebalan yang sesuai dengan berbagai macam kendala. Analisa yang dilakukan juga mempertimbangkan gaya-gaya hidrostatis yang bekerja. Optimasi yang dilakukan dibantu dengan *software* SOLVER.

2.2. Prinsip Dasar Teori Optimasi

Setiap benda yang dihasilkan manusia mengalami bermacam-macam proses. Dimulai dari menganalisa, merancang, mencetak, menjual, serta pengembangan lebih lanjut. Salah satu bagian terpenting dari proses tersebut adalah merancang suatu produk.

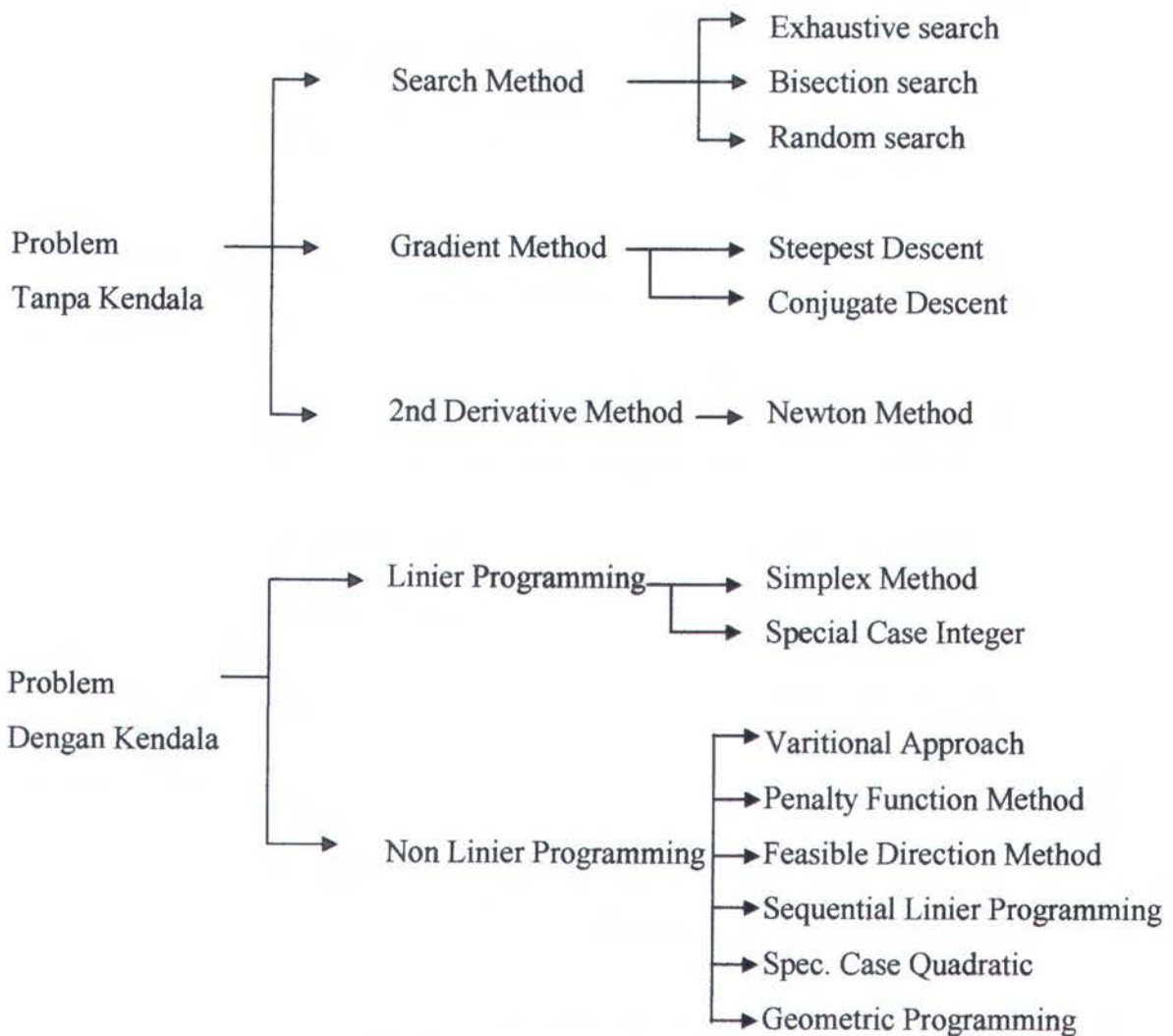
Merancang adalah salah satu proses yang memakan waktu cukup banyak, karena jika terdapat kesalahan pada proses perancangan akan berpengaruh pada produk yang dihasilkan sehingga menjadi cacat.

Dalam merancang sebuah produk, dapat dilakukan dengan dua cara yaitu metode konvensional yang sangat tergantung dari kemampuan perancang dan metode optimasi yang dapat menghasilkan produk secara efisien. Dalam prakteknya metode konvensional ini sering menghasilkan produk yang tidak ekonomis dan prosesnya memakan waktu yang lama. Untuk memudahkan proses perancangan ketebalan pipa maka digunakan pendekatan terencana yaitu dengan pendekatan saintifik yaitu dengan metode optimasi.

Dalam persoalan teknik para insinyur selalu mencari bentuk optimum dari penyelesaian persoalan yang dihadapinya. Persoalan tersebut biasanya selalu diinterpretasikan dalam suatu bentuk formulasi. Hal ini dilakukan untuk memudahkan penyelesaian. Suatu penyelesaian yang menginginkan bentuk optimum selalu disebut dengan persoalan optimasi. Keunggulan metode optimasi ini adalah perancang dapat mengidentifikasi variabel desain, fungsi yang akan dioptimalkan dan optimasi sendiri didefinisikan sebagai proses untuk menemukan kondisi yang memberi nilai maksimal atau minimal dari suatu fungsi (Rao, 1984).

Dalam sumber lain optimasi dapat dikatakan suatu proses dan langkah yang dilakukan untuk mendapatkan hasil yang terbaik dan yang diinginkan dimana diberikan nilai maksimum dan minimum dari suatu fungsi tertentu. Sangat penting sekali untuk memahami optimasi itu dilaksanakan di dalam membatasi dari suatu konsep. Dalam beberapa kasus, bahkan sasaran sederhana memerlukan analisa yang rumit. Persoalan optimasi selalu membutuhkan bantuan komputer, sebab perhitungan selalu dilakukan dengan berulang-ulang. Proses analisa optimasi pada komputer dilakukan dengan bentuk iterasi. Dalam hal ini kita akan memusatkan pada beberapa metode sederhana dimana dapat diaplikasikan untuk problem-problem teknik dengan keterbatasan alat matematis seperti perangkat lunak (*software*) yang ada.

Metode optimasi yang dipakai tergantung pada tipe permasalahan. Sebagai gambaran metode optimasi dapat dikelompokkan pada diagram berikut :



Gambar 2.1 Pengelompokan Metode Optimasi

2.2.1. Optimasi Dengan Kendala

Pada persoalan pipa bawah laut ini untuk menentukan dimensi dari pipa tersebut digunakan metode optimasi. Dalam menentukan dimensi pipa ini agar pipa tersebut mempunyai berat yang minimum sehingga biaya instalasi dapat ditekan terdapat beberapa batasan. Batasan-batasan tersebut antara lain harus mampu menahan tekanan dari dalam maupun dari luar pipa, tidak boleh terjadi buckling, dan memenuhi faktor desain dari pipa. Melihat adanya batasan-batasan tersebut, maka metode optimasi yang sesuai adalah metode optimasi dengan kendala.

Metode optimasi dengan kendala memiliki teknik penyelesaian yang bermacam-macam, tetapi secara umum dapat dibagi menjadi dua, metode langsung dan metode tak langsung. Salah satu teknik dari metode tak langsung adalah metode *penalty interior*.

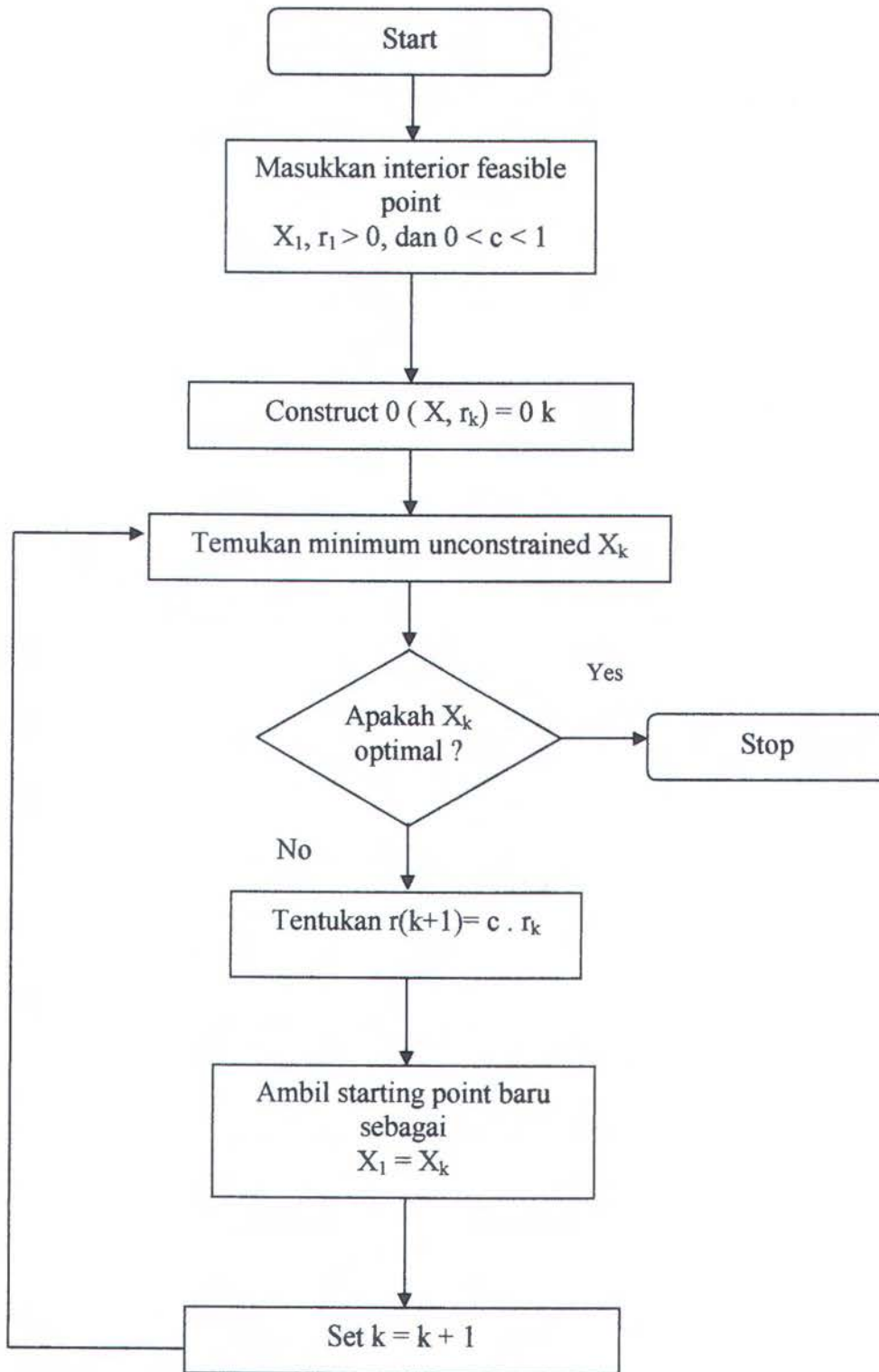
Metode interior penalti sendiri adalah metode yang mengubah suatu problem optimasi dengan kendala menjadi problem optimasi tanpa kendala. Persamaan optimasi dengan kendala tersebut diubah menjadi suatu persamaan baru dengan rumusan :

$$\phi_k = \phi(X, r_k) = f(X) - r_k \sum_{j=1}^m G_j [g_j(X)] \quad (2.1)$$

Dengan G_j adalah beberapa fungsi dari *constraint* g_j dan f_k adalah suatu nilai konstan positif yang disebut *penalty parameter*. Apabila persamaan tanpa kendala tersebut (ϕ_k) dilakukan proses perulangan dengan urutan nilai dari parameter penalti r_k ($k = 1, 2, \dots$) maka solusinya akan konvergen dengan permasalahan aslinya. Teknik ini disebut juga *Sequential Unconstrained Minimization Techniques* (SUMT) (Rao, 1984).

Untuk mendapatkan nilai G_j dalam penyelesaian dengan menggunakan metode *interior penalty* maka digunakan persamaan :

$$G_j = -\frac{1}{g_j(x)} \quad (2.2)$$



Gambar 2.2 Flow Chart Metode Interior Penalty (Rao, 1984)

2.2.2. Optimasi Tanpa Kendala

Penggunaan metode interior penalty sebenarnya hanya mengubah suatu permasalahan dengan kendala menjadi permasalahan tanpa kendala, untuk selanjutnya digunakan metode lain yang dapat digunakan untuk permasalahan tanpa kendala.

Salah satu penyelesaian yang paling baik adalah dengan menggunakan metode *steepest descent*. Dalam metode ini gradien negatif dari fungsi tersebut digunakan sebagai arah untuk menentukan titik optimal. Mula-mula digunakan suatu nilai inisial X_1 dan secara iteratif menuju pada nilai optimum sesuai dengan persamaan (Suhendro, 1990) :

$$X_{i+1} = X_i + \lambda_i^* S_i = X_i - \lambda_i^* \nabla f_i \quad (2.3)$$

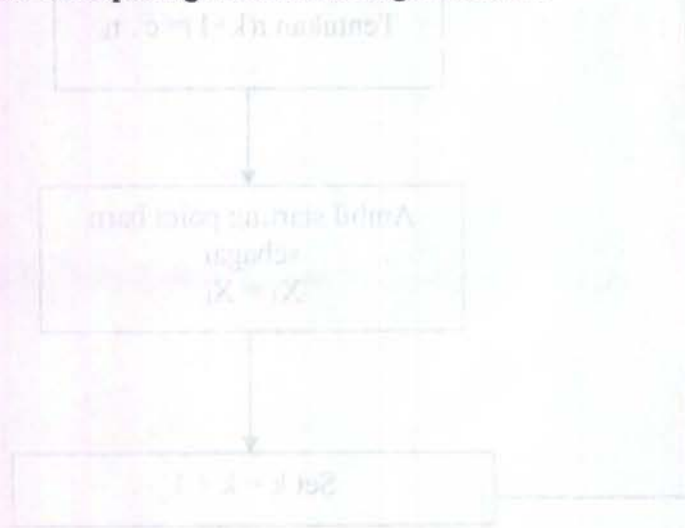
dengan :

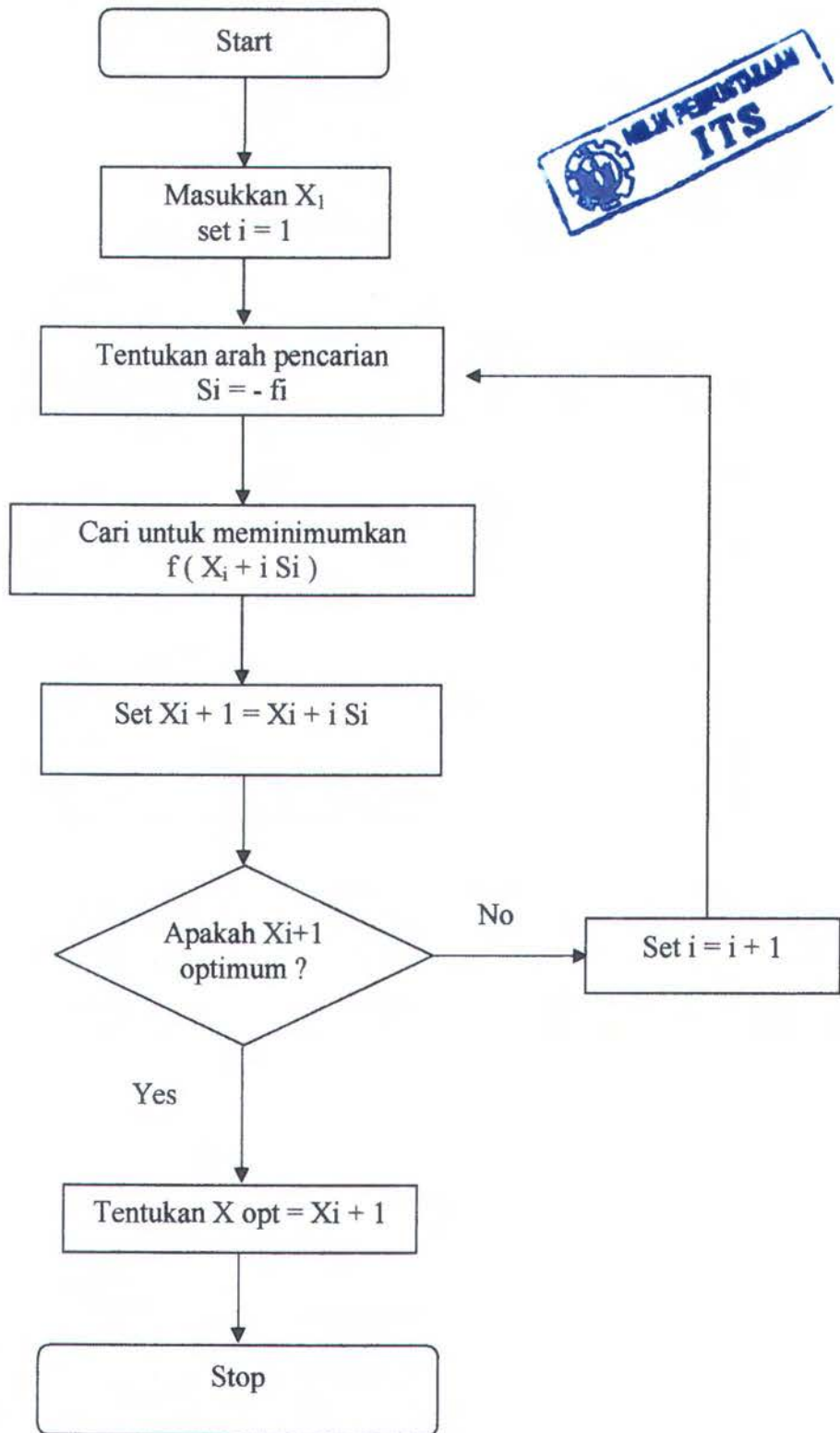
λ_i^* = Panjang langkah optimal pada arah S

S_i = $-\nabla f_i$

= Vektor arah penelusuran

Flow chart untuk metode ini dapat digambarkan sebagai berikut :





Gambar 2.3 Flow Chart Metode Steepest Descent (Rao, 1984)

2.3. Analisa Dalam Perancangan Pipa Bawah Laut

2.3.1. Analisa Tegangan Pada Pipa Bawah Laut

Pipa bawah laut selama beroperasi akan mengalami dua macam tekanan yaitu tekanan dari dalam pipa dan dari luar pipa. Tekanan luar yang dialami pipa adalah tekanan hidrostatik dimana tekanan ini diakibatkan oleh muka air diam. Tekanan hidrostatik ini dapat dihitung dengan formula yang diberikan oleh rumusan Germanischer Lloyd (1995) sebagai berikut :

$$P_e = \rho_w \cdot g \cdot h \quad (2.4)$$

$$P_e = \rho_w \cdot g \cdot \left(d + \frac{1}{2} H \right) \quad (2.5)$$

Sedangkan tekanan di dalam pipa dapat dihitung dengan persamaan berikut ini (William Natural Gas Company dalam Semedi , 2005) :

$$P_d = \frac{2 \cdot SMYS \cdot t \cdot F \cdot E \cdot T}{D} \quad (2.6)$$

dengan :

| | |
|-------|-------------------------------------------------|
| P_d | = Tekanan dalam desain (N/m^2) |
| P_e | = Tekanan luar (N/m^2) |
| SMYS | = <i>Specified Minimum Yield Strength</i> (Mpa) |
| t | = Tebal pipa (m) |
| D | = Diameter pipa (m) |
| F | = Faktor desain |
| E | = <i>Longitudinal joint factor</i> |
| T | = <i>Temperatur derating factor</i> |

Untuk harga P_d yang maksimal , maka untuk E dan T diasumsikan sama dengan 1.

Dengan adanya tebal pipa yang mendapat pengaruh tekanan dari dalam, pipa akan memperoleh tegangan melingkar, longitudinal, serta tegangan gabungan. Menurut DNV (2000), tegangan melingkar (*hoop stress*) dapat dihitung dengan persamaan :

$$\sigma_h = \Delta P \cdot \frac{D}{2t} \quad (2.7)$$

$$\sigma_h = (P_i - P_e) \frac{D}{2t} \quad (2.8)$$

$$\sigma_h \leq \eta_h \cdot SMYS \cdot k_t \quad (2.9)$$

Sedangkan tegangan longitudinal dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (DNV, 2000) :

$$\sigma_l = \sigma_a + \frac{\Delta P \cdot A_o}{A} + P_i \quad (2.10)$$

$$\sigma_l \leq \eta_l \cdot SMYS \quad (2.11)$$

dengan :

σ_l = Tegangan longitudinal efektif (kg/m²)

ΔP = $P_i - P_e$

σ_a = Axial stress (kg/m²)

A_o = External cross sectional area pipe (m²)

A_i = Internal cross sectional area pipe (m²)

A = Cross sectional area pipe (m²)

$$= \frac{1}{4} \pi (D_o^2 - D_i^2)$$

Tegangan gabungan pipa merupakan kombinasi tegangan tangensial dan longitudinal.

Besarnya tegangan tersebut adalah sebagai berikut (DNV, 2000) :

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_h^2 + \sigma_l^2 - \sigma_h \cdot \sigma_l + 3\tau_{th}^2)} \quad (2.12)$$

dengan :

σ_e = Tegangan gabungan

Menurut Yong Bai (2001), tegangan gabungan harus memenuhi persamaan :

$$\sigma_e \leq \eta_e \cdot SMYS \quad (2.13)$$

2.3.2. Analisa Buckling

Seperti dijelaskan sebelumnya dimana pipa bawah laut akan mengalami tekanan hidrostatik. Semakin dalam pipa, maka tekanan hidrostatik yang diterima pipa akan semakin besar. Jika tekanan tersebut semakin besar maka pipa tersebut akan pecah. Pecahnya pipa dapat disebabkan berbagai faktor termasuk perbandingan diameter

dengan tebal pipa (D/t), adanya inisial ovalisasi, tekanan hidrostatik, dan momen bending dari pipa.

Buckling sendiri didefinisikan sebagai gejala ovalisasi atau flattening yang besar dari pipa. Ada dua macam jenis buckling yaitu dry buckling dimana jika pipa tidak mengalami kebocoran atau kering dan wet buckling dimana pipa pecah dan terisi oleh air.

Untuk buckling yang terjadi hanya diakibatkan oleh tekanan eksternal harus memenuhi persamaan berikut ini (Mousselli, 1981):

$$P_c = \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{D-t} \right)^3 \quad (2.14)$$

$$P_c \geq P_e \quad (2.15)$$

dengan :

- P_c = Tekanan kritis collapse (kg/m^2)
- E = Modulus Young (Mpa)
- ν = Poisson's ratio
- D = Diameter pipa (m)
- t = Tebal pipa (m)

Dalam perancangan pipa harus pula dipertimbangkan kemungkinan adanya perambatan buckling. Tekanan kritis penjalaran buckling (P_{prop}) pada pipa harus lebih besar dari tekanan luar (P_e) pipa itu sendiri. Persamaan perambatan buckling menurut Mousselli (1981) dirumuskan sebagai berikut ;

$$P_p = 1,15 \cdot \pi \cdot SMYS \cdot \left(\frac{t}{D-t} \right)^2 \quad (2.16)$$

dengan :

- P_p = Perambatan buckling (kg/m^2)
- D = Diameter pipa (m)
- t = Tebal pipa (m)

2.4. Beban Yang Diperhitungkan

Untuk melakukan perhitungan dimensi pipa, terlebih dahulu harus diperhitungkan gaya-gaya yang akan diterima oleh pipa tersebut. Gaya-gaya yang terjadi sifatnya cukup kompleks tetapi dengan mengacu pada standar dan *code* yang telah berlaku. Dalam studi ini beban-beban yang diperhitungkan adalah beban-beban akibat pengaruh tekanan dalam pipa, tekanan hidrostatik, dan gaya-gaya hidrodinamis.

2.4.1. Tekanan Hidrostatik

Bentangan pipa yang meletak di dasar laut dipengaruhi oleh tekanan hidrostatik. Besarnya tekanan hidrostatik tersebut merupakan fungsi dari kedalaman perairan. Dimana semakin dalam perairan tersebut maka tekanan hidrostatik tersebut akan semakin besar. Dasar laut yang digunakan untuk peletakan pipa permukaannya rata dengan variasi kedalaman tertentu. Besarnya tekanan tersebut dirumuskan sebagai berikut :

$$Pe = \rho_{air\ laut} \cdot g \cdot \left(d_h + \frac{1}{2} Hs_{100} \right) \quad (2.17)$$

dengan :

- Pe = Tekanan eksternal pipa untuk kedalaman tertentu (kg/m^2)
- Hs_{100} = Tinggi gelombang signifikan 100 tahunan (m)
- $\rho_{air\ laut}$ = Massa jenis air laut (kg/m^3)
- g = Percepatan gravitasi (m/s^2)
- d_h = Kedalaman perairan tempat pipa meletak (m)

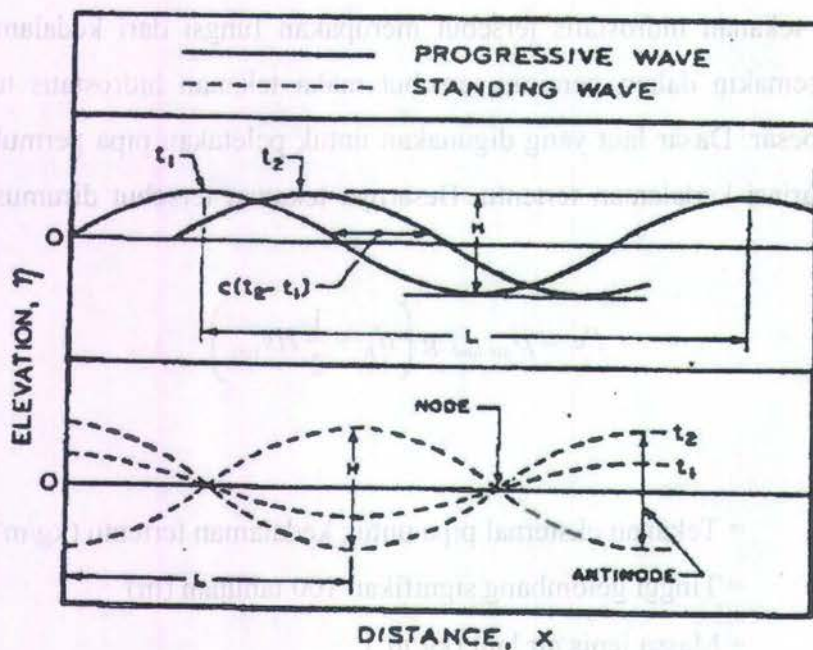
2.4.2. Beban Gelombang

Gelombang diidealisasikan sebagai bentuk dua dimensi dengan bidang XY. Sumbu X adalah dasar laut yang selalu dianggap datar dan sumbu Y adalah kedalaman (d) uniform yang diukur dari *Still Water Level* (SWL) dan gelombang bergerak pada arah x-positif.

Pada dasarnya terdapat dua jenis gelombang air, yaitu gelombang bolak-balik (*oscillatory wave*) dan gelombang pemindahan (*translatory wave*). Perbedaan antara

kedua gelombang ini adalah terletak pada pemindahan fluida yang terjadi. Pada gelombang bolak-balik, pengangkutan fluida yaitu pemindahan dan penempatan massa sama dengan nol, sedangkan pada gelombang *translatory* terjadi pemindahan massa.

Gelombang bolak-balik dapat dibedakan menjadi gelombang berjalan (*progressive wave*) dan gelombang diam (*standing wave*). Perbedaan kedua gelombang ini dapat dilihat dengan jelas pada gambar berikut ini.



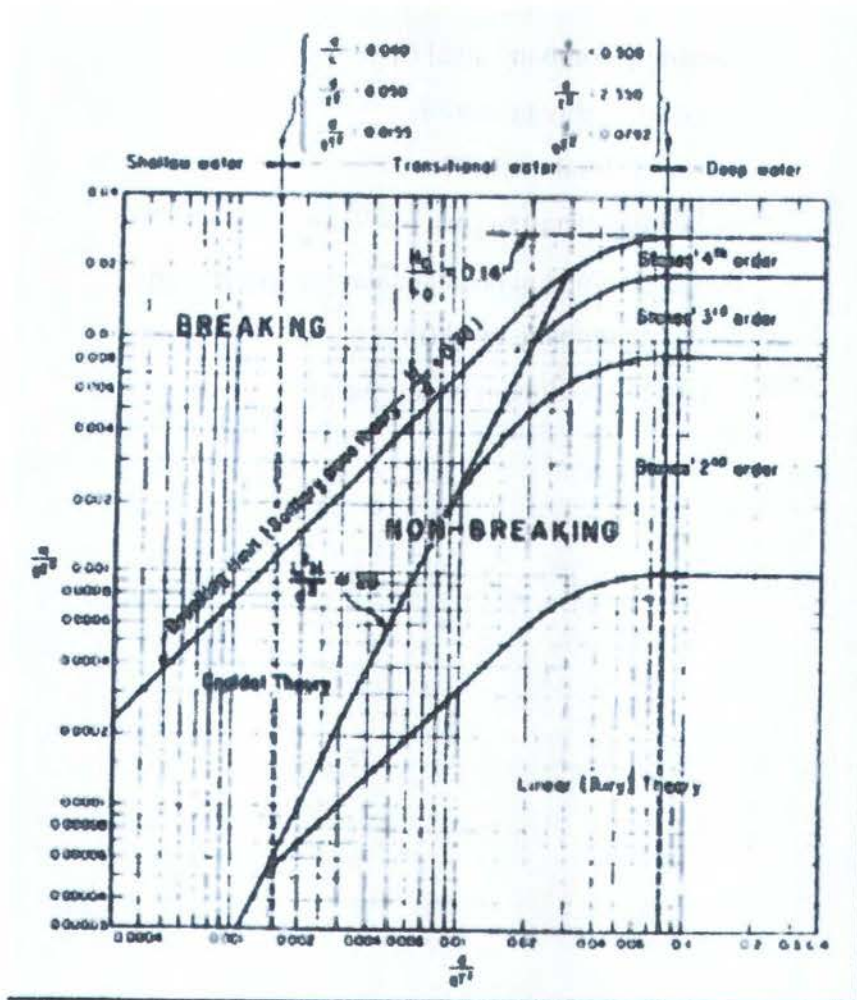
Gambar 2.4 Gelombang *Progressive* dan Gelombang *Standing*

Gelombang *progressive* adalah gelombang yang bergerak sepanjang sumbu x dengan kecepatan tertentu (kecepatan ini disebut dengan *celerity*). Karakteristik gelombang ini akan tetap bila dilihat oleh pengamat yang bergerak pada kecepatan dan arah yang sama dengan gerakan gelombang. Sebaliknya pada gelombang *standing*, permukaan air mengalami gerakan naik turun diantara titik-titik simpul tanpa mengalami pergerakan searah sumbu x. Gelombang *standing* dapat dipahami sebagai superposisi 2 gelombang *progressive* yang memiliki amplitudo dan periode yang sama, tetapi berjalan dengan kecepatan yang sama dalam arah berlawanan sehingga jumlah perjalanan (*net travel*) sama dengan nol dan yang tertinggal hanyalah pergerakan

bolak-balik searah vertikal (Chakrabarti,1987). Teori gelombang yang termasuk dalam *oscillatory* antara lain Airy , Stokes, dan Cnoidal.

Seperti dijelaskan diatas bahwa pada gelombang *translatory* terjadi pemindahan air pada arah perjalanan gelombang tersebut. Pemindahan air yang terjadi dapat menyebabkan terjadinya kikisan pada dasar laut, sebagai contoh terjadinya penggerusan tanah akibat dari arus, gelombang banjir, dan lain sebagainya.

Penentuan teori gelombang yang akan digunakan dapat dilakukan dengan menggunakan grafik validitas yang disebut *Region of Validity* dengan menggunakan parameter-parameter gelombang yang ada seperti tinggi gelombang (H) , periode gelombang (T), dan kedalaman air (d). Grafik *Region of Validity* dapat dilihat sebagai berikut :



Gambar 2.5 Grafik Region of Validity

2.4.3. Perhitungan Properti Gelombang

Menurut Triatmodjo (1999), panjang gelombang sebagai fungsi dari kedalaman untuk teori gelombang Stokes Orde 2 diperoleh dari iterasi persamaan berikut :

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (2.18)$$

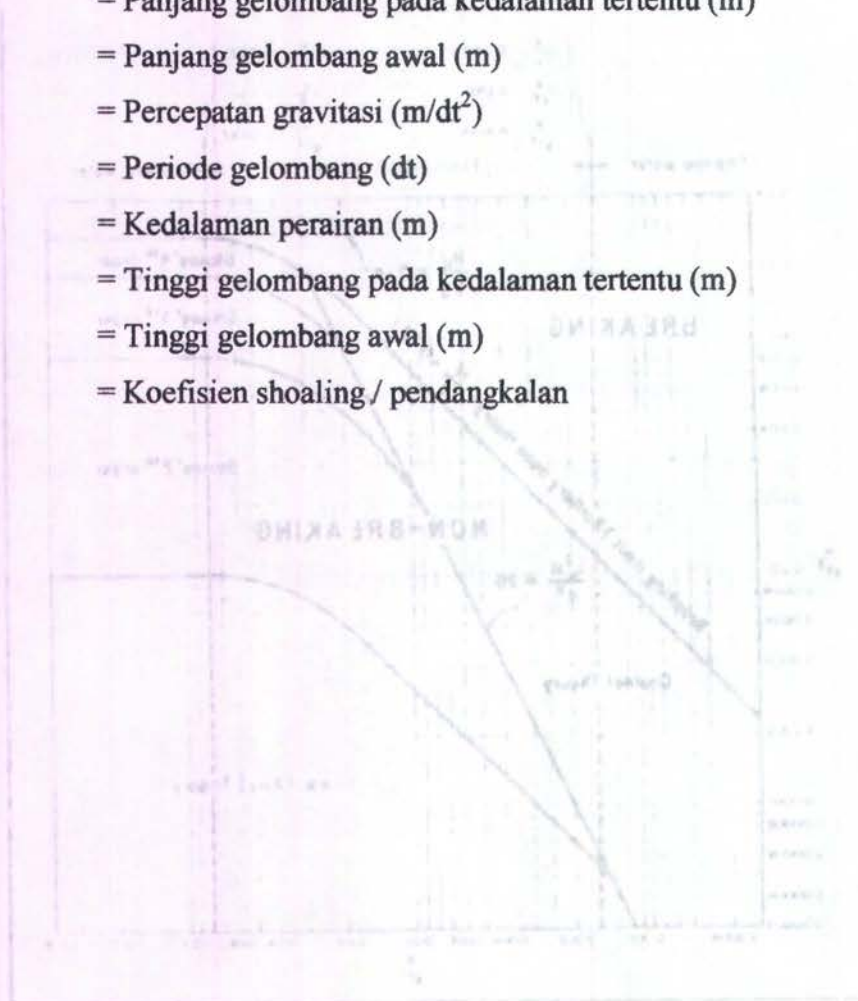
Panjang gelombang dan tinggi gelombang mula-mula diperoleh dari persamaan berikut (Triatmodjo, 1999):

$$L_o = 1,56.T^2 \quad (2.19)$$

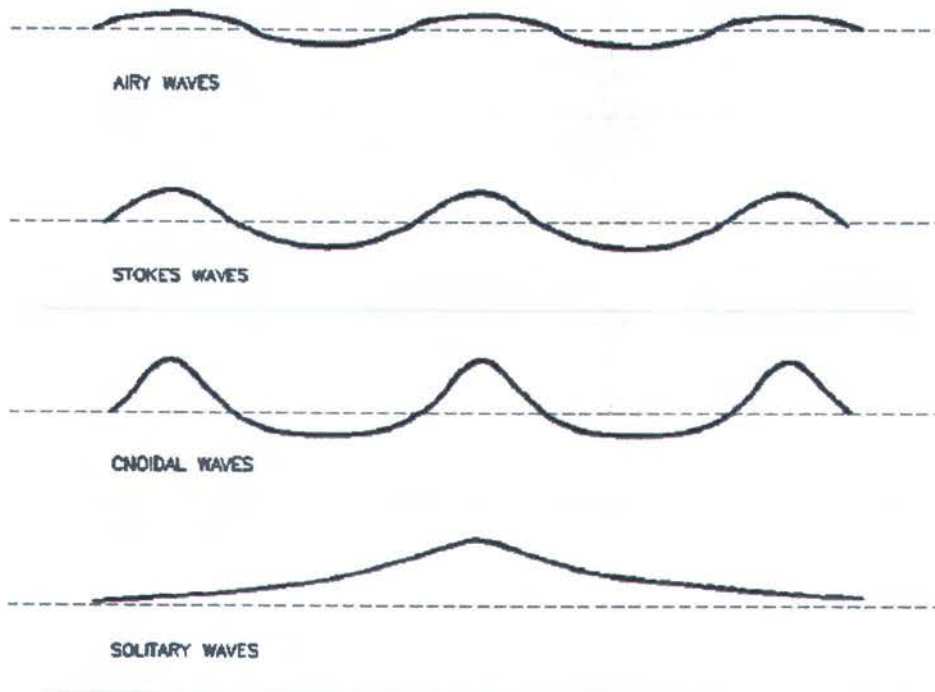
$$H = K_s.H_o \quad (2.20)$$

Keterangan :

- L = Panjang gelombang pada kedalaman tertentu (m)
- L_o = Panjang gelombang awal (m)
- g = Percepatan gravitasi (m/dt²)
- T = Periode gelombang (dt)
- D = Kedalaman perairan (m)
- H = Tinggi gelombang pada kedalaman tertentu (m)
- H_o = Tinggi gelombang awal (m)
- K_s = Koefisien shoaling / pendangkalan



Perbedaan jenis-jenis bentuk profil gelombang dapat dilihat pada gambar berikut ini :

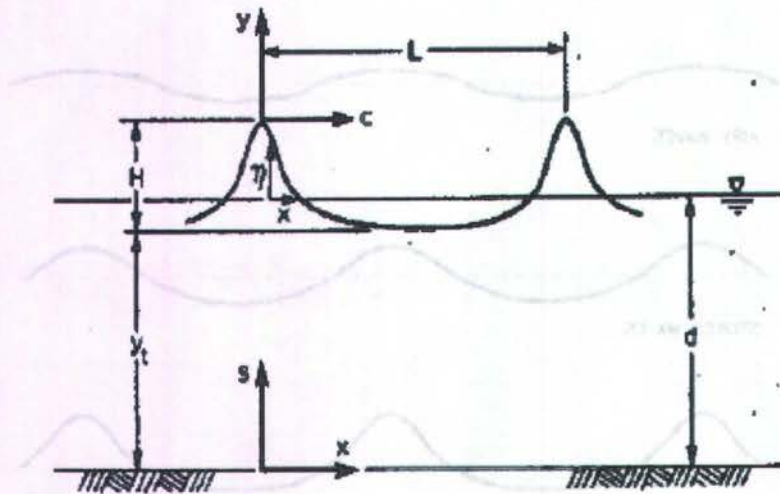


Gambar 2.6 Bentuk Macam-Macam Profil Gelombang (Sarpkaya, 1981)

2.4.4. Teori Gelombang Cnoidal

Gelombang Cnoidal adalah gelombang periodic yang biasanya memiliki puncak tajam yang dipisahkan oleh lembah yang cukup panjang. Umumnya gelombang cnoidal ini terjadi di daerah dangkal. Teori ini berlaku apabila $d/L < 1/8$ dan parameter Ursell $U_R > 26$. Dimana parameter Ursell ini didefinisikan $U_R = \frac{HL^2}{d^3}$.

Profil permukaan gelombang Cnoidal dengan beberapa parameter dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2.7 Profil Gelombang Cnoidal (Triatmodjo,1999)

Teori gelombang Cnoidal diekspresikan oleh tabulasi fungsi eliptik dan integral. Karakteristik gelombang dinyatakan dalam bentuk parameter yang merupakan fungsi dari k . Parameter k tidak mempunyai arti fisik, dan hanya digunakan untuk menyatakan hubungan antara berbagai parameter gelombang. Ordinat dari permukaan air y_s diukur terhadap dasar diberikan oleh (Triatmodjo,1999) :

$$y_s = y_t + H \operatorname{cn}^2 \left\{ 2K(k) \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right), k \right\} \quad (2.21)$$

dengan :

y_t = Jarak dari dasar ke lembah gelombang (m)

cn = Fungsi cosinus ellips

$K(k)$ = Integral ellips

k = Modulus dari integral ellips (nilai berkisar 0 -1)

Kecepatan partikel air dalam teori gelombang Cnoidal (Sarpkaya, 1981) :

• Horizontal :

$$u = \sqrt{gd} \left[\operatorname{cn}^2 q - h_1 \right] + \epsilon^2 \left\{ \left(f_1 + f_2 \operatorname{cn}^2 q - \operatorname{cn}^4 q \right) - \frac{3}{4K} \left(\frac{s}{d} \right)^2 \left[K^2 + 2(2K^2 - 1) \operatorname{cn}^2 q - 3K^2 \operatorname{cn}^4 q \right] \right\} + 0[\epsilon^3] \quad (2.22)$$

• Vertikal :

$$w = \sqrt{gd} \frac{\epsilon \sqrt{3} \epsilon}{K} \left(\frac{s}{d}\right) cnqdnqsnq \left\{ 1 + \left[f_3 - 2cn^2q - \left(\frac{s}{d}\right)^2 \left(\frac{2K^2 - 1}{2K^2} - \frac{3}{2} cn^2q \right) \right] + 0[\epsilon^2] \right\} \quad (2.23)$$

Percepatan partikel air dalam teori gelombang Cnoidal (Sarpkaya, 1981) :

• Horisontal :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = g \frac{\epsilon \sqrt{3} \epsilon}{K} cnqdnqsnq \left\{ 1 + \left[f_4 - 2cn^2q - \left(\frac{s}{d}\right)^2 \left(\frac{3(2K^2 - 1)}{2K^2} + \frac{9}{2} cn^2q \right) \right] + 0[\epsilon^2] \right\} \quad (2.24)$$

• Vertikal :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = g \frac{3\epsilon^2}{2K^2} \frac{s}{d} (K^{12} + 2(2K^2 - 1)cn^2q - 3K^2cn^4q) + 0[\epsilon^3] \quad (2.25)$$

Keterangan :

$$\epsilon = \frac{H}{d}$$

$$f_1 = \frac{\{ \gamma(6\gamma + 11K^2 - 16) + K^{12}(9K^2 - 10) \}}{12K^4}$$

$$K'^2 = 1 - K^2$$

$$f_2 = \frac{(2\gamma + 7K^2 - 6)}{4K^2}$$

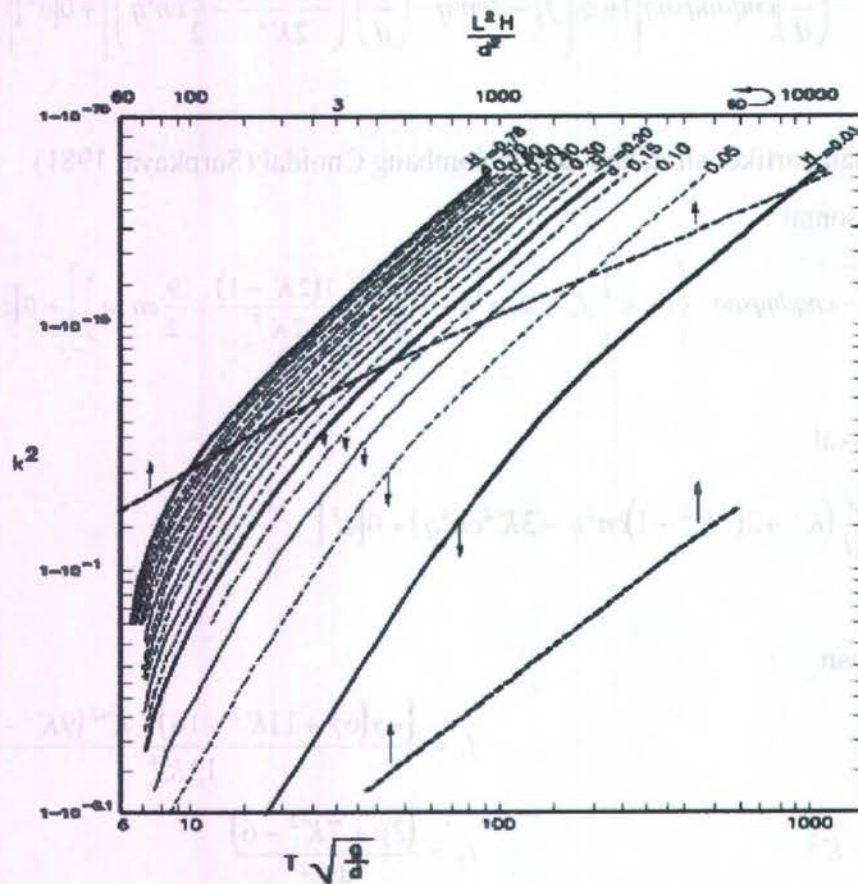
$$h_1 = \frac{\gamma - K'^2}{K^2}$$

$$f_3 = \frac{(16\gamma + 19K^2 - 22)}{8K^2}$$

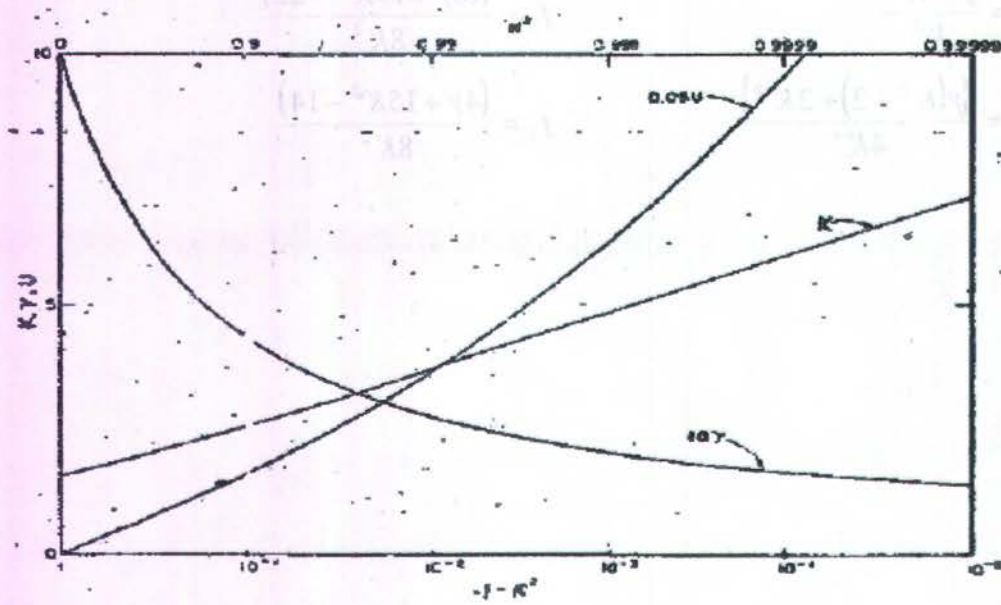
$$h_2 = \frac{\{ \gamma(K^2 - 2) + 2K'^2 \}}{4K^4}$$

$$f_4 = \frac{(4\gamma + 15K^2 - 14)}{8K^2}$$

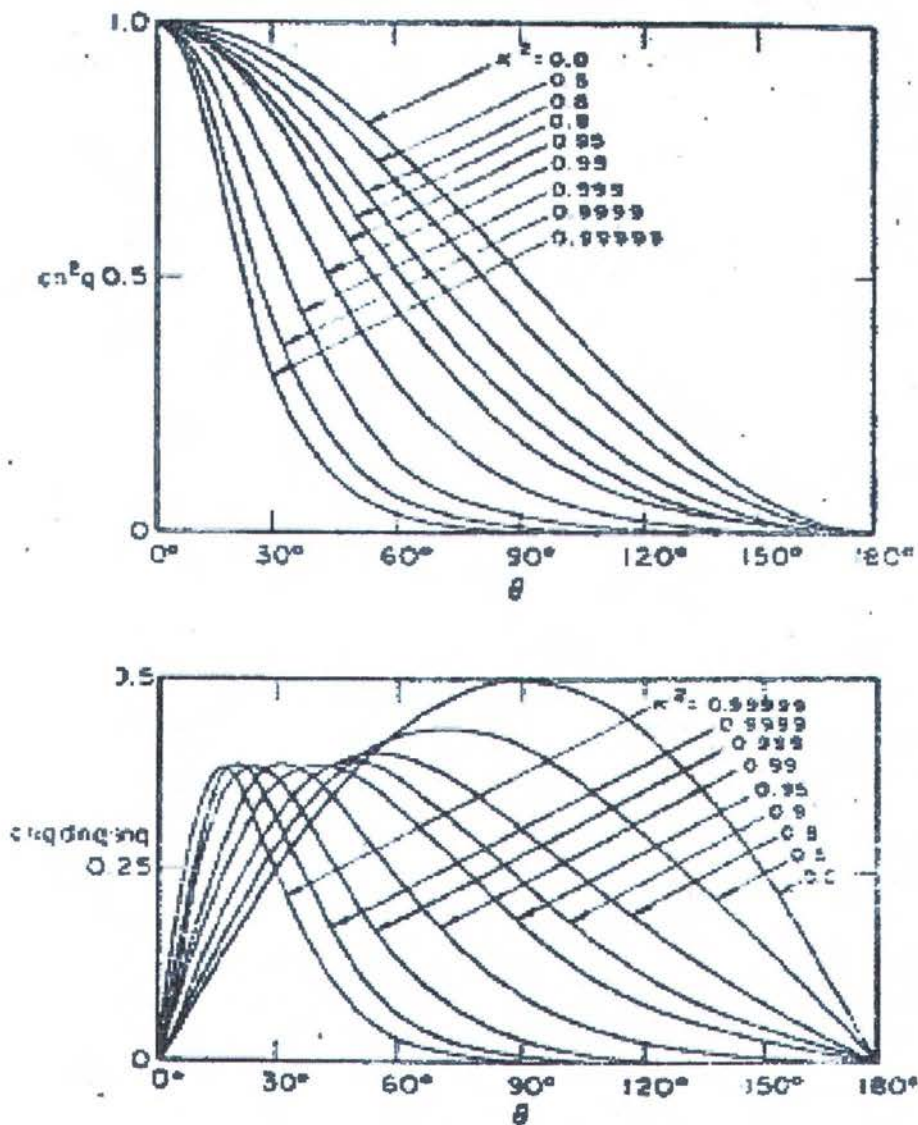
Dalam menentukan parameter-parameter di atas dapat ditentukan dari grafik-grafik berikut ini :



Gambar 2.8 Variasi H/d dengan k^2 (Triatmodjo, 1999)



Gambar 2.9 Variasi Fungsi Jacobian Elliptik dengan k (Sarpkaya, 1981)



Gambar 2.10 Variasi cn^2q dan $cnqdnqsnq$ dengan sudut untuk berbagai nilai k (Sarpkaya,1981)

2.4.5. Teori Gelombang Stokes

Teori gelombang Stokes adalah termasuk teori gelombang non linier untuk laut dalam dimana merupakan pemecahan untuk perairan yang membutuhkan tingkat akurasi yang lebih tinggi dari teori gelombang linier. Teori gelombang Stokes merupakan ekspansi potensial kecepatan sebagai deret dari parameter yang bergantung pada amplitudo dan panjang gelombang. Stokes memasukkan ekspresi kecepatan potensial dalam persamaan Laplace dan syarat batas dasar laut. Koefisien dari deret tersebut merupakan pertambahan parameter yang dikaitkan dengan

amplitudo dan panjang gelombang. Stokes mengembangkan teori orde kedua untuk gelombang yang mempunyai tinggi gelombang kecil tapi berhingga.

➤ Teori Gelombang Stokes Orde 2

Persamaan kecepatan dan percepatan partikel gelombang pada arah horisontal dan vertikal untuk teori gelombang Stokes orde 2 dapat diketahui sebagai berikut (Chakrabarti, 1987) :

- Kecepatan horisontal :

$$u = \frac{\pi H \cosh ks}{T \sinh kd} \cos \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H \cosh 2ks}{T \sinh^4 kd} \cos 2\theta \quad (2.26)$$

- Kecepatan vertikal :

$$v = \frac{\pi H \sinh ks}{T \sinh kd} \sin \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H \sinh 2ks}{T \sinh^4 kd} \sin 2\theta \quad (2.27)$$

- Percepatan horisontal :

$$u = \frac{2\pi^2 H \cosh ks}{T \sinh kd} \sin \theta + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \sin 2\theta \quad (2.28)$$

- Percepatan vertikal :

$$u = \frac{2\pi^2 H \sinh ks}{T \sinh kd} \cos \theta - \frac{3\pi^2 H}{4T^2} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\sinh 2ks}{\sinh^4 kd} \cos 2\theta \quad (2.29)$$

Nilai k dan s pada persamaan teori gelombang Stokes orde 2 diketahui dari persamaan berikut :

$$s = d \pm y \quad (2.30)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (2.31)$$

Keterangan :

L = Panjang gelombang pada kedalaman tertentu (m)

g = Percepatan gravitasi (m/dt²)

T = Periode gelombang (dt)

d = Kedalaman perairan (m)

H = Tinggi gelombang pada kedalaman tertentu (m)

k = Angka gelombang

- ω = Frekuensi gelombang (rad/dt)
- C = Cepat rambat gelombang (m/dt)
- h = Kedalaman laut (m)
- s = Jarak vertikal titik yang ditinjau dari dasar laut (m)
- y = Jarak vertikal suatu titik yang ditinjau terhadap muka air diam (m)

2.4.6. Kecepatan Partikel Efektif

Kecepatan partikel efektif dirumuskan sebagai integral dari kuadrat kecepatan arus (U) yang melintasi pipa dibagi dengan diameter pipa (D)

$$U_e^2 = \frac{1}{D} \int U^2(y) dy \quad (2.32)$$

Dalil pangkat 1/7 (1/7 power law) biasa digunakan sebagai pendekatan untuk menentukan kecepatan partikel air, dirumuskan sebagai berikut (Paul Indoyono, 2004):

$$\frac{U}{U_o} = \left(\frac{y}{y_o} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (2.33)$$

dengan :

- U = Kecepatan partikel air pada ketinggian y dari seabed (m/dt)
- U_o = Kecepatan pada ketinggian y_o dari dasar laut (m/dt)
- y_o = Ketinggian V_o dari dasar laut (m)
- y = Ketinggian V dari dasar laut (m)

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.32) dan (2.33) di atas , maka akan didapatkan :

$$U_e = 0,778.U_o^2 \left(\frac{D}{y_o} \right)^{0,286} \quad (2.34)$$

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

$$V_N = V_{abs} \cdot \cos\theta \quad (2.35)$$

Keterangan :

V_N = kecepatan normal (m/dt)

V_{abs} = kecepatan absolut (m/dt)

2.4.7. Gaya-Gaya Hidrodinamis

Dalam perhitungan optimasi pipa juga melalui perhitungan gaya-gaya hidrodinamis. Gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa yang terbenam atau meletak di dasar laut antara lain seperti gaya drag, gaya inersia, dan gaya angkat, terjadi akibat adanya gerakan relatif antara pipa dengan fluida di sekitarnya. Dengan adanya gerakan relatif ini, maka akan timbul kecepatan dan percepatan relatif partikel air. Gerakan ini dapat disebabkan oleh gelombang dan arus air laut. Berikut ini penjelasan tentang gaya-gaya yang bekerja :

a. Gaya drag (*drag force*)

Gaya drag disebabkan terjadinya hambatan yang disebabkan adanya aliran yang melalui suatu benda. Gaya drag proporsional dengan kecepatan partikel aliran kuadrat (Paul Indiyono, 2004).

Gaya drag yang bekerja pada struktur pipa di dasar laut per unit panjang pipa dirumuskan sebagai berikut (Mousselli, 1981) :

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \cdot C_D \cdot D \cdot U_e^2 \quad (2.36)$$

dengan :

F_D = Gaya drag (N/m)

ρ = Densitas fluida (kg/m^3)

C_D = Koefisien drag

D = Diameter luar pipa (m)

U_e = Kecepatan efektif partikel (m/dt)

b. Gaya inersia (*inertia force*)

Gaya inersia disebabkan oleh adanya perbedaan tekanan di dalam percepatan fluida dan interaksi lokal member dengan percepatan fluida. Gaya inersia proporsional dengan percepatan fluidanya (Paul Indiyono, 2004).

Gaya inersia yang bekerja pada struktur pipa per unit panjang dirumuskan sebagai berikut :

$$F_I = \rho.C_m.\frac{\pi.D^2}{4}.\frac{du}{dt} \quad (2.37)$$

dengan :

- F_I = Gaya inersia (N/m)
- ρ = Densitas fluida (kg/m^3)
- C_m = Koefisien inersia
- D = Diameter luar pipa (m)
- $\frac{du}{dt}$ = Percepatan fluida (m/s^2)

c. Gaya angkat (*lift force*)

Gaya angkat (*lift force*) yang bekerja pada struktur pipa bawah laut diformulasikan sebagai berikut (Mousselli, 1981) :

$$F_L = \frac{1}{2}.\rho.C_L.D.Ue^2 \quad (2.38)$$

dengan :

- F_L = Gaya angkat (N/m)
- ρ = Densitas fluida (kg/m^3)
- C_L = Koefisien lift
- D = Diameter luar pipa (m)
- Ue = Kecepatan efektif partikel (m/dt)

Selain gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja, juga perlu dibahas mengenai hal lain yaitu koefisien hidrodinamis yang sangat penting digunakan dalam penghitungan gaya-gaya hidrodinamis itu sendiri antara lain C_D , C_M , dan C_L .

2.4.8. Koefisien Hidrodinamis

Banyak penelitian telah dilakukan untuk mendapatkan harga koefisien hidrodinamis, baik dilakukan di laboratorium maupun langsung di lapangan. Hasil penelitian yang diperoleh sangat beragam. Perintis dalam penelitian nilai koefisien hidrodinamis tersebut adalah Keulegan dan Carpenter (Chakrabarti, 1987).

Penelitian di laboratorium dilakukan untuk mendapatkan hubungan antara C_D , C_M , dan C_L dengan Reynold Number (Re) dan Keulegan Carpenter Number (KC), sehingga diketahui bahwa koefisien hidrodinamis tergantung pada dua parameter non-dimensional tersebut. Sarpkaya (1981) merumuskannya sebagai berikut :

- Bilangan Reynold (Re)

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

$$R_v = \frac{Ue \cdot D}{\nu} \quad (2.39)$$

dengan :

- ν = Viskositas kinematis fluida untuk air laut berkisar $1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- D = Diameter luar pipa (m)
- Ue = Kecepatan efektif partikel (m/dt)

- Keulegan Carpenter number (KC)

Bilangan Keulegan Carpenter dirumuskan sebagai berikut :

$$KC = \frac{Ue \cdot T}{D} \quad (2.40)$$

dengan :

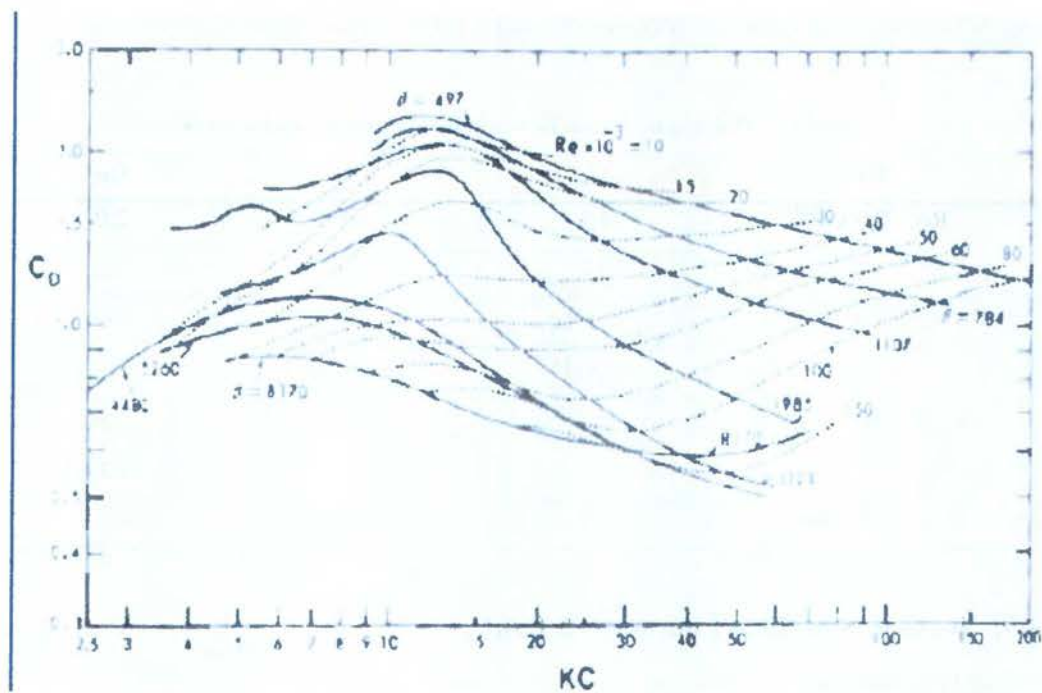
- T = Periode gelombang (dt)
- D = Diameter luar pipa (m)
- Ue = Kecepatan efektif partikel (m/dt)

- Kekasaran permukaan pipa $\left(\frac{k}{D}\right)$

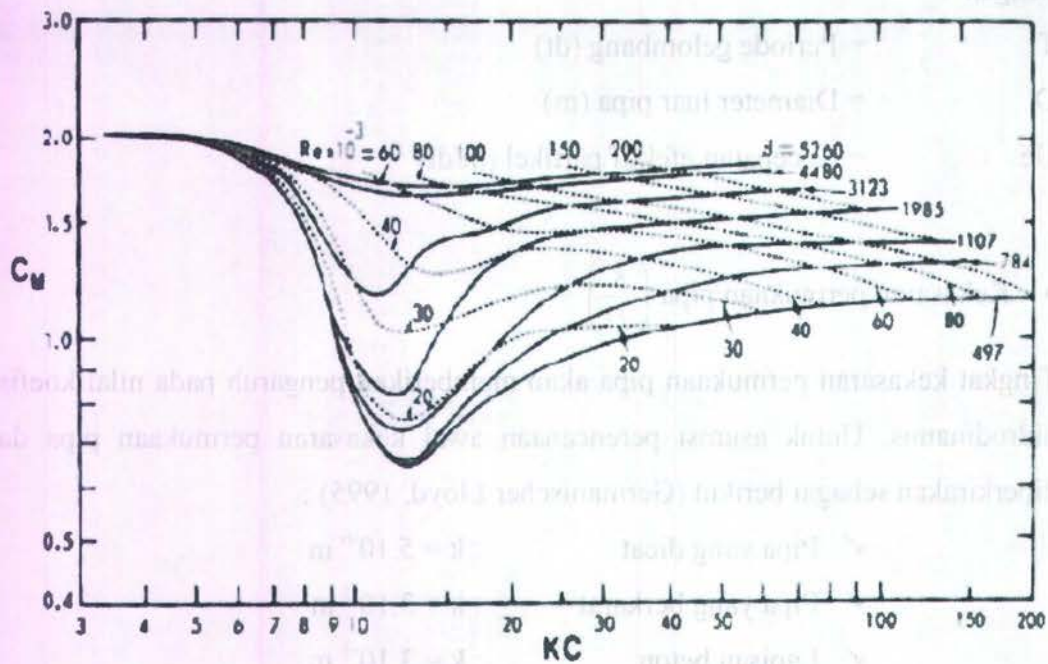
Tingkat kekasaran permukaan pipa akan memberikan pengaruh pada nilai koefisien hidrodinamis. Untuk asumsi perencanaan awal kekasaran permukaan pipa dapat diperkirakan sebagai berikut (Germanischer Lloyd, 1995) :

- ✓ Pipa yang dicat : $k = 5.10^{-6}$ m
- ✓ Pipa yang berkarat : $k = 3.10^{-3}$ m
- ✓ Lapisan beton : $k = 3.10^{-3}$ m
- ✓ Marine growth : $k = 5.10^{-3} - 5.10^{-5}$

Hasil dari perhitungan parameter tersebut dimasukkan pada grafik variasi koefisien drag, lift, dan inersia. Berikut ini grafik untuk mencari koefisien drag dan koefisien inersia.



Gambar 2.11 Grafik Variasi Re dengan C_D Untuk Silinder Halus



Gambar 2.12 Grafik Variasi Re dengan C_M Untuk Silinder Halus

Desainer harus dapat menerapkan nilai koefisien hidrodinamis sesuai dengan keadaan sebenarnya di lapangan. Beberapa pihak mempunyai cara tersendiri dalam menentukan koefisien hidrodinamis. Salah satunya adalah koefisien hidrodinamis yang direkomendasikan oleh Mouselli (1981) untuk desain pipa :

Tabel 2.1. Hubungan Angka Reynold dengan Beberapa Koefisien

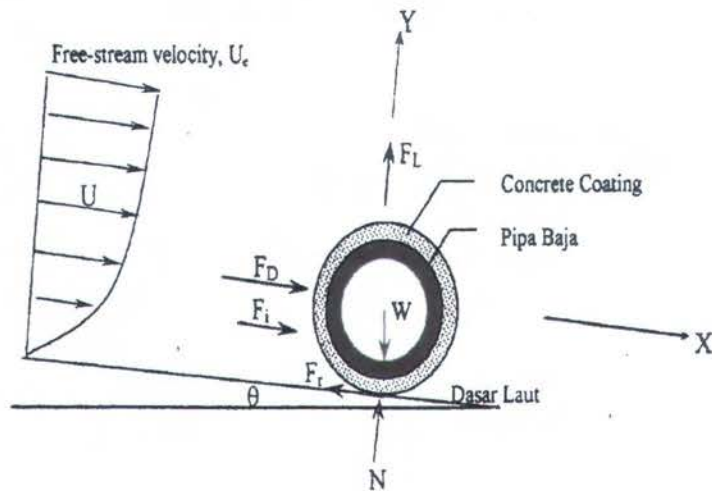
| Re | C_D | C_L | C_M |
|------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| $Re < 5,0 \times 10^4$ | 1,3 | 1,5 | 2,0 |
| $5,0 \times 10^4 < Re < 1,0 \times 10^5$ | 1,2 | 1,0 | 2,0 |
| $1,0 \times 10^5 < Re < 2,5 \times 10^5$ | $1,53 - \frac{Re}{3 \times 10^5}$ | $1,2 - \frac{Re}{5 \times 10^5}$ | 2,0 |
| $2,5 \times 10^5 < Re < 5,0 \times 10^5$ | 0,7 | 0,7 | $2,5 - \frac{Re}{5 \times 10^5}$ |
| $5,0 \times 10^5 < Re$ | 0,7 | 0,7 | 1,5 |

2.4.9. Konsep Stabilitas Pipa Bawah Laut

a. Stabilitas lateral

Struktur pipa yang terletak di dasar laut akan mendapatkan pengaruh gaya-gaya hidrodinamis. Kestabilan struktur pipa ini sangat tergantung pada gaya-gaya yang

bekerja pada pipa tersebut. Mouselli (1981) mengilustrasikan gaya-gaya yang bekerja pada pipa yang terletak di dasar laut, seperti gambar berikut ini :



Gambar 2.13 Gaya-Gaya yang Bekerja Pada Pipa (Mousselli, 1981)

Struktur pipa akan stabil jika gaya-gaya yang bekerja pada pipa memenuhi keseimbangan statis, sehingga dapat diturunkan persamaan ke dalam arah horizontal dan dalam arah vertikal sebagai berikut (Mouselli, 1981) :

- Persamaan kesetimbangan horizontal :

$$F_D + F_L - F_r - W \sin \theta = 0 \quad (2.41)$$

- Persamaan kesetimbangan vertikal :

$$N + F_L - W \cos \theta = 0 \quad (2.42)$$

Keterangan :

- W = Berat pipa terbenam (kg/m)
- F_D = Gaya drag (N/m)
- F_I = Gaya inersia (N/m)
- F_L = Gaya angkat (N/m)
- N = Gaya normal (N/m)
- F_r = Gaya gesek (N/m)
- U = Kecepatan aliran (m/dt)
- θ = Sudut kemiringan dasar laut ($^\circ$)

Jika pipa meletak di dasar laut maka pipa akan mendapatkan gaya gesekan antara tanah dan permukaan pipa tersebut (F_r). Gaya gesekan ini dapat dihubungkan dengan gaya normal (N) dengan persamaan sebagai berikut :

$$F_r = \mu N \quad (2.43)$$

Dimana μ adalah koefisien gerak lateral antara permukaan pipa dengan dasar laut. Pengukuran koefisien gesekan dengan percobaan menunjukkan bahwa nilai koefisien berkisar antara 0,5 – 0,9 (Mouselli,1981). Hal ini tergantung lapisan pipa dan tipe tanah dasar permukaan. Tabel di bawah ini memberikan nilai koefisien gesekan antar lapisan pipa dengan berbagai macam tipe tanah

Tabel 2.2. Nilai Koefisien Gesekan Berdasarkan Jenis Tanah

| Tipe Tanah | Koefisien Gesekan |
|------------------|-------------------|
| Lempung (clay) | 0,3 - 0,6 |
| Pasir (sand) | 0,5 - 0,7 |
| Kerikil (gravel) | 0,5 |

Dengan mengkombinasikan persamaan (2.41) dan (2.42) dengan menggunakan persamaan (2.43) maka dapat diturunkan persamaan sebagai berikut :

$$F_D + F_I + \mu.(F_L - W . \cos \theta) = W . \sin \theta \quad (2.44)$$

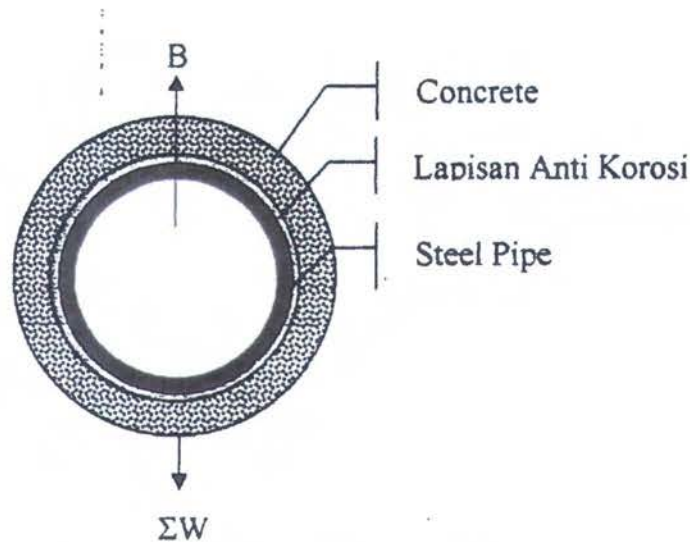
$$W = \frac{F_D + F_I + F_L}{\mu . \cos \theta + \sin \theta} \quad (2.45)$$

Jika permukaan dasar laut diasumsikan datar dimana $\theta=0^\circ$, maka :

$$W = F_L + \frac{1}{\mu} (F_D + F_I) \quad (2.46)$$

W adalah berat minimum pipa yang dibutuhkan agar pipa stabil dengan isi pipa dengan kata lain adalah berat kosong.

Gambar 2.14 merupakan gambar potongan melintang pipa dengan lapisan beton (*concrete coating*) :



Gambar 2.14 Potongan Melintang Pipa Bawah Laut

Persamaan berikut digunakan untuk menghitung properti pipa (Mousselli,1981) :

$$W_{as} = 2,68 \cdot (D^2 - OD^2) \quad (2.47)$$

$$W_{ac} = \frac{\pi \rho_c}{576} \cdot ((OD + 2t_c)^2 - ID^2) \quad (2.48)$$

$$W_{aw} = \frac{\pi \rho_w}{576} \cdot ((OD + 2t_c + 2t_w)^2 - (ID + 2t_c)^2) \quad (2.49)$$

$$W = W_{as} + W_{ac} + W_{aw} \quad (2.50)$$

$$B = 0,35 \cdot (OD + 2t_c + 2t_w)^2 \quad (2.51)$$

$$W_s = W_a - B \quad (2.52)$$

Keterangan :

- W_{as} = Berat baja di udara (kg/m)
- W_{ac} = Berat lapisan anti korosi di udara (kg/m)
- W_{aw} = Berat lapisan beton di udara (kg/m)
- W_s = Berat keseluruhan pipa di udara (kg/m)
- B = Gaya pengapung (*bouyancy*) (kg/m)
- W_s = Berat pipa tenggelam (kg/m)
- ρ_c = Densitas lapisan anti korosi (kg/m³)
- ρ_w = Densitas lapisan beton (kg/m³)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Metodologi Penelitian

Pipa di dasar laut mengalami tekanan dari dalam pipa akibat aliran gas dan tekanan dari luar pipa akibat gaya hidrostatis di dasar laut. Untuk dapat tetap beroperasi maka ketebalan dari pipa penyalur tersebut harus diperhitungkan dengan baik.

Untuk memudahkan dalam penyusunan penelitian ini, maka semua bentuk kegiatan dilakukan secara urut dan sistematis agar mendapat hasil yang baik. Adapun proses pengerjaan atau urutan kegiatan tugas akhir dapat dilihat pada gambar 3.1.

3.2. Penjelasan Diagram Alir

Dalam tugas akhir ini akan dijelaskan secara singkat dari masing-masing urutan kerja yang dilakukan dan penulisan laporan tugas akhir. Langkah-langkah yang dijalankan antara lain :

1. Studi literatur

Studi literatur dilakukan dengan mencari, mempelajari, serta memahami paper , jurnal, dan buku-buku yang berkaitan dengan tema penelitian yang dilakukan. Selain itu juga mempelajari software LINGO ver.8 dan SOLVER.

2. Pengumpulan dan pengelompokan data

Data-data yang dikumpulkan dan dikelompokkan sebagai bahan pembuat tugas akhir ini antara lain :

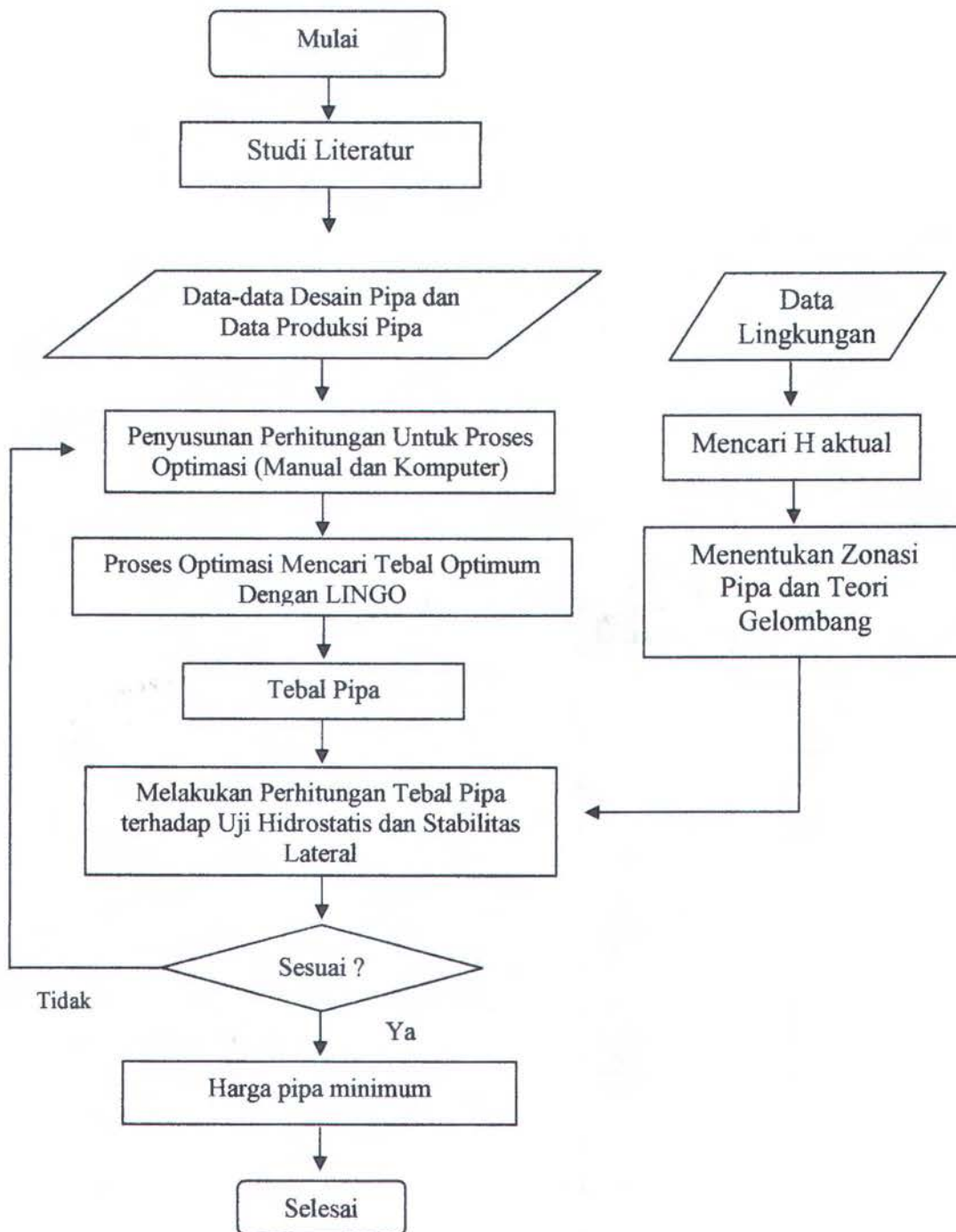
1. Data desain pipa yang meliputi data perkiraan produksi gas, diameter pipa, tekanan saat operasi, suhu desain, panjang keseluruhan pipa, umur desain pipa, berat jenis pipa, dan jenis material pipa.

2. Data lingkungan yang meliputi data pasang surut, data suhu air laut, data kecepatan arus air laut, data gelombang, data koefisien hidrodinamis, dan data kedalaman air.

3. Data pendamping yang meliputi data harga pipa sesuai jenis material pipa yang ada.

4. Penyusunan fungsi kendala dan fungsi tujuan sesuai dengan variabel-variabel yang ada dan yang telah dihitung.

5. Memasukkan fungsi-fungsi persamaan yang ada ke dalam software LINGO ver.8 dimana dilakukan optimasi mencari tebal pipa optimum.
6. Hasil tebal pipa optimum yang diperoleh kemudian dilakukan uji hidrostatis dan uji stabilitas. Dimana untuk uji hidrostatis juga dimasukkan data-data lingkungan yang ada.
7. Setelah dilakukan uji hidrostatis dan uji stabilitas dimana diperoleh hasil yang memuaskan maka kemudian tebal pipa optimum kita masukkan ke dalam fungsi tujuan yaitu fungsi harga dimana didapatkan dari hasil interpolasi berdasar data harga pipa. Apabila nilai tebal pipa yang diperoleh tidak memenuhi syarat uji stabilitas dan uji hidrostatis maka akan dilakukan lagi pencarian atau iterasi terhadap fungsi-fungsi yang ada.
8. Harga tebal pipa yang dicari adalah harga pipa minimum (material pipa).

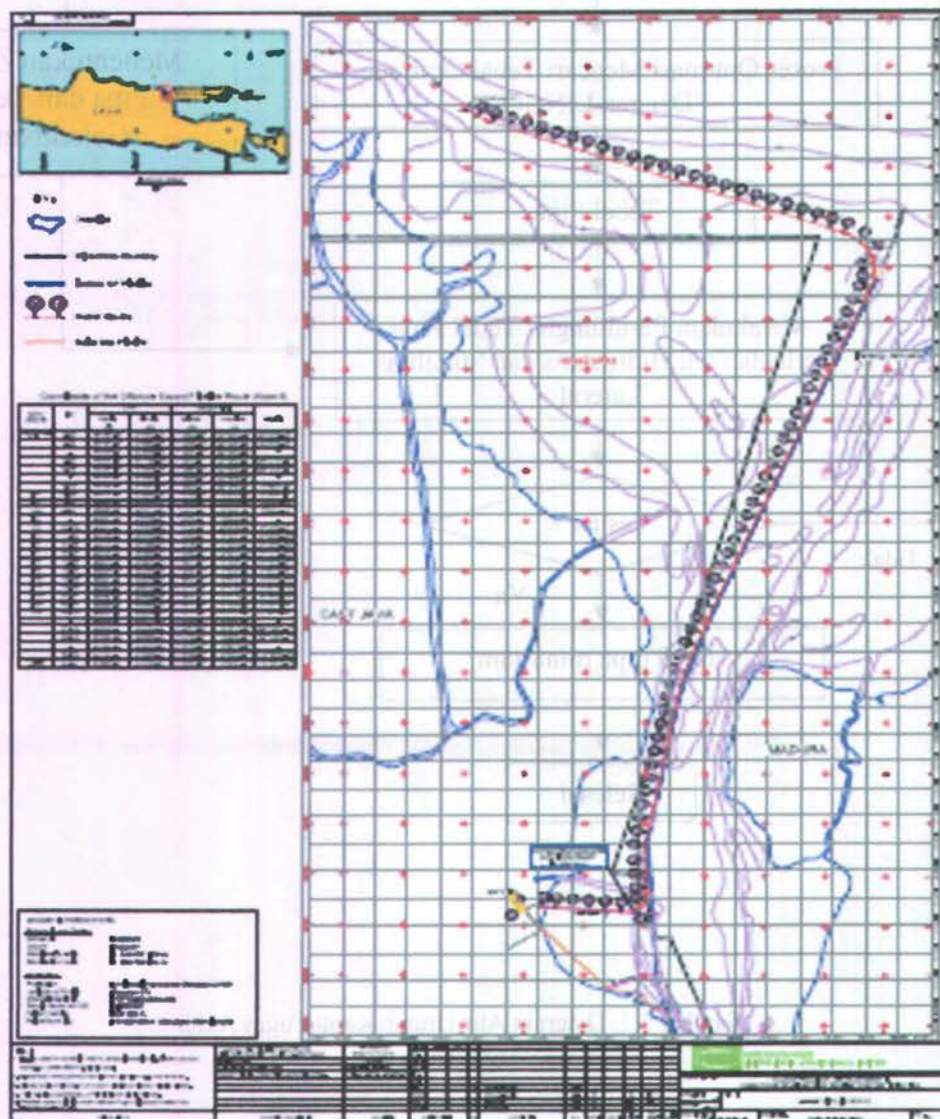


Gambar 3.1. Diagram Alir Urutan Kerja Tugas Akhir

3.3. Pengumpulan Data

3.3.1. Data Lingkungan

Pipa lepas pantai ini direncanakan dan akan dipasang oleh Amerada Hess. Pipa lepas pantai ini akan diletakkan dengan cara conventional lay barge. Rute pipa lepas pantai ini akan diletakkan dari lapangan gas Ujung Pangkah lalu masuk ke arah Selat Madura. Jalur pipa ini membentang sepanjang 39,7 km. Lapangan gas Ujung Pangkah ini berlokasi antara 2-10 km utara ke arah lepas pantai Jawa Timur, sekitar 35 km ke utara dari kota Gresik. Peletakan pipa ini dibagi menjadi 5 zona menurut kedalaman peletakan. Gambar peta perencanaan pipa lepas pantai tersebut sebagai berikut :



Gambar 3.2. Peta Jalur Pipa

Pembagian zona untuk perencanaan pipa dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 3.1. Data Pembagian Zona

| Daerah/ Zona | | Panjang pipa | Kedalaman pipa | Kedalaman peletakan |
|--------------|----------|---------------|----------------|---------------------|
| Zona I | Zona I A | 0 – 1,25 km | 0 – 5 m | 4 m |
| | Zona I B | 1,25 – 2,5 km | 5 – 10 m | 7,5 m |
| Zona II | | 2,5 – 10 km | 10 – 12 m | 11 m |
| Zona III | | 10 – 14,5 km | 12 – 20 m | 16 m |
| Zona IV | | 14,5 - 31 km | 20 – 15 m | 17,5 m |
| Zona V | | 31 – 39,7 km | 15 – 20 m | 17,5 m |

Penentuan tinggi gelombang signifikan (H_s) berdasarkan data dari Amerada Hess. Tinggi gelombang signifikan (H_s) 3,5 meter dan periode gelombang signifikan (T_s) sebesar 7,6 detik. Kecepatan arus pasang surut pada permukaan air 1,10 m/dt. Data lingkungan lain (data gelombang dan arus) yang disediakan sebagai berikut :

Tabel 3.2. Data Gelombang

| Keterangan | Gelombang 1 Tahunan | Gelombang 100 Tahunan |
|------------|---------------------|-----------------------|
| H sig (m) | 2,3 | 3,5 |
| H max (m) | 4,3 | 6,5 |
| Tz (s) | 4,9 | 6,2 |
| Tp (s) | 6,2 | 8,1 |
| Ts (s) | 6,0 | 7,6 |

Tabel 3.3. Data Arus

| Kondisi Arus | Lokasi | Kecepatan Arus (m/dt) |
|------------------|-------------|-----------------------|
| Arus 1 Tahunan | Permukaan | 0,70 |
| | Pertengahan | 0,65 |
| | Dasar | 0,60 |
| Arus 100 Tahunan | Permukaan | 1,10 |
| | Pertengahan | 1,05 |
| | Dasar | 0,95 |

3.3.2. Data Desain Pipa

Data desain yang digunakan untuk desain pipa diberikan seperti tabel di bawah ini sebagai berikut :

Tabel 3.4. Data Desain Pipa di Ujung Pangkah

| Keterangan | Data | Satuan |
|------------------------|-------------------|-------------------|
| Perkiraan panjang pipa | 39,7 | Km |
| Umur desain pipa | 25 | Tahun |
| Produk | Multiphase flow | - |
| Berat jenis material | 729 | kg/m ³ |
| Tekanan operasi | 9000 | kPa |
| Tekanan hidrottest | 12400 | kPa |
| Suhu desain | 60 (Max); 0 (Min) | °C |

3.3.3. Data Material Properti Pipa

Data material properties yang digunakan untuk perhitungan awal dalam permodelan optimasi diberikan pada tabel sebagai berikut :

Tabel 3.5 Data Material Properti Pipa

| Keterangan | Data |
|---------------|--------------|
| Tipe material | API 5 L X 65 |
| Modulus Young | 207000 Mpa |
| Poisson Ratio | 0,3 |
| SMYS | 448 Mpa |
| Diameter Luar | 16 inch |

3.4. Model Optimasi

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penyusunan model optimasi pada Tugas Akhir ini adalah :

1. Pemilihan desain variabel
 t = tebal pipa
2. Permodelan fungsi tujuan

Dalam hal permodelan optimasi ini, fungsi obyektif yang dimodelkan adalah biaya/harga pipa minimum. Data yang digunakan adalah data untuk pipa dengan

diamater luar 16 inch. Faktor ketebalan mengakibatkan perubahan harga material pipa itu sendiri.

Data harga pipa seperti di bawah ini :

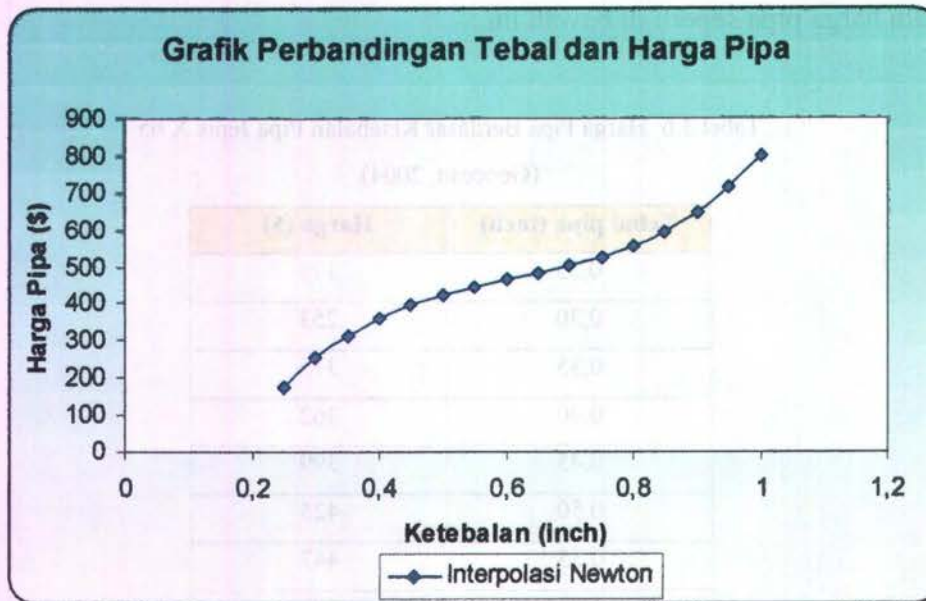
Tabel 3.6 Harga Pipa Berdasar Ketebalan Pipa Jenis X 65
(Geocean, 2004)

| Tebal pipa (inch) | Harga (\$) |
|-------------------|------------|
| 0,25 | 175 |
| 0,30 | 253 |
| 0,35 | 315 |
| 0,40 | 362 |
| 0,45 | 399 |
| 0,50 | 425 |
| 0,55 | 447 |
| 0,60 | 465 |
| 0,65 | 482 |
| 0,70 | 502 |
| 0,75 | 525 |
| 0,80 | 556 |
| 0,85 | 595 |
| 0,90 | 648 |
| 0,95 | 716 |
| 1,00 | 800 |

Data tentang biaya instalasi pipa tersebut untuk panjang pipa setiap meter. Dari data diatas tersebut akan dibuat persamaan agar dapat digunakan sebagai fungsi tujuan dalam permodelan optimasi. Adanya kenaikan harga yang tidak linier disebabkan karena adanya susunan material yang berbeda untuk ketebalan (Geocean, 2004). Dengan menggunakan interpolasi Newton berderajat tinggi persamaan fungsi obyektif adalah sebagai berikut :

$$f(t) = 3500,01 t^3 - 6461,76 t^2 + 4315,47 t - 554,36$$

Dimana grafik hubungan antara ketebalan dan harga material yang dikeluarkan dapat dilihat sebagai berikut :



Gambar 3.3 Grafik Perbandingan Tebal dan Harga Pipa

3. Permodelan Kendala

- Faktor desain dari pipa harus lebih besar dibanding dengan tekanan internal yang terjadi.

$$G(1) = \frac{2.S.t}{D}.F.E.T \geq P_i$$

- Tegangan melingkar (*hoop stress*) tidak boleh melebihi faktor desain dari tegangan melingkar dikalikan dengan *Specified Minimum Yield Strength* material.

$$G(2) = (p_i - p_e) \frac{D}{2t} \leq \eta_h . SMYS . k_1$$

- Tegangan longitudinal yang terjadi tidak boleh melebihi faktor desain tegangan longitudinal dikalikan dengan *Specified Minimum Yield Strength* material.

$$G(3) = \sigma_l \leq 0,6 . SMYS$$

- Tegangan gabungan yang terjadi tidak boleh melebihi faktor desain tegangan gabungan dikalikan dengan *Specified Minimum Yield Strength* material.

$$G(4) = \sigma_{ec} \leq 0,9.SMYS$$

$$G(4) = \sqrt{(\sigma_l + \sigma_h - \sigma_h \cdot \sigma_l + 3\sigma_a)} \leq 0,9.SMYS$$

- *Critical Buckling* disyaratkan harus lebih besar dari tekanan luar pipa.

$$G(5) = P_c \geq P_e$$

$$G(5) = \frac{2E}{1 - \nu^2} \cdot \left(\frac{t}{D - t} \right)^3 \geq P_e$$

- Perambatan buckling disyaratkan harus lebih besar dari tekanan luar pipa.

$$P_{pr} \geq P_e$$

$$G(6) = 1,15 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{t}{D - t} \right)^2 \geq P_e$$

3.5. Program Optimasi Non Linier

Untuk membantu pekerjaan tugas akhir ini digunakan suatu program optimasi non linier yaitu LINGO ver.8 dimana juga divalidasi dengan SOLVER , dimana konvergensinya 0,0001.

Susunan model optimasinya adalah :

Minimalkan :

$$f(t) = 3500,01 t^3 - 6461,76 t^2 + 4315,47 t - 554,36$$

Dengan kendala :

$$G(1) = \frac{44,8 \cdot 10^6 \cdot t}{(0,4064 - t)} \cdot 0,72 \cdot 1.1 \geq 9 \cdot 10^5 \text{ kg/m}^2$$

$$G(2) = 681298,31 \frac{0,4064}{t} \leq 0,72 \cdot 44,8 \cdot 10^6 \cdot 1 \text{ kg/m}^2$$

$$G(3) = \frac{681298,31}{2,0,25,3,14 \cdot ((0,4064 - t)^2 - (0,4064)^2)} t + \frac{681298,31 \cdot (0,25,3,14 \cdot (0,4064 + 2t)^2)}{0,25,3,14 \cdot ((0,4064)^2 - (0,4064 - 2t)^2)} + 9 \cdot 10^5 \leq 0,6,44,8 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2$$

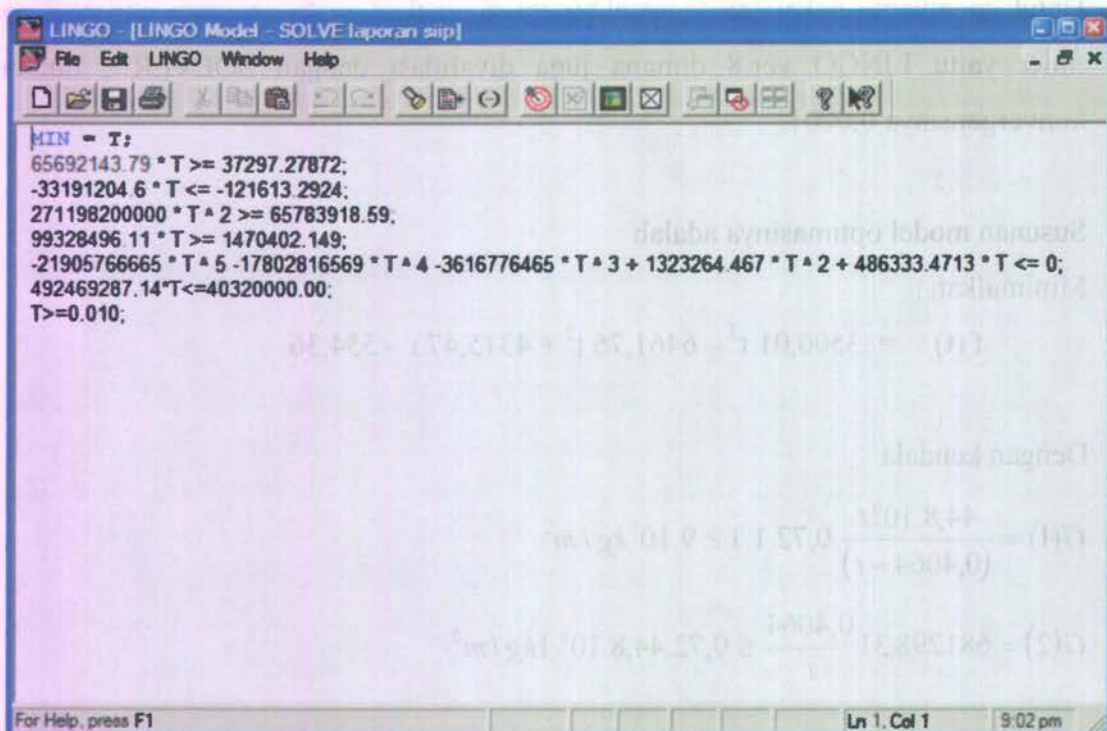
$$G(4) = \sqrt{(\sigma t^2 + \sigma h^2 - \sigma h \cdot \sigma t + 3\sigma \alpha^2)} \leq 0,9,44,8 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2$$

$$G(5) = \frac{2,2,07,10^{11}}{1 - 0,3^2} \left(\frac{t}{0,4064 - t} \right)^3 \geq 218701,688 \text{ kg/m}^2$$

$$G(6) = 1,15,3,14,44,8 \cdot 10^6 \left(\frac{t}{0,4064 - t} \right) \geq 218701,688 \text{ kg/m}^2$$

Dimana juga dalam persamaan ini dimasukkan *corrosion allowance* yang telah disyaratkan sebesar 0,010 m. Dimana kendala-kendala ini dibuat suatu persamaan yang lebih sederhana terlebih dahulu. Kemudian persamaan tersebut dijadikan input dalam software LINGO ver.8 dengan tujuan mencari nilai ketebalan (t) dimana nantinya hasil ketebalan (t) yang didapat dimasukkan ke dalam fungsi biaya instalasi (f(t)) seperti pada persamaan yang ada.

Inputan dalam LINGO dapat dilihat sebagai berikut :



Gambar 3.4 Inputan dalam LINGO

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1. Perhitungan Awal

Dari data-data yang diperoleh dilakukan perhitungan awal untuk menentukan nilai awal tekanan luar pipa, tekanan dalam desain, tegangan melingkar, tegangan longitudinal, tegangan gabungan, tekanan kritis buckling, perambatan buckling untuk pipa bawah laut.

4.1.1 Perhitungan Tekanan Eksternal Pipa

Tekanan eksternal pipa dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut ini :

$$Pe = \rho_w \cdot g \cdot \left(d_h + \frac{1}{2} H \right)$$

$$d_h = 20 \text{ m}$$

$$H = 3,5 \text{ m}$$

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

$$g = 9,81 \text{ m/dt}^2$$

maka tekanan eksternal pipa sebesar :

$$Pe = 218.701,688 \text{ kg/m}^2$$

$$= 311,0669 \text{ psi}$$

4.1.2 Perhitungan Tekanan Dalam Desain

Dari data material properties tekanan dalam desain dapat dihitung dengan menggunakan rumusan sebagai berikut :

$$P_d = \frac{2.SMYS.t}{D} \cdot F \cdot E \cdot T$$

$$F = 0,72$$

$$E = 1$$

$$T = 1$$

Maka tekanan dalam desain sebesar :

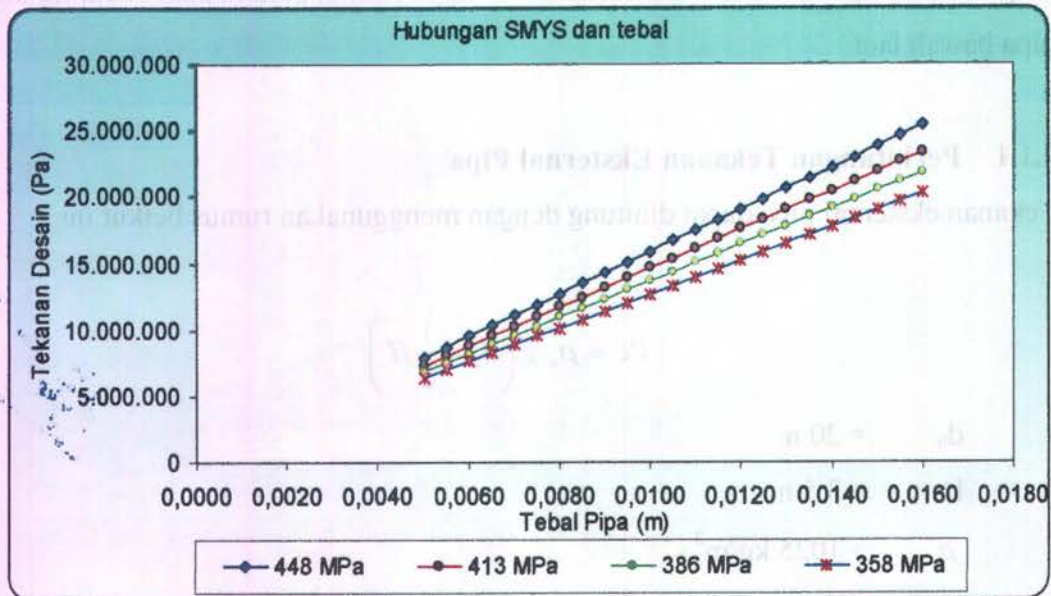
$$P_d = 2.492.220,472 \text{ kg/m}^2$$

$$= 3544,77 \text{ psi}$$

$$P_d \geq P_i$$

$$2.492.220,472 \text{ kg/m}^2 \geq 900.000 \text{ kg/m}^2$$

Dari perhitungan tekanan dalam desain maka dapat kita buat grafik hubungan antara SMYS dan tebal pipa sebagai berikut :



Gambar 4.1 Grafik Hubungan SMYS dan Tebal Pipa

4.1.3 Perhitungan Tegangan Melingkar (*hoop stress*)

Tegangan melingkar (*hoop stress*) dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\sigma_h = (P_i - P_e) \frac{D}{2t}$$

Maka tegangan melingkar yang terjadi sebesar :

$$\sigma_h = 8.817.822,745 \text{ kg/m}^2$$

$$\sigma_h \leq \eta_h \cdot SMYS k_t$$

$$8.817.822,745 \text{ kg/m}^2 \leq 32.256.000 \text{ kg/m}^2$$

4.1.4. Perhitungan Tegangan Longitudinal

Tegangan longitudinal dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\sigma_l \leq 0,6.SMYS$$

Maka tegangan longitudinal yang terjadi :

$$\sigma_l = 5.486.183,33 \text{ kg/m}^2$$

$$\sigma_l \leq 0,6.SMYS$$

$$5.486.183,33 \text{ kg/m}^2 \leq 26.880.000 \text{ kg/m}^2$$

4.1.5. Perhitungan Tegangan Gabungan

Tegangan gabungan dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\sigma_{ec} \leq \eta e.SMYS$$

$$\sigma_{ec} \leq 0,9.SMYS$$

$$\sqrt{(\sigma_l + \sigma_h - \sigma_h \cdot \sigma_l + 3\sigma_a)} \leq 0,9.SMYS$$

$$\sigma_{ec} = 7.712.069,034 \text{ kg/m}^2$$

Maka :

$$\sigma_{ec} \leq 0,9 SMYS$$

$$7.712.069,034 \text{ kg/m}^2 \leq 40.320.000 \text{ kg/m}^2$$

4.1.6. Perhitungan Tegangan Kritis Buckling

Tegangan kritis buckling dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$P_c \geq P_e$$

$$\frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{D-t} \right)^3 \geq P_e$$

$$E = 207.000 \text{ Mpa}$$

Maka tegangan kritis buckling yang terjadi :

$$P_c = 548.628,652 \text{ kg/m}^2$$



Sesuai dengan persamaan yang ada, bahwa P_c harus memenuhi syarat :

$$P_e \leq \frac{P_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)}$$

dengan :

$$\gamma_m = 1,05$$

$$\gamma_u = 1,1$$

Maka :

$$218.701,688 \text{ kg/m}^2 \leq 475.003,16 \text{ kg/m}^2$$

4.1.7. Perhitungan Perambatan Buckling

Perambatan buckling dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$P_{pr} \geq P_e$$

$$P_{pr} = 1,15 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{t}{D-t} \right)^2$$

Maka perambatan buckling yang terjadi :

$$261.464,648 \text{ kg/m}^2 \geq 218.701,688 \text{ kg/m}^2$$

4.2 Hasil Perancangan Optimasi dan Pembahasan

Sebelum membahas secara detail hasil permodelan optimasi tebal pipa, terlebih dahulu akan dijelaskan secara singkat menyangkut aspek kekuatan pipa dalam hubungannya dengan ketebalan pipa. Pipa yang terbenam di dasar laut, akan mendapatkan kombinasi tekanan hidrodinamis dan tekanan dalam yang bekerja pada pipa. Kombinasi diameter dan tebal pipa mempengaruhi kekuatan pipa terhadap tekanan yang bekerja pada pipa tersebut. Pada beberapa kasus di lapangan, kesalahan menentukan perbandingan diameter dan tebal pipa menyebabkan pipa mengalami buckling. *Buckling* atau berubahnya bentuk pipa menjadi pipih merupakan salah satu faktor penyebab kegagalan struktur pipa. Setelah didapatkan hasil dari permodelan optimasi maka langkah yang ditempuh adalah melakukan analisa permodelan meliputi :

4.2.1. Penghitungan Diameter Pipa

Meskipun diameter pipa telah diberikan dalam data, tetapi perlu dihitung lagi untuk melakukan cek. Perhitungan pipa dihitung dengan rumus (Arnold, 1998) :

$$V = 60 \cdot \frac{Q_g T Z}{d^2 P}$$

dengan :

- Q_g = Laju aliran fluida (MMScfd)
- T = Suhu ($^{\circ}R$)
- d = Diameter pipa (inch)
- P = Tekanan (Psia)
- V = Kecepatan aliran fluida (ft/detik)
- Z = Faktor kompresibilitas gas

Arnold (1998) merekomendasikan kecepatan minimum gas pada range 10-15 ft/detik, dan maksimum 60 ft/detik.

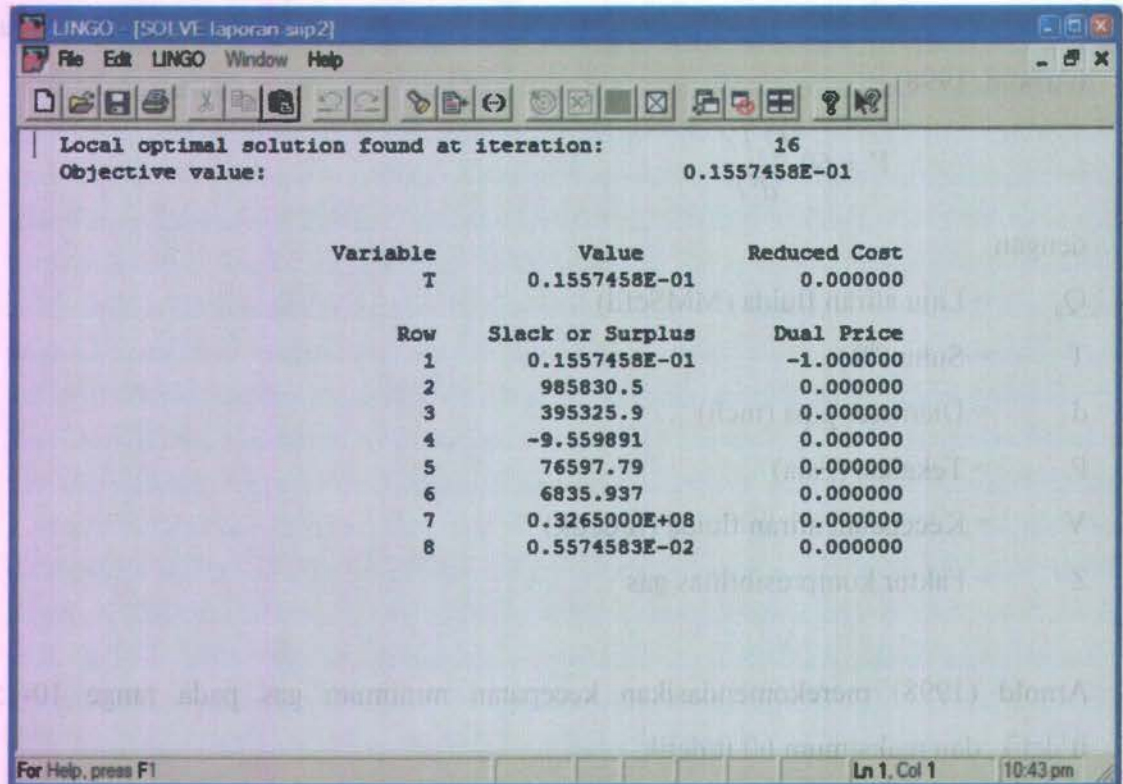
$$V = 60 \cdot \frac{Q_g T Z}{d^2 P} = \frac{2491,018}{d^2}$$

Dengan mengambil kecepatan yang paling minimum sebesar 10 ft/detik, maka :

$$d = 15,78 \text{ inch} \sim \text{dibulatkan } 16 \text{ inch.}$$

4.2.2. Tebal dan Fungsi Obyektif

Hasil optimasi dengan software LINGO ver.8 didapatkan hasil seperti berikut ini :



Gambar 4.2 Output Optimasi dengan LINGO ver.8

Dari optimasi yang dilakukan untuk tebal pipa pada pipa dengan grade material X-65 dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 4.1 Ringkasan Hasil Optimasi Tebal dan Diameter Pipa

| Keterangan | Hasil optimasi (inchi) | Hasil optimasi (m) |
|---------------|------------------------|--------------------|
| Tebal pipa | 0,618 | 0,0156 |
| Diameter pipa | 16 | 0,4064 |

Biaya yang harus dikeluarkan berdasar tebal pipa (t) 0,618 inch atau 0,0156 m adalah sebesar \$ 470,81 per meter panjangnya.

4.2.3. Alternatif Material Pipa

Dari hasil optimasi diatas disebutkan bahwa grade material pipa yang dipilih adalah X 65 dengan diameter 16 inch (0,4064 m) dan tebal pipa 0,618 inch (0,0156 m), dengan hasil perhitungan yang lain juga dapat diperoleh hasil optimasi alternatif

material apabila material grade X 65 tidak ada di pasaran. Alternatif material pipa hasil optimasi lainnya diperoleh material grade X 60 dengan diameter 18 inch (0,4572 m) dan tebal pipa 0,665 inch (0,0169 m) tetapi biaya yang dikeluarkan juga akan meningkat sebesar \$ 623,78 per meter panjangnya.

4.2.4. Alasan Pemilihan Material X 65

Berdasarkan kendala-kendala yang telah disebutkan sebelumnya maka penulis memilih *grade* material X 65 dengan diameter 16 inch (0,4064 m) dan tebal pipa 0,618 inch (0,0156 m) karena relatif lebih kuat dan biaya yang dikeluarkan juga relatif tidak terlalu mahal seperti *grade* material X 60.

4.3. Uji Hasil Perancangan

Untuk memastikan hasil dari perancangan optimasi tebal pipa layak untuk digunakan, maka perlu dilakukan pengecekan terhadap tebal pipa hasil optimasi.

Pengecekan tersebut antara lain :

4.3.1. Uji Stabilitas :

- **Stabilitas Lateral**

Struktur pipa yang terletak di dasar laut akan mendapat pengaruh gaya-gaya hidrodinamis. Kestabilan struktur pipa ini sangat tergantung pada gaya-gaya yang bekerja pada pipa tersebut. Untuk itu diperlukan pengecekan berat minimum yang dibutuhkan pipa agar pipa dapat stabil meletak di dasar laut. Langkah dalam menghitung berat yang dibutuhkan pipa adalah sebagai berikut :

a. Penentuan Teori Gelombang

Dalam menentukan teori gelombang yang akan digunakan, dapat digunakan grafik validaitas gelombang seperti pada gambar . Grafik ini merupakan fungsi perbandingan d/gT^2 dan H/gT^2 .

Untuk mendapatkan teori gelombang dan perhitungan yang tepat pada setiap area peletakan pipa, maka penentuan teori gelombang ini dilakukan pada seiap kedalaman zona yang ditentukan.

Dari data lingkungan diketahui bahwa:

$$H_s = 3,5 \text{ m}$$

$$T_s = 7,6 \text{ dt}$$

$$g = 9,81 \text{ m/dt}^2$$

Dari data diatas kemudian kita cari H aktual untuk kemudian kita tentukan teori gelombang. Penghitungan H aktual sebagai berikut :

$$L_o = 1,56 \cdot T^2$$

$$= 90,1056 \text{ m}$$

$$d/L_o = 0,2219$$

Kemudian kita cari nilai d/L sesungguhnya dengan melihat tabel L-1 buku Teknik Pantai :

$$d/L = 0,2437$$

$$L = 82,0445 \text{ m}$$

Dengan $d/L = 0,24377$, maka kita cari H aktual sebagai berikut :

$$K_s = H/H_o = H/H_s = 0,924$$

$$H = 3,234 \text{ m}$$

Teori gelombang yang digunakan dalam perhitungan tugas akhir ini diberikan sebagai berikut :

Tabel 4.2 Teori Gelombang yang Digunakan Untuk Setiap Zona

| Daerah / Zona | | Kedalaman pipa (m) | Kedalaman peletakan (m) | gT^2 | H/gT^2 | d/gT^2 | Klasifikasi Gelombang |
|---------------|----------|--------------------|-------------------------|----------|----------|----------|-----------------------|
| Zona I | Zona I A | 0 - 5 m | 4 | 566,6256 | 0,0057 | 0,0071 | Cnoidal |
| | Zona I B | 5 - 10 m | 7,5 | 566,6256 | 0,0057 | 0,0132 | Cnoidal |
| Zona II | | 10 - 12 m | 11 | 566,6256 | 0,0057 | 0,0194 | Stokes orde 2 |
| Zona III | | 12 - 20 m | 16 | 566,6256 | 0,0057 | 0,0282 | Stokes orde 2 |
| Zona IV | | 20 - 15 m | 17,5 | 566,6256 | 0,0057 | 0,0309 | Stokes orde 2 |
| Zona V | | 15 - 20 m | 17,5 | 566,6256 | 0,0057 | 0,0309 | Stokes orde 2 |

a. Perhitungan Kecepatan dan Percepatan Partikel Air Karena Gelombang

Kecepatan efektif partikel air dihitung dengan menggunakan persamaan (2.29), dan hasil perhitungan diberikan pada Tabel 4.3

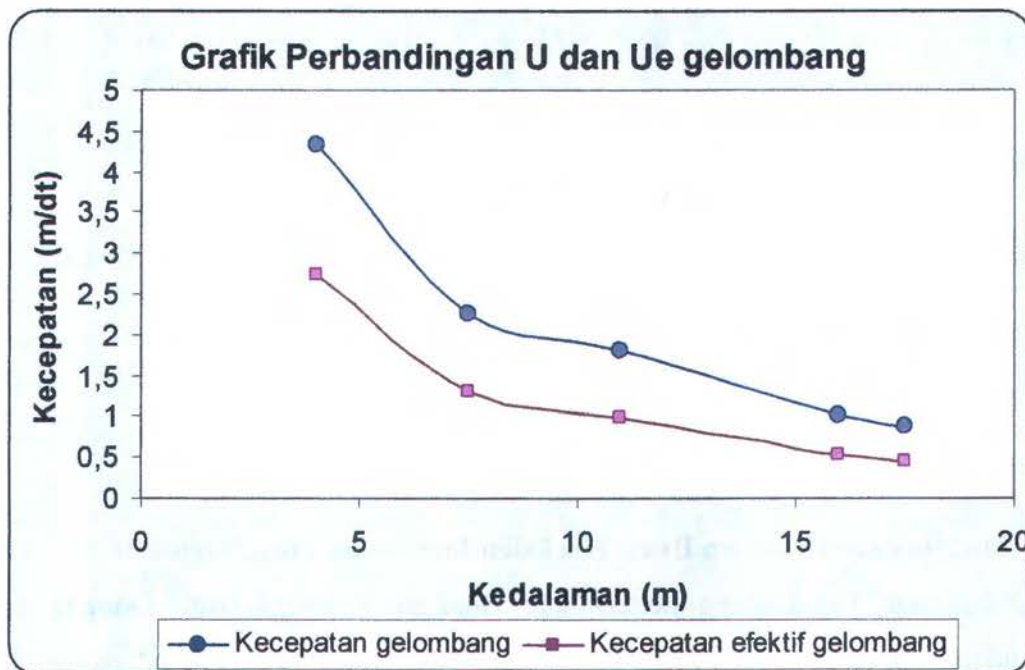
Kecepatan efektif partikel ini dihitung pada kondisi arah gelombang tegak lurus bentangan pipa dan pada saat sudut $(\theta) = 0^\circ$

Tabel 4.3 Kecepatan dan Percepatan Partikel Gelombang pada Setiap Zona

| Zona | d (m) | U (m/dt) | du/dt (m/dt ²) | U eff (m/dt) |
|----------|-------|----------|----------------------------|--------------|
| Zona I A | 4 | 4,324 | 0 | 2,7509 |
| Zona I B | 7,5 | 2,254 | 0 | 1,3114 |
| Zona II | 11 | 1,80 | 0 | 0,9942 |
| Zona III | 16 | 1,015 | 0 | 0,5245 |
| Zona IV | 17,5 | 0,884 | 0 | 0,4557 |
| Zona V | 17,5 | 0,884 | 0 | 0,4557 |

Dari Tabel 4.3 dapat kita lihat bahwa semakin dalam perairan maka kecepatan dan kecepatan efektif untuk gelombang yang terjadi akan semakin kecil. Untuk kedalaman 4 m didapatkan kecepatan sebesar 4,324 m/dt dan kecepatan efektif sebesar 2,75 m/dt, sedangkan untuk kedalaman 17,5 m didapatkan kecepatan sebesar 0,884 m/dt dan kecepatan efektif sebesar 0,4557 m/dt.

Dari Tabel 4.3 dapat kita buat suatu perbandingan antara kecepatan dan kecepatan efektif gelombang berdasar kedalaman (zona) :



Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Kecepatan dan Kecepatan Efektif Gelombang

b. Perhitungan Kecepatan Partikel Air Karena Arus

Tabel 4.4 Kecepatan Efektif Arus pada Setiap Zona

| Zona | d (m) | U eff arus (m/dt) |
|----------|-------|-------------------|
| Zona I A | 4 | 0,6997 |
| Zona I B | 7,5 | 0,6397 |
| Zona II | 11 | 0,6057 |
| Zona III | 16 | 0,5741 |
| Zona IV | 17,5 | 0,5668 |
| Zona V | 17,5 | 0,5668 |

Dari Tabel 4.4 dapat kita lihat bahwa semakin dalam perairan maka kecepatan efektif untuk arus yang terjadi akan semakin kecil. Untuk kedalaman 4 m didapatkan kecepatan efektif sebesar 0,6997 m/dt , sedangkan untuk kedalaman 17,5 m didapatkan kecepatan efektif sebesar 0,5668 m/dt.

c. Perhitungan Kecepatan Partikel Air Total

Kecepatan partikel air efektif total adalah gabungan kecepatan partikel air akibat gelombang dan arus (U_e gelombang dan U_e arus). Dimana dapat dituliskan sebagai berikut :

$$U_{e\ total} = U_{e\ gelombang} + U_{e\ arus}$$

Tabel 4.5 Kecepatan Efektif Total pada Setiap Zona

| Zona | d (m) | Ue total (m/dt) |
|----------|-------|-----------------|
| Zona I A | 4 | 3,451 |
| Zona I B | 7,5 | 1,951 |
| Zona II | 11 | 1,60 |
| Zona III | 16 | 1,104 |
| Zona IV | 17,5 | 1,022 |
| Zona V | 17,5 | 1,022 |

d. Perhitungan Koefisien Drag, Koefisien Inersia, dan Koefisien Lift

C_D , C_M , dan C_L dihitung berdasarkan Bilangan Reynold (Re). Dimana untuk mendapatkan bilangan Reynold (Re) didapatkan setelah kita mendapatkan hasil kecepatan efektif total yang terjadi.

Bilangan Reynold itu dihitung dengan rumus :

$$Re = \frac{Ue.D}{\nu}$$

dengan :

ν = viskositas kinematis fluida (untuk air laut , $\nu = 1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

Hasil perhitungan diberikan pada Tabel 4.6 yang disajikan sebagai berikut :

Tabel 4.6 Bilangan Reynold , C_D , C_M , dan C_L

| Zona | d (m) | Ue total (m/dt) | Re | C_D | C_L | C_M |
|----------|-------|-----------------|---------------------|-------|-------|-------|
| Zona I A | 4 | 3,451 | $9,32 \times 10^5$ | 0,7 | 0,7 | 1,5 |
| Zona I B | 7,5 | 1,951 | $4,44 \times 10^5$ | 0,7 | 0,7 | 1,61 |
| Zona II | 11 | 1,60 | $3,37 \times 10^5$ | 0,7 | 0,7 | 1,83 |
| Zona III | 16 | 1,104 | $1,793 \times 10^5$ | 0,932 | 0,841 | 2 |
| Zona IV | 17,5 | 1,022 | $1,543 \times 10^5$ | 1,02 | 0,891 | 2 |
| Zona V | 17,5 | 1,022 | $1,543 \times 10^5$ | 1,02 | 0,891 | 2 |

Dari Tabel 4.6 dapat kita lihat bahwa semakin dalam perairan maka harga Bilangan Reynold akan semakin kecil , tetapi untuk C_D , C_M , dan C_L akan semakin besar. Untuk kedalaman 4 m besarnya bilangan Reynold $9,32 \times 10^5$, C_D sebesar 0,7, C_L sebesar 0,7, dan C_M sebesar 1,5. Sedangkan untuk kedalaman 17,5 meter didapatkan besarnya bilangan Reynold $1,543 \times 10^5$, C_D sebesar 1,02, C_L sebesar 0,891 ,dan C_M sebesar 2 .

e. Perhitungan Berat Minimal Pipa

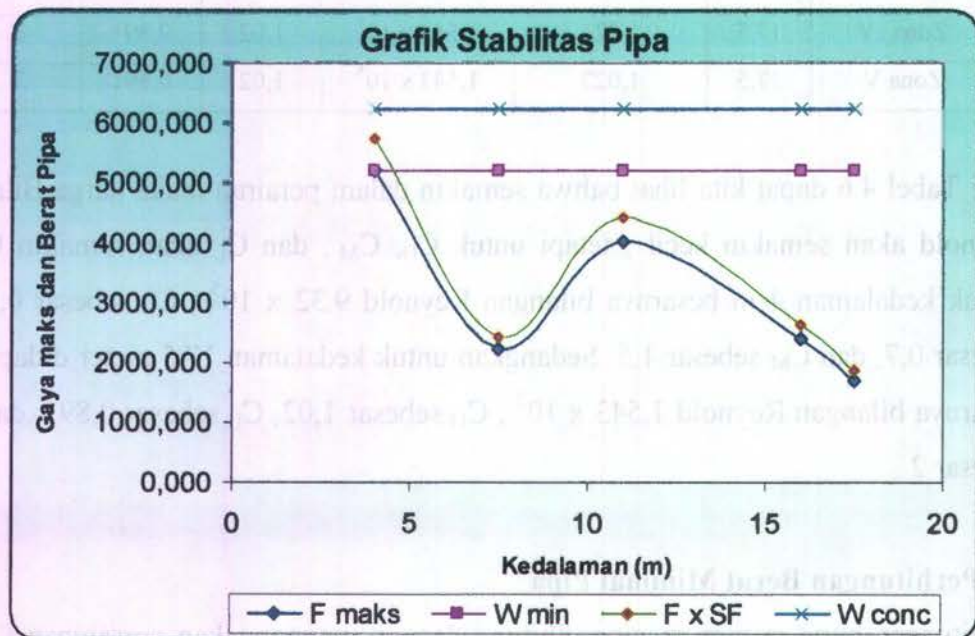
Perhitungan berat minimum pipa dihitung dengan menggunakan persamaan (2.29), dan hasil perhitungan diberikan pada Tabel 4.7

Berat pipa minimum ini dihitung dengan koefisien kekasaran tanah (μ) = 0,5 dengan kemiringan tanah 0° .

Tabel 4.7 Variasi Kedalaman dengan F Maksimum dan W pipa

| Zona | d (m) | F maks (N/m) | W pipa (N/m) |
|----------|-------|--------------|--------------|
| Zona I A | 4 | 5208,18 | 5214,67 |
| Zona I B | 7,5 | 2220,28 | 5214,67 |
| Zona II | 11 | 4033,73 | 5214,67 |
| Zona III | 16 | 2398,95 | 5214,67 |
| Zona IV | 17,5 | 1700,22 | 5214,67 |
| Zona V | 17,5 | 1700,22 | 5214,67 |

Dari Tabel 4.6 didapatkan bahwa gaya maksimum yang terjadi lebih kecil dari berat minimum pipa yang didesain. Maka dapat dikatakan pipa tersebut aman pada setiap zona kedalaman. Dapat kita lihat perbandingan berat minimum pipa dengan gaya maksimum yang terjadi sebagai berikut :



Gambar 4.4 Grafik Stabilitas Pipa

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa hasil optimasi ketebalan pipa bawah laut yang telah dilakukan di Lapangan Gas Ujung Pangkah, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil ketebalan pipa bawah laut yang optimum adalah 0,618 inch atau 15,6 mm dengan diameter luar sebesar 16 inch atau 0,4064 m dengan grade API 5L X 65. Biaya yang harus dikeluarkan sebesar \$ 470,81 per meter panjang pipa. Untuk alternatif grade material lain yang digunakan adalah grade API 5L X 60 dengan diameter 18 inch atau 0,4572 m dengan tebal pipa sebesar 0,665 inch atau 16,9 mm sedangkan biaya yang dikeluarkan sebesar \$ 623,78 per meter panjang pipa.
2. Hasil perhitungan berat pipa bawah laut yang telah dilakukan menunjukkan bahwa gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja pada semua zona kedalaman pipa besarnya lebih kecil dari berat pipa, sehingga pipa dalam kondisi stabil (tidak melayang dan terbenam). Meskipun tidak ditambahi lapisan pemberat (*concrete*) pipa sudah cukup aman untuk diletakkan pada dasar laut.

5.2. Saran

Dari hasil kesimpulan yang diperoleh maka saran yang dapat diberikan oleh penulis antara lain :

1. Perlu adanya faktor-faktor kendala tambahan pada persoalan optimasi seperti up heaval buckling .
2. Perlu adanya penelitian lebih lanjut jika pipa bawah laut ini diletakkan dibawah seabed (*buried*) dengan berbagai kendala seperti berat material timbunan.
3. Perlu adanya data pipa dan data lingkungan yang lengkap agar perhitungan dapat diarahkan dengan variasi kendala lainnya dan lebih akurat hasilnya.

DAFTAR PUSTAKA

- American Petroleum Institute.(2000). **API Spec 5L : Specification For Line Pipe 42nd Edition**. Washington.
- Arnold, K. (1998). **Surface Production Operations**. Gulf Publishing Company. Houston.
- Bai, Yong. (2001). **Pipeline and Riser**. Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 3.
- Chakrabarti, S. K. (1987). **Hydrodynamics of Offshore Structures**. Computational Mechanics Publications Southampton, Boston, USA.
- DNV .(2000). **Offshore Standard OS-F101 Submarine Pipelines Systems**. Det Norske Veritas, Norway.
- Geocean . (2004) . **Instalation Price on Subsea Pipeline** . Geocean .
- Germanischer Lloyd . (1995). **Hydrodynamics Force on Pipeline**. Germanischer Lloyd.
- Halliwell, R. (1986). **An Introduction of Offshore Pipelines**.University College . Cork.
- Indiyono, Paul. (2004). **Hidrodinamika I**. Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, ITS , Surabaya.
- Mouselli, AH. (1981). **Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods**. Pennwell Books, Oklahoma.
- Putra , A.H. (2000). **Studi Optimasi Pipa Penyalur Bawah Laut Pada Lapangan Produksi Pertamina Esso Natuna South China Sea** . Jurusan Teknik Kelautan, ITS, Surabaya.
- Popov, EP. (1996). **Mekanika Teknik**. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Rao,SS. (1984). **Optimization Theory and Application**. Willey Eastern Limited,2nd New Delhi, India.
- Rosyid, DM. (1999). **Optimasi, Teknik Pengambilan Keputusan Secara Kuantitatif**. Diktat Kuliah Optimasi Program Pendidikan Tinggi Teknik, Teknik Kelautan, ITS, Surabaya.
- Sarpkaya , T. (1981). **Mechanic of Wave Force on Offshore Structures**. Litton Educational Publishing, Inc. USA.

- Suhendro . (1990). **Optimasi Struktur** . IPTN, Bandung.
- Semedi , Dwi Wahyu. (2005). **Optimasi Pipa Bawah Laut Pada Lapangan Produksi Gas Tunu Kalimantan Timur**. Jurusan Teknik Kelautan, ITS, Surabaya.
- Thohiroh, L.H. (2005). **Perancangan Pipa Bawah Laut South Sumatera-West Java (SSWJ) Phase II**. Jurusan Teknik Kelautan, ITS, Surabaya.
- Trihatmojo, B. (1999). **Teknik Pantai**. Beta Offset, Yogyakarta.

Data Produksi

$$\begin{array}{ll} Q_g = & 100 \text{ MMscfd} & T = & 600 \text{ R} \\ P = & 9 \text{ Mpa} & Z = & 0,83 \\ & = 1310 \text{ Psia} & \rho_g = & 1,000 \text{ lb/ft}^3 \end{array}$$

Nilai Z didapatkan dari grafik.

$$V = \frac{60 Q_g T Z}{D^2 \cdot P} = \frac{2267,176}{D^2}$$

Kriteria menurut Arnold (1998):

$$V_{\max} = 60 \text{ ft/s}$$

$$V_{\min} = 10 \text{ s/d } 15 \text{ ft/s}$$

| V | D (inc) |
|----|---------|
| 10 | 15,06 |
| 15 | 12,29 |
| 60 | 6,15 |

Dibulatkan 16 inch

Validasi Material

$$t = 0,618 \text{ inch} \quad t/D = 0,038625$$

$$D = 16 \text{ inch}$$

$$S = \frac{3,05 t}{0,05 + 3t / D}$$

$$S = 11,36337604$$

Karena S bernilai antara 2,375 - 12,75 maka tergolong material dengan Grade X 42 ke atas di bawah X 80

Standard Test Pressure

$$P_h \leq \frac{2 \cdot SMYS \cdot t}{D} \cdot SF$$

$$t = 0,618 \text{ inch}$$

$$D = 16 \text{ inch}$$

$$SF = 0,85$$

$$P_h = 3.000 \text{ psi}$$

$$SMYS \geq 45.688,18 \text{ psi}$$

Nilai SMYS harus berada diatas 46 ksi artinya grade material diatas diatas X 46

$$e = 625000 \cdot \frac{A^{0,2}}{U^{0,9}}$$

$$A = 0,0192 \text{ m} \quad \text{atau} \quad 0,748 \text{ inch}$$

$$U / SMTS = 77000 \text{ psi}$$

$$e = 23,59492951$$

| A | U | e | Batas toleransi | Kondisi | Material |
|-------|-------|--------|-----------------|---------|----------|
| 0,748 | 60000 | 29,534 | 30 | ok | X 42 |
| 0,748 | 63000 | 28,265 | 28 | not ok | X 46 |
| 0,748 | 66000 | 27,106 | 27 | not ok | X 52 |
| 0,748 | 71000 | 25,382 | 25 | not ok | X 56 |
| 0,748 | 75000 | 24,160 | 24 | not ok | X 60 |
| 0,748 | 77000 | 23,595 | 24 | ok | X 65 |
| 0,748 | 82000 | 22,296 | 22 | not ok | X 70 |
| 0,748 | 90000 | 20,504 | 21 | ok | X 80 |

Material X 65

| description | data | |
|---------------------------|-------------------|-------------------|
| perkiraan panjang pipa | 39700 | m |
| diameter pipa | 0,4064 | m |
| umur desain pipa | 25 | tahun |
| pipe corrosion allowance | 0,01 | m |
| pipeline system rating | 600 # | ANSI |
| product | multiphase flow | |
| massa jenis product | 729 | kg/m ³ |
| tekanan pd saat operasi | 9000 | kPa |
| tekanan pd saat hidrotest | 12400 | kPa |
| suhu desain | 60 (max), 0 (min) | °C |

16 inchi = 0,4064 m
t = 0,0156 m

10 mm = 0,01 m

1 kPa = 100 kg/m²

1 Mpa = 100.000 kg/m²

448 MPa = 44.800.000 kg/m²

65000 psi

44.800.000,00

Tekanan internal = Tekanan pd saat operasi = 9.000 kPa
= 1.305 psi
= 900.000 kg/m²

311,0689 psi

$$Pe = \rho_w \cdot g \cdot \left(d_h + \frac{1}{2}H \right)$$

$\rho_w = 1,025 \text{ kg/m}^3$

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$d_h = 20 \text{ m}$

$H_{sig} = 3,5 \text{ m}$

$Pe = 218.701,688 \text{ kg/m} \cdot \text{s}^2$

$$p_d = \frac{2 \cdot S \cdot t}{D} \cdot F \cdot E \cdot T$$

SMYS = 44.800.000 kg/m²

t = 0,0156 m

D = 0,4064 m

F = 0,72

E = 1

T = 1

$p_d = 2.476.346,457 \text{ kg/m}^2$

2.476.346,457 ≥ 900.000

$$Pd \geq Pi$$

3.544,77 psi

$$Ppr \geq Pe$$

261.464,648 ≥ 218.701,688

$$P_{pr} = 1,15 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{t}{D-t} \right)^2$$

SMYS = 44.800.000 kg/m²

t = 0,0157 m

D = 0,4064 m

$(t/D-t)^2 = 0,001614777$

phi = 3,142857143

$P_{pr} = 261.464,648 \text{ kg/m}^2$

371,8901 psi

$$\sigma_h = (p_i - p_e) \frac{D}{2t}$$

Tegangan tangensial

$$\eta_h \cdot SMYS \cdot k_t$$

Pi = 900.000 kg/m²

681.298,31

Pe = 218.701,688 kg/m²

D = 0,4064 m

t = 0,0156 m

2t = 0,0312 m

$\eta_h = 0,72$

SMYS = 44.800.000

kt = 1

Hasil = 32.256.000

Tegangan = 8.874.347,250

$$\sigma_h \leq \eta_h \cdot SMYS \cdot k_t$$

8.874.347,250 ≤ 32.256.000

| Parameter | Value | Unit |
|-----------|---------------|---------|
| eb | 15 | (t/D)^2 |
| ebc | 15 | (t/D)^2 |
| Pe | 3.439.370,079 | SMYS |
| Pc | 548.628,652 | |
| Fx | | |
| Fxe | | |
| n | 1+300 | (t/D) |
| D | 0,4064 | m |
| t | 0,0157 | m |
| E | 2,07E+11 | N/m^2 |
| gamma y | 0,3 | |
| fo | 1,1 | |

$$\frac{1,3 \epsilon_b}{\epsilon_{bc}} + \frac{P}{P_c} + \left(\frac{F_x}{F_{xc}} \right)^n \leq 1$$

dimana :
 eb = bnding strain
 ebc = critical bending strain = $15(t/D)^2$
 Pe = eksternal overpresuure
 Pc = characterisc pressure yang menyebabkan hydrostatis collapse

$$\left(\left(\frac{P_c}{P_e} - 1 \right) \right) \left(\left(\frac{P_c}{P_y} \right)^2 - 1 \right) = 2 \cdot \frac{P_c}{P_y} \left(f_o \cdot \frac{D}{t} \right) \quad P_c = \frac{2 \cdot E}{(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{D} \right)^3$$

$$P_e = 2 \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{t}{D} \right)$$

Pe = 3.439.370,079
 SMYS = 44.800.000
 t = 0,0156
 D = 0,4064

Fx = local axial compressive force (=0 jika tenelle)
 Fxe = critical axial compressive force = phi . (D-t).t. gama y

n = 1+300.(t/D)

D = diameter luar
 t = tebal nominal
 E = modulus elastis
 gamma y = yield stress/SMYS
 fo = initial ovalisation of the pipe cross section

$$P_c \geq P_e$$

$$\frac{2E}{1 - \nu^2} \left(\frac{t}{D - t} \right)^3 \geq P_e$$

E = 2,07E+11 N/m^2
 v = 0,3
 t = 0,0157 m
 D = 0,4064 m
 (t/D-t)^3 = 1,20592E-05

Pc = 548.628,652 Pe = 218.701,688

$$P_c \geq P_e$$

548.628,652 ≥ 218.701,688

yu = 1,1 475.003,16
 ym = 1,05

$$\sigma_l \leq 0,6 .SMYS$$

$$\sigma_a + \frac{\Delta P . A_o}{A} + P_i \leq 0,6 .SMYS$$

| | | | | | | |
|------------|------|-------------|--------------|--------------|------|---------|
| σ_a | Pi = | 900.000 | $\Delta P =$ | 681.298,313 | Pi = | 900.000 |
| | Pe = | 218.701,688 | $A_o =$ | 0,129717115 | | |
| | OD = | 0,4064 | $A =$ | 0,019152657 | | |
| | ID = | 0,3752 | $\epsilon =$ | 4.614.297,24 | | |
| | t = | 0,0156 | | | | |

| | | | | |
|------------|---|-------------|--------------|------------|
| σ_a | = | 101,7280495 | 0,6 . SMYS = | 26.880.000 |
|------------|---|-------------|--------------|------------|

| | | | | |
|------------|---|--------------|--|--|
| σ_l | = | 5.514.398,97 | | |
|------------|---|--------------|--|--|

$$\sigma_l \leq 0,6 .SMYS$$

| | | |
|--------------|---|------------|
| 5.514.398,97 | ≤ | 26.880.000 |
|--------------|---|------------|

$$\sigma_{ec} \leq \eta e .SMYS$$

$$\sigma_{ec} \leq 0,9 .SMYS$$

$$\sqrt{(\sigma_l + \sigma_h - \sigma_h . \sigma_l + 3\sigma_a)} \leq 0,9 .SMYS$$

| | | | |
|------------|--------------|-----------------------|------------|
| σ_l | 5.514.398,97 | $\sigma_h . \sigma_l$ | 4,8937E+13 |
|------------|--------------|-----------------------|------------|

| | | | |
|------------|---------------|-------------|------------|
| σ_h | 8.874.347,250 | 0,9 .SMYS = | 40.320.000 |
|------------|---------------|-------------|------------|

| | |
|------------|-------------|
| σ_a | 101,7280495 |
|------------|-------------|

| | |
|---------------|--------------|
| σ_{ec} | 7.760.537,60 |
|---------------|--------------|

| |
|------------------------------|
| $\sigma_{ec} \leq 0,9 .SMYS$ |
|------------------------------|

| | | |
|-----------|---|------------|
| 7.760.538 | ≤ | 40.320.000 |
|-----------|---|------------|

| description | data | |
|----------------------------|-------------------|-------------------|
| perkiraan panjang pipa | 39700 | m |
| diameter pipa | 0,4572 | m |
| umur desain pipa | 25 | tahun |
| pipe corrosion allowance | 0,01 | m |
| pipeline system rating | 600 # | ANSI |
| product | multiphase flow | |
| massa jenis product | 729 | kg/m ³ |
| tekanan pd saat operasi | 9000 | kPa |
| tekanan pd saat hidrottest | 12400 | kPa |
| suhu desain | 60 (max), 0 (min) | °C |

$$P_e = \rho_w \cdot g \cdot \left(d_h + \frac{1}{2} H \right)$$

$$\rho_w = 1.025 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$d_h = 20 \text{ m}$$

$$H_{sig} = 3,5 \text{ m}$$

$$P_e = 218.701,688 \text{ kg/m} \cdot \text{s}^2 \quad 311,0689 \text{ psi}$$

$$P_d = \frac{2 \cdot S \cdot t}{D} \cdot F \cdot E \cdot T$$

$$SMYS = 41.300.000 \text{ kg/m}^2$$

$$t = 0,0169 \text{ m}$$

$$D = 0,4572 \text{ m}$$

$$F = 0,72$$

$$E = 1$$

$$T = 1$$

$$P_d = 2.198.330,709 \text{ kg/m}^2 \quad 3.517,61 \text{ psi}$$

$$P_{pr} = 1,15 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{t}{D-t} \right)^2$$

$$SMYS = 41.300.000 \text{ kg/m}^2$$

$$t = 0,0169 \text{ m}$$

$$D = 0,4572 \text{ m}$$

$$P_{pr} = 218.911,819 \text{ kg/m}^2 \quad 312,7881 \text{ psi}$$

$$\sigma_h = (p_i - p_e) \frac{D}{2t}$$

$$P_i = 900.000 \text{ kg/m}^2$$

$$P_e = 218.701,688 \text{ kg/m}^2$$

$$D = 0,4572 \text{ m}$$

$$t = 0,0169 \text{ m}$$

$$\text{Tegangan} = 9.215.668,298$$

Tegangan tangensial

$$(\nu D - t)^2 = 0,001473249$$

$$\phi = 3,142857143$$

$$2t = 0,0338 \text{ m}$$

$$\sigma_h \leq \eta_h \cdot SMYS \cdot k_t$$

$$9.215.668,298 \leq 29.736.000$$

$$\frac{1,3 \epsilon_b}{\epsilon_{bc}} + \frac{P}{P_c} + \left(\frac{F_x}{F_{xc}} \right)^n \leq 1$$

dimana :

eb = bending strain

ebc = critical bending strain =

$$15(\nu D)^2$$

Pe = eksternal overpressure

Pc = characteristic pressure yang menyebabkan hydrostatik collapse

$$\left(\left(\frac{P_c}{P_e} - 1 \right) \right) \left(\left(\frac{P_c}{P_y} \right)^2 - 1 \right) = 2 \cdot \frac{P_c}{P_y} \left(f_0 \frac{D}{t} \right) \quad P_c = \frac{2 \cdot E}{(1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{D} \right)^3$$

$$P_e = 2 \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{t}{D} \right)$$

$$P_e = 3.053.237,095$$

$$SMYS = 41.300.000$$

$$t = 0,0169$$

$$D = 0,4572$$

Fx = local axial compressive force (=0 jika tensile)

Fxe = critical axial compressive force = phi . (D-t).t. gama y

n = 1+300.(t/D)

D = diameter luar

t = tebal nominal

E = modulus elastis

gamma y = yield stress/SMYS

fo = initial ovalisation of the pipe cross section

Material X 60

$$18 \text{ inchi} = 0,4572 \text{ m}$$

$$t = 0,0169 \text{ m}$$

$$10 \text{ mm} = 0,01 \text{ m}$$

$$1 \text{ kPa} = 100 \text{ kg/m}^2$$

$$1 \text{ Mpa} = 100.000 \text{ kg/m}^2$$

$$413 \text{ MPa} = 41.300.000 \text{ kg/m}^2$$

$$60000 \text{ psi}$$

$$41.300.000,00$$

Tekanan internal = Tekanan pd saat operasi =

$$9.000 \text{ kPa}$$

$$1.305 \text{ psi}$$

$$900.000 \text{ kg/m}^2$$

$$P_d \geq P_i$$

$$2.198.330,709 \geq 900.000$$

$$P_{pr} \geq P_e$$

$$219.911,819 \geq 218.701,688$$

$$\eta_h \cdot SMYS \cdot k_t$$

$$\eta_h = 0,72$$

$$SMYS = 41.300.000$$

$$k_t = 1$$

$$\text{Hasil} = 29.736.000$$

$$P_c \geq P_e$$

$$\frac{2E}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{t}{D-t} \right)^3 \geq P_e$$

| | | | |
|------------------|---------------------------|------------------------|--------------------|
| E = | 2,07E+11 N/m ² | (t/D-t) ³ = | 8,0772E-06 |
| ν = | 0,3 | | |
| t = | 0,0169 m | | |
| D = | 0,4572 m | | |
| P _c = | 387.488,329 | P _e = | 218.701,688 |

$$P_c \geq P_e$$

$$387.488,329 \geq 218.701,688$$

| | | |
|------|------|------------|
| yu = | 1,1 | 318.154,40 |
| ym = | 1,05 | |

$$\sigma_i \leq 0,6 \cdot SMYS$$

$$\sigma_a + \frac{\Delta P \cdot A_o}{A} + P_i \leq 0,6 \cdot SMYS$$

| | | | | | | |
|------------|------|-------------|------|--------------|------|---------|
| σ_a | Pi = | 900.000 | ΔP = | 681.298,313 | Pi = | 900.000 |
| | Pe = | 218.701,688 | Ao = | 0,164173223 | | |
| | OD = | 0,4572 | A = | 0,023376811 | | |
| | ID = | 0,4234 | | | | |
| | t = | 0,0169 | ε = | 4.784.896,28 | | |

| | | | | |
|------------|---|-------------|--------------|------------|
| σ_a | = | 134,5113899 | 0,6 · SMYS = | 24.780.000 |
|------------|---|-------------|--------------|------------|

| | | | | |
|------------|---|--------------|--|--|
| σ_i | = | 5.684.830,79 | | |
|------------|---|--------------|--|--|

$$\sigma_i \leq 0,6 \cdot SMYS$$

$$5.684.830,79 \leq 24.780.000$$

$$\sigma_{ec} \leq \eta_e \cdot SMYS$$

$$\sigma_{ec} \leq 0,9 \cdot SMYS$$

$$\sqrt{(\sigma_i + \sigma_h - \sigma_h \cdot \sigma_i + 3\sigma_a)} \leq 0,9 \cdot SMYS$$

| | | | |
|------------|--------------|---------------------------|-------------|
| σ_i | 5.684.830,79 | $\sigma_h \cdot \sigma_i$ | 5,23895E+13 |
|------------|--------------|---------------------------|-------------|

| | | | |
|------------|---------------|--------------|------------|
| σ_h | 9.215.688,298 | 0,9 · SMYS = | 37.170.000 |
|------------|---------------|--------------|------------|

| | | | |
|------------|-------------|--|--|
| σ_a | 134,5113899 | | |
|------------|-------------|--|--|

| | | | |
|---------------|--------------|--|--|
| σ_{ec} | 8.053.342,70 | | |
|---------------|--------------|--|--|

$$\sigma_{ec} \leq 0,9 \cdot SMYS$$

$$8.053.343 \leq 37.170.000$$

| description | data | |
|----------------------------|-------------------|-------------------|
| perkiraan panjang pipa | 39700 | m |
| diameter pipa | 0,508 | m |
| umur desain pipa | 25 | tahun |
| pipe corrosion allowance | 0,01 | m |
| pipeline system rating | 600 # | ANSI |
| product | multiphase flow | |
| massa jenis product | 729 | kg/m ³ |
| tekanan pd saat operasi | 9000 | kPa |
| tekanan pd saat hidrottest | 12400 | kPa |
| suhu desain | 60 (max), 0 (min) | °C |

Material X 56

| | | |
|------------|---------------|-------------------|
| 20 inchi = | 0,508 | m |
| t = | 0,01799 | m |
| 10 mm = | 0,01 | m |
| 1 kPa = | 100 | kg/m ² |
| 1 Mpa = | 100.000 | kg/m ² |
| 386 MPa = | 38.600.000 | kg/m ² |
| | 58000 | psi |
| | 38.800.000,00 | |

$$Pe = \rho_w \cdot g \cdot \left(d_h + \frac{1}{2}H \right)$$

| | | |
|---------|-------------|---------------------|
| Pw = | 1.025 | kg/m ³ |
| g = | 9,81 | m/s ² |
| dh = | 20 | m |
| H sig = | 3,5 | m |
| Pe = | 218.701,888 | kg/m.s ² |

311,0669 psi

Tekanan internal = Tekanan pd saat operasi = **9.000 kPa**
1.305 psi
900.000 kg/m²

$$Pd = \frac{2 \cdot S \cdot t}{D} \cdot F \cdot E \cdot T$$

| | | |
|--------|------------|-------------------|
| SMYS = | 38.600.000 | kg/m ² |
| t = | 0,0180 | m |
| D = | 0,5080 | m |
| F = | 0,72 | |
| E = | 1 | |
| T = | 1 | |

$$Pd \geq Pi$$

1.988.417,638 \geq **900.000**

Pd = **1.988.417,638** kg/m²

3.617,61 psi

$$Ppr = 1,15 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{t}{D-t} \right)^2$$

$(D-t)^2 =$ **0,001347884**

$$Ppr \geq Pe$$

188.045,189 \geq **218.701,888**

| | | |
|--------|------------|-------------------|
| SMYS = | 38.600.000 | kg/m ² |
| t = | 0,0180 | m |
| D = | 0,508 | m |

Tidak Memenuhi Persamaan

phi = **3,142857143**

Ppr = **188.045,189** kg/m²

312,7881 psi

$$\sigma_h = (p_i - p_e) \frac{D}{2t}$$

Tegangan tangensial

$$\eta_h \cdot SMYS \cdot k_t$$

$\eta_h =$ **0,72**

| | | |
|------|-------------|-------------------|
| Pi = | 900.000 | kg/m ² |
| Pe = | 218.701,888 | kg/m ² |
| D = | 0,508 | m |
| t = | 0,01799 | m |

681.298,31

SMYS = **38.600.000**

kt = **1**

2t = **0,03598** m

Hasil = **27.792.000**

Tegangan = **9.619.220,199**

$$\sigma_h \leq \eta_h \cdot SMYS \cdot k_t$$

9.619.220,199 \leq **27.792.000**

$$\frac{1,3 \delta_b}{\delta_{bc}} + \frac{P}{P_c} + \left(\frac{F_x}{F_{xc}} \right)^n \leq 1$$

dimana :
 eb = bnding strain
 ebc = critical bending strain = $15(t/D)^2$
 Pe = eksternal overpresuure
 Pc = characteristic pressure yang menyebabkan hydrostatik collapse

$$\left(\frac{P_x}{P_c} - 1 \right) \left(\frac{P_y}{P_c} - 1 \right) = 2 \frac{P_c}{P_y} \left(\frac{f_o D}{t} \right) \quad P_c = \frac{2 \cdot E}{(1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{D} \right)^3$$

$$Pe = 2 \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{t}{D} \right)$$

| | |
|------|---------------|
| Pe | 2.733.913,386 |
| SMYS | 38.600.000 |
| t | 0,01799 |
| D = | 0,508 |

Fx = local axial compressive force (=0 jika tensile)
 Fxc = critical axial compressive force = phi . (D-t).t . gamma y
 n = $1+300 \cdot (t/D)$
 D = diameter luar
 t = tebal nominal
 E = modulus elastis
 gamma y = yield stress/SMYS
 fo = initial ovalisation of the pipe cross section

$$P_c \geq P_e$$

$$\frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{D-t} \right)^3 \geq P_e$$

| | | | |
|------------------|---------------------------|----------------------|-------------|
| E = | 2,07E+11 N/m ² | (D-t) ³ = | 5,28929E-06 |
| ν = | 0,3 | | |
| t = | 0,01799 m | | |
| D = | 0,508 m | | |
| P _c = | 240.633,789 | P _e = | 218.701,688 |

$$P_c \geq P_e$$

$$240.633,789 \geq 218.701,688$$

| | | |
|------------------|------|------------|
| γ _u = | 1,1 | 208.340,94 |
| γ _m = | 1,05 | |

$$\sigma_l \leq 0,6 \cdot SMYS$$

$$\sigma_a + \frac{\Delta P \cdot A_o}{A} + P_i \leq 0,6 \cdot SMYS$$

| | | | | | | |
|------------|------------------|-------------|------------------|--------------|------------------|---------|
| σ_a | P _i = | 900.000 | ΔP = | 681.298,313 | P _i = | 900.000 |
| | P _e = | 218.701,688 | A _o = | 0,202682992 | | |
| | OD = | 0,508 | A = | 0,027694019 | | |
| | ID = | 0,47202 | z = | 4.986.187,90 | | |
| | t = | 0,01799 | | | | |

| | | | | |
|------------|---|-------------|------------------|------------|
| σ_a | = | 169,6306145 | 0,6 \cdot SMYS = | 23.160.000 |
|------------|---|-------------|------------------|------------|

| | | |
|------------|---|--------------|
| σ_l | = | 5.886.357,53 |
|------------|---|--------------|

$$\sigma_l \leq 0,6 \cdot SMYS$$

$$5.886.357,53 \leq 23.160.000$$

$$\sigma_{ec} \leq \eta_e \cdot SMYS$$

$$\sigma_{ec} \leq 0,9 \cdot SMYS$$

$$\sqrt{(\sigma_l + \sigma_h - \sigma_h \cdot \sigma_l + 3\sigma_a)} \leq 0,9 \cdot SMYS$$

| | | | |
|------------|--------------|---------------------------|-------------|
| σ_l | 5.886.357,53 | $\sigma_h \cdot \sigma_l$ | 5,66222E+13 |
|------------|--------------|---------------------------|-------------|

| | | | |
|------------|---------------|------------------|------------|
| σ_h | 9.619.220,199 | 0,9 \cdot SMYS = | 34.740.000 |
|------------|---------------|------------------|------------|

| | |
|------------|-------------|
| σ_a | 169,6306145 |
|------------|-------------|

| | |
|---------------|--------------|
| σ_{ec} | 8.399.787,69 |
|---------------|--------------|

$$\sigma_{ec} \leq 0,9 \cdot SMYS$$

$$8.399.788 \leq 34.740.000$$

Matriks Optimasi

Min

t =

0,015574584 m

| Constraint | t^ | | | | | | sum | neq | rhs |
|------------|----|--------------|--------------|-------------|-------------|----------------|-----|-----|---------------|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | | | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 65.692.143,79 | ??? | >= | 37.297,28 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -33.191.204,61 | ??? | <= | -121.613,29 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,71198E+11 | 0 | ??? | >= | 65.783.918,59 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 99.328.496,11 | ??? | >= | 1.470.402,15 |
| 3 | 0 | -21905766665 | -17802816569 | -3616776465 | 1323264,467 | 486.333,47 | ??? | <= | 0,00 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 492.400.000,00 | ??? | <= | 40.320.000,00 |

| Constraint | t^ | | | | | | sum | neq | rhs |
|------------|----|--------|-----------|------------|---------------|--------------|---------------|-----|---------------|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | | | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.023.127,84 | 1.023.127,84 | >= | 37.297,28 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -516.939,22 | -516.939,22 | <= | -121.613,29 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 65.783.918,59 | 0,00 | 65.783.918,59 | >= | 65.783.918,59 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.547.000,05 | 1.547.000,05 | >= | 1.470.402,15 |
| 3 | 0 | -20,07 | -1.047,50 | -13.663,79 | 320,98 | 7.574,44 | -6.835,94 | <= | 0,00 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7.668.925,39 | 7.668.925,39 | <= | 40.320.000,00 |

$$t = 0,618$$

| | | | | | | |
|---------|----------|----------|----------|---------|-------|---------|
| 3501 | t^3 | -6463,7 | t^2 | 4317,2 | t | -554,58 |
| 3501,25 | 0,236029 | -6463,68 | 0,381924 | 4317,02 | 0,618 | -554,58 |

t coba 471,1005

| | | | | | | |
|---------|----------|----------|----------|---------|-------|----------|
| 3500,01 | t^3 | -6461,76 | t^2 | 4315,47 | t | -554,355 |
| 3500,01 | 0,236029 | -6461,76 | 0,381924 | 4315,47 | 0,618 | -554,355 |

t final 470,8082

| i | t | price | selisih 1 | selisih 2 | selisih 3 |
|----------------|-----|-------|-----------|-----------|-----------|
| X ₀ | 0,2 | 78 | 285 | -183 | 172 |
| X ₁ | 0,4 | 363 | 102 | -11 | |
| X ₂ | 0,6 | 465 | 91 | | |
| X ₃ | 0,8 | 556 | | | |

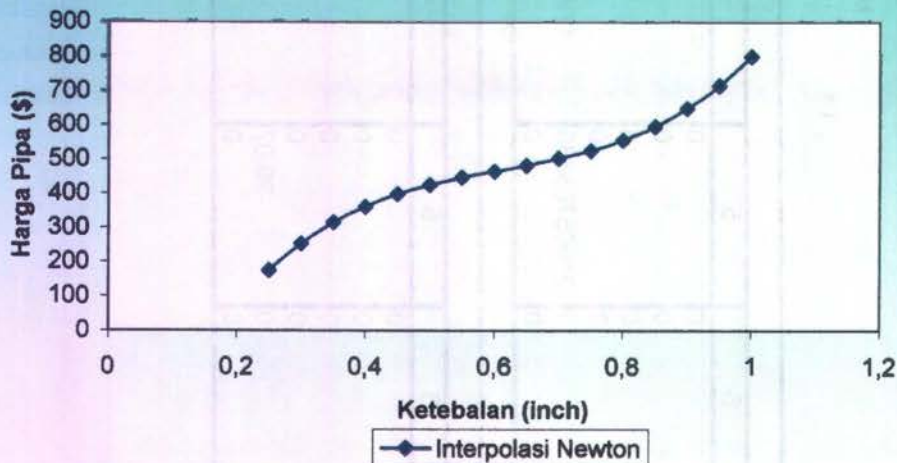
| Tebal | Harga (\$) |
|-------|------------|
| 0,2 | 78 |
| 0,25 | 175 |
| 0,3 | 253 |
| 0,35 | 315 |
| 0,4 | 362 |
| 0,45 | 399 |
| 0,5 | 425 |
| 0,55 | 447 |
| 0,6 | 465 |
| 0,65 | 482 |
| 0,7 | 502 |
| 0,75 | 525 |
| 0,8 | 556 |
| 0,85 | 595 |
| 0,9 | 648 |
| 0,95 | 716 |
| 1 | 800 |

Untuk I
1425
510
455

Untuk II
-2287,5
-137,5

Untuk III
3583,333

Grafik Perbandingan Tebal dan Harga Pipa



Wave Data

| Description | 1 - year wave | 100 - year wave |
|-------------|---------------|-----------------|
| H sig (m) | 2,3 | 3,5 |
| H max (m) | 4,3 | 6,5 |
| Tz (s) | 4,9 | 6,2 |
| Tp (s) | 6,2 | 8,1 |
| Ts (s) | 6 | 7,6 |

Perhitungan data untuk 100 tahunan :

$$\begin{aligned} H_s &= 3,5 \text{ m} \\ T_s &= 7,6 \text{ detik} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_o &= 1,56 \cdot T^2 \\ L_o &= 90,1056 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d &= 20 \text{ m} \\ d/L_o &= 0,221961787 \end{aligned}$$

Untuk nilai ini maka kita lihat Tabel L-1 buku Teknik Pantai :

$$\begin{aligned} d/L_o &= 0,221961787 \\ \text{maka :} \\ d/L &= 0,24257 \\ L &= 82,45042668 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Jadi panjang gelombang } (\lambda) = 82,45043 \text{ m}$$

Dengan $d/L = 0,24377$, maka kita cari harga H sebenarnya :

$$\begin{aligned} K_s = H/H_o = H/H_s &= 0,9237 \\ H &= 3,23295 \text{ m} \end{aligned}$$

Klasifikasi Gelombang :

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\begin{aligned} gT^2 &= 566,6256 \\ H/gT^2 &= 0,005705619 \\ d/gT^2 &= 0,035296676 \end{aligned}$$

Wave Data

| Description | 1 - year wave | 100 - year wave |
|-------------|---------------|-----------------|
| H sig (m) | 2,3 | 3,5 |
| H max (m) | 4,3 | 6,5 |
| Tz (s) | 4,9 | 6,2 |
| Tp (s) | 6,2 | 8,1 |
| Ts (s) | 6 | 7,6 |

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$d = 20 \text{ m}$

$T = 7,6 \text{ s}$

$H \text{ sig} = 3,5 \text{ m}$

$L = 82,45042668 \text{ m}$

$H \text{ aktual} = 3,23295 \text{ m}$

| Daerah / Zona | | Kedalaman pipa (m) | Kedalaman peletakan (m) | gT^2 | H/gT^2 | d/gT^2 | Klasifikasi Gelombang |
|---------------|----------|--------------------|-------------------------|----------|----------|----------|-----------------------|
| Zona I | Zona I A | 0 - 5 m | 4 | 566,6256 | 0,0057 | 0,0071 | Cnoidal |
| | Zona I B | 5 - 10 m | 7,5 | 566,6256 | 0,0057 | 0,0132 | Cnoidal |
| Zona II | | 10 - 12 m | 11 | 566,6256 | 0,0057 | 0,0194 | Stokes orde 2 |
| Zona III | | 12 - 20 m | 16 | 566,6256 | 0,0057 | 0,0282 | Stokes orde 2 |
| Zona IV | | 20 - 15 m | 17,5 | 566,6256 | 0,0057 | 0,0309 | Stokes orde 2 |
| Zona V | | 15 - 20 m | 17,5 | 566,6256 | 0,0057 | 0,0309 | Stokes orde 2 |

**Perhitungan Teori Gelombang Cnoidal Zona 1 A:
Diketahui :**

$H = 3,233 \text{ m}$
 $d = 4,00 \text{ m}$
 $T = 7,60 \text{ dt}$
 $g = 9,81 \text{ m/dt}^2$
 $d^3 = 64$
 $g/d = 2,4525$

Menghitung :

$H/d = 0,808238$ dibulatkan menjadi $0,78$

$T\sqrt{g/d} = 11,90195$

Berdasar gambar grafik yang ada maka kita hitung nilai k^2 :

$k^2 = 1 - 10^{-3}$

Untuk nilai $k^2 = 1 - 10^{-3}$ didapat :

$L^2 H / d^3 = 150$ maka $L = 54,49242$

$d/L = 0,073405$ memenuhi $d/L < 0,125$

Parameter Ursell :

$L^2 H / d^3 = 150$ memenuhi > 26

$C = L/T = 7,170056$

Dari data diatas kita cari kecepatan gelombang :

$g = 9,81 \text{ m/dt}^2$
 $H = 3,233 \text{ m}$
 $T = 7,60 \text{ dt}$
 $d = 4,00 \text{ m}$
 $s = 0,4064 \text{ m}$
 $1 - k^2 = 0,001$
 $C = H/d = 0,808238$
 $\gamma (\text{gamma}) = 0,2$
 $k = 0,9995$

$k'^2 = 1 - k^2 = 0,001$

$h_1 = 0,1992$

$h_2 = -0,04965$

$f_1 / 12 k^4 = 0,761191$ $12 k^4 = 11,97601$

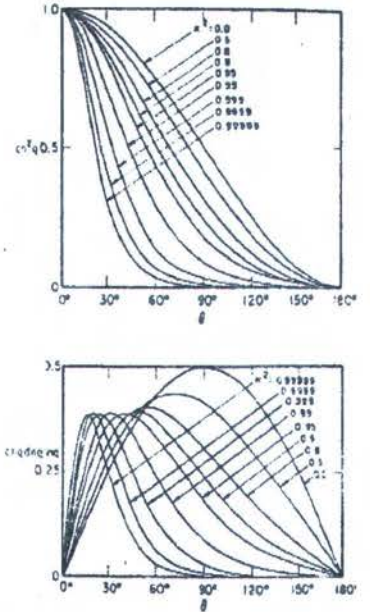
$f_1 = 0,06356$

$f_2 / 4 k^2 = 1,393$ $4 k^2 = 3,996$

$f_2 = 0,348599$

$f_4 / 8 k^2 = 1,785$ $8 k^2 = 7,992$

$f_4 = 0,223348$



Gambar 2. 8 Variasi $cn^2 q$ dan $cn^2 q d n s n q$ dengan sudut fase untul (Sarpkaya, 1981).

$1 = 0,001$
 $k^2 = 0,999$ dibulatkan $0,999$
 $k = 0,9995$
 $k'^2 = 0,001$

| Zona | H (m) | T (dt) | L (m) | ε | d (m) | s (m) | k ² | γ (gamma) | Harga cn ² q untuk berbagai sudut | | | | | | | |
|------|-------|--------|----------|----------|-------|--------|----------------|-----------|----------------------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|
| | | | | | | | | | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° |
| 1A | 3,233 | 7,60 | 54,49242 | 0,808238 | 4,00 | 0,4064 | 0,999 | 0,2 | 1 | 0,3 | 0,03 | 0 | 0 | 0 | 0,03 | 0,3 |

| Zona | √gd | f ₁ | f ₂ | h ₁ | h ₂ | Harga U untuk berbagai sudut | | | | | | | |
|------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------|---------|------------|-------|----------|----------|----------|----------|
| | | | | | | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° |
| 1A | 6,2642 | 0,0636 | 0,3486 | 0,1992 | -0,04965 | 4,323655 | 0,34578 | -0,8468906 | -0,97 | -0,96767 | -0,96767 | -0,84689 | 0,345776 |

untuk zona 1 A :

dimana :

$$\begin{aligned}
 Y &= 4,00 \text{ m} \\
 Y_0 &= 0,4064 \text{ m} \\
 D &= 0,4064 \text{ m} \\
 \nu &= 1,20\text{E-}06
 \end{aligned}$$

$$U_0 = \frac{U}{\left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{1/4}}$$

$$R_e = \frac{U_e D}{\nu}$$

$$U_e = 0.778 \times U_0^2 \left(\frac{D}{y_0}\right)^{0.286}$$

perhitungan kecepatan efektif untuk zona 1 A :

| X | U | U ₀ | U _e | Re | Cd | Cl | Cm |
|------|---------|----------------|----------------|----------|-------|-------|------|
| 0° | 4,3237 | 3,1187 | 2,7509 | 9,32E+05 | 0,7 | 0,7 | 1,5 |
| 45° | 0,3458 | 0,2494 | 0,2200 | 7,45E+04 | 1,2 | 1 | 2 |
| 90° | -0,8469 | -0,6109 | 0,5388 | 1,82E+05 | 0,922 | 0,835 | 2 |
| 135° | -0,9677 | -0,6980 | 0,6157 | 2,09E+05 | 0,835 | 0,783 | 2 |
| 180° | -0,9677 | -0,6980 | 0,6157 | 2,09E+05 | 0,835 | 0,783 | 2 |
| 225° | -0,9677 | -0,6980 | 0,6157 | 2,09E+05 | 0,835 | 0,783 | 2 |
| 270° | -0,8469 | -0,6109 | 0,5388 | 1,82E+05 | 0,75 | 0,732 | 2 |
| 315° | 0,3458 | 0,2494 | 0,2200 | 7,45E+04 | 0,7 | 0,7 | 1,62 |

Perhitungan Percepatan Teori Gelombang Cnoidal Zona 1A:
Diketahui :

$H = 3,233 \text{ m}$
 $d = 4,00 \text{ m}$
 $T = 7,60 \text{ dt}$
 $g = 9,81 \text{ m/dt}^2$
 $d^3 = 64$
 $g/d = 2,4525$

Menghitung :

$H/d = 0,808238$ dibulatkan menjadi $0,78$
 $T\sqrt{g/d} = 11,90195$

Berdasar gambar grafik yang ada maka kita hitung nilai k^2 :

$k^2 = 1 - 10^{-3}$

Untuk nilai $k^2 = 1 - 10^{-3}$ didapat :

$L^2 H / d^3 = 150$ maka $L = 54,49242$

$d/L = 0,073405$ memenuhi $d/L < 0,125$

Parameter Ursell :

$L^2 H / d^3 = 150$ memenuhi > 26

$C = L/T = 7,170056$

Dari data diatas kita cari kecepatan gelombang :

$g = 9,81 \text{ m/dt}^2$
 $H = 3,233 \text{ m}$
 $T = 7,60 \text{ dt}$
 $d = 4,00 \text{ m}$
 $s = 0,4064 \text{ m}$
 $1 - k^2 = 0,001$
 $\epsilon = H/d = 0,808238$
 $\gamma (\text{gamma}) = 0,2$
 $k = 0,9995$

$k'^2 = 1 - k^2 = 0,001$

$h_1 = 0,1992$

$h_2 = -0,049649$

$f_1 / 12 k^4 = 0,761191$ $12 k^4 = 11,976012$

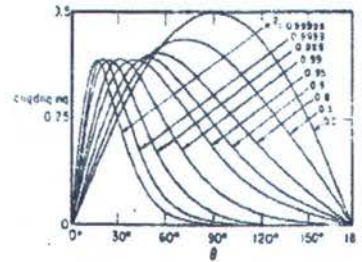
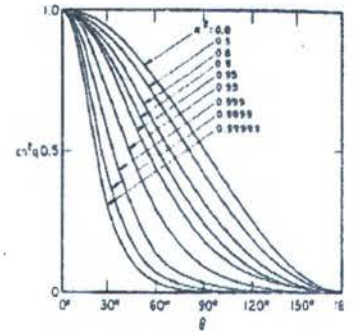
$f_1 = 0,06356$

$f_2 / 4 k^2 = 1,393$ $4 k^2 = 3,996$

$f_2 = 0,348599$

$f_4 / 8 k^2 = 1,785$ $8 k^2 = 7,992$

$f_4 = 0,223348$



Gambar 2. 8 Variasi $cn^2 q$ dan $cn^2 q$ dengan sudut fase unti (Sarpkaya, 1981).

$1 = 0,001$
 $k^2 = 0,999$ dibulatkan $0,999$
 $k = 0,9995$
 $k'^2 = 0,001$

| Zona | H (m) | T (dt) | L (m) | ε | d (m) | s (m) | k ² | γ (gamma) | Harga cnqdnqsnq untuk berbagai sudut | | | | | | | |
|------|-------|--------|----------|-----------|-------|--------|----------------|-----------|--------------------------------------|------|-------|------|------|------|--------|-------|
| | | | | | | | | | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° |
| 1A | 3,233 | 7,60 | 54,49242 | 0,8082375 | 4,00 | 0,4064 | 0,999 | 0,2 | 0 | 0,25 | 0,025 | 0 | 0 | 0 | -0,025 | -0,25 |

| Zona | √gd | f ₁ | f ₂ | h ₁ | h ₂ | Harga a x untuk berbagai sudut | | | | | | | |
|------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------------|-----------|------------|------|------|------|----------|----------|
| | | | | | | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° |
| 1A | 6,2642 | 0,0636 | 0,3486 | 0,1992 | -0,049649 | 0 | -1,549878 | -0,0233373 | 0 | 0 | 0 | 0,023337 | 1,549878 |

untuk zona 1 A :

dimana :

Y = 4,00 m
 Y₀ = 0,4064 m
 D = 0,4064 m
 v = 1,20E-06

$$U_0 = \frac{U}{\left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{1/4}}$$

$$R_e = \frac{U_e D}{\nu}$$

$$U_e = 0.778 \times U_0^2 \left(\frac{D}{y_0}\right)^{0.286}$$

perhitungan percepatan efektif untuk zona 1 A :

| X | a | a ₀ | a _e | Re | Cd | Cl | Cm |
|------|---------|----------------|----------------|----------|-------|-------|------|
| 0° | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 9,32E+05 | 0,7 | 0,7 | 1,5 |
| 45° | -1,5499 | -1,1180 | 0,9861 | 7,45E+04 | 1,2 | 1 | 2 |
| 90° | -0,0233 | -0,0168 | 0,0148 | 1,82E+05 | 0,922 | 0,835 | 2 |
| 135° | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 2,09E+05 | 0,835 | 0,783 | 2 |
| 180° | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 2,09E+05 | 0,835 | 0,783 | 2 |
| 225° | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 2,09E+05 | 0,835 | 0,783 | 2 |
| 270° | 0,0233 | 0,0168 | 0,0148 | 2,34E+05 | 0,75 | 0,732 | 2 |
| 315° | 1,5499 | 1,1180 | 0,9861 | 4,41E+05 | 0,7 | 0,7 | 1,62 |

Perhitungan Kecepatan Teori Gelombang Cnoidal Zona 1B:

Diketahui :

H = 3,233 m
 d = 7,50 m d³ = 421,875
 T = 7,60 dt
 g = 9,81 m/dt²



Menghitung :

H/d = 0,43106 dibulatkan menjadi 0,43
 T√g/d = 8,691955

Berdasar gambar grafik yang ada maka kita hitung nilai k² :

k² = 1 - 10^{-0,6}

Untuk nilai k² = 1 - 10^{-0,6} didapat :

L² H / d³ = 30 maka L = 62,56811

d/L = 0,119869 memenuhi d/L < 0,125

Parameter Ursell :

L² H / d³ = 30 memenuhi > 26

C = L/T = 8,232646

Dari data diatas kita cari kecepatan gelombang :

g = 9,81 m/dt²
 H = 3,233 m
 T = 7,60 dt
 d = 7,50 m
 s = 0,4064 m
 1-k² = 0,251189
 C = H/d = 0,43106
 γ (gamma) = 0,555
 k = 0,865339

1 = 0,251189
 k² = 0,748811 dibulatkan 0,8
 k = 0,865339
 k'² = 0,251189

k'² = 1-k² = 0,251189

h₁ = 0,4057

h₂ = -0,08562

f₁ / 12 k⁴ = 1,641306 12*k⁴ = 6,728621

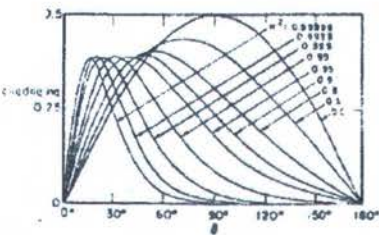
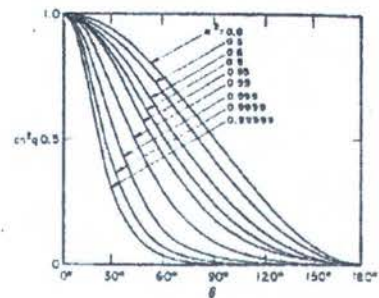
f₁ = 0,243929

f₂ / 4 k² = 0,351679 4 k² = 2,995245

f₂ = 0,117413

f₄ / 8 k² = -0,54783 8 k² = 5,990491

f₄ = -0,09145



Gambar 2.8 Variasi cn² dan cn_{2n} dengan sudut fase untuk berbagai (Sarpkaya, 1981).

| Zona | H (m) | T (dt) | L (m) | ε | d (m) | s (m) | k^2 | γ (gamma) | Harga cn^2 q untuk berbagai sudut | | | | | | | |
|------|-------|--------|----------|---------|-------|--------|-----|-----------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | | | | | | | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° |
| 1B | 3,233 | 7,60 | 62,56811 | 0,43106 | 7,50 | 0,4064 | 0,8 | 0,555 | 1 | 0,84 | 0,42 | 0,1 | 0 | 0,1 | 0,42 | 0,84 |

| Zona | vgd | f1 | f2 | h1 | h2 | Harga U untuk berbagai sudut | | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|----------|------------------------------|----------|-----------|--------|--------|----------|---------|--------|
| | | | | | | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° |
| 1B | 8,5776 | 0,2439 | 0,1174 | 0,4057 | -0,08562 | 2,254936 | 1,618944 | 0,0128346 | -1,149 | -1,501 | -1,14927 | 0,01283 | 1,6189 |

untuk zona 1 B :

dimana :

$$\begin{aligned}
 Y &= 7,50 \text{ m} \\
 Y_0 &= 0,4064 \text{ m} \\
 D &= 0,4064 \text{ m} \\
 v &= 1,20E-06
 \end{aligned}$$

$$U_0 = \frac{U}{\left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{1/4}}$$

$$R_e = \frac{U_e D}{v}$$

$$U_e = 0.778 \times U_0^2 \left(\frac{D}{y_0}\right)^{0.286}$$

perhitungan kecepatan efektif untuk zona 1 B :

| X | U | Uo | Ue | Re | Cd | Cl | Cm |
|------|---------|---------|--------|----------|-------|-------|------|
| 0° | 2,2549 | 1,4868 | 1,3114 | 4,44E+05 | 0,7 | 0,7 | 1,61 |
| 45° | 1,6189 | 1,0675 | 0,9416 | 3,19E+05 | 0,7 | 0,7 | 1,86 |
| 90° | 0,0128 | 0,0085 | 0,0075 | 2,53E+03 | 1,3 | 1,5 | 2 |
| 135° | -1,1493 | -0,7578 | 0,6684 | 2,26E+05 | 0,775 | 0,747 | 2 |
| 180° | -1,5015 | -0,9900 | 0,8733 | 2,96E+05 | 0,7 | 0,7 | 1,99 |
| 225° | -1,1493 | -0,7578 | 0,6684 | 2,26E+05 | 0,834 | 0,782 | 1,91 |
| 270° | 0,0128 | 0,0085 | 0,0075 | 2,53E+03 | 0,7 | 0,7 | 1,5 |
| 315° | 1,6189 | 1,0675 | 0,9416 | 3,19E+05 | 0,7 | 0,7 | 1,5 |

Perhitungan Percepatan Teori Gelombang Cnoidal Zona 1B:

Diketahui :

$H = 3,233 \text{ m}$
 $d = 7,50 \text{ m}$
 $T = 7,60 \text{ dt}$
 $g = 9,81 \text{ m/dt}^2$
 $d^3 = 421,875$

Menghitung :

$H/d = 0,43106$ dibulatkan menjadi $0,43$

$T\sqrt{g/d} = 8,691955$

Berdasar gambar grafik yang ada maka kita hitung nilai k^2 :

$k^2 = 1 - 10^{-0,6}$

Untuk nilai $k^2 = 1 - 10^{-0,6}$ didapat :

$L^2 H / d^3 = 30$ maka $L = 62,56811$

$d/L = 0,119869$ memenuhi $d/L < 0,125$

Parameter Ursell :

$L^2 H / d^3 = 30$ memenuhi > 26

$C = L/T = 8,232646$

Dari data diatas kita cari kecepatan gelombang :

$g = 9,81 \text{ m/dt}^2$

$H = 3,233 \text{ m}$

$T = 7,60 \text{ dt}$

$d = 7,50 \text{ m}$

$s = 0,4064 \text{ m}$

$1 - k^2 = 0,251189$

$\epsilon = H/d = 0,43106$

$\gamma (\text{gamma}) = 0,555$

$k = 0,865339$

$k'^2 = 1 - k^2 = 0,251189$

$h_1 = 0,4057$

$h_2 = -0,085619$

$f_1 / 12 k^4 = 1,641306$ $12 k^4 = 6,7286214$

$f_1 = 0,243929$

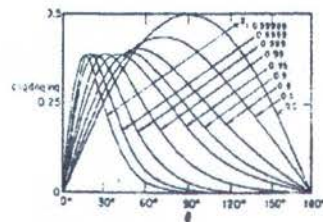
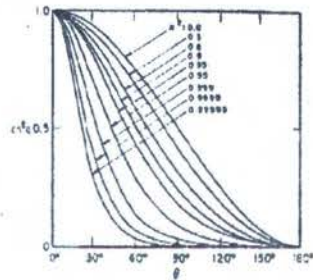
$f_2 / 4 k^2 = 0,351679$ $4 k^2 = 2,9952454$

$f_2 = 0,117413$

$f_4 / 8 k^2 = -0,54783$ $8 k^2 = 5,9904909$

$f_4 = -0,09145$

$1 = 0,251189$
 $k^2 = 0,748811$ dibulatkan $0,8$
 $k = 0,865339$
 $k'^2 = 0,251189$



Gambar 2.8 Variasi c_1^2 dan c_2^2 dengan sudut fase untuk berbagai nilai k (Sarpkaya, 1981).

| Zona | H (m) | T (dt) | L (m) | E | d (m) | s (m) | k^2 | γ (gamma) | Harga cnqdnqsnq untuk berbagai sudut | | | | | | | |
|------|-------|--------|----------|---------|-------|--------|-----|-----------|--------------------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|
| | | | | | | | | | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° |
| 1A | 3,233 | 7,60 | 62,56811 | 0,43106 | 7,50 | 0,4064 | 0,8 | 0,555 | 0 | 0,4 | 0,3 | 0,1 | 0 | 0,1 | 0,3 | 0,4 |

| Zona | √gd | f1 | f2 | h1 | h2 | Harga a x untuk berbagai sudut | | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|----------|--------------------------------|----------|-----------|---------|------|---------|---------|---------|
| | | | | | | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° |
| 1A | 8,5776 | 0,2439 | 0,1174 | 0,4057 | -0,08562 | 0 | -0,15378 | 0,4843335 | 0,31374 | 0 | 0,31374 | 0,48433 | -0,1538 |

untuk zona 1 B :

dimana :

$Y = 7,50 \text{ m}$
 $Y_0 = 0,4064 \text{ m}$
 $D = 0,4064 \text{ m}$
 $v = 1,20E-06$

$$U_0 = \frac{U}{\left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{1/7}}$$

$$U_e = 0,778 \times U_0^2 \left(\frac{D}{y_0}\right)^{0,286}$$

$$R_e = \frac{U_e D}{v}$$

perhitungan percepatan efektif untuk zona 1 B :

| X | a | ao | ae | Re | Cd | Cl | Cm |
|------|---------|---------|--------|----------|-------|-------|------|
| 0° | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 4,44E+05 | 0,7 | 0,7 | 1,61 |
| 45° | -0,1538 | -0,1014 | 0,0894 | 3,19E+05 | 0,7 | 0,7 | 1,86 |
| 90° | 0,4843 | 0,3194 | 0,2817 | 2,53E+03 | 1,3 | 1,5 | 2 |
| 135° | 0,3137 | 0,2069 | 0,1825 | 2,26E+05 | 0,775 | 0,747 | 2 |
| 180° | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 2,96E+05 | 0,7 | 0,7 | 1,99 |
| 225° | 0,3137 | 0,2069 | 0,1825 | 3,64E+05 | 0,834 | 0,782 | 1,91 |
| 270° | 0,4843 | 0,3194 | 0,2817 | 5,76E+05 | 0,7 | 0,7 | 1,5 |
| 315° | -0,1538 | -0,1014 | 0,0894 | 8,38E+05 | 0,7 | 0,7 | 1,5 |

Perhitungan Kecepatan dan Percepatan Efektif Untuk Arus :

$$\frac{U}{U_0} = \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{1/2}$$

$$U_e = 0.778 \times U_0^2 \left(\frac{D}{Y_0}\right)^{0.286}$$

$$U_0 = \frac{U}{\left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{1/2}}$$

Current Data

| | | |
|-------------|-------------|------|
| 100 tahunan | Permukaan | 1,1 |
| | Pertengahan | 1,05 |
| | Dasar | 0,95 |

| Zona | Arus | | | | D | Yo | Kecepatan Efektif Arus | | Kecepatan Efektif Gelombang dalam berbagai sudut (m/dt) | | | | | | | | Jumlah Total Ue (Ue arus+Ue gelombang) | | | | | | | |
|------|-------|----------|--------|-----------|--------|--------|------------------------|--------|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Y (m) | U (m/dt) | Yo (m) | Uo (m/dt) | | | Uo | Ue | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° |
| 1A | 4,0 | 1,10 | 0,4064 | 0,7935 | 0,4064 | 0,4064 | 0,7935 | 0,6999 | 2,751 | 0,220 | 0,539 | 0,616 | 0,616 | 0,616 | 0,539 | 0,220 | 3,451 | 0,920 | 1,239 | 1,316 | 1,316 | 1,316 | 1,239 | 0,920 |
| 1B | 7,5 | 1,10 | 0,4064 | 0,7253 | 0,4064 | 0,4064 | 0,7253 | 0,6397 | 1,311 | 0,942 | 0,007 | 0,668 | 0,873 | 0,668 | 0,007 | 0,942 | 1,951 | 1,581 | 0,647 | 1,308 | 1,513 | 1,308 | 0,647 | 1,581 |

| Zona | Percepatan Efektif Gelombang dalam berbagai sudut (m/dt ²) | | | | | | | |
|------|------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° |
| 1A | 0,000 | 0,986 | 0,015 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,015 | 0,986 |
| 1B | 0,000 | 0,089 | 0,282 | 0,182 | 0,000 | 0,182 | 0,282 | 0,089 |

Perhitungan panjang Gelombang

Zona IV

Perkiraan panjang gelombang untuk stoke orde 2

$$L_o = 1,56 \cdot T^2 = 90,1056 \text{ m}$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad L_n = (L_{(n-1)} + L_n) / 2$$

g = 9,81 T = 7,6 d = 17,5 m

| Lo | L | L_n |
|---------|-------------|--------------------|
| 90,1056 | 75,72901869 | 82,91730935 |
| | 78,30351232 | 80,61041083 |
| | 76,42631822 | 78,51836453 |
| | 77,24729321 | 77,88282887 |
| | 77,49594231 | 77,68938559 |
| | 77,57154026 | 77,63046292 |
| | 77,59455894 | 77,61251093 |
| | 77,60157126 | 77,6070411 |
| | 77,60370779 | 77,60537444 |
| | 77,60435878 | 77,60486661 |
| | 77,60455714 | 77,60471188 |
| | 77,60461758 | 77,60466473 |
| | 77,60463599 | 77,60465036 |
| | 77,60464161 | 77,60464598 |
| | 77,60464332 | 77,60464465 |
| | 77,60464384 | 77,60464424 |
| | 77,604644 | 77,60464412 |
| | 77,60464404 | 77,60464408 |
| | 77,60464406 | 77,60464407 |
| | 77,60464406 | 77,60464407 |
| | 77,60464406 | 77,60464407 |
| | 77,60464407 | 77,60464407 |

Maka L = **77,60464407**

maka d/L = 0,225501968

Perhitungan panjang Gelombang

Zona IV

Perkiraan panjang gelombang untuk stoke orde 2

$$L_o = 1,56 \cdot T^2 = 90,1056 \text{ m}$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad L_n = (L_{(n-1)} + L_n) / 2$$

g = 9,81 T = 7,6 d = 17,5 m

| Lo | L | L_n |
|---------|-------------|--------------------|
| 90,1056 | 75,72901869 | 82,91730935 |
| | 78,30351232 | 80,61041083 |
| | 76,42631822 | 78,51836453 |
| | 77,24729321 | 77,88282887 |
| | 77,49594231 | 77,68938559 |
| | 77,57154026 | 77,63046292 |
| | 77,59455894 | 77,61251093 |
| | 77,60157126 | 77,6070411 |
| | 77,60370779 | 77,60537444 |
| | 77,60435878 | 77,60486661 |
| | 77,60455714 | 77,60471188 |
| | 77,60461758 | 77,60466473 |
| | 77,60463599 | 77,60465036 |
| | 77,60464161 | 77,60464598 |
| | 77,60464332 | 77,60464465 |
| | 77,60464384 | 77,60464424 |
| | 77,604644 | 77,60464412 |
| | 77,60464404 | 77,60464408 |
| | 77,60464406 | 77,60464407 |
| | 77,60464406 | 77,60464407 |
| | 77,60464406 | 77,60464407 |
| | 77,60464407 | 77,60464407 |

Maka L = **77,60464407**

maka d/L = 0,225501968

Perhitungan panjang Gelombang

Zona II

Iterasi panjang gelombang untuk stoke orde 2

$$Lo = 1,56 \cdot T^2 = 90,1056 \text{ m}$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad L_n = (L_{(n-1)} + L_n) / 2$$

g = 9,81 T = 7,6 d = 11 m

| Lo | L | L_n |
|---------|-------------|-------------------|
| 90,1056 | 58,1856565 | 74,14562825 |
| | 65,9762456 | 70,06093693 |
| | 68,16490627 | 69,1129216 |
| | 68,68268446 | 68,89780303 |
| | 68,80065449 | 68,84922876 |
| | 68,82731641 | 68,83827259 |
| | 68,83333136 | 68,83580197 |
| | 68,83468779 | 68,83524488 |
| | 68,83499365 | 68,83511927 |
| | 68,83506262 | 68,83509094 |
| | 68,83507817 | 68,83508456 |
| | 68,83508168 | 68,83508312 |
| | 68,83508247 | 68,83508279 |
| | 68,83508264 | 68,83508272 |
| | 68,83508268 | 68,8350827 |
| | 68,83508269 | 68,8350827 |
| | 68,8350827 | 68,8350827 |
| | 68,8350827 | 68,8350827 |
| | 68,8350827 | 68,8350827 |
| | 68,8350827 | 68,8350827 |
| | 68,8350827 | 68,8350827 |
| | 68,8350827 | 68,8350827 |

Maka L = **68,8350827**

maka d/L = 0,159802234

Perhitungan panjang Gelombang

Zona III

Iterasi panjang gelombang untuk stoke orde 2

$$Lo = 1,56 \cdot T^2 = 90,1056 \text{ m}$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad L_n = (L_{(n-1)} + L_n) / 2$$

g = 9,81 T = 7,6 d = 16 m

| Lo | L | L_n |
|---------|-------------|--------------------|
| 90,1056 | 72,69228665 | 81,39894332 |
| | 76,11615165 | 78,75754749 |
| | 77,1536107 | 77,95557909 |
| | 77,46750071 | 77,7115399 |
| | 77,56288444 | 77,63721217 |
| | 77,59192249 | 77,61456733 |
| | 77,60076802 | 77,60766768 |
| | 77,60346305 | 77,60556536 |
| | 77,60428421 | 77,60492479 |
| | 77,60453442 | 77,6047296 |
| | 77,60461066 | 77,60467013 |
| | 77,60463389 | 77,60465201 |
| | 77,60464096 | 77,60464649 |
| | 77,60464312 | 77,6046448 |
| | 77,60464378 | 77,60464429 |
| | 77,60464398 | 77,60464413 |
| | 77,60464404 | 77,60464409 |
| | 77,60464406 | 77,60464407 |
| | 77,60464406 | 77,60464407 |
| | 77,60464406 | 77,60464407 |
| | 77,60464407 | 77,60464407 |
| | 77,60464407 | 77,60464407 |

Maka L = **77,60464407**

maka d/L = 0,206173228

Penentuan Kecepatan & Percepatan Gelombang untuk Stoke orde 2

Untuk persamaan kecepatan & percepatan partikel gelombang arah horizontal dari teori Stoke Orde adalah :
(Indiyono, Paul. Hidrodinamika)

Kecepatan Horizontal

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \cos 2\theta$$

$$s = d \pm y$$

Untuk zona 2 :

$$s = d \pm y$$

$$s = d - (d - D)$$

$$s = D$$

$$s = 0,4064 \text{ m}$$

$$d = 11 \text{ m}$$

$$H = 3,23295 \text{ m}$$

$$L = 90,14498182 \text{ m}$$

$$T = 7,6 \text{ s}$$

$$k = 0,069728943 \text{ m}^{-1}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} = 90,14498182 \text{ m}$$

$$k \text{ (angka gelombang)} = \frac{2\pi}{L} = 0,069729$$

perhitungan kecepatan horizontal Zona II :

| $\frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd}$ | θ | $\frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd}$ | U |
|---------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1,5832 | 0 | 0,2224 | 1,8056 |
| 1,5832 | 45 | 0,2224 | 1,1195 |
| 1,5832 | 90 | 0,2224 | -0,2224 |
| 1,5832 | 135 | 0,2224 | -1,1195 |
| 1,5832 | 180 | 0,2224 | -1,3607 |
| 1,5832 | 225 | 0,2224 | -1,1195 |
| 1,5832 | 270 | 0,2224 | -0,2224 |
| 1,5832 | 315 | 0,2224 | 1,1195 |

Untuk zona 3 :

$$s = d \pm y$$

$$s = d - (d - D)$$

$$s = D$$

$$s = 0,4064 \text{ m}$$

$$d = 16 \text{ m}$$

$$H = 3,23295 \text{ m}$$

$$L = 90,14498182 \text{ m}$$

$$T = 7,6 \text{ s}$$

$$k = 0,069728943 \text{ m}^{-1}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} = 90,14498182 \text{ m}$$

$$s = d \pm y$$

$$k \text{ (angka gelombang)} = \frac{2\pi}{L} = 0,069701$$

perhitungan kecepatan horizontal Zona III :

| $\frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd}$ | θ | $\frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd}$ | U |
|---------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 0,9816 | 0 | 0,0329 | 1,0145 |
| 0,9816 | 45 | 0,0329 | 0,6941 |
| 0,9816 | 90 | 0,0329 | -0,0329 |
| 0,9816 | 135 | 0,0329 | -0,6941 |
| 0,9816 | 180 | 0,0329 | -0,9488 |
| 0,9816 | 225 | 0,0329 | -0,6941 |
| 0,9816 | 270 | 0,0329 | -0,0329 |
| 0,9816 | 315 | 0,0329 | 0,6941 |

Untuk zona 4 :

$$s = d \pm y$$

$$s = d - (d - D)$$

$$s = D$$

$$s = 0,4064 \text{ m}$$

$$d = 17,5 \text{ m}$$

$$H = 3,23295 \text{ m}$$

$$L = 90,14498182 \text{ m}$$

$$T = 7,6 \text{ s}$$

$$k = 0,069728943 \text{ m}^{-1}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} = 90,14498182 \text{ m}$$

$$s = d \pm y$$

$$k \text{ (angka gelombang)} = \frac{2\pi}{L} = 0,069701$$

perhitungan kecepatan horizontal Zona IV :

| $\frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd}$ | θ | $\frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H \cosh 2ks}{T \sinh^4 kd}$ | U |
|---------------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 0,8645 | 0 | 0,0198 | 0,8843 |
| 0,8645 | 45 | 0,0198 | 0,6113 |
| 0,8645 | 90 | 0,0198 | -0,0198 |
| 0,8645 | 135 | 0,0198 | -0,6113 |
| 0,8645 | 180 | 0,0198 | -0,8447 |
| 0,8645 | 225 | 0,0198 | -0,6113 |
| 0,8645 | 270 | 0,0198 | -0,0198 |
| 0,8645 | 315 | 0,0198 | 0,6113 |

Untuk zona 5 :

$$s = d \pm y$$

$$s = d - (d - D)$$

$$s = D$$

$$s = 0,4064 \text{ m}$$

$$d = 17,5 \text{ m}$$

$$H = 3,23295 \text{ m}$$

$$L = 90,14498182 \text{ m}$$

$$T = 7,6 \text{ s}$$

$$k = 0,069728943 \text{ m}^{-1}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} = 90,14498182 \text{ m}$$

$$s = d \pm y$$

$$k \text{ (angka gelombang)} = \frac{2\pi}{L} = 0,069729$$

perhitungan kecepatan horizontal Zona V :

| $\frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd}$ | θ | $\frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H \cosh 2ks}{T \sinh^4 kd}$ | U |
|---------------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 0,8645 | 0 | 0,0198 | 0,8843 |
| 0,8645 | 45 | 0,0198 | 0,6113 |
| 0,8645 | 90 | 0,0198 | -0,0198 |
| 0,8645 | 135 | 0,0198 | -0,6113 |
| 0,8645 | 180 | 0,0198 | -0,8447 |
| 0,8645 | 225 | 0,0198 | -0,6113 |
| 0,8645 | 270 | 0,0198 | -0,0198 |
| 0,8645 | 315 | 0,0198 | 0,6113 |

Percepatan Horizontal

$$\frac{du}{dt} = \frac{2\pi^2 H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \theta + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh^2 ks}{\sinh^4 kd} \sin 2\theta$$

$$s = d \pm y \quad \frac{U}{U_0} = \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/7} \quad U_e^2 = 0.778 \times U_0^2 \left(\frac{D}{y_0} \right)^{0.286}$$

$$s = d - (d - D) \quad R_e = \frac{U_e D}{\nu} \quad U_0 = \frac{U}{\left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/7}}$$

Untuk zona 2 :

s = D
 s = 0,4064 m
 d = 11 m
 H = 3,23295 m
 L = 90,1449818 m
 T = 7,6 s
 k = 0,06972894 m⁻¹
 g = 9,81 m/s²

dimana :

Y = 11 m
 Y₀ = 0,4064 m
 D = 0,4064 m
 ν = 1,20E-06

perhitungan percepatan horizontal zona 2 :

| $\frac{2\pi^2 H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd}$ | θ | $\frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh^2 ks}{\sinh^4 kd}$ | dU/dt | dU ₀ /dt | du/dt eff |
|------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------|-----------|
| 9,9473 | 0 | 0,3675 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9,9473 | 45 | 0,3675 | 7,4013 | 4,6203 | 4,0753 |
| 9,9473 | 90 | 0,3675 | 9,9473 | 6,2097 | 5,4772 |
| 9,9473 | 135 | 0,3675 | 6,6663 | 4,1615 | 3,6707 |
| 9,9473 | 180 | 0,3675 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9,9473 | 225 | 0,3675 | -6,6663 | -4,1615 | 3,6707 |
| 9,9473 | 270 | 0,3675 | -9,9473 | -6,2097 | 5,4772 |
| 9,9473 | 315 | 0,3675 | -7,4013 | -4,6203 | 4,0753 |

Untuk zona 3 :

s = D
 s = 0,4064 m
 d = 16 m
 H = 3,23295 m
 L = 90,1449818 m
 T = 7,6 s
 k = 0,06972894
 g = 9,81 m/s²

dimana :

Y = 16 m
 Y₀ = 0,4064 m
 D = 0,4064 m
 ν = 1,20E-06

perhitungan percepatan horizontal zona 3 :

| $\frac{2\pi^2 H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd}$ | θ | $\frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh^2 ks}{\sinh^4 kd}$ | dU/dt | dU ₀ /dt | du/dt eff |
|------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------|-----------|
| 6,1678 | 0 | 0,0543 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6,1678 | 45 | 0,0543 | 4,4156 | 2,6128 | 2,3046 |
| 6,1678 | 90 | 0,0543 | 6,1678 | 3,6496 | 3,2191 |
| 6,1678 | 135 | 0,0543 | 4,3070 | 2,5485 | 2,2479 |
| 6,1678 | 180 | 0,0543 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6,1678 | 225 | 0,0543 | -4,3070 | -2,5485 | 2,2479 |
| 6,1678 | 270 | 0,0543 | -6,1678 | -3,6496 | 3,2191 |
| 6,1678 | 315 | 0,0543 | -4,4156 | -2,6128 | 2,3046 |

Untuk zona 4 :

$s = D$
 $s = 0,4064 \text{ m}$
 $d = 17,5 \text{ m}$
 $H = 3,23295 \text{ m}$
 $L = 90,1449818 \text{ m}$
 $T = 7,6 \text{ s}$
 $k = 0,06972894$
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

dimana :
 $Y = 17,5 \text{ m}$
 $Y_o = 0,4064 \text{ m}$
 $D = 0,4064 \text{ m}$
 $v = 1,20E-06$

perhitungan percepatan horizontal zona 4 :

| $\frac{2\pi^2 H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd}$ | θ | $\frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi l}{L}\right) \frac{\cosh^2 ks}{\sinh^4 kd}$ | dU/dt | dUo/dt | du/dt eff |
|------------------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|-----------|
| 5,4319 | 0 | 0,0327 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5,4319 | 45 | 0,0327 | 3,8736 | 2,2630 | 1,9960 |
| 5,4319 | 90 | 0,0327 | 5,4319 | 3,1733 | 2,7990 |
| 5,4319 | 135 | 0,0327 | 3,8083 | 2,2248 | 1,9624 |
| 5,4319 | 180 | 0,0327 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5,4319 | 225 | 0,0327 | -3,8083 | -2,2248 | 1,9624 |
| 5,4319 | 270 | 0,0327 | -5,4319 | -3,1733 | 2,7990 |
| 5,4319 | 315 | 0,0327 | -3,8736 | -2,2630 | 1,9960 |

Untuk zona 5 :

$s = D$
 $s = 0,4064 \text{ m}$
 $d = 17,5 \text{ m}$
 $H = 3,23295 \text{ m}$
 $L = 90,1449818 \text{ m}$
 $T = 7,6 \text{ s}$
 $k = 0,06972894$
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

dimana :
 $Y = 17,5 \text{ m}$
 $Y_o = 0,4064 \text{ m}$
 $D = 0,4064 \text{ m}$
 $v = 1,20E-06$

perhitungan percepatan horizontal zona 5 :

| $\frac{2\pi^2 H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd}$ | θ | $\frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi l}{L}\right) \frac{\cosh^2 ks}{\sinh^4 kd}$ | dU/dt | dUo/dt | du/dt eff |
|------------------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|-----------|
| 5,4319 | 0 | 0,0327 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5,4319 | 45 | 0,0327 | 3,8736 | 2,2630 | 1,9960 |
| 5,4319 | 90 | 0,0327 | 5,4319 | 3,1733 | 2,7990 |
| 5,4319 | 135 | 0,0327 | 3,8083 | 2,2248 | 1,9624 |
| 5,4319 | 180 | 0,0327 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5,4319 | 225 | 0,0327 | -3,8083 | -2,2248 | 1,9624 |
| 5,4319 | 270 | 0,0327 | -5,4319 | -3,1733 | 2,7990 |
| 5,4319 | 315 | 0,0327 | -3,8736 | -2,2630 | 1,9960 |

Kecepatan Orde 2

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \cos 2\theta$$

H = 3,23295 m T = 7,6 s

phi = 3,142857
 phi*H/T = 1,336934
 2 phi = 6,285714

| Zona | H (m) | T (dt) | L (m) | k | d (m) | s (m) | U (m/s) untuk variasi sudut (θ) | | | | | | | |
|------|---------|--------|----------|----------|-------|--------|---------------------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| | | | | | | | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° |
| 2 | 3,23295 | 7,6 | 68,83508 | 432,5036 | 11 | 0,4064 | 1,80557631 | 1,119464313 | -0,22241 | -1,11946 | -1,36075 | -1,11946 | -0,22241 | 1,1195 |
| 3 | 3,23295 | 7,6 | 77,60464 | 487,6044 | 16 | 0,4064 | 1,01450856 | 0,694120013 | -0,03287 | -0,69412 | -0,94876 | -0,69412 | -0,03287 | 0,6941 |
| 4 | 3,23295 | 7,6 | 77,60464 | 487,6044 | 17,5 | 0,4064 | 0,88429359 | 0,611305679 | -0,01978 | -0,61131 | -0,84474 | -0,61131 | -0,01978 | 0,6113 |
| 5 | 3,23295 | 7,6 | 77,60464 | 487,6044 | 17,5 | 0,4064 | 0,88429359 | 0,611305679 | -0,01978 | -0,61131 | -0,84474 | -0,61131 | -0,01978 | 0,6113 |

Percepatan Orde 2

Percepatan Horizontal

$$\frac{du}{dt} = \frac{2 \pi^2 H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \theta + \frac{3 \pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh^2 ks}{\sinh^4 kd} \sin 2 \theta$$

H = 3,23295 m

T = 7,6 s

phi*H/T = 1,336396

2 phi = 6,283185

phi = 3,141593

| Zona | H (m) | T (dt) | L | k | d (m) | s (m) | ax (m/s^2) untuk variasi sudut (θ) | | | | | | | |
|------|---------|--------|---------|----------|-------|--------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| | | | | | | | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° |
| 2 | 3,23295 | 7,6 | 68,8351 | 432,5036 | 11 | 0,4064 | 0,0000 | 7,4013 | 9,9473 | 6,6663 | 0,0000 | -6,6663 | -9,9473 | -7,4013 |
| 3 | 3,23295 | 7,6 | 77,6046 | 487,6044 | 16 | 0,4064 | 0,0000 | 4,4156 | 6,1678 | 4,3070 | 0,0000 | -4,3070 | -6,1678 | -4,4156 |
| 4 | 3,23295 | 7,6 | 77,6046 | 487,6044 | 17,5 | 0,4064 | 0,0000 | 3,8736 | 5,4319 | 3,8083 | 0,0000 | -3,8083 | -5,4319 | -3,8736 |
| 5 | 3,23295 | 7,6 | 77,6046 | 487,6044 | 17,5 | 0,4064 | 0,0000 | 3,8736 | 5,4319 | 3,8083 | 0,0000 | -3,8083 | -5,4319 | -3,8736 |

untuk zona 2 :

dimana :

Y = 11 m
 Yo = 0,4064 m
 D = 0,4064 m
 v = 1,20E-06

$$U_e = 0.778 \times U_0^2 \left(\frac{D}{y_0}\right)^{0.286}$$

$$R_e = \frac{U_e D}{v}$$

perhitungan percepatan efektif untuk zona 2 :

| X | U | Uo | Ue | Re | Cd | Cl | Cm | a | ao | ae |
|------|---------|---------|--------|----------|-------|-------|------|---------|---------|--------|
| 0° | 1,8056 | 1,1271 | 0,9942 | 3,37E+05 | 0,7 | 0,7 | 1,83 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 45° | 1,1195 | 0,6988 | 0,6164 | 2,09E+05 | 0,834 | 0,782 | 2 | 7,4013 | 4,6203 | 4,0753 |
| 90° | -0,2224 | -0,1388 | 0,1225 | 4,15E+04 | 1,3 | 1,5 | 2 | 9,9473 | 6,2097 | 5,4772 |
| 135° | -1,1195 | -0,6988 | 0,6164 | 2,09E+05 | 0,834 | 0,782 | 2 | 6,6663 | 4,1615 | 3,6707 |
| 180° | -1,3607 | -0,8495 | 0,7493 | 2,54E+05 | 0,7 | 0,7 | 1,99 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 225° | -1,1195 | -0,6988 | 0,6164 | 2,09E+05 | 0,834 | 0,782 | 2 | -6,6663 | -4,1615 | 3,6707 |
| 270° | -0,2224 | -0,1388 | 0,1225 | 4,15E+04 | 1,3 | 1,5 | 2 | -9,9473 | -6,2097 | 5,4772 |
| 315° | 1,1195 | 0,6988 | 0,6164 | 2,09E+05 | 0,834 | 0,782 | 2 | -7,4013 | -4,6203 | 4,0753 |

Untuk zona 3 :

dimana :

Y = 16 m
 Yo = 0,4064 m
 D = 0,4064 m
 v = 1,20E-06

$$U_e = 0.778 \times U_0^2 \left(\frac{D}{y_0}\right)^{0.286}$$

$$R_e = \frac{U_e D}{v}$$

perhitungan percepatan efektif untuk zona 3 :

| X | U | Uo | Ue | Re | Cd | Cl | Cm | a | ao | ae |
|------|---------|---------|--------|-----------|-------|-------|----|---------|---------|--------|
| 0° | 1,0145 | 0,6003 | 0,5295 | 1,793E+05 | 0,932 | 0,841 | 2 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 45° | 0,6941 | 0,4107 | 0,3623 | 1,227E+05 | 1,12 | 0,955 | 2 | 4,4156 | 2,6128 | 2,3046 |
| 90° | -0,0329 | -0,0195 | 0,0172 | 5,811E+03 | 1,3 | 1,5 | 2 | 6,1678 | 3,6496 | 3,2191 |
| 135° | -0,6941 | -0,4107 | 0,3623 | 1,227E+05 | 1,12 | 0,955 | 2 | 4,3070 | 2,5485 | 2,2479 |
| 180° | -0,9488 | -0,5614 | 0,4952 | 1,677E+05 | 0,971 | 0,865 | 2 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 225° | -0,6941 | -0,4107 | 0,3623 | 1,227E+05 | 1,12 | 0,955 | 2 | -4,3070 | -2,5485 | 2,2479 |
| 270° | -0,0329 | -0,0195 | 0,0172 | 5,811E+03 | 1,3 | 1,5 | 2 | -6,1678 | -3,6496 | 3,2191 |
| 315° | 0,6941 | 0,4107 | 0,3623 | 1,227E+05 | 1,12 | 0,955 | 2 | -4,4156 | -2,6128 | 2,3046 |

Untuk zona 4 :

dimana :

Y = 17,5 m
 Yo = 0,4064 m
 D = 0,4064 m
 v = 1,20E-06

$$U_e = 0.778 \times U_0^2 \left(\frac{D}{y_0}\right)^{0.286}$$

$$R_e = \frac{U_e D}{v}$$

perhitungan percepatan efektif untuk zona 4 :

| X | U | Uo | Ue | Re | Cd | Cl | Cm | a | ao | ae |
|------|---------|---------|--------|-----------|------|-------|----|---------|---------|--------|
| 0° | 0,8843 | 0,5166 | 0,4557 | 1,543E+05 | 1,02 | 0,891 | 2 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 45° | 0,6113 | 0,3571 | 0,3150 | 1,067E+05 | 1,17 | 0,987 | 2 | 3,8736 | 2,2630 | 1,9960 |
| 90° | -0,0198 | -0,0116 | 0,0102 | 3,451E+03 | 1,3 | 1,5 | 2 | 5,4319 | 3,1733 | 2,7990 |
| 135° | -0,6113 | -0,3571 | 0,3150 | 1,067E+05 | 1,17 | 0,987 | 2 | 3,8083 | 2,2248 | 1,9624 |
| 180° | -0,8447 | -0,4935 | 0,4353 | 1,474E+05 | 1,04 | 0,905 | 2 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 225° | -0,6113 | -0,3571 | 0,3150 | 1,067E+05 | 1,17 | 0,987 | 2 | -3,8083 | -2,2248 | 1,9624 |
| 270° | -0,0198 | -0,0116 | 0,0102 | 3,451E+03 | 1,3 | 1,5 | 2 | -5,4319 | -3,1733 | 2,7990 |
| 315° | 0,6113 | 0,3571 | 0,3150 | 1,067E+05 | 1,17 | 0,987 | 2 | -3,8736 | -2,2630 | 1,9960 |

Untuk zona 5 :

dimana :

Y = 17,5 m
 Yo = 0,4064 m
 D = 0,4064 m
 v = 1,20E-06

$$U_e = 0.778 \times U_0^2 \left(\frac{D}{y_0}\right)^{0.286}$$

$$R_e = \frac{U_e D}{v}$$

perhitungan percepatan efektif untuk zona 5 :

| X | U | Uo | Ue | Re | Cd | Cl | Cm | a | ao | ae |
|------|---------|---------|--------|-----------|------|-------|----|---------|---------|--------|
| 0° | 0,8843 | 0,5166 | 0,4557 | 1,543E+05 | 1,02 | 0,891 | 2 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 45° | 0,6113 | 0,3571 | 0,3150 | 1,067E+05 | 1,17 | 0,987 | 2 | 3,8736 | 2,2630 | 1,9960 |
| 90° | -0,0198 | -0,0116 | 0,0102 | 3,451E+03 | 1,3 | 1,5 | 2 | 5,4319 | 3,1733 | 2,7990 |
| 135° | -0,6113 | -0,3571 | 0,3150 | 1,067E+05 | 1,17 | 0,987 | 2 | 3,8083 | 2,2248 | 1,9624 |
| 180° | -0,8447 | -0,4935 | 0,4353 | 1,474E+05 | 1,04 | 0,905 | 2 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 225° | -0,6113 | -0,3571 | 0,3150 | 1,067E+05 | 1,17 | 0,987 | 2 | -3,8083 | -2,2248 | 1,9624 |
| 270° | -0,0198 | -0,0116 | 0,0102 | 3,451E+03 | 1,3 | 1,5 | 2 | -5,4319 | -3,1733 | 2,7990 |
| 315° | 0,6113 | 0,3571 | 0,3150 | 1,067E+05 | 1,17 | 0,987 | 2 | -3,8736 | -2,2630 | 1,9960 |

Perhitungan Kecepatan Efektif (U_e), Reynold Number (Re), dan Coefficient Hidrodynamics (C_d , C_l , C_m)

$$\frac{U}{U_0} = \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{1/4}$$

$$U_e = 0.778 \times U_0^2 \left(\frac{D}{y_0}\right)^{0.286}$$

$$U_0 = \frac{U}{\left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{1/4}}$$

$$Re = \frac{U_e D}{\nu}$$

| Zona | H (m) | T (dt) | L (m) | k | d (m) | s (m) | Ue gelombang (m/s) untuk variasi sudut (θ) | | | | | | | |
|------|---------|--------|--------|---------|-------|--------|-----------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | | | | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° |
| 2 | 3,23295 | 7,6 | 68,835 | 432,678 | 11 | 0,4064 | 0,9942 | 0,6164 | 0,1225 | 0,6164 | 0,7493 | 0,6164 | 0,1225 | 0,6164 |
| 3 | 3,23295 | 7,6 | 77,605 | 487,801 | 16 | 0,4064 | 0,5295 | 0,3623 | 0,0172 | 0,3623 | 0,4952 | 0,3623 | 0,0172 | 0,3623 |
| 4 | 3,23295 | 7,6 | 77,605 | 487,801 | 17,5 | 0,4064 | 0,4557 | 0,3150 | 0,0102 | 0,3150 | 0,4353 | 0,3150 | 0,0102 | 0,3150 |
| 5 | 3,23295 | 7,6 | 77,605 | 487,801 | 17,5 | 0,4064 | 0,4557 | 0,3150 | 0,0102 | 0,3150 | 0,4353 | 0,3150 | 0,0102 | 0,3150 |

Perhitungan Kecepatan Efektif Untuk Arus Stokes Orde 2:

$$\frac{U}{U_0} = \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{1/2}$$

$$U_e = 0.778 \times U_0^2 \left(\frac{D}{y_0}\right)^{0.286}$$

$$U_0 = \frac{U}{\left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{1/2}}$$

Current Data

| | | |
|-------------|-------------|------|
| 100 tahunan | Permukaan | 1,1 |
| | Pertengahan | 1,05 |
| | Dasar | 0,95 |

| Zona | Arus | | | | D | Y ₀ | Kecepatan Efektif Arus | | Kecepatan Efektif Gelombang dalam berbagai sudut (m/dt) | | | | | | | | Jumlah Total Ue (Ue arus+Ue gelombang) | | | | | | | |
|------|-------|----------|--------------------|-----------------------|--------|----------------|------------------------|----------------|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Y (m) | U (m/dt) | Y ₀ (m) | U ₀ (m/dt) | | | U ₀ | U _e | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° |
| 2 | 11,0 | 1,10 | 0,4064 | 0,6867 | 0,4064 | 0,4064 | 0,6867 | 0,6057 | 0,994 | 0,616 | 0,122 | 0,616 | 0,749 | 0,616 | 0,122 | 0,616 | 1,600 | 1,222 | 0,728 | 1,222 | 1,355 | 1,222 | 0,728 | 1,222 |
| 3 | 16,0 | 1,10 | 0,4064 | 0,6509 | 0,4064 | 0,4064 | 0,6509 | 0,5741 | 0,529 | 0,362 | 0,017 | 0,362 | 0,495 | 0,362 | 0,017 | 0,362 | 1,104 | 0,936 | 0,591 | 0,936 | 1,069 | 0,936 | 0,591 | 0,936 |
| 4 | 17,5 | 1,10 | 0,4064 | 0,6426 | 0,4064 | 0,4064 | 0,6426 | 0,5668 | 0,456 | 0,315 | 0,010 | 0,315 | 0,435 | 0,315 | 0,010 | 0,315 | 1,022 | 0,882 | 0,577 | 0,882 | 1,002 | 0,882 | 0,577 | 0,882 |
| 5 | 17,5 | 1,10 | 0,4064 | 0,6426 | 0,4064 | 0,4064 | 0,6426 | 0,5668 | 0,456 | 0,315 | 0,010 | 0,315 | 0,435 | 0,315 | 0,010 | 0,315 | 1,022 | 0,882 | 0,577 | 0,882 | 1,002 | 0,882 | 0,577 | 0,882 |

Perbandingan Penghitungan Gaya Maksimal dengan Berat Pipa :

$$W = F_L + \frac{1}{\mu} (F_D + F_I)$$

Asumsi dengan permukaan dasar laut datar (0°) :

$$\mu = 0,5$$

| Zona | Gaya Yang Bekerja | | | | | | | | F Maksimal | F total maks |
|------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|--------------|
| | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° | | |
| 1A | 3472,1189 | 650,0359 | 565,4340 | 583,2071 | 583,2071 | 583,2071 | 477,5523 | 459,2085 | 3472,1189 | 5208,1784 |
| 1B | 1110,1423 | 751,2664 | 319,2231 | 591,0155 | 667,5091 | 622,3348 | 178,3454 | 746,9838 | 1110,1423 | 2220,2845 |

Perbandingan Penghitungan Gaya Maksimal dengan Berat Pipa :

$$W = F_L + \frac{1}{\mu} (F_D + F_I)$$

Asumsi dengan permukaan dasar laut datar (0°) :

$$\mu = 0,5$$

| Zona | Gaya Yang Bekerja | | | | | | | | F Maksimal | F total maks |
|------|-------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|--------------|
| | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° | | |
| 2 | 746,3654 | 1586,8308 | 1766,3001 | 1479,1786 | 535,3291 | 1479,1786 | 1766,3001 | 1586,8308 | 1766,3001 | 4033,7302 |
| 3 | 449,7726 | 992,0441 | 1060,2614 | 976,9616 | 437,2400 | 976,9616 | 1060,2614 | 992,0441 | 1060,2614 | 2398,9523 |
| 4 | 416,1199 | 880,3395 | 938,7724 | 871,3816 | 406,8072 | 871,3816 | 938,7724 | 880,3395 | 938,7724 | 1700,2190 |
| 5 | 416,1199 | 880,3395 | 938,7724 | 871,3816 | 406,8072 | 871,3816 | 938,7724 | 880,3395 | 938,7724 | 1700,2190 |

$$F_D = \frac{1}{2} \times \rho \times C_D \times D \times Ue^2$$

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

D = 0,4064 m
 ρ = 1025 kg/m³
 π = 3,142857

$$F_I = \rho \times C_M \times \left[\frac{\pi D^2}{4} \right] (dU/dt)$$

Menghitung Gaya-gaya yang bekerja :

| Sudut (θ) | Zona | Ue Total (m/dt) | CD | CL | CM | ax | FD | FL | Fi | F Total |
|-----------|------|-----------------|-------|-------|------|--------|-----------|-----------|----------|-----------|
| 0° | 1A | 3,4507 | 0,7 | 0,7 | 1,5 | 0,0000 | 1736,0595 | 1736,0595 | 0,0000 | 3472,1189 |
| | 1B | 1,9512 | 0,7 | 0,7 | 1,61 | 0,0000 | 555,0711 | 555,0711 | 0,0000 | 1110,1423 |
| 45° | 1A | 0,9199 | 1,2 | 1 | 2 | 0,9861 | 211,4783 | 176,2319 | 262,3257 | 650,0359 |
| | 1B | 1,5813 | 0,7 | 0,7 | 1,86 | 0,0894 | 364,5698 | 364,5698 | 22,1267 | 751,2664 |
| 90° | 1A | 1,2387 | 0,922 | 0,835 | 2 | 0,0148 | 294,6433 | 266,8407 | 3,9500 | 565,4340 |
| | 1B | 0,6472 | 1,3 | 1,5 | 2 | 0,2817 | 113,4192 | 130,8684 | 74,9355 | 319,2231 |
| 135° | 1A | 1,3155 | 0,835 | 0,783 | 2 | 0,0000 | 300,9752 | 282,2318 | 0,0000 | 583,2071 |
| | 1B | 1,3082 | 0,775 | 0,747 | 2 | 0,1825 | 276,2269 | 266,2470 | 48,5416 | 591,0155 |
| 180° | 1A | 1,3155 | 0,835 | 0,783 | 2 | 0,0000 | 300,9752 | 282,2318 | 0,0000 | 583,2071 |
| | 1B | 1,5130 | 0,7 | 0,7 | 1,99 | 0,0000 | 333,7546 | 333,7546 | 0,0000 | 667,5091 |
| 225° | 1A | 1,3155 | 0,835 | 0,783 | 2 | 0,0000 | 300,9752 | 282,2318 | 0,0000 | 583,2071 |
| | 1B | 1,3082 | 0,834 | 0,782 | 1,91 | 0,1825 | 297,2557 | 278,7218 | 46,3572 | 622,3348 |
| 270° | 1A | 1,2387 | 0,75 | 0,732 | 2 | 0,0148 | 239,6773 | 233,9250 | 3,9500 | 477,5523 |
| | 1B | 0,6472 | 0,7 | 0,7 | 1,5 | 0,2817 | 61,0719 | 61,0719 | 56,2016 | 178,3454 |
| 315° | 1A | 0,9199 | 0,7 | 0,7 | 1,62 | 0,9861 | 123,3623 | 123,3623 | 212,4838 | 459,2085 |
| | 1B | 1,5813 | 0,7 | 0,7 | 1,5 | 0,0894 | 364,5698 | 364,5698 | 17,8441 | 746,9838 |

$$F_D = \frac{1}{2} \times \rho \times C_D \times D \times Ue^2 \quad F_I = \rho \times C_M \times \left[\frac{\pi D^2}{4} \right] (dU/dt) \quad F_L = \frac{1}{2} \times \rho \times C_L \times D \times Ue^2$$

D = 0,4064 m
 ρ = 1025 kg/m³
 π = 3,142857

Menghitung Gaya-gaya yang bekerja :

| Sudut (θ) | Zona | Ue Total (m/dt) | CD | CL | CM | ax | FD | FL | Fi | F Total |
|-----------|------|-----------------|-------|-------|------|--------|----------|----------|-----------|-----------|
| 0° | 2 | 1,5999 | 0,7 | 0,7 | 1,83 | 0,0000 | 373,1827 | 373,1827 | 0,0000 | 746,3654 |
| | 3 | 1,1036 | 0,932 | 0,841 | 2 | 0,0000 | 236,4287 | 213,3439 | 0,0000 | 449,7726 |
| | 4 | 1,0225 | 1,02 | 0,891 | 2 | 0,0000 | 222,1048 | 194,0151 | 0,0000 | 416,1199 |
| | 5 | 1,0225 | 1,02 | 0,891 | 2 | 0,0000 | 222,1048 | 194,0151 | 0,0000 | 416,1199 |
| 45° | 2 | 1,2221 | 0,834 | 0,782 | 2 | 4,0753 | 259,4306 | 243,2551 | 1084,1451 | 1586,8308 |
| | 3 | 0,9364 | 1,12 | 0,955 | 2 | 2,3048 | 204,5438 | 174,4101 | 613,0902 | 992,0441 |
| | 4 | 0,8818 | 1,17 | 0,987 | 2 | 1,9960 | 189,4903 | 159,8521 | 530,9972 | 880,3395 |
| | 5 | 0,8818 | 1,17 | 0,987 | 2 | 1,9960 | 189,4903 | 159,8521 | 530,9972 | 880,3395 |
| 90° | 2 | 0,7282 | 1,3 | 1,5 | 2 | 5,4772 | 143,5814 | 165,6477 | 1457,0910 | 1766,3001 |
| | 3 | 0,5913 | 1,3 | 1,5 | 2 | 3,2191 | 94,8613 | 109,2246 | 856,3755 | 1060,2614 |
| | 4 | 0,5770 | 1,3 | 1,5 | 2 | 2,7990 | 90,1472 | 104,0160 | 744,6092 | 938,7724 |
| | 5 | 0,5770 | 1,3 | 1,5 | 2 | 2,7990 | 90,1472 | 104,0160 | 744,6092 | 938,7724 |
| 135° | 2 | 1,2221 | 0,834 | 0,782 | 2 | 3,6707 | 259,4306 | 243,2551 | 976,4929 | 1479,1786 |
| | 3 | 0,9364 | 1,12 | 0,955 | 2 | 2,2479 | 204,5438 | 174,4101 | 598,0077 | 976,9616 |
| | 4 | 0,8818 | 1,17 | 0,987 | 2 | 1,9624 | 189,4903 | 159,8521 | 522,0392 | 871,3816 |
| | 5 | 0,8818 | 1,17 | 0,987 | 2 | 1,9624 | 189,4903 | 159,8521 | 522,0392 | 871,3816 |
| 180° | 2 | 1,3549 | 0,7 | 0,7 | 1,99 | 0,0000 | 267,6645 | 267,6645 | 0,0000 | 535,3291 |
| | 3 | 1,0693 | 0,971 | 0,865 | 2 | 0,0000 | 231,2419 | 205,9982 | 0,0000 | 437,2400 |
| | 4 | 1,0021 | 1,04 | 0,905 | 2 | 0,0000 | 217,5216 | 189,2856 | 0,0000 | 406,8072 |
| | 5 | 1,0021 | 1,04 | 0,905 | 2 | 0,0000 | 217,5216 | 189,2856 | 0,0000 | 406,8072 |
| 225° | 2 | 1,2221 | 0,834 | 0,782 | 2 | 3,6707 | 259,4306 | 243,2551 | 976,4929 | 1479,1786 |
| | 3 | 0,9364 | 1,12 | 0,955 | 2 | 2,2479 | 204,5438 | 174,4101 | 598,0077 | 976,9616 |
| | 4 | 0,8818 | 1,17 | 0,987 | 2 | 1,9624 | 189,4903 | 159,8521 | 522,0392 | 871,3816 |
| | 5 | 0,8818 | 1,17 | 0,987 | 2 | 1,9624 | 189,4903 | 159,8521 | 522,0392 | 871,3816 |
| 270° | 2 | 0,7282 | 1,3 | 1,5 | 2 | 5,4772 | 143,5814 | 165,6477 | 1457,0910 | 1766,3001 |
| | 3 | 0,5913 | 1,3 | 1,5 | 2 | 3,2191 | 94,8613 | 109,2246 | 856,3755 | 1060,2614 |
| | 4 | 0,5770 | 1,3 | 1,5 | 2 | 2,7990 | 90,1472 | 104,0160 | 744,6092 | 938,7724 |
| | 5 | 0,5770 | 1,3 | 1,5 | 2 | 2,7990 | 90,1472 | 104,0160 | 744,6092 | 938,7724 |
| 315° | 2 | 1,2221 | 0,834 | 0,782 | 2 | 4,0753 | 259,4306 | 243,2551 | 1084,1451 | 1586,8308 |
| | 3 | 0,9364 | 1,12 | 0,955 | 2 | 2,3048 | 204,5438 | 174,4101 | 613,0902 | 992,0441 |
| | 4 | 0,8818 | 1,17 | 0,987 | 2 | 1,9960 | 189,4903 | 159,8521 | 530,9972 | 880,3395 |
| | 5 | 0,8818 | 1,17 | 0,987 | 2 | 1,9960 | 189,4903 | 159,8521 | 530,9972 | 880,3395 |

Data: OD = 16 in
 ID = 14,764 in
 t = 0,618 in

t coat = 0,2 in (Data lapangan)
 ρ coat = 87,5 lb/ft³ (Data lapangan)
 ρ w = 190,03 lb/ft⁴
 ρ water = 1025 kg/m³
 g = 9,81 kg/m²

OD = 0,4064 m
 t = 0,0156 m
 ID = 0,3752 m
 tc = 0,0381 m

$$1 W_s = F_L + \frac{S}{\mu} (F_D + F_I)$$

$$2 W_a = 2.68 (D^2 - D_1^2)$$

$$4 = t \text{ (iterasi)}$$

$$W_{min} = m \cdot g$$

$$3 W_{ac} = \frac{\pi \rho}{576} ((D + 2t_c)^2 - D^2)$$

$$5 B = 0.35 (D + 2t_c + 2t_w)^2$$

$$6 W_a = W_r + B$$

$$W_{min} = \frac{\pi \rho}{4} ((OD)^2 - (ID)^2) \cdot g$$

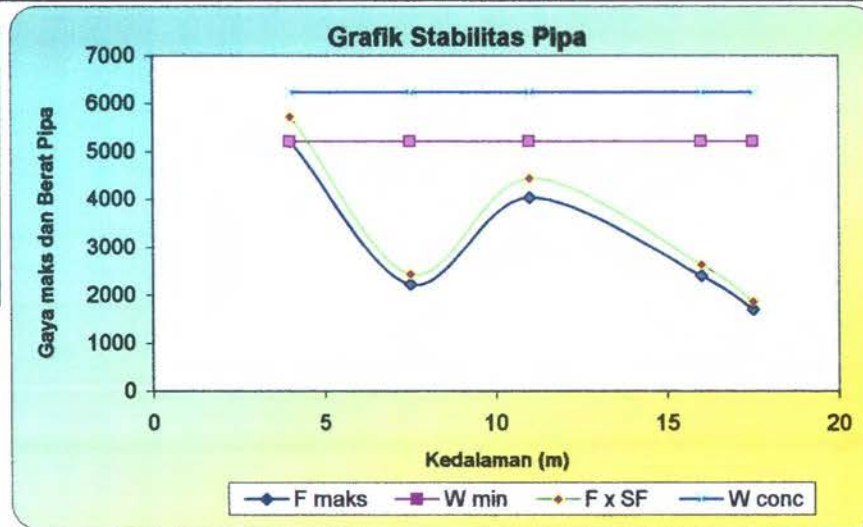
$$7 W_{aw} = W_a - (W_{as} + W_{ac})$$

$$8 W_{aw} = \frac{\pi \rho_w}{576} ((D + 2t_c + 2t_w)^2 - (D + 2t_c)^2)$$

$$W_{concrete} = \frac{\pi \rho}{4} ((OD + tc)^2 - (ID)^2) \cdot g$$

| Zona | Ws kg/m | Ws lb/ft | Was lb/ft | Wac lb/ft | tc in | B lb/ft | Wa lb/ft | Waw lb/ft | Waw lb/ft | W (-) lb/ft | W (-) kg/m | W minimum | W with concrete |
|------|------------|-------------|--------------|--------------|----------|------------|-------------|--------------|--------------|----------------|---------------|-----------|--------------------|
| 1A | 5.208,18 | 3.499,74 | 101,9051347 | 6,498 | 1,5 | 131,9977 | 3.631,74 | 3.523,34 | 111,4394 | 3.411,90 | 5077,451 | 5214,672 | 6238,262 |
| 1B | 2.220,28 | 1.491,97 | 101,9051347 | 6,498 | 1,5 | 131,9977 | 1.623,96 | 1.515,56 | 111,4394 | 1.404,12 | 2101,766 | 5214,672 | 6238,262 |
| 2 | 4.033,73 | 2.710,55 | 101,9051347 | 6,498 | 1,5 | 131,9977 | 2.842,54 | 2.734,14 | 111,4394 | 2.622,70 | 3903,003 | 5214,672 | 6238,262 |
| 3 | 2.398,95 | 1.612,02 | 101,9051347 | 6,498 | 1,5 | 131,9977 | 1.744,02 | 1.635,62 | 111,4394 | 1.524,18 | 2268,225 | 5214,672 | 6238,262 |
| 4 | 1.700,22 | 1.142,50 | 101,9051347 | 6,498 | 1,5 | 131,9977 | 1.274,49 | 1.166,09 | 111,4394 | 1.054,65 | 1569,491 | 5214,672 | 6238,262 |
| 5 | 1.700,22 | 1.142,50 | 101,9051347 | 6,498 | 1,5 | 131,9977 | 1.274,49 | 1.166,09 | 111,4394 | 1.054,65 | 1569,491 | 5214,672 | 6238,262 |

| Zona | d (m) | F maks kg/m | W minimum | F x SF (1,1) | W with concrete |
|------|-------|----------------|-----------|--------------|--------------------|
| 1A | 4 | 5208,178 | 5214,672 | 5728,996 | 6238,262 |
| 1B | 7,5 | 2220,285 | 5214,672 | 2442,313 | 6238,262 |
| 2 | 11 | 4033,730 | 5214,672 | 4437,103 | 6238,262 |
| 3 | 16 | 2398,952 | 5214,672 | 2638,848 | 6238,262 |
| 4 | 17,5 | 1700,219 | 5214,672 | 1870,241 | 6238,262 |
| 5 | 17,5 | 1700,219 | 5214,672 | 1870,241 | 6238,262 |



BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya, 25 November 1983, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Auditya Surabaya, SDN Menanggal 601 Surabaya, SLTP Negeri 12 Surabaya dan SMU Negeri 5 Surabaya. Setelah lulus dari SMU tahun 2001, Penulis mengikuti UMPTN dan diterima di Jurusan Teknik Kelautan FTK-ITS dan terdaftar dengan NRP 4301100060. Di Jurusan Teknik Kelautan ini Penulis mengambil Bidang Studi Perancangan dan Produksi Bangunan Laut. Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan seminar dan pelatihan (*workshop*) yang diselenggarakan oleh Jurusan Teknik Kelautan maupun jurusan lainnya. Penulis juga tergabung dalam anggota AAPG (Association of American Petroleum Geologist) ITS. Penulis juga aktif sebagai Karang Taruna Wisma Pagesangan periode 2005-2006.