

ANALISIS INSTALASI PIPA BAWAH LAUT PADA SAAT INSTALASI

Andi Rahmawan¹ dan Dr. Paramashanti, ST., MT.²

Program Studi Sarjana Teknik Kelautan
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesha 10 Bandung 40132
andi.rahmawan08@gmail.com

Kata Kunci: Instalasi pipa, *overbend*, kombinasi pembebanan, reliabilitas, Monte Carlo.

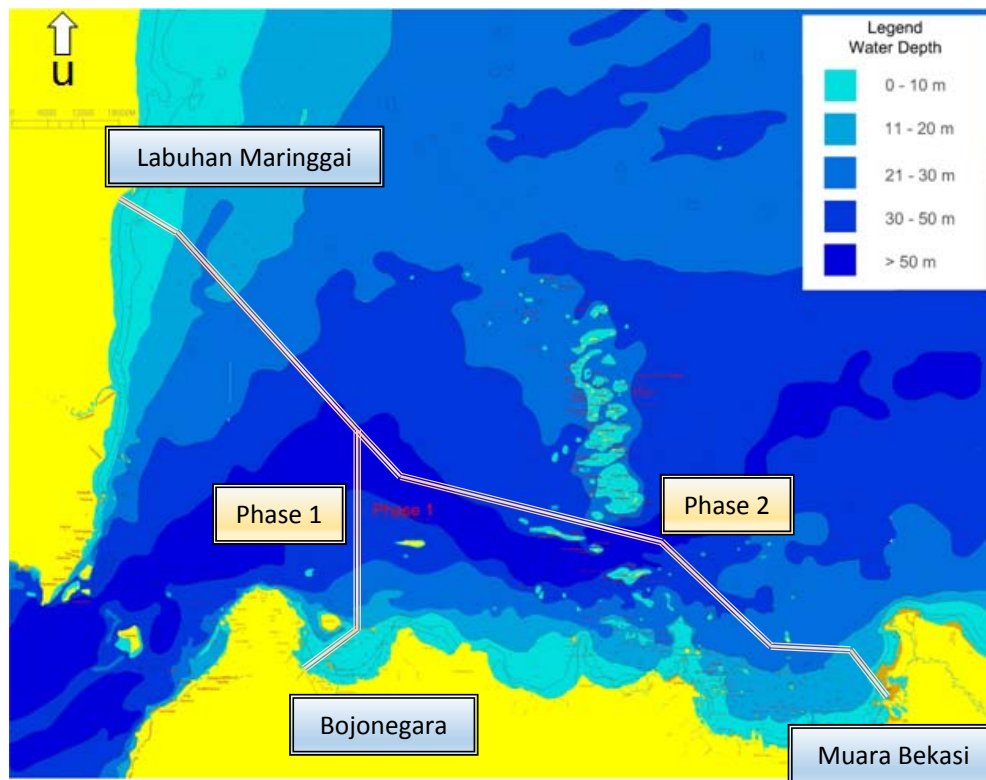
Abstrak

Selama masa penggelaran pipa di bawah laut, pipa memiliki potensi kegagalan (terjadinya *buckling*) akibat beberapa hal, diantaranya adalah akibat dari beban luar yang berupa gelombang. Agar pipa bawah laut dapat dipasang di dasar laut, perlu dilakukan pengecekan desain dan analisis instalasi pipa bawah laut dengan memperhitungkan beban (*load*) yang diterima oleh struktur pipa agar tidak melebihi kapasitas (*resistance*) yang dapat ditahan oleh struktur pipa tersebut. Namun dalam analisis desain, tidak menutup kemungkinan adanya kegagalan pada saat instalasi akibat dari beban lingkungan yang bersifat acak dimana beban yang diterima oleh pipa dapat melebihi kapasitas tahanan desainnya. Untuk mengetahui potensi kegagalan pipa pada saat instalasi perlu dilakukan analisis reliabilitas pipa agar dapat mengetahui tingkat kehandalan struktur pada masa penggelaran. Analisis perhitungan dilakukan dengan 2 kondisi, yaitu kondisi statik (tidak memperhitungkan beban lingkungan) dan kondisi dinamik (memperhitungkan gerakan *laybarge* akibat beban lingkungan). Dimana kondisi statik digunakan untuk optimasi konfigurasi agar tegangan yang diterima pipa dapat memenuhi kriteria tegangan yang diizinkan. Selanjutnya dilakukan analisis reliabilitas pipa di titik pipa terkritis yaitu daerah *overbend* dengan memperhitungkan beban lingkungan berupa gelombang yang berfungsi sebagai variabel acak. Studi kasus yang diambil penulis adalah pemasangan pipa bawah laut yang menghubungkan Labuhan Maringgai – Bojonegara dengan diameter pipa sebesar 32 inci. Pada Tugas Akhir ini akan dilakukan pengecekan desain ketebalan pipa yang sudah ditentukan dengan menggunakan kode standar DNV OS F101 *Submarine Pipeline Systems* 2007, analisis instalasi pipa untuk kondisi statik dan kondisi dinamik menggunakan perangkat lunak OFFPIPE, mengetahui hubungan variasi besar gelombang terhadap tegangan yang terjadi dan menghitung probabilitas kegagalan pipa pada saat instalasi dengan moda kegagalan kriteria *combined loading* menggunakan simulasi Monte Carlo. Dari hasil perhitungan dapat diketahui bahwa tegangan yang terjadi pada pipa cukup besar terutama untuk arah datang gelombang 90°. Dari hasil perhitungan juga didapat bahwa titik tegangan terkritis terjadi dominan di daerah *stinger*, sehingga probabilitas kegagalan akan dihitung berdasarkan titik terkritis ini. Probabilitas kegagalan pipa pada saat instalasi juga bernilai besar ditandai dengan level frekuensi probabilitas kegagalan yang bernilai 4 hingga 5. Diketahui juga bahwa dalam perhitungan menggunakan gelombang reguler, hubungan tinggi gelombang terhadap tegangan yang terjadi pada pipa tidak menunjukkan hubungan yang linear, hal ini dapat diartikan semakin besar tinggi gelombang bukan berarti tegangan yang terjadi pada pipa semakin besar.

PENDAHULUAN

Dalam masa instalasi pipa tidak menutup kemungkinan bahwa dalam proses penggelaran dapat terjadi kegagalan. Kegagalan yang dimaksud adalah pipa mengalami *buckling* pada masa instalasi akibat dari parameter pipa yang sudah didesain ternyata tidak memenuhi kriteria tertentu karena beban (*load*) yang diterima pipa melebihi kapasitas (*resistance*) yang dapat ditopang oleh pipa.

Terdapat sebuah jalur pipa pipa bawah laut yang mengalirkan gas bumi dari wilayah Sumatera bagian selatan sampai dengan pulau Jawa bagian barat. Proyek ini memiliki dua *Phase* jalur pipa, yakni *Phase 1* yang menghubungkan Labuhan Maringgai – Bojonegara dengan panjang 100 km dan *Phase 2* yang menghubungkan Labuhan Maringgai – Muara Bekasi dengan panjang 160 km. Lokasi proyek dapat dilihat pada **Gambar 1**



Gambar 1 Lokasi proyek jalur pipa *Phase 1* dan *Phase 2*

Dalam Tugas Akhir ini akan dikaji tingkat kehandalan pipa di titik tegangan terkritis pipa pada saat masa penggelaran yang menghubungkan Labuhan Maringgai – Bojonegara (*Phase 1*) dengan diameter pipa sebesar 32 inci pada kedalaman 58 m. Metode instalasi pipa yang digunakan adalah metode *S-Lay*. Dalam analisis perhitungan tegangan pipa yang terjadi, digunakan bantuan perangkat lunak OFFPIPE. Tingkat kehandalan pipa akan ditinjau berdasarkan moda kegagalan kriteria *combined loading* yang mengacu pada standar DNV OS F101 *Submarine Pipeline System*

2007. Dimana variabel acak yang digunakan adalah tinggi gelombang (H) dengan periode gelombang (T). Kemudian tingkat kehandalan pipa akan disajikan dalam bentuk probabilitas kegagalan dimana perhitungan probabilitas kegagalan menggunakan simulasi Monte Carlo.

TEORI DAN METODOLOGI

Analisis instalasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak OFFPIPE. Perangkat lunak ini dapat menghitung tegangan berupa gaya aksial, momen tekuk dan total tegangan yang terjadi sepanjang profil pipa. Dimana dalam pemodelan OFFPIPE dibagi menjadi dua, yaitu pada kondisi statik dan kondisi dinamik. Perbedaan keduanya antara lain pada input dinamik diperlukan *input* data koefisien seret dan koefisien masa tambahan, data arus, data gelombang (data integrasi waktu, tinggi dan periode gelombang, dan RAO *laybarge*) sedangkan pada *input* statik tidak diperlukan data-data tersebut melainkan hanya dibutuhkan *input* pada sistem *pipelaying* saja.

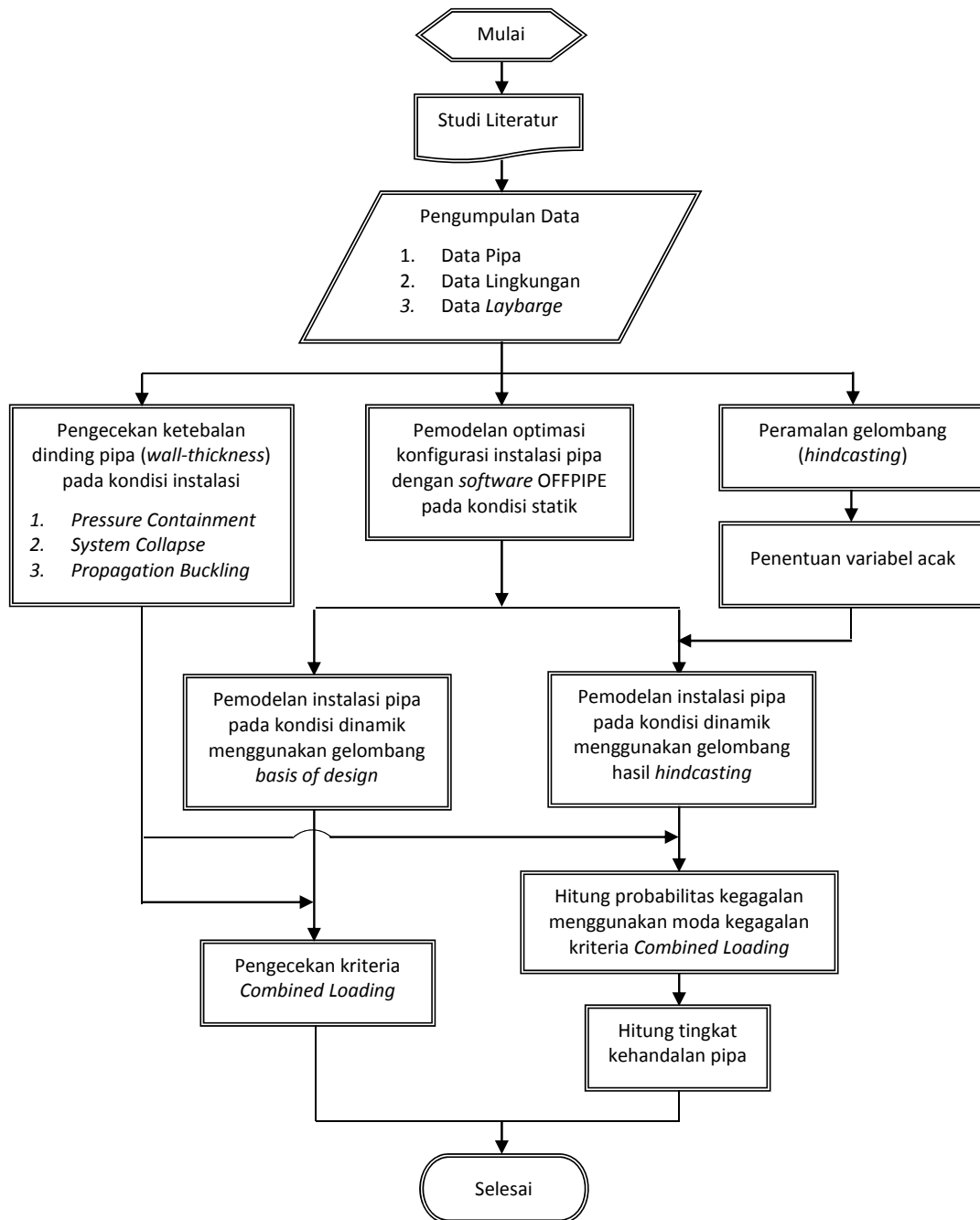
Dalam optimasi pemodelan diharuskan agar tegangan yang terjadi di sepanjang pipa cukup merata dan tidak melewati batas tegangan izin berdasarkan standar kode yang sudah ditentukan.

Dalam menghitung probabilitas kegagalan, tentukan terlebih dahulu variabel acak yang berpengaruh terhadap moda kegagalan sistem. Variabel acak yang berpengaruh pada moda kegagalan yang dipilih salah satunya adalah tinggi gelombang (H) dan periode gelombang (T). Dimana besar gelombang akan berpengaruh terhadap besar nilai *moment bending design* (Md), *axial tension design* (Sd) dan *external pressure* (Pe) pada kriteria moda kegagalan *combined loading*.

Dalam penentuan parameter variabel acak, dilakukan hindcasting terlebih dahulu. Dengan metode SPM 1984, didapat nilai besaran gelombang sintetis berupa tinggi gelombang signifikan (H_s) dan periode gelombang signifikan (T_s). Kemudian nilai H_s dan T_s untuk masing-masing nilai gelombang sintetis, diasumsikan sebagai H dan T (menjadi gelombang individual).

Kemudian tingkat kehandalan pipa dihitung menggunakan simulasi Monte Carlo yang disajikan dalam bentuk probabilitas kegagalan menggunakan kriteria *combined loading* berdasarkan standar DNV OS F101 *Submarine Pipeline System* 2007.

Sistematika penulisan tugas akhir ini disajikan dalam bentuk diagram alir seperti pada **Gambar 2** dibawah ini.



Gambar 2 Flowchart pengerjaan Tugas Akhir

HASIL DAN ANALISIS

Pemodelan instalasi pipa dilakukan untuk 3 kondisi yaitu pada pada kondisi statik setelah dilakukan optimasi, kondisi dinamik berdasarkan gelombang *basis of design*, dan kondisi dinamik berdasarkan gelombang hasil *hindcasting* untuk masing-masing arah datang gelombang dan arah datang arus 0° 45° dan 90° .

Dengan menggunakan langkah-langkah yang sudah dibahas, dapat dilakukan perhitungan tingkat kehandalan pipa terhadap arah datang gelombang dan arah datang arus 0°, 45°, dan 90°. Perlu diketahui bahwa dalam perhitungan ini, dilakukan beberapa simplifikasi perhitungan dengan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Gelombang yang digunakan diasumsikan sebagai gelombang reguler dan bukan gelombang spektrum.
2. Gelombang H_s dan T_s (gelombang signifikan) diasumsikan menjadi gelombang H dan T (gelombang individual).
3. Digunakan RAO maksimum untuk setiap besar tinggi dan periode gelombang (RAO tunggal).

Hasil perhitungan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik pada pipa di titik yang terjadi tegangan terkritis (daerah *overbend*).

Untuk kondisi statik dan dinamik berdasarkan gelombang *basis of design* akan disajikan dalam **Tabel 1** hingga **Tabel 6**

Tabel 1 Hasil perhitungan % SMYS maksimum pada kondisi statik

SMYS Max (Static)						Layable Criteria
Overbend			Sagbend			
Value (%)	Allowable (%)	Location	Value (%)	Allowable (%)	Location	
72.52	85	Node 24 (roller pertama stinger)	54.4	72	Node 46	Layable

Tabel 2 Hasil perhitungan *total stress* maksimum, *axial stress* maksimum, dan *bending moment* maksimum pada kondisi statik

Parameter	Overbend		Sagbend	
	Value (MPa)	Location	Value (MPa)	Location
Total Stress Max (Static)	326.34	Node 24 (roller pertama stinger)	244.81	Node 46
Axial Tension Max (Static)	712.15	Node 13 (Tensioner ke-2)	626.65	Node 32
Bending Moment Max (Static)	-3930.491	Node 24 (roller pertama stinger)	2937.042	Node 46

Tabel 3 Hasil perhitungan % SMYS maksimum pada kondisi dinamik

Wave & Current Direction n (degree)	SMYS Max (Dynamic)						Layable Criteria
	Overbend			Sagbend			
	Value (%)	Allowable (%)	Location	Value (%)	Allowable (%)	Location	
0	84.15	100	Node 30 (ujung stinger)	79.31	96	Node 48	Layable
45	85.36	100	Node 30 (ujung stinger)	67.16	96	Node 43	Layable
90	125.23	100	Node 30 (ujung stinger)	95.56	96	Node 48	Not Layable

Tabel 4 Hasil perhitungan total stress maksimum pada kondisi dinamik

Wave & Current Direction (degree)	Total Stress Max (Dynamic)			
	Overbend		Sagbend	
	Value (MPa)	Location	Value (MPa)	Location
0	378.66	Node 30 (ujung stinger)	356.89	Node 48
45	384.12	Node 30 (ujung stinger)	302.21	Node 43
90	563.52	Node 30 (ujung stinger)	430.03	Node 48

Tabel 5 Hasil perhitungan axial tension maksimum pada kondisi dinamik

Wave & Current Direction (degree)	Axial Tension Max (Dynamic)			
	Overbend		Sagbend	
	Value (kN)	Location	Value (kN)	Location
0	1254.46	Node 13 (Tensioner ke-2)	1153.6	Node 32
45	1334.89	Node 13 (Tensioner ke-2)	1234.37	Node 32
90	3190	Node 13 (Tensioner ke-2)	3069.06	Node 32

Tabel 6 Hasil perhitungan *bending moment* maksimum pada kondisi dinamik

Wave & Current Direction (degree)	Bending Moment Max (Dynamic)			
	Overbend		Sagbend	
	Value (kNm)	Location	Value (kNm)	Location
0	4610.92	Node 30 (ujung stinger)	4398.15	Node 48
45	4604.01	Node 30 (ujung stinger)	3526.62	Node 43
90	6949.39	Node 30 (ujung stinger)	5329.95	Node 50

Perbandingan % SMYS pada kondisi statik dengan kondisi dinamik *basis of design* dapat dilihat pada **Tabel 7**

Tabel 7 Perhitungan % SMYS pada kondisi statik vs dinamik

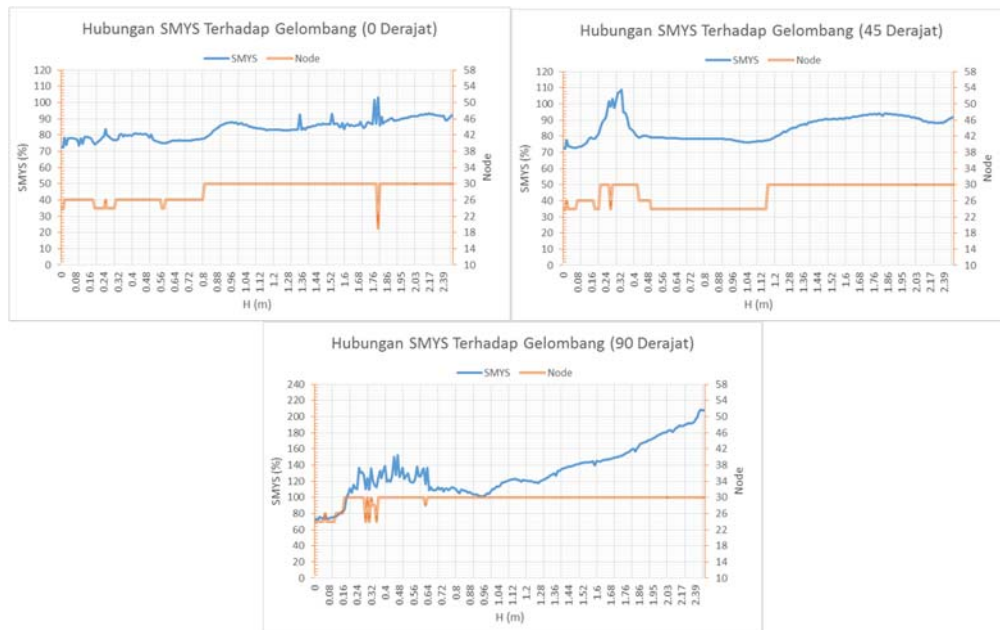
Wave & Current Direction (degree)	SMYS Max (%)			
	Overbend		Sagbend	
	Static	Dynamic	Static	Dynamic
0	72.52	84.15	54.4	79.31
45		85.36		67.16
90		125.23		95.56

Dari hasil pemodelan, dapat dilihat dari pemodelan dinamik bahwa titik tegangan terkritis terjadi dominan di daerah *overbend* khususnya pada *node stinger* (*node-24* hingga *node-30*) dan arah terkritis terjadi pada arah datang gelombang 90°. Hal ini disebabkan karena nilai RAO pada *laybarge* yang sangat besar pada arah 90°, yaitu pada gerakan *roll* sebesar 7.338. Nilai tersebut merupakan RAO maksimum. Jika dilakukan analisis menggunakan gelombang spektrum seperti kejadian gelombang di lapangan, hasilnya tidak akan sebesar ini. Dapat dikatakan pada pemodelan ini dilakukan simplifikasi perhitungan menggunakan besar tinggi dan periode gelombang yang diasumsikan sebagai gelombang reguler. Namun dalam pemilihan nilai RAO, tidak sesuai dengan yang seharusnya terjadi dimana besar nilai RAO yang digunakan seharusnya mengikuti besar gelombang. Hal ini juga dikarenakan dalam pemodelan OFFPIPE pada Tugas Akhir ini digunakan asumsi jika memodelkan gelombang dengan gelombang reguler maka akan digunakan RAO maksimum. RAO pada Tugas Akhir kali ini dianggap sebagai nilai deterministik dan tidak berpengaruh terhadap besarnya nilai tinggi dan periode gelombang. Sehingga hasil pemodelan ini dinilai sangat konservatif.

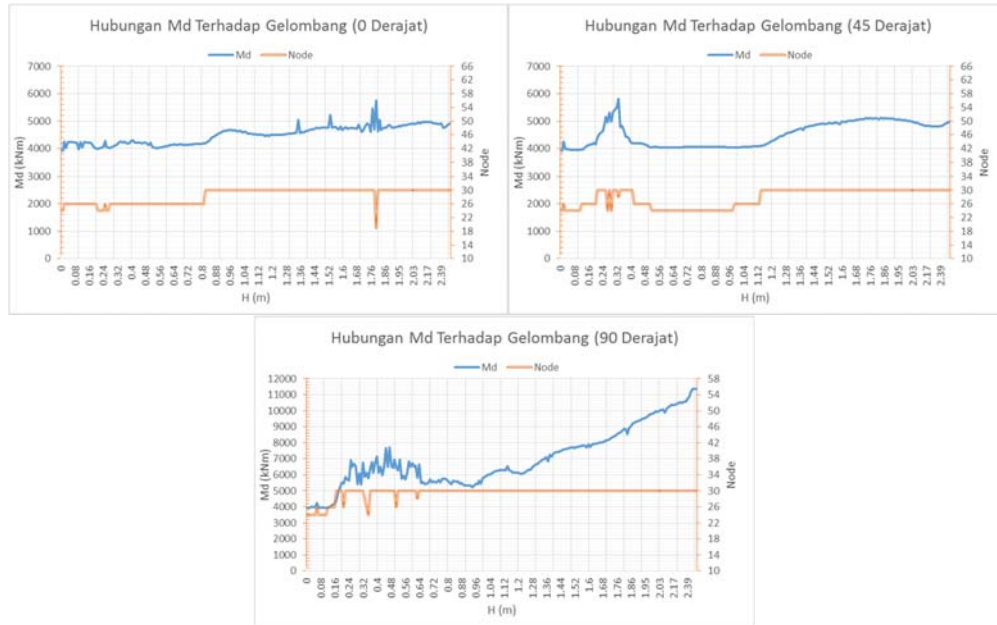
Jika dari hasil perhitungan pipa ditunjukkan “*not layable*” atau dari kondisi kriteria *combined loading* ditunjukkan dengan “NOT OK” bukan berarti pipa tidak *layable* di lapangan, hanya saja

dalam analisis perhitungan kali ini digunakan RAO maksimum untuk tiap besar gelombang sehingga hasilnya akan sangat konservatif yang dapat dilihat dari peningkatan besar % SMYS pipa secara signifikan dari kondisi statik dibandingkan dengan kondisi dinamik menggunakan gelombang *basis of design*.

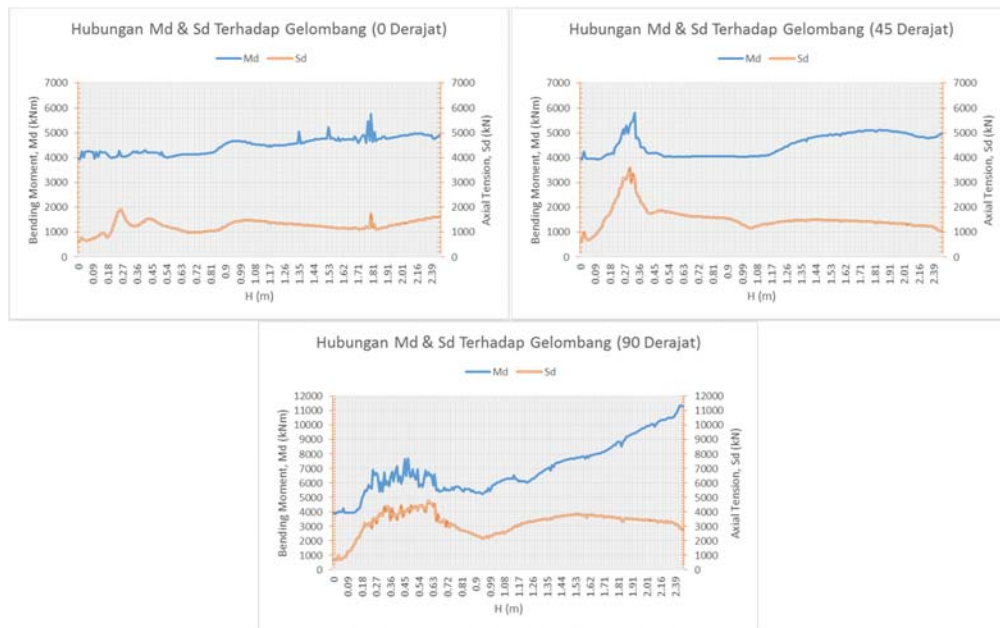
Untuk pemodelan dinamik menggunakan data hasil perhitungan *hindcasting*, akan disajikan dalam bentuk hubungan nilai maksimum % SMYS, *axial tension design* (Sd), *bending moment design* (Md) dan tekanan eksternal (Pe) terhadap gelombang untuk daerah *overbend* karena pada *overbend* terjadi nilai tegangan yang paling besar untuk untuk masing-masing arah datang gelombang dan arah datang arus 0° 45° dan 90° yang dapat dilihat pada **Gambar 3**, **Gambar 4** dan **Gambar 5**.



Gambar 3 Grafik Hubungan % SMYS terhadap gelombang pada *overbend* arah 0°, 45°, dan 90°



Gambar 4 Grafik Hubungan *bending moment design* (M_d) terhadap gelombang pada *overbend* arah 0° , 45° , dan 90°



Gambar 5 Grafik Hubungan M_d dan S_d terhadap gelombang pada *overbend* arah 0° , 45° , dan 90°

Dalam analisis gelombang reguler, kita tidak dapat langsung mengambil nilai H dan T berdasarkan satu nilai gelombang. Hal ini ditunjukkan pada **Gambar 3** hingga **Gambar 5**. Besar H dan T gelombang basis of design sebesar 1.27 m dan 5.6 m, Sedangkan pada grafik ditunjukkan bahwa gelombang dengan tinggi dibawah 1.27 m dapat memberikan nilai M_d dan S_d yang lebih besar.

Rangkuman hasil pengecekan ketebalan dinding pipa dengan tebal 22.225 mm pada kondisi instalasi dapat dilihat pada **Tabel 8**

Tabel 8 Hasil pengecekan ketebalan dinding pipa

No.	Criteria			Utilization Ratio	Criteria Condition Check
1	Pressure Containment			-0.023	“OK”
2	System Collapse			0.091	“OK”
3	Propagation Buckling			0.488	“OK”
4	Combined Loading	Pemodelan Statik Optimasi		0.643	“OK”
		Pemodelan Dinamik Basis of Design	0°	0.887	“OK”
			45°	0.885	“OK”
			90°	2.062	“NOT OK”

Dari hasil pengecekan ketebalan dinding pipa dapat dilihat bahwa dalam kondisi pemodelan dinamik *basis of design* arah datang 90° tidak memenuhi kriteria. Sehingga dalam pemodelan dinamik dengan parameter gelombang berdasarkan gelombang *basis of design* untuk arah datang gelombang 90° tidak terpenuhi. Namun keseluruhan kriteria lainnya terpenuhi.

Berikut adalah hasil perhitungan probabilitas kegagalan pipa dari arah datang gelombang dan arah datang arus 0°, 45° dan 90° pada daerah *overbend* dengan jumlah simulasi yang berbeda seperti yang disajikan pada **Tabel 9**

Tabel 9 Probabilitas kegagalan

Wave & Current Direction (degree)	N Simulation	Frequency of Failure	PoF	Ranking
0	100	1	0.01	4
	1000	8	0.008	4
	10000	68	0.0068	4
45	100	7	0.07	5
	1000	97	0.0970	5
	10000	947	0.0947	5
90	100	94	0.94	5
	1000	938	0.938	5
	10000	9402	0.9402	5

Dari hasil tabel diatas dapat dilihat bahwa pada daerah *overbend* dengan arah datang gelombang dan arah datang arus 0°, 45° dan 90° memberikan probabilitas kegagalan yang tinggi hingga mencapai level frekuensi 5. Seperti yang dijelaskan sebelumnya, hal ini disebabkan karena dalam perhitungan digunakan asumsi gelombang reguler sehingga menggunakan nilai RAO *laybarge* terbesar.

Safety factor juga mempengaruhi besar probabilitas kegagalan. Karena dalam perhitungan pada moda kegagalan, *safety factor* masih diperhitungkan, sehingga menyebabkan nilai toleransi yang kecil terhadap kriteria kegagalan. Hal ini dapat dikatakan pipa gagal secara desain namun belum tentu terjadi kegagalan di lapangan.

Dari hasil diatas dapat disimpulkan bahwa pada sistem pipa yang ditinjau kali ini, pipa kurang handal pada masa instalasi dari aspek desain. Hal ini dikarenakan beberapa asumsi diantaranya asumsi gelombang sebagai gelombang reguler, mengambil nilai RAO maksimum tanpa menyesuaikan besar gelombang yang terjadi, dan masih memperhitungkan *safety factor* dalam moda kegagalan.

SIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil *hindcasting*, pengecekan ketebalan dinding pipa, analisis instalasi pipa dengan metode S-Lay dan perhitungan probabilitas kegagalan pipa dalam Tugas Akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan uji Anderson-Darling *test*, bentuk distribusi yang paling baik untuk digunakan pada data gelombang adalah bentuk distribusi 3-parameter Weibull.
2. Diameter pipa dan ketebalan dinding pipa yang digunakan masing-masing adalah 32 inci dan 0.875 inci. Ketebalan dinding ini memenuhi kriteria *pressure containment*, *system collapse*, *propagation buckling*, dan *combined loading* berdasarkan DNV OS F101

Submarine Pipeline System 2007 pada kondisi instalasi statik dan pada kondisi dinamik arah datang gelombang 0° dan 45° , namun pada kondisi dinamik arah datang gelombang 90° tidak memenuhi kriteria.

3. Kombinasi antara arah arus dan gelombang yang menghasilkan tegangan paling besar pada pipa terjadi dari arah datang gelombang dan arah datang arus 90° .
4. Hasil analisis instalasi pada kondisi statik menunjukkan bahwa tegangan pipa maksimum yang terjadi selama masa instalasi adalah 72.52% SMYS pada *overbend* dan 54.4% SMYS pada *sagbend*. Tegangan ini tidak melebihi batas kriteria tegangan yang diizinkan yaitu 85% untuk *overbend* dan 72% untuk *sagbend*. Sehingga konfigurasi ini dapat digunakan pada kondisi statik.
5. Hasil analisis instalasi pada kondisi dinamik menunjukkan bahwa tegangan pipa maksimum yang terjadi selama masa instalasi untuk arah 0° adalah 84.79% SMYS pada *overbend* dan 79.31% SMYS pada *sagbend* dan untuk arah 45° adalah 85.36% SMYS pada *overbend* dan 67.16% SMYS pada *sagbend*. Tegangan ini tidak melebihi batas kriteria tegangan yang diizinkan yaitu 100% untuk *overbend* dan 96% untuk *sagbend*. Sehingga konfigurasi ini dapat digunakan pada kondisi dinamik untuk arah datang gelombang 0° dan 45° .
6. Hasil analisis instalasi pada kondisi dinamik menunjukkan bahwa tegangan pipa maksimum yang terjadi selama masa instalasi untuk arah 90° adalah 125.23% SMYS pada *overbend* dan 95.56% SMYS pada *sagbend*. Tegangan ini melebihi batas kriteria tegangan yang diizinkan untuk daerah *overbend* yaitu 100% namun memenuhi batas kriteria tegangan izin pada daerah *sagbend* yaitu 96%. Sehingga konfigurasi ini mengakibatkan pipa menjadi tidak *layable* pada kondisi dinamik untuk arah datang gelombang 90° .
7. Berdasarkan hasil analisis instalasi dengan konfigurasi instalasi yang sama, dapat diketahui bahwa pada analisis instalasi kondisi dinamik menyebabkan peningkatan tegangan pipa yang signifikan dibandingkan dengan kondisi statik yaitu sebesar 11.63% SMYS pada *overbend* dan 24.91% SMYS pada *sagbend* untuk arah datang gelombang 0° , 12.84% SMYS pada *overbend* dan 12.76% SMYS pada *sagbend* untuk arah datang gelombang 45° , dan 52.71% SMYS pada *overbend* dan 41.16% SMYS pada *sagbend* untuk arah datang gelombang 90° .
8. Dari hasil analisis instalasi berdasarkan gelombang hasil *hindcasting*, dapat ditunjukkan bahwa besar gelombang kurang dari gelombang *basis of design* ($H_s = 1.27$ m dan $T_s = 5.6$

s) dapat menghasilkan tegangan yang lebih besar. Sehingga tinggi dan periode gelombang yang digunakan pada gelombang *basis of design* tidak menjamin pipa akan *layable* secara desain. Titik *roller (node)* tegangan maksimum yang terjadi pada pipa terjadi secara dominan di *node-24* hingga *node-30* (daerah *stinger rollers*).

9. Dari hasil analisis instalasi berdasarkan gelombang hasil *hindcasting* juga menunjukkan semakin besar tinggi gelombang bukan berarti semakin besar tegangan yang terjadi, namun besarnya tegangan dipengaruhi oleh profil RAO *laybarge* yang ditinjau sehingga tidak menutup kemungkinan bahwa gelombang dengan tinggi dan periode yang kecil dapat memberikan tegangan yang lebih besar daripada tinggi dan periode gelombang yang besar.
10. Probabilitas kegagalan pipa dengan menggunakan moda kegagalan *combined loading* DNV OS F101 2007 untuk arah 0° menunjukkan nilai yang tinggi yaitu sebesar 0.01 untuk 100 data simulasi, 0.008 untuk 1000 data simulasi, dan 0.0068 untuk 10000 data simulasi.
11. Probabilitas kegagalan pipa dengan menggunakan moda kegagalan *combined loading* DNV OS F101 2007 untuk arah 45° menunjukkan nilai yang tinggi yaitu sebesar 0.07 untuk 100 data simulasi, 0.097 untuk 1000 data simulasi, dan 0.0947 untuk 10000 data simulasi.
12. Probabilitas kegagalan pipa dengan menggunakan moda kegagalan *combined loading* DNV OS F101 2007 untuk arah 90° menunjukkan nilai yang tinggi yaitu sebesar 0.94 untuk 100 data simulasi, 0.938 untuk 1000 data simulasi, dan 0.9402 untuk 10000 data simulasi.
13. Dari jumlah simulasi Monte Carlo, perbedaan probabilitas kegagalan dari 100 simulasi, 1000 simulasi dan 10000 simulasi untuk masing-masing arah datang gelombang 0° , 45° , dan 90° tidak terlampau besar.
14. Dari hasil perhitungan, probabilitas kegagalan menunjukkan nilai yang cukup besar yaitu berada pada level frekuensi 4 untuk arah 0° dan level frekuensi 5 untuk arah 45° dan 90° . Sehingga pada kasus kali ini, pipa kurang handal dalam masa instalasi.

Saran yang dapat diberikan setelah melakukan Tugas Akhir ini agar dapat menjadi lebih baik lagi adalah sebagai berikut:

1. Data acak dapat berupa variabel yang berkaitan dari sistem yaitu tahanan (*resistance*) dari sistem itu sendiri seperti material pipa, tebal pipa, diameter pipa, material selimut beton, dan lain-lain.

2. Arus juga dapat dijadikan sebagai variabel acak. Dimana arus termasuk kategori beban (*load*).
3. Perlu dilakukan pengecekan moda kegagalan yang lain seperti kriteria *overbend strain*.
4. Perlu dilakukan analisis perhitungan pada kedalaman minimum yaitu 48 m.
5. Perlu dilakukan analisis instalasi dari variasi arah datang gelombang dan arus yang lain dan tidak hanya arah dominan karena nilai RAO dari tiap arah datang gelombang berbeda-beda.
6. Perlu dilakukan perhitungan analisis instalasi dengan *laybarge* yang lebih besar agar tegangan yang terjadi pada *overbend* dan *sagbend* lebih kecil. Karena dengan kapal yang lebih besar akan memberi nilai RAO yang lebih kecil.
7. Perlu melakukan pemodelan bentuk *laybarge* yang lebih detail agar nilai RAO kapal lebih mendekati kondisi di lapangan.
8. Sebaiknya gunakan besar nilai RAO sesuai dengan besar gelombang yang terjadi dan tidak menggunakan nilai maksimum RAO untuk seluruh kejadian gelombang agar probabilitas kegagalan sesuai dengan kondisi gelombang yang terjadi di lapangan.
9. Kriteria *safety factor* pada kriteria moda kegagalan dapat dihilangkan untuk mendapatkan probabilitas kegagalan sesuai dengan kondisi yang terjadi di lapangan dan bukan probabilitas kegagalan berdasarkan pada kondisi desain.

DAFTAR PUSTAKA

American Petroleum Institute. *Design, Construction, Operation, and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design)*. Washington, D.C., 1999.

Bai, Yong. *Pipelines and Risers*. Amsterdam: Elsevier Ocean Engineering Book Series, 2001.

Det Norske Veritas. *DNV OS F101 Submarine Pipeline Systems*. Oslo: Veritas Offshore Technology and Services A/S., 2007.

Det Norske Veritas. *Rules for Submarine Pipeline Systems*. Oslo: Veritas Offshore Technology and Services A/S., 1981.

Det Norske Veritas. *DNV RP F107 Risk Assessment Pipeline Protection*. Oslo: Veritas Offshore Technology and Services A/S., 2010.

Falahi, Fajrin. *Pengaruh Arus dan Panjang Free Span Pada Resiko Fatigue Pipa Bawah Laut*. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2013.

- Folmen, Derpris. *Analisis Instalasi Pipa Bawah Laut di Lepas Pantai Madura Barat*. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2013.
- Guo, B., Song, S., Chacko, J., & Ghalambor, A. *Offshore Pipelines*. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2005.
- Lee, Jaeyoung. *Introduction to Offshore Pipelines and Risers*. Houston, 2007.
- Mahadevan, S. and Haldar, A. *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- Malahy, R. C. *Offpipe User's Guide*. Houston: Offpipe, 1996.
- Perdana, Firmansyah. *Analisis Tegangan Pipa Bawah Laut Akibat Gerakan Lay Barge pada Saat Instalasi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2012.
- US Army, Corps of Engineers. *Shore Protection Manual Volume I*. Washington, D.C., 1984.