

**ANALISIS ON BOTTOM STABILITY PIPA BAWAH LAUT DENGAN
METODE SIMPLIFIED STATIC, SIMPLIFIED QUASI STATIC,
DAN DNV RP F109**

Widya Ayuningtiyas¹

Pembimbing : Krisnaldi Idris, Ph.D²

Program Studi Sarjana Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,

Jalan Ganesha 10 Bandung 40123

¹widya.ayuningtiyas@gmail.com dan ²krisnaldi@ocean.itb.ac.id

ABSTRAK

Analisis *on bottom stability* dilakukan untuk menentukan berat terendam pipa yang dibutuhkan agar pipa dapat menahan gaya-gaya lingkungan dan gaya ketahanan tanah yang mengenai pipa. Secara umum, analisis kestabilan pipa bawah laut (*on bottom stability*) dihitung untuk kondisi instalasi (pipa masih dalam keadaan kosong) dan kondisi operasional (pipa berisi produk). Studi analisis kestabilan pipa bawah laut dalam Tugas Akhir ini dilakukan pada jalur pipa bawah laut di perairan selatan Makassar, yang dibagi menjadi empat zona dengan kedalaman bervariasi mulai dari 47 - 62 meter. Penghitungan kestabilan analisis pipa bawah laut ini dilakukan dengan bantuan program, *mathcad* dan AGA yang mengacu pada syarat kestabilan yang ada pada DNV RP F109 dan DNV RP E305. Hasil penghitungan tebal selimut beton yang diperoleh dengan menggunakan AGA (*Simplified Static* dan *Simplified Quasi Static*) serta DNV RP F109 (*Absolute Lateral Static Stability* dan *Generalized Lateral Stability*) kemudian dibandingkan.

Kata Kunci: *on bottom stability*, DNV, AGA

PENDAHULUAN

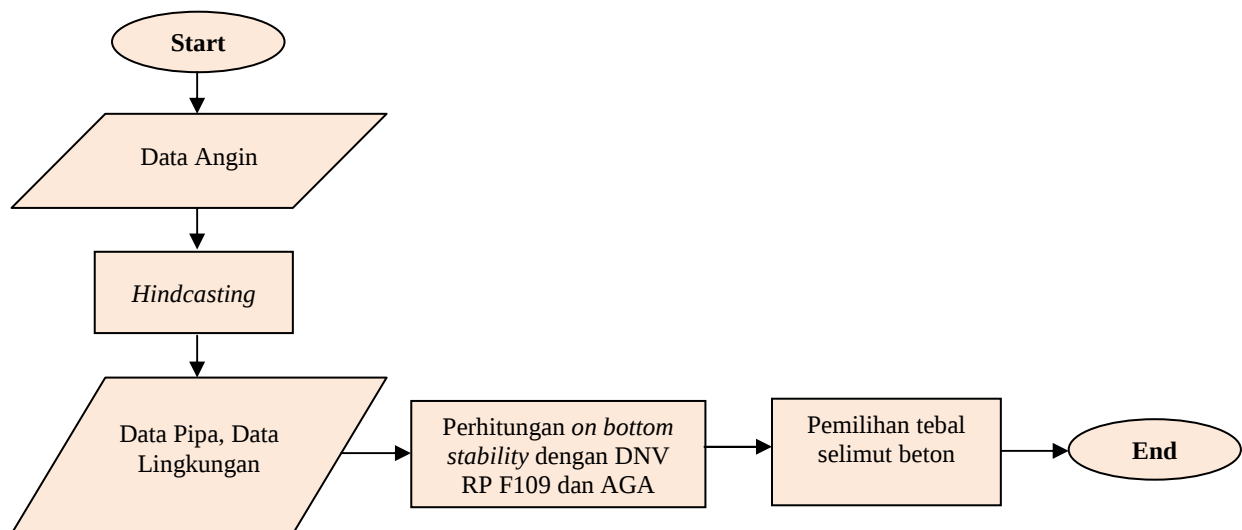
Seiring dengan majunya peradaban manusia, kebutuhan akan sumber energi minyak dan gas semakin meningkat, sehingga mendorong manusia untuk meningkatkan kegiatan eksplorasi. Keterbatasan sumber minyak dan gas yang tersedia di darat membuat manusia melakukan kegiatan eksplorasi di laut. Salah satu infrastruktur yang digunakan dalam kegiatan eksplorasi di laut adalah jaringan pipa bawah laut. Dalam merancang jaringan pipa bawah laut, terdapat beberapa analisis yang harus diperhitungkan, seperti analisis stabilitas pipa bawah laut (*on bottom stability analysis*), analisis bentangan bebas pipa (*free span analysis*), dan analisis instalasi pipa. Pada Tugas Akhir ini, akan dilakukan perhitungan analisis stabilitas pipa bawah laut (*on bottom stability analysis*) pada jaringan pipa bawah laut di perairan selatan Makassar seperti pada **Gambar 1**. Tujuan dari Tugas Akhir ini untuk memberikan gambaran mengenai perhitungan analisis kestabilan pipa bawah laut menggunakan DNV RP F109 dan program AGA yang mengacu pada DNV RP E305 serta untuk membandingkan tebal lapisan beton yang diperoleh dari perhitungan.



Gambar 1 Lokasi Studi Proyek Konstruksi Bawah Laut
(Sumber: Modifikasi dari *Google Earth*)

TEORI & METODOLOGI

Secara umum, metodologi pengerjaan dari Tugas Akhir ini dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar2 Bagan alir studi kasus

Peramalan data gelombang (*hindcasting*) dilakukan untuk mendapatkan tinggi dan perioda gelombang yang digunakan untuk penghitungan analisis kestabilan pipa bawah laut. Terdapat beberapa data yang dibutuhkan dalam proses peramalan gelombang di laut dalam suatu perairan yang dibangkitkan oleh angin, seperti panjang fetch efektif dan data angin yang telah dikonversi

elevasi, lokasi, stabilitas, durasi, dan tegangan angin. Setelah melakukan peramalan gelombang, data tinggi dan perioda gelombang yang diperoleh kemudian dimasukkan sebagai *input* untuk menghitung analisis kestabilan pipa. Penghitungan analisis kestabilan pipa menggunakan pada Tugas Akhir ini dilakukan dengan program:

- a) *Mathcad* (Menggunakan analisis *Absolute Lateral Static Stability* dan *Generalized Lateral Stability* dari DNV RP F109)

Pada standar DNV RP F109, terdapat tiga metode analisis yang dapat digunakan untuk melakukan penghitungan analisis kestabilan pipa bawah laut yaitu *Dynamic Lateral Stability*, *Absolute Lateral Static Stability*, dan *Generalized Lateral Stability*.

Rumus yang digunakan pada:

- *Absolute Lateral Static Stability*

Pipa bawah laut dapat dianggap memenuhi kestabilan statik mutlak apabila memenuhi persamaan:

$$a) \gamma_{sc} \cdot \frac{F_{YB} + \mu \cdot F_{ZB}}{\mu \cdot W_S(t_{cc}) + F_R} \leq 1.0$$

$$b) \gamma_{sc} \cdot \frac{F_{ZB}}{W_S(t_{cc})} \leq 1.0$$

Dengan:

$$F_{YB} = r_{tot,y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D(t_{cc}) \cdot C_{YB} \cdot (U_B + V_B)^2$$

$$F_{ZB} = r_{tot,y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D(t_{cc}) \cdot C_{ZB} \cdot (U_B + V_B)^2$$

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

Keterangan:

γ_{sc} = Faktor keamanan

$r_{tot,y}$ = Total faktor reduksi gaya-gaya hidrodinamika

$D(t_{cc})$ = Diameter terluar pipa

F_R = Gaya ketahanan tanah

F_{ZB} = Gaya vertikal antara pipa dengan tanah

F_{YB} = Gaya horizontal antara pipa dengan tanah

C_{YB} = Koefisien beban horizontal puncak

C_{ZB} = Koefisien beban vertikal puncak

z_0 = *Bottom roughness parameter*

z_r = Reference measurement height over seabed

$W_s(t_{cc})$ = Berat tenggelam pipa

U_B = Amplitudo kecepatan osilasi desain tunggal, tegak lurus pipa

V_B = Kecepatan arus osilasi desain pada kedalaman referensi

θ_c = sudut antara arah aliran terhadap pipa

- *Generalized Lateral Stability*

Menurut Lambrakos *et al*, analisis *Generalized* pada DNV RP F109 merupakan penyempurnaan dari DNV RP E305, dimana nilai koefisien berat pipa stabil (L_{stable}) pada analisis ini dapat ditentukan dengan cara:

a) Tanah *Clay*

- Interpolasi nilai-nilai yang diperoleh dari **Tabel A-1** sampai **Tabel A-6** pada DNV RP F109 untuk nilai $N \leq 0.024$ dan $0.0556 \leq G_C \leq 2.78$ yang kemudian dimasukkan ke dalam rumus:

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

Dengan: L_{10} = koefisien berat pipa stabil

M = perbandingan kecepatan arus pada kedalaman referensi dengan kecepatan signifikan

K = bilangan *Keulegan Carpenter*

K_b = *Equivalent sand roughness parameter*

- Menggunakan rumus hasil penyempurnaan pada DNV RP E305 jika perpindahan yang terjadi kurang dari 0.5 diameter pipa

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

$$f(M) = (0.58 \cdot (\log M)^2 + 0.60 \cdot (\log M) + 0.47)^{1.1}$$

L_{stable} = koefisien berat pipa stabil

G_C = parameter kekuatan tanah

M = perbandingan kecepatan arus pada kedalaman referensi dengan kecepatan signifikan

N = faktor percepatan spektrum

- ρ_{sw} = massa jenis air laut
 $D(t_{cc})$ = total diameter terluar
 U_s = kecepatan signifikan di dasar ($U_s = 2 \cdot \sqrt{m_0}$)

b) Tanah *Sand*

- Koefisien berat pipa stabil yang bergeser sejauh Y (L_Y) untuk nilai $N \leq 0.048$ dapat dicari dengan rumus:

$$\log L_Y = \log L_{stable} + \frac{\log \left(\frac{L_{stable5}}{L_{10}} \right)}{\log \left(\frac{0.5}{0.01 \cdot \tau} \right)} \cdot \log \frac{Y}{0.5}$$

Dimana :

- L_Y = koefisien berat pipa stabil saat bergeser sejauh Y
 τ = number of oscillation in the design bottom velocity spectrum ($\tau = \frac{T_U}{T_S}$)
 Y = perpindahan pipa non dimensional
 L_{stable} = koefisien berat pipa yang dibutuhkan agar pipa stabil.
 $L_{stable5}$ = koefisien berat pipa yang dibutuhkan agar pipa stabil saat nilai $K = 5$
 L_{10} = koefisien berat pipa yang dibutuhkan agar pipa stabil saat perpindahan lateral pipa sejauh 10 kali diameter pipa

Pipa bawah laut dapat dianggap memenuhi kestabilan lateral umum apabila memenuhi persamaan yaitu:

- i. $y \leq 0.5D(t_{cc})$
 Dengan: y = perpindahan lateral
 $D(t_{cc})$ = diameter terluar

- ii. $W_S(t_{cc}) \geq W_{stable}$

b) AGA (*Simplified Static* dan *Simplified Quasi Static* yang mengacu pada DNV RP E305)

Program AGA merupakan program perhitungan analisis kestabilan pipa bawah laut yang dikembangkan oleh *American Gas Association* berdasarkan standar industri. Metode perhitungan yang dilakukan adalah menghitung atau mengkalkulasi berat pipa, gaya hidrodinamik, karakter tanah, dan *pipeline embedment*. Nantinya program AGA akan

mengiterasi nilai tebal selimut beton minimum (t_{cc}) sampai diperoleh nilai t_{cc} yang dibutuhkan. Tiga level analisis yang ada pada AGA dapat dilihat di **Tabel 1** di bawah ini.

Tabel 1. Tiga Level Analisis pada AGA

AGA	Tipe Analisis	Definisi
Level 1	<i>Simplified Static</i>	Program yang menggunakan analisis <i>simplified (DNV RP E305)</i> dan menerapkan persamaan <i>Morrison</i> untuk mencari gaya-gaya hidrodinamika
Level 2	<i>Simplified Quasi Static</i>	Program <i>static analysis</i> yang melakukan perhitungan berdasarkan: a. <i>Realistic hydrodynamic forces</i> b. <i>Realistic pipe embedment</i> yang dihitung dengan simulasi <i>quasi static</i>
Level 3	<i>Dynamic Time Domain with Wave Kinematics for 3-D Random Seas</i>	Program simulasi dinamik yang melakukan perhitungan berdasarkan: a. <i>Wave kinematics for 3-D Random Seas</i> b. <i>Generates wave forces based on wave kinematics</i>

Pada Tugas Akhir ini, hanya dua Level saja yang digunakan, yaitu AGA Level 1 (*Simplified Static*) dan AGA Level 2 (*Simplified Quasi Static*). Berikut ini adalah penjelasan dari masing-masing analisis tersebut:

1) AGA Level 1 (*Simplified Static*)

Perhitungan analisis AGA Level ini berdasarkan pada metodologi analisis kestabilan statik, yang memperhitungkan gaya ketahanan tanah dan gaya-gaya hidrodinamika dengan menggunakan persamaan Morison. Hasil analisis penghitungan Level 1 adalah berat terendam struktur dan ketebalan selimut beton (*concrete thickness*) yang memenuhi kriteria kestabilan. Pada analisis level ini, pipa tidak diperbolehkan bergeser. Penghitungan pada AGA Level 1 berdasarkan rumus berikut ini:

$$\text{Gaya Drag} : F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot D \cdot (U_S + U_C) \cdot |(U_S + U_C)|$$

$$\text{Gaya Inersia} : F_I = C_M \cdot \rho \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) a_s$$

$$\text{Gaya Lift} : F_L = 0.5 \cdot \rho \cdot C_L \cdot D \cdot (U_S + U_C)^2$$

Gaya Ketahanan Tanah (F_f)

$$F_f = \mu (W_s - F_L(t))$$

$$\text{Dengan nilai } \mu = \begin{cases} 0.2 - 0.5 & (\text{clay}) \\ 0.6 - 1 & (\text{sand}) \end{cases}$$

Faktor keamanan (f) yang digunakan pada metode ini:

$$f = \frac{\mu (W_s - F_L(t))}{F_D(t) + F_I(t)}$$

Pada AGA Level 1, pipa dikategorikan stabil jika $f \geq 1$

Keterangan:

F_D	= Gaya seret
C_D	= Koefisien seret
ρ	= Massa jenis fluida
D	= Diameter pipa
F_I	= Gaya inersia
C_M	= Koefisien hidrodinamik inersia
a_s	= Percepatan partikel air horizontal efektif
F_L	= Gaya angkat
C_L	= Koefisien gaya angkat
U_s	= Kecepatan partikel akibat gelombang (hasil dari AGA)
U_C	= Kecepatan arus pada kedalaman referensi di atas <i>seabed</i>
D	= Diameter luar pipa
F_f	= Gaya ketahanan tanah
μ	= Koefisien gaya gesek
f	= Faktor keamanan
W_s	= Berat terendam pipa

2) AGA Level 2 (Simplified Quasi Static)

Analisis ini digunakan untuk menentukan berat lapisan yang dibutuhkan dengan menggunakan gaya hidrodinamika terbaru dan gaya-gaya ketahanan tanah yang dihitung berdasarkan sejarah pembebanan pipa. Pada analisis ini, nilai kedalaman pipa yang tertanam (*embedment*) yang dipengaruhi oleh pergerakan *small oscillatory* dapat diprediksi. Penghitungan analisis ini berdasarkan *quasi-static stability* dengan metode penghitungan yang dilakukan pada kondisi *4 hour storm build up* dan *3 hour storm*. Kestabilan pada pipa kemudian dicek pada kecepatan signifikan dan maksimum di dasar (*bottom velocity*) yang terjadi selama kondisi desain.

Interaksi pipa/tanah pada analisis AGA Level 2 sangatlah kompleks. Pada Level ini, gaya ketahanan tanah merupakan fungsi dari koefisien friksi tanah, friksi geser (*sliding friction*), ketahanan kohesif tanah, dan sejarah pembebanan/pergerakan pipa.

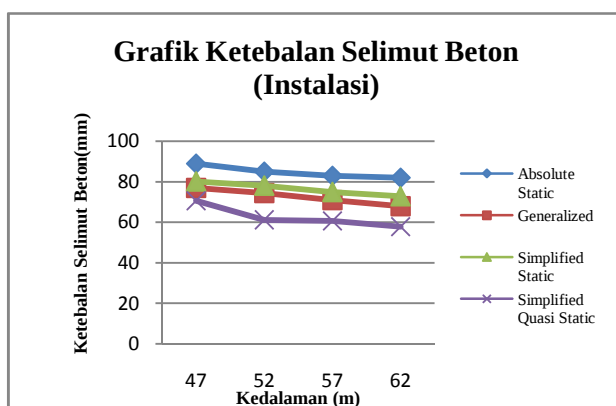
HASIL DAN ANALISIS

Hasil perhitungan desain tebal selimut beton dapat dilihat pada **Tabel 2**.

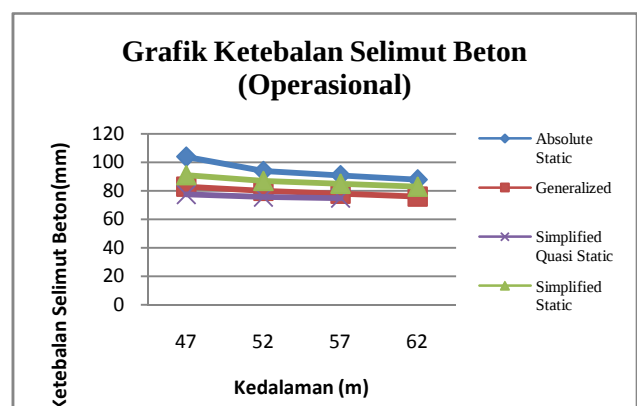
Tabel 2 Hasil Perhitungan Tebal Selimut Beton

Data Metocean	Kedalaman (m)	Tebal Concrete (mm)			
		Absolute Static	Generalized	Simplified Static	Simplified Quasi Static
Kondisi Instalasi	47	89	77	80.22	70.61
	52	85	74.5	78.11	61.21
H 2.41 m	57	83	71	74.99	60.71
T 6.07 s	62	82	68	72.90	57.83
Kondisi Operasi	47	104	83	91.14	77.51
	52	94	80	87.03	75.73
H 5.56 m	57	91	78	85.13	74.97
T 8.37 s	62	88	76	83.05	73.70

Untuk membandingkan metode penghitungan menggunakan DNV RP F109 dan AGA pada pipa dalam Tugas Akhir ini, maka tebal selimut beton pada **Tabel 3** digambarkan ke dalam grafik pada **Gambar 2** dan **Gambar 3** berikut ini.



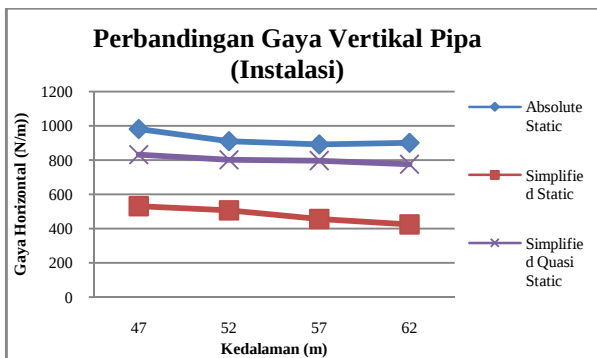
Gambar 2 Grafik Ketebalan Selimut Beton (Instalasi)



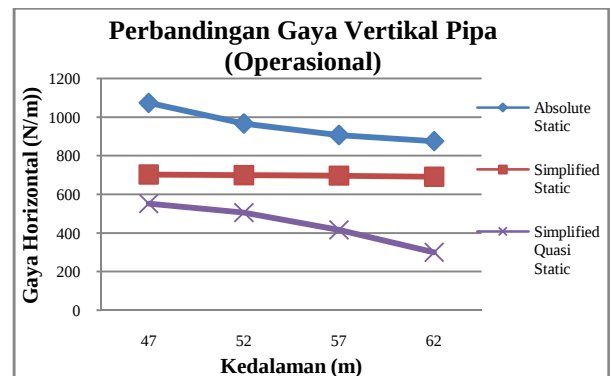
Gambar 3 Grafik Ketebalan Selimut Beton (Operasional)

Gambar 2 dan **Gambar 3** menunjukkan perbandingan antara *absolute static lateral stability*, *generalized lateral stability*, *simplified static*, dan *simplified quasi static*, dimana terlihat perbedaan yang tidak terlalu besar untuk lapisan tebal selimut beton dari tiap-tiap metode.

Sementara untuk perbandingan Gaya Vertikal yang dialami pipa dapat dilihat pada **Gambar 4** dan **Gambar 5** berikut ini.

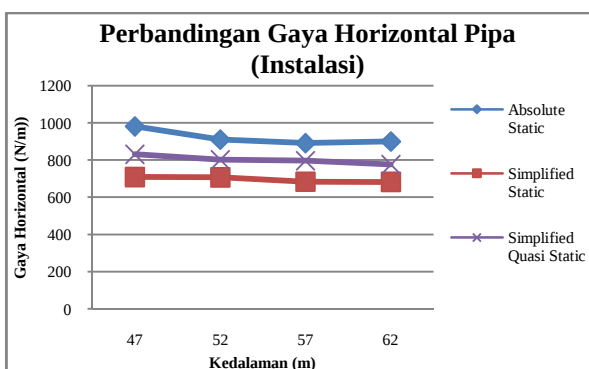


Gambar 4 Grafik Perbandingan Gaya Vertikal Pipa pada Kondisi Instalasi

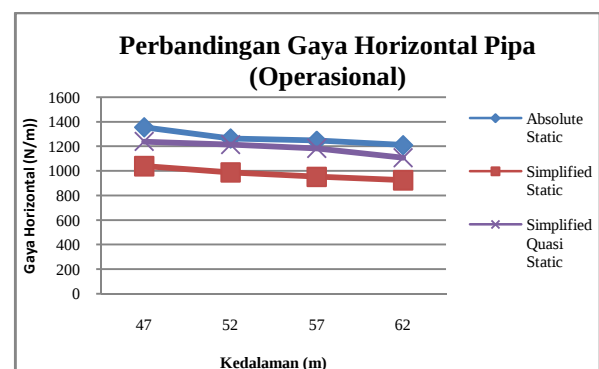


Gambar 5 Grafik Perbandingan Gaya Vertikal Pipa pada Kondisi Operasional

Gambar 4 dan **Gambar 5** menunjukkan besarnya perbedaan antara gaya vertikal untuk metode *absolute static lateral stability*, *simplified static*, dan *simplified quasi static*. Perbedaan gaya vertikal pada ketiga metode ini disebabkan karena nilai koefisien gaya vertikal yang berbeda. Untuk metode *absolute static*, besarnya koefisien gaya vertikal bervariasi antara 1.29 - 1.45. Sementara untuk metode *simplified static*, nilai koefisien gaya vertikal (*lift*) sebesar 0.9. Perbandingan Gaya Horizontal yang dialami pipa dapat dilihat pada **Gambar 6** dan **Gambar 7** berikut ini.



Gambar 6 Grafik Perbandingan Gaya Horizontal Pipa pada Kondisi Instalasi



Gambar 7 Grafik Perbandingan Gaya Horizontal Pipa pada Kondisi Operasional

Gambar 6 dan **Gambar 7** menunjukkan besarnya perbedaan antara gaya horizontal untuk metode *absolute static lateral stability*, *simplified static*, dan *simplified quasi static*. Perbedaan gaya horizontal pada ketiga metode ini disebabkan karena nilai koefisien gaya horizontal

yang berbeda. Untuk metode *absolute static*, besarnya koefisien gaya horizontal bervariasi antara 1.69 - 2.33. Sementara untuk metode *simplified static*, nilai koefisien gaya horizontal untuk gaya *drag* sebesar 0.7 dan gaya inersia sebesar 3.29.

Dari empat gambar tadi menunjukkan bahwa koefisien gaya (*peak load coefficient*) pada metode *absolute static lateral stability* lebih besar daripada koefisien gaya hidrodinamika pada metode *simplified static* dan *simplified quasi static*, sehingga gaya gelombang yang mengenai pipa untuk metode *absolute static lateral stability* lebih besar daripada gaya gelombang yang mengenai pipa untuk metode *simplified static* dan *simplified quasi static*.

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil perhitungan dan analisis proses desain yang telah dilakukan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu:

- a) Dari **Gambar 2** dan **Gambar 3**, dapat dilihat bahwa tebal selimut beton dari perhitungan analisis AGA Level 2 (*Simplified Quasi Static*) merupakan tebal selimut beton terkecil dibandingkan dengan tebal selimut beton yang diperoleh dengan standar DNV RP F109 (*Absolute Lateral Static Stability, Generalized Lateral Stability*) dan analisis AGA Level 1 (*Simplified Static*).
- a) Dalam penentuan tebal selimut beton pada jaringan pipa bawah laut, terdapat beberapa faktor yang harus dipenuhi seperti faktor keamanan dan ekonomi. Jika tebal selimut beton yang dipilih hanya dapat memenuhi salah satu faktor tersebut, maka harus dilakukan analisis lebih lanjut dengan analisis lain yang lebih kompleks seperti AGA Level 3 (*Dynamic Time Domain with Wave Kinematics for 3-D Random Seas*) untuk mendapatkan hasil selimut beton yang paling optimal.
- b) Penggunaan empat analisis kestabilan pipa bawah laut (*on bottom stability*) pada Tugas Akhir ini dapat dipilih dengan pertimbangan awal sebagai berikut:
 - Jika pipa harus diam di atas *seabed*, tanah pada jalur pipa berjenis *stiff clay* (dengan *undrained shear strength* sebesar 1-2ksf), maka analisis *Absolute Lateral Static Stability* dari DNV RP F109 dapat digunakan.
 - Jika pipa diam di atas *seabed*, maka analisis *Simplified Static* dapat digunakan.
 - Jika tanah pada jalur pipa berjenis clay dengan nilai faktor percepatan spektrum (N)>0.024 dan diperbolehkan bergeser dengan nilai maksimum sejauh setengah diameter pipa, maka analisis *Generalized Lateral Stability* dari DNV RP F109 dapat digunakan.

- Jika pipa yang dianalisis harus berada di atas *seabed* dengan estimasi nilai *embedment* pipa yang dihitung berdasarkan pengaruh pembebanan pada kondisi *4hour storm build up* dan *3hour storm*, maka analisis (*Simplified Quasi Static*) dapat digunakan.

Dalam melakukan analisis kestabilan pipa bawah laut berikutnya, sebaiknya digunakan data tanah yang lengkap seperti nilai koefisien friksi tanah. Sementara data yang tersedia hanya mencantumkan jenis tanah, sehingga *input* koefisien friksi tanah dipilih dari syarat perhitungan yang telah tersedia yaitu sebesar 0.2 - 0.5 (*clay*) dan 0.6 - 1 (*sand*).

DAFTAR PUSTAKA

- Det Norske Veritas (DNV), "*Rules for Submarine Pipeline Systems*", Oslo, 1981
- Det Norske Veritas (DNV) Recommended Practice (RP) E305, "*On Bottom Stability*", Oslo, October 1988
- Det Norske Veritas (DNV) Recommended Practice (RP) F109, "*On Bottom Stability Design of Submarine Pipelines*", Oslo, November 2011
- Det Norske Veritas (DNV) Recommended Practice (RP) C205, "*Environmental Conditions and Environmental Loads*", Oslo, October 2010
- Dr. Boyun Guo, dkk, *Offshore Pipelines*, USA : Elsevier, 2005
- Kellogg Brown & Root, "*Submarine Pipeline On Bottom Stability Volume 1 Analysis and Design Guidelines*", Texas, 2002
- A.H Mouselli, "*Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods*", Oklahoma : PennWell Publishing Company, 1981
- K. F. Lambrakos, S. Remseth, T. Sotberg and R. L. P. Verley, "*Generalized Response of Marine Pipelines*", OTC 5507
- Berliando, Rizki, *Laporan Tugas Akhir: Studi Perbandingan Analisis On Bottom Stability pada Shore Approach Berdasarkan standar AGA dan DNV*, Program Studi Teknik Kelautan ITB, Bandung, 2009.
- Rizki Santika. Anindya, *Laporan Tugas Akhir: Desain Dan Analisis Pipa Bawah Laut Menggunakan DNV OS F101 2010 & DNV 1981*, Program Studi Teknik Kelautan ITB, Bandung, 2011.
- Widhiananto Ariono, Andre, *Laporan Tesis: Analisa Pipelaying dan On Bottom Stability Pada Pipa Bawah Laut*, Program Studi Teknik Kelautan ITB, Bandung 2011.
- Nuklerangga Dimpos, Dipa, *Laporan Tugas Akhir: Analisis On Bottom Stability Pada Pipa Terkubur*, Program Studi Teknik Kelautan ITB, Bandung, 2012.