

**ANALISA KETEBALAN DAN STABILITAS PIPA BAWAH LAUT DI KAWASAN
KERJA BLOK MASELA PULAU YAMDENA**



**AHMAD FAIQ DHIYULHAQ KARYA
D08119 10 12**



**DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

LEMBAR PENGESAHAN**ANALISA KETEBALAN DAN STABILITAS PIPA BAWAH LAUT DI KAWASAN
KERJA BLOK MASELA PULAU YAMDENA**

Disusun dan diajukan oleh

Ahmad Faiq Dhiyaulhaq Karya
D081191012

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana pada Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 30 Mei 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing I,



Ir. Juswan, M.T
NIP. 19621231 198903 1031

Pembimbing II,



Fuad Mahfud Assidiq, S.T., M.T
NIP. 19950929 202101 5001

Ketua Departemen,



Dr. Ir. Chairul Paotonan, S.T., M.T
NIP. 19750605 200212 1003



PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul "Analisa Ketebalan dan Stabilitas Pipa Bawah Laut di Kawasan Kerja Blok Masela Pulau Yamdena" dengan arahan dari Pembimbing Ir. Juswan, M.T dan Fuad Mahfud Assidiq, S.T., M.T. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 30 Mei 2024



Anmad Faiq Dhiyaulhaq Karya

NIM D081191012



Optimized using
trial version
www.balesio.com

ABSTRAK

AHMAD FAIQ DHIYULHAQ KARYA. *ANALISA KETEBALAN DAN STABILITAS PIPA BAWAH LAUT DI KAWASAN KERJA BLOK MASELA PULAU YAMDENA* (dibimbing oleh **Ir. Juswan, M.T.** dan **Fuad Mahfud Assidiq, S.T., M.T.**)

Pipa bawah laut atau *submarine pipeline* merupakan alat atau konsep transportasi yang digunakan untuk mengangkut produk hidrokarbon seperti minyak mentah, gas alam bertekanan tinggi. Bahan fluida yang dibawa atau gas dipompa dari *platform* melewati dasar laut dengan menggunakan *pipeline*. Lapangan Abadi Wilayah Kerja Masela (Blok Masela) merupakan salah satu Proyek Strategis Nasional (PSN) yang terletak di Kabupaten Kepulauan Tanimbar, Maluku. Wilayah kerja ini dikembangkan oleh perusahaan INPEX Masela Ltd. Blok ini secara geografis berbatasan dengan Timor Leste dan Australia. Cadangan ini pertama kali ditemukan pada tahun 2000 dan memiliki potensi cadangan gas yang sangat besar yang mencapai 10,73 triliun kaki kubik (Tcf). Penelitian ini bertujuan untuk menentukan ketebalan minimum pipa bawah laut, menentukan stabilitas vertikal dan stabilitas lateral yang sesuai dengan DNV RP-F109 dan visualisasi tekanan maksimal yang disebabkan oleh aliran arus signifikan terhadap permukaan pipa dengan menggunakan *software* Ansys *Computational Fluid Dynamics 2023 R2 Student Version*. Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif. Pada hasil analisis yang telah diperoleh, ketebalan pipa 11,2 mm dengan menghitung stabilitas vertikal yang diperoleh 0,012 dan stabilitas lateral 0,008. Selain itu, dengan menggunakan *software* Ansys *Computational Fluid Dynamics 2023 R2 Student Version*, diperoleh nilai tekanan maksimal (pressure max) sebesar 14 Pa.

Kata Kunci: Ketebalan Pipa, *Pipeline*, Stabilitas



ABSTRACT

AHMAD FAIQ DHIYAUHAQ KARYA. *ANALYSIS OF WALL THICKNESS AND ON-BOTTOM STABILITY OF SUBMARINE PIPELINE IN MASELA BLOCK YAMDENA ISLAND* (supervised by **Ir. Juswan, M.T.** and **Fuad Mahfud Assidiq, S.T., M.T.**)

Submarine pipeline is a transportation or concept used to transport hydrocarbon products such as crude oil and high-pressure natural gas. The fluid material or gas is pumped from the platform across the seabed using a pipeline. The Abadi Field in the Masela Block is one of the National Strategic Projects (PSN) located in the Tanimbar Islands Regency, Maluku Province. The block was developed by INPEX Masela Ltd. It geographically borders to Timor Leste and Australia. It was discovered in 2000 and contains potential gas reserves which reaching 10.73 trillion cubic feet (Tcf). This research aims to determine the minimum thickness of submarine pipelines, determine on-bottom stability in accordance with DNV RP-F109, and visualize the maximum pressure caused by significant current flow on the pipe surface by using Ansys Computational Fluid Dynamics 2023 R2 Student Version. This research method is used a quantitative. The analysis result of this research that have been obtained, the thickness of the pipe is 11.2 mm. The calculated of on-bottom stability is 0.012 for vertical and 0.008 for lateral stability. In Additionally, by using Ansys Computational Fluid Dynamics 2023 R2 Student Version, maximum pressure of the pipe is 14 Pa.

Keywords: Pipeline, Stability, Wall Thickness



Optimized using
trial version
www.balesio.com

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	II
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	III
ABSTRAK.....	IV
ABSTRACT	V
DAFTAR ISI	VI
DAFTAR GAMBAR	VIII
DAFTAR TABEL	IX
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	X
DAFTAR LAMPIRAN	XIII
UCAPAN TERIMA KASIH.....	I
BAB I PENDAHULUAN.....	3
1.1 LATAR BELAKANG.....	3
1.2 RUMUSAN MASALAH	4
1.3 TUJUAN PENELITIAN	4
1.4 MANFAAT PENELITIAN.....	4
1.5 BATASAN MASALAH.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 GAMBARAN UMUM <i>PIPELINE</i>	6
2.2 PIPA BAWAH LAUT.....	7
2.3 PROSES DESAIN PIPA BAWAH LAUT.....	8
2.4 GAMBARAN UMUM KETEBALAN PIPA.....	10
2.5 RESISTENSI TANAH ATAU <i>PASSIVE RESISTANCE</i>	12
2.6 KONDISI ARUS	14
2.7 KONDISI JANGKA PENDEK GELOMBANG (<i>SHORT TERM WAVE</i>)	15
2.8 STABILITAS PIPA BAWAH LAUT	17
AMIKA	20
IM MENGENAI REGULASI	20
NELITIAN	21
IAN	21
N.....	21
TIAN.....	21



3.4 PROSEDUR PENELITIAN	21
3.5 TEMPAT PENELITIAN.....	22
3.6 DIAGRAM ALIR	22
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	22
4.1 PENENTUAN KETEBALAN PIPA	23
4.1.1 RUTE JALUR PIPA BAWAH LAUT.....	23
4.1.2 BATHIMETRI.....	24
4.1.3 DATA MATERIAL PIPA	26
4.1.4 KETEBALAN PIPA BERDASARKAN <i>PRESSURE CONTAINMENT</i>	26
4.1.5 PERHITUNGAN TEKANAN HIDROSTATIK.....	27
4.1.6 PERHITUNGAN <i>COLLAPSE DUE TO EXTERNAL PRESSURE</i>	28
4.1.7 PERHITUNGAN <i>PROPAGATION BUCKLING</i>	28
4.1.8 PERHITUNGAN <i>BUCKLING</i> AKIBAT KOMBINASI <i>BENDING</i>	29
4.1.9 PENENTUAN KETEBALAN PIPA.....	29
4.2 ANALISA STABILITAS ATAU <i>ON-BOTTOM STABILITY</i>	30
4.2.1 GELOMBANG DAN ARUS.....	30
4.2.2 RESISTENSI TANAH.....	33
4.2.3 GAYA HIDRODINAMIKA	34
4.2.4 STABILITAS VERTIKAL	34
4.2.5 STABILITAS LATERAL.....	35
4.3 SIMULASI ANSYS CFD	36
BAB V PENUTUP.....	40
5.1 KESIMPULAN.....	40
5.2 SARAN	40
DAFTAR PUSTAKA	41
LAMPIRAN	42



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Lapangan Abadi Wilayah Kerja.....	3
Gambar 2 <i>Submarine Pipeline</i>	6
Gambar 3 <i>Offshore Pipeline</i>	7
Gambar 4 Proses Desain Pipeline	9
Gambar 5 Pipa dan Komponen-Komponen.....	10
Gambar 6 Ilustrasi <i>Trenching</i>	14
Gambar 7 Ilustrasi Penetrasi Pada Pipa.....	14
Gambar 8 Diagram Alir	22
Gambar 9 Layout Rute 2 Pulau Yamdena ke FPSO	24
Gambar 10 Peta Bathimetri	25
Gambar 11 Grafik Spektrum JONSWAP	31
Gambar 12 <i>Geometry</i> Pipa Bawah Laut.....	37
Gambar 13 Kontur Tekanan Pipa Pada Arah Datang Aliran	37
Gambar 14 Kontur Tekanan Pada Bagian Belakang Pipa	38
Gambar 15 Aliran <i>Streamline</i>	38
Gambar 16 Arah Datang Kecepatan.....	39



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Kekasaran Dasar Laut (seabed)	15
Tabel 2 <i>Safety factors, winter and storms in North Sea</i>	19
Tabel 3 <i>Safety factors, winter and storms in Gulf of Mexico</i>	19
Tabel 4 <i>Safety factors, cyclonic conditions in North West Shelf</i>	20
Tabel 5 <i>Safety factors, cyclonic conditions in Gulf of Mexico</i>	20
Tabel 6 Rute dan Jarak Pulau Yamdena ke FPSO	23
Tabel 7 Data dan Properties dari Material Pipa	26
Tabel 8 Ketebalan Pipa Pressure Containment.....	27
Tabel 9 Faktor-Faktor Variabel	27
Tabel 10 Tekanan Hidrostatik	27
Tabel 11 Ketebalan Pipa dan <i>Hydrostatic Collapse</i>	28
Tabel 12 Ketebalan Pipa dan <i>Propagation Buckling</i>	29
Tabel 13 Ketebalan Pipa Berdasarkan <i>Combination Bending</i>	29
Tabel 14 Ketebalan Pipa.....	29
Tabel 15 Data Gelombang Kawasan Kerja Masela.....	30
Tabel 16 Bilangan Gelombang	31
Tabel 17 Nilai Momen Spektra Orde.....	32
Tabel 18 Nilai Kecepatan Arus Signifikan dan Periode	32
Tabel 19 Nilai Kecepatan Aliran Akibat Arus	32
Tabel 20 <i>Dry Unit Soil Weight</i>	33
Tabel 21 Nilai Faktor Reduksi Beban Arah.....	33
Tabel 22 <i>Passive Resistance</i>	33
Tabel 23 Gaya Hidrodinamika	34
Tabel 24 Berat Baja, Beton dan Korosi.....	35
Tabel 25 Stabilitas Vertikal	35
Tabel 26 Stabilitas Lateral	36



DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti, Keterangan dan Satuan
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
b	Gaya apung (N/m)
d	Kedalaman permukaan laut (m)
D	Diameter pipa (m)
D_{tot}	Diameter pipa termasuk <i>coating</i> dan korosi (m)
D_i	Diameter luar pipa (m)
D_s	Diameter dalam pipa (m)
D_{st}	Diameter total pipa (m)
d_{50}	Ukuran butir (mm)
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
C_{*y}	Koefisien beban puncak horizontal
C_{*z}	Koefisien beban puncak vertikal
E	<i>Weld joint factor</i>
F	<i>Design factor</i>
F_c	Gaya yang bekerja antara tanah dan pipa (N/m)
F_R	Resistensi tanah pasif (N/m)
F_i	Gaya inersia (N/m)
F_D	Gaya hambatan (N/m)
F_L	Gaya angkat (N/m)
F_{*y}	Beban hidrodinamika puncak horizontal
F_{*z}	Beban hidrodinamika puncak vertikal
g	Percepatan gravitasi (9.81 m/s ²)
$G(\omega)$	<i>Transfer function</i> (m/s)
G_c	<i>Soil strength parameter</i>
H_s	Gelombang tinggi signifikan (m)
k	Bilangan gelombang
k_U	Rasio antara amplitude kecepatan desain tunggal dan amplitude kecepatan desain spektral
k_T	Rasio antara periode kecepatan osilasi desain tunggal dan periode <i>mean zero up-crossing</i>
	Momen spektra untuk orde ke-n
	Momen spektra untuk orde pertama
	Momen spektra untuk orde kedua
	Momen spektra untuk orde keempat

M^*	<i>Steady to oscillatory velocity ratio for single design oscillation</i>
P_e	<i>Collapse pressure of the pipe (MPa)</i>
P_h	Tekanan hidrostatik (Pa)
P_i	<i>Internal pressure in the pipe (MPa)</i>
P_o	<i>External pressure of the pipe (MPa)</i>
r_{tot}	Faktor reduksi beban total
$r_{tot,y}$	Faktor reduksi total arah vertikal
$r_{tot,z}$	Faktor reduksi total arah horizontal
r_{perm}	Faktor reduksi beban akibat <i>permeable</i>
r_{pen}	Faktor reduksi beban akibat penetrasi
r_{tr}	Faktor reduksi beban akibat <i>trenching</i>
S_y	<i>Specified Minimum Yield Strength (MPa)</i>
S_{nn}	<i>Wave spektral density</i>
S_{UU}	<i>Wave induced velocity spectrum</i>
S_u	<i>Undrained clay shear strength (Pa)</i>
T	Periode gelombang (s)
T	<i>Temperature derating factor</i>
t	Ketebalan nominal (inch)
t_{corr}	Ketebalan korosi (mm)
T_u	<i>Mean zero up-crossing period osilasi pada permukaan pipa (s)</i>
T_n	Periode referensi (s)
T^*	<i>Period associated with single design oscillation (s)</i>
U_s	Kecepatan aliran signifikan pada permukaan pipa (m/s)
U^*	<i>Oscillatory velocity amplitude for single design oscillation, perpendicular to pipeline (m/s)</i>
V^*	<i>Steady current velocity associated with design oscillation, perpendicular to pipeline (m/s)</i>
$V_{(z)}$	Kecepatan arus pada elevasi pipa (m/s)
$V_{(z_r)}$	Kecepatan arus acuan pada pipa (m/s)
$V_c(z_r)$	Kecepatan rata-rata tegak lurus acuan terhadap diameter pipa (m/s)
W_s	Berat terendam pipa per satuan panjang (N/m)
W_{air}	Berat pipa di udara (N/m)
	Berat lapisan anti karat di udara (N/m)
	Berat lapisan <i>concrete</i> di udara (N/m)
	Berat pengisi pipa (N/m)
	Elevasi diatas permukaan dasar laut (m)
	Kedalaman penetrasi (m)
	Kedalaman <i>trench</i> (m)



Z_{pi}	Kedalaman penetrasi awal (m)
Z_{pm}	Kedalaman penetrasi akibat pergerakan pipa (m)
z_p	Kedalaman penetrasi total (m)
z_r	Tinggi pipa diatas permukaan dasar laut (m)
z_0	Kekasaran tanah (m)
α	Konstanta <i>Generalized Philips</i>
μ	Koefisien Gesek
θ_c	Sudut antara arah datang arus dan pipa, arah tegak lurus 90° (<i>perpendicular</i>)
ρ_{sw}	Massa jenis air laut (kg/m ³)
ρ_c	Massa jenis beton (kg/m ³)
ρ_{cont}	Massa jenis pipa (kg/m ³)
ρ_{corr}	Massa jenis korosi (kg/m ³)
ρ_{st}	Massa jenis baja (kg/m ³)
γ	<i>Peak-enhancement factor</i>
γ_w	<i>Safety factor</i> (1,1 untuk stabilitas vertikal)
γ_{sc}	<i>Safety factor</i> (lihat pada Tabel 2, Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5)
γ_s	<i>Dry unit soil weight</i> (18000 N/m ³ untuk tanah lempung)
ν	<i>Poisson ratio</i> (0,3 untuk baja)
φ	Fungsi distribusi dari <i>peak-enhancement factor</i>
σ	Parameter lebar spektra
π	Phi (3,14)
ω	Frekuensi gelombang (rad/s)
ω^n	Frekuensi gelombang ke-n (rad/s)
ω_p	Frekuensi gelombang puncak (rad/s)



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. <i>Design Factor</i>	43
Lampiran 2. <i>Temperature</i>	43
Lampiran 3. <i>Weld Joint Factor</i>	44
Lampiran 4. Perhitungan <i>Pressure Containment</i> dan Tekanan Hidrostatik	45
Lampiran 5. Perhitungan Ketebalan Pipa <i>Collapse Due to External Pressure</i>	45
Lampiran 6. Perhitungan Ketebalan Pipa Berdasarkan <i>Bending Combination</i>	46
Lampiran 7. Perhitungan Ketebalan Pipa Berdasarkan <i>Propagation Buckling</i>	46
Lampiran 8. Ketebalan Total Minimum	47
Lampiran 9. Berat Terendam Pipa.....	47
Lampiran 10. Perhitungan Stabilitas Vertikal	48
Lampiran 11. Perhitungan Gelombang	48
Lampiran 12. Perhitungan Arus	56
Lampiran 13. Perhitungan Tanah	56
Lampiran 14. Perhitungan Stabilitas Lateral	57



UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah Rabbil 'Aalamin

Syukur dihaturkan kepada Allah SWT sang penguasa alam semesta, atas berkah rahmat dan rahim-Nya yang telah tercurahkan kepada penulis sehingga skripsi ini akhirnya dapat terselesaikan.

Selesaiannya skripsi ini tidak terlepas dari bantuan dan dorongan dari banyak pihak, untuk itu penulis menyampaikan permohonan maaf dan rasa terima kasih serta hormat yang setinggi-tingginya kepada semua pihak yang telah mendukung penyelesaian penulisan skripsi ini.

Secara istimewa, penulis menghaturkan terima kasih untuk kedua orang tua penulis Ayahanda (**Karya Laksana Azhury, S.T**), Ibunda (**Andi Surya T**) dan Adik (**Fadhilah Salsabila Karya**) tercinta atas segala doa, nasihat, dukungan moral dan materi selama menempuh pendidikan dasar hingga menamatkan studi di Universitas Hasanuddin.

Dan penulis menghaturkan dengan penuh rasa terima kasih sebesar-besarnya kepada kedua paman penulis (**Faqih Azhury, S.E**) dan (**Musa Jaya Azhury, S.T**) atas segala dukungan moral dan materi selama penulis menempuh pendidikan dasar hingga menamatkan studi di Universitas Hasanuddin.

Dengan rasa rendah hati, penulis menyampaikan rasa terima kasih dan dukungan yang tulus kepada :

1. Bapak **Ir. Juswan M.T**, selaku pembimbing I yang telah memberikan arahan dalam proses pengerjaan skripsi.
2. Bapak **Fuad Mahfud Assidiq, S.T., M.T**, selaku pembimbing II yang telah meluangkan waktunya kepada penulis dalam memberikan arahan sehingga skripsi ini dapat selesai
3. Bapak **Dr. Ir. Taufiqur Rachman, S.T., M.T., IPU**, selaku Penasihat Akademik yang memberikan arahan dan saran selama menempuh pendidikan di Universitas Hasanuddin
4. Bapak **Dr. Ir. Chairul Paotonan, S.T., M.T**, selaku kepala Departemen Teknik Kelautan, para dosen, staff dan karyawan Departemen Teknik Kelautan yang dengan kebijaksanaan telah memberikan motivasi bagi penulis.
5. Teman-teman Teknik Kelautan 2019 (**pazzenger19**) atas segala motivasi, bantuan, canda tawa dan segala kenangan selama di himpunan, Naval B, B28, F33, ROV, Pondok Anugrah, Pondok Berlian, Pondok Tayuri, Geotek Dimanapun kalian berada, semoga kesuksesan menyertai



1, kakak-kakak dan adik-adik di Gedung Belakang; Teknik 2019 (**ztarboard19**), Teknik Sistem Perkapalan 2019 (**9**), Perkapalan 2015 (**platform15**), Perkapalan 2017 (**7**), Perkapalan 2018 (**thruzter18**) dan Teknik Kelautan 2021 atas segala bantuan proses pengerjaan tugas-tugas besar dan

kenangan-kenangan yang telah kebersamai penulis selama menempuh pendidikan di Universitas Hasanuddin.

7. Keluarga besar **SKM PERKAPALAN UNHAS**, atas segala dukungan, motivasi dan kenangan di mabes tercinta, yang kenangannya kini masih kebersamai penulis. Demi Loyalitas dan Kehormatan.
8. Kepada **A. Faiqah Angraini, S.Ked**, yang telah memberikan motivasi, semangat serta arahan kepada penulis selama menempuh studi di Universitas Hasanuddin.
9. Serta kepada seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu. Terima kasih atas segala bantuan yang telah diberikan kepada penulis. Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan yang telah diberikan.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan sehingga saran dan kritikan yang sifatnya membangun dari semua pihak sangatlah diharapkan guna pengembangan skripsi ini ke depan.

Akhirnya penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Penulis



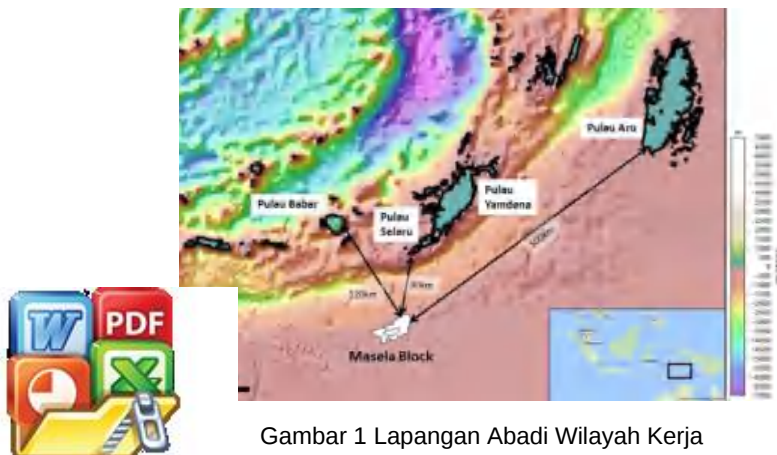
BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Lapangan Abadi Wilayah Kerja Masela (Blok Masela) merupakan salah satu Proyek Strategis Nasional (PSN) yang terletak di Kabupaten Kepulauan Tanimbar, Maluku. Wilayah kerja ini dikembangkan oleh perusahaan INPEX Masela Ltd. Daerah ini merupakan lapangan minyak dan gas terbesar yang berada di Indonesia. Blok ini secara geografis berbatasan dengan Timor Leste dan Australia. Cadangan ini pertama kali ditemukan pada tahun 2000 dan memiliki potensi cadangan gas yang sangat besar yang mencapai 10,73 triliun kaki kubik (Tcf). Cadangan ini tiga kali lebih besar dari cadangan minyak dan gas di Blok Mahakam. Beberapa ahli mengklaim cadangan ini tidak mengalami kekurangan hingga 70 tahun ke depan. Kapasitas cadangan minyak tersebut menarik perhatian publik hingga investor asing.

Proyek Blok Masela dilakukan di zona seluas sekitar 4.291,35 km² di Laut Arafura dan sekitar 800 km di sisi timur Kota Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Konsep yang digunakan untuk mengeksploitasi gas alam ini menggunakan konsep *onshore-offshore*. Dari konsep *offshore*, pipa-pipa dipasang di kedalaman laut lalu disalurkan melalui pipa ke darat sekitar 180-200 km. Aliran gas ke *onshore* mendukung operasi industri petrokimia.

Hingga saat ini, proyek tersebut masih dalam pengembangan. Pengembangan ini tentunya melibatkan para insinyur untuk merancang sebuah model pipa bawah laut. Perlu adanya beberapa pertimbangan dalam melaksanakan perancangan konsep eksploitasi. Khusus pada perancangan atau pemodelan konstruksi *pipeline* sangat diperlukan sebagai media komunikasi bagi para insinyur ke *owner* guna menghindari kondisi kegagalan pada saat operasi, *hydrotest* maupun dalam konstruksi pekerjaan pipa bawah laut.



Gambar 1 Lapangan Abadi Wilayah Kerja

Pada Gambar 1 merupakan lokasi Lapangan Abadi Wilayah Kerja Masela yang dimana terletak pada Laut Timur Indonesia yang berbatasan langsung dengan Australia. Kawasan ini masih dalam proses pengembangan. Oleh karena itu, pada penelitian kali ini menganalisa ketebalan pipa yang sesuai dengan Kawasan Kerja Blok Masela dan menentukan stabilitas hingga tekanan maksimal yang bekerja pada pipa.

Berdasarkan pada permasalahan tersebut, maka penulis akan membuat penelitian yang berjudul ***“Analisa Ketebalan dan Stabilitas Pipa Bawah Laut di Kawasan Kerja Blok Masela Pulau Yamdena”***. Penelitian ini disusun guna menentukan nilai ketebalan pipa bawah laut, stabilitas atau *on-bottom stability* sesuai dengan DNV RP-F109 *“On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines”*, dan tekanan maksimal yang bekerja terhadap pipa tersebut.

1.2 Rumusan masalah

Berdasarkan uraian di atas, maka rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini, antara lain :

1. Berapa ketebalan minimum pipa bawah laut yang sesuai dengan Kawasan Kerja Blok Masela ?
2. Apakah stabilitas vertikal dan lateral bekerja pada *pipeline* memenuhi sesuai dengan DNV RP-109 *On-Bottom Stability of Submarine Pipelines* ?
3. Berapa tekanan maksimal bekerja yang disebabkan aliran arus signifikan terhadap permukaan pipa dengan visualiasi pada *software* Ansys *Computational Fluid Dynamics R2 2023 Student Version* ?

1.3 Tujuan penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan ketebalan minimum pipa bawah laut yang sesuai dengan Kawasan Kerja Blok Masela. Selain itu, menentukan stabilitas vertikal dan lateral sesuai dengan DNV RP-F109. Sehingga, peneliti mevisualisasi tekanan maksimal yang diakibatkan oleh aliran arus signifikan terhadap permukaan pipa dengan menggunakan *software* Ansys *Computational Fluid Dynamics 2023 R2 Student Version*.

1.4 Manfaat penelitian

Adapun penelitian ini dapat memberikan informasi dan literatur berupa kajian dalam menentukan ketebalan pipa sesuai regulasi yang terkait, seperti ASME B31.8 *Gas Transmission and Distribution Piping System* dan API 1111. Selain itu penelitian ini dapat menjadi referensi dalam menghitung stabilitas (*on-bottom stability*) pipa dengan DNV RP-F109 *“On-Bottom Stability of Design Submarine*



1. Rute *pipeline* mulai dari kapal *Floating Production and Storage Offloading* (FPSO) ke lokasi *Refinery* atau *Production*.
2. Penelitian ini merancang pipa dengan kondisi lingkungan yang ekstrim.
3. Perencanaan ini menggunakan *software MathCad Student Version* dan *Ansys 2023 R2 Student Version* dalam pemodelan *submarine pipeline*.
4. Perencanaan ini tidak meliputi perhitungan *hydrotest*.
5. Analisa ini tidak mempertimbangkan desain instalasi.
6. Pada tahap simulasi, status pipa tidak dalam keadaan operasi.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gambaran Umum *Pipeline*

Pipa bawah laut atau *submarine pipeline* merupakan alat atau konsep transportasi yang digunakan untuk mengangkut produk hidrokarbon seperti minyak mentah, gas alam bertekanan tinggi. Bahan fluida yang dibawa atau gas dipompa dari *platform* melewati dasar laut dengan menggunakan *pipeline*. Namun terdapat metode lain seperti menggunakan kapal *floating production and storage offloading* (FPSO). Namun fungsi utama dari *pipeline* yaitu mengalirkan fluida dari produksi ke penampungan (Yeyes & Rosyid, 2015).

Aspek yang sangat penting dalam desain *pipeline* ialah pemilihan material pipa. Kesesuaian material pipa tergantung pada jenis fluida yang akan diangkut, tekanan dan temperatur hingga persyaratan ketika diuji. Konstruksi *pipeline* termasuk dalam pekerjaan bawah air. Bahan pipa dipilih berdasarkan aspek-aspek rancangan seperti tekanan internal dan eksternal, diameter pipa hingga standar spesifikasi yang sesuai dengan *code* tertentu (Mulyadi, 2018).



Gambar 2 *Submarine Pipeline*

Sumber : (Google, 2022)

Pada Gambar 2 merupakan contoh *submarine pipeline* yang dimana sangat umum digunakan untuk tujuan dalam pengembangan sumber daya hidrokarbon bawah laut yang membentang dan berfungsi sebagai pipa penyalur. *Flowline pipeline* dapat berupa *single-pipe pipeline*, *pipe-in-pipe system*, atau *bundled system*.

Submarine pipeline atau dikenal dengan pipa bawah laut merupakan salah satu contoh pekerjaan bawah air. Pekerjaan bawah air merupakan pekerjaan yang



Optimized using
trial version
www.balesio.com

instalasi, konstruksi, atau kapal yang dilakukan di bawah air. Pekerjaan bawah air yang bersifat khusus, yaitu penggunaan peralatan rasikan dari permukaan air (Palippui & Rachman, 2023).

Submarine pipelines atau pipa bawah laut berkaitan erat dengan transportasi yang dimana memerlukan suatu sistem atau moda transportasi bawah laut sebagai media penyalur hasil tambang atau migas dari lokasi tambang maupun pusat tangki minyak (Palippui & Rachman, 2023).

Konstruksi pipa bawah laut sangatlah kompleks dan berperan penting dalam proses industri minyak dan gas serta merupakan sebuah konstruksi yang mahal karena itu dapat diusahakan efisien biaya melalui teknologi yang terkemuka terutama dalam hal *coating*, *welding*, *hydrotest* dan metode instalasi *pipelines* ketika berada pada *site*. Dalam perencanaan *pipelines* harus menentukan ketebalan pipa dengan berdasarkan *pressure containment*, *external containment*, *external hydrostatic pressure collapse*, *buckle propagation criteria*, dan *bottom stability*.

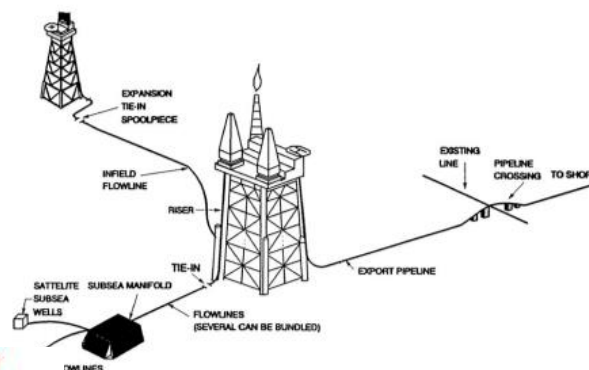
Selain itu, dalam konstruksi atau merancang pipa bawah laut, terdapat *code* atau regulasi dalam pemodelan *pipeline* seperti *Det Norske Veritas (DNV)*, *American Petroleum Institute (API)* dan lain-lain. Dalam perencanaan *pipelines* harus menentukan ketebalan pipa dengan berdasarkan *pressure containment*, *external containment*, *external hydrostatic pressure collapse*, *buckle propagation criteria*, dan *bottom stability* (Tirtawahyuni, 2020).

Industri lepas pantai, kedalaman air sangat penting untuk desain, biaya dan jadwal sistem yang dibentangkan. Industri energi alternatif, komponen penting untuk kedalaman air termasuk struktur dan pemasangan (Nur, 2021).

2.2 Pipa Bawah Laut

Pipa bawah laut atau *submarine pipeline* merupakan jaringan pipa yang tersambung pada bawah laut yang menghubungkan dari *platform* ke *platform* dengan mengalirkan fluida atau gas.

Pada Gambar 3, Terdapat banyak klasifikasi *pipeline* dalam dunia industri. Istilah yang digunakan *submarine pipeline* digambarkan sebagai saluran pipa yang membawa produk tambang seperti minyak dan gas dari *wellhead* ke *riser foot*. Terdapat banyak pengklasifikasian *pipeline offshore*, salah satunya adalah terhubung ke *platform* atau *floating production and storage offloading (FPSO)*.



Gambar 3 Offshore Pipeline



Submarine pipeline dapat dikategorikan beberapa jenis. Tergantung pada komoditas yang akan dialir seperti air, minyak atau gas. Berdasarkan jenis aliran yang dialami, *pipeline* dapat dikategorikan sebagai :

1. *Single-phase incompressible flow*
2. *Single-phase compressible flow*
3. *Two-phase flow of solid-gas mixture (pneumotransport)*
4. *Two phase flow of solid-gas mixture*
5. *Non-Newtonian fluids*
6. *Flow of capsule*

Terdapat beberapa metode yang lain mengenai konsep *pipeline*, tergantung keadaan lingkungan atau kegunaan *pipelines* pada daerah tertentu, seperti *offshore pipelines*, *inland pipelines*, *in-plant pipelines*, *cross-mountain pipeline*. Terdapat juga jenis *pipelines* menurut penempatannya, seperti *underground pipeline*, *aboveground pipeline*, *elevated pipeline* dan *underwater submarine pipeline*.

Meningkatnya kebutuhan minyak dan natural gas di penjuru dunia, ditambah dengan penyusutan seperti bahan bakar dari sumur minyak setelah diproduksi bertahun-tahun, kebutuhan untuk mengebor pun juga lebih besar seiring penemuan cadangan minyak dan gas alam di lepas pantai. Hal ini mendorong banyaknya penggunaan *offshore pipeline* yang dikategorikan sebagai konstruksi canggih dan mahal. Banyak faktor yang harus dipertimbangkan dalam konstruksi *offshore pipeline*, seperti korosi dari air laut, gelombang, serangan biota laut, *external pressure* yang disebabkan kedalaman laut dan bencana alam. Seperti tsunami, erupsi gunung bawah laut dan gempa bumi.

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan bahan bakar dan meningkatnya pengeboran, penggunaan *subsea pipeline* sangat praktis. *Subsea Pipeline* merupakan pipa yang menghubungkan antar fasilitas ke fasilitas yang diletakkan di *seabed* atau dikubur dengan metode *trenching* atau parit. *Subsea pipeline* dirancang untuk menahan tekanan internal seperti suhu dan tekanan fluida serta tekanan eksternal seperti kondisi gelombang dan arus (Liu, 2003).

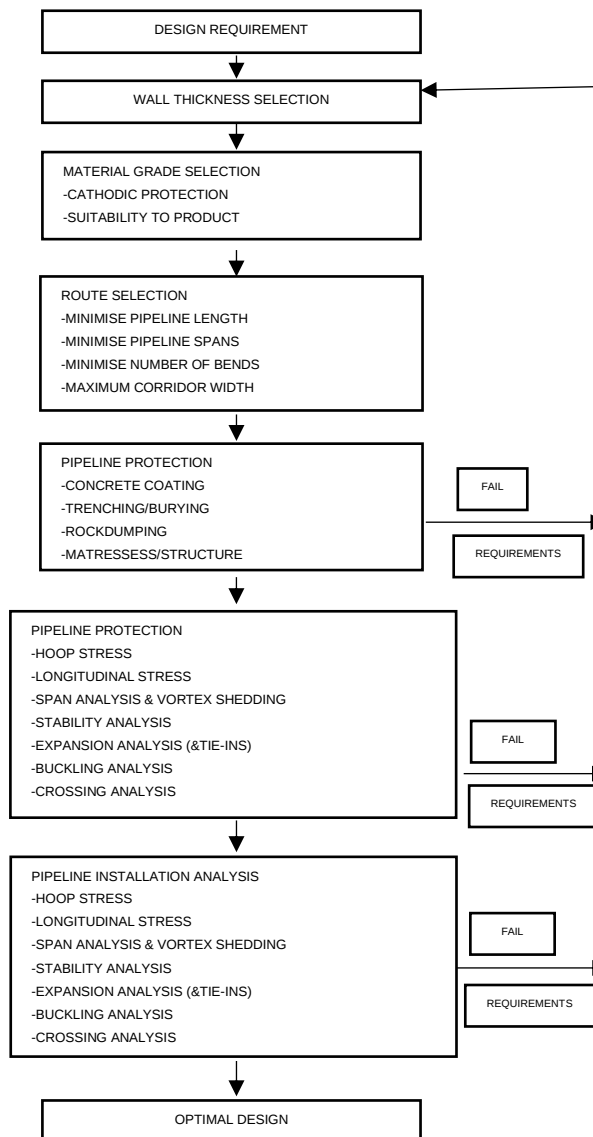
2.3 Proses Desain Pipa Bawah Laut

Dalam merancang *subsea pipeline*, Objek dalam proses desain untuk *subsea pipeline* adalah penentuan yang didasarkan oleh parameter operasi dan ketentuan ukuran *pipeline* yang sesuai. Parameter yang dimaksud adalah :

1. *Pipeline Internal Diameter*
2. *Pipeline Wall Thickness*



ne Material
untuk korosi
m coating



Gambar 4 Proses Desain Pipeline

Sumber : (Bai, 2014)



4 merupakan *flowchart* yang merupakan langkah-langkah secara detail. Terdapat aspek-aspek yang sangat penting Desain ini dibutuhkan untuk mengoptimalkan parameter dan yang terkait dengan *submarine pipeline* (Yong. Bai & Bai,

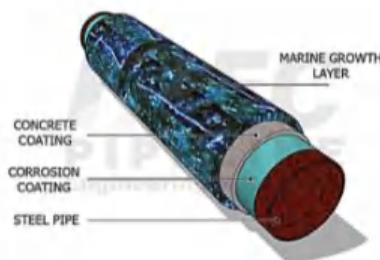
Setiap tahap dalam mendesain harus diperhatikan. Proses analisis sangat bervariasi tergantung pada *output* yang dibutuhkan. Desain yang harus dikembangkan untuk *subsea pipeline* adalah :

1. *Wall thickness, grade, coating*, dan panjang ditentukan sesuai dengan *code* atau regulasi sehingga *pipeline* dapat menuju proses fabrikasi.
2. Rute atau jalur yang ditentukan.
3. Analisa tegangan yang dilakukan untuk membuktikan bahwa *pipeline* berada dalam tekanan yang diizinkan (*allowable stress*). Dalam setiap tahap instalasi, pengujian dan operasi. Hasilnya dari analisa tersebut juga termasuk *pipeline allowable span*.
4. Analisa instalasi *pipeline* dilakukan untuk membuktikan bahwa tegangan *pipeline* dalam setiap tahap instalasi telah aman.

2.4 Gambaran Umum Ketebalan Pipa

Dalam menentukan diameter pipa atau *subsea pipeline*, kriteria-kriteria yang sangat perlu diperhatikan ialah *pressure containment* atau tekanan internal dan tekanan eksternal pada pipa. Objek dalam penelitian ketebalan untuk pipa bawah laut menggunakan *codes* tertentu, seperti DNV atau ASME. Langkah-langkah dalam menentukan *wall thickness* didasarkan pada (Q. Bai & Bai, 2014) :

1. Menghitung *internal pressure*
2. Menghitung *external pressure* atau hidrostatik pada pipa
3. Menghitung *propagation buckling*
4. Menghitung nilai minimum *wall thickness required* yang sesuai *design* yang berlaku



Gambar 5 Pipa dan Komponen-Komponen

Sumber : (Bai, 2014)



eline pada umumnya dipasang dengan komponen-komponen 1 dan lapisan anti karat. Gambar 5 merupakan gambaran ti karat dan lapisan beton. Lapisan anti karat pada umumnya ngga 3 mm, tergantung zat terkandung didalam pipa tersebut. umunya digunakan sebagai pemberat agar pipa tersebut dapat ulaman dasar permukaan laut tertentu.

Sehingga, dalam menentukan tebal pipa yang diatur dalam standar ASME B31.4 *Transportation System for Liquid Hydrocarbon and Other Liquids* atau ASME B31.8 mengenai *Gas Transmission and Distribution Piping System*. Dari standar ASME B31.8, persamaan mengenai mencari ketebalan pipa disajikan sebagai berikut :

$$t = \frac{Pd_0}{2FETs_y} \quad (1)$$

Persamaan tersebut digunakan agar hasil dari persamaan tersebut dapat memenuhi tebal pipa berdasarkan tekanan internal untuk menahan tekanan dengan arah tangensial.

Pada pipa yang terendam pada permukaan bawah laut, tentu pipa tersebut akan mengalami tekanan hidrostatik. Tekanan hidrostatik merupakan tekanan zat cair yang dialami oleh benda. Dalam menentukan desain nilai tekanan hidrostatik, dijabarkan dengan rumus sebagai berikut :

$$Ph = \rho gh \quad (2)$$

Dari nilai tekanan hidrostatik yang didapatkan, dapat menentukan nilai *Collapse Due to External Pressure* yang merupakan terjadinya kegagalan pada pipa tersebut yang disebabkan oleh tekanan eksternal. Tekanan eksternal dapat dianggap sebagai tekanan hidrostatik. Persamaan-persamaan dalam menentukan *Collapse Due to External Pressure* didefinisikan sebagai (American Petroleum Institute, 2009) ::

$$Py = 2S \left(\frac{t}{D} \right) \quad (3)$$

$$Pe = 2E \left(\frac{t}{D} \right)^3 \quad (4)$$

$$Pc = \frac{Py + Pe}{\sqrt{Py^2 + Pe^2}} \quad (5)$$

Pada struktur lepas pantai, semakin dalam titik lokasi pipa maka semakin besar tekanan eksternal yang bekerja pada pipa. Sehingga pada kedalaman tertentu, tekanan eksternal yang bekerja melebihi tekanan internal pada pipa. Sehingga pipa yang telah dipasang pada permukaan bawah laut dapat mengakibatkan *collapse* pada pipa tersebut.

Setelah menghitung *Collapse Due to External Pressure*, selanjutnya adalah *Collapse Due to Combined Bending* yang diberikan persamaan (American Petroleum Institute, 2009) :



(6)

Selanjutnya ialah menentukan nilai berdasarkan *propagation buckling*. *Propagation Buckling* merupakan deformasi pipa menjadi oval. Sehingga diperlukan untuk mendesain tebal pipa yang memenuhi *propagation buckling*. Persamaan tersebut didefinisikan sebagai berikut (American Petroleum Institute, 2009) :

$$Pbp = 24 S F_t \left(\frac{tbuck}{OD} \right)^{2.4} \quad (7)$$

Setelah mendapatkan nilai tekanan *propagation buckling*, nilai tersebut dimasukkan ke dalam persamaan untuk mendapatkan ketebalan nominal yang berdasarkan *propagation buckling* (American Petroleum Institute, 2009).

$$tprop = \left(\frac{Pbp}{24 f_p f_t} \right)^{-2.4} \quad (8)$$

Pada persamaan (2) dijelaskan bahwa t_{min} merupakan hasil ketebalan pipa yang sesuai dengan *pressure containment*. Persamaan (1) merupakan ketebalan pipa yang didasarkan pada temperatur dari fluida tekanan tinggi.

Ketebalan pipa atau *wall thickness* yang diperlukan didasarkan beberapa komponen, dinyatakan dengan rumus (Q. Bai & Bai, 2014) :

$$t_{req} = t_{min} + t_{fab} \quad (9)$$

2.5 Resistensi Tanah atau *Passive Resistance*

Untuk menghindari gerakan lateral, tanah harus memiliki tahanan yang cukup mengimbangi beban hidrodinamika. Resistensi tanah terdiri dari dua bagian :

1. *Coulumb friction*
2. Resistensi pasir akibat penumpukan penetrasi tanah saat pipa secara lateral

Lempung didefinisikan sebagai tanah yang tidak *permeable* dengan efek kohesif yang bersignifikan. Pasir didefinisikan sebagai tanah yang *permeable* dengan tidak adanya efek kohesif. Batuan didefinisikan sebagai batuan hancur dengan 50% diameter *fractile* lebih besar dari 50 mm. Koefisien gesek dengan notasi μ , biasanya untuk pipa dengan menggunakan lapisan *concrete coating* menggunakan 0.6 untuk pasir, 0.2 untuk lempung dan 0.6 untuk batu (Norske Veritas, 2010).

Berdasarkan DNV RP-F109 *On-Bottom Stability Design of Submarine Pipeline*, resistensi pasif untuk tanah pasir digambarkan dengan persamaan :

$$F_R = (5.7 - 0.1 \varepsilon \nu^2) \left(\frac{Z_p}{D} \right)^{1.25} \quad \text{untuk } K_s \leq 26.7 \quad (10)$$



$$\text{untuk } K_s \geq 26.7 \quad (11)$$

ah lempung menggunakan persamaan :

$$\frac{F_R}{F_C} = \frac{4.1 K_c}{G_c^{0.39}} \left(\frac{Z_p}{D} \right)^{1.31} \quad (12)$$

Kedalaman penetrasi total merupakan penjumlahan dari kedalaman penetrasi awal dan penetrasi akibat perpindahan pipa dan disajikan dalam bentuk persamaan :

$$Z_p = Z_{pi} + Z_{pm} \quad (13)$$

Penetrasi awal pada tanah pasir dengan persamaan :

$$\frac{Z_{pi}}{D} = 0.0037 K_s^{-0.67} \quad (14)$$

Penetrasi awal pada tanah lempung dengan persamaan :

$$\frac{Z_{pi}}{D} = 0.0071 \left(\frac{G_c^{0.3}}{K_c} \right)^{3.2} + 0.062 \left(\frac{G_c^{0.3}}{K_c} \right)^{0.7} \quad (15)$$

Dengan,

$$k_c = \frac{S_u \cdot D}{F_c} \quad (16)$$

Dan,

$$G_c = \frac{S_u}{D \cdot F_c} \quad (17)$$

Setelah itu, reduksi beban akibat *permeable seabed* dengan rumus:

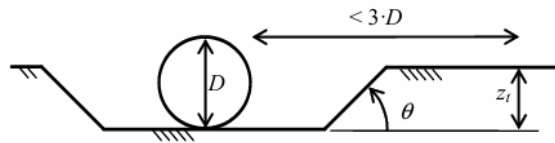
$$r_{perm,z} = 0.7 \quad (18)$$

Dengan adanya reduksi beban akibat *permeable seabed*, faktor reduksi beban akibat penetrasi baik arah horizontal maupun arah vertikal masing-masing dengan persamaan :

$$r_{pen,y} = 1.0 - 1.4 \frac{Z_p}{D} \geq 0.3 \quad (19)$$

$$r_{pen,z} = 1.0 - 1.4 \left(\frac{Z_p}{D} - 0.1 \right) \geq 0.0 \quad (20)$$

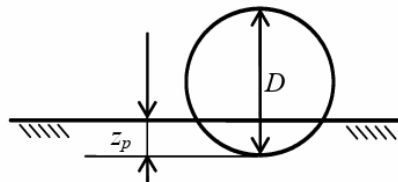


Gambar 6 Ilustrasi *Trenching*

Sumber : (Det Norske Veritas, 2010)

Pada Gambar 6, kedalaman *trench* harus diambil dengan lebar tidak melebihi 3 kali diameter pipa, termasuk tebal korosi dan tebal selimut beton. Faktor reduksi beban akibat *trenching*, baik arah vertikal maupun horizontal disajikan dalam persamaan (Norske Veritas, 2010) :

$$r_{tr,y} = 1.0 - 0.18 (\theta - 5)^{0.25} \left(\frac{z_t}{D}\right)^{0.42} \quad 5 \leq \theta \leq 45 \quad (21)$$



Gambar 7 Ilustrasi Penetrasi Pada Pipa

Sumber : (Det Norske Veritas, 2010)

Pada Gambar 7 merupakan ilustrasi mengenai penetrasi. Pada umumnya, pipa akan tenggelam yang diakibatkan oleh berat pipa tersendiri, baik keadaan tanah lempung (*clay*) maupun pasir (*sand*) (Norske Veritas, 2010).

2.6 Kondisi Arus

Aliran arus stabil (*steady current flow*) pada permukaan terdiri dari beberapa yang diantaranya (Norske Veritas, 2010) :

- Arus pasang surut
- Arus yang diinduksi angin
- Arus yang diinduksi gelombang badai
- Arus yang didorong densitas



rus dapat tereduksi karena arus dan dasar laut (*seabed*), ini :

$$\frac{\rho - \ln z_0}{\rho_0 - \ln z_0} \sin \theta_c \quad (22)$$

Sudut θ_c merupakan sudut antara kecepatan arus dan sumbu pipa. Namun, jika tidak terdapat data mengenai sudut tersebut, dapat diasumsikan jika arus bekerja terhadap pipa secara tegak lurus (*perpendicular*) (Norske Veritas, 2010).

Arus acuan seharusnya diukur pada kedalaman yang variasi kecepatan arusnya kecil pada arah horizontal. Pada dasar laut yang relative datar, tinggi acuan bisa terjadi lebih besar, tergantung pada nilai kekasaran permukaan laut (*roughness*). Sehingga, nilai kekasaran dasar laut disajikan dalam bentuk Tabel 1 (Norske Veritas, 2010).

Tabel 1 Kekasaran Dasar Laut (seabed)

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

Sumber : (Det Norske Veritas, 2010)

2.7 Kondisi Jangka Pendek Gelombang (*Short Term Wave*)

Gelombang laut tidak selalu regular atau berlinier. Seringkali terjadinya gelombang acak dalam kurun waktu pendek (*short term condition*) dapat dijelaskan dengan spektra gelombang. Berdasarkan DNV RP-F109, untuk perairan tertutup, digunakan spektrum JONSWAP. Spektrum JONSWAP adalah modifikasi dari spektra PM, dengan memasukkan parameter-parameter yang akan mengakomodasi karakteristik gelombang perairan tertutup atau kepulauan.

Sehingga, di perairan Indonesia sangat cocok digunakan spektrum JONSWAP. Berikut merupakan persamaan spektrum JONSWAP (Norske Veritas, 2010) :

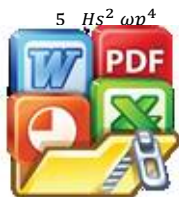
$$S_{nn}(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^4\right) \cdot \gamma^{\exp\left(-0.5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p}\right)^2\right)} \quad (23)$$

Dari persamaan diatas, mencari konstanta *Generalized Philips* :

$$5 H_s^2 \omega_p^4 \dots - 0.287 \cdot \ln \gamma \quad (24)$$

spektral diberikan persamaan dengan :

$$(25)$$



Setelah mendapatkan nilai lebar spektra, mencari nilai *peak-enhancement factor* dengan :

$$\gamma = \begin{cases} 5.0 & \varphi \leq 3.6 \\ \exp(5.75 - 1.15) & 3.6 < \varphi < 5.0 \\ 1.0 & \varphi \geq 5.0 \end{cases} \quad (26)$$

Dengan :

$$\varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \quad (27)$$

Setelah mendapatkan nilai lebar spektra, selanjutnya adalah mencari nilai kecepatan yang diinduksi oleh gelombang (*wave induced spectrum*) di *seabed* yang dinotasikan sebagai $S_{uu}(\omega)$ dengan menggunakan teori gelombang orde pertama (Norske Veritas, 2010).

$$S_{uu}(\omega) = G^2(\omega) \cdot S_{nn}(\omega) \quad (28)$$

Notasi G merupakan variabel yang mengubah elevasi permukaan laut menjadi kecepatan aliran yang diinduksi gelombang di dasar laut sehingga didefinisikan dengan persamaan (Norske Veritas, 2010) :

$$G(\omega) = \frac{\omega}{\sinh(k \cdot d)} \quad (29)$$

Yang dimana nilai d dan k merupakan iterasi atau pengulangan dari persamaan sebagai berikut (Norske Veritas, 2010) :

$$\frac{\omega^2}{g} = k \tanh(k \cdot d) \quad (30)$$

Selanjutnya, menentukan momen spektra orde n yang didefinisikan dalam bentuk persamaan sebagai berikut (Norske Veritas, 2010) :

$$M_n = \int_0^\infty \omega^n \cdot S_{uu}(\omega) d\omega \quad (31)$$

Amplitudo kecepatan aliran signifikan yang dinotasi (U_s) pada permukaan pipa dengan didefinisikan sebagai persamaan (Norske Veritas, 2010) :



(32)

crossing period layer osilasi aliran pada permukaan pipa, sebagai berikut (Norske Veritas, 2010) :

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \quad (33)$$

Dan T_n dapat dilihat dengan persamaan (Norske Veritas, 2010) :

$$T_n = \sqrt{\frac{d}{g}} \quad (34)$$

Rasio antara amplitudo kecepatan desain tunggal dan kecepatan desain spektral untuk osilasi yang bernotasi τ dapat dilihat dengan persamaan (Norske Veritas, 2010) :

$$k_u = \frac{U^*}{U_s} = \frac{1}{2} \cdot (\sqrt{2 \cdot \ln \tau} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln \tau}}) \quad (35)$$

Rasio antara periode kecepatan osilasi desain tunggal dan periode *zero up-crossing* rata-rata yang dimana letaknya berada pada *seabed* (Norske Veritas, 2010)

$$k_T = \frac{T^*}{T_u} = \begin{cases} k_t - 5 \cdot (k_t - 1) \cdot T_n/T_u & \text{Untuk } T_n/T_u \leq 0.2 \\ 1 & \text{Untuk } T_n/T_u > 0.2 \end{cases} \quad (36)$$

Dimana,

$$k_t = \begin{cases} 1.25 & \text{Untuk } \gamma = 1.0 \\ 1.21 & \text{Untuk } \gamma = 3.3 \\ 1.17 & \text{Untuk } \gamma = 5.0 \end{cases}$$

2.8 Stabilitas Pipa Bawah Laut

Stabilitas dasar laut merupakan salah satu faktor yang sangat penting dalam mendesain *pipeline*. *Pipeline* yang terbentang di dasar laut akan menahan tekanan fluida baik dari arus maupun gelombang. Analisis tentang stabilitas dasar laut disebut sebagai *on-bottom stability analysis*. Regulasi yang terkait dengan stabilitas pipa bawah laut adalah DNV RP-F109 *On-Bottom Stability Design of Submarine Pipeline*.

Pipa yang berada di bawah laut umumnya tersusun atas lapisan-lapisan yang memiliki jenis material pembentuk dan ketebalan yang berbeda-beda misalnya lapisan tebal dinding pipa, lapisan anti korosi, lapisan *concrete*. Sebelum menghitung stabilitas pipa, terlebih dahulu menghitung volume pipa dengan menggunakan rumus tabung (Q. Bai & Bai, 2014).



(37)

etahui dimensi pipa, selanjutnya dengan menentukan berat pun dalam menentukan berat tenggelam pipa, terlebih dahulu er untuk memenuhi variabel stabilitas. Berat tenggelam pipa

yang membuat pipa tersebut dapat tenggelam dengan optimal. Adapun parameternya adalah (Q. Bai & Bai, 2014) :

- Diameter total pipa

$$D_{tot} = D_s + 2t_{corr} + 2t_c \quad (38)$$

- Berat baja di udara

$$W_{st} = \frac{\pi}{4} (D_{st}^2 - D_t^2) \rho_{st} g \quad (39)$$

- Berat lapisan anti karat udara

$$W_{corr} = \frac{\pi}{4} (D_{st}^2 - 2t_{corr}^2 - D_s^2) \rho_{corr} g \quad (40)$$

- Berat lapisan beton di udara

$$W_c = \frac{\pi}{4} [D^2 (D_{st}^2 + 2t_{corr}^2 + 2t_{therm}^2)] \rho_c g \quad (41)$$

- Berat pengisi pipa

$$W_{cont} = \frac{\pi}{4} D_i^2 \rho_{cont} g \quad (42)$$

- Gaya apung

$$F_b = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot \rho_{sw} \cdot g \quad (43)$$

On-bottom stability merupakan analisa yang menentukan berat minimum pipa yang sesuai agar dapat stabil di permukaan bawah laut. Dalam menganalisa *on-bottom stability* pada pipa, pipa harus dapat menahan gaya-gaya hidrodinamis arah vertikal dan arah lateral. Dengan kata lain, berat pipa yang tenggelam harus lebih besar gaya-gaya yang bekerja pada pipa. Stabilitas *pipeline* dipengaruhi oleh pembebanan hidrodinamika dan ketahanan tanah. Bila beban cukup besar, gaya-gaya dapat mengganggu kestabilan yang menyebabkan pengapungan atau Gerakan secara lateral (Mulyadi & Sc, 2016)

Pipa yang dikubur harus diperiksa karena adanya kemungkinan tenggelam atau hanyut. Jika berat spesifik pipa kurang dari pada tanah (termasuk air), tidak perlu dilakukan analisis lebih lanjut untuk mendokumentasikan keselamatan terhadap tenggelamnya pipa. Agar *pipeline* dapat stabil secara vertikal di permukaan laut, berikut persamaan harus dipenuhi sesuai DNV RP-F109 *On-Bottom Stability Design of Submarine Pipeline* (Norske Veritas, 2010). :

$$\gamma_w \frac{b}{w_s b} = \frac{\gamma_w}{s_g} \leq 1.00 \quad (44)$$

Untuk stabilitas vertikal, kestabilan pipa dasar laut sangat dipengaruhi oleh air, gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa dan tanah ini dilakukan untuk mengetahui apakah berat pipa mampu ketika benda tercelup dalam air (Norske Veritas, 2010) a *on-bottom stability* secara lateral, terdapat 3 metode yang menghitung stabilitas lateral. Berikut 3 metode yang digunakan abilitas lateral : (Q. Bai & Bai, 2014)



1. Metode *dynamic lateral stability* Metode *dynamic lateral stability analysis* digunakan untuk menghitung perpindahan beban lateral pada *pipeline* yang mengalami pembebanan gaya hidrodinamika.
2. Metode *generalized lateral stability*. Untuk menggunakan metode ini, seabed diasumsikan datar, bending diabaikan, dan beban aksial seperti temperatur dan tekanan operasi tinggi diabaikan. Oleh karena itu analisa untuk mencapai tingkat *safety factor* untuk *submarine pipeline* sangat diperlukan. Untuk pipa yang memiliki *density* lebih dari 3 atau kurang dari 1,05 tidak direkomendasikan untuk menggunakan metode ini.
3. *Absolute lateral static stability*. Metode *absolute lateral static stability* merupakan metode yang tidak mengizinkan perpindahan lateral pada *submarine pipeline* berdasarkan penyamaan gaya yang memastikan gaya tahanan pipa mencukupi untuk bertahan terhadap beban hidrodinamis. Pipa bawah laut dapat dianggap dapat memenuhi kestabilan statik mutlak apabila memenuhi Persamaan (45) :

$$\text{a) } \gamma_{sc} = \frac{F_{\gamma B} + \mu \cdot F_{ZB}}{\mu \cdot W_s(t_{cc}) + F_R} \leq 1.0 \quad (45)$$

$$\text{b) } \gamma_{sc} = \frac{F_{\gamma B}}{W_s(t_{cc})} \leq 1.0 \quad (46)$$

Safety factors merupakan koefisien yang digunakan untuk menentukan variabel stabilitas *absolute lateral static stability* (Norske Veritas, 2010). Adapun tabelnya adalah :

Tabel 2 *Safety factors, winter and storms in North Sea*

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

Sumber : (Det Norske Veritas, 2010)

Tabel 3 *Safety factors, winter and storms in Gulf of Mexico*

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

Sumber : (Det Norske Veritas, 2010)



1. Jika *cyclonic* terjadi, maka nilai *safety factor* digunakan untuk *cyclonic* yang di Tabel 4 dan Tabel 5 dibawah ini.

Tabel 4 *Safety factors, cyclonic conditions in North West Shelf*

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

Sumber : (Det Norske Veritas, 2010)

Tabel 5 *Safety factors, cyclonic conditions in Gulf of Mexico*

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

Sumber : (Det Norske Veritas, 2010)

2.9 Gaya Hidrodinamika

Pada saat pipa bawah laut telah terpasang pada dasar laut, gaya-gaya hidrodinamika akan bekerja terhadap pipa seperti *drag force*, *lift force* dan *inertia force*. Mengacu pada DNV RP-109 *On-Bottom Stability of Design Submarine Pipelines*, variabel F_y^* dan F_z^* memiliki persamaan tersendiri yang diatur pada (Norske Veritas, 2010) :

$$F_y^* = r_{tot,y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_y^* \cdot (U^* + V^*)^2 \quad (47)$$

$$F_z^* = r_{tot,z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_z^* \cdot (U^* + V^*)^2 \quad (48)$$

3.0 Gambaran Umum mengenai Regulasi

Regulasi DNV (Det Norske Veritas) RP F109 “*On-bottom Stability Design of Submarine Pipelines*” merupakan regulasi yang menyediakan kriteria desain dari *pipeline* dan arahan beserta penilaian *on-bottom stability* terhadap pipa yang mengalami beban gelombang dan arus gelombang.

Pada *codes ASME (American Society of Mechanical Engineering) B31.8 Gas Transmission and Piping System* merupakan regulasi yang terkait dengan pipa penyalur, kompresor gas dan regulasi *stations* yang terkait. API 1111 merupakan regulasi yang terkait dengan mekanikal pipa yang akan beroperasi.

