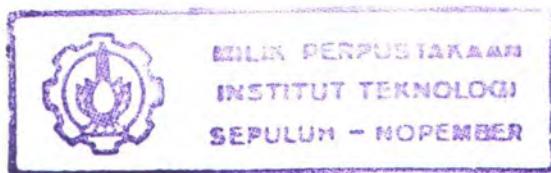


22448 /M/ 05



TUGAS AKHIR (LL 1327)

OPTIMASI PIPA BAWAH LAUT PADA LAPANGAN PRODUKSI GAS TUNU KALIMANTAN TIMUR



R.SKe
665-744
Sem
0-1
2005

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	15-2-2005
Terima Dari	H
No. Agenda Prp.	221425

Oleh :

DWI WAHYU SEMEDI
NRP. 4399 100 015

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2005

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMASI PIPA BAWAH LAUT PADA LAPANGAN PRODUKSI GAS TUNU KALIMANTAN TIMUR



Nama : DWI WAHYU SEMEDI
NRP : 4399 100 015

Surabaya, 25 Januari 2005

Mengetahui/Menyetujui

Dosen Pembimbing I

Ir. Daniel M Rosyid, PhD
NIP. 131 782 038

Dosen Pembimbing II

Ir. Hasan Ikhwani, MSc.
NIP. 132 048 145

Ketua Jurusan Teknik Kelautan



Ir. Imam Rochani, MSc
NIP. 131 417 209

ABSTRAK

Dwi Wahyu Semedi¹

Daniel M Rosyid dan Hasan Ikhwani²

1. Mahasiswa
2. Dosen Pembimbing

Perancangan suatu struktur pipa gas bawah laut yang memiliki resiko dari segi teknis serta padat modal, membutuhkan sebuah perancangan yang optimal untuk mendapatkan desain terbaik dengan sumber daya yang terbatas. Salah satu metode yang akan dicoba untuk diterapkan pada perancangan struktur pipa bawah laut pada Lapangan Produksi Gas Tunu Kalimantan Timur adalah optimasi. Tujuan dari metode ini adalah untuk mendapatkan ketebalan pipa yang optimum sehingga biaya pemasangan dapat direduksi. Kendala-kendala yang membatasi antara lain, tekanan desain, tegangan tangensial, tegangan longitudinal, tegangan gabungan, tegangan *buckling* kritis, serta perambatan *buckling*. Hasil pengkajian menunjukkan bahwa terjadi penurunan ketebalan sebesar 0.56 inch atau 44.0 % dari ketebalan awal. Penurunan ketebalan tersebut akan mengurangi biaya instalasi sampai dengan US\$ 439.4 per meter atau berkurang 44.89% dari nilai awal. Analisa lebih lanjut pada ketebalan tersebut memberikan hasil bahwa pipa relatif aman terhadap stabilitas lateral, *free span* dan *vortex shedding*, serta hidrostatis test pipa.

Kata kunci : pipa gas bawah laut, metode optimasi, tebal optimum, stabilitas lateral, free span dan vortex shedding, hidrostatis test

ABSTRACT

Dwi Wahyu Semedi¹

Daniel M Rosyid dan Hasan Ikhwani²

1. Student
2. Supervision

The design of underwater pipeline structure which has technically risk and high cost, requires an optimization to find out the best design with limited resources. One of method that will be applied to design of underwater pipeline structure at Tunu Gas Production Field East Borneo is optimization. The purpose of this method is to find an optimum pipe thickness so the cost of installation can be reduced. The constraints are internal design pressure, hoop stress, longitudinal stress, equivalent stress, critical buckling, and propagation of buckling. The result of analysis shows that the thickness is decrease to 0.56 inch or 44.0 % from initial thickness. This thickness reduction will reduce installation cost up to US\$ 439.4 per metre or 44.89 % from initial cost. Further analysis on that thickness give result that pipe is relatively safe for lateral stability, free span & vortex shedding, and hydrostatic test.

Key words: offshore pipeline, optimization method, optimum thickness, lateral stability, free span dan vortex shedding, hydrostatic test

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur kepada Allah SWT karena Dia-lah saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir **“Optimasi Pipa Bawah Laut Pada Lapangan Produksi Gas Tunu Kalimantan Timur”** ini tepat pada waktu yang telah direncanakan. Tugas Akhir yang disusun merupakan penerapan ilmu-ilmu yang telah penulis dapatkan selama dibangku perkuliahan selama beberapa semester.

Penyusunan Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat kelulusan yang harus ditempuh untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik. Dengan Tugas Akhir yang penulis buat, diharapkan dapat dipakai sebagai salah satu acuan dalam optimasi pipa bawah laut pada Lapangan Produksi Gas Tunu Kalimantan Timur maupun pada daerah lain.

Terselesaikannya Tugas Akhir ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Yang terhormat Ibunda dan Ayahanda atas doa, pengorbanan, keikhlasan, serta kesabarannya dalam membesar-kan penulis
2. Ustad serta saudara-saudara di T-96 atas bimbingan, arahan, nasehat, serta doanya kepada penulis.
3. Bp. Ir. Daniel M Rosyid, Phd atas bimbingan, dan kesedian meluangkan waktu membimbing penulis selama mengerjakan Tugas Akhir
4. Bp. Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc, atas bimbingan, arahan, nasehat, serta doanya selama kuliah maupun pengerjaan Tugas Akhir.
5. Bp. Ir Imam Rochani, M.Sc Selaku Ketua Jurusan Teknik Kelautan.

6. Bp. Dr. Ir. Handayanu, M.Sc selaku Sekretaris Jurusan Teknik Kelautan.
7. Bp Ir. Murdjito, M.Sc.Eng dan teman-teman Lab Opres atas keikhlasan dan dukungan kepada penulis selama kuliah di Teknik Kelautan
8. Bp. Ir. Mas Murtedjo, Meng selaku dosen wali penulis.
9. Bapak-Bapak dosen lainnya atas ilmu yang telah disampaikan selama dibangku kuliah.
10. Bp. Ir Didik SP atas dukungannya selama kuliah dan mengerjakan tugas akhir.
11. Mbak Prima dan Dhia Salsabila, atas doa dan inspirasinya untuk si “OM”
12. Teman-teman angkatan '99 atas dukungan serta dorongannya selama penulis menempuh kuliah di Teknik Kelautan
13. Komunitas Samandiman Production serta semua teman-teman yang selalu menghibur penulis.

Tidak lupa juga kami ucapan terima kasih kepada pihak-pihak lainya yang baik secara langsung maupun tidak langsung telah membantu dalam penggerjaan Tugas Akhir ini hingga selesai.

Kami menyadari bahwa tugas Akhir ini masih banyak kekurangannya, untuk itu semua kritik dan saran kami harapkan. Akhir kata kami harapkan semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat.

Wassalamu'alaikum Wr.Wb.

Surabaya, Januari 2005

Dwi Wahyu Semedi

DAFTAR ISI

Abstrak	i
Kata Pengantar	ii
Daftar Isi	iii
Daftar Gambar	vi
Daftar Tabel	vii
Daftar Notasi	viii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka	6
2.2 Analisa dalam Perancangan Pipa Bawah Laut	7
2.2.1 Analisa Tegangan Pada Pipa	7
2.2.2 Konsep Stabilitas Pipa Bawah Laut	11
2.2.3 Beban Gelombang	15
2.2.4 Kecepatan Partikel Air Efektif	23
2.2.5 Gaya gaya hidrodinamis	24
2.3 Dasar Teori Optimasi	27
2.3.1 Statemen Persoalan Optimasi	27
2.3.2 Optimasi Persoalan Non Linear	27
2.3.3 <i>Sequential Optimization Technique</i>	29
2.3.4 <i>Interior Penalty Method</i>	30
2.3.5 Scalling The Constraint	32

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Gambaran Umum	33
3.2	Studi Literatur	34
3.3	Pengumpulan Data	34
3.4	Model Optimasi	37
3.5	Program Optimasi Non Linear	39
3.7	Analisa Hasil Permodelan	40
3.8	Uji Hasil Optimasi	40

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1	Perhitungan Awal	42
4.2	Hasil Perancangan Optimasi Dan Pembahasan	45
4.2.1	Tebal dan Fungsi Obyektif	45
4.2.2	Kendala Optimasi	47
4.2.3.	Sensitivitas	49
4.3	Uji Hasil Perancangan	50

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan	59
5.2	Saran	60

Daftar Pustaka

Lampiran

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 2.1	Gaya-gaya yang bekerja pada pipa	12
GAMBAR 2.2	Potongan melintang pipa bawah laut	14
GAMBAR 2.3	Gelombang progresif dan gelombang standing	15
GAMBAR 2.4	Grafik validitas region	16
GAMBAR 2.5	Profil gelombang cnoidal	20
GAMBAR 2.6	Variasi $1-k^2$ dan hgt^2/d^2 untuk berbagai h/d	21
GAMBAR 2.7	Variasi fungsi jacobian elliptik modulus k	22
GAMBAR 2.8	Variasi $cn^2 q$ dan $cnqdqnq$ dengan sudut fase untuk berbagai nilai k	22
GAMBAR 2.9	Distribusi kecepatan arus menurut kedalaman	23
GAMBAR 3.1	Jalur pipa dari snps menuju mwps	35
GAMBAR4.1	Grafik perubahan ketebalan berdasarkan iterasi	47
GAMBAR 4.2	Grafik perubahan biaya pemasangan berdasarkan iterasi	47
GAMBAR 4.3	Grafik perubahan kendala berdasarkan iterasi	49
GAMBAR 4.4	Grafik perubahan tebal pipa karena variasi tekanan	49
GAMBAR 4.5	Grafik stabilitas pipa	56
GAMBAR 4.6	Metode protective matres concrete block dan cell matress	58

DAFTAR TABEL

Tabel.	Keterangan .	Hal.
Tabel 2.1	Desain Faktor untuk pipeline, platform piping, dan risers(Yong Bai,2001)	8
Tabel 2.2	Koefisien gesek Lateral (mouseli,1981)	13
Tabel 2.3	Harga Koefisien Hidrodinamis Untuk Pipa bawah Laut (mouselli,1981)	26
Tabel 3.1	Data Desain Tekanan,temperatur,operasi produksi	35
Tabel 3.2	Data Material Properties Pipa	36
Tabel 3.3	Kedalaman dan Panjang Pipa	37
Tabel 3.4	Biaya Instalasi Pipa Berdasar Ketebalan Pipa jenis X-65 (Geocean,2004)	38
Tabel 4.1	Perubahan variabel Tebal Pipa	45
Tabel 4.2	Minimasi Fungsi Obyektif	46
Tabel 4.3	Kendala Optimasi Material Pipa API PSL2 X-65	48
Tabel 4.4	Penentuan Teori Gelombang	51
Tabel 4.5	Panjang Gelombang dan cepat rambat gelombang tiap kedalaman	52
Tabel 4.6	Kecepatan dan percepatan partikel air karena gelombang	53
Tabel 4.7	Keepatan dan percepatan partikel air karena arus	53
Tabel 4.8	Perhitungan Koefisien drag,koefisien Inersia, dan koefisien lift	54
Tabel 4.9	Perhitungan berat minimal pipa	55

DAFTAR NOTASI

PE	: Tekanan Hidrostatis luar Desain
ρ	: Massa jenis air laut
g	: percepatan gravitasi
dH	: Kedalaman pada saat tertinggi/ terendah dari seabed
S	: <i>Spesified Minimum Yield Strength</i>
F	: <i>Construction type design factor</i>
E	: <i>Longitudinal joint factor</i>
T	: <i>Temperatur derating factor</i>
σ_h	: Tegangan Tangensial
Pi	: Tekanan dalam pipa
Pe	: Tekanan luar pipa
D	: Diameter luar pipa
t	: Tebal pipa
SMYS	: <i>Spesified Minimum Yield Strength</i>
η	: Desain faktor untuk pipa
η_e	: Desain faktor tegangan gabungan untuk pipa
Kt	: faktor suhu
σ_l	: Tegangan Longitudinal
σ_a	: <i>Axial stress</i>
ΔP	: Pi-Pe
A _o	: <i>Eksternal cross section pipe</i>
A	: <i>Cross section area pipe</i>
A _i	: <i>Internal cross section area of pipe</i>
σ_{ec}	: Tegangan gabungan
Pc	: Tekanan kritis buckling
γ_m	: <i>Partial safety factor</i> untuk kondisi beban disebabkan karena variasi ukuran, tegangan konsentrasi lokal, material, proses pengelasan, dll
γ_u	: <i>Partiak safety factor</i> karena adanya kemungkinan beban tumbukan yang terjadi
E	: Modulus Young's
Pd = PE	: Tekanan Hidrostatis luar desain

P _p	: Perambatan <i>buckling</i>
P _t	: uji tekanan hidrostatis
f _d	: faktor desain
f _e	: faktor sambungan las
f _t	: faktor suhu
P _b	: tekanan dalam
F _s	: frekuensi fortex shedding
N _s	: angka strouhal, 0,2
V	: viskositas kinematis fluida, $1,2 \times 10^{-6}$
K	: kondisi akhir konstan, $\pi/2$
F _D	: Gaya Drag persatuan panjang
CD	: Koefisien drag
DT	: Diameter Total
U _{eff}	: Kecepatan efektif
F _i	: Gaya inersia persatuan panjang
C _m	: Koefisien Inersia
D _u /dt	: Percepatan horizontal pipa
F _L	: Gaya <i>Lift</i> persatuan panjang
C _l	: Koefisien <i>lift</i>
v	: viskositas kinematis air laut
Re	: <i>Reynold Number</i>
KC	: <i>Keulegan Carpenter</i>
T	: Periode gelombang
W	: Berat pipa
θ	: kemiringan seabed
Fr	: Gaya gesekan Tanah
N	: Gaya Normal
μ	: koefisien gesek tanah
L	: panjang Gelombang
C	: Cepat rambat Gelombang
H	: Tinggi gelombang
K	: Angka gelombang

ω	: Frekuensi gelombang
X	: suatu n dimensi dari vektor yang dinamakan vektor desain
f(X)	: fungsi obyektif
Gj(X)	: <i>inequality constraint</i>
Lj(X)	: <i>equality constraint</i>
α	: sebuah scalar yang merupakan panjang langkah
$\Phi(X, r)$: <i>pseudo criteria</i>

BAB I
PENDAHULUAN



BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang Masalah

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 yang terbaik, biasanya tidak bisa dilakukan sekali, melainkan melalui proses berulang-ulang. Meliputi penentuan dan analisa calon rancangan hingga diperoleh hasil.

Pada perancangan konvensional, pengalaman, intuisi dan keputusan yang dibuat perancang sangat berpengaruh terhadap hasil rancangan. Dengan metode konvensional, ketergantungan pada kemampuan dan pengalaman perancang sangat besar. Hal ini berlawanan dengan perancangan menggunakan metode optimasi yang lebih berorientasi pada hasil rancangan dan batasan-batasannya. Rancangan didasarkan pada hasil rancangan sebelumnya yang diperbarui secara sistematis melalui algoritma tertentu yaitu dengan jalan iterasi.

Pada perancangan pipa bawah laut, kekuatan struktur pipa sangat dipengaruhi oleh perbandingan antara diameter dan tebal. Kesalahan memperhitungkan tebal pipa dapat menyebabkan terjadinya *buckling* yang disebabkan oleh tekanan hidrostatik maupun tekanan internal. Ketebalan pipa juga mempengaruhi stabilitas pipa. Selain harus memenuhi keamanan dan keselamatan lingkungan, aspek investasi harus diperhatikan oleh perancang dalam merancang pipa bawah laut. Pemilihan tebal yang optimal akan mempengaruhi aspek kekuatan struktur dan memiliki konsekuensi terhadap biaya instalasi.

Persoalan yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah optimasi perancangan pipa bawah laut pada Lapangan Produksi Gas Tunu, Kalimantan Timur. Sebuah Perusahaan KPS-Pertamina yang beroperasi pada Lapangan Gas Tunu berencana untuk menambah kapasitas produksinya dengan menyambungkan fasilitas perpipaan dari *platform* MWPS yang berada pada Blok Sisi menuju *platform* SNPS pada Blok Nubi sejauh 24 km. Pipa yang

akan dipasang adalah pipa dengan jenis grade material X-65 dan mempunyai diameter dalam 24 inchi, serta mempunyai ketebalan 1 inchi. Tujuan perancangan dengan metode optimasi ini adalah meminimalkan biaya pemasangan untuk mendapatkan tebal pipa yang optimal. Agar rancangan yang dihasilkan memenuhi kelayakan, hasil perancangan harus memenuhi batasan yang ditentukan. Batasan yang dimaksud adalah : tekanan dalam desain, tegangan tangensial, tegangan longitudinal, tegangan gabungan, tegangan kritis *buckling*, dan perambatan *buckling*. Selain itu, juga dipertimbangkan berat minimal pipa yang meletak didasar laut agar stabil terhadap gaya-gaya yang bekerja , *free span* dan *vortex shedding*, serta uji hidrostatis.

I.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan diselesaikan dalam optimasi pipa kali ini adalah :

1. Bagaimana meminimalkan biaya untuk mendapatkan tebal (*t*) optimum dengan mempertimbangkan kendala yang ada yaitu :

A. Faktor Desain G(1)

$$P_d = \frac{130000t}{(24+t)} - 1740,45 \geq 0$$

B. Tegangan Tangensial G(2)

$$\sigma_h = 1617,64 \frac{D-t}{2t} \leq 46800 \text{ psi}$$

C. Tegangan Longitudinal G(3)

$$\sigma_l = \frac{1617,64}{2((24+2t)^2 - (24)^2)t} + \frac{1617,64x(0,25x\pi(24+2t)^2)}{((24+2t)^2 - (24)^2)} + 1740,02$$
$$\sigma_l \leq 39000 \text{ psi}$$

D. Tegangan Gabungan G(4)

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_l^2 + \sigma_h^2 - \sigma_h\sigma_l + 3\sigma_a^2)} \leq \eta e \cdot SMYS$$

E. Tekanan kritis *Buckling* G(5)

$$P_c = 5,97 \times 10^7 \frac{t}{D} \left(\frac{t}{D-t} \right)^2 \geq 171,33 \text{ psi}$$

F. Perambatan *Buckling* G(6)

$$P_p = 1,15 \pi \times 65000 \left(\frac{t}{D} \right)^2 \geq 171,33 \text{ psi}$$

2. Bagaimanakah Hasil uji hidrostatis, stabilitas lateral, stabilitas vertikal, *free span* dan *vortex shedding* pipa hasil permodelan optimasi ?

I.3. Tujuan

Sebagaimana dengan permasalahan yang akan dibahas, tujuan dari tugas akhir ini adalah meminimalkan biaya untuk mendapatkan tebal pipa optimum sehingga memenuhi syarat stabilitas lateral, stabilitas vertikal, uji hidrostatis, *free span* dan *vortex shedding*.

I.4. Manfaat

Adapun manfaat yang dapat diambil dari studi kali ini adalah mendapatkan biaya seminimal mungkin, namun memenuhi tebal pipa yang disyaratkan dalam perancangan, serta memenuhi hasil uji yang disyaratkan meliputi uji hidrostatis, stabilitas lateral, stabilitas vertikal, *free span* dan *vortex shedding*.

I.5. Ruang Lingkup Penelitian

Validitas dari penelitian ini dibatasi oleh beberapa ketentuan, yaitu :

1. Penentuan rute tidak dilakukan.
2. Tebal yang dijadikan variable adalah tebal pipa sedangkan tebal lapisan anti korosi diasumsikan konstan.
3. Stabilitas yang ditinjau adalah stabilitas lateral dan stabilitas vertikal.
4. Analisa mengacu pada standart yang berlaku yaitu API 1111, API 5L, Germanisher Llyod.

5. Pipa diasumsikan meletak pada *seabed* dan permukaan *seabed* diasumsikan mempunyai sudut kemiringan 0° merata sepanjang jalur pipa.
6. permukaan tanah *clay* dengan koefisien gesek lateral tanah sebesar 0,5 dan koefisien gesek longitudinal tanah antara 0,2 sampai 0,5.
7. Pipa yang dianalisa mempunyai kedalaman maksimal 82,2 m dan kedalaman minimal 10 m.

L6 Sistematika Penulisan

Susunan sistematika penulisan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

Bab I Pendahuluan

Dalam bab ini diuraikan beberapa hal antara lain :

1. Latar Belakang Masalah
2. Perumusan Masalah
3. Tujuan
4. Manfaat
5. Ruang Lingkup Penelitian
6. Sistematika Penulisan

Bab II. Tinjauan Pustaka

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai persamaan-persamaan yang digunakan dalam perhitungan, teori mengenai tegangan yang terjadi pada pipa, tekanan kritis *buckling*, perambatan *buckling*, teori mengenai beban hidrodinamis yang bekerja pada struktur pipa yang dipasang dibawah permukaan laut, stabilitas serta aplikasi metode optimasi dalam perancangan.

Bab III. Metodologi Penelitian

Dalam bab ini akan dijelaskan langkah-langkah yang dilakukan untuk perhitungan, analisa dan penyelesaian dari tugas akhir ini, yang meliputi studi literatur, perhitungan

kasus, permodelan optimasi, analisa hasil permodelan, serta penarikan kesimpulan dari analisa hasil.

Bab IV. Perhitungan dan Analisa

Bab ini akan menjelaskan mengenai perhitungan beban-beban yang bekerja pada pipa, perhitungan variabel, permodelan fungsi obyektif, permodelan kendala yang membatasi persoalan optimasi pipa bawah laut. Kemudian setelah dilakukan Running Program Optimasi, dilakukan analisa hasil. Dibandingkan dengan desain awal, dan diperiksa berat minimal yang dibutuhkan pipa agar stabil meletak didasar laut, dilakukan uji hidrostatis, *free span* dan *vortex shedding*.

Bab V. Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil-hasil analisa yang dilakukan dan saran-saran yang bermanfaat untuk lebih menyempurnakan dan mengembangkan analisa yang telah dilakukan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 TINJAUAN PUSTAKA

Perancangan pipa sangat memerlukan teknologi yang canggih dan investasi biaya yang mahal. Kegagalan saluran pipa akan mengakibatkan hilangnya biaya yang cukup besar dan hilangnya produksi selama perbaikan. Sebagai gambaran umum, setiap benda yang dihasilkan manusia mengalami bermacam proses. Dimulai dari menganalisa, merancang, mencetak, menjual serta pengembangan lebih lanjut. Salah satu proses penting adalah merancang. Merancang membutuhkan waktu banyak, karena jika terdapat kesalahan akan berpengaruh pada produk yang dihasilkan.

Dalam merancang sebuah produk, dapat dilakukan dengan dua cara yaitu dengan metode konvensional yang sangat tergantung dari kemampuan perancang dan metode optimasi yang dapat menghasilkan produk secara efisien. Untuk memudahkan proses perancangan ketebalan pipa digunakan metode optimasi. Metode optimasi digunakan karena dalam pengambilan keputusan digunakan pendekatan yang terencana yaitu dengan pendekatan saintifik (Rosyid, 1999). Keunggulan metode optimasi 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 merancang pipa dibutuhkan informasi tentang volume dan laju aliran fluida yang mengalir di dalam pipa tersebut. Ukuran pipa yang ditentukan harus mampu untuk menahan tekanan yang ada dalam aliran fluida. Kombinasi tegangan pada pipa untuk pendistribusian minyak atau gas dapat dievaluasi dengan menggunakan *maximum distorsional Shear stress Equation* (API 1111, 20001)

Pipa bawah laut (*subsea pipeline*) yang terbaring didasar laut akan mendapatkan beban-beban hidrodinamis. Beban-beban yang dialami oleh pipa bawah laut akan mempengaruhi

kedudukan dan kestabilan pipa tersebut. Kestabilan dari pipa dipengaruhi oleh berat pipa dan ketebalan pipa.

2.2 ANALISA DALAM PERANCANGAN PIPA BAWAH LAUT

2.2.1 Analisa Tegangan pada Pipa

Pipa bawah laut selama beroperasi akan mengalami tekanan hidrostatis yaitu tekanan luar yang diakibatkan oleh muka air diam. Tekanan hidrostatis ini dapat dihitung dengan menggunakan formula yang diberikan oleh rumusan Germanischer Llyod (1995) sebagai berikut:

$$P_E \approx \rho_w g \left(d_H + \frac{1}{2} H \right) \quad (1)$$

$$P_E \approx \rho_w g \left(d_L - \frac{1}{2} H \right) \quad (2)$$

Sedangkan tekanan di dalam pipa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini (Williams Natural Gas Company, 1996):

$$P_d = \frac{2 S t}{D} \times F \times E \times T \quad (3)$$

Dimana :

P_E = Tekanan hidrostatis luar, N/m^2 .

d_{HL} = Kedalaman pada saat tertinggi dan terendah dari SWL, m.

P_d = *Internal design pressure*, N/m^2 .

S = *Specified Minimum Yield Strength*, N/m^2 .

F = *Construction type design factor*.

E = *Longitudinal joint factor*.

T = *Temperatur derating factor*.

Untuk mendapatkan harga P_d yang maksimum, maka F , E dan T diambil sama dengan 1.

Dengan adanya tebal pipa yang mendapat pengaruh tekanan dari dalam, pipa akan memperoleh tegangan tangensial, longitudinal serta tegangan gabungan tangensial dan longitudinal.

Menurut Yong Bai (2001), tegangan tangensial (*Hoop Stress*) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\sigma_h = (p_i - p_e) \frac{D - t}{2t} \quad (4)$$

$$\sigma_h \leq \eta h. SMYS k_t \quad (5)$$

dimana :

- pi = tekanan dalam, psi
- pe = tekanan luar, psi
- D = diameter luar pipa, in
- t = tebal pipa, in
- η = desain faktor untuk pipa
- k_t = faktor suhu

Tabel 2.1 Desain Faktor Untuk Pipelines, Platform Piping, dan Risers (Yong Bai, 2001)

	HOOP STRESS	LONGITU DINAL STRESS	EQUIVALEN T STRESS
<i>Oil & Gas Pipeline liquid hydrocarbon, piping & risers</i>	0,72	0,80	0,90
<i>Gas risers on non-production platform</i>	0,60	0,80	0,90
<i>Gas piping, gas risers on production platform</i>	0,50	0,80	0,90

Sedang tegan longitudinal dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\sigma_l = \sigma_a + \frac{\Delta Pe \cdot A_0}{A} + P_i \quad (6)$$

$$\sigma_l \leq \eta l SMYS$$

dimana :

- σ_l = tegangan longitudinal efektif, lb/ft²
- ΔP = $P_i - P_e$, psi
- σ_a = Axial Stress, lb/in²
- A_0 = *extrenal cross sectional area pipe, in²*
- A = *cross section area pipe, in²*
- A = $A_0 - A_i = \pi/4(D_o^2 - D_i^2)$, m²
- A_i = *internal cross section area of pipe, in²*

Untuk pipa, besarnya *axial stress* dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Popov, 1996) :

$$\sigma_a = \frac{T}{2At}$$

$$T = P_i - P_e \quad (7)$$

Tegangan gabungan pipa merupakan kombinasi tegangan tangensial dan longitudinal. Besarnya tegangan tersebut adalah (Yong Bai, 2001) :

$$\sigma_{ec} = \sqrt{(\sigma_l^2 + \sigma_h^2 - \sigma_h\sigma_l + 3\sigma_a^2)} \quad (8)$$

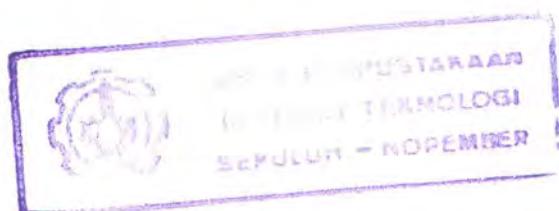
Dimana :

$$\sigma_{ec} = \text{tegangan gabungan, lb/ift}^2$$

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

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

Analisa Buckling



Seperti diterangkan di muka, pipa bawah laut akan mengalami tekanan hidrostatis. Semakin dalam pipa berada, maka tekanan hidrostatis yang diterima pipa akan semakin besar. Kegagalan/keruntuhan pipa bawah laut dapat disebabkan oleh banyak hal, diantaranya adalah perbandingan antara diameter dan ketebalan pipa (D/t), keadaan *stress-strain* pipa, tekanan hidrostatik serta momen *bending* yang terjadi pada pipa.

Buckling pada pipa dapat didefinisikan sebagai perataan (*flattening*) atau berubahnya bentuk pipa menjadi oval. Jika pipa tidak bocor, maka kejadian ini dikatakan *dry buckle* dan jika pipa bocor dan dipenuhi oleh air dikatakan sebagai *wet buckle*.

Mouselli (1981) memberikan formula tekanan kritis *elastic buckling* yang berhubungan dengan tekanan hidrostatis sebagai berikut :

$$P_c = 2E \frac{t}{D} \left(\frac{t}{D-t} \right)^2 \quad (9)$$

Dimana :

P_c = Tekanan kritis kegagalan , kg/m^2

E = Elastic Modulus, kg/m^2

D = diameter pipa, m

T = ketebalan pipa, m

Dalam kasus tekanan hidrostatik murni (*pure hydrostatic pressure*) atau tekanan luar yang lebih murni (*pure external overpressure*), tekanan kritis *buckling* (P_c) harus memenuhi persamaan berikut (Germanischer Llyod, 1995) :

$$P_d \leq \frac{P_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)} \quad (10)$$

Dimana $\gamma_m = 1.05$, untuk kombinasi beban termasuk kondisi operasional normal dan bersamaan beban lingkungan yang ekstrim sedang $\gamma_u = 1.4$, untuk riser dan struktur sejenis yang dipengaruhi oleh benturan, benda jatuh, krane handling dll.

Dalam perancangan pipa harus pula dipertimbangkan kemungkinan adanya perambatan *buckling*. Tekanan kritis penjalaran *buckling* (P_{prop}) pada pipa harus lebih besar dari tekanan desain (P_d) pipa itu sendiri. Hubungan antara P_{prop} dengan P_d diberikan oleh Germanischer Llyod (1995) seperti persamaan berikut.

$$P_d \leq \frac{P_{prop}}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)} \quad (11)$$

Sedang perambatan buckling (*propagation buckling*) menurut Mouselli (1981) dirumuskan sebagai berikut

$$P_p = 1,15\pi \cdot S \left(\frac{t}{D} \right)^2 \quad (12)$$

Dimana :

P_p = *Propagation buckling*

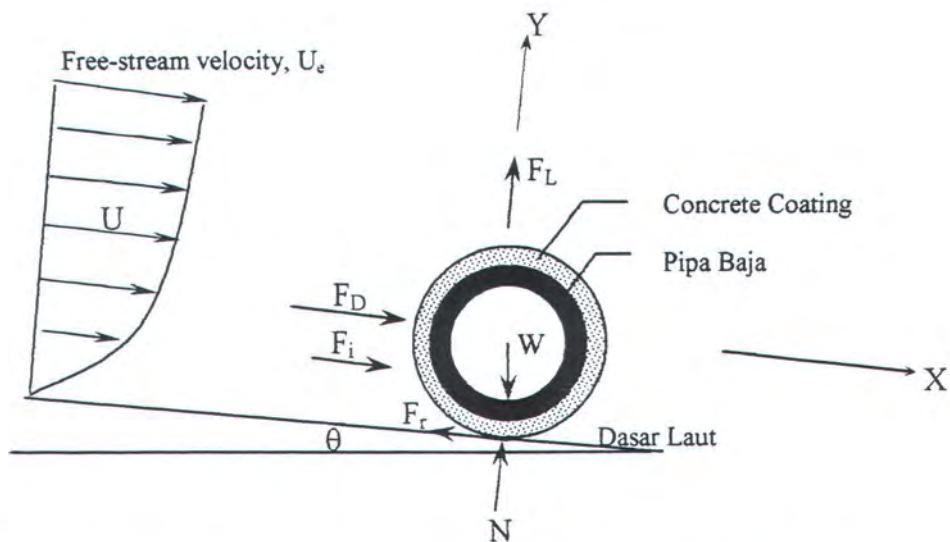
S = SMYS

D = diameter luar pipa

2.2.2 Konsep Stabilitas Pipa Bawah Laut

a. Stabilitas Lateral

Struktur pipa yang terletak didasar laut akan mendapat pengaruh gaya-gaya hidrodinamis. Kestabilan struktur pipa ini sangat tergantung pada gaya-gaya yang bekerja pada pipa tersebut. Mousselli (1981) mengilustrasikan gaya-gaya yang bekerja pada pipa yang terletak didasar laut, seperti gambar berikut ini.



Gambar 2. 1Gaya-gaya yang bekerja pada pipa (Mousselli, 1981).

Struktur pipa akan stabil jika gaya-gaya yang bekerja pada pipa memenuhi persamaan kesetimbangan statis, sehingga dapat diturunkan persamaan dalam arah horisontal dan dalam arah vertikal sebagai berikut (Mousselli, 1981) :

- Persamaan kesetimbangan Horisontal :

$$F_D + F_L - F_r - W \sin \theta = 0 \quad (13)$$

- Persamaan kesetimbangan Vertikal :

$$N + F_L - W \cos \theta = 0 \quad (14)$$

Keterangan :

W	=	Berat pipa terbenam total, lb/ft.
F _D	=	Gaya Drag (<i>Drag Force</i>), lbs.
F _I	=	Gaya Inersia (<i>Inersia Force</i>), lbs.
F _L	=	Gaya Angkat (<i>Lift Force</i>), lbs.
N	=	Gaya Normal (<i>Normal Force</i>), lbs.
F _r	=	Gaya Gesekan (<i>Friction Force</i>), lbs.
U	=	Kecepatan Aliran, ft/sec.
θ	=	Kemiringan dasar laut, °

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

$$F_r = \mu N \quad (15)$$

Dimana μ adalah koefisien gesekan lateral antara permukaan pipa dengan dasar laut. Pengukuran koefisien gesekan dengan percobaan menunjukkan bahwa nilai koefisien berkisar antara 0.5 – 0.9 (Mousselli, 1981). Hal ini tergantung lapisan pipa dan tipe tanah dasar permukaan. Tabel dibawah memberikan nilai koefisien gesekan antar lapisan pipa dengan berbagai macam tipe tanah.

Tabel 2. 2. Koefisien Gesek Lateral (μ) (Mousselli, 1981)

Tipe tanah	Koefisien Gesekan
Lempung (clay)	0.3 – 0.6
Pasir (sand)	0.5 – 0.7
Kerikil (gravel)	0.5

Dengan mengkombinasikan persamaan (13) dan (14) dengan menggunakan persamaan (15), maka dapat diturunkan persamaan sebagai berikut :

$$F_D + F_i + \mu (F_L - W \cos \theta) = W \sin \theta \quad (16)$$

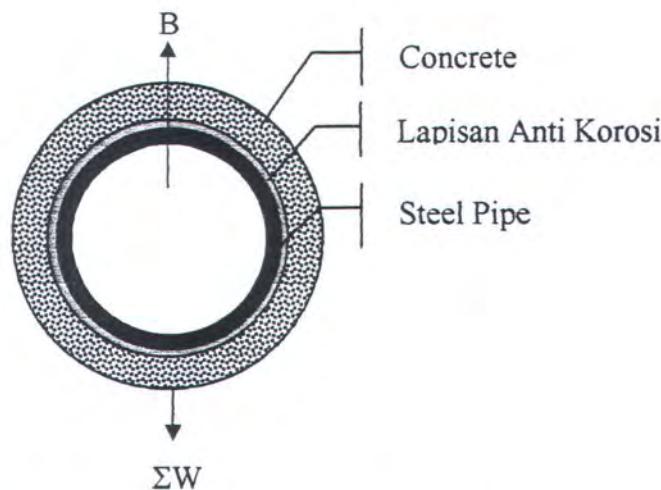
$$W = \frac{F_D + F_i + \mu F_L}{\mu \cos \theta + \sin \theta} \quad (17)$$

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

$$W = F_L + \frac{1}{\mu} (F_D + F_i) \quad (18)$$

W adalah berat minimum pipa yang dibutuhkan agar pipa stabil dengan isi pipa adalah udara (kosong).

Gambar 2.2 merupakan gambar potongan melintang pipa dengan lapisan beton (*concrete coating*).



Gambar 2.2 Potongan melintang pipa bawah laut.

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

$$W_{as} = 2.68(D^2 - Di^2) \quad (19)$$

$$W_{ac} = \frac{\pi \rho_c}{576} ((D + 2t_c)^2 - D^2) \quad (20)$$

$$W_{aw} = \frac{\pi \rho_w}{576} ((D + 2t_c + 2t_w)^2 - (D + 2t_c)^2) \quad (21)$$

$$W_a = W_{as} + W_{ac} + W_{aw} \quad (22)$$

$$B = 0.35 (D + 2t_c + 2t_w)^2 \quad (23)$$

$$W_s = W_a - B \quad (24)$$

Keterangan :

- W_{as} = Berat baja diudara, lb/ft.
- W_{ac} = Berat lapisan anti korosi diudara, lb/ft
- W_{aw} = Berat lapisan beton diudara, lb/ft
- W_a = Berat keseluruhan pipa diudara, lb/ft
- B = Gaya pengapung (*bouyancy*), lb/ft
- W_s = Berat pipa tenggelam, lb/ft

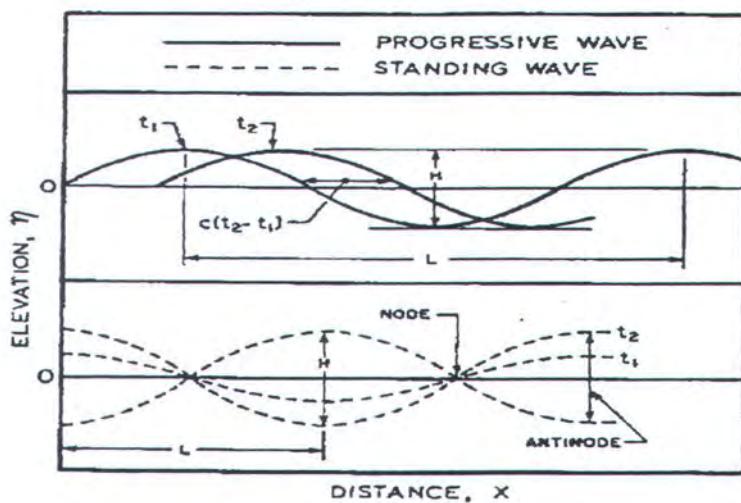
- ρ_c = Densitas lapisan anti korosi, lb/ft³
 ρ_w = Densitas lapisan beton, lb/ft³

2.2.3 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) yang diukur dari *Still Water Level (SWL)*.

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 *oscillatory*, pengangkutan fluida yaitu pemindahan dan penempatan massa sama dengan nol, sedangkan pada gelombang *translatory* terjadi pemindahan massa (Le Mehaute, 1976).

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



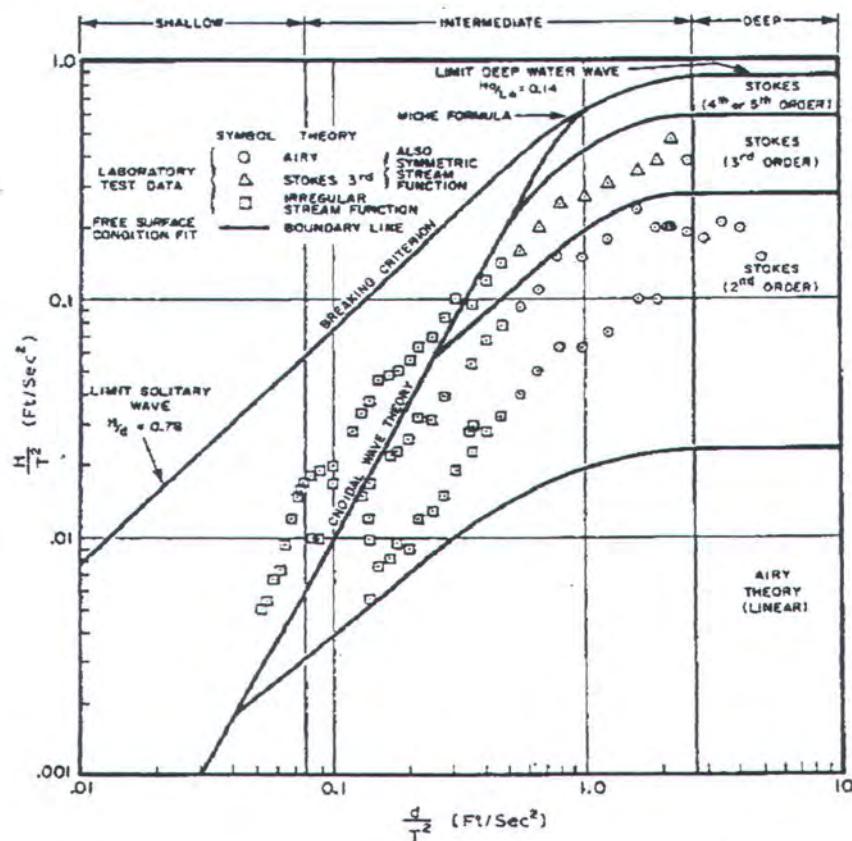
Gambar 2. 3Gelombang *progressive* dan gelombang *standing* (Chakrabarti, 1987)

Gelombang *progressive* berjalan sepanjang sumbu X dengan kecepatan tertentu (kecepatan ini disebut dengan *celerity*). 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 dua gelombang *progressive* yang memiliki amplitudo dan periode yang sama, tetapi berjalan dengan kecepatan yang sama dalam arah yang 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 gelombang Airy, gelombang Stokes dan gelombang 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 laut (d). Grafik dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. 4Grafik Validitas *Region of Validity* (Chakrabarti, 1987).

(30)

Keterangan :

L = Panjang gelombang, m.

C = Cepat rambat gelombang, m/detik

T = Periode Gelombang, detik.

H = Tinggi gelombang, m.

g = Percepatan gravitasi, ,m/detik².

d = Kedalaman, m.

k = Angka gelombang, $2\pi/L$

ω = Frekuensi gelombang, $2\pi/T$, 1/detik.

y = Kedalaman yang ditinjau, m.

θ = Sudut fase, $\theta = kx - \omega t$.

b. Teori Gelombang Stokes Orde 3

Dalam Teori Gelombang Stoke Orde-3, kecepatan gelombang atau seleritasnya mempunyai persamaan dan mempunyai bentuk alternatif :

$$c^2 = \frac{gL}{2\pi} \left(1 + \left(\frac{\pi\alpha}{L} \right)^2 \frac{14 + 4 \cosh^2 4\pi \frac{d}{L}}{16 \sinh^4 4\pi \frac{d}{L}} \right) \tanh 2\pi \frac{d}{L} \quad (31)$$

Dimana persamaan panjang gelombang sebagai berikut :

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \left(1 + \left(\frac{2\pi\alpha}{L} \right)^2 \frac{14 + 4 \cosh^2 2kd}{16 \sinh^4 kd} \right) \quad (32)$$

Persamaan kecepatan dan percepatan partikel gelombang Teori Stoke Orde-3 (Hsu, 1984) adalah :

$$u = c(F1 \cosh ks \cos \theta + F2 \cosh 2ks \cos 2\theta + f3 \cosh ks3 \cos \theta) \quad (33)$$

$$V = c(F1 \cosh \sinh ks \sin \theta + F2 \sinh 2ks \sin 2\theta + F3 \sinh 3ks \sin 3\theta) \quad (34)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{2\pi c}{T} (F1 \cosh ks \sin \theta + F2 \cosh 2ks \sin 2\theta + F3 \cosh 3ks \sin 3\theta) \quad (35)$$

Dimana:

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$F1 = \frac{ka}{\sinh kd} - (ka)^2 \frac{\cosh^2 kd(1 + 5 \cosh^2 kd)}{8 \sinh^5 kd}$$

$$F2 = \frac{3(ka)^2}{4 \sinh^4 kd}$$

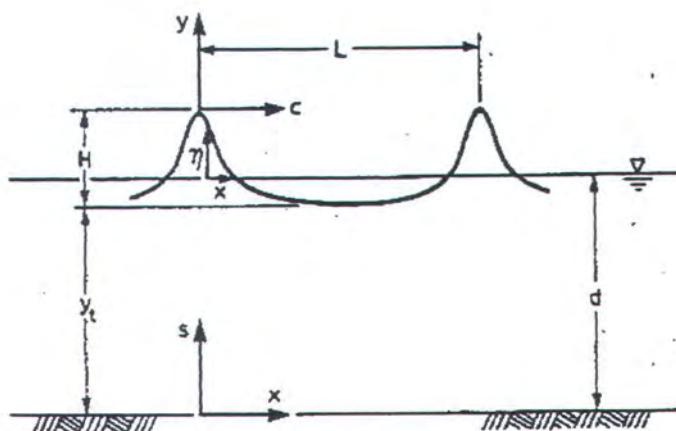
$$F3 = \frac{3(ka)^3}{64} \frac{11 - 2 \cosh 2kd}{\sinh^7 kd}$$

c. Teori Gelombang Cnoidal

Gelombang Cnoidal adalah gelombang periodik yang memiliki puncak tajam yang dipisahkan oleh lembah yang panjang. Umumnya gelombang Cnoidal terjadi di daerah dangkal. Teori ini berlaku apabila perbandingan $d/L < 1/8$ dan parameter Ursell $U_R > 26$.

Parameter Ursell didefinisikan $U_R = HL^2/d^3$.

Gambar II.6 menunjukkan profil permukaan gelombang Cnoidal dengan beberapa parameter.



Gambar 2.5 Profil Gelombang Cnoidal (Chakrabarti, 1987)

Teori Cnoidal diekspresikan oleh tabulasi fungsi eliptik dan integral. Profil permukaan gelombang Cnoidal merupakan fungsi dari k dan frekuensi, dan dirumuskan seperti pada persamaan berikut :

$$y_s = y_T + H \operatorname{cn}^2(kx - \omega t, m) \quad (36)$$

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

Horisontal :

$$u = \sqrt{gd} \in (cn^2 q - h_1) + \epsilon^2 \left\{ \left(f_1 + f_2 cn^2 q - cn^4 q \right) - \frac{3}{4\kappa^2} \left(\frac{s}{d} \right)^2 \left[\kappa'^2 + 2(2\kappa^2 - 1)cn^2 q - 3\kappa^2 cn^4 q \right] \right\} + 0[\epsilon^3] \quad (37)$$

Vertikal :

$$w = \sqrt{gd} \frac{\epsilon \sqrt{3}}{\kappa} \left(\frac{s}{d} \right) cnqdnqsnq \left\{ 1 + \epsilon \left[f_3 - 2cn^2 q - \left(\frac{s}{d} \right)^2 \left(\frac{2\kappa^2 - 1}{2\kappa^2} - \frac{3}{2} cn^2 q \right) \right] + 0[\epsilon^2] \right\} \quad (38)$$

Percepatan partikel air (Sarpkaya, 1981) :

Horisontal

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

(39)

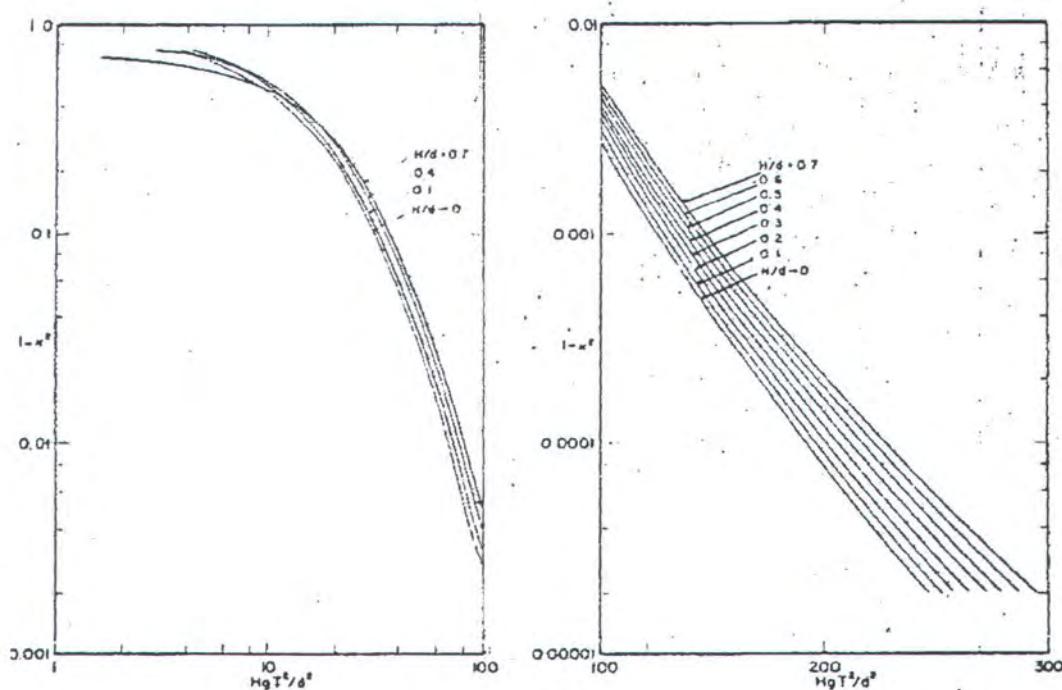
Vertikal

$$\frac{\partial w}{\partial t} = g \frac{3\epsilon^2}{2\kappa^2} \left(\frac{s}{d} \right) \left(\kappa'^2 + 2(2\kappa^2 - 1)cn^2 q - 3\kappa^2 cn^4 q \right) + 0[\epsilon^3] \quad (40)$$

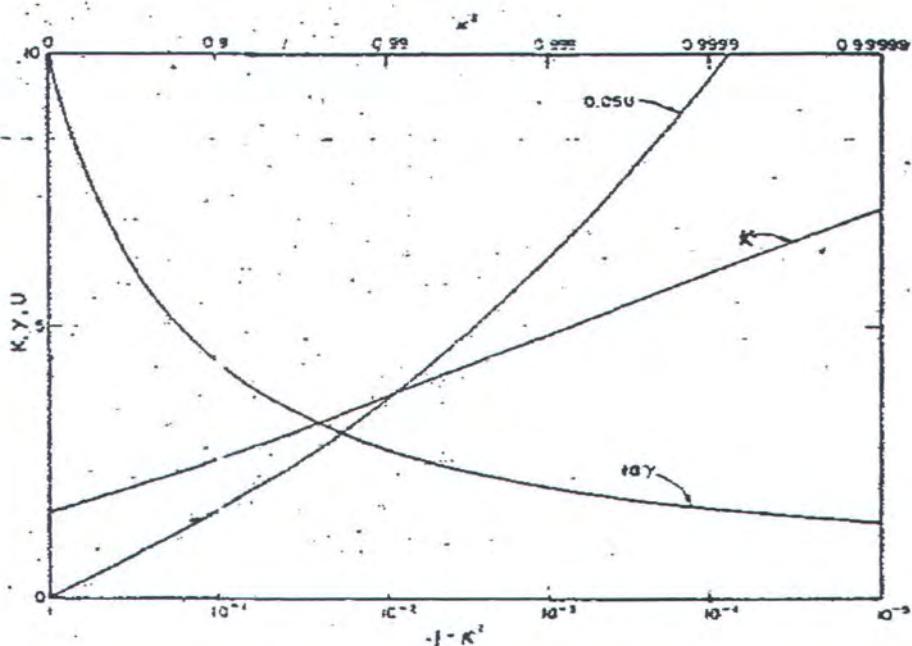
Keterangan :

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{H}{d} \\ \kappa'^2 &= 1 - \kappa^2 \\ h_1 &= \frac{(\gamma - \kappa'^2)}{\kappa^2} \\ h_2 &= \frac{\{\gamma (\kappa^2 - 2) + 2\kappa'^2\}}{4\kappa^4} \\ f_1 &= \frac{\{-\gamma (6\gamma + 11\kappa^2 - 16) + \kappa'^2 (9\kappa^2 - 10)\}}{12\kappa^4} \\ f_2 &= \frac{(2\gamma + 7\kappa^2 - 6)}{4\kappa^2} \\ f_3 &= \frac{(16\gamma + 19\kappa^2 - 22)}{8\kappa^2} \\ f_4 &= \frac{(4\gamma + 15\kappa^2 - 14)}{8\kappa^2} \end{aligned}$$

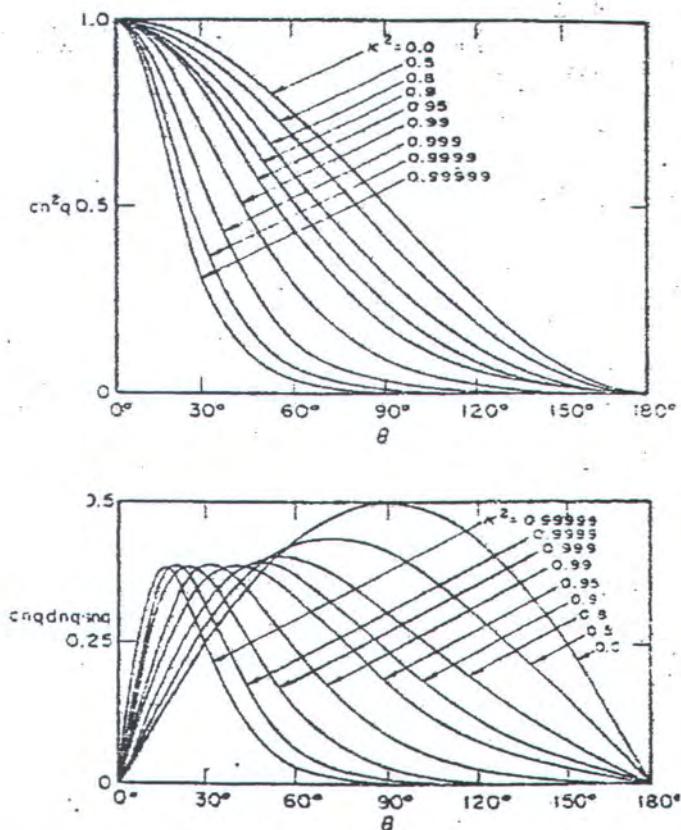
Dalam menentukan parameter-parameter diatas dapat ditentukan dari grafik-grafik berikut ini.



Gambar 2. 6 Variasi $1-k^2$ dan HgT^2/d^2 untuk berbagai H/d (Sarpkaya, 1981).



Gambar 2. 7 Variasi fungsi Jacobian elliptik modulus k (Sarpkaya, 1981).



Gambar 2. 8 Variasi $\text{cn}^2 q$ dan cnqdnqsnq dengan sudut fase untuk berbagai nilai k (Sarpkaya, 1981).

2.2.4 Kecepatan Partikel Air Efektif

Kecepatan partikel air efektif dirumuskan sebagai integral dari kuadrat kecepatan arus (V) yang melintasi pipa dibagi dengan diameter pipa (D) (Mousselli, 1981).

$$V_e^2 = \frac{1}{D} \int_0^D V^2(y) dy \quad (41)$$

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

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{y}{y_0} \right)^{1/7} \quad (42)$$

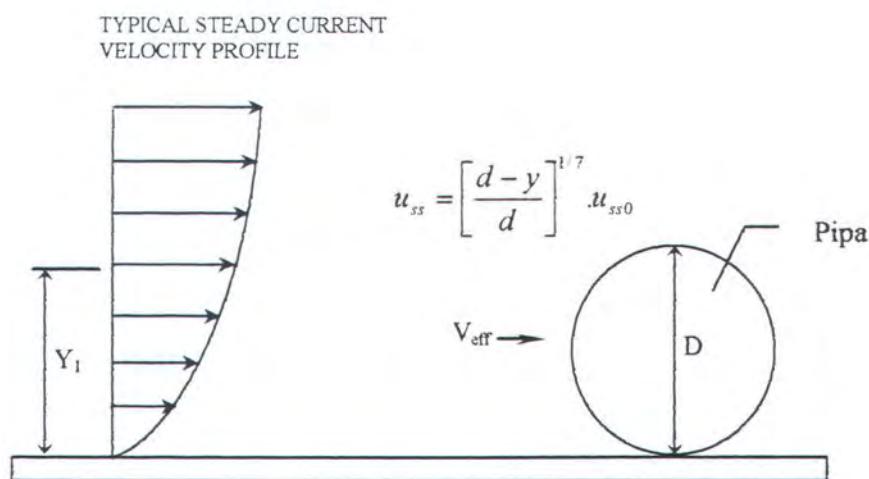
Dimana :

V = Kecepatan partikel air pada ketinggian y dari seabed, $m/detik$.

V_0 = Kecepatan pada ketinggian y_0 dari dasar laut, $m/detik$.

y_0 = Ketinggian V_0 dari dasar laut, m .

y = Ketinggian V dari dasar laut, m .



Gambar 2. 9 Distribusi kecepatan arus menurut kedalaman (Mousselli, 1981)

Dengan mensubstitusikan persamaan (41) dan (42) diatas, maka akan didapatkan :

$$V_e^2 = 0.778 V_0^2 \left(\frac{D}{y_0} \right)^{0.286} \quad (43)$$

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

$$V_N = V_{abs} \cos \theta \quad (44)$$

Keterangan : V_N = Kecepatan Normal, m/detik.

V_{abs} = Kecepatan absolut, m/detik.

2.2.5 Gaya-gaya Hidrodinamis

Gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa yang terbenam/meletak di dasar laut, seperti gaya *drag*, gaya *inersia* dan gaya angkat, terjadi akibat adanya gerakan relatif antara pipa dengan fluida disekitarnya. Dengan adanya gerakan relatif ini, maka akan timbul kecepatan dan percepatan relatif partikel air. Gerakan ini dapat disebabkan oleh gelombang dan arus.

a. Gaya Drag (Drag Force)

Gaya drag yang bekerja pada struktur pipa di dasar laut persatuan panjang pipa dirumuskan berikut ini (Mousselli, 1981) :

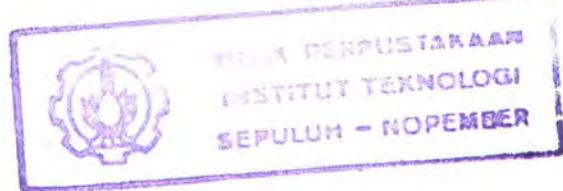
$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D U_e^2 \quad (45)$$

Dimana :

ρ = Densitas fluida, kg/m^3

C_D = Koefisien Drag

D = Diameter terluar pipa, m



U_e = Kecepatan efektif partikel, $m/detik$.

b. Gaya Inersia (Inertia Force)

Gaya Inersia yang bekerja pada struktur pipa persatuan panjang dirumuskan sebagai berikut (Mousselli, 1981) :

$$F_I = \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{dU}{dt} \quad (46)$$

Keterangan :

ρ = Densitas fluida, kg/m^3

D = Diameter terluar pipa, m

dU/dt = Percepatan horizontal partikel air, $m/detik^2$

C_M = Koefisien Inersia

c. Gaya Angkat (Lift Force)

Gaya Angkat (*Lift Force*) yang bekerja pada struktur pipa bawah laut, diformulasikan sebagai berikut (Mousselli, 1981) :

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L D U_e^2 \quad (47)$$

Keterangan :

ρ = Densitas fluida, kg/m^3

D = Diameter terluar pipa, m

U_e = Kecepatan efektif aliran, m/s

C_L = Koefisien Lift

d. Koefisien Hidrodinamis

Satu hal yang sangat penting dalam menghitung gaya-gaya hidrodinamis adalah menentukan koefisien masing-masing gaya tersebut, yaitu koefisien *drag* (C_D), koefisien *Inersia* (C_M) dan koefisien *lift* (C_L). Penentuan ketiga koefisien ini tergantung pada bilangan-bilangan tertentu, yaitu (Germanischer Llyod, 1995) :

- > Bilangan Reynold (*Reynolds Number*), Re .

Bilangan Reynold (Re) dirumuskan $Re = \frac{UD}{\nu}$, ν adalah viskositas kinematis fluida, untuk air laut $\nu = 1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

- > Bilangan Keulegan – Carpenter, KC .

Bilangan KC dirumuskan $KC = \frac{U_e T}{D}$. T adalah periode gelombang dan D adalah diameter terluar pipa.

- > Kekasaran permukaan pipa, $\frac{k}{D}$.

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

- ✓ Pipa yang dicat : $k = 5 \times 10^{-6} \text{ m}$.
- ✓ Pipa yang berkarat: $k = 3 \times 10^{-3} \text{ m}$.
- ✓ Lapisan Beton : $k = 3 \times 10^{-3} \text{ m}$.
- ✓ *Marine Growth* : $k = 5 \times 10^{-3} \text{ m}$ hingga $5 \times 10^{-2} \text{ m}$.
- ✓ Jarak antara pipa dan bidang batas (*proximity effect*), $\frac{h}{D}$.

Tabel 2.3 Harga Koefisien Hidrodinamis Untuk Pipa Bawah Laut (Mouselli, 1981)

R_e	C_D	C_L	C_M
$R_e < 5 \times 10^4$	1.3	1.5	2.0
$5 \times 10^4 < R_e < 10^5$	1.2	1.0	2.0
$10^5 < R_e < 2,5 \times 10^5$	$1.53 - \frac{R_e}{3 \times 10^5}$	$1.2 - \frac{R_e}{5 \times 10^5}$	2.0
$2,5 \times 10^5 < R_e < 5 \times 10^5$	0.7	0.7	$2.5 - \frac{R_e}{5 \times 10^5}$
$5 \times 10^5 < R_e$	0.7	0.7	1.5

2.3 DASAR TEORI OPTIMASI

Optimasi adalah sesuatu yang dilakukan untuk mendapatkan hasil yang terbaik untuk kondisi yang tersedia dalam desain, konstruksi (pemeliharaan untuk semua *engineering*). Ada beberapa tahap yang harus dilakukan sebelum mengambil keputusan. Tujuan dari optimasi adalah untuk memperoleh hasil yang maksimal ataupun minimal dimana hal tersebut dapat dikatakan optimum.(RAO, 1984)

2.3.1 Statement Persoalan Optimasi

Persoalan matematis atau optimasi dapat dinyatakan sebagai berikut (RAO, 1984) :

$$\text{Dapatkan } X = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{Bmatrix} \text{ untuk meminimalkan } f(x)$$

Dengan kendala :

$$G_j \leq 0, j = 1, 2, \dots, m \text{ dan}$$

$$L_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, p$$

Dimana X adalah suatu n dimensi dari vektor yang dinamakan vektor desain, f(X) disebut fungsi obyektif, dan Gj(X) dan Lj(X) adalah *inequality* dan *equality constraint*.

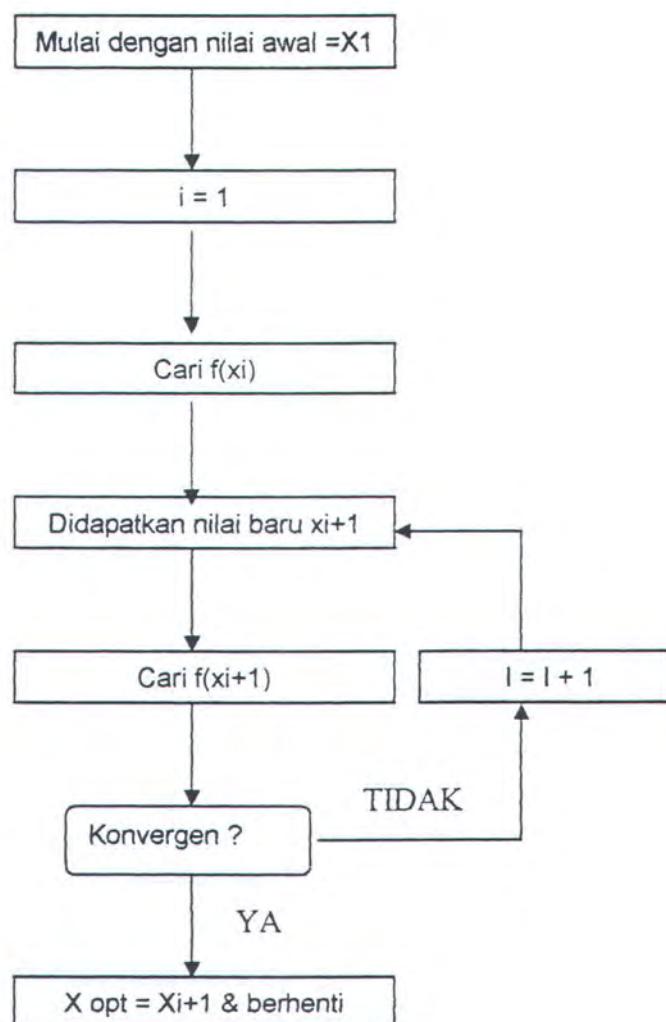
2.3.2 Optimasi Persoalan Non Linear

Persoalan nyata sehari hari yang praktis umumnya adalah persoalan non-linear berdimensi n (jumlah variable keputusannya adalah n, yaitu X1, X2, ..., Xn). Persoalan seperti ini dapat diselesaikan dengan dua skenario penyelesaian : skenario penyelesaian langsung dan tidak langsung.

Dalam penyelesaian langsung, pada awal proses optimasi pengambil keputusan perlu menentukan variable keputusan X sembarang, untuk kemudian X secara bertahap secara *iterative* diubah hingga mendekati X yang optimum, yaitu pada saat kriteria konvergen tercapai. Perubahan variabel keputusan secara bertahap ini dilakukan melalui persamaan rekurens (sering disebut *driving function*) berikut ini :

$$X_{i+1} = X_i + \alpha = D_i \quad (48)$$

Dimana i adalah interasi ke- i ; α adalah sebuah skalar yang merupakan panjang langkah; dan D adalah vektor arak perubahan. Dalam scenario ini, persoalan optimasinya dapat dibagi menjadi dua, yaitu : 1) menentukan arah perubahan variabel keputusan X , dan 2) menentukan panjang langkah α . Dalam skenario seperti ini, begitu D dapat dihitung, persoalan optimasi berdimensi n diubah menjadi persoalan optimasi berdimensi tunggal dalam α . Untuk itu perlu dibahas juga secara ringkas metode optimasi berdimensi tunggal. Penentuan D akan ditentukan oleh ada tidaknya kendala yang harus dipenuhi. Algoritma dasar skenario penyelesaian langsung ini dapat dilihat dalam diagram :



Skenario umum penyelesaian langsung secara *iterative*

Iterasi dihentikan apabila konvergensi telah dicapai, yaitu kondisi dimana :

$$|X_{i+1} - X_i| \leq \epsilon \quad (49)$$

$$\left\| \frac{f(X)_{i+1} - f(X)_i}{f(X)_i} \right\| \leq \delta \quad (50)$$

Dimana ϵ dan δ adalah bilangan yang sangat kecil, katakana 10^{-2} .

Dalam skenario langsung ini, dari segi ada dan tidaknya kendala dalam persoalan optimasi yang ditinjau, tersedia dua kategori prosedur optimasi, yaitu :

1. prosedur pelacakan langsung (*direct search*) dan
2. prosedur transformasi, dimana persoalan optimasi berkendala diubah menjadi serangkaian persoalan optimasi tanpa kendala (*Sequential unconstrained optimizations*). Untuk itu perlu dibahas pula teknik-teknik optimasi tanpa kendala.

Dalam skenario penyelesaian tak langsung, disusun kriteria optimal yang berlaku pada persoalan optimasi yang ditinjau. Kriteria optimal adalah satu set persamaan yang bila dipenuhi, penyelesaian atas sistem persamaan ini merupakan persoalan optimum yang dicari.

2.3.3 Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT)

Tujuan yang utama dari metode optimasi SUMT adalah untuk meminimalkan fungsi obyektif pada persoalan optimasi berkendala menjadi persoalan optimasi tanpa kendala yang mana memberikan beberapa *penalty* untuk membatasi pelanggaran terhadap kendala (Vanderplaats, 1984). Pada tahap terakhir disekitar titik optimum, penyelesaian sub-persoalan tanpa kendala mendekati penyelesaian aslinya.

Transformasi dari persoalan optimasi berkendala menjadi persoalan optimasi tanpa kendala dilakukan dengan membentuk suatu criteria optimasi baru, yang disebut *pseudo criteria*, yang diperoleh dengan bentuk sebagai berikut :

$$\Phi(X, r) = f(x) + r_p P(X) \quad (51)$$

$P(X)$ adalah parameter hukuman yang bentuknya dapat dipilih dari beberapa alternatif. Skalar $r p$ adalah sebuah pengali yang menentukan besarnya hukuman, dan r dipertahankan tetap selama keseluruhan proses optimasi tanpa kendala; p adalah indek transformasi ke- p .

2.3.4 Interior Penalty Function Method

Metode ini memberikan serangkaian rancangan yang *feasibel*, namun persoalan optimasinya lebih rumit. Perbedaannya dengan metode *eksterior* adalah pada bentuk $P(X)$ yang dipergunakan, serta parameter skalar sp justru diperkecil, bukan diperbesar.

Bentuk $P(X)$ yang paling banyak dipakai mungkin adalah sebagai berikut :

$$P(X) = \sum_{j=1}^m \frac{-1}{g_j(X)} \quad (52)$$

Persamaan *Sequential Unconstrained Minimization Technique* untuk mendapatkan *pseudo function objektif* yang memiliki *inequality constrain* adalah :

$$\phi(X, rp) = F(X) + rp \sum_{j=1}^m \frac{-1}{g_j(X)} \quad (53)$$

Dan dengan menambah *equality constrain* didapat *pseudo function objectif* sebagai berikut :

$$\phi(X, rp) = F(X) + r' p \sum_{j=1}^m \frac{-1}{g_j(X)} + rp \sum_{k=1}^l [h_k(X)]^2 \quad (54)$$

Dimana kita akan membawa h_k menuju ke nol (0).

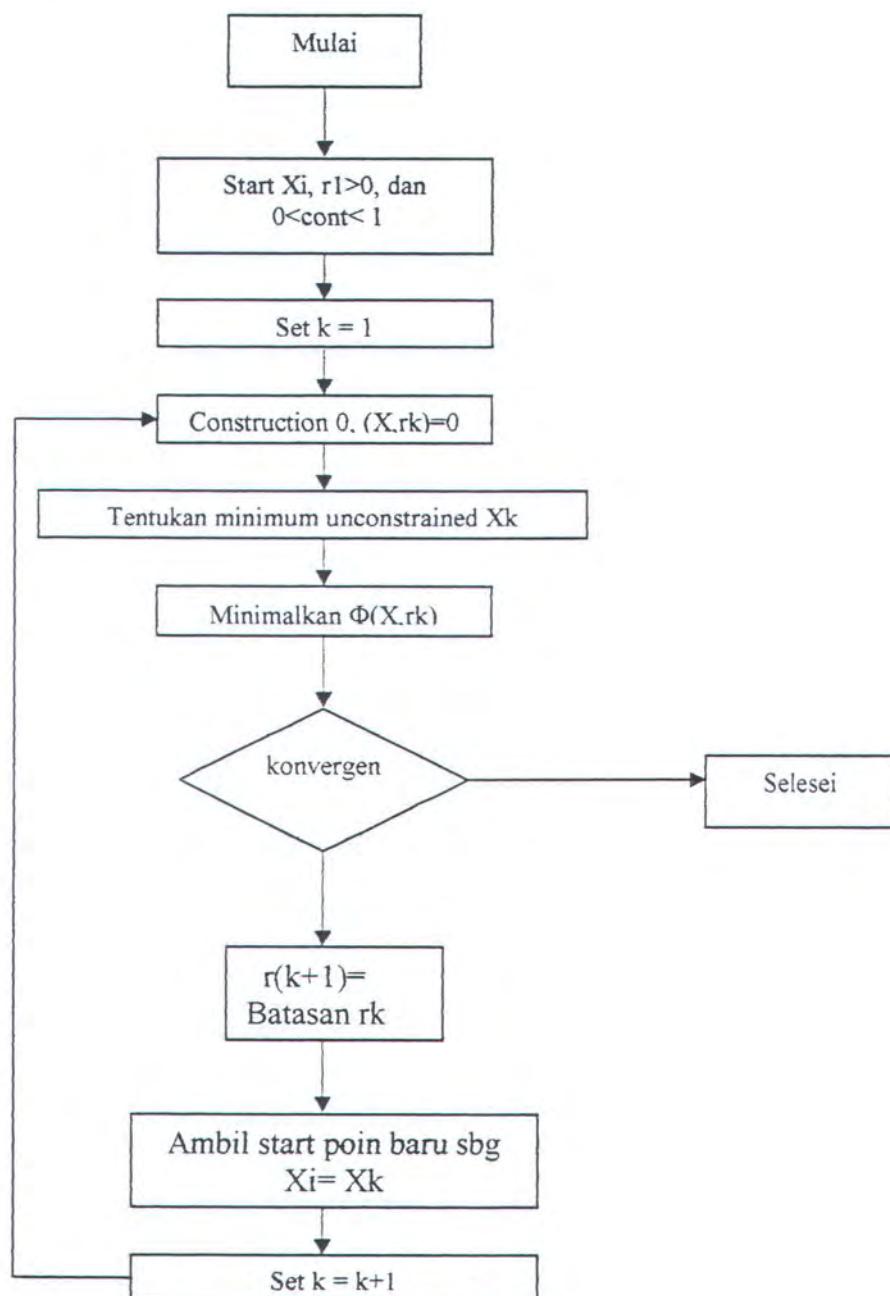
Bentuk alternatif yang lain adalah :

$$P(X) = \sum_{j=1}^m -\log [-g_j(x)] \quad (55)$$

Persamaan ini lebih sering baik untuk persoalan yang numeris.

Bentuk yang kedua pada sisi kanan adalah yang membedakan apakah fungsi tersebut *interior* atau *eksterior*. Untuk mendapatkan daerah yang *feasibel* maka $g_j(X)$ harus non positif, harga $-1/g_j(X)$ akan positif mendekati tak terhingga sebagaimana $g_j(X) \rightarrow 0$. Parameter penalti $r'p$ digunakan untuk membedakan dengan rp , dimana rp dengan harga yang relatif kecil (positif) dan kemudian membesar. Sedangkan harga $r'p$ relatif besar untuk awalnya dan kemudian menurun (mengecil). Disini harga $r'p$ dikalikan dengan γ' sehingga multiplier. Setiap selesaikan *Unconstrained Minimization* dimana harga γ' kurang

dari 1 misalnya $\gamma' = 0,3$. Kendala yang optimum didekati dari sisi dalam daerah yang feasible sebagaimana $r' p \rightarrow 0$. fungsi akan *discontinuous* pada batasan dimana $g_j(X) = 0$. Oleh karena itu ekstrem caution harus digunakan untuk mengembangkan *one dimensional search* algoritma untuk menyakinkan bahwa daerah *feasible* yang minimum ditemukan. Kali ini biasanya mudah dilakukan dengan metode *golden section*. Tapi lebih *ingenuity* jika *polynomial interpolation* digunakan.



Algoritma Metode Hukuman Interior

2.3.5 Scalling of The Constraint

Bentuk umum dari persamaan (SUMT) tersebut hanya memiliki satu parameter tunggal sebagai faktor pengali. Hal ini sering menimbulkan kesulitan numeris yang terjadi karena satu fungsi kendalanya memiliki harga yang berbeda atau berubah lebih cepat dari yang lain dan karena itulah fungsi kendala tersebut menjadi dominan dalam mempengaruhi proses optimasi. Terlepas dari yang kita diskusikan, kita menormalkan kendala-kendala yang ada. Oleh sebab itu order dari $G_j(X)$ adalah *unity*. Hal ini meningkatkan pengkondisian persoalan optimasi dan selalu harus lebih dahulu dilakukan ketika memformulasikan persoalan sebagai alternatif proses. Normalisasi dapat dilakukan didalam optimasi dengan menggunakan parameter penalti yang berbeda untuk tiap kendala. Hal ini lebih sulit karena kita tidak membuat hal yang sama dalam program optimasi yang digunakan dalam memformulasikan persoalan. Normalisasi juga bukan optimasi keseluruhan. Hal ini muncul ketika laju perubahan kendala lebih merupakan hal yang kritis, dimana hal ini lebih berhubungan dengan normalisasi, bagaimanapun juga detail matematikanya berubah. Lebih dari itu, *additional scaling* lebih memuaskan jika diselesaikan dalam program optimasi itu sendiri.

Untuk menskala setiap kendala disini sehingga *gradient* dari kendala berharga sama dengan *gradient* dari fungsi obyektif. Hal ini menyediakan dua pilihan. Pertama, hal ini dapat menjamin bahwa kurva dari fungsi *pseudo obyektif* tidak didominasi oleh satu kendala.

BAB III
METODOLOGI

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 GAMBARAN UMUM

Metode optimasi digunakan untuk mencari tebal optimum dengan fungsi obyektif adalah biaya pemasangan minimal. Agar hasil rancangan memenuhi kelayakan terdapat beberapa kendala. Kendala tersebut antara lain harus mampu menahan tekanan dari dalam pipa maupun dari luar pipa, tidak boleh terjadi buckling, dan memenuhi faktor desain pipa. Melihat adanya kendala tersebut, maka metode optimasi yang dipakai adalah dengan metode optimasi dengan kendala. *Sequential Unconstrained Minization Techniques (SUMT)* digunakan untuk mengubah persoalan optimasi berkendala menjadi tanpa kendala. Kendala yang ada antara lain : tegangan geser, tegangan longitudinal, tegangan ekuivalen , Buckling lokal, perambatan bucking, serta faktor desain pipa. Untuk membatasi pelanggaran yang terjadi pada kendala, dipakai penalty parameter yaitu *interior penalty* yang membentuk *pseudo obyektif function* baru yang memiliki *penalty* parameter. Kemudian diteruskan optimasi tanpa kendala dengan menggunakan metode *steepest descent*. Pencarian arah dan perhitungan dengan metode *one dimensional search* menggunakan metode *golden section*. Kemudian persoalan optimasi diselesaikan dengan menggunakan *Sofware optimasi SOLVER*. Dan apabila tidak didapatkan konvergensi maka perlu dilakukan pengecekan terhadap model optimasinya, dan kalau perlu model optimasinya dirubah.

Setelah didapat tebal pipa yang optimal, maka dilakukan analisa perbandingan antara tebal yang didapat dengan data. Sehingga akan diketahui dari keduanya mana yang efektif dari segi biaya. Setelah itu kita lakukan analisa terhadap output yang diperoleh dengan menganalisa kendala kendala yang aktif mempengaruhi fungsi obyektif. Langkah selanjutnya adalah melakukan pengecekan hasil optimasi tebal dengan melakukan tes hidrostatis dan pengecekan berat minimal dari pipa terhadap gaya-gaya yang bekerja pada pipa apakah pipa cukup stabil meletak di dasar laut, kemudian dilakukan analisa *free span* dan *vortex shedding*. Terakhir adalah menetukan alternatif sistem proteksi pada pipa.

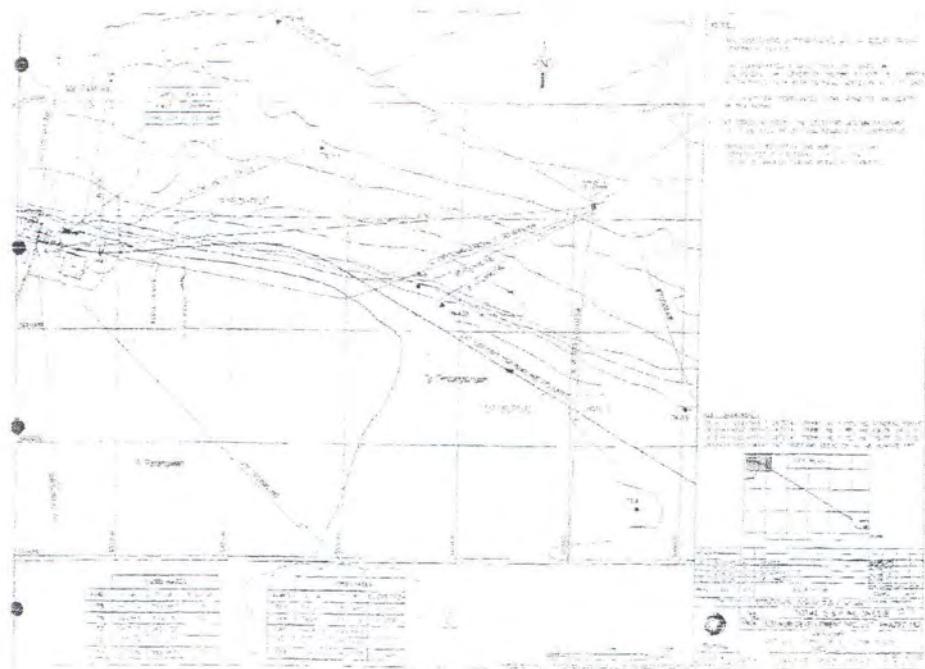
3.2 STUDI LITERATUR

Studi literatur akan memberikan kejelasan dan pemahaman dalam optimasi menentukan ketebalan pipa agar pipa mempunyai berat minimal sehingga syarat stabilitas dapat terpenuhi. Juga dipelajari gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa, pemahaman teori gelombang, kecepatan dan percepatan partikel air dan pemahaman terhadap *buckling*.

3.3 PENGUMPULAN DATA

3.3.1 Data Produksi

Pipa lepas pantai milik Total Indonesia adalah pipa gas yang menghubungkan MWPS *Platform* dengan SNPS *Platform*. Kedua *Platform* berada di lapangan gas Sisi dan lapangan gas Nubi pada Perairan Tunu, Kalimanatan Timur. Jalur pipa ini membentang sepanjang 24 km. Direncanakan, instalasi pipa akan dimulai dari dua tempat secara bersamaan. Untuk bagian pertama akan diinstalasi dari lepas pantai (MWPS *Platform*) menuju pantai sepanjang 7,5 km. Pada bagian yang kedua akan diinstalasi dari pantai (SNPS *Platform*) menuju lepas pantai sepanjang 16,5 km. Kemudian kedua pipa tersebut disambung ditengah laut. Untuk penelitian ini, hanya akan membahas optimasi pipa yang akan membentang dari sisi yang pertama. Gambar 3.1 akan memperlihatkan sketsa bentangan pipa dari MWPS *Platform* menuju SNPS *Platform*.



Gambar 3.1 Jalur Pipa Dari SNPS menuju MWPS

Untuk data tekanan, temperatur, dan data operasi produksi dapat dilihat pada tabel 3.1

Tabel 3.1:Data Desain Tekanan, Temperatur, Operasi Produksi

<i>TYPE OF LINE</i>	<i>Exsport Trunkline</i>
<i>FLUID</i>	<i>Gas, Condensate, Water</i>
<i>DESIGN PRESSURE</i>	<i>120 bar</i>
<i>AVERAGE OPERATING TEMP.</i>	<i>80°C</i>
<i>DESIGN TEMPERATUR</i>	<i>100°C</i>
<i>AVERAGE SEALINE TEMPERATUR</i>	<i>71°C</i>
<i>FIELD HIDROTEST PRESSURE</i>	<i>180 bar</i>
<i>FIUIDS DENSITY AT OPERATING</i>	<i>101,8 kg/m³</i>

3.3.2 Data Material Propertis Pipa

Data material propertis yang digunakan untuk perhitungan awal dalam permodelan optimasi adalah pipa yang rencananya akan digunakan oleh Total Indonesia. Data tersebut dapat dilihat pada tabel 3.2

Tabel 3.2:Data Material Propertis Pipa

TYPE	API 5 L X-65
Modulus Young's	206000 Mpa
Poisson's Ratio	0,3
Koefisien Thermal Expansion	$11,7 \times 10^{-5}/C$
SMYS	448 Mpa
Diameter Dalam	24 inc
Tebal Pipa	1 inc

3.3.3 Data Lingkungan

Lokasi pipa gas bawah laut berada di koordinat $09^{\circ}931.867'$ lintang utara dan $05^{\circ}60.532'$ lintang timur. Penentuan tinggi gelombang signifikan (H_s) berdasarkan data dari Total Indonesia. Arah datang gelombang maksimum dari arah Timur Laut, dengan tinggi gelombang maksimum 5,7 meter dan minimum 3,4 meter. Tinggi gelombang sinifikan (H_s) 3 meter dan periode gelombang sinifikan (T_s) 9 detik. Kecepatan arus pasang surut pada permukaan air 0.8 m/sekon. Data tinggi gelombang harian selengkapnya dapat dilihat pada lampiran data lingkungan.

Variasi kedalaman pipa berkisar antara 10 sampai dengan 82,5 meter. Berdasarkan posisi dimana pipa meletak, maka diperoleh tabulasi kedalaman dan panjang pipa, seperti diberikan dibawah ini

Tabel 3. 3 : Kedalaman dan panjang pipa

KEDALAMAN LAUT (m)	PANJANG PIPA (m)
10	0
15	187,5
20	125
25	125
30	375
35	375
40	250
45	250
50	562,5
55	625
60	375
65	1125
70	1000
75	625
80	1000
82,5	500

3.4 MODEL OPTIMASI

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penyusunan model optimasi pada tugas akhir ini adalah :

1. Pemilihan Desain Variabel
 X = Tebal pipa
2. Permodelan Fungsi Obyektif

Dalam permodelan optimasi, fungsi obyektif yang dimodelkan adalah biaya instalasi pipa minimal. Data yang digunakan adalah data untuk pipa dengan diameter dalam 24 inchi. Faktor ketebalan mengakibatkan perubahan harga dalam biaya pemasangan.

Data biaya Instalasi seperti dibawah ini :

**TABEL 3.4 BIAYA INSTALASI PIPA BERDASAR KETEBALAN PIPA
JENIS X-65 (GEOCEAN, 2004)**

TEBAL PIPA (INCHI)	HARGA (\$)
0,25	175,4
0,5	425,66
0,644	480
1	800

Dari data berbentuk tabel tersebut akan dibuat persamaan agar dapat digunakan sebagai fungsi obyektif dalam permodelan optimasi. Dengan menggunakan interpolasi Newton persamaan fungsi obyektif adalah sebagai berikut :

$$3501t^3 - 6463,7t^2 + 4317t - 554,58$$

3. Permodelan Kendala

- Faktor desain dari pipa harus lebih besar dibanding dengan tekanan dalam yangmengenai pipa.

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

- Batasan terhadap tegangan tangensial tidak boleh melebihi desain faktor dari tegangan tangensial dikalikan *specifik Minimum Yield Strength* material.

$$G(2) = (p_i - p_e) \frac{D - t}{2t} \leq \eta h . S M Y S . k$$

- Batasan terhadap tegangan longitudinal tidak boleh melebihi desain faktor dari tegangan longitudinal dikalikan *Specific Minimum Yield Strength* material.

$$G(3) = \sigma a + \frac{\Delta Pe . A_0}{A} + P_i \leq 0,6 S M Y S$$

- Batasan terhadap tegangan gabungan tidak boleh melebihi desain faktor tegangan gabungan dikalikan *Specifik Minimum Yield Strength* material.

$$G(4) = \sqrt{(\sigma h^2 + \sigma leff^2 - \sigma h \sigma leff + 3\sigma a^2)} \leq \eta eSMYS$$

- *Critikal buckling* harus lebih besar dari tegangan desain pipa

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

- Perambatan *Buckling* harus lebih besar dari tegangan desain pipa

$$G(6) = 1,15\pi S \left(\frac{t}{D} \right)^2 \geq Pd$$

3.5 PROGRAM OPTIMASI NON LINEAR

Untuk membantu pekerjaan tugas akhir digunakan suatu program optimasi non linear yang terdapat pada Microsoft EXCELL yaitu SOLVER. Presisi yang digunakan sebesar 0,00001 dengan panjang langkah awal 5 % dan konvergensi 0,0001.

Susunan Model Optimasinya Adalah :

Minimalkan :

$$F(t) = 3501t^3 - 6463,7t^2 + 4317t - 554,58$$

Dengan kendala yang membatasi :

$$G(1) = \frac{130000t}{(24+t)} - 1740,45 \geq 0$$

$$G(2) = 1617,64 \frac{D-t}{2t} \leq 46800 \text{ psi}$$

$$G(3)$$

$$\frac{1617,64}{2((24+2t)^2 - (24)^2)t} + \frac{1617,64x(0,25x\pi(24+2t)^2)}{((24+2t)^2 - (24)^2)} + 1740,02 \leq 39000 \text{ psi}$$

$$G(4) = \sqrt{(\sigma h^2 + \sigma leff^2 - \sigma h \sigma leff + 3\sigma a^2)} \leq 58500 \text{ psi}$$

$$G(5) = 5,97 \times 10^7 \frac{t}{D} \left(\frac{t}{D-t} \right)^2 \geq 171,33 \text{ psi}$$



$$G(6) = 1,15\pi \cdot 65000 \left(\frac{t}{D}\right)^2 \geq 171,33 \text{ psi}$$

3.6 ANALISA HASIL PERMODELAN

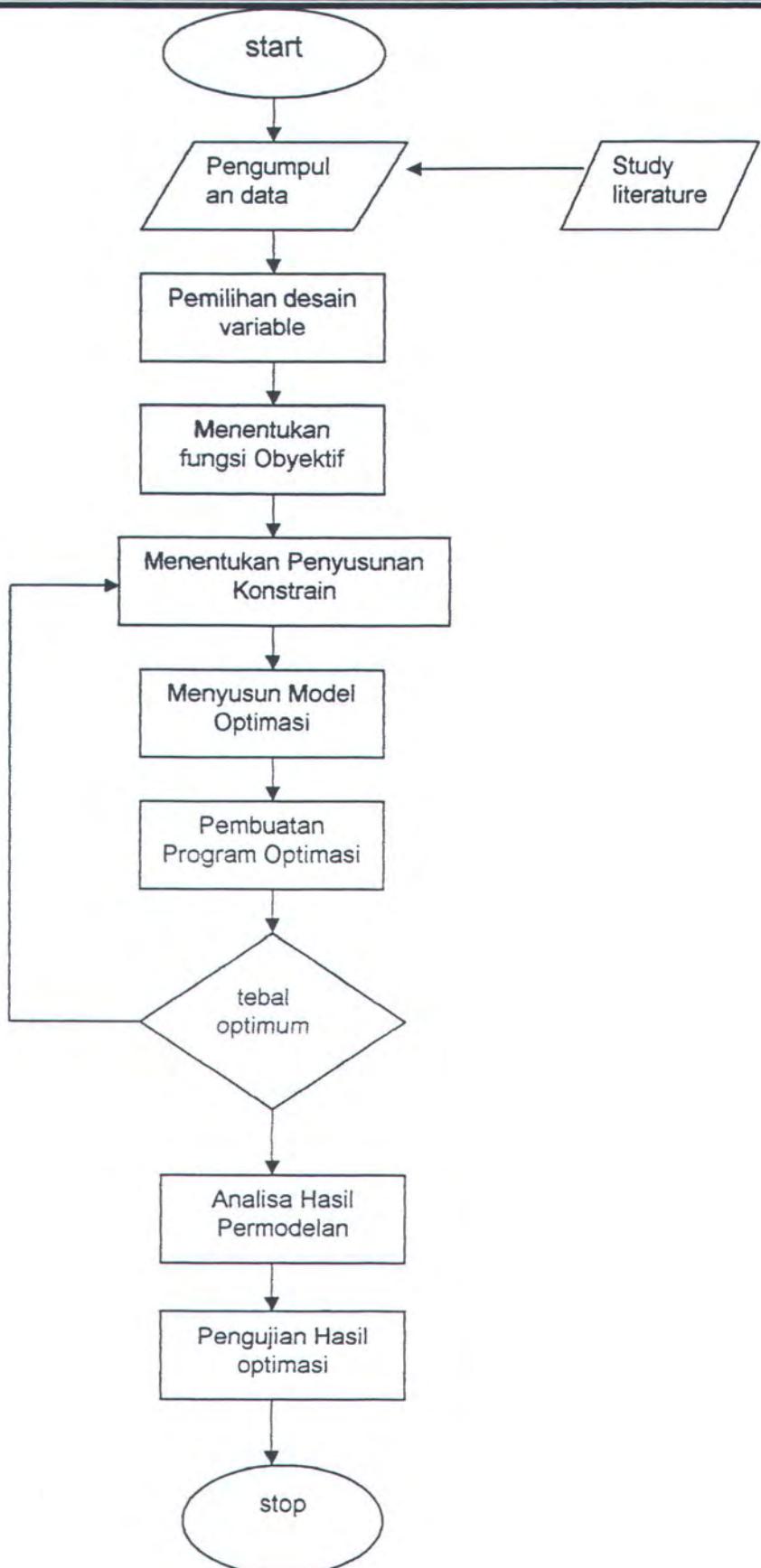
Setelah diperoleh hasil *Running* program maka dilakukan analisa hasil optimasi. Analisa tersebut meliputi :

- Variabel tebal optimum yang didapatkan
- Fungsi obyektif hasil permodelan
- Kendala yang aktif membatasi hasil optimasi pipa
- Analisa Sensitivitas Hasil Permodelan Optimasi

3.7 PENGUJIAN HASIL OPTIMASI

Meliputi tes hidrostatis serta berat minimal yang dibutuhkan pipa agar stabil terhadap gaya-gaya hidrodinamis yang mengenai pipa, kemudian penentuan metode proteksi yang tepat apabila dari kedua analisa diatas tidak tercapai syarat stabilitas.

Yang dapat digambarkan secara garis besar seperti pada diagram alir pengerjaan dibawah :



BAB IV
ANALISA DAN PEMBAHASAN

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 tangensial, tegangan longitudinal, tegangan gabungan, tekanan kritis *buckling*, perambatan *buckling* untuk pipa bawah laut. Tebal dimasukkan sebagai nilai awal dari desain variabel yang akan dioptimasikan.

4.1.1 Perhitungan Tekanan Eksternal Pipa

Tekanan eksternal pipa dapat dihitung dengan menggunakan rumusan berikut ini (persamaan 1) :

$$P_E \approx \rho_w g \left(d_H + \frac{1}{2} H \right)$$

$$d_H = 82,5 \text{ m}$$

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

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

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

maka tekanan eksternal pada pipa sebesar :

$$P_E = 843780 \text{ pascal}$$

$$= 122,379 \text{ psi}$$

4.1.2 Perhitungan Tekanan Dalam Desain

Dari data material propertis tekanan dalam desain dapat dihitung dengan menggunakan rumusan berikut ini (persamaan 3) :

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

$$F = 0,72$$

$$E = 1$$

$$T = 1$$

Maka tekanan dalam desain sebesar :

$$P_d = 3744 \text{ psi}$$

$$P_d \geq P_i$$

$$3744 \geq 1740,453$$

4.1.2 Perhitungan Tegangan Tangensial

Tegangan tangensial dapat dihitung dengan menggunakan rumusan (persamaan 4 dan 5) :

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

maka tekanan dalam desain sebesar :

$$\sigma h = 19416,88 \text{ psi}$$

$$\sigma h \leq \eta h \cdot SMYS_k$$

$$19416,88 \leq 46800 \text{ psi}$$

4.1.3 Perhitungan Tegangan Longitudinal

Tegangan longitudinal dapat dihitung dengan menggunakan rumusan (persamaan 6) :

$$\sigma l = \frac{1617,64}{2((24 + 2t)^2 - (24)^2)t} + \frac{1617,64 \times (0,25 \times \pi \times (24 + 2t)^2)}{((24 + 2t)^2 - (24)^2)} + 1740,02$$
$$\sigma l \leq 0,6SMYS$$

Maka tegangan longitudinal sebesar :

$$\sigma l = 22530,16 \text{ psi}$$

$$\sigma l \leq 0,6SMYS$$

$$22530,16 \leq 39000 \text{ psi}$$

4.1.4 Perhitungan Tegangan Gabungan

Tegangan gabungan dapat dihitung dengan menggunakan rumusan (persamaan 8) :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_h^2 + \sigma_{leff}^2 - \sigma_h\sigma_{leff} + 3\sigma_a^2)}$$

$$\sigma_{eq} = 21146,12 \text{ psi}$$

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

$$21146,12 \leq 58500 \text{ psi}$$

4.1.5 Perhitungan Tegangan Kritis Buckling

Tegangan kritis buckling dapat dihitung dengan menggunakan rumusan (persamaan 9) :

$$P_c = 2E \frac{t}{D} \left(\frac{t}{D-t} \right)^2$$

$$E = 206000 \text{ Mpa}$$

$$E = 2,987 \times 10^7 \text{ psi}$$

Maka tegangan kritis buckling sebesar :

$$P_c = 4963,984963 \text{ psi}$$

Sesuai dengan persamaan 10, bahwa P_c harus memenuhi syarat :

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

$$\gamma_m = 1,05$$

$$\gamma_u = 1,1$$

Maka :

$$4559,98 \geq 171,33 \text{ psi}$$

4.1.6 Perhitungan Perambatan *Buckling*

Perambatan *buckling* dapat dihitung dengan menggunakan rumusan (persamaan 12) :

$$P_p = 1,15\pi S \left(\frac{t}{D} \right)^2$$

maka perambatan buckling sebesar :

$$P_p = 375,544 \text{ psi}$$

4.2 HASIL PERANCANGAN OPTIMASI DAN PEMBAHASAN

Sebelum membahas secara detail hasil pemodelan 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 mempengaruhi kekuatan pipa terhadap tekanan yang bekerja pada pipa tersebut. Pada banyak kasus, kesalahan menentukan perbandingan diameter dan tebal menyebabkan pipa mengalami *buckling*. *Buckling* atau berubahnya bentuk pipa menjadi pipih merupakan salah satu penyebab kegagalan struktur pipa. Penentuan tebal yang optimal diperlukan agar pipa yang diletakkan di dasar laut Setelah didapatkan hasil dari permodelan optimasi maka langkah yang ditempuh adalah melakukan analisa hasil permodelan meliputi :

4.2.1 Tebal Dan Fungsi Obyektif

Dari optimasi yang dilakukan untuk tebal pipa pada pipa dengan grade material jenis X-65 PSL 2 didapatkan seperti terlihat pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 : Perubahan Variabel Tebal Pipa

NAMA	NILAI AWAL (INCHI)	NILAI AKHIR (INCHI)
TEBAL	1	0.56
DIAMETER	25	24.56

- Tebal pipa optimal = 0,56 inc
- Diameter tebal optimal = 24,56 inc

Dari Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa terjadi penurunan nilai variabel tebal sebesar :

$$\text{Tebal pipa yang berkurang} = \frac{1 - 0,56}{1} \times 100\% \\ = 44\%$$

Penurunan variabel tebal sebesar 44 % tersebut mengakibatkan diameter pipa menjadi tereduksi sebesar 1,76%. Penurunan tebal pipa secara langsung akan berakibat menurunkan biaya pemasangan pipa.

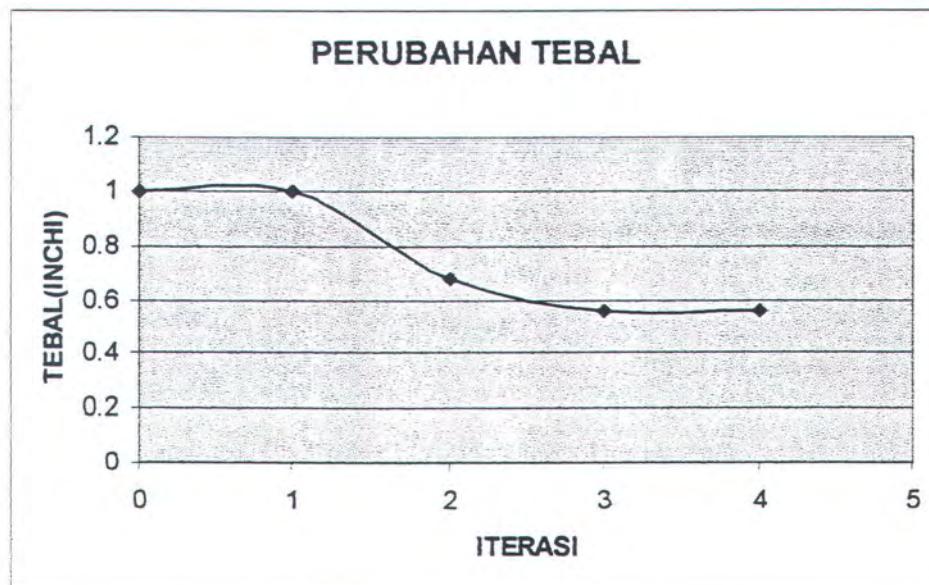
Tabel 4.2 : Minimisasi Fungsi Obyektif Pipa

F(X)	FUNGSI OBYEKTIIF	NILAI AWAL	NILAI AKHIR
Tebal Pipa	Biaya pemasangan	US \$ 797,51	US \$ 439,54

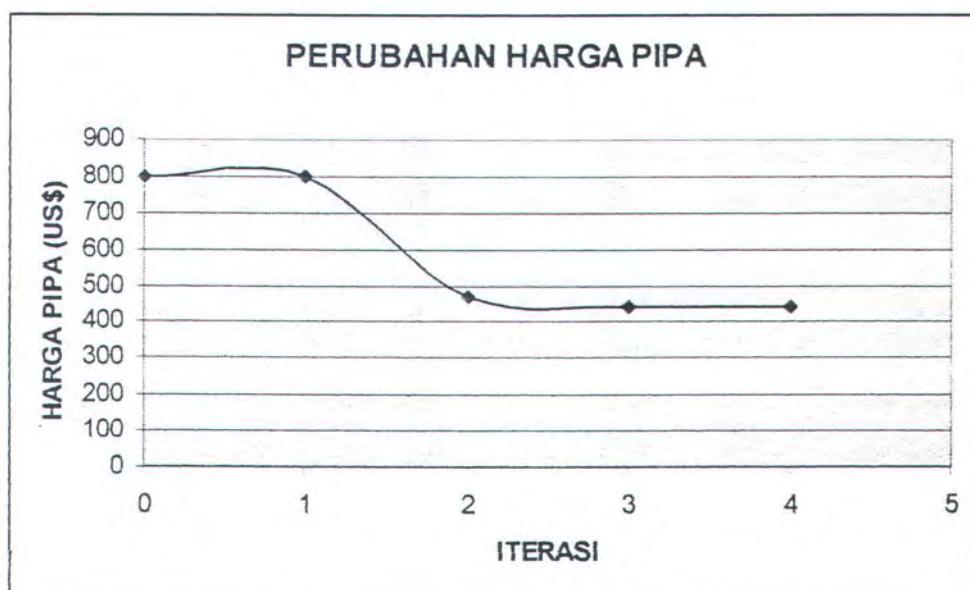
Dari hasil nilai tersebut diperoleh biaya pemasangan pipa yang tereduksi karena menurunnya nilai variabel desain adalah :

- Biaya pemasangan yang berkurang = $\frac{\text{US\$797,51} - \text{US\$439,54}}{\text{US\$797,51}} \times 100\% \\ = 44,89\%$

Grafik pada Gambar 4.1, Gambar 4.2 akan menunjukkan penurunan tebal serta fungsi obyektif biaya pemasangan pipa berdasarkan iterasi.



Gambar 4.1 : Grafik Perubahan Ketebalan Berdasarkan Iterasi



Gambar 4.2 : Grafik Perubahan Biaya Pemasangan Berdasarkan Iterasi

4.2.2 Kendala Optimasi

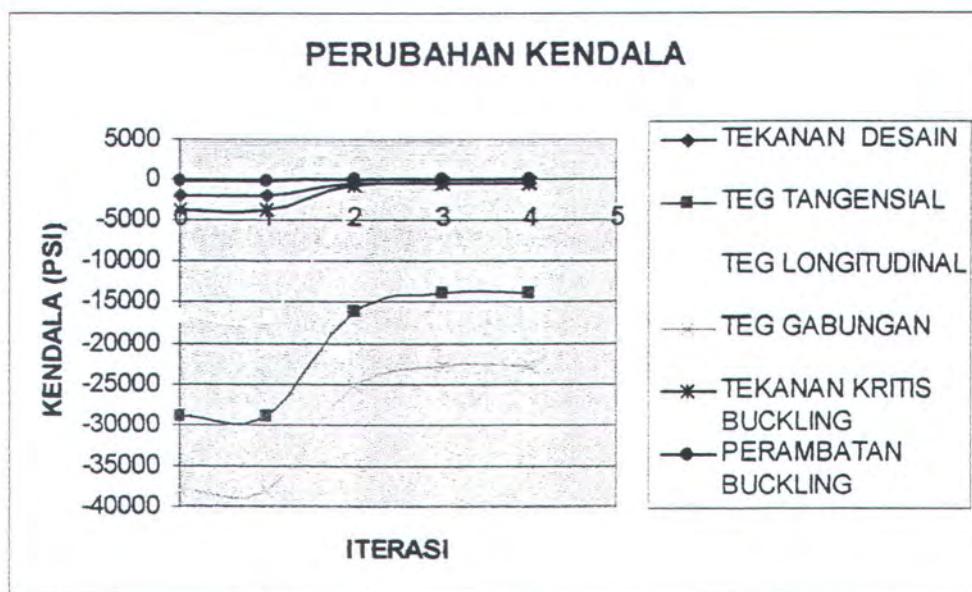
Analisa kendala perlu dilakukan untuk mengetahui fisibilitas dari perancangan dengan metode optimasi, metodenya dengan melakukan pengecekan terhadap kendala yang aktif

membatasi proses pemodelan. Keaktifan kendala dapat kita lihat pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 : Kendala Optimasi Material Pipa API PSL2 X-65

NAMA	NILAI	NILAI BATAS	STATUS	SLACK
TEKANAN DALAM DESAIN (psi)	-396,82	<=0	Not Binding	396,82
TEGANGAN TANGENSIAL (psi)	-13796,1	<=0	Not Binding	13796,1
TEGANGAN LONGITUDINAL (psi)	-1381,5	<=0	Not Binding	1381,5
TEGANGAN GABUNGAN (psi)	-22963,3	<=0	Not Binding	22963,3
TEGANGAN KRITIS BUCKLING(ksi)	-557,08	<=0	Not Binding	557,08
PERAMBATAN BUCKLING (psi)	0	<=0	Binding	0

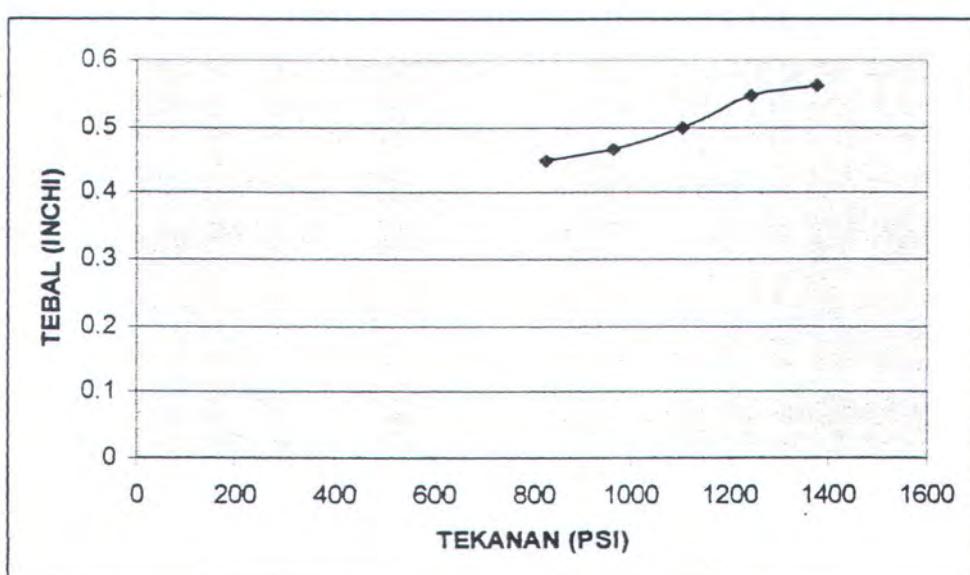
Dari Tabel 4.3 di atas, kendala yang aktif pada proses optimasi adalah tegangan perambatan *buckling* dengan nilai *slack* nol. Keaktifan nilai kendala tersebut dapat dilihat dari nilai slacknya. Semakin kecil semakin aktif membatasi hingga nilai nol. Maka dapat dicermati bahwa penggunaan material dengan nilai *SMYS* 65000 psi dan tekanan yang bekerja pada pipa sangat dominan membatasi proses optimasi. Dari keaktifan kendala tersebut, dapat diketahui bahwa perubahan ketebalan pipa sangat mempengaruhi perambatan *buckling*. Besarnya nilai slack untuk tegangan tangensial sebesar 13796,1 psi menunjukkan bahwa pada ketebalan 0,56 inchi tidak berpengaruh besar untuk kegagalan pipa karena pengaruh tegangan tangensial. Begitu juga untuk tegangan yang lain seperti tegangan longitudinal, tegangan gabungan sangat kecil dipengaruhi oleh perubahan variabel tebal pipa menjadi 0,56 inchi. Grafik pada Gambar 4.3 menunjukkan perubahan kendala terhadap iterasi.



**Gambar 4.3 : Grafik Perubahan Kendala Berdasarkan Iterasi
Pipa Jenis X-65**

4.2.3 Sensitivitas

Dalam melakukan simulasi permodelan optimasi telah diambil variasi parameter sistem berupa tekanan yang divariasikan untuk mengetahui sensitivitas dari permodelan optimasi. Tekanan yang divariasikan sebesar 60 %, 70 %, 80 %, 90 %100 % dari tekanan yang bekerja.



Gambar 4.4 : Grafik Perubahan Tebal Pipa Karena Variasi Tekanan

Grafik pada gambar 4.4 menunjukkan bahwa pada saat penambahan tekanan akan menambah tebal pipa, dengan presentasi kenaikan tebal antara 3% – 4% terhadap tebal mula-mula. Penambahan tebal juga akan menaikkan besar diameter luar pipa sebesar 0,5% - 1% dari diameter awal. tekanan naik, ketebalan juga semakin bertambah. Hal tersebut disebabkan karena kekuatan pipa sangat dipengaruhi oleh ketebalan pipa, sedangkan beban yang paling dominan bekerja pada pipa adalah tekanan dalam dan tekanan hidrostatik.

4.3 UJI HASIL PERANCANGAN

Untuk memastikan hasil dari perancangan optimasi tebal pipa layak untuk digunakan, maka perlu dilakukan pengecekan hasil perancangan optimasi. Pengecekan tersebut meliputi :

4.3.1 Uji Hidrostatis

Formula yang diberikan oleh API 1111 untuk tes hidrostatik adalah :

$$P_t \leq fd \cdot fe \cdot ft \cdot P_b \quad \Rightarrow \quad P_b = 0,9(SMYS + SMTS) \left(\frac{t}{D-t} \right)$$

$$2611 \text{ psi} \leq 2677,51 \text{ psi}$$

jadi berdasarkan formula diatas desain pipa dengan ketebalan 0,56 inchi memenuhi syarat tes hidrostatik.

4.3.2 Uji Stabilitas

♦ Stabilitas Lateral

Struktur pipa yang terletak didasar 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 minimal 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 validitas gelombang seperti pada gambar 2.5 Grafik ini merupakan fungsi perbandingan d/T^2 dan H/T^2 .

Untuk mendapatkan teori gelombang dan perhitungan yang tepat pada setiap titik, maka penentuan teori gelombang ini dilakukan pada setiap kenaikan kedalaman (d).

Dari data lingkungan diketahui bahwa :

$$\begin{aligned} H_s &= 3 \text{ m} \\ T_s &= 9 \text{ s} \\ g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Teori gelombang yang digunakan dalam perhitungan tugas akhir ini diberikan pada tabel 4.4 berikut :

Tabel 4.4: Penentuan Teori Gelombang

KEDALAMAN LAUT (M)	X (M)	S (M)	H/T^2	D/T^2	T GELOMBANG
10	0	0	0,121481	0,404938	CNOIDAL
15	187,5	187,5	0,121481	0,607407	STOKE 3 nd
20	312,5	125	0,121481	0,809877	STOKE 2 nd
25	437,5	125	0,121481	1,012346	STOKE 2 nd
30	812,5	375	0,121481	1,214815	STOKE 2 nd
35	1187,5	375	0,121481	1,417284	STOKE 2 nd
40	1437,5	250	0,121481	1,619753	STOKE 2 nd
45	1687,5	250	0,121481	1,822222	STOKE 2 nd
50	2250	562,5	0,121481	2,024691	STOKE 2 nd
55	2875	625	0,121481	2,22716	STOKE 2 nd
60	3250	375	0,121481	2,42963	STOKE 2 nd
65	4375	1125	0,121481	2,632099	STOKE 2 nd
70	5375	1000	0,121481	2,834568	STOKE 2 nd
75	6000	625	0,121481	3,037037	STOKE 2 nd
80	7000	1000	0,121481	3,239506	STOKE 2 nd
82,5	7500	500	0,121481	3,239506	STOKE 2 nd

Keterangan :

d = Kedalaman, m.

x = Ordinat Pipa, m.

s = Panjang Pipa, m

b. Penentuan Panjang Gelombang dan Cepat Rambat Gelombang

Panjang gelombang (L) dan cepat rambat gelombang ($C = \text{Celerity}$) dihitung dengan menggunakan persamaan (25) dan (26). Perhitungan panjang gelombang dilakukan dengan proses iterasi karena panjang gelombang merupakan fungsi panjang gelombang itu sendiri. Hasil perhitungan diberikan pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 : Panjang Gelombang dan Cepat Rambat Gelombang Tiap Kedalaman

KEDALAMAN LAUT (m)	Y (m)	L (m)	C (m/s)
15	14,4	14	4,7
20	19,4	105,21	11,68165
25	24,4	112,02	12,43905
30	29,4	116,82	12,97107
35	34,4	120,13	13,33948
40	39,4	122,37	13,58917
45	44,4	123,86	13,75468
50	49,4	124,83	13,86226
55	54,4	125,45	13,93101
60	59,4	125,84	13,97433
65	64,4	126,08	14,00136
70	69,4	126,23	14,01809
75	74,4	126,32	14,02838
80	79,4	126,37	14,0347
82,5	81,9	126,4	14,03686

Keterangan :

- d = Kedalaman, m.
y = Kedalaman pada sumbu pipa, m.
L = Panjang Gelombang, m.
C = Cepat Rambat Gelombang, m/s.

c. Perhitungan Kecepatan dan Percepatan Partikel Air Karena Gelombang

Kecepatan efektif partikel air dihitung dengan menggunakan persamaan (27), dan hasil perhitungan diberikan pada tabel 4.6

Tabel 4.6: Kecepatan dan Percepatan Partikel Air Karena Gelombang

D (m)	K	U (m/s)	du/dt (m/s ²)	U eff (m/s)
10	0,065668	1,5914801	0	0,14
15	0,06222	0,9961281	0	0,00019
20	0,05969	0,727022	0	0,152886
25	0,056061	0,559002	0	0,084648
30	0,053758	0,438565	0	0,049397
35	0,052277	0,346416	0	0,029466
40	0,05132	0,273938	0	0,017725
45	0,050702	0,216348	0	0,010684
50	0,050308	0,170481	0	0,006435
55	0,05006	0,134023	0	0,003869
60	0,049905	0,105145	0	0,002322
65	0,04981	0,082349	0	0,001392
70	0,04975	0,064442	0	0,000834
75	0,049715	0,050348	0	0,000499
80	0,049695	0,039319	0	0,000299
82,5	0,049684	0,034757	0	0,000231

d. Perhitungan Kecepatan dan Percepatan Partikel Air Karena Arus

Kecepatan efektif partikel air dihitung dengan menggunakan persamaan (36) , dan hasil perhitungan diberikan pada tabel 4.7

Tabel 4.7: Kecepatan dan Percepatan Partikel Air Karena Arus

D(m)	Y(m)	Ueff(m/s)
10	9,4	0,591278
15	14,4	0,55797
20	19,4	0,535482
25	24,4	0,518665
30	29,4	0,505317
35	34,4	0,4943
40	39,4	0,48495
45	44,4	0,476851
50	49,4	0,46972
55	54,4	0,463362
60	59,4	0,457632
65	64,4	0,452424
70	69,4	0,447654
75	74,4	0,44326
80	79,4	0,439188
82,5	81,9	0,437259

e. Perhitungan Koefisien Drag, Koefisien Inersia dan Koefisien Lift

CD, CM dan CL dihitung berdasarkan Bilangan Reynold (Re)

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad \nu \text{ adalah viskositas kinematis fluida, untuk air laut } \nu = 1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s.}$$

Dan hasil perhitungan diberikan pada tabel 4.8

Tabel 4.8 Perhitungan Koefisien Drag, Koefisien Inersia, dan Koefisien Lift

d(m)	y(m)	U _{c eff} (m/s)	U _{w eff} (m/s)	Re	CD	CM	CL
10	9,4	0,591278	0,14	372910,9	0,7	1,74878	0,7
15	14,4	0,55797	1.E-05	357335	0,7	1,78533	0,48533
20	19,4	0,535482	0,152886	349920,3	0,7	1,800159	0,7
25	24,4	0,518665	0,084648	306683,8	0,7	1,886632	0,7
30	29,4	0,505317	0,0493974	281979,7	0,7	1,936041	0,7
35	34,4	0,4943	0,0294662	266247,6	0,7	1,967505	0,7
40	39,4	0,48495	0,0177246	255526,5	0,7	1,988947	0,7
45	44,4	0,476851	0,0106841	247830,3	0,7	2	0,704339
50	49,4	0,46972	0,0064347	242045,4	0,723182	2	0,715909
55	54,4	0,463362	0,0038687	237508,8	0,738304	2	0,724982
60	59,4	0,457632	0,002322	233809,9	0,750634	2	0,73238
65	64,4	0,452424	0,0013917	230689,5	0,761035	2	0,738621
70	69,4	0,447654	0,0008337	227981,5	0,770062	2	0,744037
75	74,4	0,44326	0,0004992	225577,4	0,778075	2	0,748845
80	79,4	0,439188	0,0002988	223405,6	0,785315	2	0,753189
82,5	81,9	0,437259	0,0002314	222391,1	0,788696	2	0,755218

f. Perhitungan Berat Minimal Pipa

Perhitungan berat minimal pipa dihitung berdasarkan persamaan (18), dan hasil perhitungannya dapat dilihat pada tabel 4.9

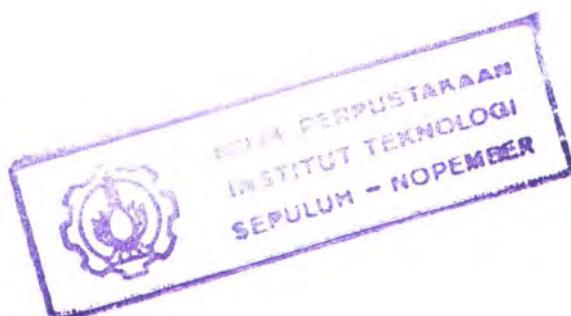
Tabel 4.9 Perhitungan Berat Minimal Pipa

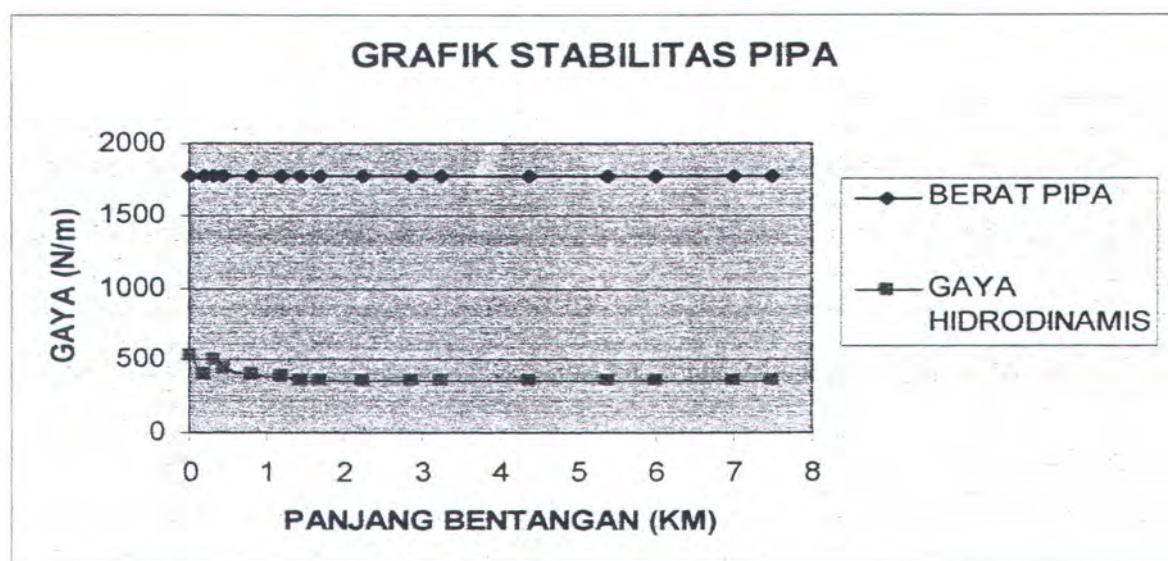
d(m)	Y(m)	FD (N/m)	FI (N/m))	FL (N/m)	W minimal
10	9,4	160,58	0	117,77	535,12
15	14,4	122,10	0	68,14	407,030
20	19,4	150,6407	0	103,6962	502,13561
25	24,4	132,0274	0	79,65377	440,09132
30	29,4	121,3922	0	67,33799	404,64082
35	34,4	114,6196	0	60,03381	382,06529
40	39,4	110,0042	0	55,29634	366,6805
45	44,4	106,6909	0	52,33801	355,63642
50	49,4	107,6514	0	50,74324	358,83789
55	54,4	107,8425	0	49,47813	359,47508
60	59,4	107,9359	0	48,4383	359,78644
65	64,4	107,9711	0	47,55584	359,90371
70	69,4	107,9693	0	46,78647	359,89762
75	74,4	107,9425	0	46,10094	359,80823
80	79,4	107,8979	0	45,4798	359,65958
82,5	81,9	107,8704	0	45,18909	359,56804

Untuk pipa hasil optimasi dengan ketebalan 0,56 inchi dan diameter 24,56 inchi berat tiap satuan panjangnya dapat dihitung dengan menggunakan rumusan berikut :

$$\begin{aligned}
 W_a &= M_{a..}g \\
 &= \rho \pi / 4 (D_0^2 - (D_0 - 2t_p)^2) \cdot g \\
 &= 1776,936 \text{ N/m}
 \end{aligned}$$

Dari banyak perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya, maka dapat disusun grafik yang menunjukkan kondisi stabilitas pipa dalam arah lateral. Kondisi tersebut ditentukan oleh besar gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja dan berat pipa itu sendiri.





Gambar 4.5 : Grafik Stabilitas Pipa

Dari gambar 4.5 tampak bahwa gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja pada sepanjang bentangan pipa mempunyai harga yang jauh lebih kecil dari berat pipa. Sehingga kondisi pipa adalah stabil. Hal ini ditunjukkan dengan gaya berat pipa yang lebih besar daripada hidrodinamis total yang bekerja. Jadi meskipun tidak ditambahi lapisan pemberat, pipa sudah cukup aman untuk diletakkan pada dasar laut.

♦ Stabilitas Vertikal

Untuk mengetahui stabilitas vertikal pipa maka dilakukan perhitungan kedalaman penetrasi pipa pada tanah. Yong Bay (2001) memberikan formula sebagai berikut :

$$\frac{z}{D} = 0.09(S.G^3)$$

dengan

Z = penetrasi pada seabed (m)

S = $F_c/(D.S_u)$

G = $S_u/(D.\gamma')$

F_c = gaya vertikal yang bekerja (kN/m)

D = Diameter luar pipa (m)

S_u = undrained shear strength (Kpa)

γ = submerged soil density (KN/m³)

dari data diketahui :

D = 0,62 m

S_u = 2 Kpa

γ = 3 kN/m³

F_c = berat pipa + berat fluida

$$= 1,776 \text{ kN/m}$$

G = 1,075 kN/m³

S = 1,43 kN

Maka :

$$z = D \cdot 0.09(S \cdot G^{0.3})$$

$$z = 0,082 \text{ m}$$

Dari hasil perhitungan menunjukkan bahwa pipa akan sedikit terbenam kedalam tanah sedalam 0,082 m . Kondisi tersebut tidak berpengaruh terhadap stabilitas vertikal pipa karena daya dukung tanah mampu untuk menahan pipa stabil.

4.3.3 Free Span dan Vortex Shedding

Vortex shedding yang mengakibatkan pipa berosilasi. Osilasi kritis muncul jika frekuensi dari *vortex shedding* sama dengan frekuensi natural pipa pada saat span.. API 1111 memberikan rumusan untuk menghitung frekuensi dari *fortex shedding* dengan rumusan :

$$F_s = N_s \cdot V/D$$

Dengan :

F_s = frekuensi fortex shedding

N_s = angka strouhal, 0,2

V = viskositas kinematis fluida, $1,2 \times 10^{-6}$

D = Diameter Luar Pipa

Untuk menghitung frekuensi natural dari span adalah :

$$f_n = \frac{K}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{M}}$$

f_n = frekuensi natural akibat span

K = kondisi akhir konstan, $\pi/2$

I = momen inersia pipa, 0,11599

E = Modulus Elastis, $4,48 \times 10^8$ pascal

M = total pipa ditambah massa fluida , 490,6 kg/m

Analisa span dan *vortex shedding* akan menghitung jarak span yang mengakibatkan pipa mempunyai frekuensi natural mendekati frekuensi natural *vortex sheding*.

Langkah yang dilakukan adalah :

✓ Menghitung F_s

Dari hasil Perhitungan didapatkan $F_s = 3,8 \times 10^{-7}$ cycle/s

✓ Menghitung L

Agar terjadi resonansi $F_s = F_n$, maka L dapat dihitung

$$L^2 = \frac{K}{f_s} \sqrt{\frac{EI}{M}}$$

$$L^2 = 4,16 \times 10^{16}$$

$$L = 2,1 \times 10^8 \text{ m}$$

Titik kritis span baru terjadi pada jarak $2,1 \times 10^8$ m, sehingga pengaruh vortex shedding tidak akan menyebabkan pipa mengalami osilasi.

Sistem Perlindungan

Setelah dilakukan analisa terhadap stabilitas pipa bawah laut pada Lapangan Produksi Gas Tunu ternyata pipa dalam kondisi yang stabil terhadap beban yang mengenai pipa sehingga tidak perlu dilakukan proteksi terhadap stabilitas. Yang perlu dipertimbangkan adalah proteksi terhadap *pipe crossing* yang sering terjadi pada Perairan Tunu. *Pipe Crossing* adalah sebuah kejadian dimana jalur pipa yang saling bertemu sehingga pada suatu titik pertemuan salah satu pipa harus menumpuk pipa yang lain. Penumpukan ini memberikan konsekuensi salah satu pipa akan terangkat naik agar bisa melewati jalur pipa lainnya. Untuk itu diperlukan suatu pemberat agar pipa tetap stabil pada saat terjadi *crossing*.

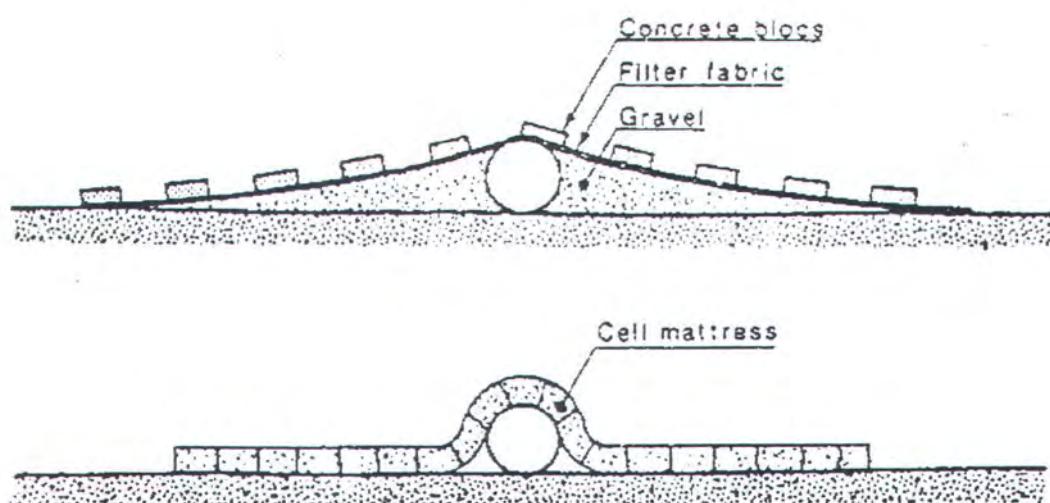
Beberapa metode perlindungan pada pipa bawah laut dapat diaplikasikan untuk

memproteksi pipa bawah laut (Herbich, 1981) antara lain :

- ✓ *Rock-fill*
- ✓ *Riprap*
- ✓ *Protective Mattress*

Metode *rock-fill* dan *Riprap*, dimana batu-batuan disusun membentuk suatu *rubble* dengan komposisi tertentu agar dapat mencegah *scouring* pada pipa bawah laut. Metode ini kurang cocok diterapkan Pada Perairan Tunu karena kemungkinan *scouring* yang kecil.

Salah satu metode perlindungan yang cocok digunakan pada Lapangan Gas Tunu adalah metode *Protektif Mattres*. Pipa diletakkan pada dasar laut dan kemudian ditutupi oleh *mattress*. Terdapat beberapa jenis *mattress* yang digunakan, yaitu *fascine*, *concrete*, *stone-asphalt*, *ballast*, *block* dan *cell mattress*. Gambar berikut ini memperlihatkan metode *protective mattress*. *Protektif Mattres* diletakkan sebagai lapisan pemberat pada saat pipa mengalami crossing dengan bentangan pipa lain.



Gambar 4.6

Metode *protective mattress concrete block* dan *cell mattress* (Herbich, 1981).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Sesuai dengan permasalahan dan tujuan dari penelitian ini, yaitu optimasi pipa bawah laut pada Perairan Tunu Kalimantan Timur, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- a. Hasil ketebalan pipa yang optimum adalah 0,56 inchi. Sehingga terjadi penurunan ketebalan dari nilai awal sebesar 44 %. Penurunan ketebalan pipa secara langsung akan mengurangi biaya pemasangan pipa sebesar 44,89 %
- b. Fisibilitas dari optimasi pipa dipengaruhi oleh kendala yang bekerja. Dari keaktifan kendala, dapat diketahui bahwa perubahan ketebalan mempegaruhi tekanan kritis *buckling*. Untuk kendala yang lain seperti tegangan tangensial, tegangan longitudinal, serta tegangan gabungan sangat kecil dipengaruhi oleh perubahan variabel tebal pipa . Sedangkan pada analisa sensitivitas, dapat diketahui bahwa ketebalan pipa merupakan fungsi dari tekanan yang bekerja pada pipa tersebut. Pada saat tekanan dinaikkan sebesar 10 % dari tekanan awal, tebal bertambah sebesar 3-4 % dari tebal semula.
- c. Hasil perhitungan berat pipa yang telah dilakukan menunjukkan bahwa gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja pada sepanjang bentangan pipa mempunyai harga yang jauh lebih kecil dari berat pipa, sehingga kondisi pipa adalah stabil. Jadi meskipun tidak ditambahi lapisan pemberat, pipa sudah cukup aman untuk diletakkan pada dasar laut. Meskipun demikian penggunaan *concrete matress* diperlukan untuk melindungi pipa dari jangkar, korosi, dan terutama digunakan sebagai pemberat pada bagian pipa yang mengalami *crossing*.

5.2 Saran

Dari hasil kesimpulan yang diperoleh, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai :

1. Stabilitas Lateral perlu ditambahkan sebagai kendala pada persoalan optimasi pipa bawah laut.
2. Variasi grade material dan pengaruhnya terhadap biaya instalasi.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

API, 2001. **Design, Construction, Operation & Maintance of Offshore**

Hidrocarbon Pipeline, API 1111. American Petroleum Institute. USA

API, 2001. **Specification for Line Pipeline**. API 5L. American Petroleum Institute,

USA.

Bai, Yong.2001. **Pipelines And Risers**. Elsevier Ocean Engineering Book Series.

Oxford. UK.

Chakrabarti, S.K. 1987. **Hydrodynamics of Offshore Structure**. Computational Mechanics Publication. London.

Germanisher Llyod, 1995. **Rules for Classification and Construction, Part 4-Subsea Pipelines and Riser**. Germanisher Llyod. Hamburg.

Halliwell, Roy. 1986. **An Introduction to Offshore Pipelines**. University College. Cork.

Herbich, J.B. 1981. **Offshore Pipeline Design Element**. Marcel Dekker. New York.

Mousselli, AH. 1981. **Offshore Pipelines Design, Analysis and Methods**. PennWellBooks. Oklahoma.

Popov, E.P. 1996. **Mekanika Teknik**. Penerbit Erlangga. Jakarta.

Sarpkaya, T. 1981. **Mechanics of Forces on Offshore Structures**. Litton Educational publishing, Inc. USA.

Rao, SS. 1984. **Optimization Theory & Application**. Willey Eastern Limited,2nd. New Delhi, India.

Rosyid, D.M. 1999. **Optimasi, Teknik Pengambilan Keputusan Secara Kuantitatif.**

Diktat Kuliah Optimasi Program Pendidikan Tinggi Teknik, T. Kelautan, ITS, Sby.

William Natural Gas Company. 1996. **Pipe Characteristic Handbook.** PennWell

Book. Oklahoma.



LAMPIRAN

LAMPIRAN 2

PERHITUNGAN NILAI AWAL PERMODELAN OPTIMASI

✓ Perhitungan Tekanan Eksternal pada kedalaman 82,5

Perhitungan tekanan eksternal pada pipa dihitung berdasarkan Rumusan :

$$P_E \approx \rho_w g \left(d_H + \frac{1}{2} H \right)$$

$$d_H = 82,5 \text{ m}$$

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

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

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$PE = 843780 \text{ pascal}$$

$$= 122,379 \text{ psi}$$

✓ Perhitungan Nilai Awal Kendala Dalam Permodelan Optimasi

Tekanan Internal Desain

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

$$P_i = \text{Tekanan internal}, 1740,453 \text{ psi}$$

$$F = 0,72$$

$$E = 1$$

$$T = 1$$

Maka tekanan dalam desain sebesar :

$$P_d = 3744 \text{ psi}$$

$$P_d \geq P_i$$

$$3744 \geq 1740,453$$

Tegangan Tangensial

$$2. G(2) = (p_i - p_e) \frac{D - t}{2t} \leq \eta h . SMYS . k$$

maka tekanan dalam desain sebesar :

$$\sigma_h = 19416,88 \text{ psi}$$

$$\sigma h \leq \eta h \cdot SMYS k_t$$

$$19416,88 \leq 46800 \text{ psi}$$

Tegangan Longitudinal

$$3 \cdot G(3) = \sigma a + \frac{\Delta Pe \cdot A_0}{A} + P_i \leq 0,6 SMYS$$

$$\sigma a = 151,0214 \text{ psi}$$

$$P_i = 1740,453 \text{ psi}$$

Maka tegangan longitudinal sebesar :

$$\sigma l = 22530,16 \text{ psi}$$

$$\sigma l \leq 0,6 SMYS$$

$$22530,16 \leq 39000 \text{ psi}$$

Tegangan Gabungan

$$4 \cdot G(4) = \sqrt{(\sigma h^2 + \sigma leff^2 - \sigma h \sigma leff + 3\sigma a^2)} \leq \eta e SMYS$$

$$\sigma ec = 21146,12 \text{ psi}$$

$$\sigma ec \leq 0,9 SMYS \quad (\text{dasar})$$

$$21146,12 \leq 58500 \text{ psi}$$

Tegangan Kritis Buckling

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

$$E = 206000 \text{ Mpa}$$

$$E = 2,987 \times 10^7 \text{ psi}$$

Maka tegangan kritis buckling sebesar :

$$Pc = 4963,984963 \text{ psi}$$

Perambatan Buckling

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

$$S = 65000 \text{ psi}$$

$$T = 1 \text{ inchi}$$

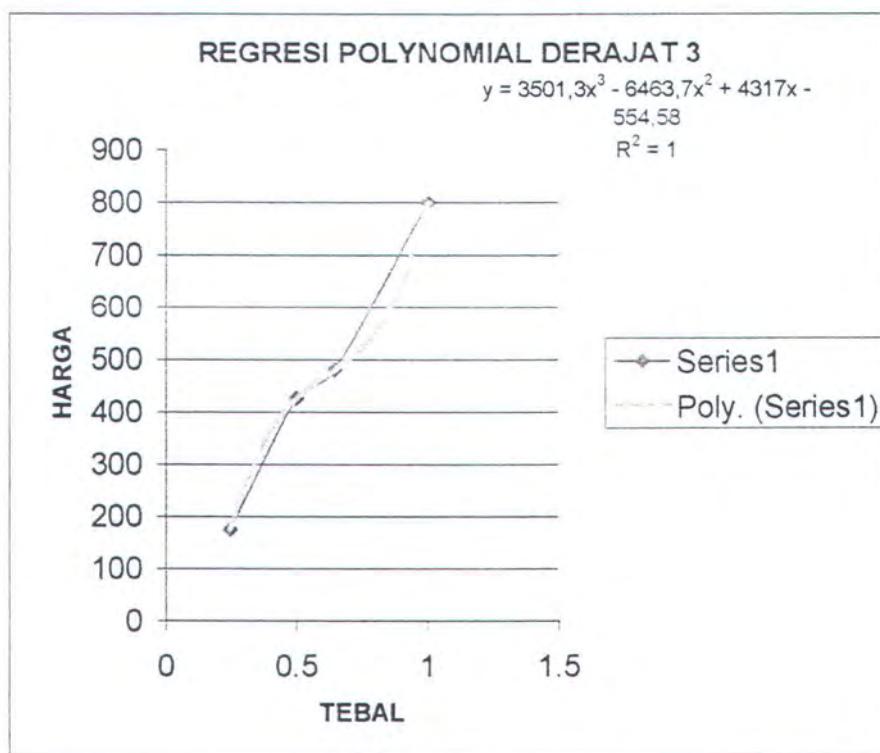
$$D = 25 \text{ inchi}$$

$$P_p = 375,544 \text{ psi}$$

✓ Perhitungan Fungsi Obyektif

Dalam permodelan optimasi, fungsi obyektif yang dimodelkan adalah biaya instalasi pipa minimal. Data yang digunakan adalah data untuk pipa dengan diameter dalam 24 inchi. Faktor ketebalan mengakibatkan perubahan harga dalam biaya pemasangan.

TEBAL PIPA (INCHI)	HARGA (\$)
0,25	175,4
0,5	425,66
0,644	480
1	800



Dengan menggunakan interpolasi Newton persamaan fungsi obyektif adalah sebagai berikut :

$$3501t^3 - 6463,7t^2 + 4317t - 554,58$$

LAMPIRAN 3

HASIL PERMODELAN OPTIMASI

Report Created: 1/5/2005 10:58:52 AM

Adjustable Cells

Cell	Name	Final Value	Reduced Gradient
\$B\$2	TEBAL	0.560825277	0

Constraints

Cell	Name	Final Value	Lagrange Multiplier
\$B\$5	TEKANAN DALAM DESAIN	-1267.275331	0
\$B\$6	TEGANGAN TANGENSIAL	-31550.76411	0
\$B\$7	TEGANGAN LONGITUDINAL	-21552.7853	0
\$B\$8	TEGANGAN GABUNGAN	-42041.30258	0
\$B\$10	PERAMBATAN BUCKLING	1.22329E-07	-1.911281172

Target Cell (Min)

Cell	Name	Original Value	Final Value
\$B\$38	HARGA PIPA	797.51	439.5430754

Adjustable Cells

Cell	Name	Original Value	Final Value
\$B\$2	TEBAL	1	0.560825277

Constraints

Cell	Name	Cell Value	Formula	Status	Slack
\$B\$5	TEKANAN DALAM DESAIN	-1267.275331	\$B\$5<=0	Not Binding	1267.275
\$B\$6	TEGANGAN TANGENSIAL	-31550.76411	\$B\$6<=0	Not Binding	31550.76
\$B\$7	TEGANGAN LONGITUDINAL	-21552.7853	\$B\$7<=0	Not Binding	21552.79
\$B\$8	TEGANGAN GABUNGAN	-42041.30258	\$B\$8<=0	Not Binding	42041.3
\$B\$10	PERAMBATAN BUCKLING	1.22329E-07	\$B\$10<=0	Binding	0
\$B\$2	TEBAL	0.560825277	\$B\$2>=0.1	Not Binding	0.460825
\$B\$2	TEBAL	0.560825277	\$B\$2<=1	Not Binding	0.439175

Target

Cell	Target Name	Value
\$B\$38	HARGA PIPA	439.5430754

Adjustable

Cell	Adjustable Name	Value	Lower Limit	Target Result	Upper Limit	Target Result
\$B\$2	TEBAL	0.560825277	0.560825	439.5431	1	797.51

Adjustable Cells

Cell	Name	Final Value	Reduced Gradient
\$B\$2	TEBAL	0.531403623	0

Constraints

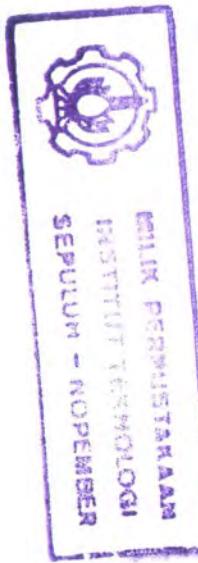
Cell	Name	Final Value	Lagrange Multiplier
\$B\$5	TEKANAN DALAM DESAIN	-1157.579827	0
\$B\$6	TEGANGAN TANGENSIAL	-30400.92543	0
\$B\$7	TEGANGAN LONGITUDINAL	-20380.32373	0
\$B\$8	TEGANGAN GABUNGAN	-40885.30193	0
\$B\$10	PERAMBATAN BUCKLING	3.15783E-07	-2.00986085

Target Cell (Min)

Cell	Name	Original Value	Final Value
\$B\$38	HARGA PIPA	797.51	415.5617791

Adjustable Cells

Cell	Name	Original Value	Final Value
\$B\$2	TEBAL	1	0.531403623



Constraints

Cell	Name	Cell Value	Formula	Status	Slack
\$B\$5	TEKANAN DALAM DESAIN	-1157.579827	\$B\$5<=0	Not Binding	1157.58
\$B\$6	TEGANGAN TANGENSIAL	-30400.92543	\$B\$6<=0	Not Binding	30400.93
\$B\$7	TEGANGAN LONGITUDINAL	-20380.32373	\$B\$7<=0	Not Binding	20380.32
\$B\$8	TEGANGAN GABUNGAN	-40885.30193	\$B\$8<=0	Not Binding	40885.3
\$B\$10	PERAMBATAN BUCKLING	3.15783E-07	\$B\$10<=0	Binding	0
\$B\$2	TEBAL	0.531403623	\$B\$2>=0.1	Not Binding	0.431404
\$B\$2	TEBAL	0.531403623	\$B\$2<=1	Not Binding	0.468596

Target

Cell	Name	Value
\$B\$38	HARGA PIPA	415.5617791

Adjustable

Cell	Adjustable Name	Value	Lower Limit	Target Result	Upper Limit	Target Result
\$B\$2	TEBAL	0.531403623	0.531404	415.5618	1	797.51

Adjustable Cells

Cell	Name	Final Value	Reduced Gradient
\$B\$2	TEBAL	0.500033455	0

Constraints

Cell	Name	Final Value	Lagrange Multiplier
\$B\$5	TEKANAN DALAM DESAIN	-1040.329283	0
\$B\$6	TEGANGAN TANGENSIAL	-29039.94998	0
\$B\$7	TEGANGAN LONGITUDINAL	-18996.27529	0
\$B\$8	TEGANGAN GABUNGAN	-39518.36515	0
\$B\$10	PERAMBATAN BUCKLING	3.4193E-07	-2.127767868

Target Cell (Min)

Cell	Name	Original Value	Final Value
\$B\$38	HARGA PIPA	797.51	389.9922685

Adjustable Cells

Cell	Name	Original Value	Final Value
\$B\$2	TEBAL	1	0.500033455

Cell	Name	Cell Value	Formula	Status	Slack
\$B\$5	TEKANAN DALAM DESAIN	-1040.329283	\$B\$5<=0	Not Binding	1040.329
\$B\$6	TEGANAN TANGENSIAL	-29039.94998	\$B\$6<=0	Not Binding	29039.95
\$B\$7	TEGANAN LONGITUDINAL	-18996.27529	\$B\$7<=0	Not Binding	18996.28
\$B\$8	TEGANAN GABUNGAN	-39518.36515	\$B\$8<=0	Not Binding	39518.37
\$B\$10	PERAMBATAN BUCKLING	3.4193E-07	\$B\$10<=0	Binding	0
\$B\$2	TEBAL	0.500033455	\$B\$2>=0.1	Not Binding	0.400033
\$B\$2	TEBAL	0.500033455	\$B\$2<=1	Not Binding	0.499967

Cell	Target Name	Value
\$B\$38	HARGA PIPA	389.9922685

Cell	Adjustable Name	Value	Lower Limit	Target Result	Upper Limit	Target Result
\$B\$2	TEBAL	0.500033455	0.500033	389.9923	1	797.51

Report Created: 1/6/2005 11:17:32 AM

Adjustable Cells

Cell	Name	Final Value	Reduced Gradient
\$B\$2	TEBAL	0.466695735	0

Constraints

Cell	Name	Final Value	Lagrange Multiplier
\$B\$5	TEKANAN DALAM DESAIN	-915.3951878	0
\$B\$6	TEGANAN TANGENSIAL	-27410.42808	0
\$B\$7	TEGANAN LONGITUDINAL	-17343.39546	0
\$B\$8	TEGANAN GABUNGAN	-37883.1818	0
\$B\$10	PERAMBATAN BUCKLING	6.54288E-07	-2.270468146

Target Cell (Min)

Cell	Name	Original Value	Final Value
\$B\$38	HARGA PIPA	797.51	362.8190269

Adjustable Cells

Cell	Name	Original Value	Final Value
\$B\$2	TEBAL	1	0.466695735

Constraints

Cell	Name	Cell Value	Formula	Status	Slack
\$B\$5	TEKANAN DALAM DESAIN	-915.3951878	\$B\$5<=0	Not Binding	915.3952
\$B\$6	TEGANGAN TANGENSIAL	-27410.42808	\$B\$6<=0	Not Binding	27410.43
\$B\$7	TEGANGAN LONGITUDINAL	-17343.39546	\$B\$7<=0	Not Binding	17343.4
\$B\$8	TEGANGAN GABUNGAN	-37883.1818	\$B\$8<=0	Not Binding	37883.18
\$B\$10	PERAMBATAN BUCKLING	6.54288E-07	\$B\$10<=0	Binding	0
\$B\$2	TEBAL	0.466695735	\$B\$2>=0.1	Not Binding	0.366696
\$B\$2	TEBAL	0.466695735	\$B\$2<=1	Not Binding	0.533304

Cell	Target Name	Value
\$B\$38	HARGA PIPA	362.8190269

Cell	Adjustable Name	Value	Lower Limit	Target Result	Upper Limit	Target Result
\$B\$2	TEBAL	0.466695735	0.466696	362.819	1	797.51

LAMPIRAN 4

PENENTUAN TEORI GELOMBANG

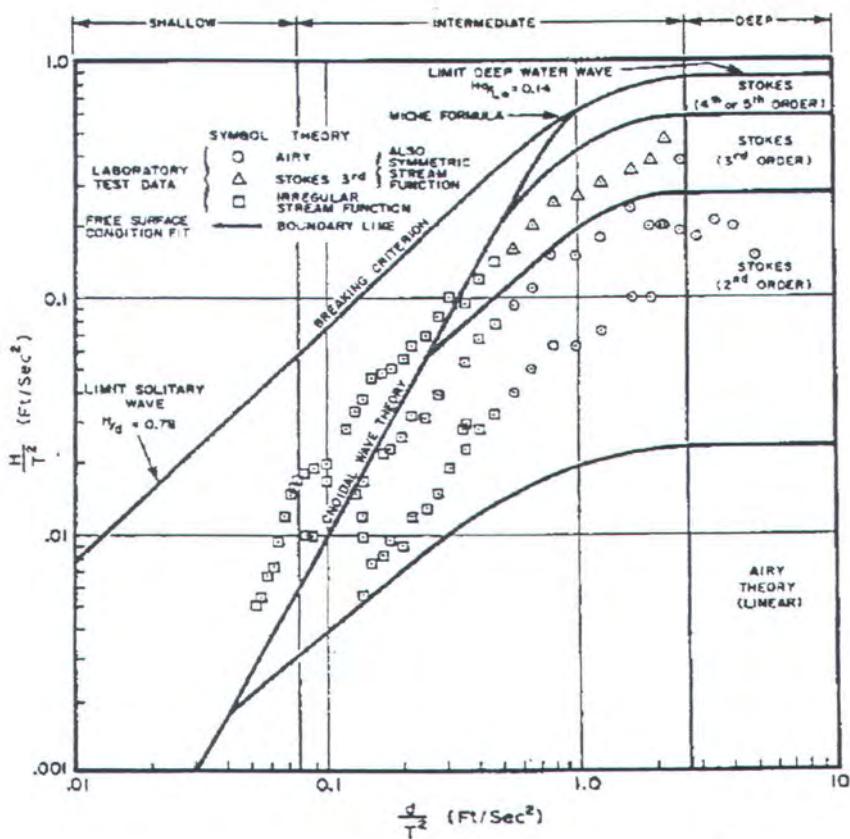
Penentuan Teori Gelombang

Dalam menentukan teori gelombang yang akan digunakan, dapat digunakan grafik validitas gelombang seperti pada gambar 2.5. Grafik ini merupakan fungsi perbandingan d/T^2 dan H/T^2 .

Untuk mendapatkan teori gelombang dan perhitungan yang tepat pada setiap titik, maka penentuan teori gelombang ini dilakukan pada setiap kenaikan kedalaman (d).

Dari data lingkungan diketahui bahwa :

$$\begin{aligned} H_s &= 3 \text{ m} \\ T_s &= 9 \text{ s} \\ g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$



Kedalaman (m)	X (m)	S (m)	H/T^2	d/T^2	T GELOMBANG
10	0	0	0,121481	0,404938	CNOIDAL
15	187,5	187,5	0,121481	0,607407	STOKE 3 nd
20	312,5	125	0,121481	0,809877	STOKE 2 nd
25	437,5	125	0,121481	1,012346	STOKE 2 nd
30	812,5	375	0,121481	1,214815	STOKE 2 nd
35	1187,5	375	0,121481	1,417284	STOKE 2 nd
40	1437,5	250	0,121481	1,619753	STOKE 2 nd
45	1687,5	250	0,121481	1,822222	STOKE 2 nd
50	2250	562,5	0,121481	2,024691	STOKE 2 nd
55	2875	625	0,121481	2,22716	STOKE 2 nd
60	3250	375	0,121481	2,42963	STOKE 2 nd
65	4375	1125	0,121481	2,632099	STOKE 2 nd
70	5375	1000	0,121481	2,834568	STOKE 2 nd
75	6000	625	0,121481	3,037037	STOKE 2 nd
80	7000	1000	0,121481	3,239506	STOKE 2 nd
82,5	7500	500	0,121481	3,239506	STOKE 2 nd

Keterangan :

d = Kedalaman, m.

x = Ordinat Pipa, m.

s = Panjang Pipa, m

LAMPIRAN 5

**PENENTUAN PANJANG GELOMBANG , CEPAT RAMBAT
KECEPATAN GELOMBANG**

Perhitungan Panjang Gelombang dan Cepat Rambat Gelombang Stoke Orde 2

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}$$

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}$$

d	y	L	C	k
20	19.4	105.21	11.68165	0.05969
25	24.4	112.02	12.43905	0.056061
30	29.4	116.82	12.97107	0.053758
35	34.4	120.13	13.33948	0.052277
40	39.4	122.37	13.58917	0.05132
45	44.4	123.86	13.75468	0.050702
50	49.4	124.83	13.86226	0.050308
55	54.4	125.45	13.93101	0.05006
60	59.4	125.84	13.97433	0.049905
65	64.4	126.08	14.00136	0.04981
70	69.4	126.23	14.01809	0.04975
75	74.4	126.32	14.02838	0.049715
80	79.4	126.37	14.0347	0.049695
82.5	81.9	126.4	14.03686	0.049684

Perhitungan Kecepatan dan Percepatan Partikel Air Karena Gelombang

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T} \frac{\cosh k(d+y)}{\sinh kd} \sin \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh 2k(d+y)}{\sinh^4 kd} \sin 2\theta$$

Kecepatan dan Percepatan Partikel Air Karena Gelombang

	k	u	du/dt	U eff
20	0,05969	0,727022	0	0,152886
25	0,056061	0,559002	0	0,084648
30	0,053758	0,438565	0	0,049397
35	0,052277	0,346416	0	0,029466
40	0,05132	0,273938	0	0,017725
45	0,050702	0,216348	0	0,010684
50	0,050308	0,170481	0	0,006435
55	0,05006	0,134023	0	0,003869
60	0,049905	0,105145	0	0,002322
65	0,04981	0,082349	0	0,001392
70	0,04975	0,064442	0	0,000834
75	0,049715	0,050348	0	0,000499
80	0,049695	0,039319	0	0,000299
82,5	0,049684	0,034757	0	0,000231

Perhitungan Panjang Gelombang dan Cepat Rambat Gelombang Stoke Orde 3

$$c^2 = \frac{gL}{2\pi} \left(1 + \left(\frac{\pi a}{L} \right)^2 \frac{14 + 4 \cosh^2 4\pi \frac{d}{L}}{16 \sinh^4 4\pi \frac{d}{L}} \right) \tanh 2\pi \frac{d}{L}$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \left(1 + \left(\frac{2\pi a}{L} \right)^2 \frac{14 + 4 \cosh^2 2kd}{16 \sinh^4 kd} \right)$$

Keterangan :

C = cepat rambat Gelombang
L = Panjang Gelombang

Hasil iterasi Perhitungan Panjang Gelombang Stoke orde 3

$a^2/(2 \cdot 3.14)$	$2 \cdot 3.14 \cdot d/L$	$(2 \cdot 3.14 \cdot a/L)^2$	$14 + 4 \cosh^2$ $(4 \cdot 3.14 d/L)$	$16 \sinh^4 kd$	TANH	L
4.04458599	6.728571429	0.452736735	4.88344E+11	2.09166E+24	1	114.0
4.04458599	6.728571429	0.452736735	4.88344E+11	2.09166E+24	1	114.0
4.04458599	6.728571429	0.452736735	4.88344E+11	2.09166E+24	1	114.0
4.04458599	6.728571429	0.452736735	4.88344E+11	2.09166E+24	1	114.0
4.04458599	6.728571429	0.452736735	4.88344E+11	2.09166E+24	1	114.0
4.04458599	6.728571429	0.452736735	4.88344E+11	2.09166E+24	1	114.0
4.04458599	6.728571429	0.452736735	4.88344E+11	2.09166E+24	1	114.0
4.04458599	6.728571429	0.452736735	4.88344E+11	2.09166E+24	1	114.0
4.04458599	6.728571429	0.452736735	4.88344E+11	2.09166E+24	1	114.0
4.04458599	6.728571429	0.452736735	4.88344E+11	2.09166E+24	1	114.0
4.04458599	6.728571429	0.452736735	4.88344E+11	2.09166E+24	1	114.0
4.04458599	6.728571429	0.452736735	4.88344E+11	2.09166E+24	1	114.0
4.04458599	6.728571429	0.452736735	4.88344E+11	2.09166E+24	1	114.0
4.04458599	6.728571429	0.452736735	4.88344E+11	2.09166E+24	1	114.0

Perhitungan Kecepatan dan Percepatan Gelombang Stoke orde 3

$$u = c(F1 \cosh ks \cos \theta + F2 \cosh 2ks \cos 2\theta + f3 \cosh ks3 \cos \theta)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{2\pi c}{T} (F1 \cosh ks \sin \theta + F2 \cosh 2ks \sin 2\theta + F3 \cosh 3ks \sin 3\theta)$$

C =

4.7

F1 COSH KSCOS Q	F2COSH 2KS COS2 Q	F3COSH3KSCOS 3Q	U
4.7	0.001672122	6.93487E-11	-3.76772E-13

OSH KS SIN Q	F2COSH 2KS SIN2 Q	F3COSH3KSCOS 3Q	DU/DT
0	0	0	0

Perhitungan Kecepatan dan Percepatan Gelombang Cnoidal

Profil permukaan gelombang Cnoidal merupakan fungsi dari k dan frekuensi, dan dirumuskan seperti pada persamaan berikut :

$$y_s = y_T + Hcn^2(kx - \omega t, m) \quad (\text{pers 36})$$

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

▪ Horisontal :

$$u = \sqrt{gd} \in (cn^2 q - h_1) + \epsilon^2 \left\{ \left(f_1 + f_2 cn^2 q - cn^4 q \right) - \frac{3}{4\kappa^2} \left(\frac{s}{d} \right)^2 [\kappa'^2 + 2(2\kappa^2 - 1)cn^2 q - 3\kappa^2 cn^4 q] \right\} + 0[\epsilon^3] \quad (\text{pers 37})$$

Percepatan partikel air (Sarpkaya, 1981) :

▪ Horisontal

$$\frac{\partial u}{\partial t} = g \frac{\sqrt{3}\epsilon}{\kappa} cnqdnqsnq \left\{ 1 + \epsilon \left[f_4 - 2cn^2 q - \left(\frac{s}{d} \right)^2 \left(\frac{3(2\kappa^2 - 1)}{2\kappa^2} + \frac{9}{2} cn^2 q \right) \right] + 0[\epsilon^2] \right\} \quad (\text{pers 38})$$

Keterangan :

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{H}{d} & f_1 &= \frac{-\gamma(6\gamma + 11\kappa^2 - 16) + \kappa'^2(9\kappa^2 - 10)}{12\kappa^4} \\ \kappa'^2 &= 1 - \kappa^2 & f_2 &= \frac{(2\gamma + 7\kappa^2 - 6)}{4\kappa^2} \\ h_1 &= \frac{(\gamma - \kappa'^2)}{\kappa^2} & f_3 &= \frac{(16\gamma + 19\kappa^2 - 22)}{8\kappa^2} \\ h_2 &= \frac{\{\gamma(\kappa^2 - 2) + 2\kappa'^2\}}{4\kappa^4} & f_4 &= \frac{(4\gamma + 15\kappa^2 - 14)}{8\kappa^2} \end{aligned}$$

Parameter-parameter diatas ditentukan berdasarkan Gambar 2.6 , 2.7 , 2.8

Kemudian Dari data diketahui :

g	9.81	e	0.116667	s	0.61
H	0.7	cn2q	1	k	0.78962
T	9	h1	0.198859		
d	6	f1	0.32516	f3	
S	0.61	f2	-0.22811	f4	-0.50407
t	0	cn4q	1		
g	0.5333	cnqdnqsnq	0.022		
1-k ²	0.3764				

Setelah parameter diketahui langkah selanjutnya adalah menghitung

menghitung $HgT2/d2$ dan
 $1 H/d$
15.45075

H/d 0.116667

2 Mencari sudu fase
q 0

Dari Pers 37 dapat dicari :

Untuk Mendapatkan
kecepatan

gd ^{0,5}	7.672027
	0.08243
u	0,63 m/s

Kemudian Dicari Percepatan dengan menggunakan pers 38 :

Untuk mendapatkan
percepatan

0.08741	0.001923
2cn2q	2
s/d ²	0.010336
	-0.90577 -0.00936
9/2cn2q	4.5
du/dt	0.0034

LAMPIRAN 6

PENENTUAN KECEPATAN ARUS EFEKTIF

Perhitungan Kecepatan dan Percepatan Partikel Air Karena Arus

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{y}{y_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Dimana :

V = Kecepatan partikel air pada ketinggian y dari seabed, *m/sekon.*

V₀ = Kecepatan pada ketinggian y₀ dari dasar laut, *m/sekon.*

y₀ = Ketinggian V₀ dari dasar laut, *m.*

y = Ketinggian V dari dasar laut, *m.*

Kecepatan dan Percepatan Partikel Air Karena Arus

d(m)	y(m)	Ueff(m/s)
10	9,4	0,591278
15	14,4	0,55797
20	19,4	0,535482
25	24,4	0,518665
30	29,4	0,505317
35	34,4	0,4943
40	39,4	0,48495
45	44,4	0,476851
50	49,4	0,46972
55	54,4	0,463362
60	59,4	0,457632
65	64,4	0,452424
70	69,4	0,447654
75	74,4	0,44326
80	79,4	0,439188
82,5	81,9	0,437259

LAMPIRAN 7

PENENTUAN NILAI CD,CM, dan CL

CD, CM dan CL dihitung berdasarkan Bilangan Reynold (Re)

$$Re = \frac{UD}{\nu} . \nu \text{ adalah viskositas kinematis fluida, untuk air laut } \nu = 1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Dan hasil perhitungan diberikan pada tabel

Perhitungan Koefisien Drag, Koefisien Inersia, dan Koefisien Lift

d(m)	y(m)	Uc eff (m/s)	Uw eff (m/s)	Re	CD	CM	CL
10	9,4	0,591278	0,14	372910,9	0,7	1,74878	0,7
15	14,4	0,55797	1.E-05	357335	0,7	1,78533	0,48533
20	19,4	0,535482	0,152886	349920,3	0,7	1,800159	0,7
25	24,4	0,518665	0,084648	306683,8	0,7	1,886632	0,7
30	29,4	0,505317	0,0493974	281979,7	0,7	1,936041	0,7
35	34,4	0,4943	0,0294662	266247,6	0,7	1,967505	0,7
40	39,4	0,48495	0,0177246	255526,5	0,7	1,988947	0,7
45	44,4	0,476851	0,0106841	247830,3	0,7	2	0,704339
50	49,4	0,46972	0,0064347	242045,4	0,723182	2	0,715909
55	54,4	0,463362	0,0038687	237508,8	0,738304	2	0,724982
60	59,4	0,457632	0,002322	233809,9	0,750634	2	0,73238
65	64,4	0,452424	0,0013917	230689,5	0,761035	2	0,738621
70	69,4	0,447654	0,0008337	227981,5	0,770062	2	0,744037
75	74,4	0,44326	0,0004992	225577,4	0,778075	2	0,748845
80	79,4	0,439188	0,0002988	223405,6	0,785315	2	0,753189
82,5	81,9	0,437259	0,0002314	222391,1	0,788696	2	0,755218

LAMPIRAN 8

PENENTUAN BERAT MINIMAL PIPA

Perhitungan berat minimal pipa dihitung berdasarkan persamaan (18), dan hasil perhitungannya dapat dilihat pada tabel 4.12

Nilai yang Dimasukkan Adalah :

a.Gaya Drag

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

Dimana :

ρ = Densitas fluida, kg/m^3

C_D = Koefisien Drag

D = Diameter terluar pipa, m

U_e = Kecepatan efektif partikel, $m/sekon$

b. Gaya Inersia (Inertia Force)

Gaya Inersia yang bekerja pada struktur pipa persatuan panjang dirumuskan sebagai berikut (Mousselli, 1981) :

$$F_I = \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{dU}{dt} \quad (42)$$

Keterangan :

ρ = Densitas fluida, $kg m^3$

D = Diameter terluar pipa, m

dU/dt = Percepatan horizontal partikel air, $m/sekon^2$

C_M = Koefisien Inersia

c. Gaya Angkat (*Lift Force*)

Gaya Angkat (*Lift Force*) yang bekerja pada struktur pipa bawah laut, diformulasikan sebagai berikut (Mousselli, 1981) :

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L D U_e^2 \quad (43)$$

Keterangan :

- ρ = Densitas fluida, kg/m^3
 D = Diameter terluar pipa, m
 U_e = Kecepatan efektif aliran, m/sekon.
 C_L = Koefisien Lift

Tabel 4.12 Perhitungan Berat Minimal Pipa

d	y	FD	FI	FL	W minimal
10	9,4	160,54	0	117,77	535,12
15	14,4	122,109	0	68,1355	407,030
20	19,4	150,6407	0	103,6962	502,13561
25	24,4	132,0274	0	79,65377	440,09132
30	29,4	121,3922	0	67,33799	404,64082
35	34,4	114,6196	0	60,03381	382,06529
40	39,4	110,0042	0	55,29634	366,6805
45	44,4	106,6909	0	52,33801	355,63642
50	49,4	107,6514	0	50,74324	358,83789
55	54,4	107,8425	0	49,47813	359,47508
60	59,4	107,9359	0	48,4383	359,78644
65	64,4	107,9711	0	47,55584	359,90371
70	69,4	107,9693	0	46,78647	359,89762
75	74,4	107,9425	0	46,10094	359,80823
80	79,4	107,8979	0	45,4798	359,65958
82,5	81,9	107,8704	0	45,18909	359,56804