

19.329/10/A/2003



**TUGAS AKHIR
(KL. 1702)**

**PERANCANGAN PIPA BAWAH LAUT
MOBIL CEPU LTD.
DI PERAIRAN TUBAN, JAWA TIMUR**



RiKe
665.744
Asy
P-1
2003

Disusun Oleh :
M. TEDY ASYIKIN
NRP : 4398 100 017

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	12-9-2003
Terima dari	P1
No. Agenda Prp.	269177

**JURUSAN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2003**

**PERANCANGAN PIPA BAWAH LAUT MOBIL CEPU LTD.
DI PERAIRAN TUBAN, JAWA TIMUR**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Jurusan Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya**

**Surabaya, Agustus 2003
Mengetahui / Menyetujui**

Dosen Pembimbing I



**Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc.
NIP. 132 048 145**

Dosen Pembimbing II

**Dr. Ir. Wisnu Wardhana, M.Sc.
NIP. 68 001 934**

“Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, silih bergantinya malam dan siang, bahtera yang berlayar di laut membawa apa yang berguna bagi manusia, dan apa yang Allah turunkan dari langit berupa air, lalu dengan air itu Dia (Allah) hidupakan bumi sesudah mati (kering) nya dan Dia (Allah) sebarkan di bumi itu segala jenis hewan, dan pengisaran angin dan awan yang dikendalikan antar langit dan bumi ; Sungguh (terdapat) tanda-tanda (keEsaan dan kebesaran Allah) bagi kaum yang memikirkan”

QS. Al Baqarah : 164

ABSTRAK

ABSTRAK

Tugas Akhir ini merancang dan menganalisa pipa bawah laut Mobil Cepu Ltd. di perairan Tuban, Jawa Timur. Beban-beban hidrodinamis yang mengenai pipa akan mempengaruhi kestabilan dan kekuatan struktur pipa. Perancangan meliputi perhitungan diameter pipa, ketebalan pipa, ketebalan lapisan beton (concrete coating) serta densitas lapisan beton. Analisa pada pipa meliputi analisa buckling dan analisa kekuatan struktur pipa. Perancangan dan analisa yang dilakukan berdasarkan pada referensi yang berkaitan dengan perancangan pipa bawah laut serta rules yang diberikan oleh Germanischer Lloyd (1995) Rules for Classification and Construction, Part 4-Subsea Pipelines and Riser. Daerah studi berada di pantai utara perairan Tuban, Jawa Timur. Tinggi Gelombang signifikan pada daerah studi adalah 1.22 meter dengan periode gelombang 5.73 detik. Dari hasil perhitungan dan analisa dapat disimpulkan bahwa diameter luar pipa adalah 0.457 m (18 in) dengan ketebalan pipa 0.0125 m (0.5 in). Seluruh bagian pipa memiliki ketebalan lapisan beton 7.62 cm (3 in) dengan variasi densitas berdasarkan kedalaman. Sistem proteksi trenching/burial direkomendasikan agar pipa tidak mengalami kerusakan dan ketidakstabilan, khususnya pada kedalaman 1.56 meter sampai 11 meter.



KATA PENGANTAR

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan syukur 'alhamdulillah', akhirnya tugas akhir ini telah berhasil diselesaikan dan diberi judul :

"PERANCANGAN PIPA BAWAH LAUT MOBIL CEPU LTD. DI PERAIRAN
TUBAN, JAWA TIMUR"

Tugas akhir ini disusun guna memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar sarjana Strata Satu (S-1) di jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan ITS.

Kami menyadari bahwa tugas akhir ini masih terdapat kekurangan dan masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran dari pembaca sekalian sangat diharapkan agar untuk masa yang akan datang didapatkan hasil yang lebih baik dan sempurna.

Perancangan dalam tugas akhir ini adalah perancangan yang bersifat umum (*general*). Banyak aspek yang harus dipertimbangkan dalam merancang sistem perpipaan bawah laut, namun hal yang mendasar adalah menentukan diameter pipa yang digunakan untuk mengalirkan suatu fluida.

Perancangan pipa bawah laut dalam tugas akhir ini mengacu pada *rule* yang diberikan oleh Germanischer Lloyd (GL) 1995, *Rules for Classification and Construction, Part 4 – Subsea Pipeline and Riser*.

Semoga tugas akhir ini dapat memberikan tambahan ilmu dan wawasan bagi kita semua dan memberikan sedikit sumbangsih bagi kemajuan, khususnya untuk Almamater Tercinta 'Teknik Kelautan, FTK-ITS'

Surabaya, Agustus 2003

M. Tedy Asyikin



UCAPAN TERIMA KASIH

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini, penulis sampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah memberikan masukan, dukungan, dorongan serta kritik kepada penulis, sehingga akhirnya laporan tugas akhir ini bisa selesai dengan baik.

Penulis mengucapkan terima kasih yang setulusnya kepada :

1. Ibunda dan Ayahanda tercinta atas segala curahan kasih dan sayangnya serta kesabaran dalam mendidik dan membimbing tanpa mengenal rasa lelah.
2. Saudara-suadaraku yang tercinta, Kak Leni & Indri atas dorongan serta doa yang diberikan selama ini. Keberadaan kakak dan adik selalu menyemangati penulis untuk segera menyelesaikan studi.
3. Ir. Hasan Ikhwani, MSc. dan DR. Ir. Wisnu Wardhana MSc. selaku dosen pembimbing dalam pengerjaan tugas akhir ini, atas bimbingan, arahan, nasehat dan motivasi yang telah diberikan.
4. Ir. Imam Rochani, MSc. selaku dosen wali yang telah banyak memberikan perhatian dan bimbingan.
5. DR. Ir. Paulus Indiyono MSc. dan DR. Ir. Wahyudi, MSc. selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Kelautan yang telah banyak membantu selama masa perkuliahan.
6. Ir. Murdjito MEng. selaku kepala laboratorium OPRES, yang telah mengizinkan penulis untuk menyelesaikan tugas akhir di lab, serta

atas kesediaannya meluangkan waktu untuk berbagi ilmu dan pengetahuan.

7. Seluruh staf pengajar dan segenap karyawan di Jurusan Teknik Kelautan.
8. Warga lab opres, Alexis, Pak Suyuthi, Muhammad, Ferry, Budi Krist, Dain, Denny serta mas Slamet atas kebaikan dan dorongan yang diberikan serta kebersamaan selama ini.
9. Saudara-saudaraku di Cabang Sukolilo, yang tak pernah lelah untuk menasehati penulis.
10. Teman-teman angkatan '98, Udin, Buset, Agus, Aryo, Rudi, Willy, Lucky, Mamah, Yenung, Sindhu, Sasra, Wiyono, Lalu, Teguh, Panggi, Lidya, Papa Yusuf, Rouf 'Cool' dan yang lainnya.
11. My Future 'Juicer'. Bersabarlah, karena Allah pasti bersama orang-orang yang sabar.
12. Teman-teman kontrakan Kejawan Gebang VI/13, Kak Roni, Chemenk, Ari, Bim-bim serta Kak Sudi.
13. Dan kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Semoga Allah memberikan balasan yang sesuai kepada orang-orang yang ikhlas.

Surabaya, Agustus 2003

M. Tedy Asyikin



DAFTAR ISI

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	ii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR NOTASI	xi
BAB I. PENDAHULUAN	
I.1. LATAR BELAKANG MASALAH	I-1
I.2. PERUMUSAN MASALAH	I-3
I.3. TUJUAN	I-3
I.4. MANFAAT	I-4
I.5. BATASAN MASALAH	I-4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	
II.1. TINJAUAN PUSTAKA	II-1
II.2. DESAIN UKURAN PIPA	II-3
II.2.1. Kecepatan Alir Suatu Fluida	II-4
II.2.2. Diameter Dalam Pipa (Pipe Inside Diameter)	II-5
II.3. STABILITAS LATERAL PIPA BAWAH LAUT	II-6
II.4. STABILITAS VERTIKAL	II-10
II.5. BEBAN GELOMBANG	II-13
II.5.1. Teori Gelombang Stokes Orde 2	II-15
II.5.2. Teori Gelombang Cnoidal	II-17
II.5.3. Kecepatan Partikel Air Efektif	II-21
II.5.4. Gaya-gaya Hidrodinamis	II-23
II.5.5. Koefisien Hidrodinamis	II-24
II.6. BUCKLING PADA PIPA	II-29
II.6.1. Local Buckling	II-31
II.6.2. Global Buckling	II-35

BAB III. METODOLOGI

METODOLOGI	III-1
------------	-------

BAB IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN

IV.1. ANALISA	IV-1
IV.1.1. Data Produksi Minyak	IV-1
IV.1.2. Data Lingkungan	IV-4
IV.1.3. Perhitungan Densitas Cairan	IV-7
IV.1.4. Kecepatan Alir Cairan	IV-7
IV.1.5. Diameter dalam pipa	IV-8
IV.1.6. Perhitungan Ketebalan Concrete Coating	IV-9
IV.1.7. Analisa Buckling	IV-24
IV.2. PEMBAHASAN	IV-32
IV.2.1. Ukuran Pipa	IV-32
IV.2.2. Densitas dan Ketebalan Lapisan Beton	IV-33
IV.2.3. Sistem Perlindungan (Protection Methods)	IV-52
IV.2.4. Lokal Buckling	IV-60
IV.2.5. Global Buckling	IV-60

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

V.1. KESIMPULAN	V-1
V.2. SARAN	V-3

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR GAMBAR

DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1. Gaya-gaya yang bekerja pada pipa	II-6
Gambar II. 2. Potongan melintang pipa bawah laut	II-9
Gambar II. 3. Stabilitas pipa yang dipendam	II-10
Gambar II. 4. Gelombang progressive dan gelombang standing	II-13
Gambar II. 5. Grafik Validitas Region of Validity	II-15
Gambar II. 6. Profil Gelombang Cnoidal	II-17
Gambar II. 7. Variasi $1-k^2$ dan HgT^2/d^2 untuk berbagai H/d	II-19
Gambar II. 8. Variasi fungsi Jacobian elliptik modulus k	II-20
Gambar II. 9. Variasi $cn2q$ dan $cnqdnqsnq$ dengan sudut fase untuk berbagai nilai k	II-20
Gambar II. 10. Distribusi kecepatan arus menurut kedalaman	II-22
Gambar II. 11. Perkiraan harga CD untuk silinder akibat pengaruh gelombang	II-26
Gambar II. 12. Perkiraan harga CM untuk silinder akibat pengaruh gelombang	II-27
Gambar II. 13. Koefisien Inersia (C_{mb}) dasar laut akibat pengaruh gelombang dan arus	II-27
Gambar II. 14. Koefisien Drag (C_{db}) dasar laut akibat pengaruh gelombang dan arus	II-28
Gambar II. 15. Koefisien Lift akibat beban gelombang dan arus	II-28
Gambar IV. 1. Bentangan pipa di perairan Tuban, Jawa Timur	IV-2
Gambar IV. 2. Daerah studi di perairan Tuban, Jawa Timur	IV-2
Gambar IV. 3. Daerah studi di perairan Tuban, Jawa Timur	IV-3
Gambar IV. 4. Ilustrasi pemodelan struktur pipa	IV-31
Gambar IV. 5. Grafik diameter dalam vs kecepatan alir untuk berbagai harga flow rate	IV-33
Gambar IV. 6. Grafik densitas lapisan beton pada setiap kedalaman (d)	IV-35
Gambar IV. 7. Grafik densitas lapisan beton pada setiap kedalaman (d)	IV-36
Gambar IV. 8. Proses pelapisan beton dengan metode impingement	IV-37

Gambar IV. 9. Proses pelapisan beton dengan metode wrapping	IV-37
Gambar IV. 10. Grafik perbandingan kecepatan partikel air teori gelombang Cnoidal	IV-40
Gambar IV. 11. Grafik perbandingan kecepatan efektif partikel air teori gelombang Cnoidal	IV-41
Gambar IV. 12. Grafik perbandingan percepatan partikel air teori gelombang Cnoidal	IV-41
Gambar IV. 13. Grafik perbandingan kecepatan partikel air teori gelombang Stokes Orde 2	IV-42
Gambar IV. 14. Grafik perbandingan kecepatan efektif partikel air teori gelombang Stokes Orde	IV-42
Gambar IV. 15. Grafik perbandingan percepatan efektif partikel air teori gelombang Stokes Orde 2	IV-43
Gambar IV. 16. Grafik perbandingan koefisien hidrodinamis	IV-44
Gambar IV. 17. Grafik perbandingan gaya drag	IV-44
Gambar IV. 18. Grafik perbandingan gaya inersia	IV-45
Gambar IV. 19. Grafik perbandingan gaya lift	IV-45
Gambar IV. 20. Grafik perbandingan berat pipa	IV-46
Gambar IV. 21. Grafik perbandingan densitas	IV-46
Gambar IV. 22. Bentuk fisik bermacam-macam gelombang	IV-48
Gambar IV. 23. Distribusi kecepatan dan percepatan partikel air	IV-48
Gambar IV. 24. Sistem anchoring pipa bawah laut	IV-53
Gambar IV. 25. Burial/trenching pada pipa	IV-55
Gambar IV. 26. Metode backfill untuk pemendaman pipa	IV-56
Gambar IV. 27. Metode jetting untuk pemendaman pipa	IV-56
Gambar IV. 28. Metode fluidization untuk pemendaman pipa	IV-57
Gambar IV. 29. Metode rock cover	IV-58
Gambar IV. 30. Metode protective mattress concrete block dan cell mattress	IV-58
Gambar IV. 31. Metode protective mattress colcrete, stone asphalt, ballast dan finer rock	IV-59

DAFTAR TABEL

DAFTAR TABEL

Tabel II. 1. Koefisien Gesek Lateral (μ)	II-8
Tabel II. 2. Harga e dan $\gamma\delta$ untuk beberapa jenis tanah	II-12
Tabel II. 3. Harga C untuk beberapa jenis tanah	II-12
Tabel IV. 1. Kedalaman dan panjang pipa	IV-5
Tabel IV. 2. Panjang pipa pada kenaikan kedalaman 1 meter.	IV-6
Tabel IV. 3. Pembagian Teori Gelombang	IV-10
Tabel IV. 4. Validasi Teori Gelombang Cnoidal	IV-11
Tabel IV. 5. Kecepatan dan Percepatan Partikel Air Teori Gelombang Cnoidal.	IV-12
Tabel IV. 6. Panjang Gelombang dan Cepat Rambat Gelombang Stokes Orde 2.	IV-13
Tabel IV. 7. Kecepatan dan Percepatan Partikel Air Teori Gelombang Stokes Orde 2	IV-14
Tabel IV. 8. Asumsi awal nilai C_d dan C_m	IV-16
Tabel IV. 9. Nilai koefisien hidrodinamis akibat kombinasi arus dan gelombang.	IV-17
Tabel IV. 10. Nilai koefisien hidrodinamis akibat proximity effect.	IV-18
Tabel IV. 11. Gaya-gaya hidrodinamis persatuan panjang pipa.	IV-20
Tabel IV. 12. Berat minimum pipa (W).	IV-21
Tabel IV. 13. Densitas lapisan beton dengan ketebalan 1 inch.	IV-22
Tabel IV. 14. Densitas lapisan beton dalam berbagai harga Ketebalan	IV-23
Tabel IV. 15. Perhitungan Tekanan Buckling Kritis (P_c).	IV-27
Tabel IV. 16. Densitas lapisan beton dalam berbagai harga ketebalan	IV-34
Tabel IV. 17. Variasi densitas pada ketebalan 7.62 cm (3 in).	IV-39
Tabel IV. 18. Harga ketebalan dan densitas lapisan beton	IV-51
Tabel IV. 19. Densitas lapisan beton dengan ketebalan 7.62 cm (3 in)	IV-52



DAFTAR NOTASI

DAFTAR NOTASI

A_{st}	=	Luasan potongan pipa.
B	=	Gaya pengapung (<i>bouyancy</i>).
C	=	Konsistensi tanah dari tanah.
C	=	Cepat rambat gelombang.
C_i	=	Konstanta ($C_1 = 28$; $C_2 = 2.1 \times 10^{-4}$; $C_3 = 1.6$)
C_D	=	Koefisien Drag
C_L	=	Koefisien Lift
C_M	=	Koefisien Inersia
D	=	Diameter luar pipa.
D_o	=	Diameter luar pipa baja.
DF	=	Design Factor.
d	=	Diameter dalam pipa.
$d_{H,L}$	=	Kedalaman pada saat tertinggi dan terendah dari SWL.
dU/dt	=	Percepatan horizontal partikel air.
E	=	Elastic Modulus.
E	=	<i>Longitudinal joint factor.</i>
F	=	<i>Construction type design factor.</i>
F_D	=	Gaya Drag (<i>Drag Force</i>).
F_I	=	Gaya Inersia (<i>Inersia Force</i>).
F_L	=	Gaya Angkat (<i>Lift Force</i>).
F_c	=	Gaya aksial kritis (<i>critical axial force</i>).
F_d	=	Gaya aksial desain (<i>design axial force</i>).
F_r	=	Gaya Gesekan (<i>Friction Force</i>).
g	=	Percepatan gravitasi.
H	=	Tinggi gelombang.
h	=	Kedalaman dasar laut.
I	=	Momen Inersia.
K	=	Curvature of the pipe
KC	=	Bilangan Keulegan – Carpenter,

k	=	Angka gelombang.
L	=	Panjang gelombang.
L	=	Panjang <i>buckle</i> (<i>length of buckle</i>).
M_c	=	Momen <i>bending</i> kritis pada potongan pipa.
M_d	=	Momen <i>bending</i> desain pada waktu instalasi.
N	=	Gaya Normal (<i>Normal Force</i>).
P_E	=	Tekanan hidrostatik luar.
P_c	=	Tekanan Kritis <i>Buckling</i> .
P_d	=	Tekanan Desain Eksternal <i>Buckling</i> .
P_{eb}	=	Tekanan Elastik <i>Buckling</i> .
P_{prop}	=	Tekanan Kritis Penjalaran.
P_y	=	<i>Pressure required for full plasticity in the hoop</i>
Q_l	=	Laju aliran fluida.
U_e	=	Kecepatan efektif partikel.
$R_{10.5}$	=	Specified Minimum Yield Strength.
Re	=	Bilangan Reynold (<i>Reynolds Number</i>),.
S	=	<i>Specified Minimum Yield Strength</i> .
$S.G.$	=	Berat Spesifik Cairan (air = 1)
SG_{float}	=	Batas minimum <i>specific gravity</i> pipa.
SG_p	=	<i>Specific gravity</i> pipa.
SG_{sink}	=	Batas maksimum <i>specific gravity</i> pipa.
SG_t	=	<i>Specific gravity</i> tanah.
T	=	Periode Gelombang, sekon.
T	=	<i>Temperatur derating factor</i> .
t	=	ketebalan pipa.
U_e	=	Kecepatan efektif aliran.
u_{ss}	=	Kecepatan arus pada kedalaman y dibawah SWL.
u_{ss0}	=	Kecepatan arus pada permukaan air.
V	=	Kecepatan partikel air pada ketinggian y dari seabed..
V_{abs}	=	Kecepatan absolut.
V_N	=	Kecepatan Normal.
V_0	=	Kecepatan pada ketinggian y_0 dari dasar laut.



v	=	Kecepatan alir fluida didalam pipa.
W	=	Berat pipa terbenam total.
W_a	=	Berat keseluruhan pipa diudara.
W_{ac}	=	Berat lapisan anti korosi diudara.
W_{as}	=	Berat baja diudara.
W_{aw}	=	Berat lapisan beton diudara.
W_s	=	Berat pipa tenggelam.
W_{udara}	=	Berat total sistem pipa diudara.
Y	=	<i>Yield Stress</i> pipa.
y	=	Kedalaman yang ditinjau.
y	=	Ketinggian V dari dasar laut.
y_0	=	Ketinggian V_0 dari dasar laut.
Z	=	Section Modulus.
α	=	Koefisien pemuaian linier thermal.
ΔT	=	Perbedaan temperatur.
ΔP	=	Perbedaan tekanan.
Δ_b	=	Ovalisasi yang disebabkan oleh bending.
Δ_0	=	initial ovalisation.
γ_d	=	Berat kering tanah.
γ_m	=	<i>Safety Factor</i> (1.05).
γ_u	=	<i>Safety Factor</i> (1.4).
γ_w	=	Berat air laut.
μ	=	Koefisien gesek tanah aksial ($\mu = 0.7$)
μ_L	=	Koefisien gesek tanah lateral ($\mu_L = 0.6$)
ρ_L	=	Densitas Cairan.
ρ_w	=	Densitas air murni.
ρ	=	Densitas fluida.
ρ_c	=	Densitas lapisan anti korosi.
ρ_{cc}	=	Densitas lapisan beton.
ω	=	Frekuensi gelombang.
θ	=	Kemiringan dasar laut.

- θ = Sudut fase.
- σ_o = Specified Minimum Yield Stress.
- ν = Poisson's ratio untuk material pipa.

BAB I
PENDAHULUAN

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. LATAR BELAKANG MASALAH

Jalur pipa bawah laut digunakan untuk mendistribusikan minyak dan gas bumi dari suatu fasilitas ke fasilitas yang lainnya. Pada kondisi dan keadaan tertentu perlu perencanaan agar memberikan efisiensi yang lebih baik, sehingga investasi yang dihabiskan untuk instalasi pipa bawah laut dapat memberikan hasil yang maksimal, dengan kata lain bahwa kelaikan dan keandalan serta *lifetime* dari struktur harus sesuai dengan perencanaan.

Keandalan pipa bawah laut akan baik jika struktur berada dalam kondisi yang stabil. Namun pada kenyataannya pengaruh lingkungan laut akan mempengaruhi kestabilan dari struktur tersebut. Lingkungan laut akan memberikan pengaruh gaya-gaya hidrodinamika. Pengaruh ini disebabkan oleh keadaan lingkungan laut, yaitu gelombang, arus dan keadaan tanah dasar laut.

Beban-beban ini akan mempengaruhi kestabilan pipa. Perubahan kedudukan pipa akibat dari ketidakstabilannya meliputi pergeseran/ketidakstabilan horisontal di *seabed* maupun ketidakstabilan vertikal seperti melayang (*floating*) dan melesak (*sink/settlement*) akibat dari peristiwa likuifaksi tanah, (Ma'ruf, 2001).

Perubahan kedudukan ini akan menyebabkan pipa mengalami deformasi *bending* yang bisa memberikan pengaruh buruk pada pipa tersebut. Kerusakan akan terjadi pada pipa dan bahkan akan menyebabkan kebocoran (Nerlan, 1999). Kebocoran bukan saja menyebabkan kerugian dengan muntahnya minyak/gas bumi, namun juga akan merusak lingkungan.

Pipa bawah laut biasanya dilapisi dengan lapisan beton (*concrete coating*), yang berfungsi untuk memberikan perlindungan bagi lapisan korosi bagian luar dan untuk memberikan berat tambahan bagi pipa sehingga menjadi lebih stabil. Berat baja pipa dan lapisan anti korosi luar, biasanya tidak cukup untuk menyebabkan pipa terbenam didasar laut.

Dalam Tugas Akhir ini, ruang lingkup desain meliputi perhitungan ukuran pipa yaitu diameter luar dan dalam, ketebalan pipa dan ketebalan serta densitas lapisan beton. Sedangkan analisa yang akan dilakukan meliputi analisa *buckling* yang terdiri atas *local buckling* dan *global buckling* serta analisa struktur pada daerah yang memberikan pengaruh beban yang terbesar pada struktur pipa. Pemodelan struktur menggunakan perangkat lunak *GT-Strudl 25*. Lokasi studi kasus terletak di perairan Tuban, Jawa Timur, Indonesia.

I.2. PERUMUSAN MASALAH

Dalam tugas akhir ini, terdapat empat hal yang dijadikan rumusan masalah, yaitu :

1. Berapa besar *inside diameter* serta ketebalan pipa bawah laut Mobil Cepu Ltd. di perairan Tuban, Jawa Timur yang dibutuhkan untuk mendistribusikan minyak bumi berdasarkan produksi perharinya.
2. Berapa besar ketebalan dan densitas lapisan beton pipa bawah laut Mobil Cepu Ltd. di Perairan Tuban, Jawa Timur yang dibutuhkan agar pipa tetap stabil didasar laut.
3. Apakah pipa mengalami *buckling (local dan global)* akibat beban yang bekerja pada pipa.
4. Berapa panjang jarak tumpuan yang harus ditentukan agar struktur pipa tidak mengalami kegagalan (*failed*).

I.3. TUJUAN

Tujuan yang ingin diperoleh dalam tugas akhir ini adalah :

1. Untuk mendapatkan *inside diameter* dan ketebalan pipa bawah laut Mobil Cepu Ltd. di perairan Tuban, Jawa Timur yang sesuai untuk mendistribusikan minyak berdasarkan produksi perharinya.
2. Untuk mendapatkan ketebalan dan densitas lapisan beton Mobil Cepu Ltd. di Perairan Tuban, Jawa Timur yang cukup untuk menyebabkan pipa tetap stabil.

3. Untuk mengetahui kekuatan struktur pipa terhadap kemungkinan terjadinya *buckling*.
4. Untuk mengetahui jarak tumpuan maksimal agar pipa tidak mengalami kegagalan (*failed*).

I.4. MANFAAT

Adapun manfaat dari tugas akhir ini adalah :

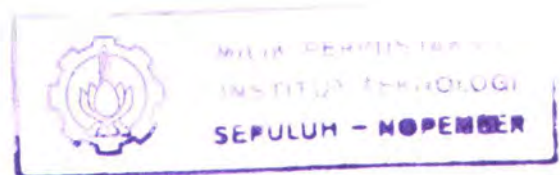
1. Mendapatkan desain ukuran *inside diameter* dan ketebalan pipa bawah laut Mobil Cepu Ltd. di perairan Tuban, Jawa Timur yang sesuai untuk mendistribusikan minyak berdasarkan produksi perharinya.
2. Mendapatkan ketebalan dan densitas lapisan beton Mobil Cepu Ltd. di Perairan Tuban, Jawa Timur yang cukup untuk menyebabkan pipa tetap stabil.
3. Mengetahui kekuatan struktur pipa terhadap kemungkinan terjadinya *buckling*.
4. Mendapatkan jarak tumpuan maksimal agar pipa tidak mengalami kegagalan (*failed*).

I.5. BATASAN MASALAH

Untuk membatasi ruang lingkup dalam perancangan pipa bawah laut, maka permasalahan dibatasi dengan batasan-batasan sebagai berikut :

1. Dalam perhitungan ketebalan dan densitas lapisan beton, pipa dianggap meletak didasar laut.

2. *Scouring* tidak diperhitungkan.
3. Pengaruh gempa tidak diperhitungkan.
4. Pipa hanya dipengaruhi oleh gaya-gaya hidrodinamis yang berdasarkan data arus dan data gelombang.
5. Analisa dilakukan pada saat operasional.



BAB II
TINJAUAN PUSTAKA DAN
DASAR TEORI

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

II.1. TINJAUAN PUSTAKA

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. Pipa bawah laut yang berada didekat zona pantai (*near onshore zone*) biasanya diberi sistem proteksi (*trenching, backfilling, burial, anchoring*) yang bertujuan untuk melindungi pipa dari kerusakan yang diakibatkan oleh benturan kapal, jangkar kapal, serta aktivitas nelayan. Selain itu juga, sistem proteksi diberikan untuk menjaga agar pipa tetap stabil pada kedudukannya.

Pipa bawah laut yang berada jauh dari pantai (*offshore zone*) tidak atau jarang menggunakan sistem proteksi. Untuk pipa yang berada dilepas pantai biasanya hanya diberikan lapisan pemberat yang terbuat dari beton (*concrete coating*). Lapisan beton diberikan dengan tujuan untuk memberikan berat tambahan pada pipa dan juga untuk melindungi lapisan anti korosi terluar pipa dari kerusakan akibat benturan maupun pada saat instalasi. Bertambahnya berat pipa dengan diberikan lapisan beton, akan menyebabkan pipa semakin stabil. Lapisan beton ditentukan berdasarkan ketebalan dan densitas lapisan tersebut. Penggunaan densitas yang

besar akan mengurangi ketebalannya, sedangkan densitas yang kecil membutuhkan ketebalan yang besar.

Nerlan (1999) telah menganalisa lapisan beton pipa bawah laut dilokasi jaringan transmisi pipa gas Jawa Timur. Analisa yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui spesifikasi tebal lapisan beton dan densitas yang mampu menjaga stabilitas pipa. Dari hasil analisa diperoleh kesimpulan bahwa pada zona perairan dalam stabilitas pipa dapat dicapai pada ketebalan 2.5 in dengan densitas 140 pcf, ketebalan 2 in dengan densitas 160 pcf dan ketebalan 1.5 in dengan densitas 190 sampai 200 pcf. Nerlan juga mengatakan bahwa pada keadaan operasional, ketebalan dan densitas lapisan beton lebih besar jika dibandingkan pada keadaan instalasi dan uji hidrostatis.

Bawonondo (1999) dalam Ma'ruf (2001) telah melakukan analisa stabilitas pipa bawah laut pada lapangan produksi Pertamina-Esso di laut Cina Selatan. Analisa dilakukan pada pipa dengan diameter 26 in pada kedalaman 143 meter. Analisa tersebut dilakukan pada 3 kondisi yaitu instalasi, tes hidrostatis dan operasional. Dari hasil analisa diperoleh bahwa ketebalan lapisan beton yang memenuhi syarat stabilitas untuk 3 kondisi tersebut adalah 1.5 in dengan densitas 140 pcf dan 1 in dengan densitas 160, 190 dan 200 pcf.

Sutarno (1995) telah melakukan studi perbandingan perhitungan tebal lapisan beton Trans Java Gas Pipeline Zone I dengan analisis FEM dan peraturan standar. Dari hasil analisa stabilitas didapatkan tiga macam

spesifikasi lapisan beton yang memenuhi syarat stabilitas, yaitu ketebalan 5 in dengan densitas 160 pcf, ketebalan 4 in dengan densitas 190 pcf dan ketebalan 3.5 in dengan densitas 200 pcf. Tekanan dalam pipa maksimum terjadi pada saat kondisi operasional.

II.2. DESAIN UKURAN PIPA

Perhitungan ukuran pipa sangat tergantung pada fluida yang mengalir didalam pipa tersebut. Karakteristik fluida alir yang mengalir didalam pipa merupakan parameter-parameter untuk menentukan desain ukuran pipa. Karakteristik tersebut diantaranya berat spesifik dan densitas fluida alir.

Berat spesifik suatu cairan didefinisikan sebagai perbandingan densitas cairan tersebut dengan densitas air murni, dan dirumuskan seperti pada persamaan (1) (Arnold, 1998).

$$SG = \frac{\rho_L}{\rho_w} \quad (1)$$

Hubungan antara berat API dengan berat spesifik diberikan oleh persamaan (2).

$${}^0 API = \frac{141.5}{S.G.} - 131.5 \quad (2)$$

Jika persamaan (1) disubstitusikan dengan persamaan (2), maka didapatkan,

$$\rho_L = \left[\frac{141.5}{({}^0 API + 131.5)} \right] \times \rho_w \quad (3)$$

Keterangan :

S.G. = Berat Spesifik Cairan (air = 1)

ρ_L = Densitas Cairan, lb/ft³.

ρ_w = Densitas air murni, lb/ft³.

II.2.1. Kecepatan Alir Suatu Fluida

Untuk mendesain ukuran pipa dari suatu sistem perpipaan, diperlukan data ataupun keterangan tentang volume dan laju aliran fluida yang dialirkan kedalam pipa tersebut. Penentuan awal diameter kadang memerlukan prosedur coba-coba (*trial and error*). Namun terdapat suatu pendekatan rumus empiris yang dapat digunakan untuk menghitung diameter pipa, dimana rumus empiris ini merupakan fungsi dari laju aliran (v) dan densitas (ρ_L) fluida yang mengalir didalam pipa. Ziu (1995) memberikan rumusan kecepatan alir (v) fluida didalam pipa. Untuk fluida yang bersih (*clear fluids*) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (4) dan untuk fluida yang erosif (*erosive fluid*) persamaan (5).

$$v = \frac{48}{(\rho)^{1/3}} \quad (4)$$

$$v = \frac{24}{(\rho)^{1/3}} \quad (5)$$

Keterangan :

v = Kecepatan alir fluida didalam pipa, ft/s

ρ = Densitas fluida, lb/ft³

II.2.2. Diameter Dalam Pipa (*Pipe Inside Diameter*)

Kecepatan maksimum fluida yang mengalir dalam pipa adalah 15 m/s (Arnold, 1998). Berdasarkan pengalaman, maka kecepatan maksimum ini cukup untuk mengurangi kebisingan (*noise*), *water hammer* dan erosi. Kecepatan alir aliran fluida khususnya cairan yang mengalir dalam suatu pipa, perlu dijaga agar tidak terjadi pengendapan.

Hubungan antar kecepatan alir dengan diameter dalam pipa dirumuskan oleh persamaan berikut ini (Arnold, 1998).

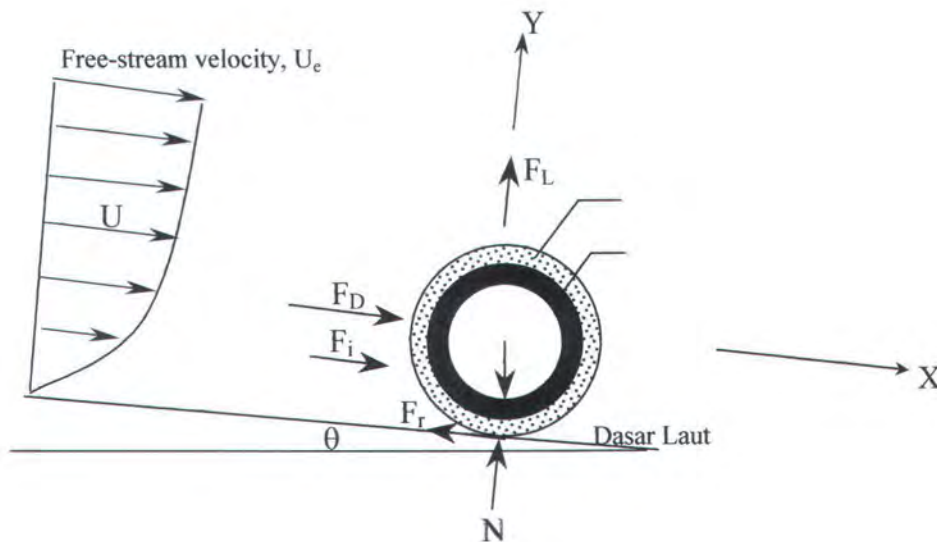
$$v = 0.012 \frac{Q_l}{d^2} \quad (6)$$

Keterangan :

- Q_l = Laju aliran fluida, barrel/hari.
 d = Diameter dalam pipa, in.

II.3. STABILITAS LATERAL PIPA BAWAH LAUT

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 II. 1

Gaya-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 :

$$F_D + F_L - F_r - W \sin \theta = 0 \quad (7)$$

- Persamaan kesetimbangan Vertikal :

$$N + F_L - W \cos \theta = 0 \quad (8)$$

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 didasar 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:

$$F_r = \mu N \quad (9)$$

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 beton dengan berbagai macam tipe tanah.

Tabel II. 1. Koefisien Gesek Lateral (μ) (Mousselli, 1981)

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

Dengan mengkombinasikan persamaan (7) dan (8) dengan menggunakan persamaan (9), maka dapat diturunkan persamaan sebagai berikut :

$$F_D + F_i + \mu (F_L - W \cos \theta) = W \sin \theta \quad (10)$$

$$W = \frac{F_D + F_i + \mu F_L}{\mu \cos \theta + \sin \theta} \quad (11)$$

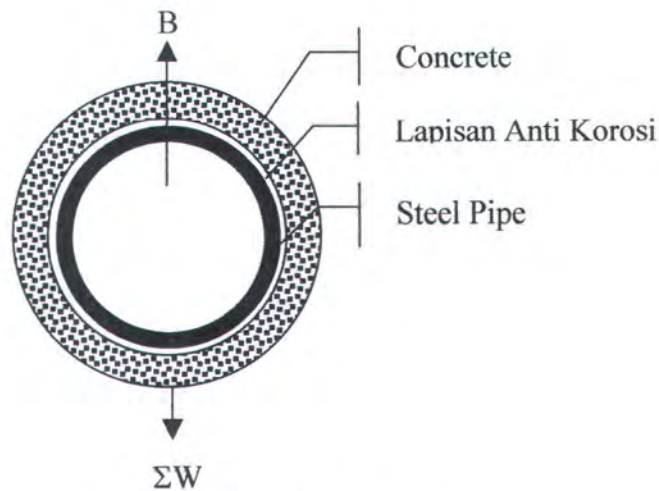
Jika permukaan dasar laut datar, $\theta = 0^\circ$, maka :

$$W = F_L + \frac{1}{\mu} (F_D + F_i) \quad (12)$$

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

Densitas beton yang sering digunakan untuk melapisi berkisar antara 2250 – 3050 kg/m³ (Halliwell, 1986). Beton dengan densitas yang besar akan menyebabkan ketebalan lapisan beton kecil, namun sebaliknya jika digunakan densitas yang kecil, maka ketebalan akan semakin besar.

Gambar II.2 merupakan gambar potongan melintang pipa dengan lapisan beton (*concrete coating*).



Gambar II. 2

Potongan melintang pipa bawah laut.

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

$$W_{as} = 2.68 (D^2 - Di^2) \quad (13)$$

$$W_{ac} = \frac{\pi \rho_c}{576} ((D + 2t_c)^2 - D^2) \quad (14)$$

$$W_{aw} = \frac{\pi \rho_w}{576} ((D + 2t_c + 2t_w)^2 - (D + 2t_c)^2) \quad (15)$$

$$W_a = W_{as} + W_{ac} + W_{aw} \quad (16)$$

$$B = 0.35 (D + 2t_c + 2t_w)^2 \quad (17)$$

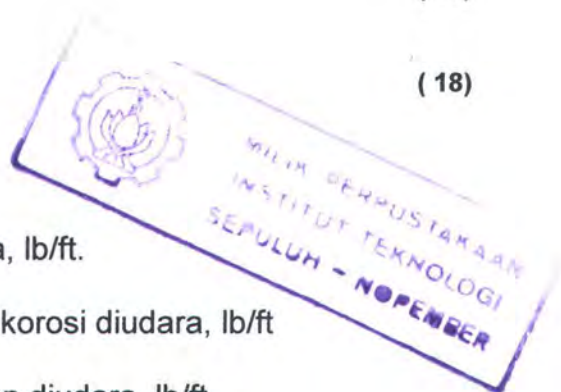
$$W_s = W_a - B \quad (18)$$

Keterangan :

W_{as} = Berat baja diudara, lb/ft.

W_{ac} = Berat lapisan anti korosi diudara, lb/ft

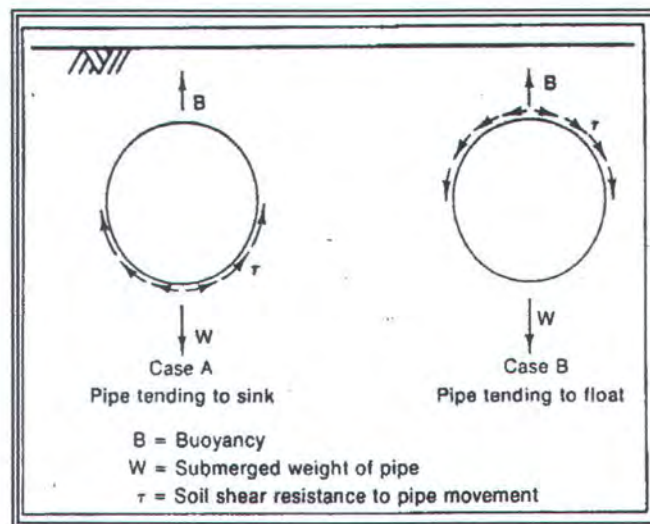
W_{aw} = Berat lapisan beton diudara, lb/ft



W_a	=	Berat keseluruhan pipa diudara, lb/ft
B	=	Gaya pengapung (<i>bouyancy</i>), lb/ft
W_s	=	Berat pipa tenggelam, lb/ft
ρ_c	=	Densitas lapisan anti korosi, lb/ft ³
ρ_w	=	Densitas lapisan beton, lb/ft ³

II.4. STABILITAS VERTIKAL

Pipa yang terbenam didasar laut dapat melayang (*float*) atau terbenam (*sink/settlement*). Hal ini dipengaruhi oleh berat pipa (termasuk isinya), *undrained shear strength* dan densitas tanah, seperti gambar berikut ini :



Gambar II. 3

Stabilitas pipa yang dipendam (Mousselli, 1981).

Ghazzaly dalam Mousselli (1981) menyatakan bahwa stabilitas vertikal pipa dinyatakan dalam suatu batasan (*range*) harga *specify gravity* (SG) yang ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut ini :

$$SG_{float} < SG_P < SG_{sink} \quad (19)$$

Keterangan :

- SG_p = *Specific gravity* pipa.
 SG_{float} = Batas minimum *specific gravity* pipa.
 = $SG_{air\ laut}$
 SG_{sink} = Batas maksimum *specific gravity* pipa.
 = $SG_t + \frac{2C}{\rho D}$
 SG_t = *Specific gravity* tanah.
 C = Konsistensi tanah dari tanah, lb/ft²
 D = Diameter luar pipa, in.

Sarpkaya (1981) dalam Ma'ruf (2001) menjelaskan bahwa *Specific gravity* pipa didefinisikan sebagai berat total sistem pipa diudara dibagi dengan berat air yang dipindahkan, dan diformulasikan :

$$SG = \frac{W_{udara}}{B} \quad (20)$$

- Dimana : W_{udara} = Berat total sistem pipa diudara.
 B = Berat air yang dipindahkan.

Sedangkan SG_t dihitung dengan menggunakan rumus yang diberikan oleh Das (1985) sebagai berikut :

$$SG_t = \frac{\gamma_d(1+e)}{\gamma_w} \quad (21)$$

- Dimana : γ_d = Berat kering tanah.
 γ_w = Berat air laut.
 e = *void ratio*.

Harga *void ratio*(e) dan γ_d dapat dilihat pada Tabel II.2 berikut ini.

Tabel II. 2. Harga e dan γ_d untuk beberapa jenis tanah (Das, 1985)

Jenis Tanah	e	γ_d	
		Lb/ft ³	KN/m ³
<i>Loose Uniform Sand</i>	0.5	92	14.5
<i>Dense Uniform Sand</i>	0.45	115	18
<i>Loose Angular-Grained Silty Sand</i>	0.65	102	16
<i>Dense Angular-Grained Silty Sand</i>	0.4	121	19
<i>Stiff Clay</i>	0.6	108	17
<i>Soft Clay</i>	0.9-1.4	73-93	11.5-14.5
<i>Loess</i>	0.9	86	13.5
<i>Soft Organic Clay</i>	2.5-3.2	38-51	6-8
<i>Clacial Till</i>	0.3	134	21

Harga konsistensi (C) untuk beberapa tipe tanah diberikan oleh Dawson (1983) pada Tabel II.3 berikut ini.

Tabel II. 3. Harga C untuk beberapa jenis tanah (Dawson, 1983)

Jenis Tanah	C (lb/ft ³)
<i>Very Soft</i>	<250
<i>Soft</i>	250 – 500
<i>Medium</i>	500 – 1000
<i>Stiff</i>	1000 – 2000
<i>Very Stiff</i>	2000 – 4000
<i>Hard</i>	> 4000

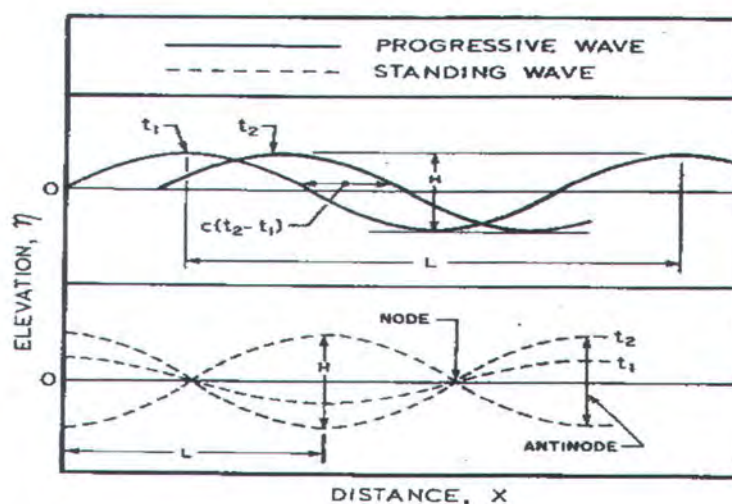
SG air laut dihitung sebagai perbandingan antara *specific weight* air laut dengan *specific weight* air murni pada kondisi standar.

II.5. 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.



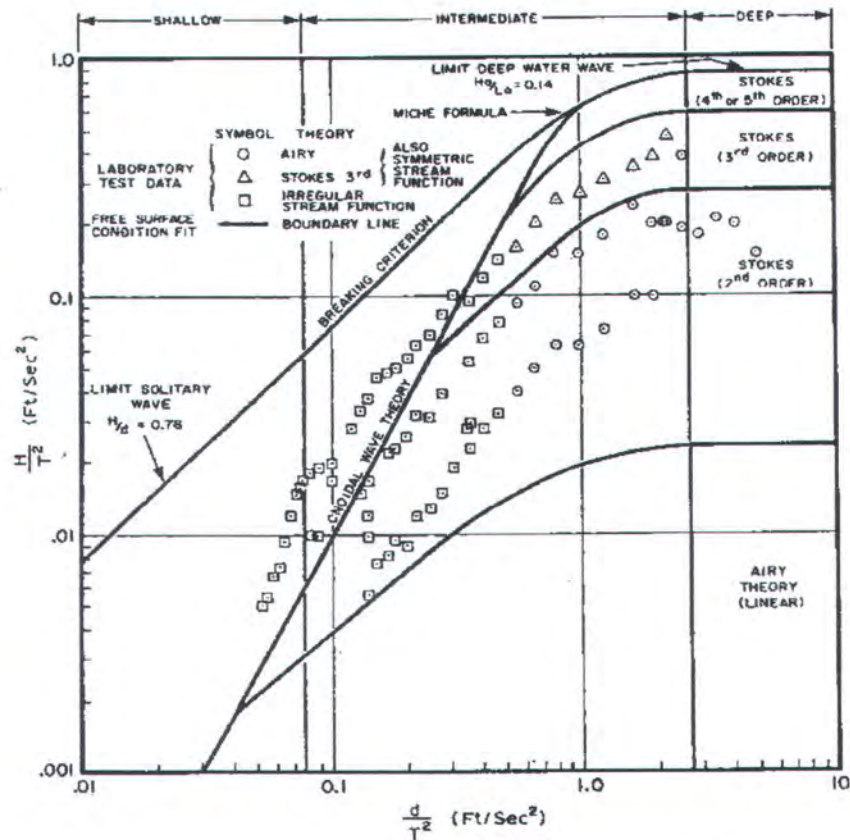
Gambar II. 4

Gelombang *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 II. 5

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

II.5.1. Teori Gelombang Stokes Orde 2

Teori gelombang Stokes merupakan teori gelombang non-linear. Teori gelombang Stokes merupakan ekspansi potensial kecepatan sebagai deret dari parameter yang bergantung pada amplitudo dan panjang gelombang. Stokes mengasumsikan bahwa semua variasi pada arah horisontal dapat ditunjukkan pada suatu deret matematis, dan koefisien dari deret ini dapat ditulis sebagai pertambahan parameter yang dikaitkan dengan amplitudo dan panjang gelombang. Panjang dan kecepatan rambat gelombang untuk teori gelombang Stokes Orde 2 dirumuskan oleh persamaan berikut (Chakrabarti, 1987) :

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (22)$$

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (23)$$

Kecepatan partikel air teori gelombang Stokes Orde 2 :

- Horizontal :

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(d+y)}{\sinh kd} \cos \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2k(d+y)}{\sinh^4 kd} \cos 2\theta \quad (24)$$

- Vertikal :

$$v = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(d+y)}{\sinh kd} \sin \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh 2k(d+y)}{\sinh^4 kd} \sin 2\theta \quad (25)$$

Sedangkan percepatan partikel air dirumuskan sebagai berikut :

- Horizontal :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T} \frac{\cosh k(d+y)}{\sinh kd} \sin \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh 2k(d+y)}{\sinh^4 kd} \sin 2\theta \quad (26)$$

- Vertikal :

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T} \frac{\sinh k(d+y)}{\sinh kd} \cos \theta - \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi^2 H}{T^2} \frac{\sinh 2k(d+y)}{\sinh^4 kd} \cos 2\theta \quad (27)$$

Keterangan :

L = Panjang gelombang, m.

C = Cepat rambat gelombang, m/s.

T = Periode Gelombang, sekon.

H = Tinggi gelombang, m.

g = Percepatan gravitasi, m/s^2 .

d = Kedalaman, m.

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

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

y = Kedalaman yang ditinjau, m.

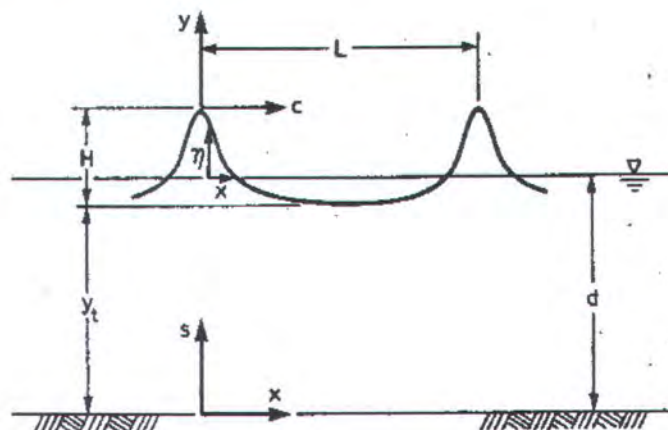
θ = Sudut fase, $\theta = kx - \omega t$.

II.5.2. Teori Gelombang Cnoidal

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

$$U_R = \frac{HL^2}{d^3}.$$

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



Gambar II. 6

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 :

$$y_s = y_T + Hcn^2(kx - \omega t, m) \quad (28)$$

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

- Horizontal :

$$u = \sqrt{gd} \epsilon (cn^2 q - h_1) + \epsilon^2 \left\{ (f_1 + f_2 cn^2 q - cn^4 q) - \frac{3}{4\kappa^2} \left(\frac{s}{d} \right)^2 [\kappa'^2 + 2(2\kappa^2 - 1)cn^2 q - 3\kappa^2 cn^4 q] \right\} + 0[\epsilon^3] \quad (29)$$

- Vertikal :

$$w = \sqrt{gd} \frac{\epsilon \sqrt{3\epsilon}}{\kappa} \left(\frac{s}{d} \right) cnq dnq snq \left\{ 1 + \epsilon \left[f_3 - 2cn^2 q - \left(\frac{s}{d} \right)^2 \left(\frac{2\kappa^2 - 1}{2\kappa^2} - \frac{3}{2} cn^2 q \right) \right] + 0[\epsilon^2] \right\} \quad (30)$$

Percepatan partikel air (Sarpkaya, 1981) :

- Horizontal

$$\frac{\partial u}{\partial t} = g \frac{\epsilon \sqrt{3\epsilon}}{\kappa} cnq dnq snq \left\{ 1 + \epsilon \left[f_4 - 2cn^2 q - \left(\frac{s}{d} \right)^2 \left(\frac{3(2\kappa^2 - 1)}{2\kappa^2} + \frac{9}{2} cn^2 q \right) \right] + 0[\epsilon^2] \right\} \quad (31)$$

- Vertikal

$$\frac{\partial w}{\partial t} = g \frac{3\epsilon^2}{2\kappa^2} \left(\frac{s}{d} \right) (\kappa'^2 + 2(2\kappa^2 - 1)cn^2 q - 3\kappa^2 cn^4 q) + 0[\epsilon^3] \quad (32)$$

Keterangan :

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

$$\kappa'^2 = 1 - \kappa^2$$

$$h_1 = \frac{(\gamma - \kappa'^2)}{\kappa^2}$$

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

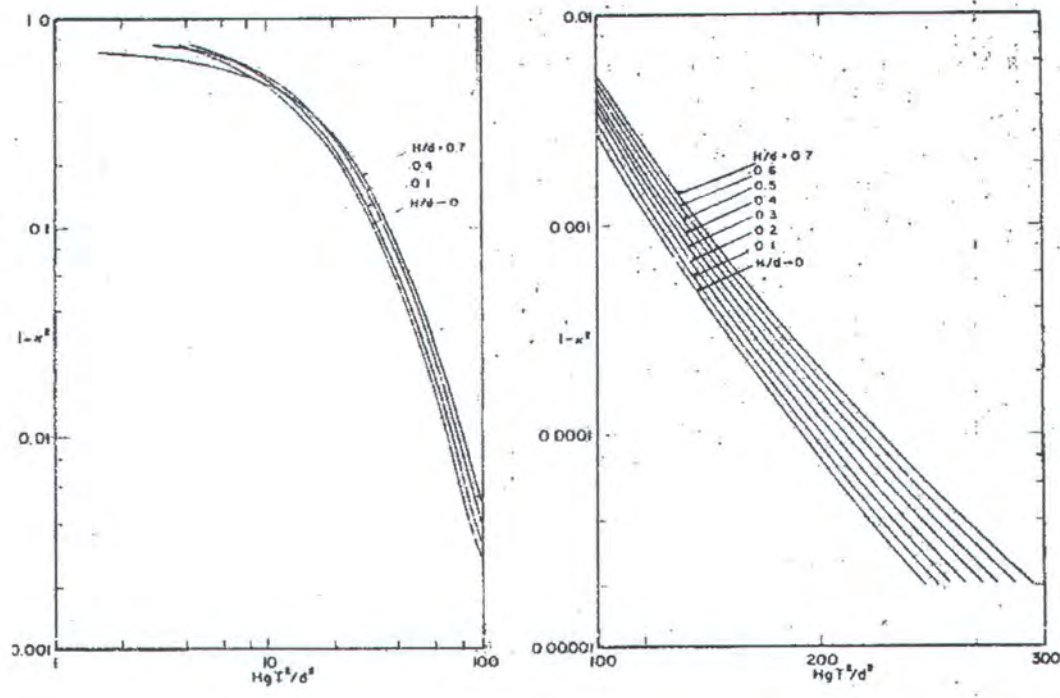
$$f_1 = \frac{\{-\gamma (6\gamma + 11\kappa^2 - 16) + \kappa'^2 (9\kappa^2 - 10)\}}{12\kappa^4}$$

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

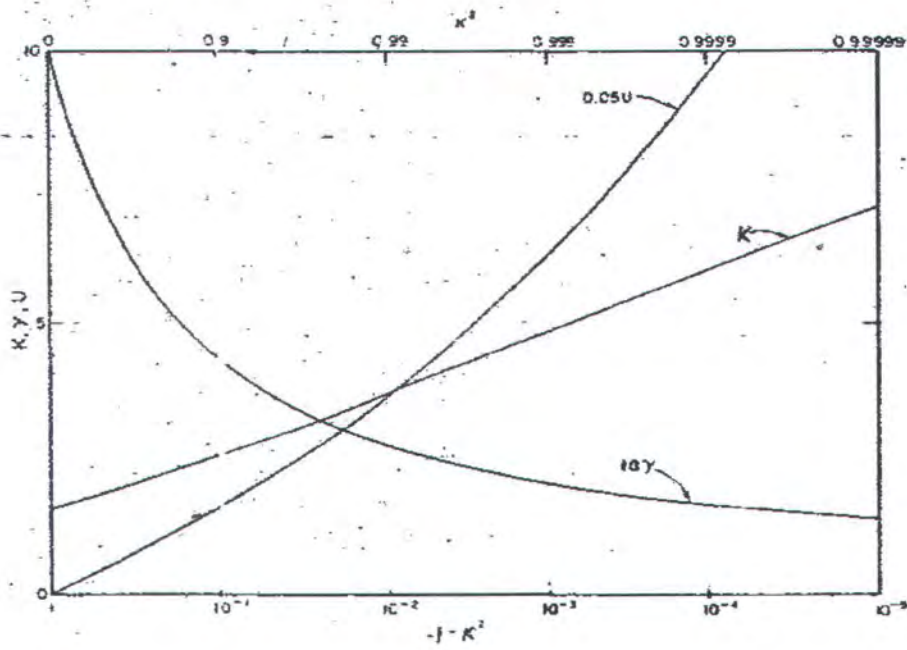
$$f_3 = \frac{(16\gamma + 19\kappa^2 - 22)}{8\kappa^2}$$

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

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

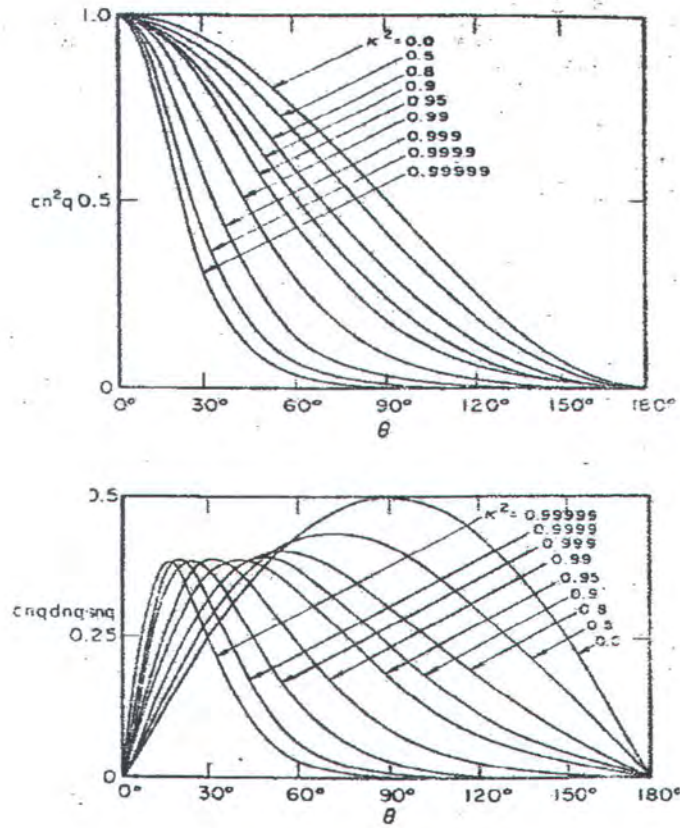


Gambar II. 7
 Variasi 1-k² dan HgT²/d² untuk berbagai H/d (Sarpkaya, 1981).



Gambar II. 8

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



Gambar II. 9

Variasi $cn^2 q$ dan $cn q dn q sn q$ dengan sudut fase untuk berbagai nilai k (Sarpkaya, 1981).

II.5.3. Kecepatan Partikel Air Efektif

Arus akan mengalir dalam suatu range kecepatan dan membentuk suatu profil yang merupakan fungsi kedalaman perairan, seperti pada Gambar II.10. Suatu rumusan diberikan oleh Germanischer Lloyd (GL) dalam menghitung kecepatan arus sebagai berikut (Germanischer Lloyd, 1995) :

$$u_{ss} = \left[\frac{d-y}{d} \right]^{1/7} \cdot u_{ss0} \quad (33)$$

Keterangan :

u_{ss} = Kecepatan arus pada kedalaman y dibawah SWL, m/s.

u_{ss0} = Kecepatan arus pada permukaan air, m/s.

d = Kedalaman air, m.

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

$$V_e^2 = \frac{1}{D} \int_0^D V^2(y) dy \quad (34)$$

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

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{y}{y_0} \right)^{1/7} \quad (35)$$

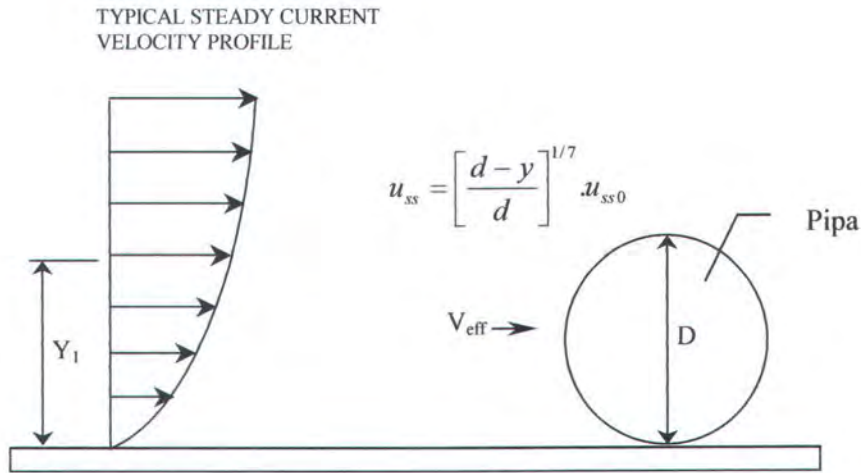
Dimana :

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

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

y_0 = Ketinggian V_0 dari dasar laut, m .

y = Ketinggian V dari dasar laut, m .



Gambar II. 10

Distribusi kecepatan arus menurut kedalaman (DnV 1981 dalam Ma'ruf, 2001)

Dengan mensubstitusikan persamaan (34) dan (35) diatas, maka akan didapatkan :

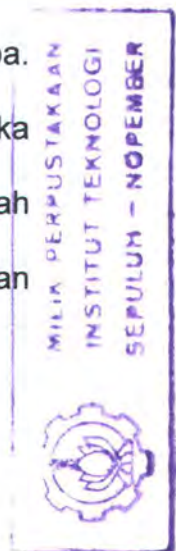
$$V_e^2 = 0.778V_0^2 \left(\frac{D}{y_0} \right)^{0.286} \tag{36}$$

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:

$$V_N = V_{abs} \cos \theta \tag{37}$$

Keterangan : V_N = Kecepatan Normal, $m/sekon$.

V_{abs} = Kecepatan absolut, $m/sekon$.



II.5.4. 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.

Gaya Drag (Drag Force)

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

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D U_e^2 \quad (38)$$

Dimana :

- ρ = Densitas fluida, kg/m^3
- C_D = Koefisien Drag
- D = Diameter terluar pipa, m
- U_e = Kecepatan efektif partikel, $m/sekon$.

Gaya Inersia (Inersia Force)

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

$$F_I = \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{dU}{dt} \quad (39)$$

Keterangan :

- ρ = Densitas fluida, kg/m^3
 D = Diameter terluar pipa, m
 dU/dt = Percepatan horizontal partikel air, $m/sekond^2$
 C_M = Koefisien Inersia

Gaya Angkat (Lift Force)

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

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L D U_e^2 \quad (40)$$

Keterangan :

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

II.5.5. 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 Lloyd, 1995) :

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

Bilangan Reynold (Re) dirumuskan $Re = \frac{U_e D}{\nu}$. 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 Lloyd, 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*), $\frac{h}{D}$.

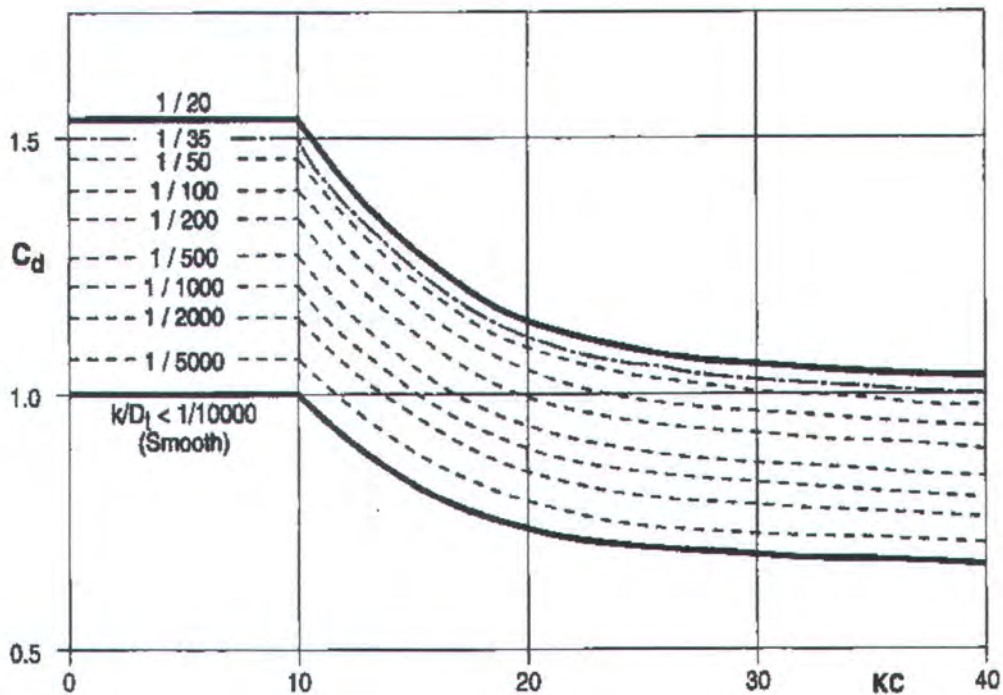
Pengaruh jarak (h) antara pipa dengan dasar laut dapat dihitung untuk perencanaan awal dengan menggunakan persamaan berikut ini (Germanischer Lloyd, 1995) .

$$C_d \left(\frac{h}{D} \right) = C_d + (C_{db} - C_d) e^{-2.5h/D} \quad (41)$$

$$C_m \left(\frac{h}{D} \right) = C_m + (C_{mb} - C_m) \cdot e^{-2.5h/D} \quad (42)$$

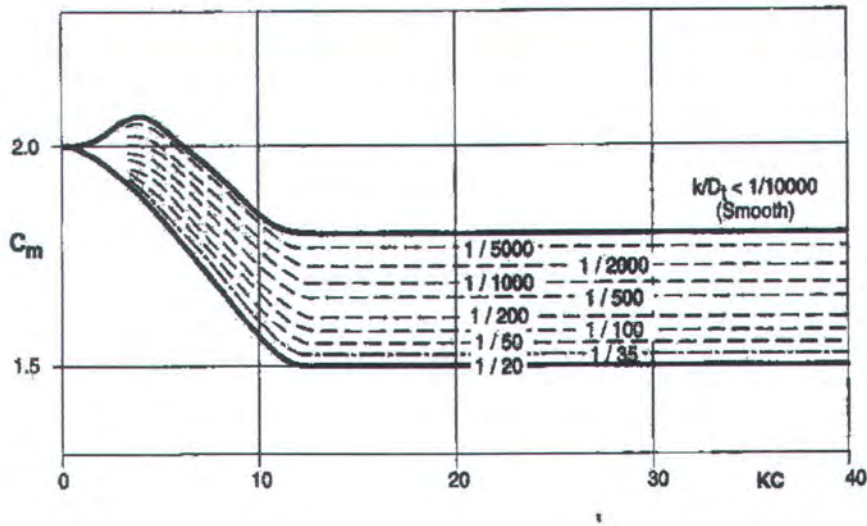
$$C_l \left(\frac{h}{D} \right) = C_l \cdot e^{-2.5h/D} \quad (43)$$

Nilai koefisien hidrodinamis (C_d , C_m dan C_l) awal dapat diperkirakan dengan menentukan nilai-nilai tersebut pada grafik di gambar II.11 dan gambar II.12. Nilai koefisien hidrodinamis ini tidak dipengaruhi oleh pengaruh jarak pipa dengan dasar laut dan kekasaran permukaan, dan hanya berdasarkan bilangan Keulegan-Carpenter.



Gambar II. 11

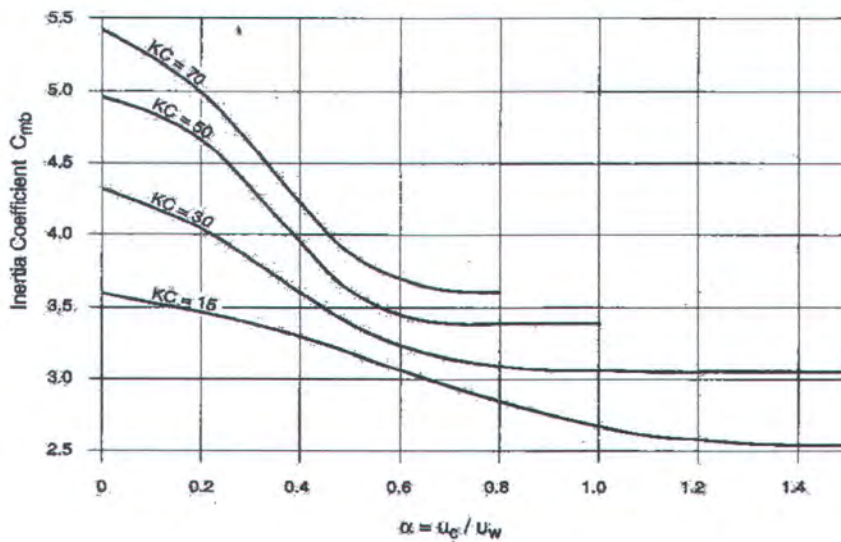
Perkiraan harga C_D untuk silinder akibat pengaruh gelombang (Germanischer Lloyd, 1995).



Gambar II. 12

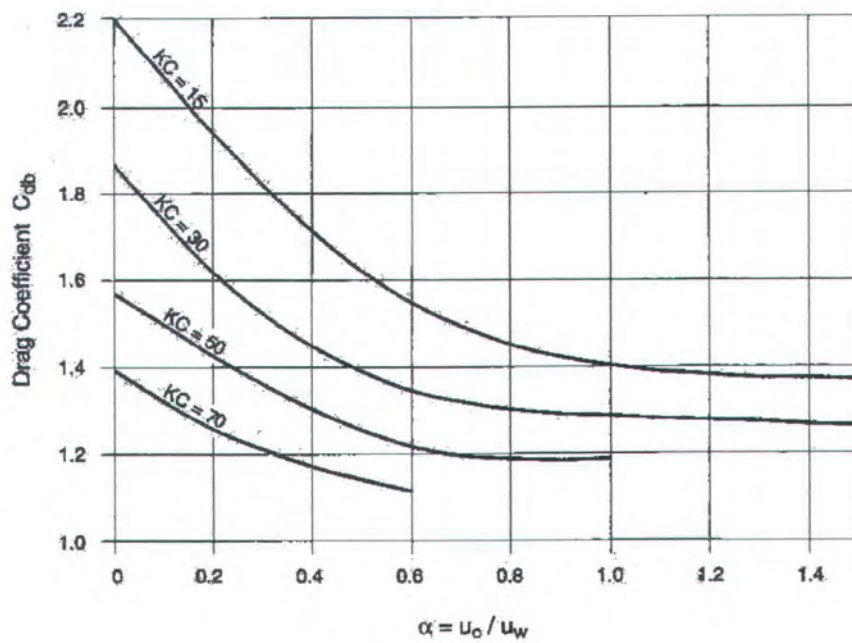
Perkiraan harga C_m untuk silinder akibat pengaruh gelombang (Germanischer Llyod, 1995).

Pengaruh gelombang dan arus yang mengalir diatas pipa yang meletak didasar laut, maka nilai C_{db} dan C_{mb} dapat ditentukan dari grafik pada gambar II.13 sampai dengan gambar II.15.



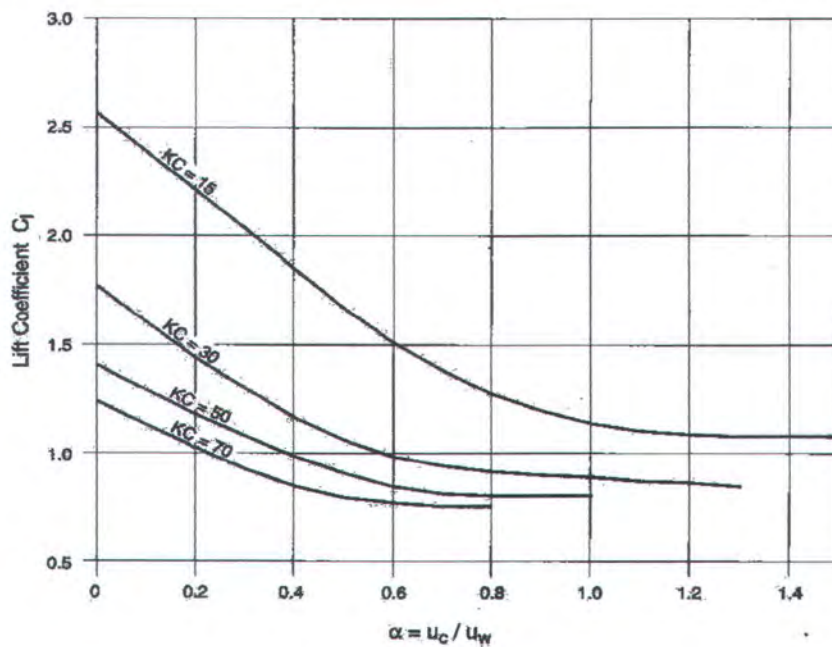
Gambar II. 13

Koefisien Inersia (C_{mb}) dasar laut akibat pengaruh gelombang dan arus (Germanischer Llyod, 1995).



Gambar II. 14

Koefisien *Drag* (C_{db}) dasar laut akibat pengaruh gelombang dan arus (Germanischer Llyod, 1995).



Gambar II. 15

Koefisien *Lift* akibat beban gelombang dan arus (Germanischer Llyod, 1995).

II.6. BUCKLING PADA PIPA

Pipa bawah laut akan mendapatkan pengaruh tekanan hidrostatik. Semakin dalam pipa berada, maka tekanan hidrostatik 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*.

Tekanan kritis *elastic buckling* yang berhubungan dengan tekanan hidrostatik dirumuskan sebagai berikut (Mousselli, 1981) :

$$P_c = \frac{2E}{1-\nu^2} \frac{t}{D} \left(\frac{t}{D-t} \right)^2 \quad (44)$$

Keterangan :

- P_c = Tekanan kritis kegagalan , kg/m^2
- E = Elastic Modulus, kg/m^2
- ν = Poisson ratio
- D = diameter pipa, m
- t = ketebalan pipa, m

Rumusan ini sesuai untuk perbandingan D/t yang besar, yaitu lebih besar dari 250.

DnV (1976) dalam Mousselli (1981) memberikan rumusan dalam menghitung tekanan kritis *buckle* sebagai berikut :

$$P_c = 2 \sigma_e \frac{t}{D} \text{ untuk } \sigma_e \leq \frac{2}{3} Y \quad (45)$$

$$P_c = 2Y \frac{t}{D} \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{2Y}{3\sigma_e} \right)^2 \right] \text{ untuk } \sigma_e \geq \frac{2}{3} Y \quad (46)$$

Keterangan :

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

Y = Yield Stress pipa (sama dengan 0.005 strain)

Untuk memprediksi tekanan kegagalan pipa yang terkait dengan beban kombinasi seperti tekanan, gaya aksial dan momen *bending*, DnV memberikan rumusan berikut ini :

$$\left(\frac{M}{M_c} \right)^\alpha + \frac{P}{P_c} = 1 \quad (47)$$

Keterangan :

M_c = Momen bending kritis ketika $P = 0$

P_c = Tekanan luar kritis ketika $M = 0$

$$\alpha = 1 + \frac{300}{D/t} \frac{P}{P_c}$$

II.6.1. Local Buckling

Menurut peraturan yang diberikan oleh Germanischer Lloyd (1995), analisa *local buckling* yang dilakukan meliputi hal-hal berikut ini :

1. Lokal Buckling dinding pipa (*pipe wall*) disebabkan oleh tekanan hidrostatik ataupun tekanan luar yang lebih (*external overpressure*), *bending* dan gaya aksial.
2. Buckling Propagation disebabkan oleh tekanan hidrostatik ataupun tekanan luar yang lebih (*external overpressure*) akibat terjadinya lokal *buckling*.

Perhitungan *local buckling* tersebut adalah :

Ovalisasi

Ovalisasi yang akan dihitung diakibatkan oleh *bending*, dan dirumuskan sebagai berikut (Germanischer Lloyd, 1995) :

$$\Delta_b \approx \frac{1}{24} \frac{D_o^4}{t^2} K^2 \quad (48)$$

Keterangan :

Δ_b = Ovalisasi yang disebabkan oleh bending.

D_o = Diameter luar pipa baja, in.

t = Ketebalan pipa baja, in.

K = Curvature of the pipe

$$K = \frac{1}{R} = \frac{2 \sigma_o DF}{E D_o} \quad (\text{Mousselli, 1981})$$

σ_o = Specified Minimum Yield Stress, psi.

DF = Design Factor, usually 0.85

E = Modulus Elastisitas, psi.

Pengaruh Lendutan Murni (*Pure Bending*)

Dalam kasus *bending* murni, momen *bending* kritis harus memenuhi persamaan berikut (Germanischer Lloyd, 1995) :

$$M_d \leq \frac{M_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)} \quad (49)$$

dan momen *bending* kritis dirumuskan sebagai berikut.

$$M_c = (D_o - t)^2 t R_{t0.5} \left(1 - 0.0024 \frac{D_o}{t} \right) \quad (50)$$

M_d adalah momen *bending* desain pada waktu instalasi atau operasi.

$$M_d = \sigma_{\max} Z \quad (\text{Popov, 1996}) \quad (51)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{E D}{2R} \quad (\text{Mousselli, 1981}) \quad (52)$$

Keterangan :

- M_d = Momen *bending* desain pada waktu instalasi, N.m
- M_c = Momen *bending* kritis pada potongan pipa, N.m
- $R_{t0.5}$ = Spicified Minimum Yield Strength, MPa.
- γ_m = 1.05, untuk kombinasi beban (oper-3) termasuk kondisi operasional normal dan bersamaan beban lingkungan yang ekstrim.
- γ_u = 1.4, untuk riser dan struktur sejenis yang dipengaruhi oleh benturan, benda jatuh, krane handling dll.



Pengaruh Tekanan Murni (Pure Pressure)

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 Lloyd, 1995) :

$$P_d \leq \frac{P_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)} \quad (53)$$

dan P_c dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\left[\frac{P_c}{P_{eb}} - 1 \right] \left[\left(\frac{P_c}{P_y} \right)^2 - 1 \right] = 2 \frac{P_c}{P_y} \Delta_0 \frac{D_o}{t} \quad (54)$$

dimana :

$$P_y = 2R_{t0.5} \frac{t}{D_o - t} \quad (55)$$

$$P_{eb} = \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{D_o - t} \right)^3$$

P_d adalah Tekanan *buckling* eksternal desain (*external design buckling pressure*). Tekanan luar yang bekerja pada pipa adalah tekanan hidrostatik. Tekanan ini merupakan fungsi dari kedalaman (h), dan dirumuskan sebagai berikut :

$$P_d = \rho \ g \ h \quad (56)$$

Keterangan :

P_c = Tekanan Kritis *Buckling*, psi.

P_d = Tekanan Desain Eksternal *Buckling*, psi.

- P_y = Pressure required for full plasticity in the hoop direction, psi.
 P_{eb} = Tekanan Elastik *Buckling*, psi.
 E = Young Modulus, psi.
 ν = Poisson's ratio untuk material pipa.
 D_o = Outside Diameter, in.
 t = thickness, in.
 Δ_0 = initial ovalisation, tidak boleh kurang dari 0.025.

$$\Delta_0 = \frac{1}{24} \frac{D_o^4}{t^2} K^2$$
 K = curvature of the pipe.
 ρ = Densitas air laut, lb/ft³.
 g = Percepatan gravitasi, ft/s².
 h = Kedalaman, m.
 I = Momen Inersia, in⁴.
 Z = Section Modulus, in³.

Kombinasi Lendutan dan Tekanan

Untuk kombinasi bending dan tekanan hidrostatik, persamaan berikut harus terpenuhi (Germanischer Lloyd, 1995).

$$\left(\frac{\gamma_m \cdot \gamma_u \cdot M_d}{M_c} \right)^4 + \frac{\gamma_m \cdot \gamma_u \cdot P_d}{P_c} \leq 1 \quad (57)$$

Penjalaran Buckling (*Buckling Propagation*)

Lokal *Buckling* dapat menyebabkan terjadinya penjalaran *buckling* (*buckle propagation*). Tekanan kritis penjalaran *buckling* (P_{prop}) pada pipa harus

lebih besar dari tekanan desain *buckling* (P_d) pipa itu sendiri. Hubungan antara P_{prop} dengan P_d dirumuskan oleh Germanischer Llyod (1995) seperti persamaan berikut.

$$P_d \leq \frac{P_{prop}}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)} \quad (58)$$

dan P_{prop} dirumuskan oleh persamaan berikut ini :

$$P_{prop} = 10.7 R_{10.5} \left(\frac{t}{D_o - t} \right)^{2.25} \quad (59)$$

Keterangan :

- P_{prop} = Tekanan Kritis Penjalaran, psi.
 P_d = Tekanan desain buckling (tekanan hidrostatik atau *external overpressure*), psi.

II.6.2. Global Buckling

Analisa *global buckling* adalah analisa *buckling* pada pipa dimana pipa dianggap sebagai batangan (*bar*) yang mengalami kompresi akibat adanya *thermal expansion*. Kompresi yang dialami pipa dapat menyebabkan *bar buckling* secara lateral (*snaking*) ataupun vertikal *bar buckling* (*upheaval & downward*).

Germanischer Llyod (1995) memberikan rumusan perhitungan *bar buckling* secara lateral yang diakibatkan oleh kompresi aksial.

$$F_d \leq \frac{F_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)} \quad (60)$$

$$F_d = \left(E\alpha \Delta T - \nu \Delta P \frac{D_o}{2T} \right) A_{st} \quad (61)$$

$$F_c = \min \left\{ C_1 \frac{EI}{L^2} + C_3 \mu W_s L \left[\left(1 + C_2 \frac{E A_{st} \mu_L^2 W_s L^5}{\mu (EI)^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \right\} \quad (62)$$

Keterangan :

- F_d = Gaya aksial desain (*design axial force*), N.
 F_c = Gaya aksial kritis (*critical axial force*).
 C_i = Konstanta ($C_1 = 28$; $C_2 = 2.1 \times 10^{-4}$; $C_3 = 1.6$)
 L = Panjang *buckle* (*length of buckle*), m.
 μ = Koefisien gesek tanah aksial ($\mu = 0.7$)
 μ_L = Koefisien gesek tanah lateral ($\mu_L = 0.6$)
 W_s = Berat pipa terendam persatuan panjang, N/m.
 A_{st} = Luasan potongan pipa, m².
 I = Momen inersia luasan potongan pipa, m⁴.
 ΔT = Perbedaan temperatur, °F.
 ΔP = Perbedaan tekanan, N/m².
 α = Koefisien pemuaian linier thermal.
 ν = *Poisson's ratio*.

Panjang *buckle* adalah panjang *span* antar tumpuan. Penentuan awal jarak tumpuan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini (McAllister, 1998).

$$L = 6.6 \sqrt{D} \quad (63)$$

Perbedaan tekanan yang terjadi merupakan perbedaan antara tekanan hidrostatis luar dengan tekanan didalam pipa. Tekanan hidrostatis luar dapat dihitung dengan menggunakan rumusan yang diberikan oleh Germanischer Lloyd (1995) seperti dibawah ini.

$$P_E \approx \rho_w g \left(d_H + \frac{1}{2} H \right) \quad (64)$$

$$P_E \approx \rho_w g \left(d_L - \frac{1}{2} H \right) \quad (65)$$

Sedangkan tekanan didalam pipa dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini (Williams Natural Gas Company, 1996).

$$P_d = \frac{2 S t}{D} \times F \times E \times T \quad (66)$$

Keterangan :

- P_E = Tekanan hidrostatis luar, N/m^2 .
- $d_{H,L}$ = 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.

BAB III
METODOLOGI

BAB III METODOLOGI

Untuk mencapai tujuan dari rumusan masalah dalam Tugas Akhir ini, terdapat beberapa tahapan dan langkah dalam pengerjaan, yaitu :

1. Studi Literatur

Studi literatur akan memberikan kejelasan dan pemahaman dalam menentukan ukuran pipa yang meliputi diameter pipa serta ketebalan pipa, syarat stabilitas pipa bawah laut, penentuan lapisan beton, termasuk gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa, pemahaman teori gelombang, kecepatan dan percepatan partikel air dan pemahaman terhadap *buckling*.

2. Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan, antara lain :

- a. Data produksi sumur Mobil Cepu Ltd. secara umum.
- b. Data lingkungan : gelombang, arus, tanah diperairan Tuban.
- c. Data bathymetri.

3. Menghitung diameter dan ketebalan pipa bawah laut Mobil Cepu Ltd. Di Perairan Tuban, Jawa Timur.

Perhitungan desain diameter dan ketebalan pipa ini merupakan fungsi dari laju aliran (*flow rate*) fluida.

Langkah perhitungan diameter adalah :

- a. Hitung laju aliran fluida.

- b. Hitung diameter dalam
- c. Hitung ketebalan (*thickness*) pipa.

4. Menghitung lapisan beton (*concrete coating*) pipa bawah laut Mobil Cepu Ltd. Di perairan Tuban, Jawa Timur.

Perhitungan lapisan beton berdasarkan pada syarat stabilitas pipa bawah laut, yang dipengaruhi oleh gaya-gaya hidrodinamis yang mengenai struktur pipa tersebut.

Langkah perhitungan lapisan beton :

- a. Menentukan teori gelombang
- b. Hitung kecepatan efektif partikel akibat arus dan gelombang
- c. Hitung gaya-gaya hidrodinamis
- d. Hitung berat pipa
- e. Hitung ketebalan dan densitas lapisan beton.

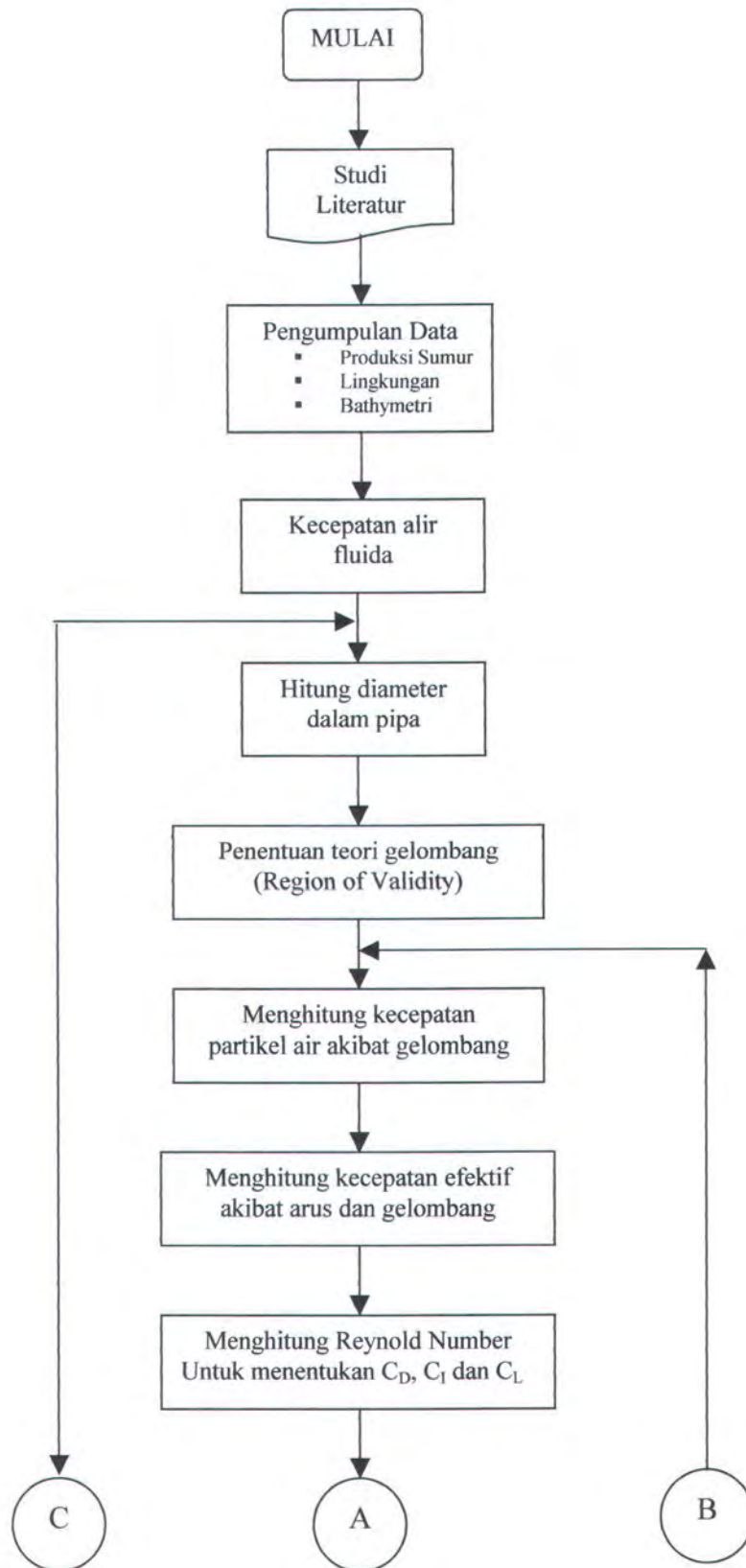
Perhitungan lapisan beton dilakukan dalam beberapa kali (iterasi). Hal ini disebabkan karena nilai diameter pipa yang digunakan dalam perhitungan beban gelombang dan gaya-gaya hidrodinamis tidak sama dengan diameter pipa pada akhir perhitungan. Proses iterasi akan meminimalkan perbedaan kedua nilai diameter tersebut.

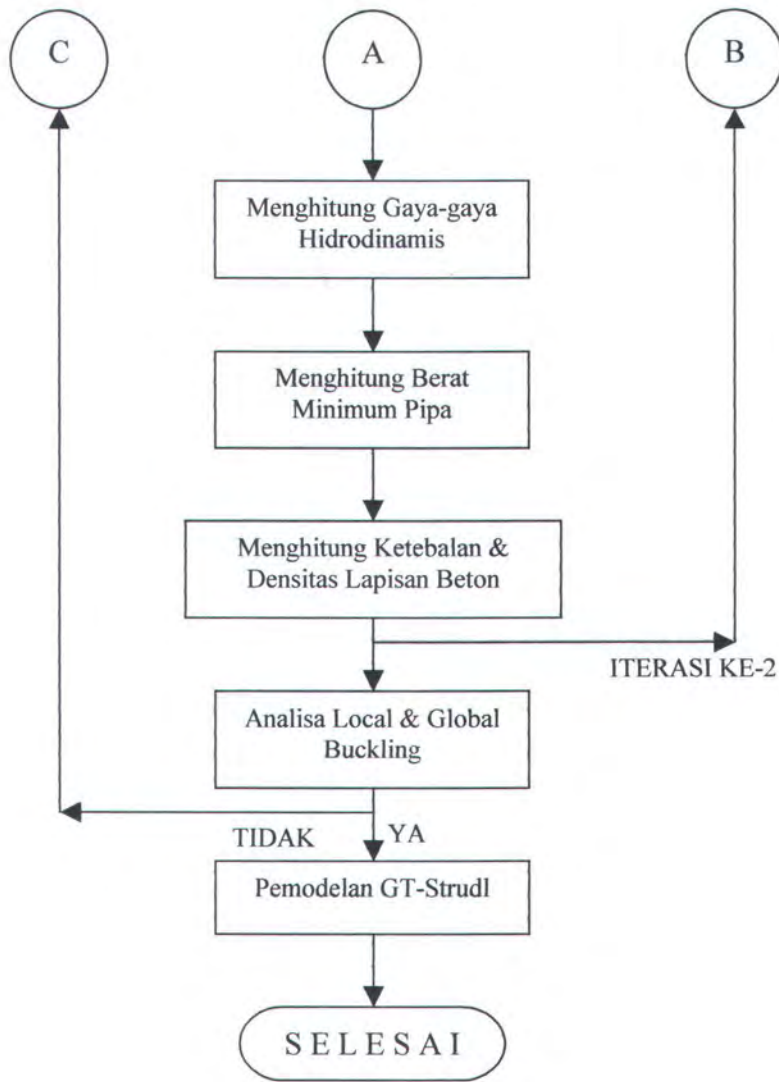
5. Melakukan analisa *buckling* pada pipa yang telah didesain.

Analisa *buckling* dimaksudkan untuk mengetahui kekuatan pipa yang telah direncanakan terhadap pengaruh lendutan, tekanan, kombinasi lendutan dan tekanan serta kompresi yang bekerja pada struktur pipa bawah laut tersebut.

6. Melakukan pemodelan struktur secara keseluruhan.

Pada tahapan ini, pemodelan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak struktur GT-STRUDL. Pemodelan ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan struktur pipa dan mendapatkan jarak tumpuan maksimum. Pemodelan dilakukan pada bagian struktur yang mendapatkan pembebanan yang terbesar. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada diagram alir berikut ini :





BAB IV
ANALISA DAN PEMBAHASAN

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

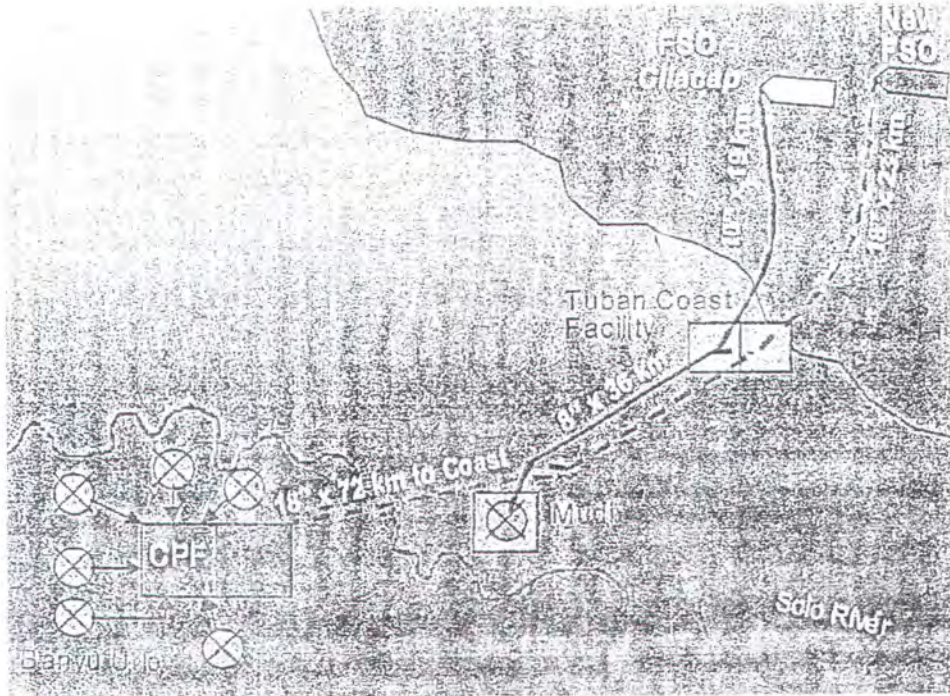
IV.I. ANALISA

Analisa yang dilakukan meliputi perhitungan ukuran pipa, perhitungan ketebalan lapisan beton dan analisa *buckling* pada pipa. Subbab awal menjelaskan keadaan dan data produksi minyak Mobil Cepu Ltd. yang meliputi data *barrel oil perday (bopd)* dan *properties* minyak yang dihasilkan. Penjelasan keadaan dan data produksi minyak Mobil Cepu Ltd. selengkapnya dapat dilihat pada lampiran data lingkungan dan peta batimetri.

Subbab kedua menjelaskan keadaan dan data lingkungan dimana pipa berada. Data lingkungan yang digunakan diambil berdasarkan hasil survei dan penelitian Dinas Hidro-Oseanografi di Pelabuhan Khusus P.T. Semen Gresik (Persero) Tuban Jawa Timur.

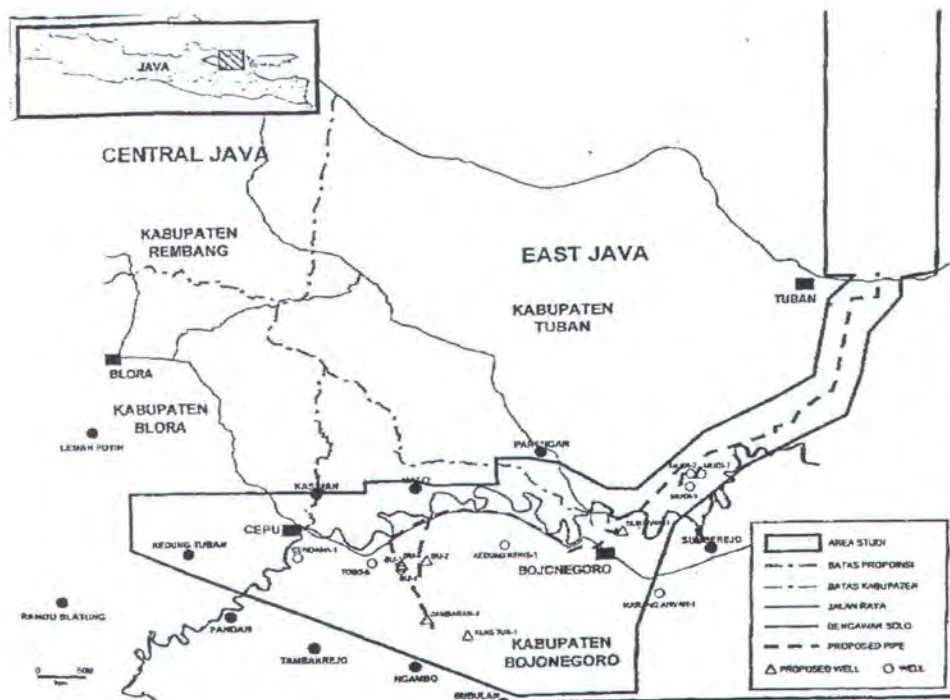
IV.1.1. Data Produksi Minyak

Pipa lepas pantai milik Mobil Cepu Ltd. adalah pipa yang menghubungkan fasilitas pantai (*coastal facility*) yang berada di desa Leran Kulon ke FSO (*Floating Storage and Offloading*). Jalur pipa ini membentang sepanjang 23 km dari fasilitas pantai ke FSO. Gambar IV.1 sampai dengan Gambar IV.3 memperlihatkan sketsa bentangan pipa di perairan Tuban, Jawa Timur.



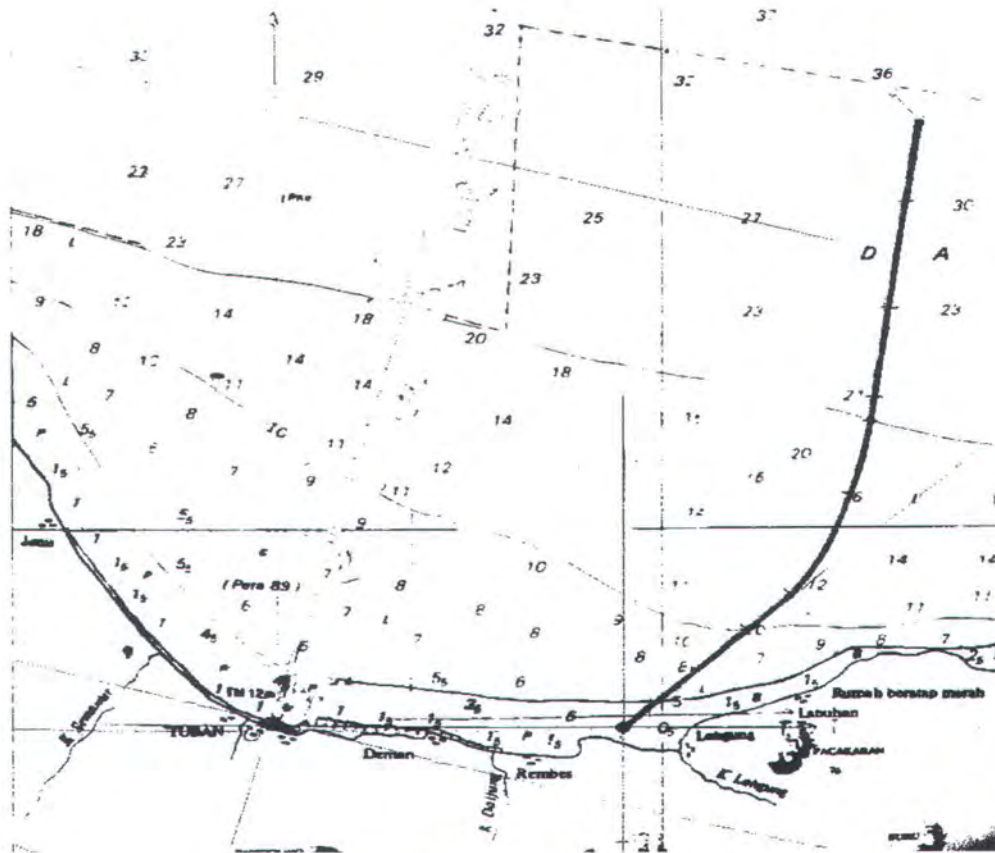
Gambar IV. 1

Bentangan pipa di perairan Tuban, Jawa Timur (Mobil Cepu Ltd.).



Gambar IV. 2

Daerah studi di perairan Tuban, Jawa Timur (Mobil Cepu Ltd.).



Gambar IV. 3

Bentangan pipa pada peta batimetri (Mobil Cepu Ltd.).

Minyak bumi yang didistribusikan berasal dari Banyu Urip Oil Field yang berada di Blok Cepu. Pada sistem produksi awal pada tahun 2003 diharapkan diperoleh rata-rata minyak sejumlah 25.000 barrel/hari, sedangkan pada saat pengembangan penuh diperoleh (*full field development*) ditahun 2004, maka produksi minyak rata-rata diperkirakan akan mencapai 135.000 barrel/hari.

Pada saat pengembangan penuh, produksi CPF (*Central Processing Facility*) meliputi :

- 210 kbd *total liquid*
- 150 kbd minyak

- 160 kbd air terproduksi
- 190 kbd injeksi air
- 75 MSCFD *produced gas*
- 65 MSCFD *gas lift*
- 130 kbd *fresh water make-up*
- 25 ton/hari *sulfur recovery*
- Dehidrasi dan injeksi gas alam.

Sifat (*properties*) minyak yang dialirkan adalah sebagai berikut :

- 32° API
- 375 GOR
- 85 – 90 °F Pour Point
- *Crude Spesification* :
 - ☑ *True Vapor Pressure* : 10.5 psia at 100 F
 - ☑ *Basic Sediment and Water* : 0.5 %
 - ☑ *Sulfur Content* : 10 ppm

IV.1.2. Data Lingkungan

Lokasi pipa bawah laut Mobil Cepu Ltd. terletak di perairan Tuban, Jawa Timur. Titik awal pipa berada di koordinat 06°53.697' lintang selatan dan 112°09.326' lintang timur. Penentuan tinggi gelombang signifikan (H_s) berdasarkan data tinggi gelombang harian hasil survei dan penelitian Hidro-Oseanografi di Pelabuhan Khusus P.T. Semen Gresik (Persero) Tuban Jawa Timur.

Arah datang gelombang maksimum dari arah Timur Laut, dengan tinggi gelombang maksimum 2.22 meter dan minimum 0.64 meter. Urutan tinggi gelombang sepertiga terbesar maksimum 2.22 meter dan minimum 0.7 meter. Tinggi gelombang signifikan (H_s) 1.22 meter dan periode gelombang signifikan (T_s) 5.73 detik. Kecepatan arus pasang surut pada permukaan air 0.35 m/sekon. Data tinggi gelombang harian selengkapnya dapat dilihat pada lampiran data lingkungan dan peta batimetri.

Pipa membentang sepanjang 23 km dari titik awal sampai ke FSO. Variasi kedalaman berkisar antara 0 sampai dengan 36 meter. Berdasarkan posisi dimana pipa meletak, maka diperoleh tabulasi kedalaman dan panjang pipa, seperti diberikan dibawah ini.

Tabel IV. 1. Kedalaman dan panjang pipa

Kedalaman (m)	Panjang Pipa (m)
0	0
5	1.3
8	2.7
10	4.7
12	6.4
16	10.3
20	12.9
21	13.7
23	16.7
30	20.3
36	23

Dari tabel ini, dapat di buat suatu grafik yang menghubungkan kedalaman dan jarak (dapat dilihat di lampiran data lingkungan dan peta batimetri). Berdasarkan grafik tersebut bisa diperoleh panjang pipa untuk setiap kenaikan kedalaman (setiap meter).

Tabel IV. 2. Panjang pipa pada kenaikan kedalaman 1 meter.

Kedalaman (d) m	Ordinat Pipa (x) m	Panjang Pipa (L) m
1.6	250	250
2	500	250
3	750	250
4	1000	250
5	1300	300
6	1660	360
7	2100	440
8	2700	600
9	3560	860
10	4700	1140
11	5500	800
12	6400	900
13	7400	1000
14	8450	1050
15	9400	950
16	10300	900
17	11070	770
18	11700	630
19	12280	580
20	12900	620
21	13700	800
22	15600	1900
23	16700	1100
24	17200	500
25	17860	660
26	18400	540
27	18860	460
28	19350	490
29	19800	450
30	20300	500
31	20800	500
32	21200	400
33	21660	460
34	22100	440
35	22560	460
36	23000	440
Σ		23000

Keterangan :

- d = Kedalaman laut, m
x = Ordinat pipa, m.
L = Panjang pipa, m.

Data kedalaman perairan (*bathymetri*) selengkapnya dapat dilihat pada lampiran data lingkungan dan peta batimetri.

IV.1.3. Perhitungan Densitas Cairan

Densitas fluida dihitung dengan menggunakan rumusan berikut ini (persamaan 3).

$$\rho_L = \left[\frac{141.5}{(^\circ API + 131.5)} \right] \times \rho_w$$

Densitas air murni :

$$\begin{aligned} \rho_w &= 1000 \text{ kg/m}^3 &= 62.43 \text{ lb/ft}^3 \\ \text{API}^\circ &= 32 \end{aligned}$$

Maka, densitas cairan adalah :

$$\begin{aligned} \rho_l &= 54.03 \text{ lb/ft}^3. \\ \rho_l &= 865.45 \text{ kg/m}^3. \end{aligned}$$

IV.1.4. Kecepatan Alir Cairan

Cairan yang mengalir dalam pipa ini merupakan jenis fluida yang erosif (mengandung H_2S), sehingga persamaan yang digunakan untuk menghitung kecepatan alir fluida adalah persamaan (5).

$$v = \frac{24}{(\rho_l)^{1/3}}$$

Dari perhitungan sebelumnya didapatkan $\rho_l = 54.03 \text{ lb/ft}^3$, maka kecepatan alir fluida adalah :

$$\begin{aligned} v &= 6.35 \text{ ft/s} \\ v &= 1.94 \text{ m/s} \end{aligned}$$

IV.1.5. Diameter dalam pipa

Jika nilai kecepatan alir cairan sudah diketahui, maka selanjutnya bisa dihitung diameter dalam pipa dengan menggunakan persamaan (6).

$$v = 0.012 \frac{Q_l}{d^2}$$

$$d = \left(0.012 \frac{Q_l}{v} \right)^{0.5}$$

Berdasarkan data, pada saat pengembangan penuh (*full field development*) laju aliran fluida (Q_l) mencapai 150 kbd (*kilobarrel per day*), sehingga diameter dalam pipa didapatkan :

$$d = 16.84 \text{ inch}$$

$$d = 0.43 \text{ meter.}$$

Berdasarkan *Table of Pipe Properties* dalam McAllister (1998), pipa yang mendekati nilai tersebut diatas adalah dengan diameter dalam 17 inch dan diameter luar 18 inch, spesifikasi pipa yang digunakan adalah API 5LX X52. Oleh karena itu pipa yang digunakan dalam perancangan ini adalah :

$$\text{Diameter Luar, } D_o = 0.457 \text{ m}$$

$$\text{Diameter Dalam, } D_i = 0.432 \text{ m}$$

$$\text{Tebal Pipa, } th = 0.0125 \text{ m}$$

IV.1.6. Perhitungan Ketebalan *Concrete Coating*

Penentuan Teori Gelombang

Dalam menentukan teori gelombang yang akan digunakan, dapat digunakan grafik validitas gelombang seperti pada gambar II.5. Grafik ini merupakan fungsi perbandingan d/gT^2 dan H/gT^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 :

$$H_s = 1.22 \text{ m}$$

$$T_s = 5.73 \text{ m}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Teori gelombang yang digunakan dalam perhitungan tugas akhir ini diberikan pada tabel IV.3 berikut.

Tabel IV. 3. Pembagian Teori Gelombang

d m	x m	s m	H _s m	d/gT _s ²	H _s /gT _s ²	Teori Gel.
1.6	250	250	1.220	0.005	0.004	Cnoidal
2	500	250	1.220	0.006	0.004	Cnoidal
3	750	250	1.220	0.009	0.004	Cnoidal
4	1000	250	1.220	0.012	0.004	Cnoidal
5	1300	300	1.220	0.016	0.004	Stokes # 2
6	1660	360	1.220	0.019	0.004	Stokes # 2
7	2100	440	1.220	0.022	0.004	Stokes # 2
8	2700	600	1.220	0.025	0.004	Stokes # 2
9	3560	860	1.220	0.028	0.004	Stokes # 2
10	4700	1140	1.220	0.031	0.004	Stokes # 2
11	5500	800	1.220	0.034	0.004	Stokes # 2
12	6400	900	1.220	0.037	0.004	Stokes # 2
13	7400	1000	1.220	0.040	0.004	Stokes # 2
14	8450	1050	1.220	0.043	0.004	Stokes # 2
15	9400	950	1.220	0.047	0.004	Stokes # 2
16	10300	900	1.220	0.050	0.004	Stokes # 2
17	11070	770	1.220	0.053	0.004	Stokes # 2
18	11700	630	1.220	0.056	0.004	Stokes # 2
19	12280	580	1.220	0.059	0.004	Stokes # 2
20	12900	620	1.220	0.062	0.004	Stokes # 2
21	13700	800	1.220	0.065	0.004	Stokes # 2
22	15600	1900	1.220	0.068	0.004	Stokes # 2
23	16700	1100	1.220	0.071	0.004	Stokes # 2
24	17200	500	1.220	0.075	0.004	Stokes # 2
25	17860	660	1.220	0.078	0.004	Stokes # 2
26	18400	540	1.220	0.081	0.004	Stokes # 2
27	18860	460	1.220	0.084	0.004	Stokes # 2
28	19350	490	1.220	0.087	0.004	Stokes # 2
29	19800	450	1.220	0.090	0.004	Stokes # 2
30	20300	500	1.220	0.093	0.004	Stokes # 2
31	20800	500	1.220	0.096	0.004	Stokes # 2
32	21200	400	1.220	0.099	0.004	Stokes # 2
33	21660	460	1.220	0.102	0.004	Stokes # 2
34	22100	440	1.220	0.106	0.004	Stokes # 2
35	22560	460	1.220	0.109	0.004	Stokes # 2
36	23000	440	1.220	0.112	0.004	Stokes # 2
Σ		23000				

Keterangan :

d = Kedalaman, m.

x = Ordinat Pipa, m.

s = Panjang Pipa, m

Kecepatan Partikel Air Teori Gelombang Cnoidal

Pada subbab sebelumnya didapatkan bahwa pada kedalaman 1.6 sampai dengan 4 meter, teori gelombang yang dipakai adalah teori gelombang Cnoidal. Validitas teori gelombang Cnoidal berdasarkan pada *Ursell* parameter ($U_R > 26$) dan perbandingan $d/L < 1/8$ (Chakrabarti, 1987). Tabulasi validasi teori gelombang diberikan pada tabel berikut ini.

Tabel IV. 4. Validasi Teori Gelombang Cnoidal

d (m)	Syarat Batas	
	$U_r > 26$	$d/L < 1/8$
1.6	400	0.06
2	120	0.07
3	35	0.11
4	30	0.10

Sedangkan kecepatan dan percepatan partikel air dihitung berdasarkan atas persamaan-persamaan yang diberikan pada subbab II.5.2 dimana nilai parameter-parameter ditentukan dari gambar II.7 sampai dengan gambar II.9.

Nilai cn^2q diambil sama dengan 1, yaitu pada saat $\theta = 0^\circ$, sedangkan nilai $cnqdnqsnq$ diambil nilai maksimum yaitu 0.5 pada saat $\theta = 90^\circ$. Kecepatan efektif partikel air dihitung dengan menggunakan persamaan (36) pada subbab II.5.3.

Hasil perhitungan kecepatan dan percepatan partikel air diberikan pada tabel berikut.

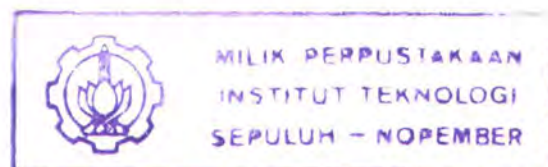
Tabel IV. 5. Kecepatan dan Percepatan Partikel Air Teori Gelombang Cnoidal.

d (m)	u (m/s)	U_{eff} (m/s)	du/dt (m/s ²)
1.6	2.07	1.83	-5.74
2	1.89	1.67	-3.39
3	1.42	1.25	-1.95
4	1.16	1.03	-1.65

Kecepatan Partikel Air Teori Gelombang Stokes Orde 2

Teori Gelombang Stokes Orde 2 berlaku mulai dari kedalaman (d) 5 meter hingga 36 meter seperti dijelaskan pada subbab penentuan teori gelombang. Panjang gelombang (L) dan cepat rambat gelombang ($C = \text{Celerity}$) dihitung dengan menggunakan persamaan (22) dan (23) pada subbab II.5.1. Perhitungan panjang gelombang dilakukan dengan proses iterasi karena panjang gelombang merupakan fungsi panjang gelombang itu sendiri. Hasil perhitungan diberikan pada tabel IV.6.

Kecepatan dan percepatan partikel air arah horisontal dihitung dengan menggunakan persamaan (24) dan (26) pada subbab II.5.1. Laitone (1961) dalam Sarpkaya (1981) mengatakan bahwa untuk aplikasi terekayasa, nilai t (waktu) dan x (jarak horisontal) diambil sama dengan 0. Namun dalam perhitungan ini x adalah 0.23 meter ($\frac{1}{2} D$), hal ini dikarenakan nilai ini memberikan nilai kecepatan dan percepatan partikel air mencapai harga maksimum. Titik 0 tepat berada pada tengah penampang melintang pipa. Kecepatan efektif partikel air dihitung dengan menggunakan persamaan (36) pada subbab II.5.3, dan hasil perhitungan diberikan pada tabel IV.7.



Tabel IV. 6. Panjang Gelombang dan Cepat Rambat Gelombang Stokes Orde 2.

d (m)	y (m)	L (m)	C (m/s)
5	4.79	36.01	6.29
6	5.79	38.55	6.73
7	6.79	40.68	7.10
8	7.79	42.47	7.41
9	8.79	43.98	7.68
10	9.79	45.25	7.90
11	10.79	46.32	8.08
12	11.79	47.22	8.24
13	12.79	47.97	8.37
14	13.79	48.59	8.48
15	14.79	49.10	8.57
16	15.79	49.52	8.64
17	16.79	49.87	8.70
18	17.79	50.15	8.75
19	18.79	50.37	8.79
20	19.79	50.55	8.82
21	20.79	51.16	8.93
22	21.79	50.82	8.87
23	22.79	50.91	8.89
24	23.79	50.99	8.90
25	24.79	51.04	8.91
26	25.79	51.09	8.92
27	26.79	51.13	8.92
28	27.79	51.16	8.93
29	28.79	51.18	8.93
30	29.79	51.20	8.93
31	30.79	51.21	8.94
32	31.79	51.22	8.94
33	32.79	51.23	8.94
34	33.79	51.24	8.94
35	34.79	51.24	8.94
36	35.79	51.25	8.94

Keterangan :

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

Tabel IV. 7. Kecepatan dan Percepatan Partikel Air Teori Gelombang Stokes Orde 2

d (m)	k	ω	θ°	u (m/s)	U_{eff} (m/s)	a_x (m/s ²)
5	0.17	1.10	0.04	0.73	0.71	0.18
6	0.16	1.10	0.04	0.62	0.60	0.14
7	0.15	1.10	0.04	0.53	0.52	0.12
8	0.15	1.10	0.03	0.46	0.45	0.10
9	0.14	1.10	0.03	0.41	0.40	0.08
10	0.14	1.10	0.03	0.36	0.35	0.07
11	0.14	1.10	0.03	0.32	0.31	0.06
12	0.13	1.10	0.03	0.28	0.28	0.05
13	0.13	1.10	0.03	0.25	0.25	0.05
14	0.13	1.10	0.03	0.23	0.22	0.04
15	0.13	1.10	0.03	0.20	0.20	0.04
16	0.13	1.10	0.03	0.18	0.17	0.03
17	0.13	1.10	0.03	0.16	0.16	0.03
18	0.13	1.10	0.03	0.14	0.14	0.03
19	0.12	1.10	0.03	0.13	0.12	0.02
20	0.12	1.10	0.03	0.11	0.11	0.02
21	0.12	1.10	0.03	0.10	0.10	0.02
22	0.12	1.10	0.03	0.09	0.09	0.02
23	0.12	1.10	0.03	0.08	0.08	0.01
24	0.12	1.10	0.03	0.07	0.07	0.01
25	0.12	1.10	0.03	0.06	0.06	0.01
26	0.12	1.10	0.03	0.05	0.05	0.01
27	0.12	1.10	0.03	0.05	0.05	0.01
28	0.12	1.10	0.03	0.04	0.04	0.01
29	0.12	1.10	0.03	0.04	0.04	0.01
30	0.12	1.10	0.03	0.03	0.03	0.01
31	0.12	1.10	0.03	0.03	0.03	0.01
32	0.12	1.10	0.03	0.03	0.03	0.00
33	0.12	1.10	0.03	0.02	0.02	0.00
34	0.12	1.10	0.03	0.02	0.02	0.00
35	0.12	1.10	0.03	0.02	0.02	0.00
36	0.12	1.10	0.03	0.02	0.02	0.00

Keterangan :

- k = Angka Gelombang.
 ω = Frekuensi Sudut, rad/s.
 θ° = Sudut fase, $^\circ$.
u = Kecepatan arah sumbu x, m/s.
 U_{eff} = Kecepatan efektif arah sumbu x, m/s.
 a_x = Percepatan arah sumbu x, m/s².

Koefisien Hidrodinamis

Dari perhitungan sebelumnya, sudah didapatkan kecepatan efektif partikel air untuk masing-masing teori gelombang, yaitu teori gelombang Cnoidal dan Stokes. Dari data didapatkan bahwa kecepatan arus pasang surut maksimum pada permukaan air 0.214 m/s. Kecepatan partikel air efektif akibat arus dihitung dengan menggunakan persamaan (36) pada subbab II.5.3.

Dalam perhitungan ini, nilai k (pengaruh kekasaran permukaan) diambil 3×10^{-3} m, karena pipa bawah laut dilapisi dengan lapisan beton. Pipa diasumsikan meletak didasar laut, sehingga jarak antara pipa dengan dasar laut (h) adalah sama dengan nol ($h = 0$). Untuk asumsi awal, nilai C_d dan C_m dihitung berdasarkan gambar II.11 dan II.12 yang merupakan fungsi dari bilangan KC. Hasil perhitungan awal ini diberikan pada tabel IV.8.

Pengaruh kombinasi arus dan gelombang dalam menentukan koefisien hidrodinamis berdasarkan pada gambar II.13, II.14 dan II.15 diberikan pada tabel IV.9.

Pengaruh jarak pipa dengan dasar laut untuk koefisien hidrodinamis dihitung dengan menggunakan persamaan (41), (42) dan (43) diberikan pada tabel IV.10.

Tabel IV. 8. Asumsi awal nilai C_d dan C_m

d (m)	y (m)	U_{weff} (m/s)	U_{CeftT} (m/s)	KC	Pengaruh KC	
					C_d	C_m
1.60	1.37	1.82	0.27	26.17	0.97	1.60
2.00	1.77	1.66	0.26	24.02	0.98	1.60
3.00	2.77	1.24	0.24	18.61	1.06	1.60
4.00	3.77	1.02	0.23	15.69	1.14	1.60
5.00	4.77	0.71	0.23	11.78	1.28	1.60
6.00	5.77	0.60	0.22	10.27	1.36	1.60
7.00	6.77	0.52	0.21	9.15	1.38	1.71
8.00	7.77	0.45	0.21	8.28	1.38	1.77
9.00	8.77	0.40	0.21	7.55	1.38	1.81
10.00	9.77	0.35	0.20	6.95	1.38	1.84
11.00	10.77	0.31	0.20	6.42	1.38	1.87
12.00	11.77	0.28	0.20	5.96	1.38	1.89
13.00	12.77	0.25	0.20	5.55	1.38	1.90
14.00	13.77	0.22	0.19	5.19	1.38	1.92
15.00	14.77	0.20	0.19	4.87	1.38	1.93
16.00	15.77	0.17	0.19	4.58	1.38	1.94
17.00	16.77	0.16	0.19	4.32	1.38	1.95
18.00	17.77	0.14	0.19	4.08	1.38	1.95
19.00	18.77	0.12	0.19	3.88	1.38	1.96
20.00	19.77	0.11	0.18	3.69	1.38	1.96
21.00	20.77	0.10	0.18	3.55	1.38	1.97
22.00	21.77	0.09	0.18	3.37	1.38	1.97
23.00	22.77	0.08	0.18	3.23	1.38	1.97
24.00	23.77	0.07	0.18	3.11	1.38	1.98
25.00	24.77	0.06	0.18	3.00	1.38	1.98
26.00	25.77	0.05	0.18	2.90	1.38	1.98
27.00	26.77	0.05	0.18	2.81	1.38	1.98
28.00	27.77	0.04	0.18	2.73	1.38	1.98
29.00	28.77	0.04	0.18	2.66	1.38	1.99
30.00	29.77	0.03	0.17	2.60	1.38	1.99
31.00	30.77	0.03	0.17	2.54	1.38	1.99
32.00	31.77	0.03	0.17	2.49	1.38	1.99
33.00	32.77	0.02	0.17	2.44	1.38	1.99
34.00	33.77	0.02	0.17	2.40	1.38	1.99
35.00	34.77	0.02	0.17	2.36	1.38	1.99
36.00	35.77	0.02	0.17	2.33	1.38	1.99

Keterangan :

- KC = Bilangan Keulegan-Carpenter.
 C_d = Koefisien Drag.
 C_m = Koefisien Inersia.

Tabel IV. 9. Nilai koefisien hidrodinamis akibat kombinasi arus dan gelombang.

d (m)	y (m)	U _{weff} (m/s)	U _{CeffT} (m/s)	KC	Pengaruh arus dan gelombang		
					C _{db} (α)	C _{mb} (α)	C _l (α)
1.60	1.37	1.82	0.27	26.17	1.75	3.98	1.71
2.00	1.77	1.66	0.26	24.02	1.79	3.88	1.81
3.00	2.77	1.24	0.24	18.61	1.85	3.61	2.03
4.00	3.77	1.02	0.23	15.69	1.87	3.47	2.13
5.00	4.77	0.71	0.23	11.78	1.85	3.29	2.16
6.00	5.77	0.60	0.22	10.27	1.83	3.22	2.13
7.00	6.77	0.52	0.21	9.15	1.80	3.17	2.07
8.00	7.77	0.45	0.21	8.28	1.76	3.12	2.00
9.00	8.77	0.40	0.21	7.55	1.73	3.07	1.92
10.00	9.77	0.35	0.20	6.95	1.69	3.00	1.82
11.00	10.77	0.31	0.20	6.42	1.64	2.92	1.72
12.00	11.77	0.28	0.20	5.96	1.60	2.82	1.61
13.00	12.77	0.25	0.20	5.55	1.56	2.69	1.51
14.00	13.77	0.22	0.19	5.19	1.52	2.56	1.41
15.00	14.77	0.20	0.19	4.87	1.49	2.44	1.33
16.00	15.77	0.17	0.19	4.58	1.46	2.32	1.27
17.00	16.77	0.16	0.19	4.32	1.46	2.20	1.25
18.00	17.77	0.14	0.19	4.08	1.46	2.17	1.26
19.00	18.77	0.12	0.19	3.88	1.45	2.13	1.26
20.00	19.77	0.11	0.18	3.69	1.45	2.12	1.27
21.00	20.77	0.10	0.18	3.55	1.44	2.12	1.28
22.00	21.77	0.09	0.18	3.37	1.44	2.11	1.29
23.00	22.77	0.08	0.18	3.23	1.43	2.11	1.30
24.00	23.77	0.07	0.18	3.11	1.42	2.10	1.32
25.00	24.77	0.06	0.18	3.00	1.41	2.10	1.33
26.00	25.77	0.05	0.18	2.90	1.40	2.09	1.34
27.00	26.77	0.05	0.18	2.81	1.39	2.09	1.35
28.00	27.77	0.04	0.18	2.73	1.38	2.09	1.35
29.00	28.77	0.04	0.18	2.66	1.36	2.09	1.36
30.00	29.77	0.03	0.17	2.60	1.34	2.08	1.37
31.00	30.77	0.03	0.17	2.54	1.33	2.08	1.37
32.00	31.77	0.03	0.17	2.49	1.30	2.08	1.37
33.00	32.77	0.02	0.17	2.44	1.28	2.08	1.36
34.00	33.77	0.02	0.17	2.40	1.25	2.08	1.35
35.00	34.77	0.02	0.17	2.36	1.23	2.08	1.33
36.00	35.77	0.02	0.17	2.33	1.19	2.07	1.31

Keterangan :

C_{db}(α) = Koefisien *Drag* akibat pengaruh arus & gelombang.

C_{mb}(α) = Koefisien *Inersia* akibat pengaruh arus & gelombang.

C_l(α) = Koefisien *Lift* akibat pengaruh arus & gelombang.

Tabel IV. 10. Nilai koefisien hidrodinamis akibat *proximity effect*.

d (m)	Pengaruh KC		Pengaruh arus dan gelombang			Pengaruh <i>Proximity Effect</i>		
	Cd	Cm	C _{db} (α)	C _{mb} (α)	C _l (α)	C _d (h/D)	C _m (h/D)	C _l (h/D)
1.60	0.97	1.60	1.75	3.98	1.71	1.75	3.98	1.71
2.00	0.98	1.60	1.79	3.88	1.81	1.79	3.88	1.81
3.00	1.06	1.60	1.85	3.61	2.03	1.85	3.61	2.03
4.00	1.14	1.60	1.87	3.47	2.13	1.87	3.47	2.13
5.00	1.28	1.60	1.85	3.29	2.16	1.85	3.29	2.16
6.00	1.36	1.60	1.83	3.22	2.13	1.83	3.22	2.13
7.00	1.38	1.71	1.80	3.17	2.07	1.80	3.17	2.07
8.00	1.38	1.77	1.76	3.12	2.00	1.76	3.12	2.00
9.00	1.38	1.81	1.73	3.07	1.92	1.73	3.07	1.92
10.00	1.38	1.84	1.69	3.00	1.82	1.69	3.00	1.82
11.00	1.38	1.87	1.64	2.92	1.72	1.64	2.92	1.72
12.00	1.38	1.89	1.60	2.82	1.61	1.60	2.82	1.61
13.00	1.38	1.90	1.56	2.69	1.51	1.56	2.69	1.51
14.00	1.38	1.92	1.52	2.56	1.41	1.52	2.56	1.41
15.00	1.38	1.93	1.49	2.44	1.33	1.49	2.44	1.33
16.00	1.38	1.94	1.46	2.32	1.27	1.46	2.32	1.27
17.00	1.38	1.95	1.46	2.20	1.25	1.46	2.20	1.25
18.00	1.38	1.95	1.46	2.17	1.26	1.46	2.17	1.26
19.00	1.38	1.96	1.45	2.13	1.26	1.45	2.13	1.26
20.00	1.38	1.96	1.45	2.12	1.27	1.45	2.12	1.27
21.00	1.38	1.97	1.44	2.12	1.28	1.44	2.12	1.28
22.00	1.38	1.97	1.44	2.11	1.29	1.44	2.11	1.29
23.00	1.38	1.97	1.43	2.11	1.30	1.43	2.11	1.30
24.00	1.38	1.98	1.42	2.10	1.32	1.42	2.10	1.32
25.00	1.38	1.98	1.41	2.10	1.33	1.41	2.10	1.33
26.00	1.38	1.98	1.40	2.09	1.34	1.40	2.09	1.34
27.00	1.38	1.98	1.39	2.09	1.35	1.39	2.09	1.35
28.00	1.38	1.98	1.38	2.09	1.35	1.38	2.09	1.35
29.00	1.38	1.99	1.36	2.09	1.36	1.36	2.09	1.36
30.00	1.38	1.99	1.34	2.08	1.37	1.34	2.08	1.37
31.00	1.38	1.99	1.33	2.08	1.37	1.33	2.08	1.37
32.00	1.38	1.99	1.30	2.08	1.37	1.30	2.08	1.37
33.00	1.38	1.99	1.28	2.08	1.36	1.28	2.08	1.36
34.00	1.38	1.99	1.25	2.08	1.35	1.25	2.08	1.35
35.00	1.38	1.99	1.23	2.08	1.33	1.23	2.08	1.33
36.00	1.38	1.99	1.19	2.07	1.31	1.19	2.07	1.31

Keterangan :

- C_d(h/D) = Koefisien *Drag* akibat pengaruh *proximity effect*.
C_m(h/D) = Koefisien *Inersia* akibat pengaruh *proximity effect*.
C_l(h/D) = Koefisien *Lift* akibat pengaruh *proximity effect*.

Gaya-gaya Hidrodinamis

Setelah mendapatkan koefisien-koefisien hidrodinamis, maka selanjutnya dapat dihitung gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa persatuan panjang pipa. Gaya-gaya hidrodinamis dihitung dengan menggunakan persamaan (38), (39) dan (40) pada subbab II.5.4. Hasil perhitungan diberikan pada tabel IV.11.

Concrete Coating

Berat minimum pipa (W) yang dibutuhkan agar pipa stabil terhadap gaya-gaya hidrodinamis dihitung berdasarkan rumus 11 (subbab II.3). Berat ini hanya berat pipa yang berisi udara (kosong). Koefisien gesekan lateral tanah digunakan 0.6 (jenis tanah lumpur), dan kemiringan dasar laut dianggap rata ($\theta = 0^\circ$). Hasil perhitungan diberikan pada tabel IV.12.

Setelah diperoleh berat minimum pipa (W), maka selanjutnya dapat dihitung densitas beton dengan variasi ketebalan lapisan beton yang memenuhi syarat kestabilan. Perhitungan ini berdasarkan persamaan (13) sampai dengan (18) pada subbab II.3. Tabel IV.13 memberikan hasil perhitungan densitas lapisan beton dengan ketebalan 1 inch (2.54 cm).

Selanjutnya dihitung densitas lapisan beton untuk berbagai ketebalan lapisan beton tersebut dan hasil perhitungan diberikan pada tabel IV.14.



Tabel IV. 11. Gaya-gaya hidrodinamis persatuan panjang pipa.

d m	ΣU_{eff} m/s	dU/dt m/s ²	C_D	C_M	C_L	F_D kg/m	F_I kg/m	F_L kg/m
1.56	1.82	-5.34	1.75	3.98	1.71	1361.67	-3574.01	1332.14
2	1.66	-3.04	1.79	3.88	1.81	1151.48	-1980.35	1169.43
3	1.24	-1.65	1.85	3.61	2.03	669.43	-1004.21	735.37
4	1.02	-1.39	1.87	3.47	2.13	455.81	-812.28	517.87
5	0.71	0.17	1.85	3.29	2.16	221.73	93.50	258.25
6	0.60	0.13	1.83	3.22	2.13	153.88	72.40	179.05
7	0.52	0.11	1.80	3.17	2.07	111.80	58.32	128.90
8	0.45	0.09	1.76	3.12	2.00	83.40	48.12	94.66
9	0.40	0.08	1.73	3.07	1.92	63.20	40.27	70.18
10	0.35	0.07	1.69	3.00	1.82	48.35	33.95	52.21
11	0.31	0.06	1.64	2.92	1.72	37.19	28.68	38.84
12	0.28	0.05	1.60	2.82	1.61	28.70	24.17	28.84
13	0.25	0.04	1.56	2.69	1.51	22.19	20.26	21.39
14	0.22	0.04	1.52	2.56	1.41	17.19	16.95	15.90
15	0.20	0.03	1.49	2.44	1.33	13.35	14.25	11.90
16	0.17	0.03	1.46	2.32	1.27	10.40	11.98	9.04
17	0.16	0.03	1.46	2.20	1.25	8.23	10.03	7.04
18	0.14	0.02	1.46	2.17	1.26	6.51	8.77	5.62
19	0.12	0.02	1.45	2.13	1.26	5.14	7.62	4.48
20	0.11	0.02	1.45	2.12	1.27	4.04	6.72	3.56
21	0.10	0.02	1.44	2.12	1.28	3.34	6.03	2.97
22	0.09	0.01	1.44	2.11	1.29	2.50	5.25	2.25
23	0.08	0.01	1.43	2.11	1.30	1.96	4.64	1.79
24	0.07	0.01	1.42	2.10	1.32	1.53	4.10	1.42
25	0.06	0.01	1.41	2.10	1.33	1.20	3.62	1.12
26	0.05	0.01	1.40	2.09	1.34	0.93	3.20	0.89
27	0.05	0.01	1.39	2.09	1.35	0.73	2.83	0.70
28	0.04	0.01	1.38	2.09	1.35	0.56	2.50	0.56
29	0.04	0.01	1.36	2.09	1.36	0.44	2.21	0.44
30	0.03	0.01	1.34	2.08	1.37	0.34	1.96	0.34
31	0.03	0.00	1.33	2.08	1.37	0.26	1.73	0.27
32	0.03	0.00	1.30	2.08	1.37	0.20	1.53	0.21
33	0.02	0.00	1.28	2.08	1.36	0.16	1.35	0.17
34	0.02	0.00	1.25	2.08	1.35	0.12	1.20	0.13
35	0.02	0.00	1.23	2.08	1.33	0.09	1.06	0.10
36	0.02	0.00	1.19	2.07	1.31	0.07	0.94	0.08

Keterangan :

- F_D = Gaya Drag persatuan panjang pipa, kg/m.
 F_I = Gaya Inersia persatuan panjang pipa, kg/m.
 F_L = Gaya Lift persatuan panjang pipa, kg/m.

Tabel IV. 12. Berat minimum pipa (W).

d m	F _D kg/m	F _I kg/m	F _L kg/m	W kg/m
1.56	1361.67	-3574.01	1332.14	2355.09
2	1151.48	-1980.35	1169.43	212.01
3	669.43	-1004.21	735.37	177.40
4	455.81	-812.28	517.87	76.26
5	221.73	93.50	258.25	783.64
6	153.88	72.40	179.05	556.19
7	111.80	58.32	128.90	412.44
8	83.40	48.12	94.66	313.85
9	63.20	40.27	70.18	242.63
10	48.35	33.95	52.21	189.38
11	37.19	28.68	38.84	148.63
12	28.70	24.17	28.84	116.96
13	22.19	20.26	21.39	92.14
14	17.19	16.95	15.90	72.80
15	13.35	14.25	11.90	57.90
16	10.40	11.98	9.04	46.35
17	8.23	10.03	7.04	37.47
18	6.51	8.77	5.62	31.08
19	5.14	7.62	4.48	25.73
20	4.04	6.72	3.56	21.51
21	3.34	6.03	2.97	18.58
22	2.50	5.25	2.25	15.17
23	1.96	4.64	1.79	12.79
24	1.53	4.10	1.42	10.81
25	1.20	3.62	1.12	9.16
26	0.93	3.20	0.89	7.79
27	0.73	2.83	0.70	6.64
28	0.56	2.50	0.56	5.67
29	0.44	2.21	0.44	4.86
30	0.34	1.96	0.34	4.17
31	0.26	1.73	0.27	3.59
32	0.20	1.53	0.21	3.10
33	0.16	1.35	0.17	2.68
34	0.12	1.20	0.13	2.32
35	0.09	1.06	0.10	2.02
36	0.07	0.94	0.08	1.75

Keterangan :

W = Berat Minimum Pipa, kg/m.

Tabel IV. 13. Densitas lapisan beton dengan ketebalan 1 inch.

d m	W_s kg/m	W_s lb/ft	$W_{corrosion}$ lb/ft	W_{steel} lb/ft	$t_{concrete} = 1$ in		
					B lb/ft	$W_{concrete}$ lb/ft	$\rho_{concrete}$ lb/ft ³
1.6	2355.09	1582.62	3.52	93.80	142.64	1627.94	3888.93
2	212.01	142.47	3.52	93.80	142.64	187.79	448.61
3	177.40	119.22	3.52	93.80	142.64	164.54	393.06
4	76.26	51.24	3.52	93.80	142.64	96.57	230.68
5	783.64	526.61	3.52	93.80	142.64	571.93	1366.26
6	556.19	373.76	3.52	93.80	142.64	419.08	1001.13
7	412.44	277.16	3.52	93.80	142.64	322.48	770.36
8	313.85	210.91	3.52	93.80	142.64	256.23	612.10
9	242.63	163.05	3.52	93.80	142.64	208.37	497.77
10	189.38	127.26	3.52	93.80	142.64	172.58	412.28
11	148.63	99.88	3.52	93.80	142.64	145.20	346.86
12	116.96	78.60	3.52	93.80	142.64	123.92	296.03
13	92.14	61.92	3.52	93.80	142.64	107.24	256.19
14	72.80	48.92	3.52	93.80	142.64	94.25	225.14
15	57.90	38.91	3.52	93.80	142.64	84.23	201.21
16	46.35	31.15	3.52	93.80	142.64	76.47	182.67
17	37.47	25.18	3.52	93.80	142.64	70.50	168.41
18	31.08	20.88	3.52	93.80	142.64	66.21	158.16
19	25.73	17.29	3.52	93.80	142.64	62.61	149.57
20	21.51	14.45	3.52	93.80	142.64	59.77	142.79
21	18.58	12.49	3.52	93.80	142.64	57.81	138.10
22	15.17	10.19	3.52	93.80	142.64	55.51	132.62
23	12.79	8.59	3.52	93.80	142.64	53.91	128.79
24	10.81	7.26	3.52	93.80	142.64	52.58	125.62
25	9.16	6.16	3.52	93.80	142.64	51.48	122.97
26	7.79	5.23	3.52	93.80	142.64	50.55	120.77
27	6.64	4.46	3.52	93.80	142.64	49.78	118.92
28	5.67	3.81	3.52	93.80	142.64	49.13	117.37
29	4.86	3.27	3.52	93.80	142.64	48.59	116.07
30	4.17	2.80	3.52	93.80	142.64	48.13	114.97
31	3.59	2.41	3.52	93.80	142.64	47.74	114.03
32	3.10	2.08	3.52	93.80	142.64	47.40	113.24
33	2.68	1.80	3.52	93.80	142.64	47.12	112.57
34	2.32	1.56	3.52	93.80	142.64	46.88	111.99
35	2.02	1.35	3.52	93.80	142.64	46.68	111.50
36	1.75	1.18	3.52	93.80	142.64	46.50	111.08

Keterangan :

W_s	=	Berat pipa tenggelam, lb/ft.
W_{steel}	=	Berat baja diudara, lb/ft.
$W_{corrosion}$	=	Berat lapisan anti korosi diudara, lb/ft
B	=	Gaya pengapung (<i>bouyancy</i>), lb/ft.
$\rho_{concrete}$	=	Densitas lapisan beton, lb/ft ³ .
$t_{concrete}$	=	Ketebalan lapisan beton, in.

Tabel IV. 14. Densitas lapisan beton dalam berbagai harga ketebalan.

d (m)	$\rho_{\text{concrete}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$					
	t = 2.54 (cm)	t = 5.08 (cm)	t = 7.62 (cm)	t = 10.16 (cm)	t = 12.7 (cm)	t = 15.24 (cm)
1.56	62294.67	30143.86	19522.42	14273.63	11167.50	9128.23
2	7185.98	3954.43	2886.85	2359.28	2047.08	1842.10
3	6296.18	3531.57	2618.24	2166.91	1899.81	1724.46
4	3695.17	2295.49	1833.08	1604.58	1469.35	1380.57
5	21885.32	10940.03	7324.11	5537.24	4479.80	3785.56
6	16036.59	8160.53	5558.57	4272.76	3511.84	3012.28
7	12339.93	6403.75	4442.66	3473.55	2900.05	2523.53
8	9804.86	5199.01	3677.41	2925.48	2480.50	2188.36
9	7973.49	4328.68	3124.57	2529.54	2177.41	1946.22
10	6604.12	3677.91	2711.20	2233.48	1950.78	1765.17
11	5556.18	3179.90	2394.86	2006.92	1777.35	1626.62
12	4741.87	2792.91	2149.05	1830.87	1642.58	1518.96
13	4103.71	2489.64	1956.41	1692.90	1536.96	1434.59
14	3606.41	2253.31	1806.29	1585.39	1454.66	1368.84
15	3223.12	2071.15	1690.58	1502.52	1391.23	1318.16
16	2926.07	1929.99	1600.92	1438.30	1342.07	1278.89
17	2697.68	1821.45	1531.97	1388.92	1304.27	1248.69
18	2533.43	1743.39	1482.39	1353.41	1277.08	1226.97
19	2395.94	1678.05	1440.88	1323.69	1254.33	1208.79
20	2287.26	1626.40	1408.08	1300.19	1236.34	1194.43
21	2212.07	1590.67	1385.38	1283.94	1223.90	1184.49
22	2124.30	1548.96	1358.89	1264.96	1209.37	1172.88
23	2063.05	1519.85	1340.40	1251.72	1199.24	1164.78
24	2012.18	1495.67	1325.04	1240.72	1190.82	1158.06
25	1969.83	1475.55	1312.26	1231.56	1183.81	1152.46
26	1934.49	1458.75	1301.59	1223.92	1177.96	1147.79
27	1904.92	1444.70	1292.66	1217.53	1173.07	1143.88
28	1880.09	1432.90	1285.17	1212.16	1168.96	1140.59
29	1859.20	1422.98	1278.86	1207.65	1165.50	1137.83
30	1841.57	1414.60	1273.54	1203.83	1162.58	1135.50
31	1826.64	1407.50	1269.03	1200.61	1160.11	1133.53
32	1813.97	1401.48	1265.21	1197.86	1158.01	1131.85
33	1803.17	1396.35	1261.95	1195.53	1156.23	1130.42
34	1793.96	1391.97	1259.17	1193.54	1154.70	1129.21
35	1786.08	1388.22	1256.79	1191.84	1153.40	1128.16
36	1779.31	1385.01	1254.74	1190.37	1152.28	1127.27

Keterangan :

t = Ketebalan lapisan beton, cm.

IV.1.7. Analisa *Buckling*

Analisa *buckling* yang dilakukan berdasarkan peraturan (*rules*) yang diberikan oleh Germanischer Lloyd (GL) 1995, *Rules for Classification and Construction, Part 4 : Subsea Pipelines and Riser*. Analisa dilakukan pada keadaan operasional.

Analisa *buckling* yang dilakukan meliputi :

1. Lokal *Buckling* dinding pipa (*pipe wall*) disebabkan oleh tekanan hidrostatik ataupun tekanan luar yang lebih (*external overpressure*), *bending* dan gaya aksial.
2. *Buckling Propagation* disebabkan oleh tekanan hidrostatik ataupun tekanan luar yang lebih (*external overpressure*) akibat terjadinya lokal *buckling*.
3. Global *Buckling*, pipa dianggap sebagai batang (*bar*) yang mengalami kompresi (tekanan).

Tipe pipa yang digunakan adalah API 5LX X52 dengan spesifikasi sebagai berikut :

- ✓ Spesifikasi : API 5LX
- ✓ Kelas (*grade*) : X52
- ✓ Specified Min. Yield Strength (SMYS) : 52000 psi (358 MPa)
- ✓ Diameter Luar (D_o) : 18 in.
- ✓ Ketebalan (t) : 0.5 in.

Perhitungan yang akan diberikan berikut ini berdasarkan pada *rules* yang diberikan oleh GL (*Germanischer Lloyd*) seperti yang dijelaskan pada subbab II.4.

Ovalisasi

Ovalisasi yang diakibatkan oleh *bending* dihitung dengan menggunakan persamaan (48) seperti yang diberikan pada subbab II.6.1. *Specified Minimum Yield Strength* pipa 52000 psi, desain faktor diambil 0.8 dan modulus elastisitas pipa 3.05×10^7 psi.

$$K = \frac{1}{R} = \frac{2 \sigma_o DF}{E D_o} = 1.52 \times 10^{-4} \text{ 1/in.}$$

$$= 2.98 \times 10^{-3} \text{ 1/m.}$$

$$\Delta_b \approx \frac{1}{24} \frac{D_o^4}{t^2} K^2 = 4.03 \times 10^{-4} \text{ 1/in.}$$

$$= 15.87 \times 10^{-3} \text{ 1/m.}$$

Pengaruh Lendutan Murni (*Pure Bending*)

Lokal *buckling* yang diakibatkan oleh lendutan murni (*pure bending*) dihitung berdasarkan persamaan (49) sampai dengan persamaan (52) seperti yang dijelaskan pada subbab II.6.1. γ_m diambil 1.05, untuk kombinasi beban (oper-3) termasuk kondisi operasional normal dan bersamaan beban lingkungan yang ekstrim sedangkan γ_u diambil 1.4 untuk riser dan struktur sejenis yang dipengaruhi oleh benturan benda jatuh, *crane handling* dan lainnya. *Specified Minimum Yield Strength* ($R_{10.5}$) 52000 psi. Modulus penampang (*section modulus*) 117 in^3 .

$$\sigma_{\max} = \frac{E D}{2R} = 416000 \text{ psi} = 286.8 \text{ MPa.}$$

$$M_d = \sigma_{\max} Z = 4867200 \text{ lb.in} = 549993.6 \text{ N.m}$$

$$M_c = (D_o - t)^2 t R_{t,0.5} \left(1 - 0.0024 \frac{D_o}{t} \right) = 7274540 \text{ lb.in}$$

$$= 822023.02 \text{ N.m}$$

$$\frac{M_c}{(\gamma_m \gamma_u)} = 559199.33 \text{ N.m}$$

Dari hasil perhitungan diatas, dapat dilihat bahwa M_d lebih kecil dari

$$\frac{M_c}{(\gamma_m \gamma_u)}, \text{ dan memenuhi persamaan } M_d \leq \frac{M_c}{(\gamma_m \gamma_u)}.$$

Pengaruh Tekanan Murni (Pure Pressure)

Lokal *buckling* yang diakibatkan tekanan murni (*pure pressure*) dihitung berdasarkan persamaan (53) sampai dengan persamaan (56) pada subbab II.6.1. Perbandingan Poisson diambil 0.3 untuk material baja, ovalisasi awal (Δ_o) ditentukan 0.025 (Germanischer Lloyd, 1995), densitas air laut 1025 kg/m^3 , percepatan gravitasi 9.81 m/s dan kedalaman maksimum 36 meter.

$$P_y = 2 R_{t,0.5} \frac{t}{D_o - t} = 2971.43 \text{ psi} = 20.49 \text{ MPa}$$

$$P_{eb} = \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{D_o - t} \right)^3 = 1561.24 \text{ psi} = 10.76 \text{ MPa}$$

Untuk menghitung *Critical Buckling Pressure* (P_c) digunakan metode iterasi, karena berdasarkan persamaan (54), P_c merupakan fungsi dari P_c itu sendiri.

$$\left[\frac{P_c}{P_{eb}} - 1 \right] \left[\left(\frac{P_c}{P_y} \right)^2 - 1 \right] = 2 \frac{P_c}{P_y} \Delta_0 \frac{D_o}{t}$$

Hasil perhitungan iterasi diberikan pada tabel dibawah ini.

Tabel IV. 15. Perhitungan Tekanan *Buckling* Kritis (P_c).

P_c psi	P_c' psi	error
10.00	1640.20	-163.0201
825.10	718.35	0.1294
771.72	778.49	-0.0088
775.11	774.66	0.0006
774.89	774.92	0.0000
774.90	774.90	0.0000
774.90	774.90	0.0000
774.90	774.90	0.0000

Dari tabel diperoleh bahwa

$$P_c = 774.9 \text{ psi} = 5.34 \text{ MPa.}$$

Tekanan Desain Eksternal *Buckling* (P_d) adalah tekanan hidrostatis yang bekerja pada struktur pipa.

$$P_d = \rho g h = 361989 \text{ Pascal} = 0.36 \text{ MPa}$$

$$\frac{P_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)} = 3.63 \text{ MPa.}$$

Dari perhitungan diatas, diperoleh bahwa P_d lebih kecil dari $\frac{P_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)}$,

sehingga memenuhi persamaan $P_d \leq \frac{P_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)}$.

Kombinasi Lendutan dan Tekanan Hidrostatik

Lokal *buckling* yang dipengaruhi oleh kombinasi lendutan dan tekanan murni dihitung berdasarkan persamaan (57) pada subbab II.6.1.

$$\left(\frac{\gamma_m \cdot \gamma_u \cdot M_d}{M_c} \right)^4 + \frac{\gamma_m \cdot \gamma_u \cdot P_d}{P_c} = 1.0$$

dengan demikian hasil ini memenuhi persamaan

$$\left(\frac{\gamma_m \cdot \gamma_u \cdot M_d}{M_c} \right)^4 + \frac{\gamma_m \cdot \gamma_u \cdot P_d}{P_c} \leq 1.$$

Panjalaran Buckling

Dari seluruh pengaruh-pengaruh yang dapat menimbulkan lokal *buckling* ternyata dari perhitungan-perhitungan sebelumnya tidak ditemukan indikasi terjadinya lokal *buckling*. Dengan tidak terjadinya lokal *buckling* maka penjaralan *buckling* (*buckling propagation*) tidak akan terjadi, karena penjaralan *buckling* muncul diawali dengan terjadinya lokal *buckling*.

Global Buckling

Analisa *global buckling* adalah analisa *buckling* pada pipa dimana pipa dianggap sebagai batangan (*bar*) yang mengalami kompresi akibat adanya *thermal expansion*. Kompresi yang dialami pipa dapat menyebabkan *bar buckling* secara lateral (*snaking*) ataupun vertikal *bar buckling* (*upheaval & downward*). Analisa *global buckling* dihitung berdasarkan persamaan yang diberikan pada subbab II.6.2.

Koefisien tanah aksial (μ) dan lateral (μ_L) masing-masing ditentukan 0.7 dan 0.6, nilai ini berdasarkan nilai yang diberikan oleh Germanischer Lloyd

(1995) untuk jenis tanah *clay* dan *silt*. Luas potongan pipa (A_{st}) 27.49 in^2 ($6.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$), momen inersia (I) 1053 in^4 ($4.2 \times 10^{-7} \text{ m}^4$) dan koefisien pemuaian (α) $6.5 \times 10^{-5} \text{ in/in}^\circ\text{F}$. Perbedaan temperatur adalah perbedaan antara temperatur diluar pipa, yaitu air laut dengan temperatur dalam pipa (temperatur fluida alir). Temperatur air laut ditentukan 30° (111.6°F) sedangkan suhu fluida alir berdasarkan data adalah 90°F . Perbedaan tekanan adalah perbedaan antara tekanan hidrostatik luar dengan tekanan dalam pipa. Tekanan luar hidrostatik dihitung dengan persamaan (64) dan (65) sedangkan tekanan dalam pipa dihitung dengan persamaan (66).

Gaya aksial desain (*design axial force*) dihitung berdasarkan persamaan (61), dan gaya aksial kritis dihitung berdasarkan persamaan (62). Hasil perhitungan diberikan berikut ini.

$$P_E \approx \rho_w g \left(d_H + \frac{1}{2} H \right) = 54.28 \text{ psi} = 374.25 \text{ KN/m}^2$$

$$P_d = \frac{2 S t}{D} \times F \times E \times T = 2888.9 \text{ psi} = 19918.26 \text{ KN/m}^2$$

$$\Delta P = P_d - P_E = 2834.6 \text{ psi} = 19543.88 \text{ KN/m}^2$$

$$F_d = \left(E \alpha \Delta T - \nu \Delta P \frac{D_o}{2T} \right) A_{st} = 303235.0103 \text{ lb} = 1349316.20 \text{ N}$$

$$L = 6.6 \sqrt{D} = 28.00 \text{ ft} = 8.53 \text{ meter.}$$

$$F_c = \left\{ C_1 \frac{EI}{L^2} + C_3 \mu W_s L \left[\left(1 + C_2 \frac{E A_{st} \mu_L^2 W_s L^5}{\mu (EI)^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \right\} = 1.24 \times 10^{10} \text{ lb}$$

$$= 5.52 \times 10^{10} \text{ N}$$

$$\frac{F_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)} = 8.46 \times 10^9 \text{ lb} = 37.78 \times 10^9 \text{ N}$$

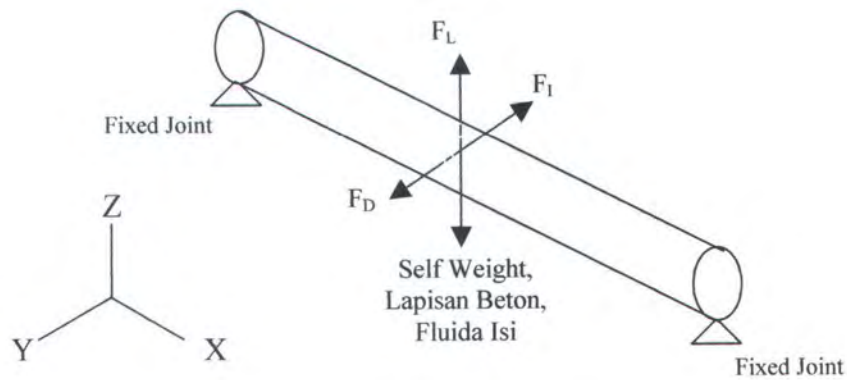
Dari hasil perhitungan diatas dapat dilihat bahwa $\frac{F_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)}$ adalah lebih besar dari F_d , maka memenuhi persamaan $F_d \leq \frac{F_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)}$. Sehingga struktur pipa tidak terjadi *bar buckling* secara lateral.

Pemodelan Pipa

Pemodelan pipa bertujuan untuk mengetahui reaksi struktur pipa akibat beban hidrodinamis maupun beban yang berasal dari struktur pipa itu sendiri (*self weight, concrete coating*) dengan menggunakan *software* struktur GT-Strudl 25. Pemodelan dilakukan pada bagian pipa yang mengalami pembebanan yang paling besar, yaitu terjadi pada kedalaman 1.6 meter. *Output* pemodelan ditunjukkan dengan parameter *member check* untuk setiap member. Dalam pemodelan, *joint* didefinisikan *fixed*.

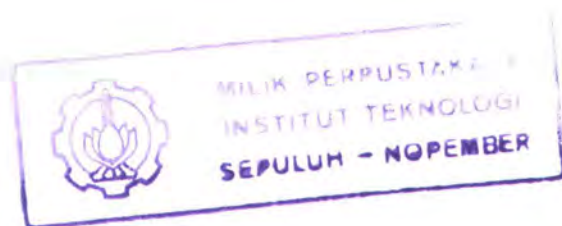
Panjang pipa pada kedalaman 1.6 meter adalah 250 meter. Gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja pada kedalaman ini adalah gaya *drag* (F_D) 2050.31 kg/m (20113.57 N/m), gaya *inersia* (F_I) -9465.8 kg/m (-62859.5 N/m) dan gaya *lift* (F_L) 2222.99 kg/m (21807.5 N/m). Berat lapisan beton adalah 3846 N/m. Jenis beban yang bekerja pada pipa adalah beban merata (*uniform*).

Jarak antar *joint* (*span*) *divariasikan* hingga didapatkan jarak maksimal namun masih memenuhi parameter *member check*. Variasi *span* 8, 9 dan 10 meter. Ilustrasi pemodelan seperti pada gambar IV.4 berikut ini.

**Gambar IV. 4**

Ilustrasi pemodelan struktur pipa.

Dari hasil pemodelan untuk setiap *spanning* didapatkan bahwa jarak *span* maksimum yang tidak menyebabkan member gagal (*failed*) adalah 8 meter. Hasil *running* pemodelan dapat dilihat di lampiran hasil pemodelan.



IV.2. PEMBAHASAN

Subbab ini membahas hasil perhitungan dan analisa dari subbab analisa IV.1. Pembahasan ini meliputi desain ukuran pipa, densitas dan ketebalan lapisan beton, sistem perlindungan serta pembahasan *buckling*.

Grafik-grafik hasil perhitungan akan ditampilkan untuk memberikan kejelasan dalam memahami pembahasan ini. Grafik tersebut merupakan hasil perhitungan dan analisa pada subbab IV.1.

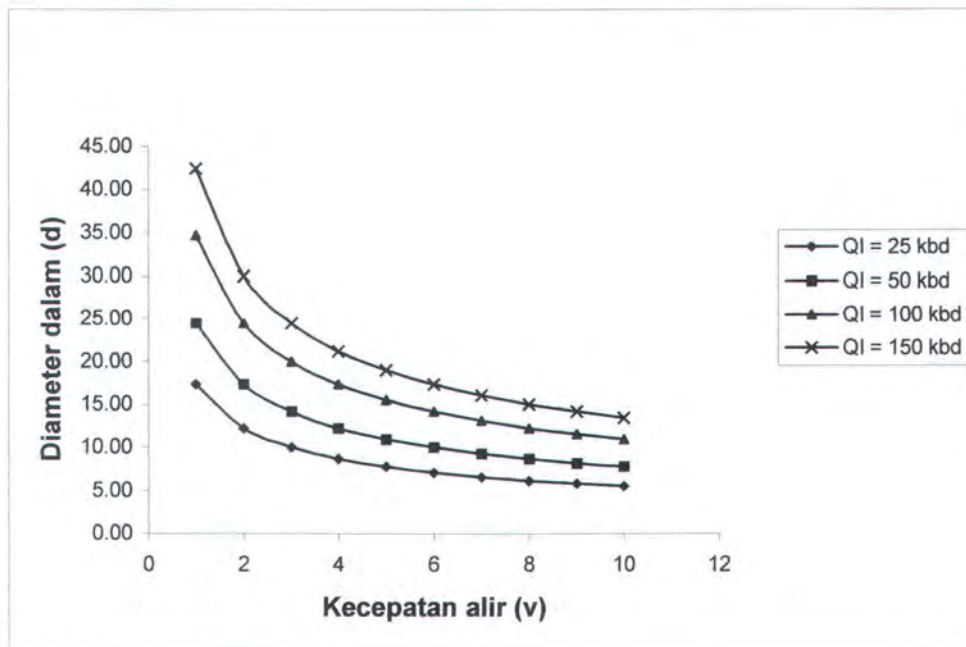
IV.2.1. Ukuran Pipa

Dari hasil analisa perhitungan diameter pipa pada subbab IV.1.5 diperoleh bahwa diameter dalam pipa adalah 0.43 meter (16.84 in). Diameter ini dihitung berdasarkan fungsi dari laju aliran fluida (*flow rate*) dan densitas fluida tersebut.

Berdasarkan tabel *properties of pipe* dalam McAllister (1998), maka nilai diameter dalam (d) yang paling mendekati angka 0.43 m (16.84 in) adalah 0.432 m (17 in), sedangkan ketebalan dinding pipa (t) dan diameter luar (D) adalah 0.0125 m (0.5 in) dan 0.457 m (18.0 in).

Penentuan diameter dalam pipa (d) sangat dipengaruhi kecepatan alir fluida (v) dan laju aliran (*flow rate*) fluida. Semakin besar *flow rate* maka diameter dalam yang dibutuhkan juga semakin besar, namun kebalikan dari itu, semakin besar kecepatan alir fluida semakin kecil diameter dalam yang dibutuhkan. Hal ini sesuai dengan efek kapilaritas suatu pipa.

Hubungan antara diameter dalam pipa dan kecepatan alir fluida dapat dilihat pada grafik dibawah ini untuk berbagai harga *flow rate* (QI).



Gambar IV. 5

Grafik diameter dalam vs kecepatan alir untuk berbagai harga *flow rate*.

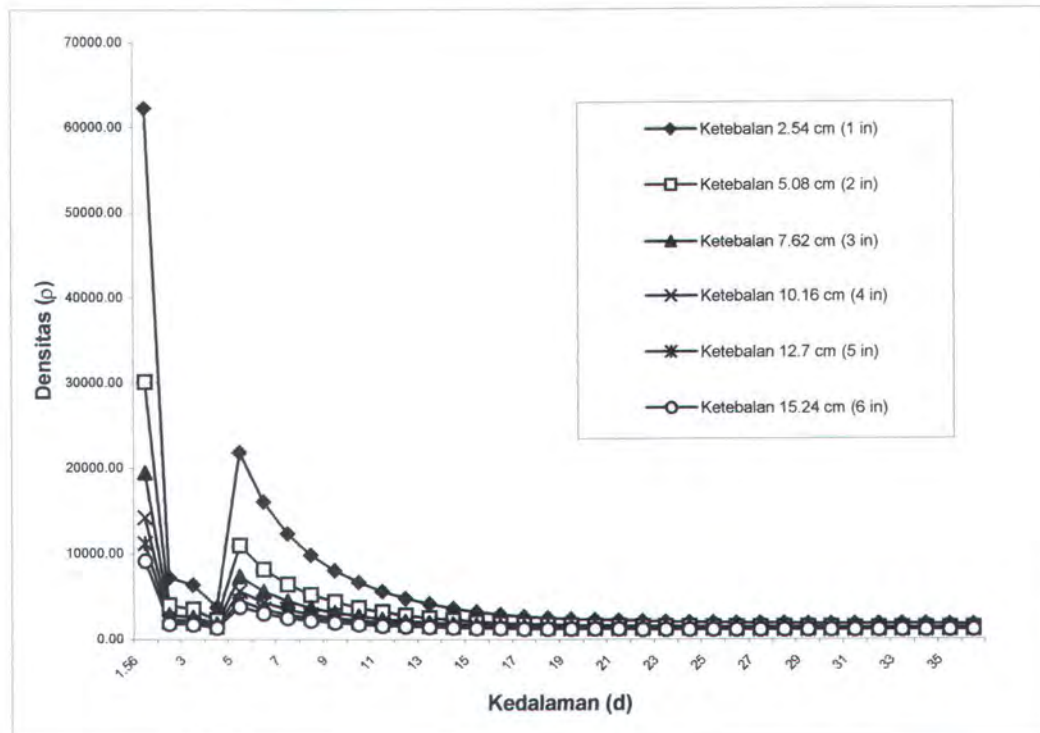
IV.2.2. Densitas dan Ketebalan Lapisan Beton

Densitas beton yang digunakan untuk lapisan pipa bawah laut memiliki variasi antara 2250 kg/m^3 sampai dengan 3050 kg/m^3 (Halliwell, 1986). Densitas tersebut adalah densitas yang umumnya dipakai oleh industri. Tabel berikut ini diberikan nilai densitas untuk berbagai harga ketebalan. Tabel ini adalah hasil perhitungan densitas dan ketebalan lapisan beton pada subbab IV.6 (Tabel IV.14).

Tabel IV. 16. Densitas lapisan beton dalam berbagai harga ketebalan.

d (m)	ρ_{concrete} (kg/m ³)					
	t = 2.54 (cm)	t = 5.08 (cm)	t = 7.62 (cm)	t = 10.16 (cm)	t = 12.7 (cm)	t = 15.24 (cm)
1.56	62294.67	30143.86	19522.42	14273.63	11167.50	9128.23
2	7185.98	3954.43	2886.85	2359.28	2047.08	1842.10
3	6296.18	3531.57	2618.24	2166.91	1899.81	1724.46
4	3695.17	2295.49	1833.08	1604.58	1469.35	1380.57
5	21885.32	10940.03	7324.11	5537.24	4479.80	3785.56
6	16036.59	8160.53	5558.57	4272.76	3511.84	3012.28
7	12339.93	6403.75	4442.66	3473.55	2900.05	2523.53
8	9804.86	5199.01	3677.41	2925.48	2480.50	2188.36
9	7973.49	4328.68	3124.57	2529.54	2177.41	1946.22
10	6604.12	3677.91	2711.20	2233.48	1950.78	1765.17
11	5556.18	3179.90	2394.86	2006.92	1777.35	1626.62
12	4741.87	2792.91	2149.05	1830.87	1642.58	1518.96
13	4103.71	2489.64	1956.41	1692.90	1536.96	1434.59
14	3606.41	2253.31	1806.29	1585.39	1454.66	1368.84
15	3223.12	2071.15	1690.58	1502.52	1391.23	1318.16
16	2926.07	1929.99	1600.92	1438.30	1342.07	1278.89
17	2697.68	1821.45	1531.97	1388.92	1304.27	1248.69
18	2533.43	1743.39	1482.39	1353.41	1277.08	1226.97
19	2395.94	1678.05	1440.88	1323.69	1254.33	1208.79
20	2287.26	1626.40	1408.08	1300.19	1236.34	1194.43
21	2212.07	1590.67	1385.38	1283.94	1223.90	1184.49
22	2124.30	1548.96	1358.89	1264.96	1209.37	1172.88
23	2063.05	1519.85	1340.40	1251.72	1199.24	1164.78
24	2012.18	1495.67	1325.04	1240.72	1190.82	1158.06
25	1969.83	1475.55	1312.26	1231.56	1183.81	1152.46
26	1934.49	1458.75	1301.59	1223.92	1177.96	1147.79
27	1904.92	1444.70	1292.66	1217.53	1173.07	1143.88
28	1880.09	1432.90	1285.17	1212.16	1168.96	1140.59
29	1859.20	1422.98	1278.86	1207.65	1165.50	1137.83
30	1841.57	1414.60	1273.54	1203.83	1162.58	1135.50
31	1826.64	1407.50	1269.03	1200.61	1160.11	1133.53
32	1813.97	1401.48	1265.21	1197.86	1158.01	1131.85
33	1803.17	1396.35	1261.95	1195.53	1156.23	1130.42
34	1793.96	1391.97	1259.17	1193.54	1154.70	1129.21
35	1786.08	1388.22	1256.79	1191.84	1153.40	1128.16
36	1779.31	1385.01	1254.74	1190.37	1152.28	1127.27

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa nilai densitas lapisan beton sangat bervariasi pada setiap kedalaman (d) untuk setiap ketebalan lapisan tersebut. Secara grafik dapat dilihat berikut ini.



Gambar IV. 6

Grafik densitas lapisan beton pada setiap kedalaman (d).

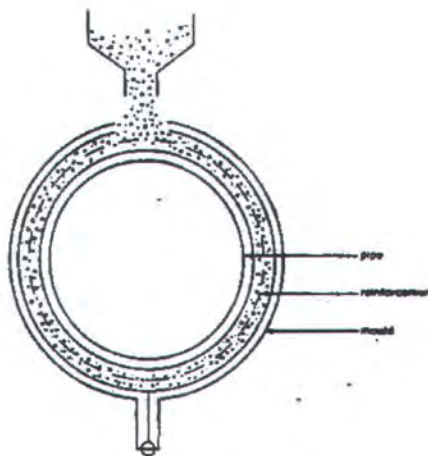
Penentuan lapisan beton dan ketebalan yang akan digunakan dipengaruhi oleh beberapa hal, diantaranya harus mempertimbangkan proses pembuatan (*methods of concrete application*) dan proses instalasi (*instalation application*). Beton yang berat (densitasnya besar) akan menyebabkan ketebalan yang dibutuhkan lebih kecil jika dibandingkan dengan beton yang ringan, selain itu juga pengaruh beban-beban hidrodinamis akan semakin kecil juga.

Terdapat tiga proses pembuatan lapisan beton yang sering digunakan, yaitu *casting* (cetak), *impingement* dan *wrapping* (bahan pembungkus).

Proses *casting* (Gambar IV.7) menggunakan cetakan dengan diameter tertentu, dan cairan beton dimasukkan diantara cetakan dan pipa baja.

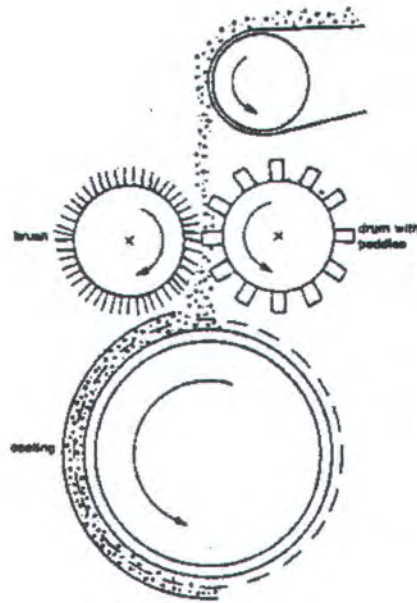
Pelapisan beton dengan menggunakan metode *impingement* adalah dengan cara mengalirkan beton pada pipa yang berputar melalui suatu sistem yang terdiri atas drum berputar yang memiliki pedal dan sikat. Campuran beton yang relatif kering akan melekat pada lapisan terluar pipa tanpa merosot (lepas) dan secepatnya pipa yang sudah dilapisi tadi dikeringkan. Proses ini dapat dilihat pada gambar IV.8.

Metode *wrapping* (Gambar IV.9) atau juga disebut metode kompresi menggunakan pembungkus yang terbuat dari bahan polyethylene. Beton mengalir dari *mixer* melalui *hopper* ke pembungkus (*outerwrap*). Pipa berputar dan bergerak secara aksial. Beton dikompresikan diantara pipa dan pembungkus diatas *carrier belt*.



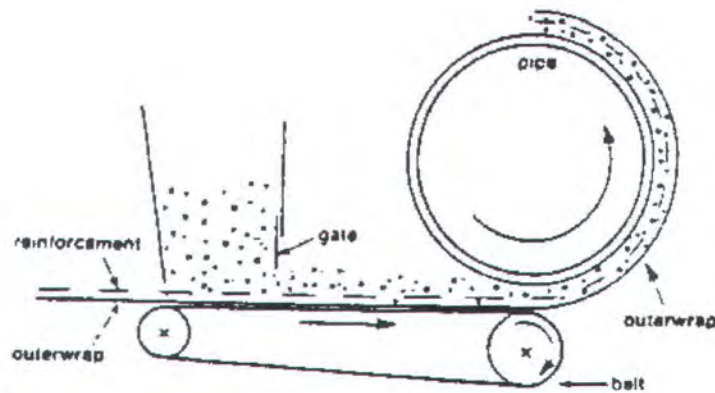
Gambar IV. 7

Proses pelapisan beton dengan metode *casting* (Halliwell, 1986).



Gambar IV. 8

Proses pelapisan beton dengan metode *impingement* (Halliwell, 1986).



Gambar IV. 9

Proses pelapisan beton dengan metode *wrapping* (Halliwell, 1986).

Dalam teknis proses pelapisan beton untuk ketiga metode yang telah dijelaskan diatas, adalah lebih mudah untuk melakukan proses pelapisan dengan ketebalan yang konstan atau tetap. Jika ketebalan lapisan beton dipertahankan tetap, maka yang perlu dilakukan hanyalah bervariasi

densitas beton yang digunakan untuk mempertahankan berat pipa minimum yang harus dipenuhi.

Sedangkan jika memvariasikan ketebalan akan menyebabkan proses pelapisan membutuhkan waktu yang lebih lama dan proses yang cukup rumit. Misalnya pada proses *casting* harus dibuat cetakan yang baru untuk ketebalan yang berbeda. Pada proses *impingement* dan *wrapping* dibutuhkan waktu untuk mengatur ulang peralatan pelapisan jika harus melapisi dengan ketebalan yang berbeda.

Campuran beton yang digunakan terdiri atas semen (EN 197, ASTM-C-150, BS 12 atau DIN 1164), *aggregate* (kerikil, bijih besi, bijih barium) dan air. Untuk mendapatkan densitas lapisan beton yang diinginkan, hanya tinggal menambah ataupun mengurangi komposisi atau campuran yang digunakan. Hal ini adalah lebih mudah jika dibandingkan dengan merubah ketebalan lapisan.

Jika pipa bawah laut memerlukan *protection methods* ataupun *anchoring methods*, maka kesukaran dalam proses-proses tersebut harus ditekan serendah mungkin. Salah satu hal yang mempengaruhi proses tersebut adalah pengaruh lingkungan, dalam hal ini adalah kedalaman dasar laut. Semakin dalam kedalaman yang dihadapi, maka tingkat kesukaran dalam pengerjaan akan semakin sukar. Karena besarnya densitas juga tergantung dari kedalaman, maka hal ini juga harus dipertimbangkan.

Berdasarkan pertimbangan diatas, maka ketebalan lapisan beton yang akan digunakan adalah 7.62 cm (3 in) dan dapat dilihat pada tabel sebelumnya. Seperti dijelaskan dimuka, bahwa densitas lapisan beton yang umum digunakan oleh industri berkisar antara 2250 kg/m³ hingga 3050 kg/m³. Densitas yang kurang dari 2250 kg/m³ ditetapkan 2250 kg/m³ sedangkan densitas yang lebih dari 3050 kg/m³ ditetapkan 3050 kg/m³. Variasi densitas pada ketebalan 7.62 cm (3 in) diberikan pada tabel dibawah ini.

Tabel IV. 17. Variasi densitas pada ketebalan 7.62 cm (3 in).

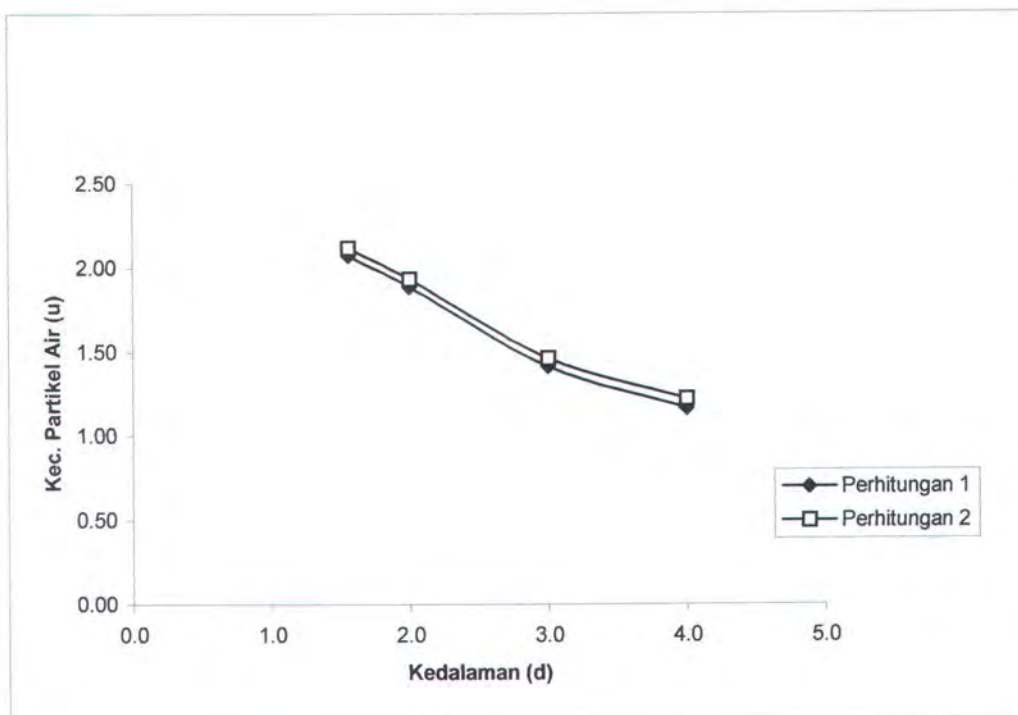
Kedalaman (d) (m)	Ketebalan (t) = 7.62 cm ρ_{concrete}
1.56 - 9	3050.00
10	2711.20
11	2394.86
12 - 36	2250.00

Dikedalaman 1.56 sampai dengan kedalaman 9 meter densitas lapisan beton adalah 3050 kg/m³, namun sebenarnya densitas lapisan beton yang disyaratkan agar memenuhi berat minimal pipa untuk stabil adalah lebih dari 3050 kg/m³. Oleh karena itu pada kedalaman 1.56 sampai dengan 9 meter harus menggunakan sistem pemberat (*anchoring systems*) agar pipa tetap stabil. Pembahasan sistem pemberat ini akan diberikan didepan.

Seluruh perhitungan pada subbab IV.1 menggunakan nilai diameter luar (D) 0.457 m (18 in). Nilai ini diperoleh berdasarkan perhitungan pada subbab IV.1.5. Diakhir perhitungan ketebalan lapisan beton didapatkan nilai ketebalan lapisan beton adalah 7.62 cm (3 in), sehingga diameter luar

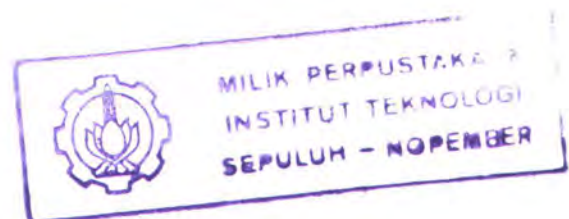
(D) secara keseluruhan adalah diameter pipa baja itu sendiri ditambahkan ketebalan lapisan beton. Maka diameter luar akhir yang diperoleh adalah 0.61 m (24 in).

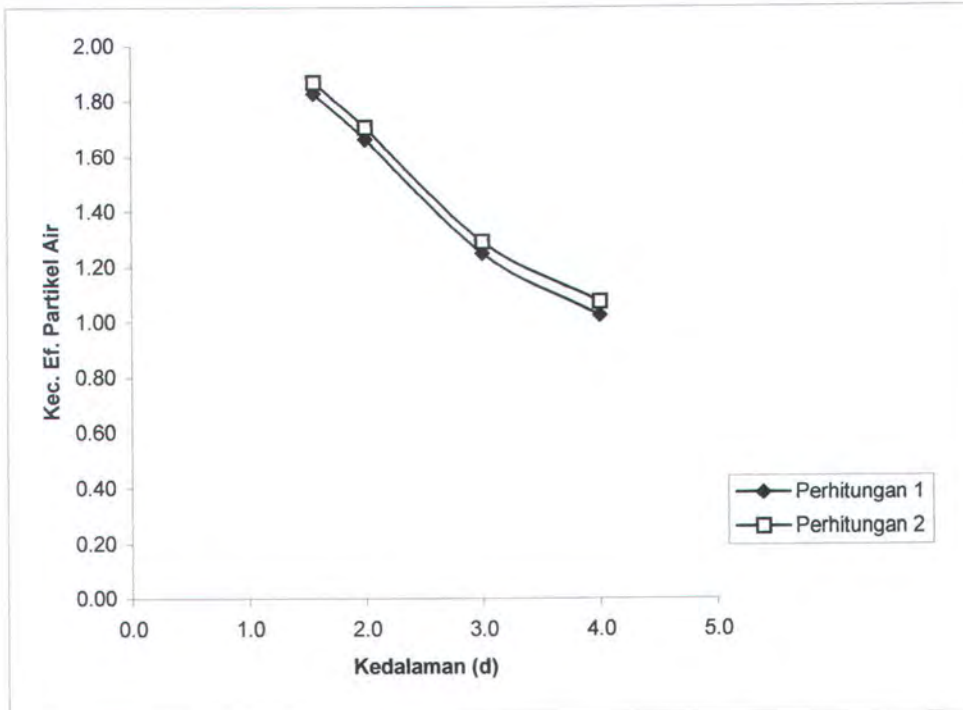
Untuk mendapatkan hasil yang lebih sempurna dan untuk mengurangi kesalahan yang terjadi, maka perhitungan harus dilakukan kembali dengan menggunakan nilai diameter luar 0.61 m (24 in). Perbandingan perhitungan pertama dan perhitungan kedua diberikan dalam bentuk grafik berikut ini.



Gambar IV. 10

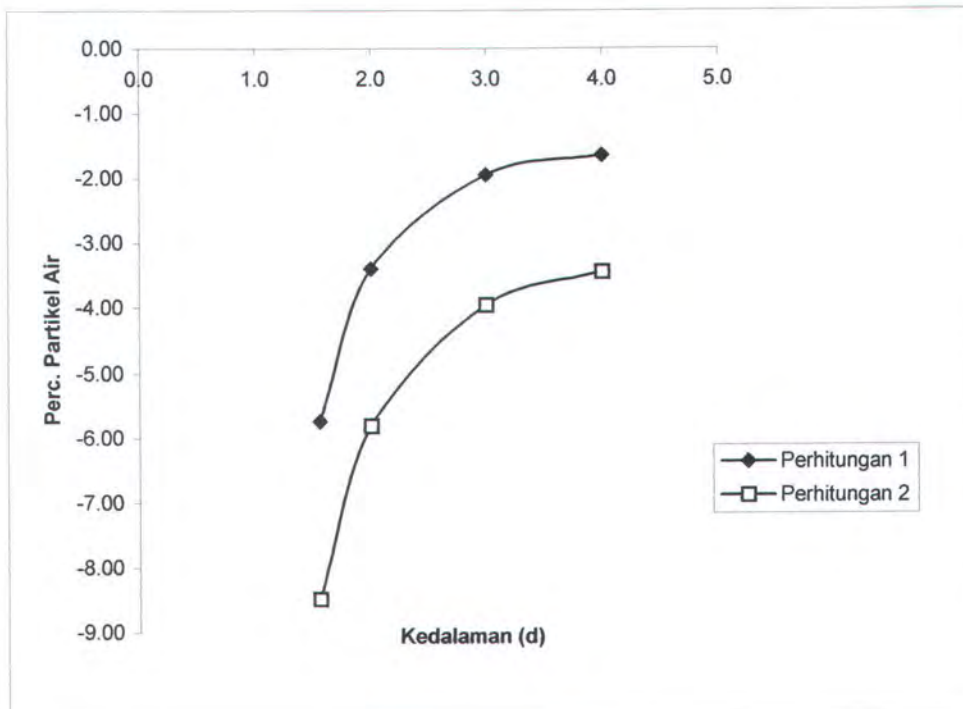
Grafik perbandingan kecepatan partikel air teori gelombang Cnoidal





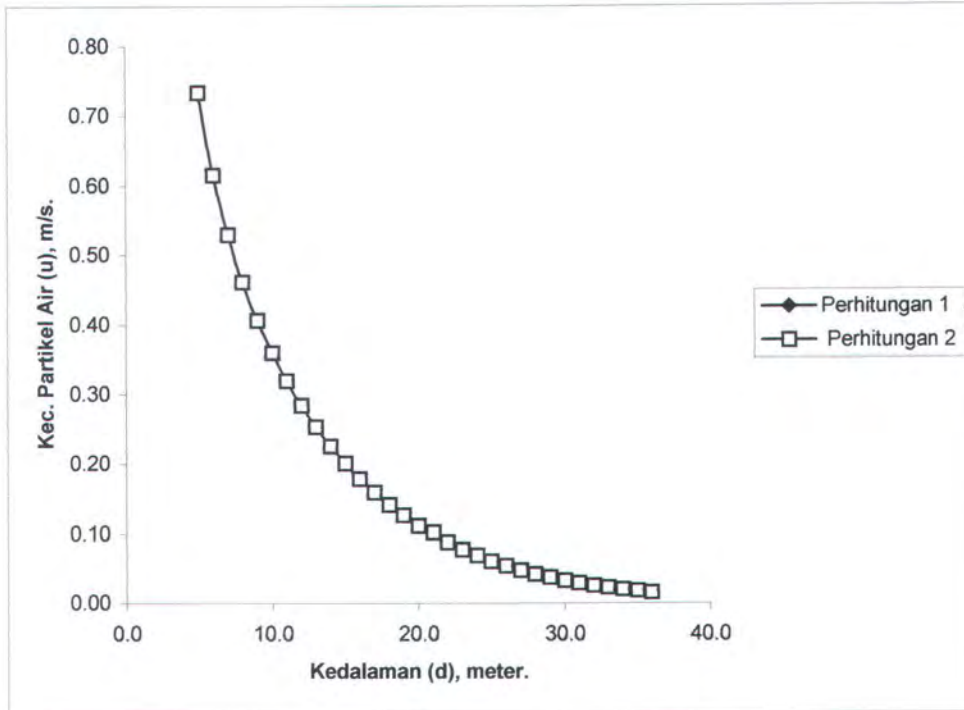
Gambar IV. 11

Grafik perbandingan kecepatan efektif partikel air teori gelombang Cnoidal



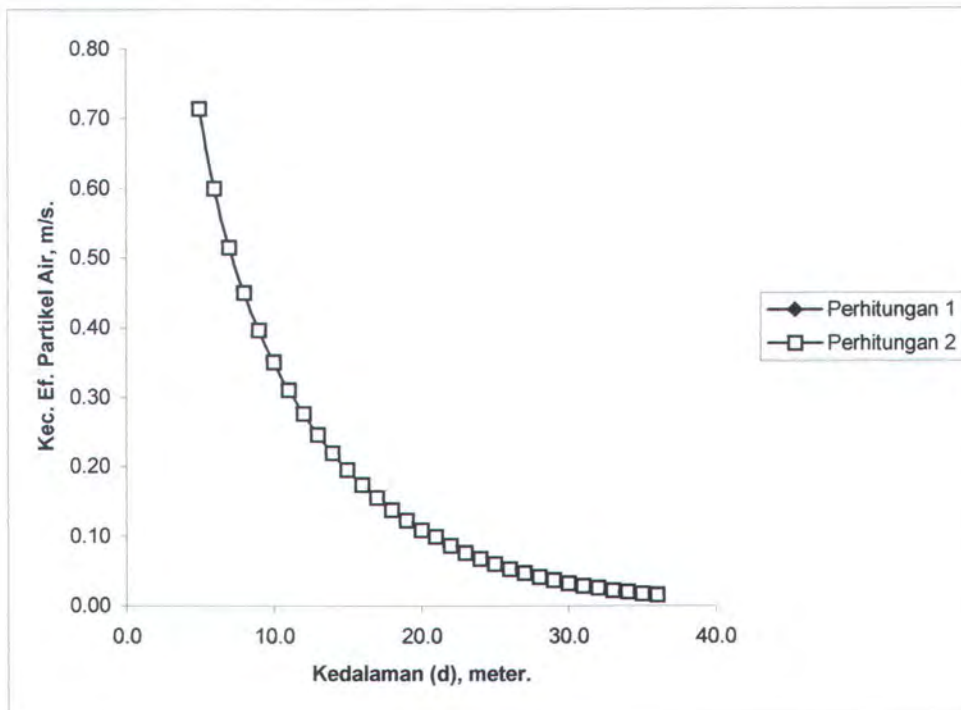
Gambar IV. 12

Grafik perbandingan percepatan partikel air teori gelombang Cnoidal



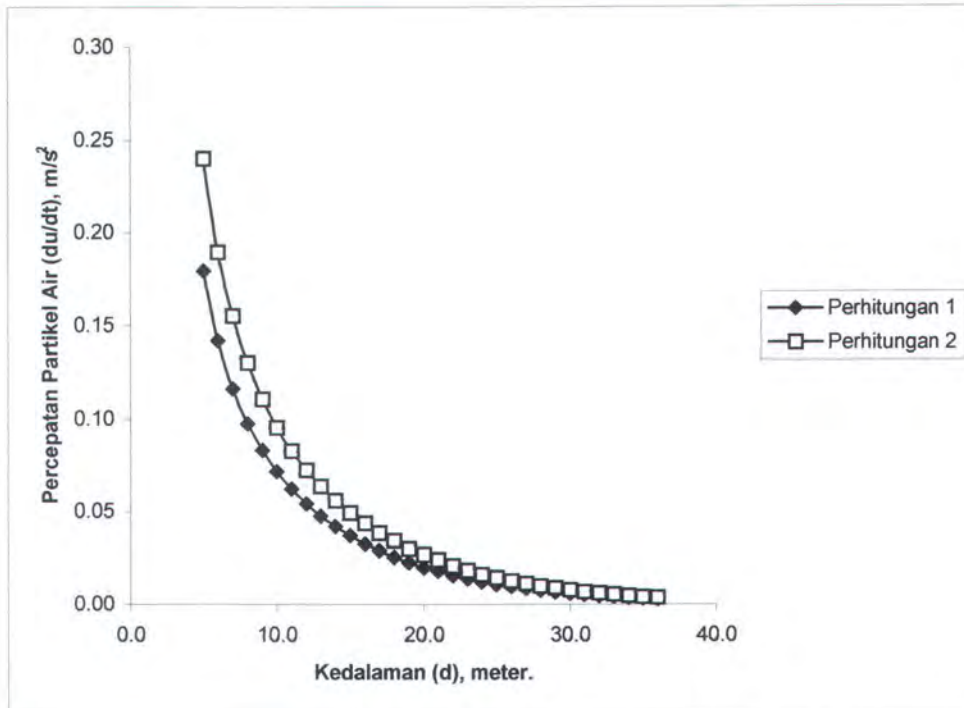
Gambar IV. 13

Grafik perbandingan kecepatan partikel air teori gelombang Stokes Orde 2



Gambar IV. 14

Grafik perbandingan kecepatan efektif partikel air teori gelombang Stokes Orde 2



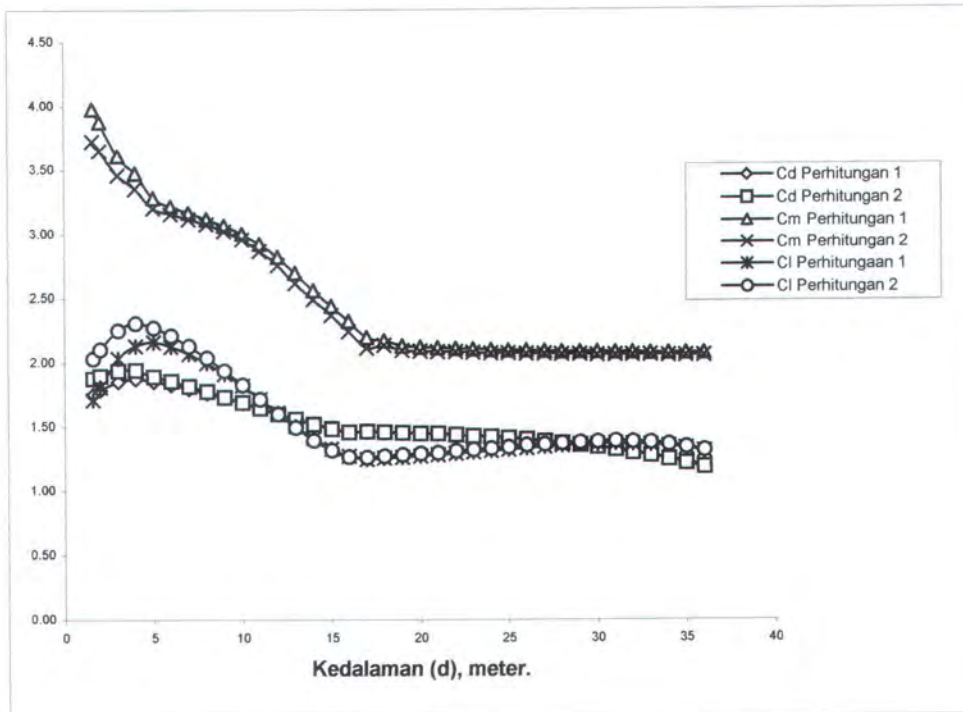
Gambar IV. 15

Grafik perbandingan percepatan efektif partikel air teori gelombang Stokes Orde 2

Dari grafik IV.10 sampai grafik IV.15 dapat dilihat bahwa perbedaan yang besar terjadi pada teori gelombang Cnoidal. Sedangkan untuk teori gelombang Stokes Orde 2 perbedaan yang terjadi tidak terlalu besar, khususnya pada perbandingan kecepatan partikel air.

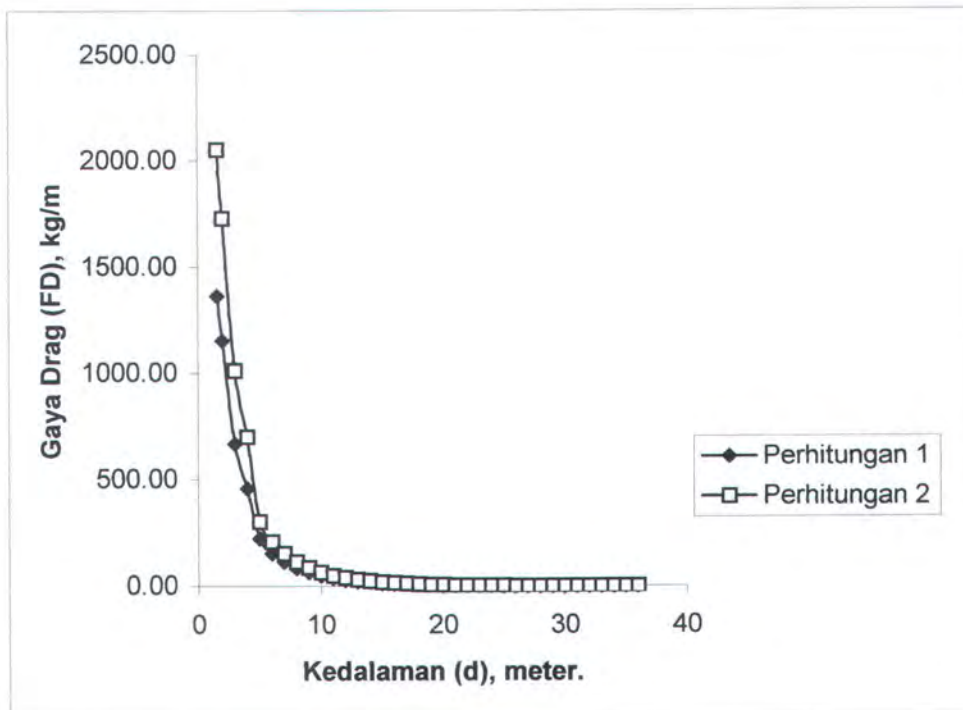
Dari grafik yang diberikan diatas, dapat disimpulkan bahwa kenaikan diameter pipa yang terbaring didasar laut akan menyebabkan kenaikan kecepatan dan percepatan partikel air yang cukup berarti/besar, khususnya terjadi untuk teori gelombang Cnoidal.

Grafik perbandingan perhitungan 1 dan 2 nilai koefisien hidrodinamis, gaya-gaya hidrodinamis serta densitas lapisan beton diberikan berikut ini.



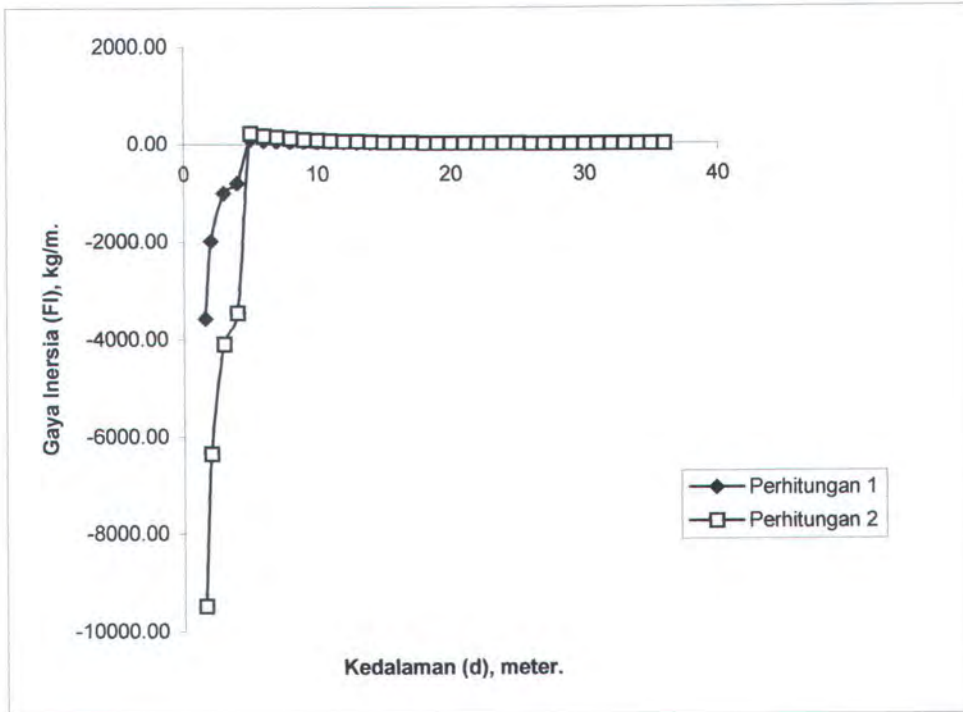
Gambar IV. 16

Grafik perbandingan koefisien hidrodinamis

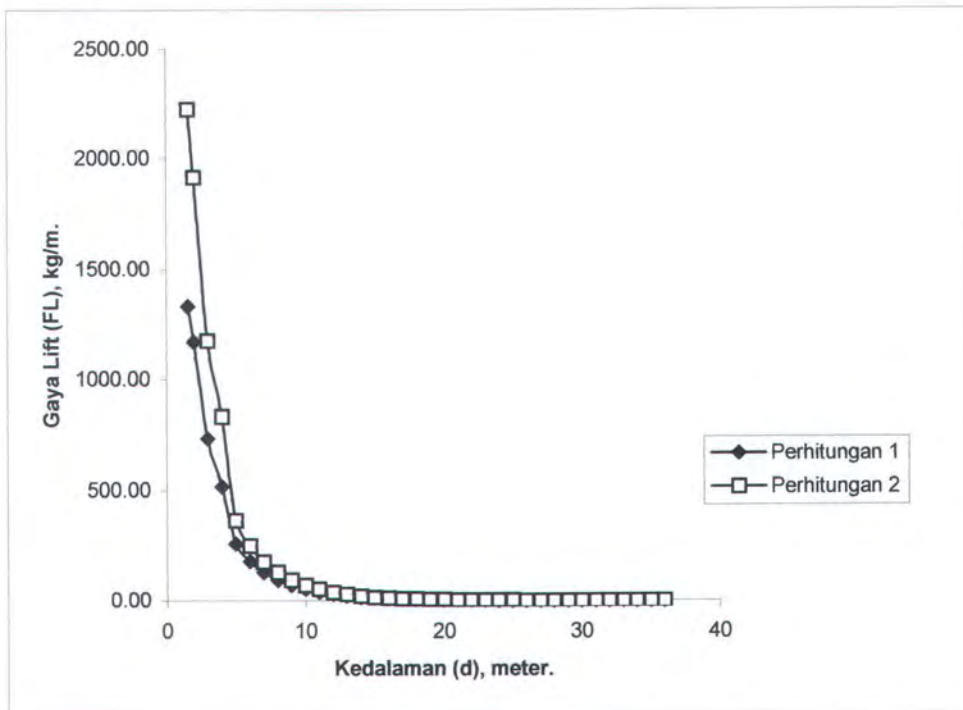


Gambar IV. 17

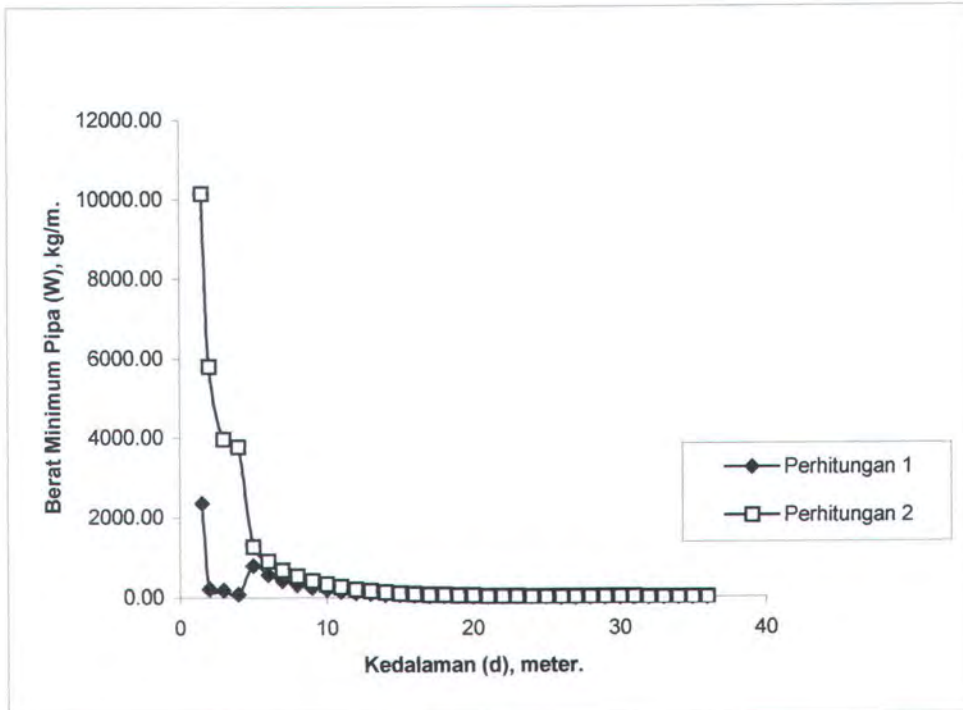
Grafik perbandingan gaya drag



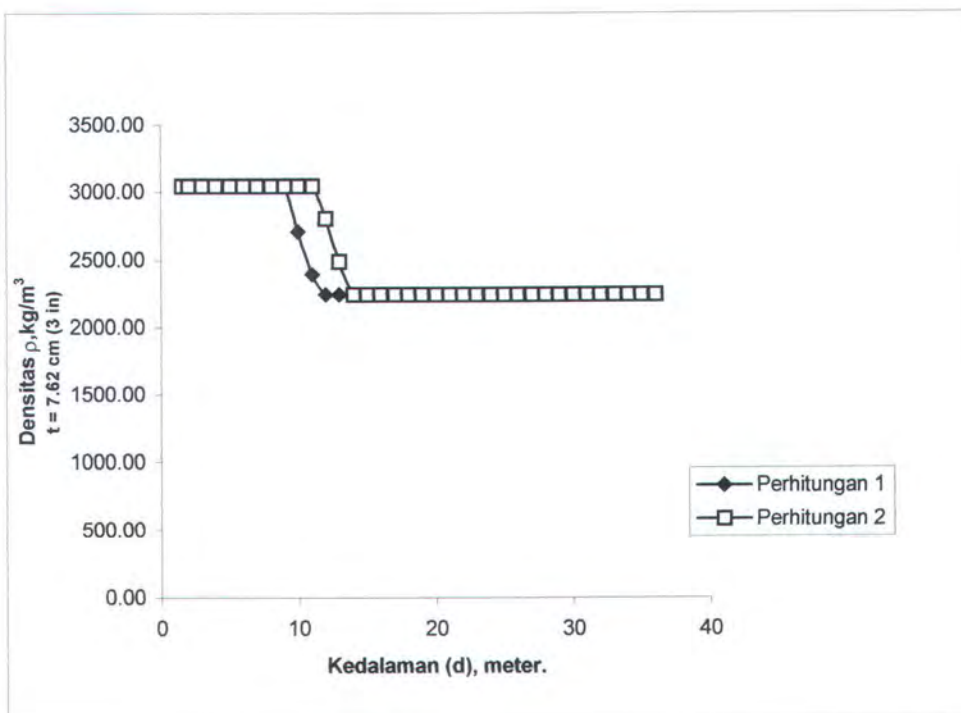
Gambar IV. 18
Grafik perbandingan gaya inersia



Gambar IV. 19
Grafik perbandingan gaya lift



Gambar IV. 20
Grafik perbandingan berat pipa



Gambar IV. 21
Grafik perbandingan densitas

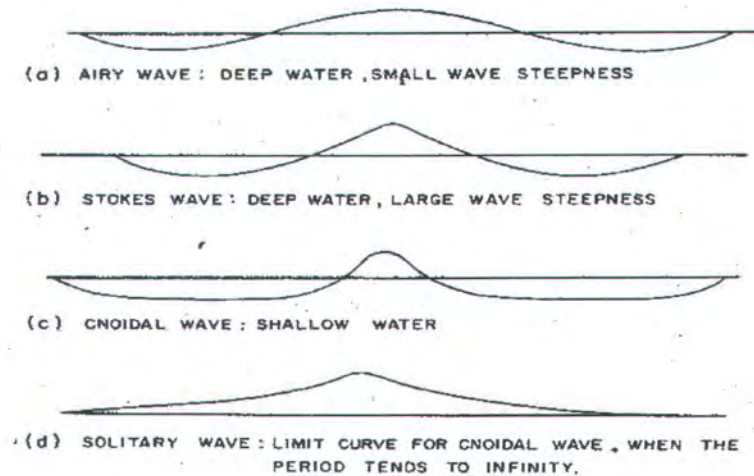
Dari perbandingan kedua perhitungan yang diberikan dalam bentuk grafik diatas, dapat dilihat bahwa perbedaan yang paling besar terjadi pada kedalaman 1.6 sampai 5 meter. Pada kedalaman 1.6 sampai dengan 4 meter berlaku teori gelombang Cnoidal, dan kedalaman 5 meter merupakan daerah peralihan antara gelombang Cnoidal dan Stokes Orde 2. Perbedaan yang berarti ini dapat dengan jelas dilihat pada grafik gaya-gaya hidrodinamika dan berat minimum pipa.

Pipa bawah laut didesain untuk tetap stabil ketika berada didasar laut selama proses konstruksi (pipa dalam keadaan kosong). Pengaruh gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa dengan diameter tertentu lebih besar untuk zona atau daerah yang berada didekat pantai (*near-shore zone*) dari pada zona lepas pantai (*offshore area*). Dengan pengaruh gaya hidrodinamis yang lebih besar ini, akan menyebabkan ketebalan lapisan beton juga akan semakin besar.

Karakteristik gelombang daerah pantai memiliki puncak yang runcing/tajam dan lembah datar. Bentuk fisik bermacam-macam gelombang dapat dilihat pada gambar IV.22.

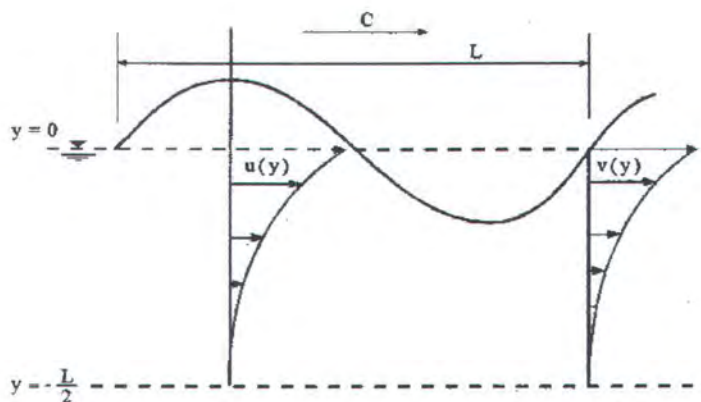
Kedalaman laut akan mempengaruhi besar kecilnya kecepatan dan percepatan partikel air. Untuk laut yang dalam distribusi kecepatan dan percepatan partikel air relatif kecil. Semakin dangkal maka distribusi kecepatan dan percepatan partikel air semakin besar. Sehingga, kecepatan dan percepatan partikel air pada zona pantai lebih besar jika dibandingkan dengan zona yang lebih dalam. Akibatnya gaya-gaya

hidrodinamis yang merupakan fungsi dari kecepatan, percepatan dan diameter luar pipa merupakan gaya-gaya maksimum yang bekerja pada pipa bawah laut. Gambar IV.23 memperlihatkan distribusi kecepatan dan percepatan partikel air untuk kedalaman yang berbeda.



Gambar IV. 22

Bentuk fisik bermacam-macam gelombang.



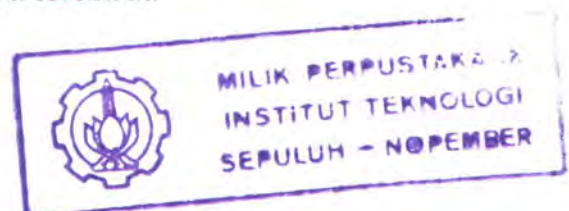
Gambar IV. 23

Distribusi kecepatan dan percepatan partikel air

Penjalaran gelombang merupakan suatu konsep penjalaran energi. Besarnya energi yang berjalan dari titik awal (*offshore*) ke pantai (*near-shore*) adalah tetap. Penjalaran energi pada suatu kedalaman tertentu

akan mempengaruhi dinamika partikel-partikel air. Energi akan menyebabkan partikel-partikel air bergerak dengan kecepatan dan percepatan tertentu. Pada zona laut dalam, dinamika partikel ini relatif kecil yang disebabkan volume fluida yang dipengaruhi oleh energi tersebut relatif besar. Ketika kedalaman semakin berkurang (semakin dangkal) volume fluida yang terpengaruh oleh penjaran energi akan semakin kecil, sehingga dengan energi yang sama pada laut dalam, maka dinamika partikel air akan meningkat, kecepatan dan percepatan partikel akan bertambah. Disamping itu, perubahan kedalaman yang dialami energi akan mempengaruhi karakteristik gelombang terbentuk. Perubahan ini terjadi pada tinggi gelombang (H), amplitudo gelombang (A) serta panjang gelombang (L).

Berdasarkan grafik perbandingan perhitungan 1 dan 2 untuk berat minimum pipa, terjadi perbedaan yang cukup besar. Perbedaan ini terjadi pada kedalaman 1.6 sampai dengan 5 meter. Hal ini dipengaruhi oleh gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja pada struktur pipa pada kedalaman tersebut. Telah dijelaskan diatas bahwa di daerah dekat pantai (*near-shore zone*) pengaruh gaya-gaya hidrodinamis lebih besar jika dibandingkan dengan daerah lepas pantai. Berat minimum pipa yang disyaratkan agar pipa tetap stabil merupakan fungsi dari gaya-gaya hidrodinamis. Kenaikan dan penurunan gaya-gaya yang bekerja pada pipa juga akan mempengaruhi berat minimum pipa tersebut.



Seperti yang telah dijelaskan diatas, penentuan ketebalan dan densitas lapisan beton didasarkan pada beberapa pertimbangan, diantaranya adalah densitas maksimum dan minimum yang tersedia, proses pelapisan beton serta proses instalasi. Setelah dilakukan perhitungan kedua, yaitu dengan menggunakan diameter terluar 0.61 m didapatkan hasil perhitungan ketebalan dan densitas lapisan beton seperti diberikan pada tabel IV.18.

Tabel IV. 18. Harga ketebalan dan densitas lapisan beton

d (m)	ρ_{concrete} (kg/m ³)					
	t = 2.54 (cm)	t = 5.08 (cm)	t = 7.62 (cm)	t = 10.16 (cm)	t = 12.7 (cm)	t = 15.24 (cm)
1.56	262382.71	125232.17	79922.67	57532.13	44281.83	35582.62
2	150720.56	72166.70	46215.40	33391.07	25801.88	20819.35
3	103700.29	49821.15	32021.47	23225.42	18020.08	14602.62
4	98542.86	47370.18	30464.60	22110.40	17166.53	13920.74
5	33903.93	16651.66	10952.15	8135.63	6468.86	5374.58
6	24759.73	12306.05	8191.81	6158.68	4955.51	4165.60
7	18977.09	9557.95	6446.21	4908.49	3998.49	3401.05
8	14999.71	7667.77	5245.57	4048.59	3340.24	2875.19
9	12110.47	6294.71	4373.40	3423.94	2862.07	2493.19
10	9931.94	5259.40	3715.76	2952.95	2501.53	2205.16
11	8245.75	4458.07	3206.76	2588.40	2222.47	1982.22
12	6917.34	3826.77	2805.75	2301.20	2002.62	1806.59
13	5861.50	3325.00	2487.03	2072.93	1827.88	1666.99
14	5040.54	2934.85	2239.21	1895.44	1692.01	1558.45
15	4398.77	2629.86	2045.48	1756.69	1585.80	1473.60
16	3893.24	2389.62	1892.87	1647.40	1502.13	1406.76
17	3498.41	2201.98	1773.69	1562.04	1436.79	1354.56
18	3239.03	2078.71	1695.39	1505.96	1393.86	1320.26
19	2997.47	1963.92	1622.47	1453.74	1353.88	1288.33
20	2808.04	1873.89	1565.29	1412.78	1322.53	1263.28
21	2673.25	1809.84	1524.60	1383.64	1300.23	1245.46
22	2517.24	1735.69	1477.50	1349.91	1274.40	1224.83
23	2405.10	1682.40	1443.65	1325.67	1255.85	1210.01
24	2310.37	1637.38	1415.05	1305.19	1240.17	1197.48
25	2230.12	1599.25	1390.83	1287.84	1226.89	1186.87
26	2161.97	1566.86	1370.26	1273.10	1215.61	1177.86
27	2103.94	1539.28	1352.74	1260.56	1206.00	1170.19
28	2054.39	1515.74	1337.78	1249.84	1197.80	1163.64
29	2012.01	1495.59	1324.99	1240.68	1190.79	1158.03
30	1975.63	1478.31	1314.01	1232.82	1184.77	1153.23
31	1944.36	1463.44	1304.57	1226.06	1179.59	1149.09
32	1917.40	1450.63	1296.43	1220.23	1175.13	1145.53
33	1894.12	1439.57	1289.40	1215.19	1171.28	1142.45
34	1873.97	1430.00	1283.32	1210.84	1167.95	1139.78
35	1856.51	1421.69	1278.05	1207.06	1165.05	1137.48
36	1841.34	1414.49	1273.47	1203.78	1162.54	1135.47

Keterangan :

- D = Kedalaman, m.
 ρ = Densitas Lapisan Beton, kg/m³.
t = Ketebalan lapisan beton, cm.

Berdasarkan pertimbangan dalam penentuan densitas dan ketebalan lapisan beton, maka ketebalan dan densitas lapisan beton yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel IV. 19. Densitas lapisan beton dengan ketebalan 7.62 cm (3 in)

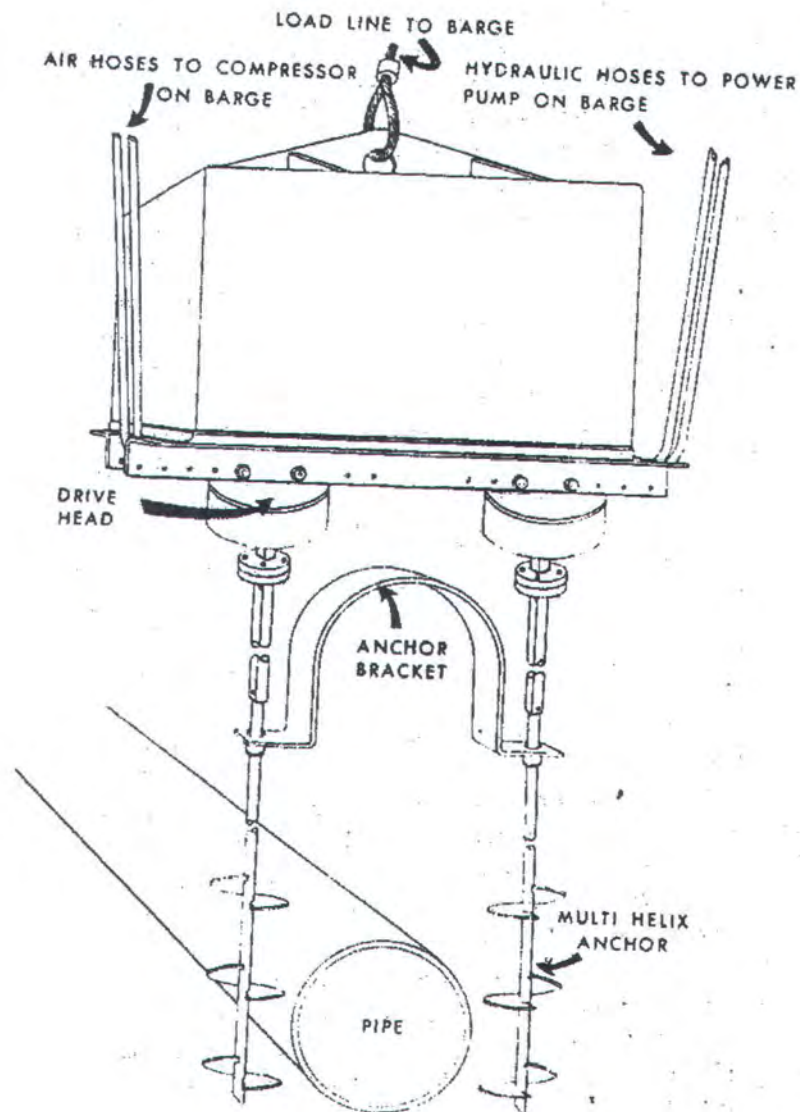
Kedalaman (d) (m)	Ketebalan (t) = 7.62 cm ρ_{concrete}
1.56 - 11	3050.00
12	2805.75
13	2487.03
14 - 36	2250.00

IV.2.3. Sistem Perlindungan (*Protection Methods*)

Pada tabel IV.19 dapat dilihat bahwa untuk ketebalan 7.62 cm (3 in) pada kedalaman 1.56 sampai dengan 11 meter, densitas lapisan beton adalah 3050 kg/m. Namun dalam hasil perhitungan yang sebenarnya densitas yang harus diberikan agar memenuhi syarat berat minimum pipa adalah lebih dari 3050 kg/m (Lihat tabel IV.18). Oleh karena itu, maka pada kedalaman 1.56 sampai dengan 11 meter, pipa harus diberikan sistem stabilitas agar pipa tidak bergerak/bergeser dari posisi semula. Sistem penyetabil ini dikenal dengan *anchoring*.

Stabilisasi pipa bawah laut dengan sistem *anchoring* merupakan suatu konsep yang baru. Sistem *anchoring* pada pipa bawah laut dapat mengurangi kebutuhan ketebalan dan densitas lapisan beton. Sistem *anchoring* terdiri atas beberapa batang panjang dimana pada ujungnya terhubung ke suatu sambungan yang terikat pada pipa (Gambar IV.24).

Ancor pipa bawah laut diletakkan pada posisinya secara manual yang sering dikerjakan oleh penyelam, sedangkan untuk pengencangan ikatan *anchor* dengan dasar laut digunakan perlengkapan instalasi sistem hidraulik. Sebelum pelaksanaan *anchoring* dilakukan terlebih dulu harus dilakukan survey dasar laut untuk memperkirakan kedalaman yang dibutuhkan.



Gambar IV. 24

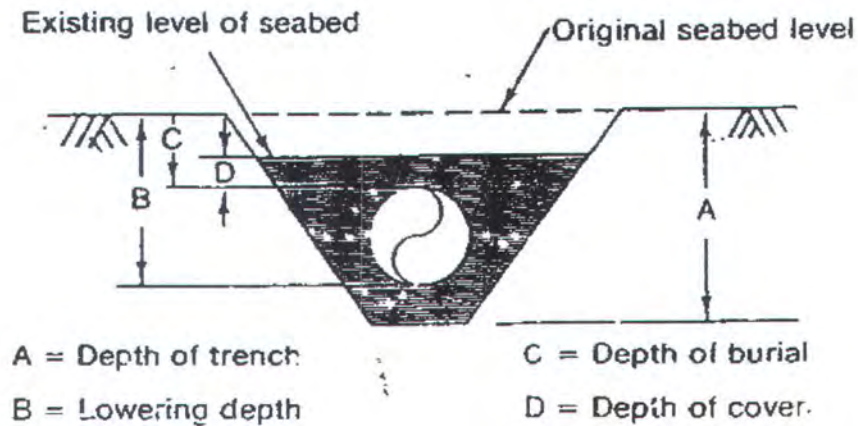
Sistem *anchoring* pipa bawah laut (Herbich, 1981).

Kemampuan menahan *anchor* tergantung dari berat *anchor* itu sendiri, luasan sauh (*fluke area*), kedalaman sauh terbenam (*depth of fluke embedment*) dan kondisi dasar lautnya. *Anchor* harus cukup ringan agar bisa dibawa oleh penyelam pada saat instalasi dibawah air. Perencanaan sistem *anchoring* tergantung pada beberapa hal, diantaranya pasang-surut, arus, badai, ketebalan pipa, diameter, kondisi tanah, *negative buoyancy*, permukaan dasar laut serta kondisi *scouring*.

Sistem *anchoring* dapat digunakan pada daerah perairan yang memiliki aktivitas pelayaran yang sepi. Namun untuk daerah perairan yang memiliki aktivitas pelayaran yang ramai, dapat digunakan metode-metode lainnya seperti *burial/trenching*, *rock cover*, *protective mattres* dan lain sebagainya.

Burial (Trenching)

Metode perlindungan pipa dengan sistem ini adalah memendam/mengubur pipa didasar laut pada kedalaman tertentu (Gambar IV.25). Metode ini dapat menghindari kerusakan pada pipa dari bahaya benturan dengan kapal, jangkar kapal, kapal pukat, arus dasar dan lain sebagainya. Namun, metode ini membutuhkan biaya yang cukup besar dalam proses operasinya, biaya *barge* hampir sama dengan biaya *lay-barge* konvensional dan resiko kerusakan pada pipa selama operasi penguburan juga cukup tinggi.



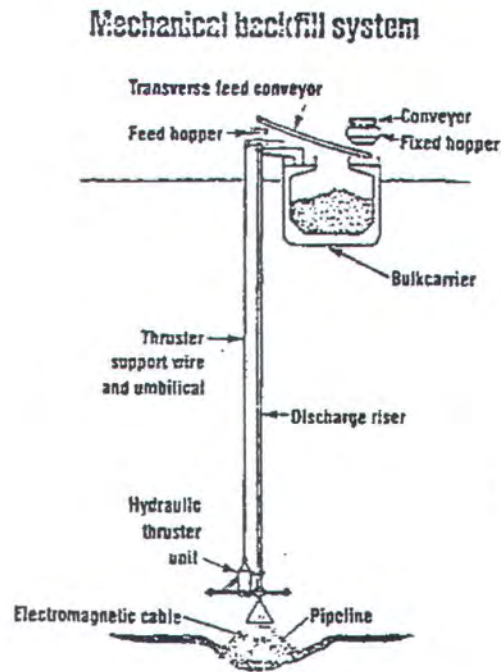
Gambar IV. 25

Burial/trenching pada pipa (Mouesselli, 1981).

Dalam banyak kasus, pipa bawah laut hanya diletakkan di parit yang telah dibuat, dengan harapan nantinya pipa dapat terbenam secara alami. Kedalaman pemendaman tergantung pada beberapa hal, yaitu gelombang, ukuran sediment dan arus. Pada tahapan pemendaman, terdapat beberapa metode atau cara yang dapat digunakan, diantaranya metode *backfill system*, *jetting method* dan *fluidization method*. Metode *backfill* mengubur pipa dengan tanah/pasir melalui *discharge riser* yang dihubungkan dengan kapal (*bulkcarrier*). Metode ini dapat dilihat pada gambar berikut ini.

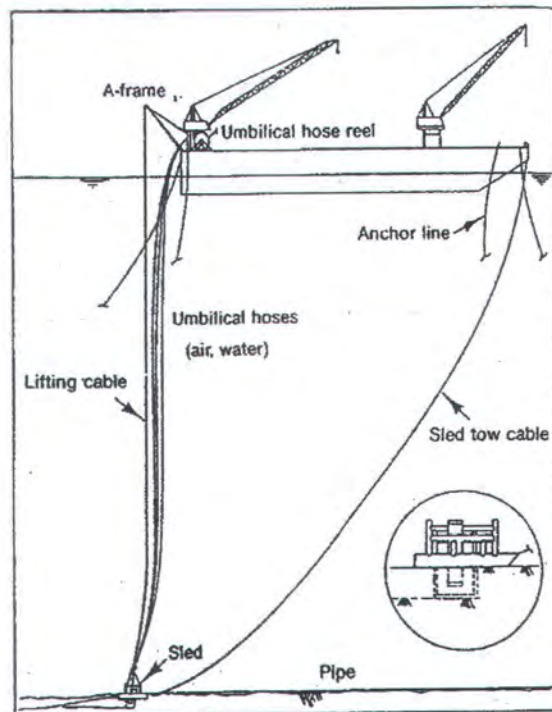
Metode *jetting* merupakan metode yang sering digunakan dalam operasi *burial/trenching*. Ilustrasi metode ini dapat dilihat pada gambar IV.27.

Metode *fluidization* cocok diterapkan jika kondisi tanah dasar merupakan tanah yang tidak kohesif. Metode ini efektif untuk tanah *silty-clay* ataupun pasir. Ilustrasi metode ini dapat dilihat pada gambar IV.28.



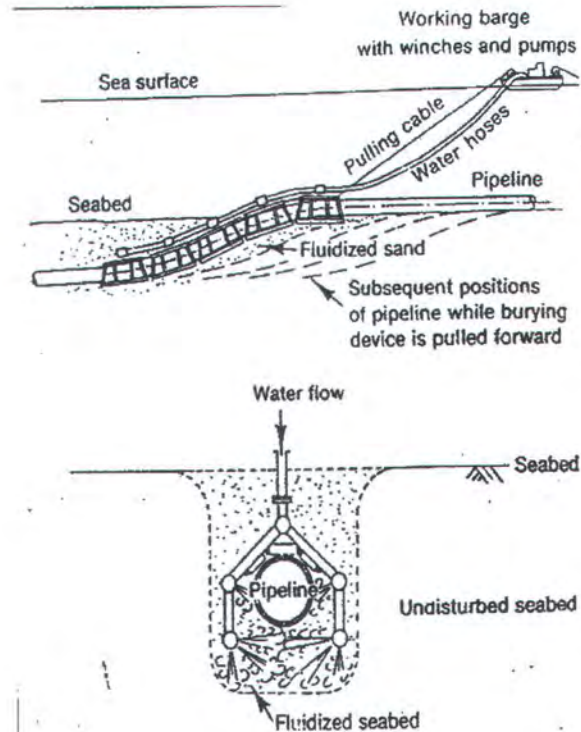
Gambar IV. 26

Metode *backfill* untuk pemendaman pipa (Mouesselli, 1981).



Gambar IV. 27

Metode *jetting* untuk pemendaman pipa (Mouesselli, 1981).

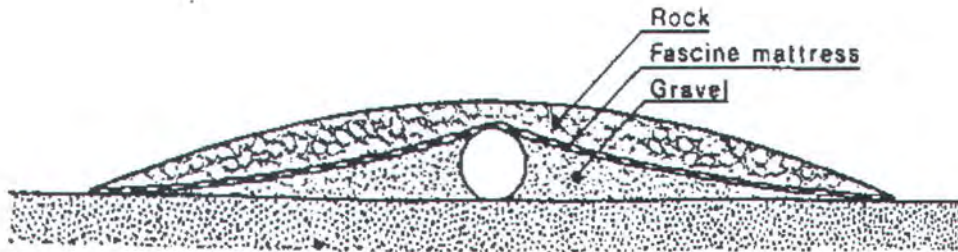


Gambar IV. 28

Metode *fluidization* untuk pemendam pipa (Mouesselli, 1981).

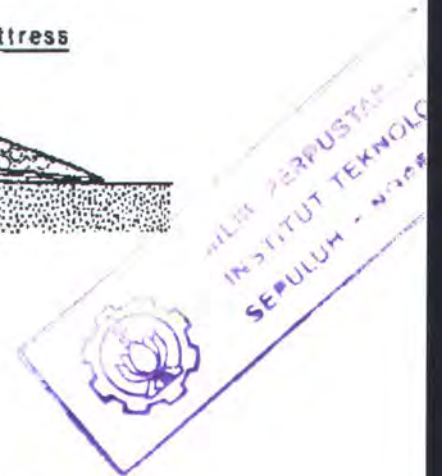
Rock Cover

Rock cover digunakan pada daerah yang memiliki aktivitas pelayaran yang tinggi dengan kondisi lingkungan yang cukup ekstrim. Pipa di pendam dengan kedalaman yang rendah dan kemudian ditutup dengan *rock cover* untuk melindungi dari bahaya jangkar, gelombang dan arus. Pada daerah yang memiliki aktivitas *scouring* yang tinggi, seperti pada daerah gelombang pecah (*surf zone*) metode ini cocok untuk digunakan. Gambar berikut memperlihatkan metode *rock cover*.



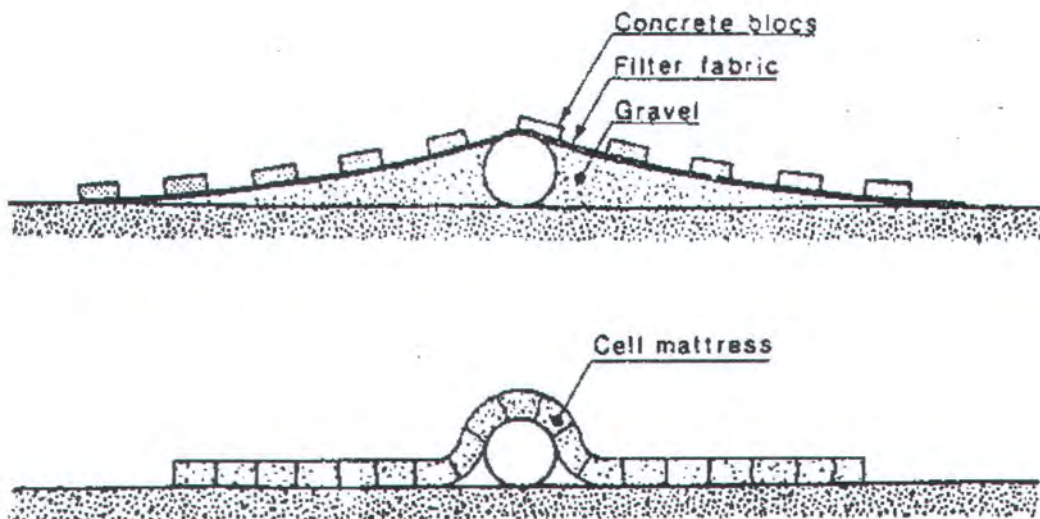
Gambar IV. 29

Metode rock cover (Herbich, 1981).



☑ **Protective Mattress**

Prinsip metode ini hampir sama dengan metode *rock cover*. Namun pipa sebelumnya tidak dipendam dalam parit. Pipa hanya diletakkan pada dasar laut dan kemudian ditutupi oleh *mattress*. Terdapat beberapa jenis *mattress* yang digunakan, yaitu *fascine*, *colcrete*, *stine-asphalt*, *ballast*, *block* dan *cell mattress*. Gambar berikut ini memperlihatkan metode *protective mattress*.



Gambar IV. 30

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

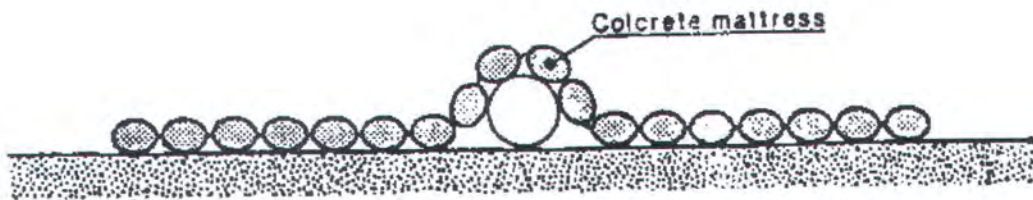


Figure 4-17. "Colcrete" mattress.

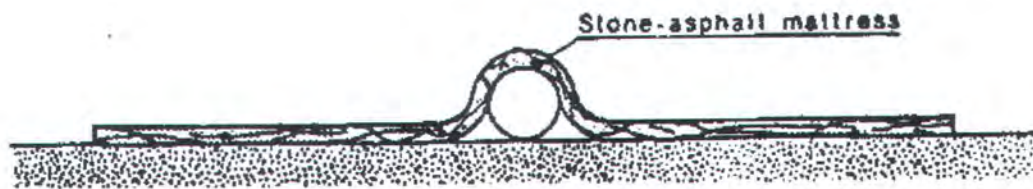


Figure 4-18. Stone-asphalt mattress.

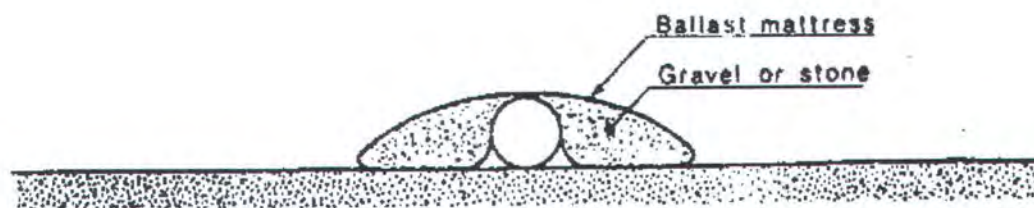


Figure 4-19. Ballast mattress.



Gambar IV. 31

Metode protective mattress colcrete, stone asphalt, ballast dan finer rock (Herbich, 1981).

IV.2.4. Lokal *Buckling*

Dari hasil perhitungan analisa *local buckling* pada subbab IV.1.7 didapatkan bahwa pipa bawah laut tidak mengalami lokal *buckling* yang diakibatkan oleh pengaruh lendutan murni, tekanan murni maupun kombinasi lendutan dan tekanan murni. Dengan tidak terjadinya lokal *buckling* maka penjarangan *buckling* tidak akan terjadi, karena penjarangan *buckling* terjadi didahului dengan terjadinya lokal *buckling*.

IV.2.5. Global *Buckling*

Dari hasil perhitungan analisa *global buckling* pada subbab IV.1.7 didapatkan bahwa pipa tidak mengalami kejadian *global buckling* yaitu *snaking*, *uplift/upheaval* ataupun *downward*. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya aksial desain (F_d) lebih kecil dari gaya aksial kritis (F_c), sehingga memenuhi persamaan/syarat batas yang diberikan,

$$\text{yaitu } F_d \leq \frac{F_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)}$$

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

BAB V

PENUTUP

V.I. KESIMPULAN

Dari hasil analisa dan pembahasan pada Bab IV, maka selanjutnya dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Spesifikasi pipa bawah laut (*subsea pipeline*) yang digunakan oleh Mobil Cepu Ltd. Di Perairan Tuban, Jawa Timur adalah sebagai berikut:

- Spesifikasi : API 5LX X52
Specified Minimum Yield Strength 52000 psi.
- Diameter Luar : 0.457 m (18 in)
- Ketebalan : 0.0125 m (0.5 in)

2. Ketebalan dan densitas pipa bawah laut (*subsea pipeline*) yang digunakan oleh Mobil Cepu Ltd. Di Perairan Tuban, Jawa Timur adalah bervariasi berdasarkan kedalaman dimana pipa tersebut berada. Seluruh bagian pipa memiliki ketebalan lapisan beton (*concrete coating*) 7.62 cm (3 in). Densitas lapisan beton (*concrete coating*) pada tiap kedalaman adalah :

- Kedalaman 0 sampai dengan 11 meter, ketebalan lapisan beton 7.62 cm (3 in) dengan densitas lapisan beton 3050 kg/m.
- Kedalaman 12 meter, ketebalan lapisan beton 7.62 cm (3 in) dengan densitas lapisan beton 2806 kg/m

- Kedalaman 13 meter, ketebalan lapisan beton 7.62 cm (3 in) dengan densitas lapisan beton 2487 kg/m.
- Kedalaman 14 sampai dengan 36 meter, ketebalan lapisan beton 7.62 cm (3 in) dengan densitas lapisan beton 2250 kg/m.

Dalam tabel diberikan berikut ini.

Kedalaman (d) (m)	Ketebalan (t) = 7.62 cm ρ_{concrete}
0 - 11	3050.00
12	2806
13	2487
14 - 36	2250.00

Pada kedalaman 0 sampai dengan 11 meter, pipa harus diberikan sistem proteksi (*protection methods*) yang bertujuan untuk melindungi pipa dari kerusakan dan ketidakstabilan. Perairan Tuban merupakan perairan dengan aktivitas pelayaran yang cukup tinggi, maka sistem perlindungan yang disesuaikan adalah dengan metode pemendaman (*trenching/burial method*).

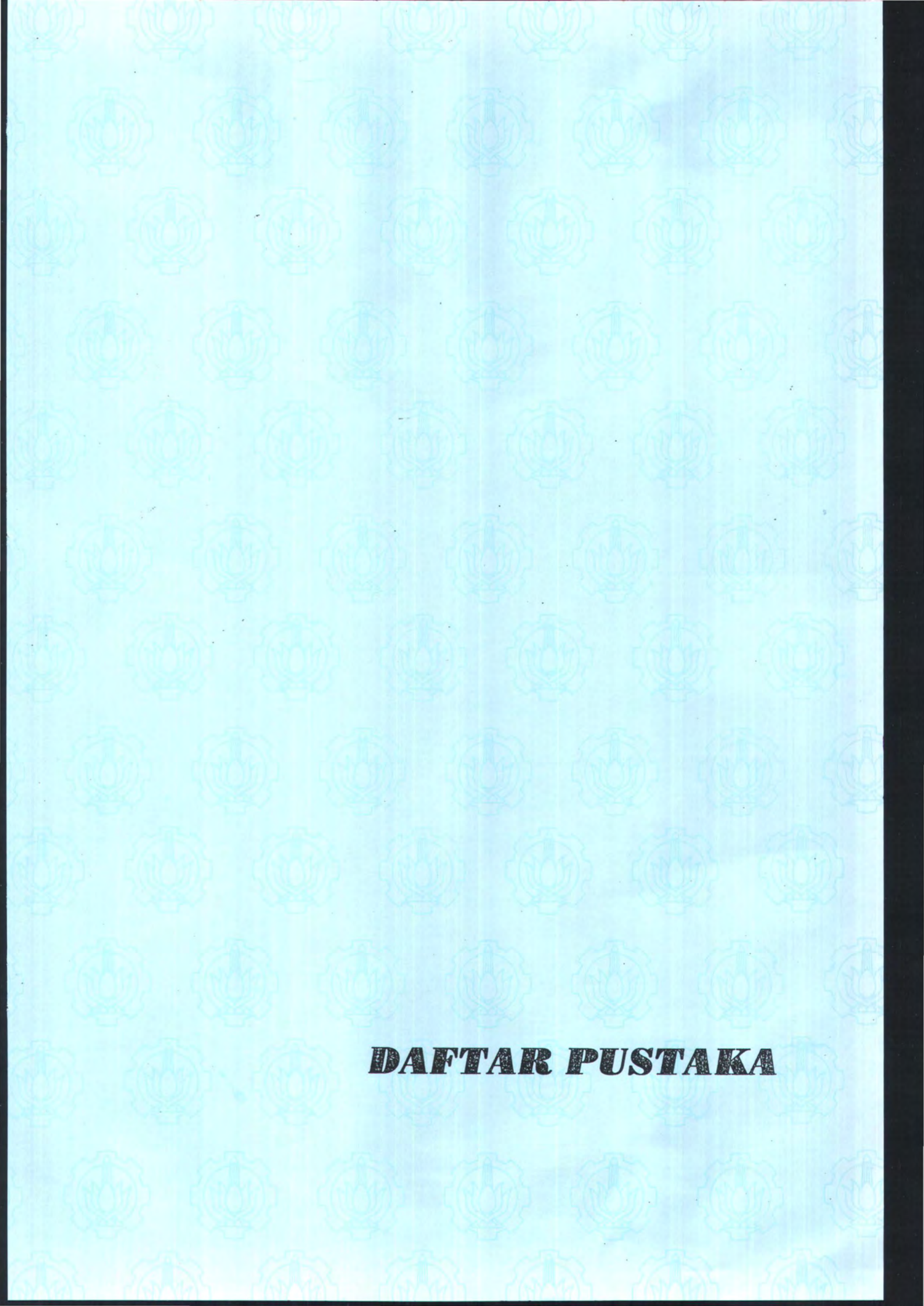
3. Pipa bawah laut (*subsea pipeline*) Mobil Cepu Ltd. di perairan Tuban Jawa Timur tidak mengalami kejadian *buckling*, baik itu lokal *buckling* yang disebabkan oleh lendutan murni, *bending* murni maupun kombinasi keduanya serta dari global *buckling* yang diakibatkan oleh gaya aksial pada struktur pipa.
4. Struktur pipa bawah laut (*subsea pipeline*) Mobil Cepu Ltd. di perairan Tuban Jawa Timur tidak mengalami kegagalan (*failed*) akibat

pembebanan yang bekerja pada struktur pipa bawah laut. Jarak tumpuan (*span*) maksimum yang mampu menopang struktur pipa bawah laut adalah 8 meter.

V.2. SARAN

Dimuka telah dijelaskan bahwa pada kedalaman 1.56 sampai dengan kedalaman 11 meter, pipa bawah laut harus diberikan sistem proteksi (*protection methods*) untuk menghindari kerusakan dan ketidakstabilan pipa tersebut. Terdapat beberapa metode/sistem proteksi yang dapat digunakan, masing-masing sistem/metode memiliki kelebihan dan keterbatasan. Dalam Tugas Akhir ini, penulis merekomendasikan (secara global) sistem proteksi yang digunakan adalah Metode *Trenching/Burial*. Metode ini sesuai untuk daerah dengan aktivitas pelayaran yang tinggi, dalam hal ini daerah perairan Tuban merupakan daerah dengan aktivitas pelayaran yang cukup tinggi.

Penyusun mengharapkan adanya studi dan penelitian yang lebih jauh berkenaan dengan sistem/metode proteksi yang akan digunakan pada pipa bawah laut Mobil Cepu Ltd. Banyak aspek yang harus dipertimbangkan dalam penentuan metode yang dipilih, seperti lingkungan, sosial serta dari segi tekno-ekonominya.

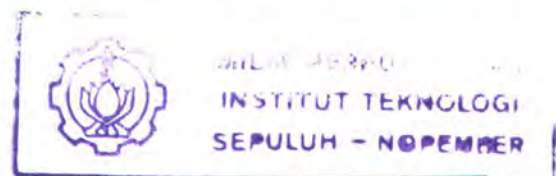


DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- Arnold, K. 1998. **Surface Production Operations**. Gulf Publishing Company. Houston.
- Chakrabarti, S.K. 1987. **Hydrodynamics of Offshore Structure**. Computational Mechanics Publication. London
- Das, Braja M. 1985. **Principle of Geotechnology Engineering**. PWS Engineering. Boston.
- Dawson, T.H. 1983. **Offshore Structural Engineering**. Prentice-Hall, Inc. New Jersey.
- 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.
- Le Mehaute, B. 1976. **An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves**. Springer-Verlag. New York.

- Ma'ruf, Fahrudin. 2001. **Pengembangan Piranti Lunak Perhitungan Stabilitas Pipa Bawah Laut**. Jurusan Teknik Kelautan – FTK – ITS. Surabaya.
- McAllister, E.W. 1998. **Pipe Line Rules of Thumb**. Gulf Publishing Company. Houston-Texas.
- Mousselli, AH. 1981. **Offshore Pipelines Design, Analysis and Methods**. PennWellBooks. Oklahoma.
- Nerlan. 1999. **Analisa Lapisan Beton Pipa Bawah Laut Dilokasi Jaringan Transmisi Pipa Gas Jawa Timur**. Jurusan Teknik Kelautan – FTK – ITS. Surabaya.
- Popov, E.P. 1996. **Mekanika Teknik**. Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Sarpkaya, T. 1981. **Mechanics of Forces on Offshore Structures**. Litton Educational publishing, Inc. USA.
- Sutarno. 1995. **Studi Perbandingan Perhitungan Tebal Concrete Coating Trans Java Gas Pipeline Zone I dengan Analisis FEM dan Peraturan Standar**. Jurusan Teknik Kelautan – FTK – ITS. Surabaya.
- William Natural Gas Company. 1996. **Pipe Characteristic Handbook**. PennWellBook. Oklahoma.
- Ziu, C. 1995. **Handbook of Double Containment Piping Systems**. McGraw Hill. New York.





LAMPIRAN

LAMPIRAN 1

Perhitungan-perhitungan

PERHITUNGAN DIAMETER DALAM PIPA

Perhitungan diameter dalam pipa tergantung dari volume dan laju aliran fluida (Ziu, 1995). Untuk fluida yang bersih (*clear fluid*) kecepatan alir maksimum fluida dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1), sedangkan untuk fluida yang korosif ataupun erosi digunakan persamaan (2) (Ziu, 1995).

$$v = \frac{48}{(\rho)^{1/3}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$v = \frac{24}{(\rho)^{1/3}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Arnold (1998) menjelaskan bahwa hubungan antara API gravity dengan *Specific Gravity* adalah sebagai berikut :

$$^{\circ} API = \frac{141.5}{S.G.} - 131.5 \quad \dots\dots\dots (3)$$

Dan *Specific Gravity* dirumuskan sebagai berikut, (Arnold, 1998) :

$$S.G. = \frac{\rho_L}{\rho_w} \quad \dots\dots\dots (4)$$

Sedangkan *Inside Diameter (d)* dirumuskan oleh persamaan berikut :

$$v = 0.012 \frac{Q_L}{d^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan :

- v = Kecepatan fluida, m/s
- ρ_L = Densitas cairan/fluida, lb/ft³
- ρ_w = Densitas air tawar, lb/ft³
- Q_L = Laju aliran fluida, bpd

Perhitungan

Data : $^{\circ}API =$ 32
 $Q_L =$ 150 kbd

1. Densitas fluida (ρ_L)

Substitusi persamaan (3) dan (4), menghasilkan persamaan berikut,

$$\rho_L = \left[\frac{141.5}{(API + 131.5)} \right] \times \rho_w$$

$$\rho_w = 62.43 \text{ lb/ft}^3$$

$$\rho_L = 54.03 \text{ lb/ft}^3$$

2. Kecepatan Fluida (v)

Fluida adalah termasuk kedalam fluida korosif (mengandung H_2S), sehingga perhitungan kecepatan menggunakan persamaan (2).

$$v = \frac{24}{(\rho)^{1/3}}$$

$$v = 6.35 \text{ ft/s}$$

3. Diameter dalam pipa (d)

$$d^2 = 0.012 \frac{Q_L}{v}$$

$$\begin{aligned} d &= 16.84 \text{ inch} \\ &= 0.43 \text{ meter} \end{aligned}$$

Dari *Table of Pipe* (dalam *Pipeline Rules and Thumb Handbook*) nilai inside diameter yang mendekati adalah 17 in dengan diameter luar 18.0 in.

Resume :

D =	0.457 meter	Diameter Luar
Di =	0.432 meter	Diameter Dalam
th =	0.0125 meter	Ketebalan

Perhitungan Tebal Lapisan Concrete Coating

Langkah-langkah dalam perhitungan *Concrete Coating* :

- 1 Menentukan Teori Gelombang
- 2 Menghitung komponen kecepatan partikel air.
- 3 Menghitung gaya-gaya hidrodinamis.
- 4 Menghitung berat pipa.
- 5 Menghitung tebal Concrete Coating.

I. Penentuan Teori Gelombang

Dalam penentuan teori gelombang, tinjauan dilakukan pada tiap meter kedalaman. Grafik 1. Menunjukkan distribusi kedalaman dengan panjang pipa.

d = Kedalaman, m.	$H_s = 1.22$ m
x = Ordinat Pipa, m.	$T_s = 5.73$ sekon
s = Panjang Pipa, m.	$g = 9.81$ m/s ²

d m	x m	s m	H_s m	d/gT_s^2	H_s/gT_s^2	Teori Gel.
1.6	250	250	1.220	0.005	0.004	Cnoidal
2	500	250	1.220	0.006	0.004	Cnoidal
3	750	250	1.220	0.009	0.004	Cnoidal
4	1000	250	1.220	0.012	0.004	Cnoidal
5	1300	300	1.220	0.016	0.004	Stokes # 2
6	1660	360	1.220	0.019	0.004	Stokes # 2
7	2100	440	1.220	0.022	0.004	Stokes # 2
8	2700	600	1.220	0.025	0.004	Stokes # 2
9	3560	860	1.220	0.028	0.004	Stokes # 2
10	4700	1140	1.220	0.031	0.004	Stokes # 2
11	5500	800	1.220	0.034	0.004	Stokes # 2
12	6400	900	1.220	0.037	0.004	Stokes # 2
13	7400	1000	1.220	0.040	0.004	Stokes # 2
14	8450	1050	1.220	0.043	0.004	Stokes # 2
15	9400	950	1.220	0.047	0.004	Stokes # 2
16	10300	900	1.220	0.050	0.004	Stokes # 2
17	11070	770	1.220	0.053	0.004	Stokes # 2
18	11700	630	1.220	0.056	0.004	Stokes # 2
19	12280	580	1.220	0.059	0.004	Stokes # 2
20	12900	620	1.220	0.062	0.004	Stokes # 2
21	13700	800	1.220	0.065	0.004	Stokes # 2
22	15600	1900	1.220	0.068	0.004	Stokes # 2
23	16700	1100	1.220	0.071	0.004	Stokes # 2
24	17200	500	1.220	0.075	0.004	Stokes # 2
25	17860	660	1.220	0.078	0.004	Stokes # 2
26	18400	540	1.220	0.081	0.004	Stokes # 2
27	18860	460	1.220	0.084	0.004	Stokes # 2
28	19350	490	1.220	0.087	0.004	Stokes # 2
29	19800	450	1.220	0.090	0.004	Stokes # 2
30	20300	500	1.220	0.093	0.004	Stokes # 2
31	20800	500	1.220	0.096	0.004	Stokes # 2
32	21200	400	1.220	0.099	0.004	Stokes # 2
33	21660	460	1.220	0.102	0.004	Stokes # 2
34	22100	440	1.220	0.106	0.004	Stokes # 2
35	22560	460	1.220	0.109	0.004	Stokes # 2
36	23000	440	1.220	0.112	0.004	Stokes # 2
Σ		23000				

PERHITUNGAN KECEPATAN DAN PERCEPATAN PARTIKEL AIR
UNTUK TEORI GELOMBANG CNOIDAL

Kecepatan partikel air searah horisontal :

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

Kecepatan partikel air searah vertikal :

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

Percepatan partikel air searah horisontal :

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

Percepatan partikel air searah vertikal :

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

Kecepatan efektif partikel air :

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



Keterangan :

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

$$\kappa'^2 = 1 - \kappa^2$$

$$h_1 = \frac{(\gamma - \kappa'^2)}{\kappa^2}$$

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

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

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

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

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

- Nilai κ'^2 didapatkan berdasarkan gambar 4.9 (Sarpkaya, 1981) sebagai fungsi dari HgT^2/d^2 dan H/d .
- Setelah nilai κ'^2 didapat, gambar 4.7 (Sarpkaya, 1981) digunakan untuk menghitung nilai K , γ dan U .
- $cn^2 q$ dan $cnqdnqsnq$ ditentukan berdasarkan gambar 4.8 (Sarpkaya, 1981) sebagai fungsi dari sudut fase (θ).
Laitone (1961) dalam Sarpkaya (1981) mengatakan bahwa untuk aplikasi keteknikan, nilai t dan x diambil nol (0), sehingga $\theta = kx - \omega t = 0$.

Perhitungan :

Hasil pembacaan nilai parameter dari Gambar 4.7 - 4.9.

H =	1.22	m
T =	5.73	sekon
g =	9.81	m/s ²
D =	0.61	m

d (m)	HgT^2/d^2	H/d	$1 - \kappa^2$	κ^2	K	γ	U
1.6	161.47	0.78	0.0028	0.9972	4.31	0.23	100
2	98.24	0.61	0.0051	0.9949	4	0.25	88
3	43.66	0.41	0.066	0.934	2.7	0.39	42
4	24.56	0.305	0.19	0.81	2.3	0.514	22

Berdasarkan gambar 4.8, nilai maks. cn^2q dicapai pada saat $\theta = 0^\circ$

$$cn^2q = 1$$

Sedangkan untuk $cnqdnqsnq$ maks. Dicapai pada saat $\theta = 90^\circ$

$$cnqdnqsnq = 0.5$$

d (m)	HgT^2/d^2	ε	$1 - \kappa^2$ (κ'^2)	γ	κ^2	h_1	h_2	f_1	f_2	f_3	f_4
1.6	161.47	0.78	0.003	0.23	0.997	0.228	-0.057	0.070	0.361	0.079	0.235
2	98.24	0.61	0.005	0.25	0.995	0.246	-0.061	0.074	0.368	0.113	0.242
3	43.66	0.41	0.066	0.39	0.934	0.347	-0.081	0.116	0.353	0.266	0.210
4	24.559	0.305	0.190	0.51	0.810	0.400	-0.088	0.196	0.215	0.249	0.032

d (m)	u (m/s)	U_{eff} (m/s)	du/dt (m/s ²)
1.6	2.12	1.87	-8.48
2	1.93	1.71	-5.81
3	1.46	1.29	-3.95
4	1.22	1.08	-3.44

PERHITUNGAN KECEPATAN DAN PERCEPATAN PARTIKEL AIR
UNTUK TEORI GELOMBANG STOKES ORDE 2

Panjang Gelombang dirumuskan sebagai berikut :

$$L = (gT^2/2\pi) [\tanh (2\pi d/L)] \quad \dots\dots(\text{Chakrabarty, 1987})$$

Cepat Rambat Gelombang dirumuskan sebagai berikut :

$$C = L/T = (gT/2\pi) [\tanh (2\pi d/L)] \quad \dots\dots(\text{Chakrabarty, 1987})$$

Perhitungan ini membutuhkan proses iterasi sehingga didapatkan nilai L.

$$\begin{aligned} H_s &= 1.22 \quad \text{m} \\ T_s &= 5.73 \quad \text{sekon} \\ g &= 9.81 \quad \text{m/s}^2 \end{aligned}$$

d m	H _s m	L _o m	L m	Error	C m/s ²	d in	H _s m	L _o m	L m	Error	C m/s ²	d m	H _s m	L _o m	L m	Error	C m/s ²	d m	H _s m	L _o m	L m	Error	C m/s ²
5	1.22	51.26	28.00	0.831	6.29	13	1.22	51.26	47.20	0.086	8.37	21	1.22	51.26	50.67	0.012	8.85	29	1.22	51.26	51.18	0.002	8.93
		39.63	33.83	0.171				49.23	47.68	0.032				50.97	50.69	0.006				51.22	51.18	0.001	
		36.73	35.57	0.033				48.45	47.86	0.012				50.83	50.70	0.003				51.20	51.18	0.000	
		36.15	35.93	0.006				48.16	47.93	0.005				50.76	50.70	0.001				51.19	51.18	0.000	
		36.04	36.00	0.001				48.04	47.95	0.002				50.73	50.70	0.001				51.18	51.18	0.000	
		36.02	36.01	0.000				48.00	47.96	0.001				50.72	50.70	0.000				51.18	51.18	0.000	
		36.02	36.01	0.000				47.98	47.97	0.000				50.71	50.70	0.000				51.18	51.18	0.000	
6	1.22	51.26	32.11	0.597	6.73	14	1.22	51.26	48.05	0.067	8.48	22	1.22	51.26	50.80	0.009	8.87	30	1.22	51.26	51.20	0.001	8.93
		41.69	36.83	0.132				49.66	48.38	0.026				51.03	50.81	0.004				51.23	51.20	0.001	
		39.26	38.16	0.029				49.02	48.51	0.011				50.92	50.81	0.002				51.21	51.20	0.000	
		38.71	38.47	0.006				48.76	48.56	0.004				50.87	50.82	0.001				51.21	51.20	0.000	
		38.59	38.54	0.001				48.66	48.58	0.002				50.84	50.82	0.000				51.20	51.20	0.000	
		38.56	38.55	0.000				48.62	48.58	0.001				50.83	50.82	0.000				51.20	51.20	0.000	
		38.56	38.55	0.000				48.60	48.59	0.000				50.82	50.82	0.000				51.20	51.20	0.000	
7	1.22	51.26	35.64	0.438	7.10	15	1.22	51.26	48.73	0.052	8.57	23	1.22	51.26	50.90	0.007	8.89	31	1.22	51.26	51.21	0.001	8.94
		43.45	39.30	0.106				50.00	48.95	0.021				51.08	50.91	0.003				51.24	51.21	0.000	
		41.38	40.33	0.026				49.47	49.04	0.009				50.99	50.91	0.002				51.22	51.21	0.000	
		40.85	40.60	0.006				49.26	49.08	0.004				50.95	50.91	0.001				51.22	51.21	0.000	
		40.73	40.66	0.002				49.17	49.09	0.002				50.93	50.91	0.000				51.21	51.21	0.000	
		40.69	40.68	0.000				49.13	49.10	0.001				50.92	50.91	0.000				51.21	51.21	0.000	
		40.69	40.68	0.000				49.11	49.10	0.000				50.92	50.91	0.000				51.21	51.21	0.000	
8	1.22	51.26	38.62	0.327	7.41	16	1.22	51.26	49.27	0.040	8.64	24	1.22	51.26	50.98	0.006	8.90	32	1.22	51.26	51.22	0.001	8.94
		44.94	41.37	0.086				50.27	49.42	0.017				51.12	50.98	0.003				51.24	51.22	0.000	
		43.16	42.17	0.023				49.84	49.48	0.007				51.05	50.98	0.001				51.23	51.22	0.000	
		42.66	42.39	0.006				49.66	49.50	0.003				51.02	50.99	0.001				51.23	51.22	0.000	
		42.53	42.45	0.002				49.58	49.52	0.001				51.00	50.99	0.000				51.22	51.22	0.000	
		42.49	42.47	0.000				49.55	49.52	0.001				50.99	50.99	0.000				51.22	51.22	0.000	
		42.48	42.47	0.000				49.53	49.52	0.000				50.99	50.99	0.000				51.22	51.22	0.000	
9	1.22	51.26	41.09	0.247	7.68	17	1.22	51.26	49.70	0.031	8.70	25	1.22	51.26	51.04	0.004	8.91	33	1.22	51.26	51.23	0.001	8.94
		46.18	43.11	0.071				50.48	49.79	0.014				51.15	51.04	0.002				51.25	51.23	0.000	
		44.64	43.72	0.021				50.14	49.84	0.006				51.10	51.04	0.001				51.24	51.23	0.000	
		44.18	43.90	0.006				49.99	49.85	0.003				51.07	51.04	0.001				51.23	51.23	0.000	
		44.04	43.96	0.002				49.92	49.86	0.001				51.06	51.04	0.000				51.23	51.23	0.000	
		44.00	43.98	0.001				49.89	49.87	0.001				51.05	51.04	0.000				51.23	51.23	0.000	
		43.99	43.98	0.000				49.88	49.87	0.000				51.05	51.04	0.000				51.23	51.23	0.000	
10	1.22	51.26	43.13	0.189	7.90	18	1.22	51.26	50.03	0.025	8.75	26	1.22	51.26	51.09	0.003	8.92	34	1.22	51.26	51.24	0.000	8.94
		47.20	44.58	0.059				50.65	50.10	0.011				51.18	51.09	0.002				51.25	51.24	0.000	
		45.89	45.04	0.019				50.37	50.13	0.005				51.13	51.09	0.001				51.24	51.24	0.000	
		45.46	45.18	0.006				50.25	50.14	0.002				51.11	51.09	0.000				51.24	51.24	0.000	
		45.32	45.23	0.002				50.19	50.14	0.001				51.10	51.09	0.000				51.24	51.24	0.000	
		45.28	45.25	0.001				50.17	50.15	0.000				51.10	51.09	0.000				51.24	51.24	0.000	
		45.26	45.25	0.000				50.16	50.15	0.000				51.09	51.09	0.000				51.24	51.24	0.000	
11	1.22	51.26	44.78	0.145	8.08	19	1.22	51.26	50.30	0.019	8.79	27	1.22	51.26	51.13	0.003	8.92	35	1.22	51.26	51.24	0.000	8.94
		48.02	45.80	0.048				50.78	50.34	0.009				51.19	51.13	0.001				51.25	51.24	0.000	
		46.91	46.15	0.017				50.56	50.36	0.004				51.16	51.13	0.001				51.25	51.24	0.000	
		46.53	46.26	0.006				50.46	50.37	0.002				51.14	51.13	0.000				51.25	51.24	0.000	
		46.40	46.30	0.002				50.41	50.37	0.001				51.14	51.13	0.000				51.24	51.24	0.000	
		46.35	46.32	0.001				50.39	50.37	0.000				51.13	51.13	0.000				51.24	51.24	0.000	
		46.33	46.32	0.000				50.38	50.37	0.000				51.13	51.13	0.000				51.24	51.24	0.000	
12	1.22	51.26	46.12	0.111	8.24	20	1.22	51.26	50.51	0.015	8.82	28	1.22	51.26	51.16	0.002	8.93	36	1.22	51.26	51.25	0.000	8.94
		48.69	46.83	0.040				50.88	50.53	0.007				51.21	51.16	0.000				51.25	51.25	0.000	
		47.76	47.08	0.014				50.71	50.55	0.003				51.18	51.16	0.001				51.25	51.25	0.000	
		47.42	47.17	0.005				50.63	50.55	0.002				51.17	51.16	0.000				51.25	51.25	0.000	
		47.29	47.20	0.002				50.59	50.55	0.001				51.16	51.16	0.000				51.25	51.25	0.000	
		47.25	47.21	0.001				50.57	50.56	0.000				51.16	51.16	0.000				51.25	51.25	0.000	
		47.23	47.22	0.000				50.56	50.56	0.000				51.16	51.16	0.000				51.25	51.25	0.000	

Kecepatan partikel air dalam arah x dirumuskan sebagai berikut:

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(d+y)}{\sinh kd} \cos \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2k(d+y)}{\sinh^4 kd} \cos 2\theta \quad \dots\dots(\text{Chakrabarti, 1987})$$

Percepatan partikel air dalam arah x dirumuskan sebagai berikut:

$$a_x = \frac{2\pi^2 H}{T} \frac{\cosh k(d+y)}{\sinh kd} \sin \theta + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh 2k(d+y)}{\sinh^4 kd} \sin 2\theta \quad \dots\dots(\text{Chakrabarti, 1987})$$

$$U_{\text{eff}}^2 = 0.778 U_0^2 \left(\frac{D}{Y_0} \right)^{0.286}$$

- Keterangan :
- k = Wave Number, $k = 2\pi/L$
 - y = Kedalaman yang ditinjau, m.
 - x = Jarak Horisontal, x (m)
 - h = Frekwensi Gelombang, 1/s.
 - t = Waktu, s.
 - U_{eff} = Kecepatan efektif partikel air akibat gelombang, m/s.
 - U_0 = Kecepatan partikel air pada ketinggian y_0 diatas seabed, m/s.

- Hs = 1.22 m
- Ts = 5.73 sekon
- g = 9.81 m/s²
- D = 0.610 m
- x = 0.31 m
- t = 0 sekon

d m	y m	L m	C m/s	k	ω	θ°	u m/s	U_{eff} m/s	a_x m/s ²
5.00	4.70	36.01	6.29	0.17	1.10	0	0.73	0.71	0.24
6.00	5.70	38.55	6.73	0.16	1.10	0	0.62	0.60	0.19
7.00	6.70	40.68	7.10	0.15	1.10	0	0.53	0.52	0.16
8.00	7.70	42.47	7.41	0.15	1.10	0	0.46	0.45	0.13
9.00	8.70	43.98	7.68	0.14	1.10	0	0.41	0.40	0.11
10.00	9.70	45.25	7.90	0.14	1.10	0	0.36	0.35	0.10
11.00	10.70	46.32	8.08	0.14	1.10	0	0.32	0.31	0.08
12.00	11.70	47.22	8.24	0.13	1.10	0	0.28	0.28	0.07
13.00	12.70	47.97	8.37	0.13	1.10	0	0.25	0.25	0.06
14.00	13.70	48.59	8.48	0.13	1.10	0	0.23	0.22	0.06
15.00	14.70	49.10	8.57	0.13	1.10	0	0.20	0.20	0.05
16.00	15.70	49.52	8.64	0.13	1.10	0	0.18	0.17	0.04
17.00	16.70	49.87	8.70	0.13	1.10	0	0.16	0.16	0.04
18.00	17.70	50.15	8.75	0.13	1.10	0	0.14	0.14	0.03
19.00	18.70	50.37	8.79	0.12	1.10	0	0.13	0.12	0.03
20.00	19.70	50.55	8.82	0.12	1.10	0	0.11	0.11	0.03
21.00	20.70	51.16	8.93	0.12	1.10	0	0.10	0.10	0.02
22.00	21.70	50.82	8.87	0.12	1.10	0	0.09	0.09	0.02
23.00	22.70	50.91	8.89	0.12	1.10	0	0.08	0.08	0.02
24.00	23.70	50.99	8.90	0.12	1.10	0	0.07	0.07	0.02
25.00	24.70	51.04	8.91	0.12	1.10	0	0.06	0.06	0.01
26.00	25.70	51.09	8.92	0.12	1.10	0	0.05	0.05	0.01
27.00	26.70	51.13	8.92	0.12	1.10	0	0.05	0.05	0.01
28.00	27.70	51.16	8.93	0.12	1.10	0	0.04	0.04	0.01
29.00	28.70	51.18	8.93	0.12	1.10	0	0.04	0.04	0.01
30.00	29.70	51.20	8.93	0.12	1.10	0	0.03	0.03	0.01
31.00	30.70	51.21	8.94	0.12	1.10	0	0.03	0.03	0.01
32.00	31.70	51.22	8.94	0.12	1.10	0	0.03	0.03	0.01
33.00	32.70	51.23	8.94	0.12	1.10	0	0.02	0.02	0.01
34.00	33.70	51.24	8.94	0.12	1.10	0	0.02	0.02	0.00
35.00	34.70	51.24	8.94	0.12	1.10	0	0.02	0.02	0.00
36.00	35.70	51.25	8.94	0.12	1.10	0	0.02	0.02	0.00

PERHITUNGAN KOEFISIEN HIDRODINAMIS

Penentuan koefisien hidrodinamis berikut ini, berdasarkan aturan yang diberikan oleh Germanischer Lloyd (GL), Part 4 - **Subsea Pipelines and Risers**, Section 4.

Penentuan koefisien hidrodinamis tergantung pada beberapa hal berikut ini :

- 1 Reynold Number (Re)
- 2 Keulegan-Carpenter Number (KC)
- 3 Kekasaran Permukaan Pipa (*Roughness*)
- 4 Jarak pipa dengan dasar laut (*Proximity Effect*)
- 5 Pengaruh gelombang dan arus (α)

I. Reynold Number (Re)

Reynold Number diformulasikan sebagai berikut :

$$Re = \frac{U_{eff} D}{\nu}$$

U_{eff} = Kecepatan efektif partikel, m/s
 D = Diameter luar, m.
 ν = Viskositas kinematis, m²/s

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

II. Keulegan - Carpenter (KC)

KC diformulasikan sebagai berikut :

$$KC = U_{eff} \frac{T}{D}$$

T = Periode Gelombang, sekon.

III. Kekasaran permukaan pipa (*Roughness*)

Roughness diformulasikan sebagai :

$\frac{k}{D}$	$k = 5 \cdot 10^{-6}$ m	<i>painted steel</i>
	$= 3 \cdot 10^{-3}$ m	<i>corroded steel</i>
	$= 3 \cdot 10^{-3}$ m	<i>concrete</i>
	$= 5 \cdot 10^{-3}$ m	<i>marine growth</i>

to $5 \cdot 10^{-2}$ m

IV. Proximity Effect

Pengaruh jarak antara pipa dengan permukaan tanah (h) terhadap C_d dan C_m sbb:

$$C_d \left(\frac{h}{D} \right) = C_{d0} + (C_{hd} - C_{d0}) e^{-2.5h/D}$$

$$C_m \left(\frac{h}{D} \right) = C_{m0} + (C_{bm} - C_{m0}) e^{-2.5h/D}$$

Untuk asumsi awal, nilai C_d dan C_m didapatkan dari gambar 1 dan gambar 2.

Sedangkan C_{db} & C_{mb} akibat pengaruh gelombang dan arus dapat dilihat pada gambar 6 dan gambar 7.

Pengaruh jarak pipa dengan permukaan dasar untuk koefisien lift (C_l) diformulasikan :

$$C_l \left(\frac{h}{D} \right) = C_{l0} e^{-2.5h/D}$$

Asumsi awal C_l akibat pengaruh gelombang dan arus dapat dilihat pada gambar 8.



Asumsi awal C_i akibat pengaruh gelombang dan arus dapat dilihat pada gambar 8.

Untuk kombinasi gelombang dan arus, maka kecepatan partikel efektif adalah jumlah dari kecepatan efektif partikel akibat arus dan gelombang itu sendiri.

$$U_{eff} = U_{effc} + U_{effw}$$

Maka, C_{db} dan C_{mb} berdasarkan gambar 6 dan gambar 7, dan C_i dari gambar 8.

Tabel Perhitungan :

T =	5.73	sekon	
D =	0.61	m	
$U_0 =$	0.35	m/s	(Arus pasut pada permukaan air)
$\nu =$	1.20E-06	m ² /sekon	
k =	3.00E-03	m	
h =	0	m	
<i>Roughness :</i>	$\frac{k}{D}$	=	0.005 (concrete)

d m	y m	U _w m/s	U _{CeffT} m/s	ΣU _{eff} m/s	Re	KC	U _c /U _w	Pengaruh KC		Pengaruh arus dan gelombang			Pengaruh Proximity Effect		
								C _d	C _m	C _{db} (α)	C _{mb} (α)	C _i (α)	C _d (h/D)	C _m (h/D)	C _i (h/D)
1.6	1.30	1.87	0.28	2.14	1.09E+06	20.15	0.148	0.99	1.6	1.88	3.73	2.04	1.88	3.73	2.04
2	1.70	1.71	0.27	1.97	1.00E+06	18.53	0.157	1.03	1.6	1.90	3.65	2.11	1.90	3.65	2.11
3	2.70	1.29	0.25	1.54	7.85E+05	14.50	0.196	1.14	1.6	1.94	3.46	2.25	1.94	3.46	2.25
4	3.70	1.08	0.24	1.32	6.70E+05	12.38	0.225	1.21	1.6	1.95	3.36	2.31	1.95	3.36	2.31
5	4.70	0.71	0.23	0.95	4.83E+05	8.92	0.328	1.35	1.79	1.89	3.21	2.27	1.89	3.21	2.27
6	5.70	0.60	0.23	0.83	4.21E+05	7.78	0.381	1.35	1.84	1.86	3.16	2.21	1.86	3.16	2.21
7	6.70	0.52	0.22	0.74	3.76E+05	6.94	0.434	1.35	1.87	1.82	3.12	2.13	1.82	3.12	2.13
8	7.70	0.45	0.22	0.67	3.40E+05	6.28	0.488	1.35	1.89	1.78	3.08	2.04	1.78	3.08	2.04
9	8.70	0.40	0.22	0.61	3.11E+05	5.74	0.546	1.35	1.91	1.73	3.03	1.94	1.73	3.03	1.94
10	9.70	0.35	0.21	0.56	2.86E+05	5.28	0.608	1.35	1.92	1.69	2.96	1.83	1.69	2.96	1.83
11	10.70	0.31	0.21	0.52	2.65E+05	4.89	0.675	1.35	1.93	1.65	2.87	1.72	1.65	2.87	1.72
12	11.70	0.28	0.21	0.48	2.46E+05	4.54	0.749	1.35	1.94	1.60	2.76	1.60	1.60	2.76	1.60
13	12.70	0.25	0.20	0.45	2.29E+05	4.24	0.831	1.35	1.95	1.56	2.62	1.49	1.56	2.62	1.49
14	13.70	0.22	0.20	0.42	2.15E+05	3.96	0.923	1.35	1.96	1.52	2.49	1.40	1.52	2.49	1.40
15	14.70	0.20	0.20	0.40	2.01E+05	3.72	1.026	1.35	1.96	1.49	2.37	1.32	1.49	2.37	1.32
16	15.70	0.17	0.20	0.37	1.90E+05	3.50	1.140	1.35	1.96	1.46	2.24	1.27	1.46	2.24	1.27
17	16.70	0.16	0.20	0.35	1.79E+05	3.31	1.269	1.35	1.97	1.46	2.12	1.26	1.46	2.12	1.26
18	17.70	0.14	0.20	0.33	1.70E+05	3.13	1.414	1.35	1.97	1.46	2.14	1.27	1.46	2.14	1.27
19	18.70	0.12	0.19	0.32	1.61E+05	2.98	1.578	1.35	1.97	1.46	2.10	1.28	1.46	2.10	1.28
20	19.70	0.11	0.19	0.30	1.53E+05	2.83	1.763	1.35	1.98	1.45	2.09	1.29	1.45	2.09	1.29
21	20.70	0.10	0.19	0.29	1.48E+05	2.73	1.924	1.35	1.98	1.45	2.09	1.30	1.45	2.09	1.30
22	21.70	0.09	0.19	0.28	1.40E+05	2.59	2.203	1.35	1.98	1.44	2.08	1.31	1.44	2.08	1.31
23	22.70	0.08	0.19	0.27	1.35E+05	2.49	2.467	1.35	1.98	1.43	2.08	1.32	1.43	2.08	1.32
24	23.70	0.07	0.19	0.26	1.30E+05	2.40	2.764	1.35	1.98	1.42	2.08	1.33	1.42	2.08	1.33
25	24.70	0.06	0.19	0.25	1.25E+05	2.32	3.099	1.35	1.98	1.41	2.07	1.35	1.41	2.07	1.35
26	25.70	0.05	0.19	0.24	1.21E+05	2.24	3.477	1.35	1.98	1.40	2.07	1.36	1.40	2.07	1.36
27	26.70	0.05	0.18	0.23	1.18E+05	2.18	3.903	1.35	1.98	1.39	2.07	1.37	1.39	2.07	1.37
28	27.70	0.04	0.18	0.23	1.15E+05	2.12	4.384	1.35	1.99	1.38	2.07	1.37	1.38	2.07	1.37
29	28.70	0.04	0.18	0.22	1.12E+05	2.06	4.925	1.35	1.99	1.36	2.06	1.38	1.36	2.06	1.38
30	29.70	0.03	0.18	0.21	1.09E+05	2.02	5.535	1.35	1.99	1.34	2.06	1.39	1.34	2.06	1.39
31	30.70	0.03	0.18	0.21	1.07E+05	1.97	6.223	1.35	1.99	1.32	2.06	1.39	1.32	2.06	1.39
32	31.70	0.03	0.18	0.21	1.05E+05	1.93	6.999	1.35	1.99	1.30	2.06	1.38	1.30	2.06	1.38
33	32.70	0.02	0.18	0.20	1.03E+05	1.90	7.872	1.35	1.99	1.28	2.06	1.38	1.28	2.06	1.38
34	33.70	0.02	0.18	0.20	1.01E+05	1.87	8.858	1.35	1.99	1.25	2.06	1.36	1.25	2.06	1.36
35	34.70	0.02	0.18	0.20	9.94E+04	1.84	9.968	1.35	1.99	1.22	2.06	1.34	1.22	2.06	1.34

PERHITUNGAN GAYA-GAYA HIDRODINAMIS

a. Drag Force, F_D , (Persatuan Panjang)

$$F_D = 0.5 \rho C_D D U_{\text{eff}}^2$$

b. Inersia Force, F_I (Persatuan Panjang)

$$F_I = \rho C_M (\pi D^2/4) (dU/dt)$$

c. Lift Force, F_L , (Persatuan Panjang)

$$F_L = 0.5 \rho C_L D U_{\text{eff}}^2$$

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

$$D_i = 0.61 \text{ m}$$

d m	ΣU_{eff} m/s	dU/dt m/s ²	C_D	C_M	C_L	F_D kg/m	F_I kg/m	F_L kg/m
1.56	1.87	-8.48	1.88	3.73	2.04	2050.31	-9465.80	2222.99
2	1.71	-5.81	1.90	3.65	2.11	1729.31	-6355.79	1917.00
3	1.29	-3.95	1.94	3.46	2.25	1010.86	-4095.25	1175.38
4	1.08	-3.44	1.95	3.36	2.31	704.28	-3464.56	835.76
5	0.71	0.24	1.89	3.21	2.27	302.40	230.58	362.71
6	0.60	0.19	1.86	3.16	2.21	208.70	179.58	248.29
7	0.52	0.16	1.82	3.12	2.13	150.98	145.17	176.96
8	0.45	0.13	1.78	3.08	2.04	112.23	119.99	128.84
9	0.40	0.11	1.73	3.03	1.94	84.80	100.43	94.80
10	0.35	0.10	1.69	2.96	1.83	64.70	84.55	70.04
11	0.31	0.08	1.65	2.87	1.72	49.66	71.19	51.79
12	0.28	0.07	1.60	2.76	1.60	38.26	59.71	38.27
13	0.25	0.06	1.56	2.62	1.49	29.55	49.77	28.30
14	0.22	0.06	1.52	2.49	1.40	22.89	41.64	21.03
15	0.20	0.05	1.49	2.37	1.32	17.78	34.92	15.79
16	0.17	0.04	1.46	2.24	1.27	13.87	29.26	12.06
17	0.16	0.04	1.46	2.12	1.26	11.03	24.42	9.52
18	0.14	0.03	1.46	2.14	1.27	8.72	21.83	7.60
19	0.12	0.03	1.46	2.10	1.28	6.88	18.96	6.06
20	0.11	0.03	1.45	2.09	1.29	5.41	16.75	4.82
21	0.10	0.02	1.45	2.09	1.30	4.47	15.03	4.02
22	0.09	0.02	1.44	2.08	1.31	3.34	13.09	3.05
23	0.08	0.02	1.43	2.08	1.32	2.62	11.58	2.42
24	0.07	0.02	1.42	2.08	1.33	2.05	10.24	1.92
25	0.06	0.01	1.41	2.07	1.35	1.60	9.06	1.52
26	0.05	0.01	1.40	2.07	1.36	1.25	8.01	1.21
27	0.05	0.01	1.39	2.07	1.37	0.97	7.08	0.95
28	0.04	0.01	1.38	2.07	1.37	0.75	6.26	0.75
29	0.04	0.01	1.36	2.06	1.38	0.58	5.54	0.59
30	0.03	0.01	1.34	2.06	1.39	0.45	4.90	0.47
31	0.03	0.01	1.32	2.06	1.39	0.35	4.33	0.37
32	0.03	0.01	1.30	2.06	1.38	0.27	3.83	0.29
33	0.02	0.01	1.28	2.06	1.38	0.21	3.39	0.22
34	0.02	0.00	1.25	2.06	1.36	0.16	3.00	0.17
35	0.02	0.00	1.22	2.06	1.34	0.12	2.65	0.13
36	0.02	0.00	1.19	2.06	1.32	0.09	2.34	0.10

PERHITUNGAN BERAT MINIMUM PIPA

Berat minimum pipa yang dibutuhkan agar pipa stabil, dirumuskan sebagai berikut

$$W = (F_D + F_I + \mu F_L) / (\mu \cos \theta + \sin \theta) \quad \text{kg/m}$$

μ adalah koefisien gesekan lateral antara permukaan pipa dengan dasar laut.

θ adalah kemiringan dasar laut

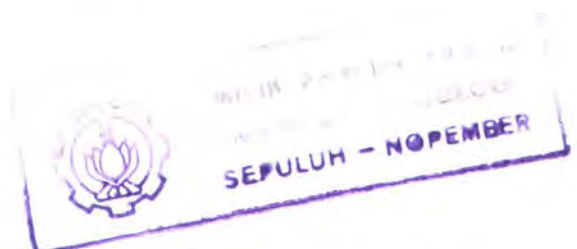
$$\begin{aligned} \mu &= 0.6 && \text{silt} \\ \theta &= 0 && \text{°} \end{aligned}$$

d m	F _D kg/m	F _I kg/m	F _L kg/m	W kg/m
1.56	2050.31	-9465.80	2222.99	10136.15
2	1729.31	-6355.79	1917.00	5793.81
3	1010.86	-4095.25	1175.38	3965.28
4	704.28	-3464.56	835.76	3764.71
5	302.40	230.58	362.71	1251.02
6	208.70	179.58	248.29	895.42
7	150.98	145.17	176.96	670.54
8	112.23	119.99	128.84	515.87
9	84.80	100.43	94.80	403.51
10	64.70	84.55	70.04	318.79
11	49.66	71.19	51.79	253.22
12	38.26	59.71	38.27	201.56
13	29.55	49.77	28.30	160.50
14	22.89	41.64	21.03	128.58
15	17.78	34.92	15.79	103.62
16	13.87	29.26	12.06	83.96
17	11.03	24.42	9.52	68.60
18	8.72	21.83	7.60	58.52
19	6.88	18.96	6.06	49.12
20	5.41	16.75	4.82	41.76
21	4.47	15.03	4.02	36.52
22	3.34	13.09	3.05	30.45
23	2.62	11.58	2.42	26.09
24	2.05	10.24	1.92	22.40
25	1.60	9.06	1.52	19.28
26	1.25	8.01	1.21	16.63
27	0.97	7.08	0.95	14.38
28	0.75	6.26	0.75	12.45
29	0.58	5.54	0.59	10.80
30	0.45	4.90	0.47	9.39
31	0.35	4.33	0.37	8.17
32	0.27	3.83	0.29	7.12
33	0.21	3.39	0.22	6.22
34	0.16	3.00	0.17	5.43
35	0.12	2.65	0.13	4.75
36	0.09	2.34	0.10	4.16

PERHITUNGAN PROPERTI PIPA

Range densitas concrete coating adalah : 2243 - 3044 kg/m³

d (m)	ρ_{concrete} (kg/m ³)					
	t = 2.54 (cm)	t = 5.08 (cm)	t = 7.62 (cm)	t = 10.16 (cm)	t = 12.7 (cm)	t = 15.24 (cm)
1.56	262382.71	125232.17	79922.67	57532.13	44281.83	35582.62
2	150720.56	72166.70	46215.40	33391.07	25801.88	20819.35
3	103700.29	49821.15	32021.47	23225.42	18020.08	14602.62
4	98542.86	47370.18	30464.60	22110.40	17166.53	13920.74
5	33903.93	16651.66	10952.15	8135.63	6468.86	5374.58
6	24759.73	12306.05	8191.81	6158.68	4955.51	4165.60
7	18977.09	9557.95	6446.21	4908.49	3998.49	3401.05
8	14999.71	7667.77	5245.57	4048.59	3340.24	2875.19
9	12110.47	6294.71	4373.40	3423.94	2862.07	2493.19
10	9931.94	5259.40	3715.76	2952.95	2501.53	2205.16
11	8245.75	4458.07	3206.76	2588.40	2222.47	1982.22
12	6917.34	3826.77	2805.75	2301.20	2002.62	1806.59
13	5861.50	3325.00	2487.03	2072.93	1827.88	1666.99
14	5040.54	2934.85	2239.21	1895.44	1692.01	1558.45
15	4398.77	2629.86	2045.48	1756.69	1585.80	1473.60
16	3893.24	2389.62	1892.87	1647.40	1502.13	1406.76
17	3498.41	2201.98	1773.69	1562.04	1436.79	1354.56
18	3239.03	2078.71	1695.39	1505.96	1393.86	1320.26
19	2997.47	1963.92	1622.47	1453.74	1353.88	1288.33
20	2808.04	1873.89	1565.29	1412.78	1322.53	1263.28
21	2673.25	1809.84	1524.60	1383.64	1300.23	1245.46
22	2517.24	1735.69	1477.50	1349.91	1274.40	1224.83
23	2405.10	1682.40	1443.65	1325.67	1255.85	1210.01
24	2310.37	1637.38	1415.05	1305.19	1240.17	1197.48
25	2230.12	1599.25	1390.83	1287.84	1226.89	1186.87
26	2161.97	1566.86	1370.26	1273.10	1215.61	1177.86
27	2103.94	1539.28	1352.74	1260.56	1206.00	1170.19
28	2054.39	1515.74	1337.78	1249.84	1197.80	1163.64
29	2012.01	1495.59	1324.99	1240.68	1190.79	1158.03
30	1975.63	1478.31	1314.01	1232.82	1184.77	1153.23
31	1944.36	1463.44	1304.57	1226.06	1179.59	1149.09
32	1917.40	1450.63	1296.43	1220.23	1175.13	1145.53
33	1894.12	1439.57	1289.40	1215.19	1171.28	1142.45
34	1873.97	1430.00	1283.32	1210.84	1167.95	1139.78
35	1856.51	1421.69	1278.05	1207.06	1165.05	1137.48
36	1841.34	1414.49	1273.47	1203.78	1162.54	1135.47



REKOMENDASI

Pertimbangan dalam menentukan ketebalan dan densitas lapisan beton.

1. Mudah dalam aplikasi
2. Mudah dalam instalasi yang meliputi penyambungan serta protection methods.

d (m)	ρ_{concrete} t = 7.62 cm
1.56	3044.00
2	3044.00
3	3044.00
4	3044.00
5	3044.00
6	3044.00
7	3044.00
8	3044.00
9	3044.00
10	3044.00
11	3044.00
12	2805.75
13	2487.03
14	2243.00
15	2243.00
16	2243.00
17	2243.00
18	2243.00
19	2243.00
20	2243.00
21	2243.00
22	2243.00
23	2243.00
24	2243.00
25	2243.00
26	2243.00
27	2243.00
28	2243.00
29	2243.00
30	2243.00
31	2243.00
32	2243.00
33	2243.00
34	2243.00
35	2243.00
36	2243.00

d (m)	t = 7.62 cm ρ_{concrete}
1.56 - 11	3044.00
12	2805.75
13	2487.03
14 - 36	2243.00

Notes :

Pada kedalaman 1.56 - 11 meter, pipa bawah laut harus menggunakan *protection methods* (*anchoring the pipeline, strengthen the pipe, buried method, etc*)

**Tabel Perbandingan Perhitungan 1 dan 2
Kecepatan dan Percepatan Teori Gelombang Cnoidal**

d (m)	Perhitungan 1			Perhitungan 2		
	u	U _{eff}	du/dt	u	U _{eff}	du/dt
1.6	2.07	1.83	-5.74	2.12	1.87	-8.48
2	1.89	1.67	-3.39	1.93	1.71	-5.81
3	1.42	1.25	-1.95	1.46	1.29	-3.95
4	1.16	1.03	-1.65	1.22	1.08	-3.44

**Tabel Perbandingan Perhitungan 1 dan 2
Kecepatan dan Percepatan Teori Gelombang Stokes#2**

d (m)	Perhitungan 1			Perhitungan 2		
	u	U _{eff}	du/dt	u	U _{eff}	du/dt
5.0	0.73	0.71	0.18	0.73	0.71	0.24
6.0	0.62	0.60	0.14	0.62	0.60	0.19
7.0	0.53	0.52	0.12	0.53	0.52	0.16
8.0	0.46	0.45	0.10	0.46	0.45	0.13
9.0	0.41	0.40	0.08	0.41	0.40	0.11
10.0	0.36	0.35	0.07	0.36	0.35	0.10
11.0	0.32	0.31	0.06	0.32	0.31	0.08
12.0	0.28	0.28	0.05	0.28	0.28	0.07
13.0	0.25	0.25	0.05	0.25	0.25	0.06
14.0	0.23	0.22	0.04	0.23	0.22	0.06
15.0	0.20	0.20	0.04	0.20	0.20	0.05
16.0	0.18	0.17	0.03	0.18	0.17	0.04
17.0	0.16	0.16	0.03	0.16	0.16	0.04
18.0	0.14	0.14	0.03	0.14	0.14	0.03
19.0	0.13	0.12	0.02	0.13	0.12	0.03
20.0	0.11	0.11	0.02	0.11	0.11	0.03
21.0	0.10	0.10	0.02	0.10	0.10	0.02
22.0	0.09	0.09	0.02	0.09	0.09	0.02
23.0	0.08	0.08	0.01	0.08	0.08	0.02
24.0	0.07	0.07	0.01	0.07	0.07	0.02
25.0	0.06	0.06	0.01	0.06	0.06	0.01
26.0	0.05	0.05	0.01	0.05	0.05	0.01
27.0	0.05	0.05	0.01	0.05	0.05	0.01
28.0	0.04	0.04	0.01	0.04	0.04	0.01
29.0	0.04	0.04	0.01	0.04	0.04	0.01
30.0	0.03	0.03	0.01	0.03	0.03	0.01
31.0	0.03	0.03	0.01	0.03	0.03	0.01
32.0	0.03	0.03	0.00	0.03	0.03	0.01
33.0	0.02	0.02	0.00	0.02	0.02	0.01
34.0	0.02	0.02	0.00	0.02	0.02	0.00
35.0	0.02	0.02	0.00	0.02	0.02	0.00
36.0	0.02	0.02	0.00	0.02	0.02	0.00

**Tabel Perbandingan Perhitungan 1 dan 2
Koefisien Hidrodinamis**

d m	Perhitungan 1			Perhitungan 2		
	$C_d(h/D)$	$C_m(h/D)$	$C_l(h/D)$	$C_d(h/D)$	$C_m(h/D)$	$C_l(h/D)$
1.6	1.75	3.98	1.71	1.88	3.73	2.04
2	1.79	3.88	1.81	1.90	3.65	2.11
3	1.85	3.61	2.03	1.94	3.46	2.25
4	1.87	3.47	2.13	1.95	3.36	2.31
5	1.85	3.29	2.16	1.89	3.21	2.27
6	1.83	3.22	2.13	1.86	3.16	2.21
7	1.80	3.17	2.07	1.82	3.12	2.13
8	1.76	3.12	2.00	1.78	3.08	2.04
9	1.73	3.07	1.92	1.73	3.03	1.94
10	1.69	3.00	1.82	1.69	2.96	1.83
11	1.64	2.92	1.72	1.65	2.87	1.72
12	1.60	2.82	1.61	1.60	2.76	1.60
13	1.56	2.69	1.51	1.56	2.62	1.49
14	1.52	2.56	1.41	1.52	2.49	1.40
15	1.49	2.44	1.33	1.49	2.37	1.32
16	1.46	2.32	1.27	1.46	2.24	1.27
17	1.46	2.20	1.25	1.46	2.12	1.26
18	1.46	2.17	1.26	1.46	2.14	1.27
19	1.45	2.13	1.26	1.46	2.10	1.28
20	1.45	2.12	1.27	1.45	2.09	1.29
21	1.44	2.12	1.28	1.45	2.09	1.30
22	1.44	2.11	1.29	1.44	2.08	1.31
23	1.43	2.11	1.30	1.43	2.08	1.32
24	1.42	2.10	1.32	1.42	2.08	1.33
25	1.41	2.10	1.33	1.41	2.07	1.35
26	1.40	2.09	1.34	1.40	2.07	1.36
27	1.39	2.09	1.35	1.39	2.07	1.37
28	1.38	2.09	1.35	1.38	2.07	1.37
29	1.36	2.09	1.36	1.36	2.06	1.38
30	1.34	2.08	1.37	1.34	2.06	1.39
31	1.33	2.08	1.37	1.32	2.06	1.39
32	1.30	2.08	1.37	1.30	2.06	1.38
33	1.28	2.08	1.36	1.28	2.06	1.38
34	1.25	2.08	1.35	1.25	2.06	1.36
35	1.23	2.08	1.33	1.22	2.06	1.34
36	1.19	2.07	1.31	1.19	2.06	1.32

**Tabel Perbandingan Perhitungan 1 dan 2
Gaya-gaya Hidrodinamis**

d m	Perhitungan 1			Perhitungan 2		
	F _D kg/m	F _I kg/m	F _L kg/m	F _D kg/m	F _I kg/m	F _L kg/m
1.6	1361.67	-3574.01	1332.14	2050.31	-9465.80	2222.99
2	1151.48	-1980.35	1169.43	1729.31	-6355.79	1917.00
3	669.43	-1004.21	735.37	1010.86	-4095.25	1175.38
4	455.81	-812.28	517.87	704.28	-3464.56	835.76
5	221.73	93.50	258.25	302.40	230.58	362.71
6	153.88	72.40	179.05	208.70	179.58	248.29
7	111.80	58.32	128.90	150.98	145.17	176.96
8	83.40	48.12	94.66	112.23	119.99	128.84
9	63.20	40.27	70.18	84.80	100.43	94.80
10	48.35	33.95	52.21	64.70	84.55	70.04
11	37.19	28.68	38.84	49.66	71.19	51.79
12	28.70	24.17	28.84	38.26	59.71	38.27
13	22.19	20.26	21.39	29.55	49.77	28.30
14	17.19	16.95	15.90	22.89	41.64	21.03
15	13.35	14.25	11.90	17.78	34.92	15.79
16	10.40	11.98	9.04	13.87	29.26	12.06
17	8.23	10.03	7.04	11.03	24.42	9.52
18	6.51	8.77	5.62	8.72	21.83	7.60
19	5.14	7.62	4.48	6.88	18.96	6.06
20	4.04	6.72	3.56	5.41	16.75	4.82
21	3.34	6.03	2.97	4.47	15.03	4.02
22	2.50	5.25	2.25	3.34	13.09	3.05
23	1.96	4.64	1.79	2.62	11.58	2.42
24	1.53	4.10	1.42	2.05	10.24	1.92
25	1.20	3.62	1.12	1.60	9.06	1.52
26	0.93	3.20	0.89	1.25	8.01	1.21
27	0.73	2.83	0.70	0.97	7.08	0.95
28	0.56	2.50	0.56	0.75	6.26	0.75
29	0.44	2.21	0.44	0.58	5.54	0.59
30	0.34	1.96	0.34	0.45	4.90	0.47
31	0.26	1.73	0.27	0.35	4.33	0.37
32	0.20	1.53	0.21	0.27	3.83	0.29
33	0.16	1.35	0.17	0.21	3.39	0.22
34	0.12	1.20	0.13	0.16	3.00	0.17
35	0.09	1.06	0.10	0.12	2.65	0.13
36	0.07	0.94	0.08	0.09	2.34	0.10

**Tabel Perbandingan Perhitungan 1 dan 2
Berat Minimum Pipa**

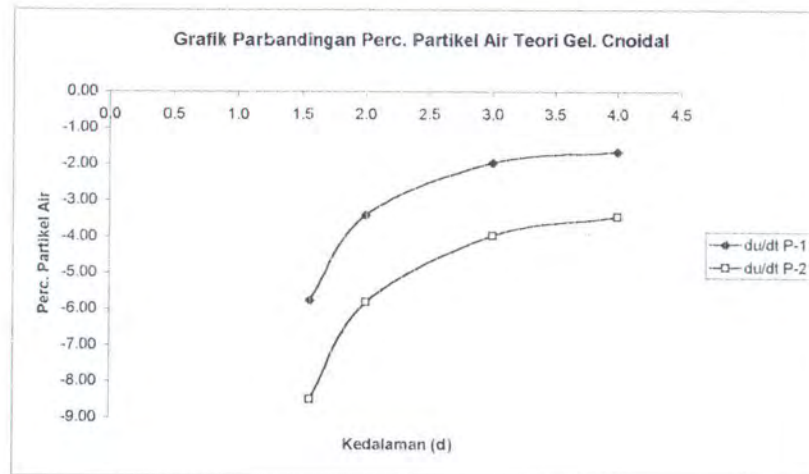
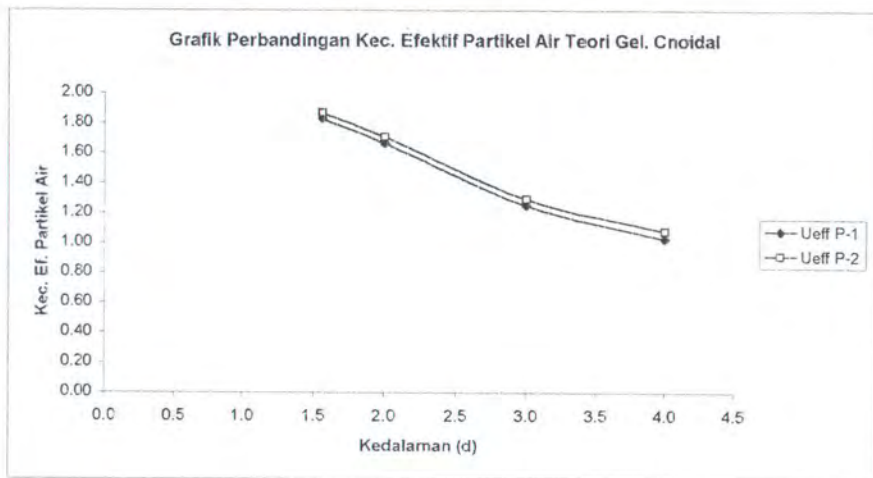
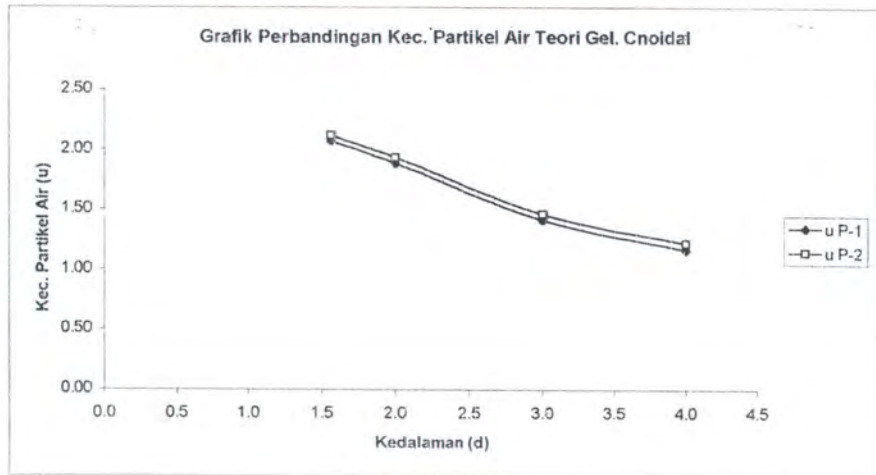
d m	W (kg/m)	
	Perhitungan 1	Perhitungan 2
1.56	2355.09	4629.29
2	212.01	2350.09
3	177.40	1688.15
4	76.26	1735.41
5	783.64	865.03
6	556.19	614.59
7	412.44	456.89
8	313.85	348.90
9	242.63	270.85
10	189.38	212.36
11	148.63	167.41
12	116.96	132.30
13	92.14	104.66
14	72.80	83.28
15	57.90	66.69
16	46.35	53.74
17	37.47	43.75
18	31.08	37.00
19	25.73	30.86
20	21.51	26.04
21	18.58	22.65
22	15.17	18.71
23	12.79	15.92
24	10.81	13.58
25	9.16	11.61
26	7.79	9.95
27	6.64	8.55
28	5.67	7.36
29	4.86	6.36
30	4.17	5.50
31	3.59	4.76
32	3.10	4.14
33	2.68	3.60
34	2.32	3.13
35	2.02	2.73
36	1.75	2.39

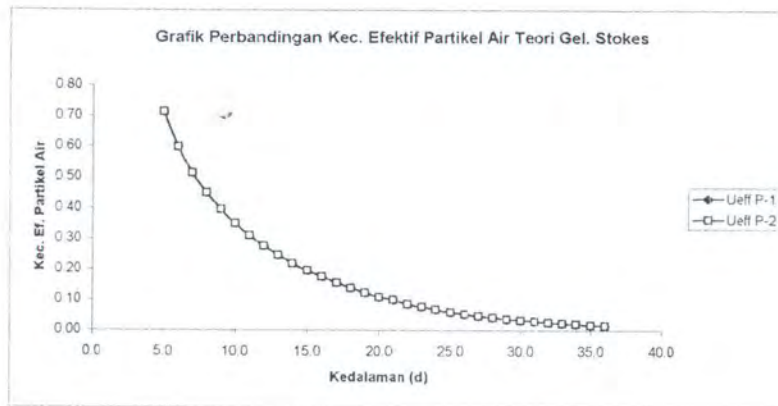
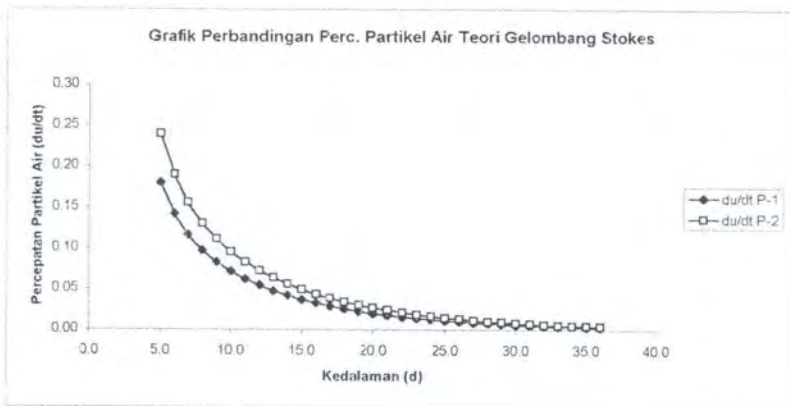
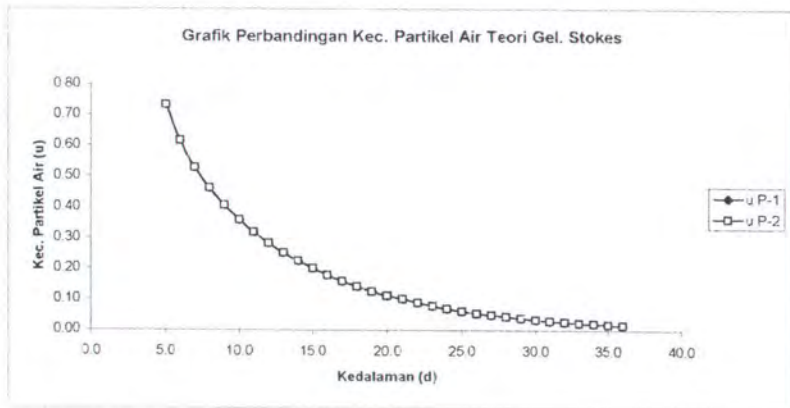
**Tabel Perbandingan Perhitungan 1 dan 2
Densitas dan Ketebalan Pipa.**

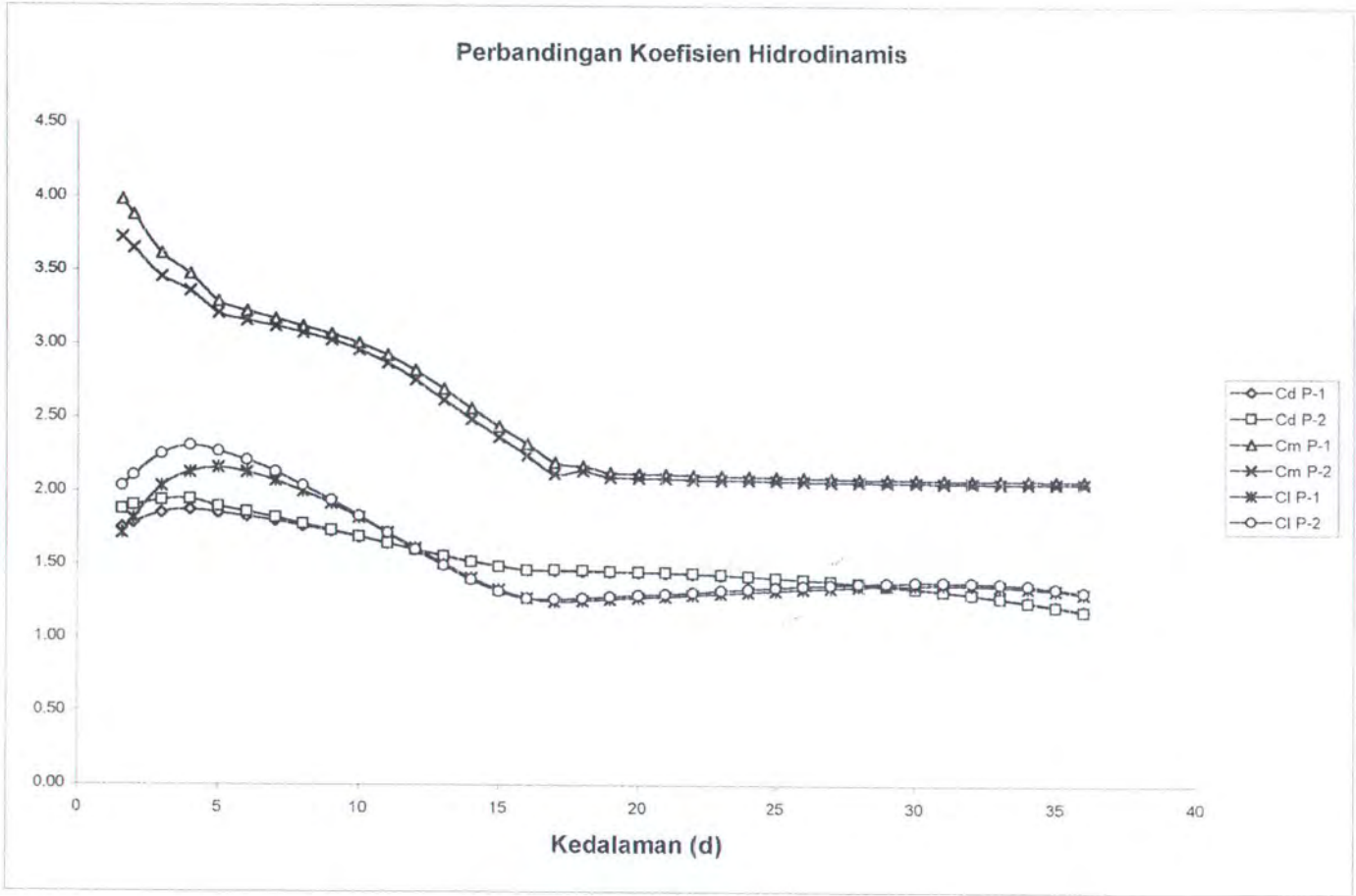
d m	Densitas (ρ) pada th 7.62 cm (3in)	
	Perhitungan 1	Perhitungan 2
1.56	3044.00	3044.00
2	3044.00	3044.00
3	3044.00	3044.00
4	3044.00	3044.00
5	3044.00	3044.00
6	3044.00	3044.00
7	3044.00	3044.00
8	3044.00	3044.00
9	3044.00	3044.00
10	2711.20	2889.54
11	2394.86	2540.67
12	2243.00	2268.16
13	2243.00	2243.00
14	2243.00	2243.00
15	2243.00	2243.00
16	2243.00	2243.00
17	2243.00	2243.00
18	2243.00	2243.00
19	2243.00	2243.00
20	2243.00	2243.00
21	2243.00	2243.00
22	2243.00	2243.00
23	2243.00	2243.00
24	2243.00	2243.00
25	2243.00	2243.00
26	2243.00	2243.00
27	2243.00	2243.00
28	2243.00	2243.00
29	2243.00	2243.00
30	2243.00	2243.00
31	2243.00	2243.00
32	2243.00	2243.00
33	2243.00	2243.00
34	2243.00	2243.00
35	2243.00	2243.00
36	2243.00	2243.00

PERBANDINGAN PERHITUNGAN 1 DAN 2 - KETEBALAN DAN DENSITAS LAPISAN BETON

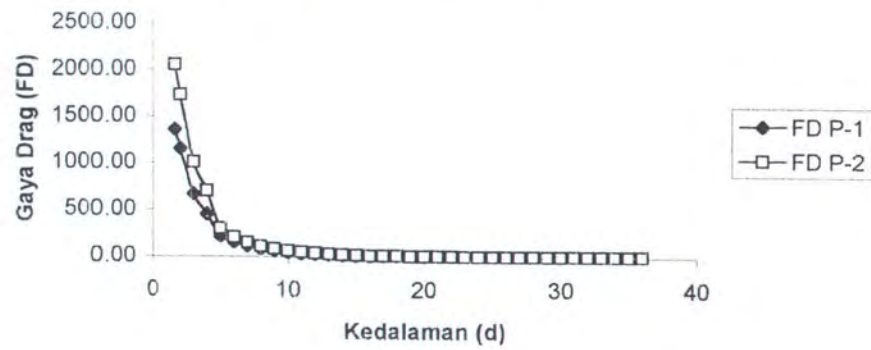
d (m)	Perhitungan 1						Perhitungan 2					
	$\rho_{\text{concrete}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$						$\rho_{\text{concrete}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$					
	t = 2.54 (cm)	t = 5.08 (cm)	t = 7.62 (cm)	t = 10.16 (cm)	t = 12.7 (cm)	t = 15.24 (cm)	t = 2.54 (cm)	t = 5.08 (cm)	t = 7.62 (cm)	t = 10.16 (cm)	t = 12.7 (cm)	t = 15.24 (cm)
1.56	62294.67	30143.86	19522.42	14273.63	11167.50	9128.23	262382.71	125232.17	79922.67	57532.13	44281.83	35582.62
2	7185.98	3954.43	2886.85	2359.28	2047.08	1842.10	150720.56	72166.70	46215.40	33391.07	25801.88	20819.35
3	6296.18	3531.57	2618.24	2166.91	1899.81	1724.46	103700.29	49821.15	32021.47	23225.42	18020.08	14602.62
4	3695.17	2295.49	1833.08	1604.58	1469.35	1380.57	98542.86	47370.18	30464.60	22110.40	17166.53	13920.74
5	21885.32	10940.03	7324.11	5537.24	4479.80	3785.56	33903.93	16651.66	10952.15	8135.63	6468.86	5374.58
6	16036.59	8160.53	5558.57	4272.76	3511.84	3012.28	24759.73	12306.05	8191.81	6158.68	4955.51	4165.60
7	12339.93	6403.75	4442.66	3473.55	2900.05	2523.53	18977.09	9557.95	6446.21	4908.49	3998.49	3401.05
8	9804.86	5199.01	3677.41	2925.48	2480.50	2188.36	14999.71	7667.77	5245.57	4048.59	3340.24	2875.19
9	7973.49	4328.68	3124.57	2529.54	2177.41	1946.22	12110.47	6294.71	4373.40	3423.94	2862.07	2493.19
10	6604.12	3677.91	2711.20	2233.48	1950.78	1765.17	9931.94	5259.40	3715.76	2952.95	2501.53	2205.16
11	5556.18	3179.90	2394.86	2006.92	1777.35	1626.62	8245.75	4458.07	3206.76	2588.40	2222.47	1982.22
12	4741.87	2792.91	2149.05	1830.87	1642.58	1518.96	6917.34	3826.77	2805.75	2301.20	2002.62	1806.59
13	4103.71	2489.64	1956.41	1692.90	1536.96	1434.59	5861.50	3325.00	2487.03	2072.93	1827.88	1666.99
14	3606.41	2253.31	1806.29	1585.39	1454.66	1368.84	5040.54	2934.85	2239.21	1895.44	1692.01	1558.45
15	3223.12	2071.15	1690.58	1502.52	1391.23	1318.16	4398.77	2629.86	2045.48	1756.69	1585.80	1473.60
16	2926.07	1929.99	1600.92	1438.30	1342.07	1278.89	3893.24	2389.62	1892.87	1647.40	1502.13	1406.76
17	2697.68	1821.45	1531.97	1388.92	1304.27	1248.69	3498.41	2201.98	1773.69	1562.04	1436.79	1354.56
18	2533.43	1743.39	1482.39	1353.41	1277.08	1226.97	3239.03	2078.71	1695.39	1505.96	1393.86	1320.26
19	2395.94	1678.05	1440.88	1323.69	1254.33	1208.79	2997.47	1963.92	1622.47	1453.74	1353.88	1288.33
20	2287.26	1626.40	1408.08	1300.19	1236.34	1194.43	2808.04	1873.89	1565.29	1412.78	1322.53	1263.28
21	2212.07	1590.67	1385.38	1283.94	1223.90	1184.49	2673.25	1809.84	1524.60	1383.64	1300.23	1245.46
22	2124.30	1548.96	1358.89	1264.96	1209.37	1172.88	2517.24	1735.69	1477.50	1349.91	1274.40	1224.83
23	2063.05	1519.85	1340.40	1251.72	1199.24	1164.78	2405.10	1682.40	1443.65	1325.67	1255.85	1210.01
24	2012.18	1495.67	1325.04	1240.72	1190.82	1158.06	2310.37	1637.38	1415.05	1305.19	1240.17	1197.48
25	1969.83	1475.55	1312.26	1231.56	1183.81	1152.46	2230.12	1599.25	1390.83	1287.84	1226.89	1186.87
26	1934.49	1458.75	1301.59	1223.92	1177.96	1147.79	2161.97	1566.86	1370.26	1273.10	1215.61	1177.86
27	1904.92	1444.70	1292.66	1217.53	1173.07	1143.88	2103.94	1539.28	1352.74	1260.56	1206.00	1170.19
28	1880.09	1432.90	1285.17	1212.16	1168.96	1140.59	2054.39	1515.74	1337.78	1249.84	1197.80	1163.64
29	1859.20	1422.98	1278.86	1207.65	1165.50	1137.83	2012.01	1495.59	1324.99	1240.68	1190.79	1158.03
30	1841.57	1414.60	1273.54	1203.83	1162.58	1135.50	1975.63	1478.31	1314.01	1232.82	1184.77	1153.23
31	1826.64	1407.50	1269.03	1200.61	1160.11	1133.53	1944.36	1463.44	1304.57	1226.06	1179.59	1149.09
32	1813.97	1401.48	1265.21	1197.86	1158.01	1131.85	1917.40	1450.63	1296.43	1220.23	1175.13	1145.53
33	1803.17	1396.35	1261.95	1195.53	1156.23	1130.42	1894.12	1439.57	1289.40	1215.19	1171.28	1142.45
34	1793.96	1391.97	1259.17	1193.54	1154.70	1129.21	1873.97	1430.00	1283.32	1210.84	1167.95	1139.78
35	1786.08	1388.22	1256.79	1191.84	1153.40	1128.16	1856.51	1421.69	1278.05	1207.06	1165.05	1137.48
36	1779.31	1385.01	1254.74	1190.37	1152.28	1127.27	1841.34	1414.49	1273.47	1203.78	1162.54	1135.47



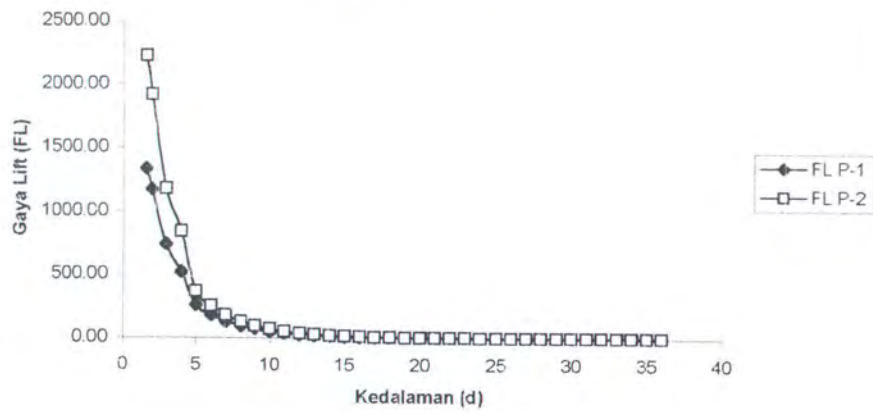




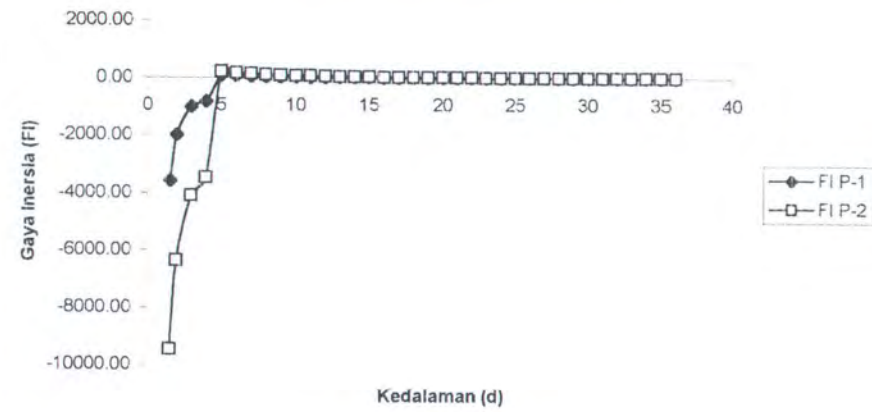
Grafik Perbandingan Gaya Drag



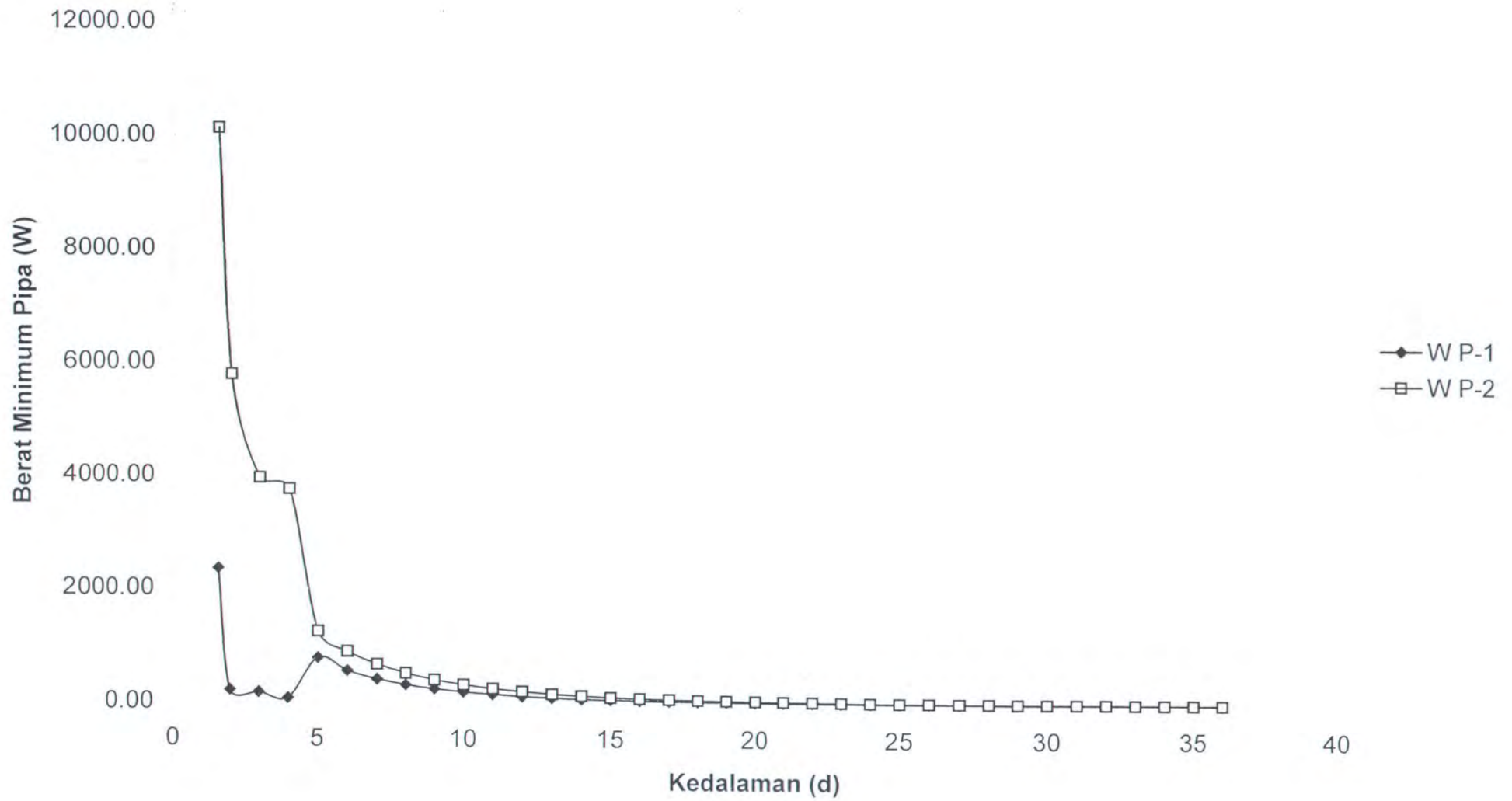
Grafik Perbandingan Gaya Lift



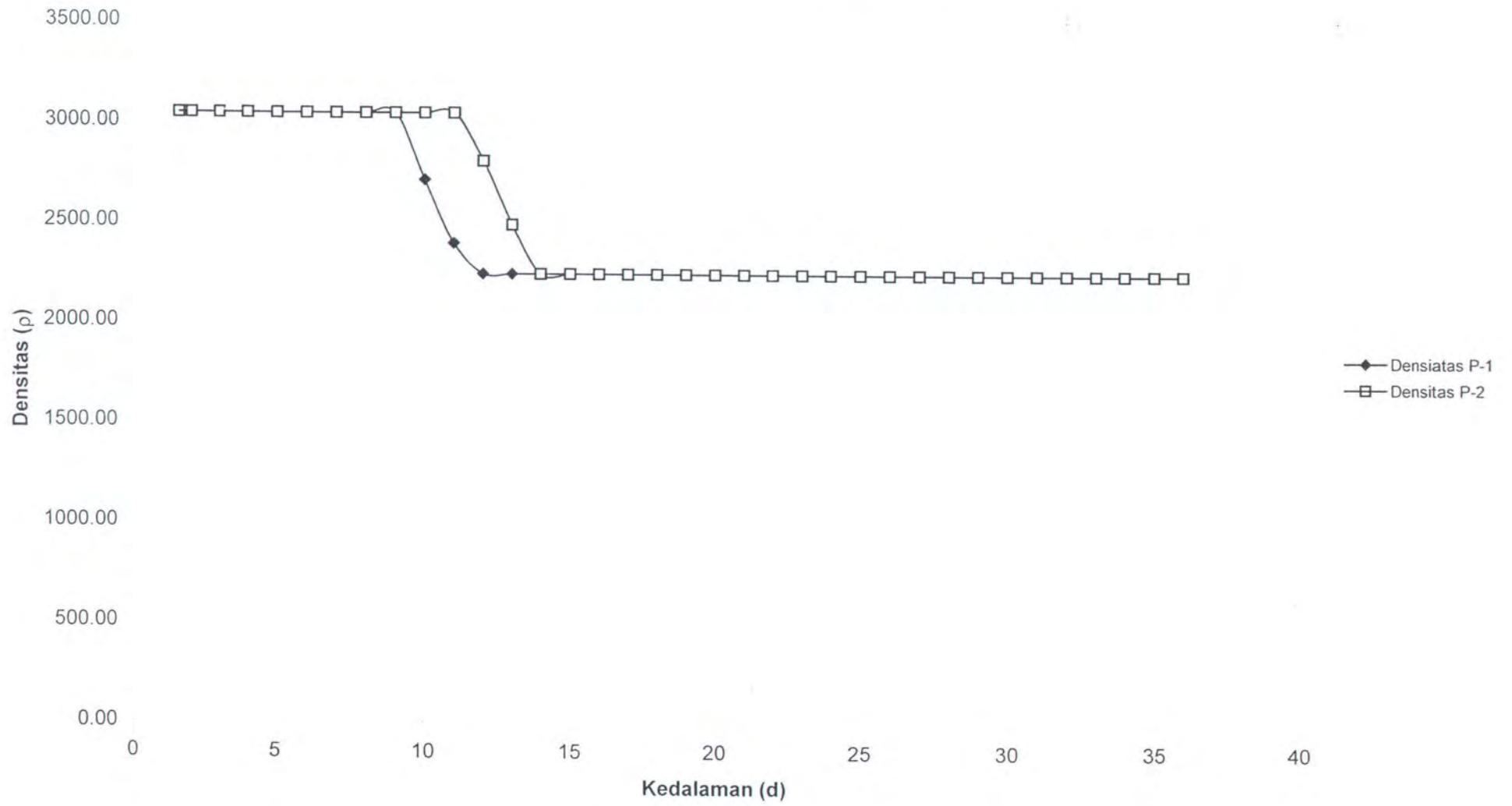
Grafik Perbandingan Gaya Inersia



Grafik Perbandingan Berat Pipa



Grafik Perbandingan Densitas



ANALISA BUCKLING

LOCAL BUCKLING

Spesifikasi pipa yang digunakan : **API 5LX X52**

Diameter luar, D_o =	18	in	
Ketebalan, t =	0.5	in	
$R_{10.5}$ =	52000	psi	
E =	3.05E+07	psi	taken from Popov (page 41 & 618)
ν =	0.3		taken from Popov (page 47)
Δ_0 =	0.025		taken from GL (1995, page B-7)
γ_m =	1.05		
γ_u =	1.4		
ρ =	1025	kg/m ³	
g =	9.81	m/sec	
h =	36	m	
I =	1053	in ⁴	
Z =	117	in ³	
DF =	0.8		

a. Ovalization

$$K = \frac{1}{R} = \frac{2 \sigma_o DF}{E D_o}$$
$$= 1.52E-04 \quad 1/\text{in}$$

$$\Delta_b \approx \frac{1}{24} \frac{D_o^4}{t^2} K^2$$
$$\Delta_b = 4.03E-04$$

b. Pure Bending

$$\sigma_{\max} = \frac{E D}{2R}$$
$$\sigma_{\max} = 41600 \quad \text{psi}$$
$$M_d = \sigma_{\max} Z$$
$$M_d = 4867200 \quad \text{lb.in}$$
$$= 549993.6 \quad \text{N.m}$$

$$M_c = (D_o - t)^2 t R_{10.5} \left(1 - 0.0024 \frac{D_o}{t} \right)$$

$$M_c = 7274540 \text{ lb.in}$$

$$= 822023.02 \text{ N.m}$$

$$\frac{M_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)} = 559199.33 \text{ N.m}$$

Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa M_d lebih kecil dari $\frac{M_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)}$ sehingga memenuhi persamaan $M_d \leq \frac{M_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)}$

c. Pure Pressure

$$\left[\frac{P_c}{P_{eb}} - 1 \right] \left[\left(\frac{P_c}{P_y} \right)^2 - 1 \right] = 2 \frac{P_c}{P_y} \Delta_0 \frac{D_o}{t} \quad (a)$$

$$P_c = \frac{1}{2} \frac{P_y t}{\Delta_0 D_o} \left[\frac{P_c}{P_{eb}} - 1 \right] \left[\left(\frac{P_c}{P_y} \right)^2 - 1 \right] \quad (b)$$

$$P_y = 2 R_{t0.5} \frac{t}{D_o - t} \quad (c)$$

$$P_{eb} = \frac{2E}{1 - \nu^2} \left(\frac{t}{D_o - t} \right)^3 \quad (d)$$

Critical Buckling Pressure dicari dengan cara iterasi, karena P_c merupakan fungsi dari P_c itu sendiri (Persamaan (b)).

$$P_y = 2971.43$$

$$P_{eb} = 1561.24$$

P_c psi	P_c' psi	error
10.00	1640.20	-163.0201
825.10	718.35	0.1294
771.72	778.49	-0.0088
775.11	774.66	0.0006
774.89	774.92	0.0000
774.90	774.90	0.0000
774.90	774.90	0.0000
774.90	774.90	0.0000

Tekanan luar merupakan tekanan hidrostatis yang merupakan fungsi dari kedalaman.

$$P_d = \rho g h$$

$$P_d = 361989 \text{ Pascal}$$

Dari perhitungan diatas didapatkan :

$$P_c = 774.90 \text{ psi} = 5.34 \text{ Mpa}$$

$$P_d = 0.36 \text{ Mpa}$$

maka perhitungan ini memenuhi persamaan $P_d \leq \frac{P_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)}$

d. Kombinasi bending dan tekanan hidrostatik

Perhitungan sebelumnya :

$$M_d = 549993.6 \text{ N.m}$$

$$M_c = 822023.02 \text{ N.m}$$

$$P_d = 0.36 \text{ Mpa}$$

$$P_c = 5.34 \text{ MPa}$$

$$\left(\frac{\gamma_m \cdot \gamma_u \cdot M_d}{M_c} \right)^4 + \frac{\gamma_m \cdot \gamma_u \cdot P_d}{P_c} \leq 1$$

$$\left(\frac{\gamma_m \cdot \gamma_u \cdot M_d}{M_c} \right)^4 + \frac{\gamma_m \cdot \gamma_u \cdot P_d}{P_c} = 1.0 \text{ maka memenuhi !!!}$$

GLOBAL BUCKLING

Berdasarkan GL, lateral bar buckling akibat kompresi aksial untuk pipa yang meletak didasara laut, gaya aksial kritis (F_d) dirumuskan sebagai berikut :

$$F_d \leq \frac{F_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)} \quad \text{dan}$$

$$F_d = \left(E \alpha \Delta T - \nu \Delta P \frac{D_o}{2T} \right) A_n$$

$$F_c = \min \left\{ C_1 \frac{EI}{L^2} + C_3 \mu W_s L \left[\left(1 + C_2 \frac{E A_n \mu_L^2 W_s L^3}{\mu (EI)^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \right\}$$

$$\Delta P = P_d - P_E$$

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

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

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

$$\Delta T = T_E - T_I$$

Diketahui :

$\gamma_m = 1.05$	$\rho_w = 1025 \text{ kg/m}^3$
$\gamma_u = 1.4$	$g = 9.81 \text{ m/s}^2$
$C_1 = 28$	$H = 1.22 \text{ m}$
$C_2 = 2.10E-04$	$d_L = 35.39 \text{ m}$
$C_3 = 1.6$	$d_H = 36.61 \text{ m}$
$\mu = 0.7$	$S = 0 \text{ psi}$
$\mu_L = 0.6$	$D = 18 \text{ in}$
$W_s = 170.16 \text{ lb/ft}$	$t = 0.5 \text{ in}$
$A_{st} = 27.49 \text{ in}^2$	$F, E, T = 1$
$I = 1053 \text{ in}^4$	$T_E = 111.9 \text{ }^\circ\text{F}$
$E = 3.05E+07 \text{ psi}$	$T_I = 90 \text{ }^\circ\text{F}$
$\alpha = 6.50E-06 \text{ in/in}^\circ\text{F}$	
$\nu = 0.3$	
$\Delta P = 0.0 \text{ psi}$	

Perhitungan :

$P_E = 54.28 \text{ psi}$	$T_E = 111.9 \text{ }^\circ\text{F}$
$P_d = 2888.89 \text{ psi}$	$T_I = 90 \text{ }^\circ\text{F}$
$\Delta P = 2834.61 \text{ psi}$	$\Delta T = 21.9 \text{ }^\circ\text{F}$

$$\begin{aligned}
 F_d &= 303235.01 \text{ lb} \\
 &= 1349316.20 \text{ N} \quad \dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

L adalah length of buckle, panjang yang dimaksud adalah panjang span (jarak antar tumpuan). Untuk menghitung jarak antar tumpuan maksimum :

$$L = 6.6 \sqrt{D}$$

$$\begin{aligned}
 L &= 28.00 \text{ ft} \\
 &= 8.53 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

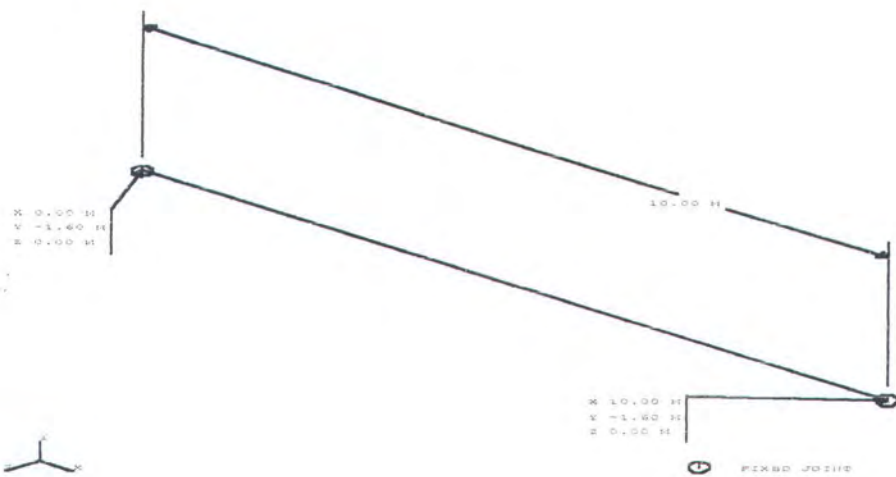
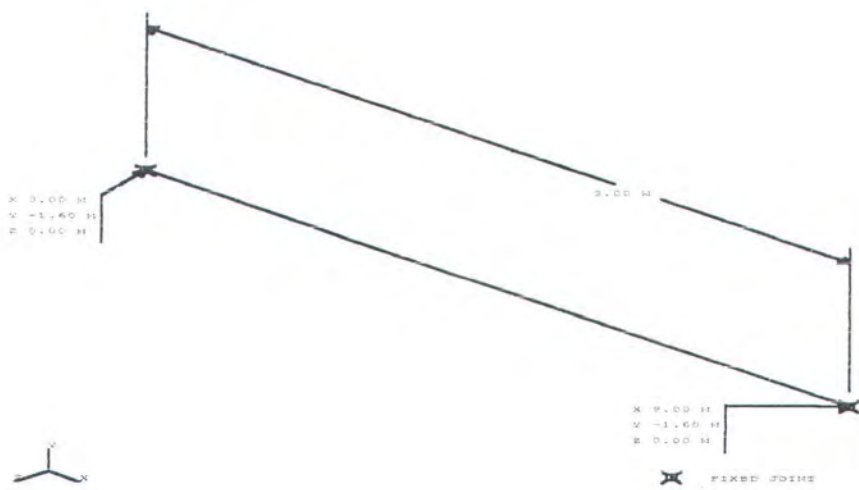
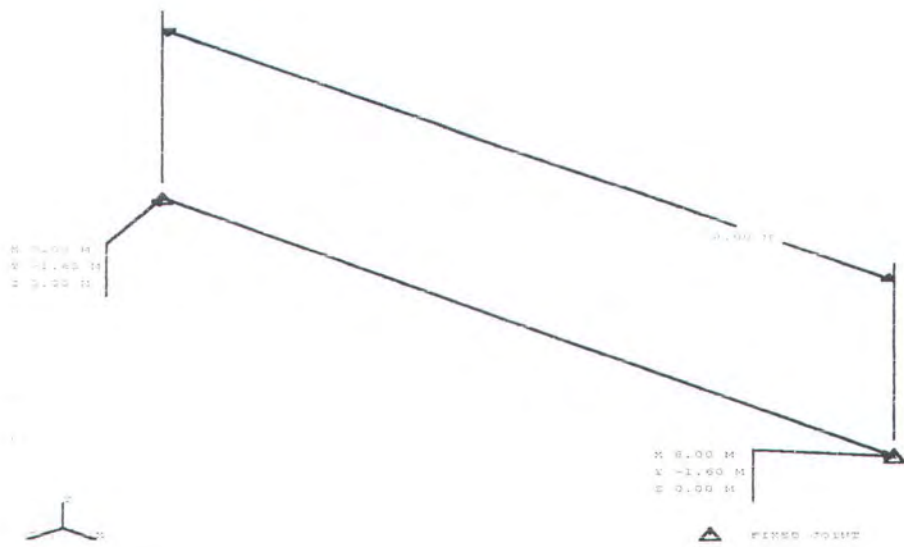
$$\begin{aligned}
 F_c &= 1.24\text{E}+10 \text{ lb} \\
 &= 5.53\text{E}+10 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\frac{F_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)} = 3.76\text{E}+10 \text{ N} \quad \dots\dots(2)$$

maka : $F_d \leq \frac{F_c}{(\gamma_m \cdot \gamma_u)}$ **memenuhi !!!**

LAMPIRAN 2

Hasil Running GT-STRUDL



in Begebenheit



F_{v1}	20113.57	1/10
F_{v2}	20289.5	1/10
	10.7	1/10
	1340	1/10
	148	1/10

Commercial Software Rights Legend

Any use, duplication or disclosure of this software by or for the U.S. Government shall be restricted to the terms of a license agreement in accordance with the clause at DFARS 227.7202-3.

This computer software is an unpublished work containing valuable trade secrets owned by the Georgia Tech Research Corporation (GTRC). No access, use, transfer, duplication or disclosure thereof may be made except under a license agreement executed by GTRC or its authorized representatives and no right, title or interest thereto is conveyed or granted herein, notwithstanding receipt or possession hereof. Decompilation of the object code is strictly prohibited.

Georgia Tech Research Corporation
Georgia Institute of Technology
Atlanta, Georgia 30332 U.S.A.

Copyright (c) 1999 GTRC
ALL RIGHTS RESERVED.

Fri Apr 11 12:38:17 2003

1GTICES/C-NP 2.5.0 MD-NT 2.0, January 1995.
Proprietary to Georgia Tech Research Corporation, U.S.A.

Reading password file C:\Program Files\GTStrudl\25\gtaccess.dat
CI-i-audfile, Command AUDIT file FILE1238.aud has been activated.

*** G T S T R U D L ***

RELEASE DATE	VERSION	COMPLETION NO.
August 30, 2000	25.0	4085

ACTIVE UNITS -	LENGTH	WEIGHT	ANGLE	TEMPERATURE	TIME
ASSUMED TO BE	INCH	POUND	RADIAN	FAHRENHEIT	SECOND

```
( 1) > RESTORE 'C:\My Documents\T-E-D-D-Y (^-^)\T U G A S A K H I R\GT -
( 2) > _STRUDL\MOBILEXXON25.gts'
DAM-i-filFest, Sub-system 25.0 restored from file C:\My Documents\T-E-D-D-Y (^-^)\T U G A S A K H I
```

*** G T S T R U D L ***

RELEASE DATE	VERSION	COMPLETION NO.
August 30, 2000	25.0	4085

**** INFORMATION -- Saved GTSTRUDL version: 25.0
Restored under GTSTRUDL version: 25.0

**** CURRENT GTSTRUDL PROBLEM STATISTICS ****

ACTIVE UNITS: M N DEG DEGF SEC

INPUT MODE: ADDITIONS SCAN MODE INITIATED: NO

CURRENT STRUCTURAL TYPE: SPACE FRAME

	JOINTS	MEMBERS	ELEMENTS	SUPERELEMENTS
ACTIVE	2	1	0	0
INACTIVE	0	0	0	0
RIGID BODIES	0			
JOINT TIES	0			

	LOADS:	INDEPENDENT	DEPENDENT
ACTIVE		6	1
INACTIVE		1	0

(3) > GTMENU
GT STRUDL is initializing GTMenu...
GTMenu has returned to Command Mode.



**** CURRENT GTSTRUDL PROBLEM STATISTICS ****

ACTIVE UNITS: M N DEG DEGF SEC

INPUT MODE: ADDITIONS SCAN MODE INITIATED: NO

CURRENT STRUCTURAL TYPE: SPACE FRAME

	JOINTS	MEMBERS	ELEMENTS	SUPERELEMENTS
ACTIVE	2	1	0	0
INACTIVE	0	0	0	0

RIGID BODIES	0
JOINT TIES	0

	LOADS:	INDEPENDENT	DEPENDENT
ACTIVE		6	1
INACTIVE		1	0

{ 4) > LOAD LIST 'FL' 'CC' 'SW' 'FD' 'FI' 'FLT' 'LCOMBALL'
{ 5) > STIFFNESS ANALYSIS
TIME FOR CONSISTENCY CHECKS FOR 1 MEMBERS 0.00 SECONDS
TIME FOR BANDWIDTH REDUCTION 0.00 SECONDS
TIME TO GENERATE 1 ELEMENT STIF. MATRICES 0.01 SECONDS
TIME TO PROCESS 6 MEMBER LOADS 0.00 SECONDS
TIME TO PROCESS 2 JOINTS 0.00 SECONDS
TIME TO PROCESS 2 JOINT DISPLACEMENTS 0.00 SECONDS
TIME TO PROCESS 1 ELEMENT DISTORTIONS 0.00 SECONDS
TIME FOR STATICS CHECK 0.00 SECONDS
TIME TO GENERATE COMBINED RESULTS 0.00 SECONDS
{ 6) > LIST MAXIMUM JOINT DISPLACEMENT SUMMARY ONLY LOADS ACTIVE

1

RESULTS OF LATEST ANALYSIS

PROBLEM - NONE TITLE - NONE GIVEN

ACTIVE UNITS M N DEG DEGF SEC

****SUMMARY OF MAXIMUM GLOBAL DISPLACEMENTS****
INDEPENDENT IN EACH COORDINATE

```
=====
* RESULT *    MAXIMUM    LOAD    JOINT    *
*-----*
* X-DISP *   0.000000E+00            *
* Y-DISP *   0.000000E+00            *
* Z-DISP *   0.000000E+00            *
=====
```

****SUMMARY OF MAXIMUM GLOBAL DISPLACEMENTS****
SRSS VECTOR LENGTHS

=====

```
* RESULT *    MAXIMUM    LOAD    JOINT *  
*-----*  
* XYZ-DISP * 0.000000E+00 *  
* XY-DISP * 0.000000E+00 *  
* XZ-DISP * 0.000000E+00 *  
* YZ-DISP * 0.000000E+00 *  
*-----*
```

```
{ 7) > PARAMETERS  
{ 8) > CODE APILRFD1 All Members  
{ 9) > CHECK All Members AS BEAM  
1
```

```
*****  
* DESIGN TRACE OUTPUT *  
*****
```

JOBID - NONE TITLE - NONE GIVEN

```
** CODE UNITS ARE USED FOR ALL SECTION FORCES **  
** MEMBERS WHICH FAIL ARE MARKED BY TWO ASTERISKS (**) **  
** SECTION FORCES SHOWN ARE FOR FIRST LOADING AND SECTION **
```

MEMBER CODE	PROFILE TABLE	LOADING NAME	SECTION LOCATION	PROVISION NAME	ACTUAL/ LIMITING	SECTION FORCES			UNITS
						FX/MT	FY/MY	FZ/MZ	TRIALS
M1	PIPE	FI	8.000	D.3.2-2	0.85018	0.000	0.000	371438.062	M N
APILRFD1	PRIS.	FI	8.000	D.2.3-1	0.85018	0.000	495251.000	0.000	0
OD =	0.4570	ID =	0.4320	THI =	0.0125	D/T =	36.5601		

```
*****  
* END OF TRACE OUTPUT *  
*****
```

1

Commercial Software Rights Legend

Any use, duplication or disclosure of this software by or for the U.S. Government shall be restricted to the terms of a license agreement in accordance with the clause at DFARS 227.7202-3.

This computer software is an unpublished work containing valuable trade secrets owned by the Georgia Tech Research Corporation (GTRC). No access, use, transfer, duplication or disclosure thereof may be made except under a license agreement executed by GTRC or its authorized representatives and no right, title or interest thereto is conveyed or granted herein, notwithstanding receipt or possession hereof. Decompilation of the object code is strictly prohibited.

Georgia Tech Research Corporation
Georgia Institute of Technology
Atlanta, Georgia 30332 U.S.A.

Copyright (c) 1999 GTRC
ALL RIGHTS RESERVED.

Fri Apr 11 12:39:29 2003

1GTICES/C-NP 2.5.0 MD-NT 2.0, January 1995.
Proprietary to Georgia Tech Research Corporation, U.S.A.

Reading password file C:\Program Files\GTStrudl\25\gtaccess.dat
CI-i-audfile, Command AUDIT file FILE1239.aud has been activated.

*** G T S T R U D L ***

RELEASE DATE	VERSION	COMPLETION NO.
August 30, 2000	25.0	4085

ACTIVE UNITS -	LENGTH	WEIGHT	ANGLE	TEMPERATURE	TIME
ASSUMED TO BE	INCH	POUND	RADIAN	FAHRENHEIT	SECOND

```
{ 1 } > RESTORE 'C:\My Documents\T-E-D-D-Y (^-^)\T U G A S A K H I R\GT -
{ 2 } > STRUDL\MOBILEXXON26.gts'
DAM-i-filFest, Sub-system 25.0 restored from file C:\My Documents\T-E-D-D-Y (^-^)\T U G A S A K H I
```

*** G T S T R U D L ***

RELEASE DATE	VERSION	COMPLETION NO.
August 30, 2000	25.0	4085

**** INFORMATION -- Saved GTSTRUDL version: 25.0
Restored under GTSTRUDL version: 25.0

**** CURRENT GTSTRUDL PROBLEM STATISTICS ****

ACTIVE UNITS: M N DEG DEGF SEC

INPUT MODE: ADDITIONS SCAN MODE INITIATED: NO

CURRENT STRUCTURAL TYPE: SPACE FRAME

	JOINTS	MEMBERS	ELEMENTS	SUPERELEMENTS
ACTIVE	2	1	0	0
INACTIVE	0	0	0	0
RIGID BODIES	0			
JOINT TIES	0			

	LOADS:	INDEPENDENT	DEPENDENT
ACTIVE		6	1
INACTIVE		1	0

```
{ 3 } > GTMENU
GT STRUDL is initializing GTMenu...
GTMenu has returned to Command Mode.
```

**** CURRENT GTSTRUDL PROBLEM STATISTICS ****

ACTIVE UNITS: M N DEG DEGF SEC

INPUT MODE: ADDITIONS SCAN MODE INITIATED: NO

CURRENT STRUCTURAL TYPE: SPACE FRAME

	JOINTS	MEMBERS	ELEMENTS	SUPERELEMENTS
ACTIVE	2	1	0	0
INACTIVE	0	0	0	0

RIGID BODIES 0
JOINT TIES 0

	LOADS:	INDEPENDENT	DEPENDENT
ACTIVE		6	1
INACTIVE		1	0

(4) > LOAD LIST 'FL' 'CC' 'SW' 'FD' 'FI' 'FLT' 'LCOMBALL'
(5) > STIFFNESS ANALYSIS
TIME FOR CONSISTENCY CHECKS FOR 1 MEMBERS 0.00 SECONDS
TIME FOR BANDWIDTH REDUCTION 0.00 SECONDS
TIME TO GENERATE 1 ELEMENT STIF. MATRICES 0.01 SECONDS
TIME TO PROCESS 6 MEMBER LOADS 0.00 SECONDS
TIME TO PROCESS 2 JOINTS 0.00 SECONDS
TIME TO PROCESS 2 JOINT DISPLACEMENTS 0.00 SECONDS
TIME TO PROCESS 1 ELEMENT DISTORTIONS 0.00 SECONDS
TIME FOR STATICS CHECK 0.00 SECONDS
TIME TO GENERATE COMBINED RESULTS 0.00 SECONDS
(6) > LIST MAXIMUM JOINT DISPLACEMENT SUMMARY ONLY LOADS ACTIVE

1

RESULTS OF LATEST ANALYSIS

PROBLEM - NONE TITLE - NONE GIVEN

ACTIVE UNITS M N DEG DEGF SEC

****SUMMARY OF MAXIMUM GLOBAL DISPLACEMENTS****
INDEPENDENT IN EACH COORDINATE

=====

* RESULT *	MAXIMUM	LOAD	JOINT	*
* X-DISP *	0.000000E+00			*
* Y-DISP *	0.000000E+00			*
* Z-DISP *	0.000000E+00			*

=====

****SUMMARY OF MAXIMUM GLOBAL DISPLACEMENTS****
SRSS VECTOR LENGTHS

=====

```

* RESULT *   MAXIMUM   LOAD   JOINT *
*-----*-----*-----*-----*
* XYZ-DISP * 0.000000E+00 *
* XY-DISP * 0.000000E+00 *
* XZ-DISP * 0.000000E+00 *
* YZ-DISP * 0.000000E+00 *
=====
    
```

```

( 7) > PARAMETERS
( 8) > CODE APILRFD1 All Members
( 9) > CHECK All Members AS BEAM
    
```

```

*****
* DESIGN TRACE OUTPUT *
*****
    
```

JOBID - NONE TITLE - NONE GIVEN

```

** CODE UNITS ARE USED FOR ALL SECTION FORCES **
** MEMBERS WHICH FAIL ARE MARKED BY TWO ASTERISKS (**) **
** SECTION FORCES SHOWN ARE FOR FIRST LOADING AND SECTION **
    
```

MEMBER CODE	PROFILE TABLE	LOADING NAME	SECTION LOCATION	PROVISION NAME	ACTUAL/ LIMITING	SECTION FORCES			UNITS TRIALS
						FX/MT	FY/MY	FZ/MZ	
** M1	PIPE	FI	0.000	D.3.2-2	1.07601	0.000	0.000	-4.179E+05	M N
APILRFD1	PRIS.	FI	0.000	D.2.3-1	1.07601	0.000	626801.875	0.000	0
OD =	0.4570	ID =	0.4320	THI =	0.0125	D/T =	36.5601		

```

*****
* END OF TRACE OUTPUT *
*****
    
```

**** INFO_STTECC -- The following members FAILED CODE CHECKS
 M1

**** INFO_STTECC -- The above failed member names for the CODE CHECKS
 are stored permanently in a group name FAILCK1

**** INFO_STTECC -- Also, the group name FAILCK has been updated to contain the
 FAILED CODE CHECKS member names for this CHECK command.

Commercial Software Rights Legend

Any use, duplication or disclosure of this software by or for the U.S. Government shall be restricted to the terms of a license agreement in accordance with the clause at DFARS 227.7202-3.

This computer software is an unpublished work containing valuable trade secrets owned by the Georgia Tech Research Corporation (GTRC). No access, use, transfer, duplication or disclosure thereof may be made except under a license agreement executed by GTRC or its authorized representatives and no right, title or interest thereto is conveyed or granted herein, notwithstanding receipt or possession hereof. Decompilation of the object code is strictly prohibited.

Georgia Tech Research Corporation
Georgia Institute of Technology
Atlanta, Georgia 30332 U.S.A.

Copyright (c) 1999 GTRC
ALL RIGHTS RESERVED.

Fri Apr 11 12:34:26 2003

IGTICES/C-NP 2.5.0 MD-NT 2.0, January 1995.
Proprietary to Georgia Tech Research Corporation, U.S.A.

Reading password file C:\Program Files\GTStrudl\25\gtaccess.dat
CI-i-audfile, Command AUDIT file FILE1234.aud has been activated.

```

*** G T S T R U D L ***
  RELEASE DATE      VERSION      COMPLETION NO.
  August 30, 2000   25.0          4085

```

```

**** ACTIVE UNITS - LENGTH  WEIGHT  ANGLE  TEMPERATURE  TIME
**** ASSUMED TO BE  INCH    POUND  RADIANT  FAHRENHEIT  SECOND

```

```

( 1 ) > RESTORE 'C:\My Documents\T-E-D-D-Y (^-^)\T U G A S  A K H I R\GT -
( 2 ) > STRUDL\MOBILEXXON23.gts'
DAM-i-filRest, Sub-system 25.0      restored from file C:\My Documents\T-E-D-D-Y (^-^)\T U G A S  A K H I

```

```

*** G T S T R U D L ***
  RELEASE DATE      VERSION      COMPLETION NO.
  August 30, 2000   25.0          4085

```

```

**** INFORMATION -- Saved GTSTRUDL version: 25.0
Restored under GTSTRUDL version: 25.0

```

**** CURRENT GTSTRUDL PROBLEM STATISTICS ****

```

ACTIVE UNITS:      M      N      DEG      DEGF      SEC

INPUT MODE: ADDITIONS          SCAN MODE INITIATED: NO

CURRENT STRUCTURAL TYPE: SPACE FRAME

```

```

          JOINTS      MEMBERS      ELEMENTS      SUPERELEMENTS
ACTIVE          2          1          0          0
INACTIVE        0          0          0          0

RIGID BODIES          0
JOINT TIES            0

```

```

          LOADS:      INDEPENDENT      DEPENDENT
ACTIVE          6          1
INACTIVE        1          0

```

```

( 3 ) > GTMENU
GT STRUDL is initializing GTMenu...
DAM-i-filsave, Sub-system 25.0      saved in file C:\My Documents\T-E-D-D-Y (^-^)\T U G A S  A K H I R\GT

```

GTMenu has returned to Command Mode.

**** CURRENT GTSTRUDL PROBLEM STATISTICS ****

ACTIVE UNITS: M N DEG DEGF SEC

INPUT MODE: ADDITIONS SCAN MODE INITIATED: NO

CURRENT STRUCTURAL TYPE: SPACE FRAME

	JOINTS	MEMBERS	ELEMENTS	SUPERELEMENTS
ACTIVE	2	1	0	0
INACTIVE	0	0	0	0

RIGID BODIES	0
JOINT TIES	0

	LOADS:	INDEPENDENT	DEPENDENT
ACTIVE		6	1
INACTIVE		1	0

{ 4 } > LOAD LIST 'FL' 'CC' 'SW' 'FD' 'FI' 'FLT' 'LCOMBALL'
{ 5 } > STIFFNESS ANALYSIS
TIME FOR CONSISTENCY CHECKS FOR 1 MEMBERS 0.10 SECONDS
TIME FOR BANDWIDTH REDUCTION 0.00 SECONDS
TIME TO GENERATE 1 ELEMENT STIF. MATRICES 0.10 SECONDS
TIME TO PROCESS 6 MEMBER LOADS 0.09 SECONDS
TIME TO PROCESS 2 JOINTS 0.00 SECONDS
TIME TO PROCESS 2 JOINT DISPLACEMENTS 0.00 SECONDS
TIME TO PROCESS 1 ELEMENT DISTORTIONS 0.00 SECONDS
TIME FOR STATICS CHECK 0.00 SECONDS
TIME TO GENERATE COMBINED RESULTS 0.10 SECONDS
{ 6 } > LIST MAXIMUM JOINT DISPLACEMENT SUMMARY ONLY LOADS ACTIVE

1

RESULTS OF LATEST ANALYSIS

PROBLEM - NONE TITLE - NONE GIVEN

ACTIVE UNITS M N DEG DEGF SEC

****SUMMARY OF MAXIMUM GLOBAL DISPLACEMENTS****
INDEPENDENT IN EACH COORDINATE

```
=====
* RESULT *    MAXIMUM    LOAD    JOINT    *
*-----*-----*-----*-----*
* X-DISP *   0.000000E+00       *
* Y-DISP *   0.000000E+00       *
* Z-DISP *   0.000000E+00       *
=====
```

****SUMMARY OF MAXIMUM GLOBAL DISPLACEMENTS****
SRSS VECTOR LENGTHS

```

=====
* RESULT * MAXIMUM LOAD JOINT *
=====
* XYZ-DISP * 0.000000E+00 *
* XY-DISP * 0.000000E+00 *
* XZ-DISP * 0.000000E+00 *
* YZ-DISP * 0.000000E+00 *
=====
    
```

```

( 7) > CHECK All Members AS BEAM
**** STRUCL ERROR 9.04 - VALUE NOT SPECIFIED FOR PARAMETER CODE FOR MEMBER M1
**** STRUCL WARNING 9.02 - CODE CHECK WAS NOT PERFORMED FOR MEMBER M1
    
```

```

**** INFO_STTECC -- The following members FAILED CODE CHECKS
M1
    
```

```

**** INFO_STTECC -- The above failed member names for the CODE CHECKS
are stored permanently in a group name FAILCK1
    
```

```

**** INFO_STTECC -- Also, the group name FAILCK has been updated to contain the
FAILED CODE CHECKS member names for this CHECK command.
    
```

```

( 8) > PARAMETERS
( 9) > CODE APILRFD1 All Members
(10) > SUMMARY YES All Members
(11) > CHECK All Members AS BEAM
1
    
```

```

*****
* DESIGN TRACE OUTPUT *
*****
    
```

JOBID - NONE TITLE - NONE GIVEN

```

** CODE UNITS ARE USED FOR ALL SECTION FORCES **
** MEMBERS WHICH FAIL ARE MARKED BY TWO ASTERISKS (**) **
** SECTION FORCES SHOWN ARE FOR FIRST LOADING AND SECTION **
    
```

MEMBER CODE	PROFILE TABLE	LOADING NAME	SECTION LOCATION	PROVISION NAME	ACTUAL/LIMITING	FX/MT	FY/MY	FZ/MZ	UNITS TRIALS
-------------	---------------	--------------	------------------	----------------	-----------------	-------	-------	-------	--------------

```

**** INFO_MSAHL1 -- A value of 3.0 for parameter CHECK indicates that API Basic Stresses and Hydrostatic
Pressure provisions should be checked for member M1 . None of the Hydrostatic Pressure paramete
have been specified, therefore Hydrostatic Pressure check will not be performed. If you do not want
see this message, set parameter CHECK equal to 1 or specify values for Hydrostatic Pressure parameter
    
```

** M1	PIPE	FI	0.000	D.3.2-2	1.32841	0.000	0.000	-4.643E+05	M N
APILRFD1	PRIS.	FI	0.000	D.2.3-1	1.32841	0.000	773829.562	0.000	0
OD =	0.4570	ID =	0.4320	THI =	0.0125	D/T =	36.5601		

```

*****
* END OF TRACE OUTPUT *
*****
1
    
```

```

**** INFO_STTECC -- The following members FAILED CODE CHECKS
M1
    
```

```

**** INFO_STTECC -- The above failed member names for the CODE CHECKS
are stored permanently in a group name FAILCK2
    
```

```

**** INFO_STTECC -- Also, the group name FAILCK has been updated to contain the
FAILED CODE CHECKS member names for this CHECK command.
    
```

LAMPIRAN 3

Data Lingkungan & Peta

Batimetri

DESKRIPSI RENCANA KEGIATAN

Pengembangan Lapangan Minyak Banyu Urip bertujuan untuk mengeksploitasi minyak bumi yang terdapat di Blok Cepu. Pada sistem produksi awal (*early production system*) pada tahun 2003 diharapkan diperoleh rata-rata minyak sejumlah 25.000 barel/hari, sedangkan pada saat pengembangan penuh (*full field development*) di tahun 2004, maka produksi minyak rata-rata diperkirakan akan mencapai 135.000 barel/hari.

Lapangan Banyu Urip terletak di sebelah Selatan jalan raya Cepu-Bojonegoro, sekitar 120 km arah Barat Daya dari Surabaya. Lapangan Banyu Urip ini terletak di dalam Wilayah Kerja Penambangan (WKP) Blok Cepu dengan luas total 1.903,9 km². Pengembangan Lapangan Banyu Urip akan meliputi dua kabupaten di Propinsi Jawa Timur, yaitu Kabupaten Tuban dan Bojonegoro (**Gambar 1**).

Pengembangan Lapangan Banyu Urip meliputi kegiatan-kegiatan pemboran sumur, pembangunan pusat pemrosesan minyak (Central Processing Facility = CPF) di Desa Mojodelik, pemasangan pipa penyalur minyak darat dari CPF ke fasilitas pantai (*coastal facility*) di Desa Leran Kulon sepanjang 79 km, pemasangan pipa lepas pantai dari fasilitas pantai ke FSO sepanjang 23 km dan pembangunan fasilitas-fasilitas penunjang (seperti: gudang, perumahan, pelabuhan udara, kantor dan kolam penampung air). Secara garis besar, pengembangan Lapangan Banyu Urip akan dilaksanakan dalam dua fase yaitu :

1. Fase I : Produksi Awal (*Early Production*)

Rencana kegiatan yang akan dilakukan pada Fase I ini meliputi :

- a. Penghubungan 3 tapak sumur (*well pad*) ke CPF
- b. Pemasangan pipa 20" sepanjang 79 km dari CPF ke Tuban Coastal Facility (milik Santa Fe Tuban)

Pada fase produksi awal ini, diperkirakan akan dihasilkan 33 kbd (kilobarrel/hari) total *liquid* yang terdiri dari 28 kbd minyak dan 5 kbd air terproduksi. Air terproduksi yang dihasilkan akan diinjeksi kembali ke dalam sumur injeksi (*subsurface disposal*) setelah diolah terlebih dahulu sehingga kualitas air terproduksi telah memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan. Gas

ikutan (*associated gas*) yang dihasilkan akan diinjeksikan kembali ke sumur injeksi gas.

Fase pertama akan dimulai pada Januari 2003.

2. Fase II : Pengembangan Penuh (*Full Field Development*)

Rencana kegiatan yang akan dilakukan pada Fase II adalah :

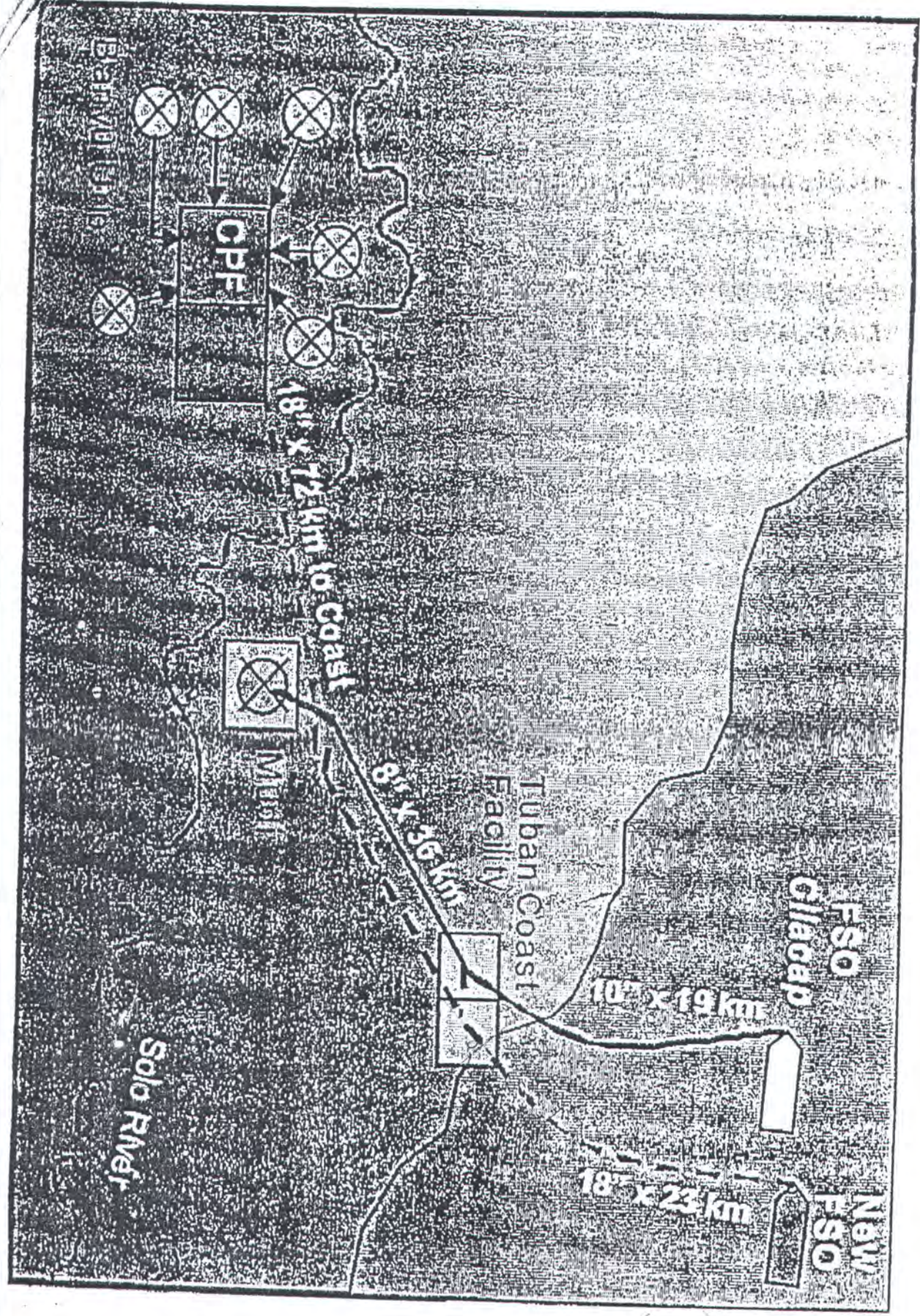
- Penambahan penghubungan 3 tapak sumur ke CPF
- Perluasan CPF sehubungan adanya penambahan fasilitas produksi
- Pemasangan pipa 20" dari Fasilitas Pantai baru ke FSO (*Floating Storage and Off-loading system*) baru sepanjang 23 km
- Pembuatan Fasilitas Pantai yang terpisah dari Santa Fe Tuban
- Pembuatan FSO baru yang terpisah dari Santa Fe Tuban (± 20 km dari garis pantai).

Pada fase ini produksi CPF meliputi:

- 210 kbd total liquid
- 150 kbd minyak
- 160 kbd air terproduksi
- 190 kbd injeksi air
- 75 MSCFD produced gas
- 65 MSCFD gas lift
- 130 kbd fresh water make up
- 26 ton/hari sulfur recovery
- dehidrasi dan injeksi gas asam

Fase II akan dimulai pada Januari 2004.

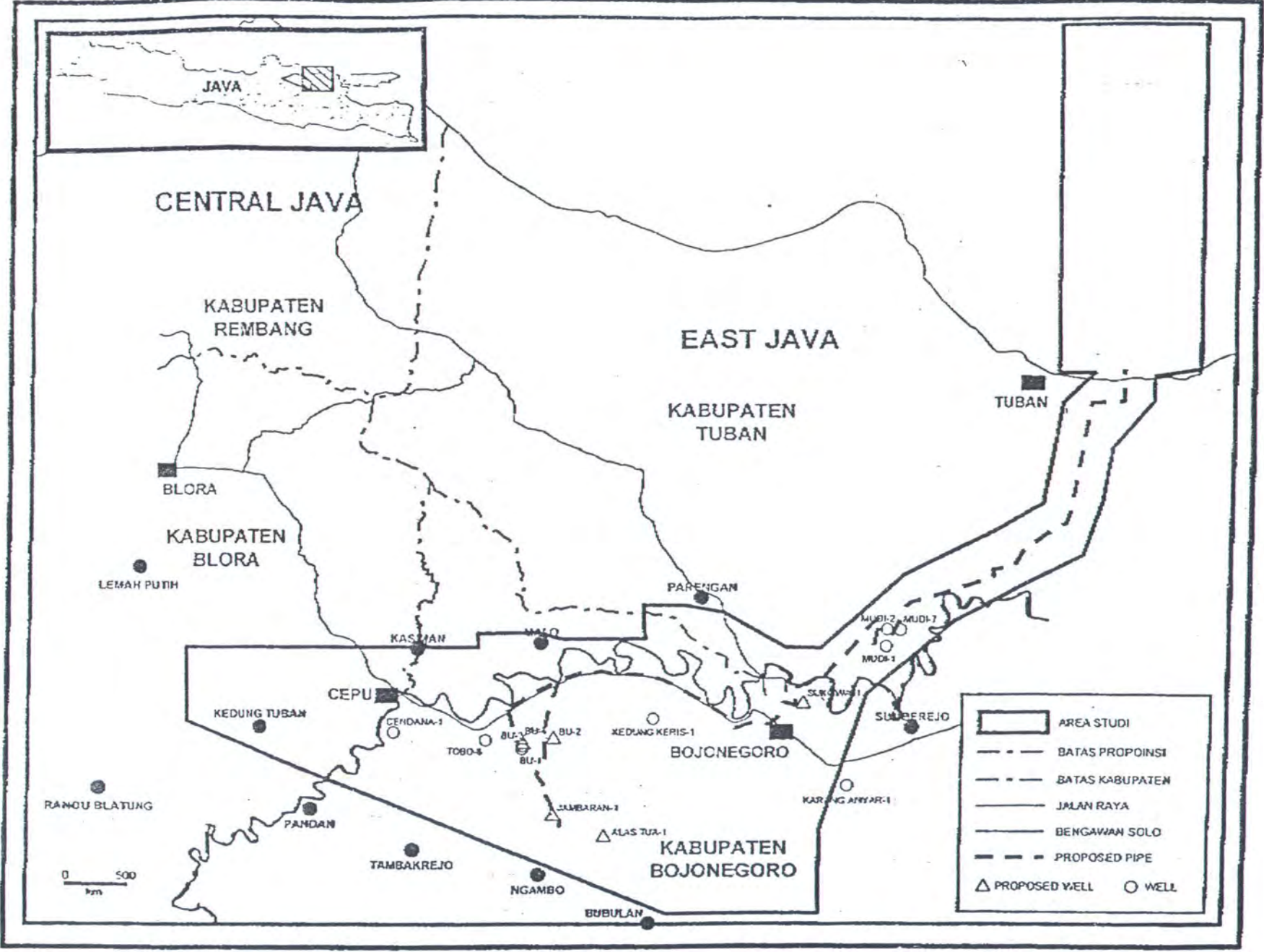
Minyak bumi dari sumur-sumur akan dikumpulkan terlebih dahulu di tapak sumur (*wellpad*) sebelum dialirkan untuk diproses di CPF. Rencananya akan dibangun 6 tapak sumur dengan luas lahan untuk tiap tapak sumur adalah $0,2 \text{ km}^2$. Setelah minyak diproses di CPF, minyak akan dialirkan ke Fasilitas Pantai yang terletak di Desa Leran Kulon melalui pipa 20" sepanjang 79 km, untuk selanjutnya dialirkan melalui pipa lepas pantai sepanjang 23 km ke FSO. Alur proses rencana kegiatan ini ditampilkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Field Layout

$0a = 1.8 \text{ satuan}$
 $sb = 3.75 \text{ satuan}$
 $ba = 2.6 \text{ satuan}$

$b.9 / 10 = 0.9$
 $0.9 \times 10 = 9$
 $9 \times 0.9 = 8.1$



MILIK PERUSAHAAN
 INSTITUT TEKNOLOGI
 SEPULUH - NOPEMBER

Fluid Basis and Product Specifications

Kw	Component	lluv	Full Well	Separator
			Stream	Gas
	Hydrogen Sulfide	34.05	0.85%	1.55%
	Carbon Dioxide	44.01	21.43%	45.26%
900	Nitrogen	27.01	0.08%	0.17%
260	Methane	16.04	21.18%	46.97%
54	Ethane	30.07	1.64%	3.15%
16	Propane	44.10	0.90%	1.39%
5.7	Iso-Butane	57.12	0.25%	0.30%
4.5	N-Butane	58.12	0.41%	0.41%
1.8	Iso-Pentane	72.15	0.23%	0.15%
1.6	N-Pentane	72.15	0.22%	0.12%
0.47	Hexanes	85.18	0.41%	0.12%
0.17	Heptanes	150.20	2.25%	0.25%
0.06	Octanes	114.22	1.95%	0.07%
0.00	Nonanes	128.25	1.84%	0.02%
0.00	Decanes	142.25	1.58%	0.02%
	Undecanes Plus		44.78%	0.05% X
	<u>Total</u>		<u>100.00%</u>	<u>100.00%</u>

Is this a Mole fraction? Yes!

Fluid Data:

-Fluid analysis study completed on carbonate oil sample

-Additional analyses underway

Results:

-32 °API → Specific Gravity

-375 GOR gas oil ratio

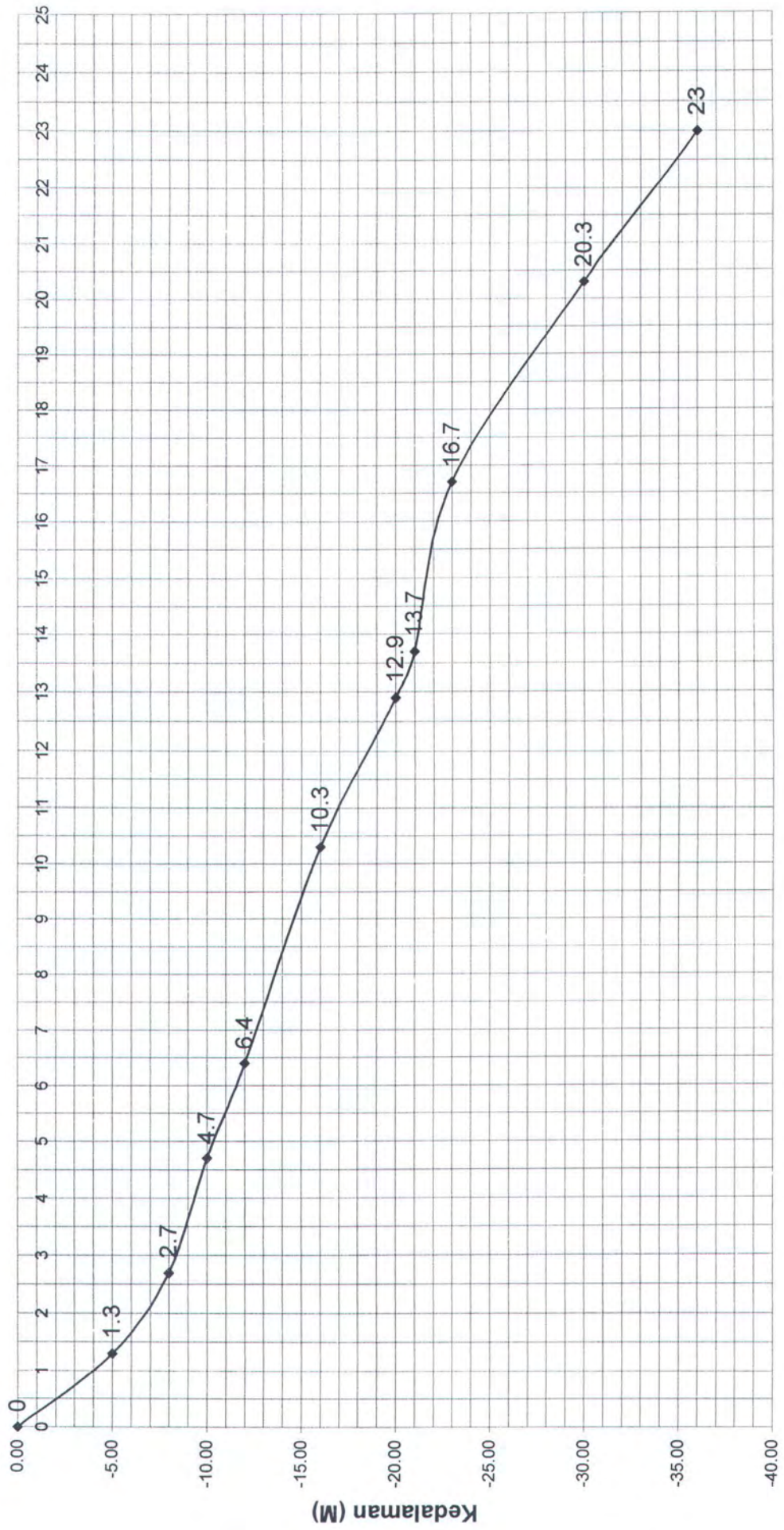
✓ -85-90 °F Pour Point

Crude Specifications:

- True vapor pressure
- Basic sediment and water
- Sulfur content

10.5 psia @ 100F
0.5 %
10 ppm

Kedalaman - Panjang Pipa



Panjang Pipa (KM)

Konversi Kecepatan Angin Arah Timur Laut.
Data Harian

No.	H	T	No.	H	T	No.	H	T	No.	H	T	No.	H	T	No.	H	T
1	2.22	7.82	51	1	5.21	101	0.64	4.4	151	0.64	4.4	201	0.64	4.4	251	0.64	4.4
2	2.22	7.82	52	1	5.21	102	0.64	4.4	152	0.64	4.4	202	0.64	4.4	252	0.64	4.4
3	2.22	7.82	53	1	5.21	103	0.64	4.4	153	0.64	4.4	203	0.64	4.4	253	0.64	4.4
4	2.22	7.82	54	1	5.21	104	0.64	4.4	154	0.64	4.4	204	0.64	4.4	254	0.64	4.4
5	2.22	7.82	55	1	5.21	105	0.64	4.4	155	0.64	4.4	205	0.64	4.4	255	0.64	4.4
6	2.22	7.82	56	1	5.21	106	0.64	4.4	156	0.64	4.4	206	0.64	4.4	256	0.64	4.4
7	1.58	6.45	57	1	5.21	107	0.64	4.4	157	0.64	4.4	207	0.64	4.4	257	0.64	4.4
8	1.5	6.5	58	1	5.21	108	0.64	4.4	158	0.64	4.4	208	0.64	4.4	258	0.64	4.4
9	1.5	6.5	59	1	5.21	109	0.64	4.4	159	0.64	4.4	209	0.64	4.4	259	0.64	4.4
10	1.5	6.5	60	1	5.21	110	0.64	4.4	160	0.64	4.4	210	0.64	4.4	260	0.64	4.4
11	1.5	6.5	61	1	5.21	111	0.64	4.4	161	0.64	4.4	211	0.64	4.4	261	0.64	4.4
12	1.5	6.5	62	1	5.21	112	0.64	4.4	162	0.64	4.4	212	0.64	4.4	262	0.64	4.4
13	1.5	6.5	63	1	5.21	113	0.64	4.4	163	0.64	4.4	213	0.64	4.4	263	0.64	4.4
14	1.5	6.5	64	1	5.21	114	0.64	4.4	164	0.64	4.4	214	0.64	4.4	264	0.64	4.4
15	1.5	6.5	65	1	5.21	115	0.64	4.4	165	0.64	4.4	215	0.64	4.4	265	0.64	4.4
16	1.5	6.5	66	1	5.21	116	0.64	4.4	166	0.64	4.4	216	0.64	4.4	266	0.64	4.4
17	1.5	6.5	67	1	5.21	117	0.64	4.4	167	0.64	4.4	217	0.64	4.4	267	0.64	4.4
18	1.5	6.5	68	1	5.21	118	0.64	4.4	168	0.64	4.4	218	0.64	4.4	268	0.64	4.4
19	1.5	6.5	69	1	5.21	119	0.64	4.4	169	0.64	4.4	219	0.64	4.4	269	0.64	4.4
20	1.5	6.5	70	1	5.21	120	0.64	4.4	170	0.64	4.4	220	0.64	4.4	270	0.64	4.4
21	1.5	6.5	71	1	5.21	121	0.64	4.4	171	0.64	4.4	221	0.64	4.4	271	0.64	4.4
22	1.5	6.5	72	1	5.21	122	0.64	4.4	172	0.64	4.4	222	0.64	4.4	272	0.64	4.4
23	1.5	6.5	73	1	5.21	123	0.64	4.4	173	0.64	4.4	223	0.64	4.4	273	0.64	4.4
24	1.5	6.5	74	1	5.21	124	0.64	4.4	174	0.64	4.4	224	0.64	4.4	274	0.64	4.4
25	1.5	6.5	75	1	5.21	125	0.64	4.4	175	0.64	4.4	225	0.64	4.4			
26	1.5	6.5	76	1	5.21	126	0.64	4.4	176	0.64	4.4	226	0.64	4.4			
27	1.5	6.5	77	1	5.21	127	0.64	4.4	177	0.64	4.4	227	0.64	4.4			
28	1.5	6.5	78	1	5.21	128	0.64	4.4	178	0.64	4.4	228	0.64	4.4			
29	1.5	6.5	79	1	5.21	129	0.64	4.4	179	0.64	4.4	229	0.64	4.4			
30	1.5	6.5	80	1	5.21	130	0.64	4.4	180	0.64	4.4	230	0.64	4.4			
31	1.5	6.5	81	0.7	4.4	131	0.64	4.4	181	0.64	4.4	231	0.64	4.4			
32	1.5	6.5	82	0.7	4.4	132	0.64	4.4	182	0.64	4.4	232	0.64	4.4			
33	1.25	5.89	83	0.7	4.4	133	0.64	4.4	183	0.64	4.4	233	0.64	4.4			
34	1.25	5.89	84	0.7	4.4	134	0.64	4.4	184	0.64	4.4	234	0.64	4.4			
35	1.25	5.89	85	0.7	4.4	135	0.64	4.4	185	0.64	4.4	235	0.64	4.4			
36	1.25	5.89	86	0.7	4.4	136	0.64	4.4	186	0.64	4.4	236	0.64	4.4			
37	1.25	5.89	87	0.7	4.4	137	0.64	4.4	187	0.64	4.4	237	0.64	4.4			
38	1.25	5.89	88	0.7	4.4	138	0.64	4.4	188	0.64	4.4	238	0.64	4.4			
39	1.25	5.89	89	0.7	4.4	139	0.64	4.4	189	0.64	4.4	239	0.64	4.4			
40	1.25	5.89	90	0.7	4.4	140	0.64	4.4	190	0.64	4.4	240	0.64	4.4			
41	1.25	5.89	91	0.7	4.4	141	0.64	4.4	191	0.64	4.4	241	0.64	4.4			
42	1.25	5.89	92	0.7	4.4	142	0.64	4.4	192	0.64	4.4	242	0.64	4.4			
43	1	5.21	93	0.7	4.4	143	0.64	4.4	193	0.64	4.4	243	0.64	4.4			
44	1	5.21	94	0.7	4.4	144	0.64	4.4	194	0.64	4.4	244	0.64	4.4			
45	1	5.21	95	0.7	4.4	145	0.64	4.4	195	0.64	4.4	245	0.64	4.4			
46	1	5.21	96	0.64	4.4	146	0.64	4.4	196	0.64	4.4	246	0.64	4.4			
47	1	5.21	97	0.64	4.4	147	0.64	4.4	197	0.64	4.4	247	0.64	4.4			
48	1	5.21	98	0.64	4.4	148	0.64	4.4	198	0.64	4.4	248	0.64	4.4			
49	1	5.21	99	0.64	4.4	149	0.64	4.4	199	0.64	4.4	249	0.64	4.4			
50	1	5.21	100	0.64	4.4	150	0.64	4.4	200	0.64	4.4	250	0.64	4.4			

Data urutan 1/3 terbesar :

No.	H	T	No.	H	T
1	2.22	7.82	51	1	5.21
2	2.22	7.82	52	1	5.21
3	2.22	7.82	53	1	5.21
4	2.22	7.82	54	1	5.21
5	2.22	7.82	55	1	5.21
6	2.22	7.82	56	1	5.21
7	1.58	6.45	57	1	5.21
8	1.5	6.5	58	1	5.21
9	1.5	6.5	59	1	5.21
10	1.5	6.5	60	1	5.21
11	1.5	6.5	61	1	5.21
12	1.5	6.5	62	1	5.21
13	1.5	6.5	63	1	5.21
14	1.5	6.5	64	1	5.21
15	1.5	6.5	65	1	5.21
16	1.5	6.5	66	1	5.21
17	1.5	6.5	67	1	5.21
18	1.5	6.5	68	1	5.21
19	1.5	6.5	69	1	5.21
20	1.5	6.5	70	1	5.21
21	1.5	6.5	71	1	5.21
22	1.5	6.5	72	1	5.21
23	1.5	6.5	73	1	5.21
24	1.5	6.5	74	1	5.21
25	1.5	6.5	75	1	5.21
26	1.5	6.5	76	1	5.21
27	1.5	6.5	77	1	5.21
28	1.5	6.5	78	1	5.21
29	1.5	6.5	79	1	5.21
30	1.5	6.5	80	1	5.21
31	1.5	6.5	81	0.7	4.4
32	1.5	6.5	82	0.7	4.4
33	1.25	5.89	83	0.7	4.4
34	1.25	5.89	84	0.7	4.4
35	1.25	5.89	85	0.7	4.4
36	1.25	5.89	86	0.7	4.4
37	1.25	5.89	87	0.7	4.4
38	1.25	5.89	88	0.7	4.4
39	1.25	5.89	89	0.7	4.4
40	1.25	5.89	90	0.7	4.4
41	1.25	5.89	91	0.7	4.4
42	1.25	5.89	Σ	110.6	521.15
43	1	5.21	Hs = 1.22 Ts = 5.73 meter sekon		
44	1	5.21			
45	1	5.21			
46	1	5.21			
47	1	5.21			
48	1	5.21			
49	1	5.21			
50	1	5.21			

