

ANALISIS TRANSPORTASI DAN INSTALASI *RIGID RISER* PADA SISTEM *FREE STANDING HYBRID RISER*

TUGAS AKHIR

Karya tulis sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

Oleh:

YONATHAN MOZES MANDAGI

NIM. 15508008



**PROGRAM STUDI TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN LINGKUNGAN
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
2012**



**PROGRAM STUDI TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN LINGKUNGAN
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG**

TUGAS AKHIR

Diberikan kepada:

Nama : Yonathan Mozes Mandagi

NIM : 155 08 008

Judul Tugas Akhir adalah “**Analisis Transportasi dan Instalasi *Rigid Riser* pada Sistem *Free Standing Hybrid Riser***”, dengan isi Tugas Akhir sebagai berikut:

- Bab I Pendahuluan
- Bab II Teori Dasar
- Bab III Sistem Subsea Riser
- Bab IV Free Standing Hybrid Riser
- Bab V Studi Kasus
- Bab VI Analisis Instalasi Rigid Riser
- Bab VII Penutup

Tugas Akhir ini dibuat rangkap enam dengan rincian sebagai berikut:

1. Untuk Mahasiswa	1 buah
2. Untuk Pembimbing Tugas Akhir	1 buah
3. Untuk Penguji Sidang Tugas Akhir	2 buah
4. Untuk Tata Usaha PST Teknik Kelautan	1 buah
5. Untuk Perpustakaan	1 buah

Menyetujui,

Koordinator Tugas Akhir,

Pembimbing Tugas Akhir,

Andojo Wurjanto, Ph.D
NIP. 19600330 198503 1 007

Dr. Paramashanti, ST., MT.
NIP. 19760703 201012 2 002

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir Sarjana

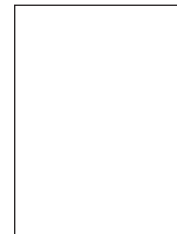
ANALISIS TRANSPORTASI DAN INSTALASI *RIGID RISER* PADA SISTEM *FREE STANDING HYBRID RISER*

Adalah benar dibuat oleh saya sendiri dan belum pernah dibuat dan diserahkan sebelumnya baik sebagian ataupun seluruhnya, baik oleh saya maupun orang lain, baik di ITB maupun institusi pendidikan lainnya.

Bandung, September 2012

Penulis,

Yonathan Mozes Mandagi
NIM. 155 08 008



Bandung, September 2012

Pembimbing,

Dr. Paramashanti, ST., MT.
NIP. 19760703 201012 2 002

Mengetahui:

Ketua Program Studi Teknik Kelautan,

Irsan Soemantri Brojonegoro, Ph.D
NIP. 19600619 198703 1 001

ABSTRAK

Seiring dengan perkembangan aktivitas eksplorasi dan produksi migas yang merambah ke perairan yang lebih dalam, dibutuhkan pengembangan teknis yang giat dan ekonomis untuk sistem riser. Saat ini, sistem riser laut dalam yang banyak digunakan adalah sistem *Steel Catenary Riser* (SCR) yang merupakan salah satu contoh dari sistem *flexible riser*. Konstruksi sistem SCR merupakan sebuah konstruksi yang melewati tahap pengelasan di daratan karena pada umumnya sistem ini diadaptasi dari konsep produksi struktur untuk laut dangkal. Maka dari itu, kapal dengan spesifikasi yang tinggi dibutuhkan untuk menginstal sistem riser laut dalam ini, dengan harga sewa kapal harian dan biaya mobilisasi yang tinggi. Selain itu, semakin dalam perairannya, maka desain *riser* untuk sistem ini akan semakin besar dan berat, dimana menimbulkan resiko kerusakan yang semakin besar. Untuk menanggulangi kekurangan pada sistem *flexible riser*, dikenalkan sistem baru yang bernama *Free Standing Hybrid Riser* (FSHR). FSHR merupakan gabungan dari *flexible riser* dan *rigid riser*. Desain FSHR harus memperhatikan proses transportasi dari lokasi fabrikasi ke lokasi pemasangan dan proses instalasi, termasuk bagian *rigid riser*.

Proses transportasi *rigid riser* dilakukan dengan metode *towing*, terdapat beberapa alternatif metode *towing*, yaitu *surface tow*, *mid-depth tow*, *bottom tow*, dan *off-bottom tow* yang masing-masing akan mempengaruhi besarnya gaya yang bekerja selama proses transportasi ini. Dengan demikian, diperlukan suatu analisis untuk mempertimbangkan metode *towing* yang dapat dilaksanakan secara efektif dan efisien. Selain proses transportasi, instalasi *rigid riser* juga mempunyai tantangan tersendiri dalam instalasi FSHR. Hasil desain *rigid riser* sangat berpengaruh pada proses instalasinya termasuk tebal dinding *riser* yang menentukan apakah *riser* tersebut akan berhasil untuk diinstal atau mengalami kegagalan yang mungkin terjadi selama proses instalasi, sehingga diperlukan penentuan nilai tebal *riser* yang optimum sesuai dengan pengecekan kriteria pada API RP 2RD, 1998. Kemudian tahapan-tahapan dalam proses instalasi *rigid riser* perlu dilakukan analisis untuk mengetahui kondisi-kondisi kritis saat instalasi dalam menentukan keberhasilan suatu *rigid riser* terpasang pada *riser base*, dengan membandingkan tegangan von Mises yang terjadi dengan tegangan yang diizinkan sesuai dengan kekuatan material *rigid riser* itu sendiri.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan yang Maha Esa, yang senantiasa membimbing dan memberikan kekuatan, sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya.

Tugas Akhir ini disusun pada dasarnya untuk memenuhi syarat kelulusan sarjana di Institut Teknologi Bandung, namun lebih dari itu, penulis mendapatkan banyak hal dalam penyelesaian Tugas Akhir ini. Adapun judul yang diangkat untuk Tugas Akhir ini, setelah melewati beberapa kali revisi untuk judul sampai mendapatkan yang paling tepat yaitu "Analisis Transportasi dan Instalasi *Rigid Riser* pada Sistem *Free Standing Hybrid Riser*".

Banyak hal yang terjadi selama pengerjaan Tugas Akhir ini, baik suka maupun duka. Pemilihan topik ini juga didapat berkat bantuan salah satu alumni KL yang telah bekerja di suatu perusahaan di luar Indonesia dengan komunikasi hanya bisa lewat email dan dosen pembimbing yang setia memberikan masukan, yang menjadi suatu tantangan tersendiri dikarenakan topik yang diangkat dalam Tugas Akhir ini tergolong masih baru dan sedang gencar-gencarnya dikembangkan sekarang ini sehingga begitu sulit untuk mencari informasi yang mendukung dalam penyelesaian laporannya.

Terima kasih sedalam-dalamnya penulis sampaikan kepada pihak-pihak yang telah membantu dan memberikan motivasi selama pengerjaan Tugas Akhir ini, yaitu:

1. **Dr. Paramashanti, ST., MT.** selaku dosen pembimbing penulis yang setia membimbing dengan penuh kesabaran, memantau kemajuan setiap minggunya, dan memberikan banyak sekali arahan dan masukan yang sangat bermanfaat sampai Tugas Akhir ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya.
2. **Dr. Nita Yuanita, ST., MT.** dan **Dr. Ir. Hendra Achiari, MT.** selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktu dan memberikan saran dan koreksi yang sangat bermanfaat.
3. **Sangga Ciptadi**, selaku pembimbing kedua penulis yang sedang bekerja di suatu perusahaan di Norway, memberikan data-data yang menjadi acuan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, memberikan sangat banyak masukan dan pelajaran

yang sangat berarti, walaupun komunikasi hanya bisa lewat e-mail dan pernah ditelepon sekali, namun bimbingan yang luar biasa saya dapatkan, sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai dengan hasil yang cukup memuaskan.

4. **Seluruh jajaran PST Kelautan** untuk segala pengalaman dan bantuan yang diberikan kepada penulis.
5. **Dr. Ir. Robert J. M. Mandagi, M.Sc** dan **Elisabeth Winokan, SH., M.Si** selaku kedua orang tua penulis yang memberikan kepercayaan dan motivasi yang sangat besar dari jauh mulai dari tahun pertama sampai sekarang, ketika penulis merasa tidak sanggup lagi melanjutkan studi, cinta dan kasih sayang yang selalu ada ketika banyak masa-masa sulit yang dilewati keluarga dan penulis sendiri, namun mereka selalu ada untuk penulis dalam keadaan susah maupun senang.
6. **dr. Chreisy K.F. Mandagi, MPH., Natalia F.B. Mandagi, ST., Felicia M. Mandagi, ST., dan Cecilia M. Mandagi, ST.,** selaku kakak kandung penulis yang selalu memberikan dukungan, serta kasih sayang yang menjadi motivasi tersendiri selama kuliah.
7. Teman-teman **Okeanos** (KL ITB 2008):
 - 1) **Rilya**, salah satu orang yang paling berpengaruh selama penulis berkuliah di ITB dan sudah dianggap sebagai saudara sekaligus sahabat penulis dalam suka duka. (April ya, Ly, awas lo!)
 - 2) **Chacha** yang penuh kegalauan dan keceriaan, **Wiwid** yang selalu menemani *kerandoman* penulis kemanapun kaki melangkah, **Fera** geng KP Balikpapan yang mau bersedia belajar bareng kapanpun, **Pure** teman seperjuangan jaman dulu yang selalu ceria, **Chika** partner duet perform wisnite yang kreatif, **Asep** kemana ya asep, terima kasih Srikandi KL 08.
 - 3) Anak-anak serumah kontrakan **Ari** yang setia mau ditebengin dan mendengarkan unek-unek selama ngontrak, **Fendy** temen setia makan dan nonton, **Essa** dengan obsesi *six-pack* mudah-mudahan tercapai, **Nopal** dengan pacal balu yang mobilnya ngga pernah dimatiin mesinnya sampe berjam-jam di depan rumah, **Jun** yang selalu bersedia meluangkan waktu mendengarkan, **Faisal** sang pemasok film di theater rumah, **Oddy** yang meracuni dengan kokoreaan yang ternyata oke punya, **Wikan** partner KP yang setia sampe lulus sidang juga berurutan, dan **Aceh**, kuliah ceh.

- 4) **Gilang** yang master OrcaFlex yang siap membantu kapan saja, **Cumit** temen seperjuangan geng riser dalam suka duka, **Nunu** yang kapanpun mau membantu membuka pintu rumahnya yang sangat nyaman dan penuh kehangatan, **Ilman** yang kadang skip sama omongannya tapi mau membantu tanpa pamrih, **Fahmi** yang selalu bikin suasana jadi rame, **Farid** sang soko guru dalam hal apapun, **Kenin** anak gaul PVJ, **Andra** god of game, **Koyo** dan **Ulus** yang logat Medannya masih kental banget, **Agit** dan **Yanot** lantai dansa yang akhirnya sidang KP, **Ajin** yang entah kenapa ngga suka *running man*, **Dio** pemakan segala apalagi kalo mau makan babi enak ajak orang ini, **Rajin** si bos Oceanovolution yang paling gaul dan nyante selama gue di kepanitiaan, **Yoga** dengan selera *men fashion* yang oke, **Gema** dengan cerita cinta yang bisa dinovelin, **Fathur** teman satu house di Slytherin, **Aji** sang legenda billiard, **Rahman** sang penakluk gunung, **Ghani** bukan Ghani kalo ngga ngerokok, **Xiaolun** businessman kaskus, **Dhanes** yang mau buka konter di BEC, **Richie** dengan gaya ketawa yang khas, **Derpris** yang mulai memakai *softlense*, **GMG** yang penuh ambisi, **Osmond** dan **Fian** sebagai pendahulu ST, **Andi**, kemana aja ndi, dan **Nelson**, ilang.
8. **KL 2007**, tersisa yang sama-sama berjuang Oktober, Gudel, Om, Faris, Maul, dan yang sudah lulus duluan yang banyak membantu, serta **KL 2006**, **KL 2005** semoga sukses.
9. **KL 2009** cewe-cewenya yang penuh semangat dan suka memberikan motivasi, dan yang lainnya juga, sukses BP dan Ocean Summitnya. **KL 2010** yang penuh semangat dalam perkuliahan, sukses dan makin kompak.
10. Teman-teman PSM, blonggeng, **Shabrina**, **Piala**, **Bestman**, **Romi**, **Gema** dengan suara-suara emasnya, selalu up-to-date kalo soal film horror, dan tetap peduli anak panti yang menjadi program tahunan.
11. Allayers **Ury**, **Lya** (lagi), **Edrea**, **Santi**, **Hanifa**, **Izzah**, **Anditan**, **Arifin**, **Johan**, **Nero** yang selalu bikin kejutan-kejutan di hari-hari spesial.
12. Teman-teman perantauan di Bandung, **Vey**, **Oliv**, ci' **Opin**, **Annie**, **Sweetly**, **Elis**, **Cheya** yang mau diajak kemana aja.

13. Dan teman-teman yang lain **Cley, Morley, Jean, Nata, Michelle, Victor, Tya, Bixy, Keita** dan yang tidak bisa disebutkan satu per satu, terima kasih atas semua dukungannya.

Penulis menyadari Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna karena terdapat banyak kekurangan, sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Akhirnya, kiranya karya tulis ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, terlebih untuk kehidupan manusia.

Bandung, September 2012

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	4
1.3 Ruang Lingkup Pembahasan dan Batasan Masalah.....	5
1.4 Metodologi	6
1.5 Sistematika Penulisan	10
BAB II TEORI DASAR	
2.1 Gelombang.....	2-1
2.1.1 Teori Gelombang	2-2
2.1.2 Gelombang Linier	2-7
2.1.3 Pengukuran dan Pengolahan Data Gelombang.....	2-10

2.1.5	Gaya Gelombang	2-11
2.1.6	Persamaan Morison.....	2-12
2.2	Arus.....	2-15
2.3	Dinamika Struktur Benda Terapung	2-16
2.3.1	<i>Response Amplitude Operator (RAO)</i>	2-17
2.3.2	<i>Dynamic Amplification Factor (DAF)</i>	2-18
 BAB III SISTEM SUBSEA RISER		
3.1	Definisi Riser	3-1
3.2	Konfigurasi Riser	3-3
3.2.1	<i>Top Tensioned Riser</i>	3-4
3.2.2	<i>Compliant Riser</i>	3-5
3.2.3	<i>Hybrid Riser</i>	3-7
3.3	Kriteria Pemilihan Riser	3-12
3.3.1	<i>Flexible Riser</i>	3-12
3.3.2	<i>Steel Catenary Riser</i>	3-13
3.3.3	<i>Hybrid Riser</i>	3-14
3.4	Tantangan Desain.....	3-15
3.4.1	Kedalaman Perairan	3-15
3.4.2	Kondisi Lingkungan.....	3-17

BAB IV FREE STANDING HYBRID RISER

4.1	Deskripsi <i>Free Standing Hybrid Riser</i>	4-1
4.2	Rekomendasi Praktis Desain FSHR.....	4-5
	4.2.1 API RP 2RD.....	4-5
4.3	Tantangan Desain FSHR.....	4-9
	4.3.1 Kedalaman Perairan	4-9
	4.3.2 Gerakan Struktur Terapung.....	4-10
	4.3.3 Arus	4-10
	4.3.4 <i>Fatigue</i>	4-10
	4.3.5 Tekanan dan Temperatur Tinggi.....	4-11
	4.3.6 Kualitas Pengelasan	4-11
	4.3.7 Metode Transportasi	4-11
4.4	Metode Transportasi <i>Rigid Riser</i>	4-11
	4.5.1 <i>Bottom Tow</i>	4-12
	4.5.2 <i>Mid-Depth Tow</i>	4-13
	4.5.3 <i>Surface Tow</i>	4-14
	4.5.4 <i>Off-Bottom Tow</i>	4-15
4.5	Proses Instalasi <i>Rigid Riser</i>	4-16
4.6	Kriteria Instalasi.....	4-17
	4.6.1 Kombinasi Tegangan Maksimum izin	4-17

4.6.2 Radius Tekuk Minimum	4-18
----------------------------------	------

BAB V STUDI KASUS

5.1	Gambaran Umum.....	5-1
5.2	Basis Desain.....	5-2
5.2.1	Properti Geometri <i>Rigid Riser</i> pada Sistem FSHR	5-2
5.2.2	Data Lingkungan.....	5-3
5.2.3	Kapal Instalasi.....	5-5
5.3	Pemilihan Metode Transportasi <i>Rigid Riser</i>	5-5
5.3.1	Kedalaman	5-6
5.3.2	Gelombang	5-6
5.3.3	Arus	5-6
5.3.4	Tekanan	5-7
5.3.5	Temperatur	5-7
5.3.6	Wetpark.....	5-7
5.3.7	Permukaan Dasar Laut	5-7
5.3.8	Biaya	5-8
5.4	Tahapan Instalasi <i>Rigid Riser</i> pada Sistem FSHR	5-9

BAB VI ANALISIS INSTALASI RIGID RISER

6.1	Penentuan Tebal Dinding Riser Optimum.....	6-1
6.1.1	<i>Hydrostatic Collapse Check</i>	6-1

6.1.2	<i>Buckle Propagation Check</i>	6-1
6.2	Analisis Instalasi <i>Rigid Riser</i>	6-2
6.2.1	Perhitungan Tegangan Izin	6-2
6.2.2	Pemodelan dan Analisis Tahap <i>Upending Rigid Riser</i>	6-2
6.2.2	Pemodelan dan Analisis Tahap Instalasi <i>Buoyancy Tank</i> ke <i>Rigid Riser</i>	6-13
6.2.3	Tahap Instalasi <i>Rigid Riser</i> ke <i>Riser Base</i>	6-19

BAB VII PENUTUP

7.1	Kesimpulan	7-1
7.2	Saran	7-2

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN A

LAMPIRAN B

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Persentasi perkembangan eksplorasi wilayah perairan tahun 2005-2009	1-2
Gambar 1.2	Sistem fasilitas produksi terapung	2-3
Gambar 1.3	Ilustrasi sistem <i>Steel Catenary Riser</i> (SCR)	2-4
Gambar 1.4	Ilustrasi sistem <i>Free Standing Hybrid Riser</i> (FSHR)	2-5
Gambar 1.5	Metodologi penentuan metode transportasi <i>rigid riser</i> sistem FSHR	2-7
Gambar 1.6	Metodologi analisis instalasi <i>rigid riser</i> pada sistem FSHR	2-8
Gambar 2.1	Gelombang acak merupakan penjumlahan dari gelombang sinusoidal... ..	2-2
Gambar 2.2	Profil gelombang sinusoidal	2-3
Gambar 2.3	Sketsa gelombang dan daerah syarat batas	2-6
Gambar 2.4	Gaya gelombang pada silinder tegak.	2-13
Gambar 3.1	Perbandingan sistem riser pada fixed platform dan struktur terapung.... ..	3-2
Gambar 3.2	Konfigurasi <i>drilling riser</i>	3-3
Gambar 3.3	Konfigurasi <i>Top Tensioned Riser</i> (TTR).	3-4
Gambar 3.4	Macam-macam konfigurasi <i>compliant riser</i>	3-6
Gambar 3.5	Konfigurasi <i>hybrid riser</i>	3-8
Gambar 3.6	Komponen-komponen <i>hybrid riser</i>	3-9
Gambar 3.7	Tipikal penampang <i>Bundle Hybrid Riser</i>	3-10
Gambar 3.8	Sistem <i>Bundle Hybrid Riser</i>	3-10
Gambar 3.9	Tipikal penampang <i>Single Line Offset Risers</i> (SLORs).....	3-11

Gambar 3.10	<i>Grouped SLOR</i>	3-11
Gambar 3.11	Ilustrasi Touch Down Point (TDP) pada SCR	3-14
Gambar 4.1	Konfigurasi FSHR	4-3
Gambar 4.2	Sketsa <i>bottom tow</i>	4-13
Gambar 4.3	Sketsa <i>mid-depth tow</i>	4-13
Gambar 4.4	Penggelaran <i>riser</i> untuk <i>mid-depth tow</i>	4-14
Gambar 4.5	Sketsa <i>surface tow</i>	4-15
Gambar 4.6	Sketsa <i>off-bottom tow</i>	4-16
Gambar 4.7	Bagan alir garis besar tahapan instalasi <i>rigid riser</i>	4-17
Gambar 5.1	Lokasi Platform Minyak	5-1
Gambar 5.2	<i>Mid-depth tow</i> dipilih menjadi metode transportasi yang tepat	5-8
Gambar 5.3	Riser di <i>upending</i> sampai tergantung vertikal	5-9
Gambar 5.4	Riser dihubungkan dengan <i>buoy</i> hingga dipasang pada <i>base</i>	5-10
Gambar 6.1	Komponen-komponen dalam tahap <i>upending rigid riser</i>	6-4
Gambar 6.2	<i>Rigid riser</i> dalam keadaan <i>wetpark</i> sebelum <i>upending</i> pada pemodelan <i>OrcaFlex</i>	6-5
Gambar 6.3	Input data A&R Winch di Orcaflex	6-6
Gambar 6.4	Input parameter untuk <i>rigid riser</i> pada Orcaflex	6-7
Gambar 6.5	<i>Rigid riser upending</i>	6-8
Gambar 6.6	Posisi <i>rigid riser</i> dan <i>chain</i> setelah <i>upending riser</i> di OrcaFlex	6-9
Gambar 6.7	Grafik tegangan maksimum von Mises pada ujung A dan B <i>rigid riser</i> terhadap kedalaman selama tahap <i>upending riser</i>	6-9
Gambar 6.8	Grafik tegangan maksimum von Mises pada ujung A dan B <i>chain</i> terhadap kedalaman selama tahap <i>upending riser</i>	6-10

Gambar 6.9	Grafik tegangan maksimum von Mises pada ujung A dan B <i>chain2</i> terhadap kedalaman selama tahap <i>upending riser</i>	6-11
Gambar 6.10	Grafik tegangan maksimum von Mises pada ujung A dan B <i>chain1</i> terhadap kedalaman selama tahap <i>upending riser</i>	6-12
Gambar 6.11	Grafik tegangan maksimum von Mises pada ujung A dan B <i>chain3</i> terhadap kedalaman selama tahap <i>upending riser</i>	6-13
Gambar 6.12	Komponen-komponen dalam tahap instalasi <i>buoyancy tank</i> ke <i>rigid riser</i>	6-14
Gambar 6.13	Kondisi awal instalasi <i>buoyancy tank</i> ke <i>rigid riser</i>	6-14
Gambar 6.14	Kondisi awal <i>riser</i> tahap instalasi <i>buoyancy tank</i> ke <i>rigid riser</i>	6-15
Gambar 6.15	Kondisi <i>winch1</i> tahap instalasi <i>buoyancy tank</i> ke <i>rigid riser</i>	6-16
Gambar 6.16	Kondisi <i>winch2</i> tahap instalasi <i>buoyancy tank</i> ke <i>rigid riser</i>	6-16
Gambar 6.17	Kondisi <i>winch3</i> tahap instalasi <i>buoyancy tank</i> ke <i>rigid riser</i>	6-17
Gambar 6.18	Simulasi dinamik instalasi <i>buoyancy tank</i> ke <i>rigid riser</i>	6-17
Gambar 6.19	Grafik tegangan von Mises terhadap <i>rigid riser</i> pada tahap instalasi <i>buoyancy tank</i> ke <i>rigid riser</i>	6-18
Gambar 6.20	Kondisi awal <i>rigid riser</i> pada tahapan instalasi <i>rigid riser</i> ke <i>riser base</i>	6-19
Gambar 6.21	Kondisi awal <i>winch1</i> tahap instalasi <i>rigid riser</i> ke <i>riser base</i>	6-20
Gambar 6.22	Kondisi awal <i>winch2</i> tahap instalasi <i>rigid riser</i> ke <i>riser base</i>	6-20
Gambar 6.23	Komponen-komponen dalam tahapan instalasi <i>rigid riser</i> ke <i>riser base</i>	6-21

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Kriteria Pemilihan Teori Gaya Gelombang	2-12
Tabel 3.1	Sifat fisik line pipe API 5L.....	3-7
Tabel 5.1	Properti Rigid Riser	5-2
Tabel 5.2	Properti <i>Buoyancy Tank</i>	5-2
Tabel 5.3	Data Properti Air Laut	5-3
Tabel 5.4	Data Temperatur dengan Periode Ulang 100 Tahun	5-3
Tabel 5.5	Data Properti Gelombang dengan Periode Ulang 1 Tahun	5-4
Tabel 5.6	Data Kecepatan Arus dengan Periode Ulang 1 Tahun	5-4
Tabel 5.7	Data Kecepatan Angin Terbesar.....	5-5
Tabel 5.8	Data Kapal Instalasi.....	5-5
Tabel 5.9	Tabulasi parameter penentu dan alternatif metode transportasi <i>rigid riser</i>	5-8
Tabel 6.1	Posisi <i>vessel</i> dalam sumbu global dan orientasinya	6-5
Tabel 6.2	Posisi <i>winch</i> untuk koordinat sumbu global.....	6-6
Tabel 6.3	Posisi <i>Rigid Riser</i> untuk koordinat sumbu global	6-7
Tabel 6.4	Nilai tegangan von Mises maksimum setiap komponen di setiap tahapan	6-24
Tabel 7.1	Rangkuman hasil pengecekan tebal dinding <i>rigid riser</i>	7-1

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A	PENGECEKAN TEBAL DINDING OPTIMUM RISER DENGAN API RP 2RD, 1998 UNTUK KRITERIA <i>HYDROSTATIC COLLAPSE</i> DAN <i>BUCKLE PROPAGATION</i>
LAMPIRAN B	HASIL KELUARAN ORCAFLEX UNTUK <i>CHAIN</i> DAN <i>RIGID RISER</i> SETIAP TAHAPAN

INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG 2012



BAB 1

PENDAHULUAN

Analisis Transportasi dan Instalasi Rigid Riser pada Sistem Free Standing Hybrid Riser

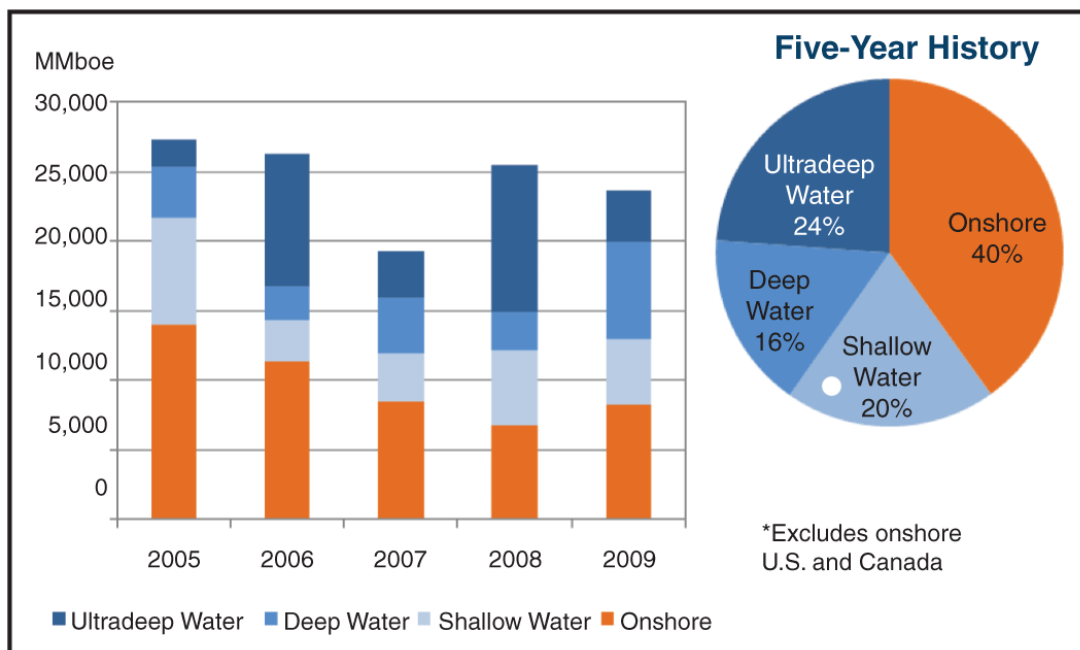
Yonathan Mozes Mandagi - 15508008

Program Studi Teknik Kelautan

Seiring dengan perkembangan aktivitas eksplorasi dan produksi migas yang merambah ke perairan yang lebih dalam, dibutuhkan pengembangan teknis yang giat dan ekonomis untuk sistem riser, salah satunya hybrid riser. Tugas Akhir ini akan membahas tentang analisis transportasi dan instalasi rigid riser pada sistem Free Standing Hybrid Riser (FSHR) pada suatu proyek minyak yang berlokasi di Laut Utara, Norwegia.

1.1 Latar Belakang

Cadangan minyak dan gas di daerah daratan semakin berkurang. Seiring dengan itu, perusahaan-perusahaan migas mulai dengan gencarnya mengembangkan kegiatan eksplorasi ke daerah lepas pantai. Akibatnya, sumber daya cadangan migas di daerah perairan dangkal saat ini semakin berkurang sehingga diperlukan eksplorasi lebih jauh lagi ke daerah perairan yang lebih dalam. **Gambar 1.1** menunjukkan persentasi riwayat pengembangan eksplorasi di wilayah perairan selama 5 tahun sebelumnya tercatat dari tahun 2005 sampai dengan tahun 2009. Maka dari itu, penggunaan struktur lepas pantai jenis *fixed structure* tidak lagi menjadi jawaban yang ekonomis untuk mengatasi permasalahan ini.

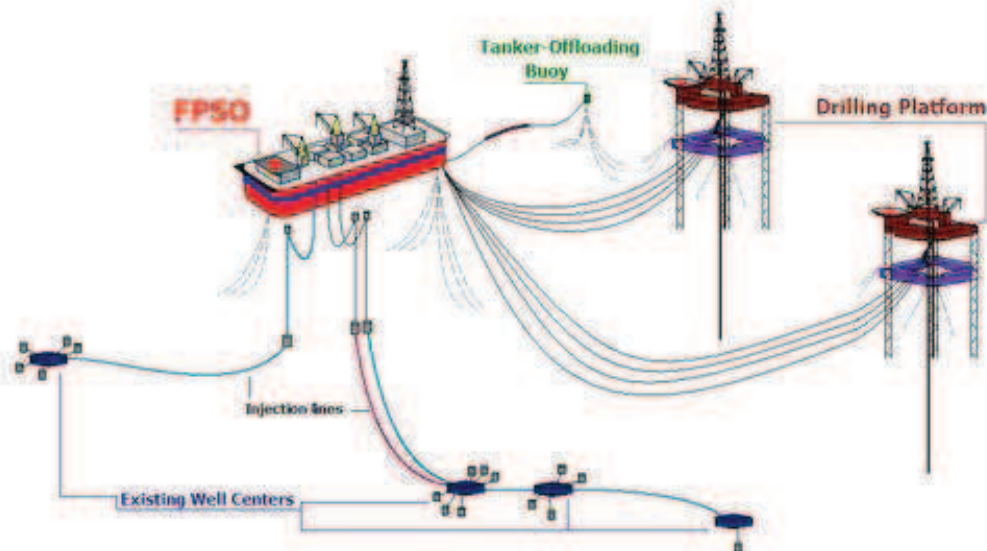


Gambar 1.1 Persentasi perkembangan eksplorasi wilayah perairan tahun 2005-2009

Sumber: *The American Oil & Gas Reporter Official Site* (www.aogr.com)

Floating Production System (FPS) atau sistem produksi terapung dengan riser menjadi metode yang paling praktis dalam mengembangkan kegiatan eksplorasi migas di laut transisi sampai laut dalam. Sistem ini tidak membutuhkan pipeline jarak

jauh dari fasilitas proses ke sebuah terminal di daratan yang sangat tidak *cost-effective* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1.2**.



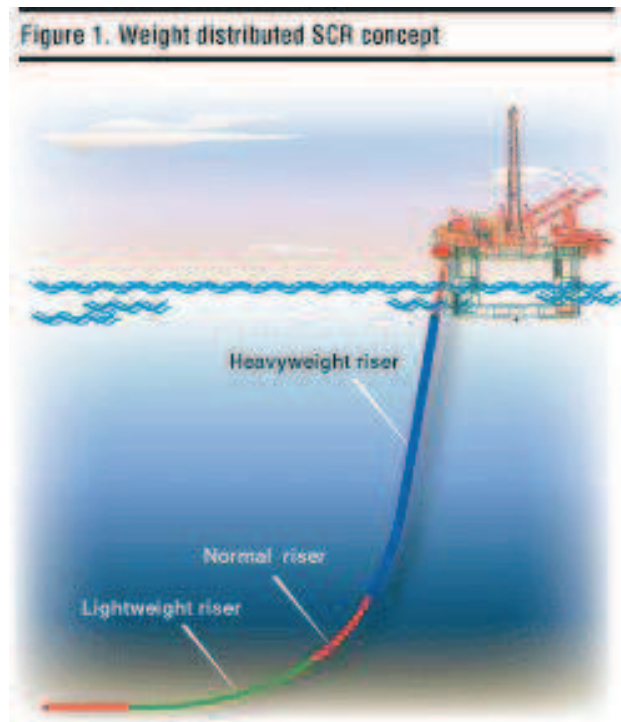
Gambar 1.2 Sistem fasilitas produksi terapung

Sumber: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/80/FPSO_diagram.PNG/500px-FPSO_diagram.PNG

Selain itu, setelah sumber daya yang diproses telah habis, FPS dapat berpindah atau dipindahkan dengan lebih mudah ke lokasi yang baru. Namun, biaya produksi sistem riser pada FPS ini sangat berpengaruh terhadap setiap peningkatan kedalaman permukaan air, seiring dengan biaya instalasi dari sistem riser itu sendiri.

Dua konsep riser yang ditawarkan sebagai alternatif riser untuk fasilitas produksi terapung laut dalam dan mempunyai potensi yang signifikan adalah sistem *Steel Catenary Riser* (SCR) dan *Free Standing Hybrid Riser* (FSHR). Saat ini, sistem riser laut dalam yang banyak digunakan adalah sistem SCR (**Gambar 1.3**). Konstruksi sistem SCR merupakan sebuah konstruksi yang melewati tahap pengelasan di daratan karena pada umumnya sistem ini diadaptasi dari konsep produksi struktur untuk laut

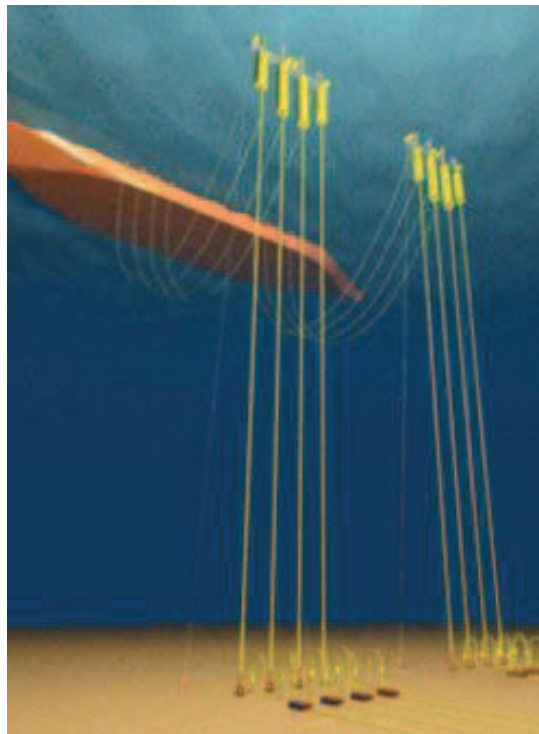
dangkal. Maka dari itu, kapal dengan spesifikasi yang tinggi dibutuhkan untuk menginstal sistem riser laut dalam ini, dimana kapal-kapal ini mempunyai harga sewa harian dan biaya mobilisasi yang tinggi.



Gambar 1.3 Ilustrasi sistem *Steel Catenary Riser* (SCR)

Sumber: http://images.pennnet.com/articles/os/thm/th_z0608offsub1.gif

Untuk menanggulangi kekurangan pada sistem *flexible* riser, dikenalkan sistem baru yang bernama *Free Standing Hybrid Riser* (FSHR). FSHR seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1.4**, merupakan gabungan dari *flexible riser* dan *rigid riser*. Pada prinsipnya *hybrid riser* merupakan sebuah *bundle* pipa baja vertikal yang didukung oleh gaya apung eksternal di bagian ujung atas *rigid riser*, ditambah dengan *flexible pipe jumpers* yang terletak di dekat permukaan untuk mengakomodasi pergerakan antara kapal dan bagian atas *rigid riser* pada saat operasi.



Gambar 1.4 Ilustrasi sistem *Free Standing Hybrid Riser* (FSHR)

Sumber: http://www.ndco.ir/contentimages/HIW_risers3.jpg

Desain FSHR harus memperhatikan proses transportasi dari lokasi fabrikasi ke lokasi pemasangan dan proses instalasi, khususnya *rigid riser* yang mempunyai pengaruh yang cukup besar selama keberlangsungan proses secara keseluruhan. Proses transportasi *rigid riser* yang dilakukan melalui metode *towing* akan mempengaruhi besarnya gaya yang bekerja selama proses transportasi ini. Ada beberapa alternatif metode *towing* yang bisa dilaksanakan, tergantung pada geometri *riser* yang akan ditransport dan terutama kondisi lingkungan selama proses transportasi. Untuk menentukan metode *towing* mana yang paling tepat, perlu dilakukan pertimbangan-pertimbangan tertentu terkait dengan faktor-faktor yang mempengaruhi proses transportasi tersebut agar efektif dan efisien, sehingga *rigid riser* yang ditransport dapat sampai ke lokasi platform dengan kondisi yang layak untuk dipasang. Proses pemasangan *rigid riser* mempunyai tantangan tersendiri dalam instalasi FSHR. Hasil

desain *rigid riser* sangat berpengaruh pada proses instalasinya termasuk tebal dinding riser. Tebal dinding riser merupakan hal yang signifikan yang menentukan apakah riser tersebut akan berhasil untuk diinstal dan mengalami kegagalan, seperti kebocoran, tekuk, dan kegagalan lain yang mungkin terjadi selama proses instalasi. Untuk itu diperlukan pengecekan tebal dinding riser yang harus dilaksanakan sesuai dengan rekomendasi-rekomendasi praktis yang telah ada. Proses instalasi *rigid riser* ini mempunyai tahapan-tahapan khusus yang harus dilaksanakan. Setiap tahapan ini sangat kritis dalam menentukan keberhasilan suatu *rigid riser* terpasang pada *riser base*, dimana akan terjadi kegagalan apabila riser dan beberapa fasilitas pendukung tidak kuat menahan gaya-gaya yang terjadi selama proses instalasi tersebut yang ditentukan oleh hasil desain *rigid riser* sebelumnya.

Berdasarkan penjelasan tentang pentingnya kedua proses tersebut, maka Tugas Akhir ini akan membahas tentang analisis transportasi dan instalasi *rigid riser* pada sistem FSHR di suatu proyek *oil export* yang berlokasi di Laut Utara, Norwegia.

1.2 Tujuan

Penulisan Tugas Akhir ini mempunyai tujuan, yaitu :

- 1) Untuk menentukan metode transportasi *rigid riser* FSHR yang paling tepat sesuai dengan kondisi proyek.
- 2) Untuk mendapatkan nilai tebal dinding optimum *rigid riser* pada kondisi instalasi FSHR berdasarkan API RP 2RD, 1998.
- 3) Untuk mengetahui kondisi kritis saat instalasi *rigid riser* pada sistem FSHR.

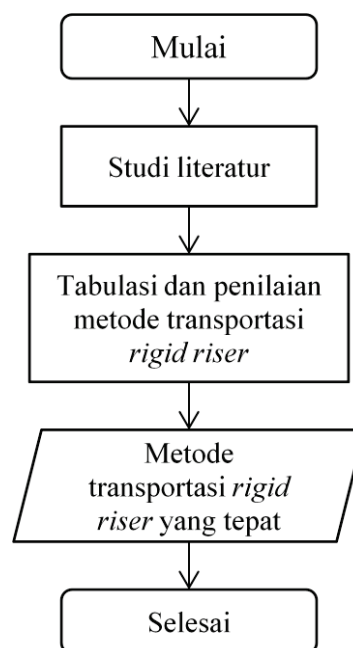
1.3 Ruang Lingkup Pembahasan dan Batasan Masalah

FSHR secara umum terdiri dari *flexible jumpers*, *buoyancy tank*, dan *rigid riser*. Pada Tugas Akhir ini, akan membahas mulai dari teori-teori riser secara umum sampai pada teori FSHR lebih khusus, dilanjutkan dengan pemilihan metode

transportasi *rigid riser* dengan studi literatur dan analisis lebih lanjut mengenai instalasi *rigid riser* dari sistem FSHR dengan mengambil studi kasus pada suatu proyek *oil export* di Laut Utara, Norwegia.

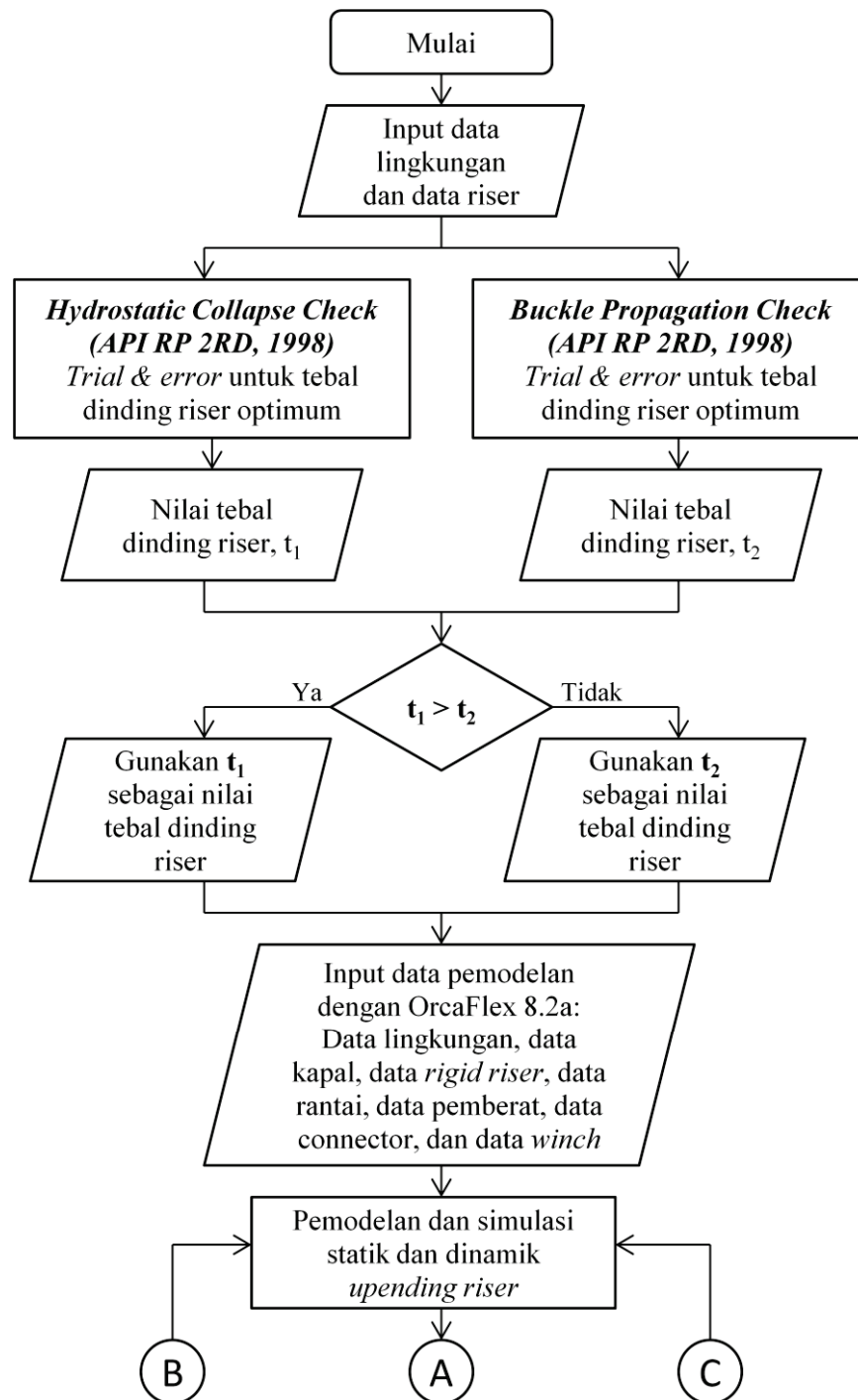
1.4 Metodologi

Metodologi untuk mencapai tujuan-tujuan yang telah disampaikan sebelumnya ditunjukkan pada **Gambar 1.5** dan **Gambar 1.6**, dengan penjelasan sebagai berikut:

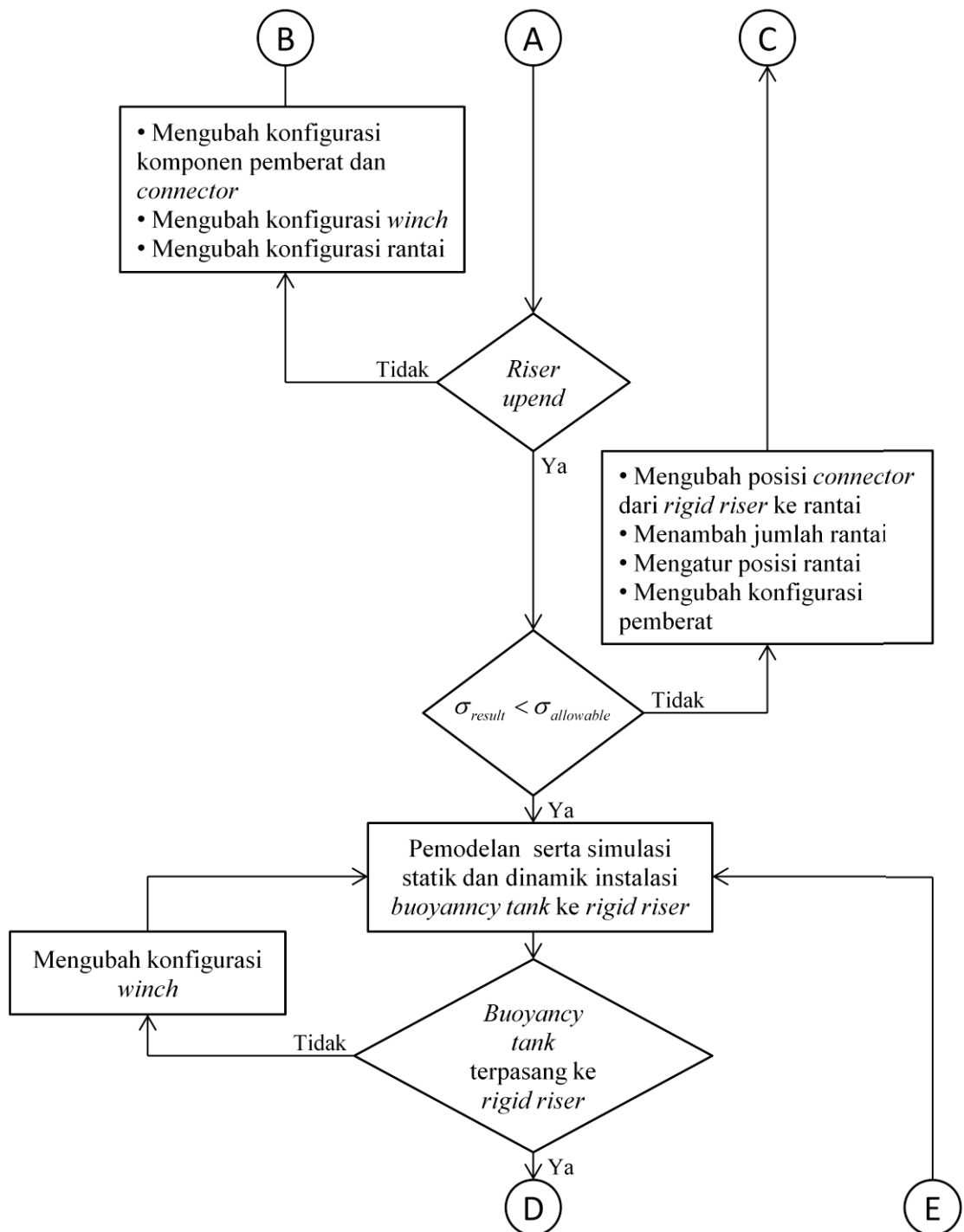


Gambar 1.5 Metodologi penentuan metode transportasi *rigid riser* sistem FSHR

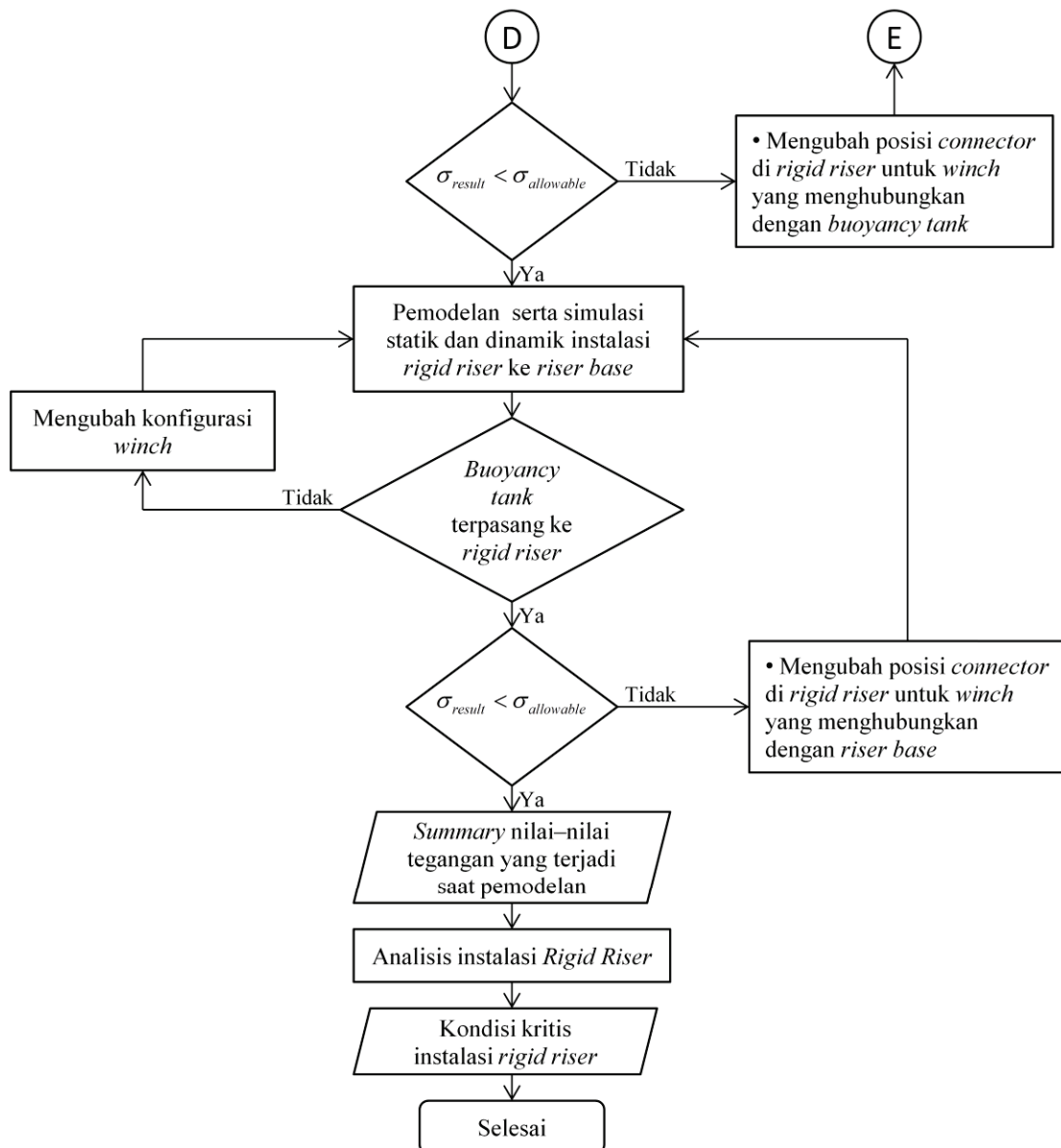
1. Untuk menentukan metode transportasi *rigid riser* yang paling tepat dengan kondisi proyek seperti pada **Gambar 1.6**, dilakukan studi literatur tentang alternatif metode transportasi *rigid riser*, dianalisis dengan menampilkan tabulasi yang membandingkan kondisi proyek dengan metode-metode yang tersedia, serta pemberian nilai mulai dari yang paling tepat sampai yang paling tidak tepat untuk setiap kriteria. Hasil dari tabulasi dan pemberian nilai ini kemudian akan disimpulkan untuk menjadi metode transportasi *rigid riser* yang paling tepat untuk dilaksanakan.



Gambar 1.6 Metodologi analisis instalasi *rigid riser* pada sistem FSHR



Gambar 1.6 Metodologi analisis instalasi *rigid riser* pada sistem FSHR (lanjutan)



Gambar 1.6 Metodologi analisis instalasi *rigid riser* pada sistem FSHR (lanjutan)

2. Untuk mendapatkan tebal dinding riser yang paling optimum seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1.6**, dilakukan beberapa perhitungan dari rekomendasi praktis API RP 2 RD, 1998, yang terdiri dari 2 macam pengecekan, yaitu pengecekan *hydrostatic collapse* dan *buckle propagation*, dimana masing-masing pengecekan

akan menghasilkan nilai tebal dinding yang memenuhi kriteria, kemudian akan dibandingkan nilai mana yang paling optimum dan nantinya akan digunakan pada tahap pemodelan instalasi *rigid riser*.

3. Untuk mengetahui kondisi kritis pada saat instalasi, dilakukan pemodelan dengan menggunakan software OrcaFlex 8.2a dengan tahapan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1.6**. Pemodelan dibuat sesuai dengan tahapan instalasi yang diuraikan secara bertahap, dan dilakukan dalam 2 kondisi, yakni statik dan dinamik. Kondisi statik dilakukan untuk mendapatkan kondisi seimbang dari model yang dibuat menjelang simulasi kondisi dinamik. Sedangkan kondisi dinamik merupakan simulasi yang dilakukan secara seri waktu dengan memperhitungkan pengaruh beban lingkungan seperti arus, gelombang, angin, dan lain-lain. Dari hasil simulasi, keluaran diambil berupa nilai gaya-gaya yang bekerja pada rigid riser, serta tegangan von Mises maksimum pada sistem *rigid riser* yang dihasilkan setiap tahapan pada proses instalasi *rigid riser*.

1.5 Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini terdiri dari 7 bab yang akan diuraikan sebagai berikut:

BAB 1 Pendahuluan

Bab pendahuluan berisi tentang latar belakang, tujuan, ruang lingkup pembahasan, metodologi serta sistematika penulisan laporan.

BAB 2 Dasar Teori

Bab dasar teori berisi tentang teori-teori yang digunakan dalam perhitungan dan pemodelan struktur pada saat instalasi termasuk pengaruh gaya lingkungan seperti gelombang dan arus, serta dinamika struktur benda terapung.

BAB 3 Sistem Subsea Riser

Bab sistem *subsea riser* berisi tentang uraian secara umum mengenai sistem riser di laut dalam, definisi riser, konfigurasi sistem riser, kriteria pemilihan riser, serta tantangan desain.

BAB 4 Free Standing Hybrid Riser

Bab ini berisi tentang uraian mengenai pengertian *Free Standing Hybrid Riser*, rekomendasi praktis desain FSHR, tantangan desain FSHR, serta metode transportasi *rigid riser* pada sistem FSHR.

BAB 5 Studi Kasus

Bab studi kasus berisi tentang gambaran umum proyek, basis desain, pemilihan metode transportasi *rigid riser*, dan tahapan instalasi *rigid riser*.

BAB 6 Analisis Instalasi Rigid Riser

Bab analisis instalasi *rigid riser* berisi tentang penentuan tebal dinding *riser* optimum, serta hasil pemodelan program dan analisis instalasi *rigid riser*.

BAB 7 Penutup

Bab penutup berisi tentang kesimpulan dan saran.



BAB 2

TEORI DASAR

Analisis Transportasi dan Instalasi Rigid Riser pada Sistem Free Standing Hybrid Riser

Yonathan Mozes Mandagi - 15508008

Program Studi Teknik Kelautan

Untuk menunjang pelaksanaan analisis instalasi rigid riser yang dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak OrcaFlex, diperlukan data-data awal sebagai input parameter dalam pemodelan. Ada beberapa teori tentang gelombang dan arus serta dinamika benda terapung yang perlu diketahui sebagai landasan pengerjaan OrcaFlex.

2.1 Gelombang

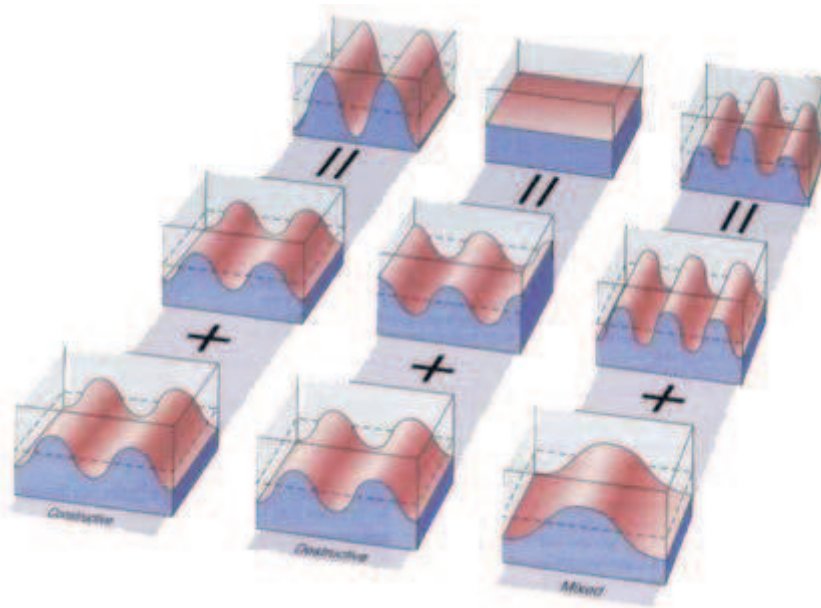
Gelombang merupakan komponen utama pengaruh lingkungan dalam melakukan perancangan struktur lepas pantai. Gelombang dapat dibangkitkan dengan berbagai cara, yaitu akibat kapal/struktur terapung yang bergerak, gesekan antara angin dan permukaan laut, gaya tarik benda-benda angkasa, atau akibat gempa/pergerakan lempeng di dasar laut. Gelombang yang dipakai dalam perancangan merupakan gelombang yang dibangkitkan oleh angin.

Gelombang yang dibangkitkan oleh angin dapat diklasifikasikan menjadi 2 kategori yakni gelombang akibat angin dan gelombang *swell*. Gelombang akibat angin merupakan sekelompok gelombang yang dikendalikan oleh angin yang bertiup di suatu wilayah dan gelombang tersebut memiliki puncak yang pendek. Selain itu, kombinasi gelombang laut sangat tidak beraturan, gelombang tinggi tanpa bisa diramal diikuti oleh gelombang rendah dan sebaliknya. Puncak gelombang individual terlihat berpropagasi dalam arah yang rendah dan sebaliknya. Puncak tersebut cukup tajam dan kadang-kadang gelombang kecil dapat diamati di puncak-puncak tersebut. Periode gelombang bervariasi secara terus-menerus, sama halnya dengan panjang gelombang.

Di sisi lain, gelombang *swell* merupakan gelombang yang berpropagasi di luar area pembangkitan gelombang dan angin lokal dimana gelombang dibangkitkan. Gelombang tersebut tidak bergantung terhadap angin dan dapat berpropagasi sejauh ratusan kilometer melewati wilayah dimana angin tidak berhembus. Gelombang individual dari gelombang *swell* lebih beraturan dan puncaknya lebih landai daripada gelombang akibat angin.

Gelombang angin yang dibangkitkan sangat tidak beraturan. Walaupun demikian, gelombang tersebut dapat dilihat sebagai superposisi dari banyak komponen gelombang harmonik yang teratur, masing-masing gelombang memiliki amplitudo, panjang, periode/frekuensi dan arah propagasi yang berbeda-beda. Konsep tersebut

sangat berguna dalam banyak aplikasi. Dengan menggunakan konsep ini, perilaku gelombang yang tidak teratur sangat kompleks dalam hal teori yang jauh lebih sederhana daripada gelombang reguler dapat diprediksi. Ilustrasi dari gelombang superposisi dapat dilihat pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1 Gelombang acak merupakan penjumlahan dari gelombang sinusoidal.

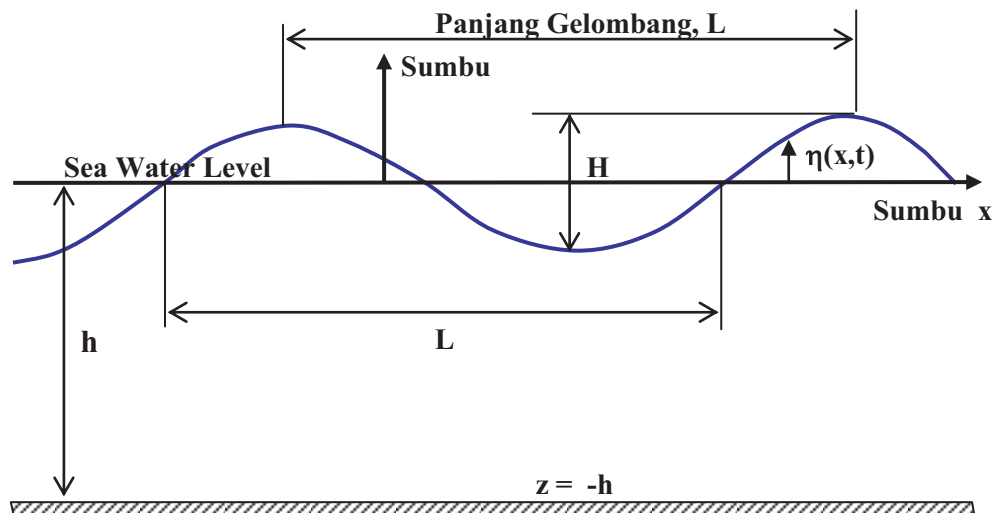
Sumber: Thurman, H. V., 1997. *Introductory Oceanography*. Prentice Hall. Ch. 9

Untuk menganalisis gelombang yang kompleks, properti dari komponen gelombang yang sederhana tersebut penting untuk diketahui. Berikut uraian singkat mengenai teori gelombang untuk mendapatkan properti gelombang seperti kecepatan partikel, percepatan partikel, dan sebagainya.

2.1.1 Teori Gelombang

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya mengenai gelombang yang dibangkitkan oleh angin, gelombang tersebut dianggap memiliki amplitudo kecil dibandingkan dengan panjang gelombang dan dapat diasumsikan

sebagai gelombang sinusoidal. Karakteristik gelombang dua dimensi yang merambat dalam arah x diilustrasikan pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2 Profil gelombang sinusoidal

Dimana :

- A : amplitudo gelombang
- c : cepat rambat gelombang
- h : jarak antara dasar laut dengan muka air rata-rata
- H : tinggi gelombang dari lembah ke puncak
- L : panjang gelombang
- $\eta(x,t)$: elevasi muka air pada posisi x saat t

Untuk gelombang laut, terdapat beberapa parameter penting untuk mendeskripsikannya, yaitu:

- Panjang gelombang (L) adalah jarak horizontal antara dua puncak gelombang atau dua lembah gelombang yang saling berurutan.

- Tinggi gelombang (H) adalah jarak vertika dari puncak gelombang ke lembah gelombang.
- Periode gelombang (T) adalah selang waktu yang ditempuh untuk menempuh satu panjang gelombang, dari puncak ke puncak atau lembah ke lembah yang berurutan.
- Kedalaman perairan (h) adalah kedalaman perairan dimana gelombang tersebut dirambatkan.

Adapun parameter lain, seperti kecepatan serta percepatan partikel air, kecepatan dan panjang gelombang dapat diturunkan dari teori gelombang.

Dalam membangun suatu teori gelombang diperlukan suatu persamaan pengatur yang dapat mewakili kondisi fisik gelombang yang sebenarnya. Persamaan pengatur dalam teori gelombang adalah persamaan Laplace. Persamaan pengatur bersifat umum, untuk mendapatkan persamaan (solusi) yang bersifat khusus (*unique solution*) diperlukan syarat-syarat batas, yaitu syarat batas kinematis, dinamis dan syarat batas periodik. Perbedaan cara dan pengambilan asumsi yang berbeda dalam penyelesaian persamaan gelombang akan menghasilkan teori gelombang yang berbeda pula. Namun tiap teori gelombang memiliki keunggulan dan keterbatasan sendiri-sendiri.

a. Persamaan Pengatur

Teori gelombang dibangun dari asumsi bahwa fluida (air) merupakan fluida yang *incompressible* (tak bisa dimampatkan) dan *irrotational* (tidak terjadi gerak berputar). Dengan asumsi ini maka potensial kecepatan ϕ akan memenuhi persamaan kontinuitas.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.1)$$

atau

$$\nabla \cdot \nabla \phi = 0 \quad (2.2)$$

dimana :

$\vec{u}$: vektor kecepatan aliran

Persamaan (2.2) dapat ditulis dalam bentuk persamaan Laplace sebagai berikut :

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.3)$$

dimana :

x, y, z : arah aliran x, y, dan z

Dalam tinjauan dua dimensi x dan z, persamaan Laplace menjadi:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.4)$$

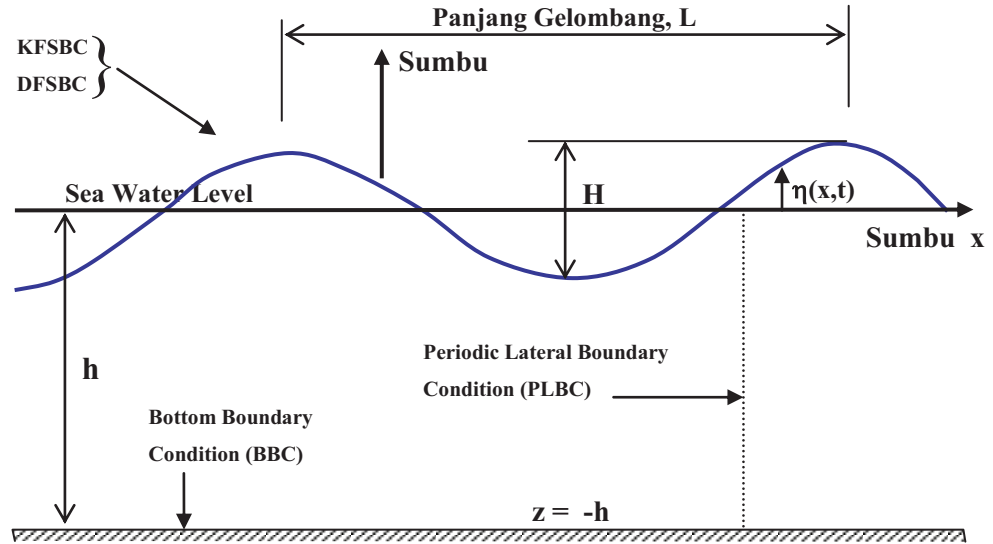
Persamaan Laplace dapat dituliskan dalam bentuk fungsi *stream function*, ψ :

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.5)$$

b. Syarat Batas

Persamaan pengatur di atas merupakan suatu kasus *Boundary Value Problem* (BVP), sehingga penyelesaian persamaan (2.3) dan (2.4) memerlukan syarat batas tertentu untuk memperoleh solusi yang bersifat khusus (*unique*

solution). Daerah-daerah syarat batas yang dimaksudkan diilustrasikan pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3 Sketsa gelombang dan daerah syarat batas

1) Syarat batas permukaan, meliputi:

- Syarat batas kinematis (*kinematic free surface boundary condition*, KFSBC)

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} \text{ pada } z = \eta(x, t) \quad (2.6)$$

- Syarat batas dinamis (*dynamic free surface boundary condition*, DFSBC)

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\eta = C(t) \text{ pada } z = \eta(x, t) \quad (2.7)$$

2) Syarat batas dasar perairan (*bottom boundary condition*, BBC)

Syarat batas dasar perairan (pada $z = -h$) termasuk dalam tipe syarat batas kinematis.

$$u \frac{dh}{dx} + w = 0 \quad (2.8a)$$

$$\frac{w}{u} = -\frac{dh}{dx} \quad (2.8b)$$

Persamaan (2.8b) menyatakan bahwa arah kecepatan partikel air tangensial terhadap dasar perairan. Untuk dasar perairan yang datar, syarat batas menjadi:

$$w = -\frac{d\phi}{dz} = 0 \text{ pada } z = -h \quad (2.8c)$$

Kondisi ini menggambarkan bahwa kecepatan partikel fluida tegak lurus dasar perairan impermeabel dan diam, adalah nol.

c. *Syarat batas periodik*

$$\phi(x, t) = \phi(x + L, t)$$

$$\phi(x, t) = \phi(x, t + T) \quad (2.9)$$

2.1.2 Gelombang Linier

Solusi tepat (*exact solution*) dari persamaan di subbab pengatur di atas sulit ditentukan karena syarat batas permukaan memiliki suku-suku tak linier serta kondisi awal di permukaan, $z = \eta(x, t)$ tidak diketahui. Oleh karena itu, dilakukan penyederhanaan dengan melinierkan suku-suku tak linier. Pelinieran dilakukan dengan membuat asumsi bahwa tinggi gelombang jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan panjang gelombang L dan kedalaman h , jadi

$H \ll L, h$. Berdasarkan asumsi ini teori gelombangnya disebut teori gelombang linier.

Sekarang dengan asumsi bahwa $H \ll L, h$ tersebut, maka nilai suku-suku tak linier pada syarat batas kecil dan dapat diabaikan serta syarat batas di permukaan dapat diterapkan di $z = 0$, bukan di $z = \eta$ lagi.

Syarat batas permukaan yang baru dapat dituliskan menjadi:

- Syarat batas kinematis

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \text{ pada } z = \eta(x, t) = 0 \quad (2.10)$$

- Syarat batas dinamis

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = C(t) \text{ pada } z = \eta(x, t) = 0 \quad (2.11)$$

Selanjutnya persamaan *Laplace* (2.4) dapat diselesaikan dengan menggunakan metode pemisahan variabel (*separation of variable method*), sehingga untuk gelombang berjalan didapat potensi kecepatan ϕ .

$$\phi = -\frac{H}{2} \frac{g}{\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \omega t) \quad (2.12)$$

Dari syarat batas dinamis, dengan membuat rata-rata $\eta = 0$, maka $C(t) = 0$, sehingga :

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \text{ pada } z = 0 \quad (2.13)$$

atau

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.14)$$

Hubungan dispersi menunjukkan hubungan antara periode gelombang dan panjang gelombang, berikut persamaan dispersi:

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (2.15)$$

Gelombang berjalan membutuhkan satu periode T untuk menempuh satu panjang gelombang L , dengan $\omega = \frac{2\pi}{T}$ serta $k = \frac{2\pi}{L}$, maka persamaan dispersi dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$\left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 = g \frac{2\pi}{L} \tanh kh \quad (2.16)$$

Pada laut dalam, kh besar dan $\tanh \frac{2\pi h}{L} = 1$, sehingga $L = L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$, dimana subskrip nol menunjukkan kondisi laut dalam. Secara umum dapat dituliskan sebagai berikut:

$$L = L_0 \tanh kh \quad (2.17)$$

Jadi, panjang gelombang berkurang dengan berkurangnya kedalaman untuk periode yang konstan. Kecepatan dan percepatan partikel air diturunkan dari potensial kecepatan ϕ terhadap x dan z untuk masing-masing kecepatan arah horisontal x dan arah vertikal z .

Kecepatan partikel air pada arah horizontal u :

$$u = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx - \omega t) \quad (2.18)$$

Percepatan partikel air arah horizontal adalah :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{H}{2} \omega^2 \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(kx - \omega t) \quad (2.19)$$

Kecepatan partikel air arah vertikal w :

$$w = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{H}{2} \omega \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(kx - \omega t) \quad (2.20)$$

Percepatan partikel air arah vertikal adalah:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{H}{2} \omega^2 \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx - \omega t) \quad (2.21)$$

2.1.3 Pengukuran dan Pengolahan Data Gelombang

Ada berbagai macam formula spektrum yang biasa digunakan dalam perancangan struktur lepas pantai. Formula tersebut diturunkan dari properti gelombang laut yang diamati dan dilakukan secara empiris. Formula spektrum yang umum digunakan adalah spektrum Pierson-Moskowitz, Bretschneider, JONSWAP, dan Torsethaugen. Satu atau lebih parameter dibutuhkan dalam mendeskripsikan spektrum tersebut. Spektrum tersebut memberikan distribusi energi gelombang di antara frekuensi gelombang yang berbeda di permukaan laut. Salah satu spektrum gelombang yang akan digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah spektrum JONSWAP. Penggunaan spektrum ini dikarenakan gelombang dominan yang terjadi di lokasi studi memiliki karakteristik seperti spektrum JONSWAP, dimana parameter fungsi gelombang disesuaikan dengan kondisi di lokasi.

Pada tahun 1968 dan 1969, sebuah program pengukuran gelombang secara ekstensif dikenal sebagai *Joint Operation North Sea Wave Project* (JONSWAP) dilakukan di 100 mil dari pantai di Laut Utara, mulai dari Pulau Sylt. Hasil analisis data dalam sebuah formula spektrum untuk laut dalam kondisi *fetch limited* dan terbukti memberikan gambaran yang baik terhadap gelombang yang dibangkitkan oleh angin lokal di wilayah tersebut.

Spektrum JONSWAP diformulasikan dengan 4 parameter sebagai berikut:

$$S_j(\omega) = (\alpha) \cdot S_{PM}(\omega) \cdot p \quad (2.22)$$

$$\text{Dimana, } \alpha = 1 - 0.287 \ln \gamma \text{ dan } p = \gamma \exp \left(-0.5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p} \right)^2 \right)$$

S_{PM} merupakan spektrum energi Pierson-Moskowitz (1964) yang dapat ditentukan dengan mengikuti persamaan di bawah ini:

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} (H_s^2) (\omega_p^4) \omega^{-5} \exp \left(-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^4 \right) \quad (2.23)$$

Dimana ω_p merupakan frekuensi puncak spektrum, dan $\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$.

Parameter puncak gelombang γ diambil dari persamaan berikut :

$$\gamma = \begin{cases} \exp \left(\begin{matrix} 5 \\ 5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \\ 1 \end{matrix} \right) & \text{for } T_p < 3.6\sqrt{H_s} \\ & \text{for } 3.6\sqrt{H_s} \leq T_p \leq 5\sqrt{H_s} \\ & \text{for } T_p > 5\sqrt{H_s} \end{cases} \quad (2.24)$$

Dimana :

T_p : periode gelombang puncak [s]

H_s : tinggi gelombang signifikan [m]

2.1.5 Gaya Gelombang

Gaya hidrodinamika akibat gelombang pada tiang silinder bergantung pada pola aliran di sekitar tiang. Pola aliran ini sangat dipengaruhi oleh derajat ketergangguan aliran oleh adanya tiang. Derajat ketergangguan ini ditentukan

oleh perbandingan antara diameter tiang dengan panjang gelombang yaitu D/L . Persamaan Morison mengasumsikan bahwa komposisi gaya terdiri dari gaya seret dan gaya inersia yang ditambahkan secara linier. Persamaan ini biasanya digunakan ketika gaya seret dominan. Biasanya terjadi pada kasus struktur yang kecil bila dibandingkan dengan panjang gelombangnya. Ketika gaya seret kecil dan gaya inersia lebih mendominasi tetapi struktur masih relatif kecil, digunakan teori *Froude-Krylov*. Sementara teori difraksi digunakan ketika besarnya struktur sebanding dengan panjang gelombang dan keberadaan struktur tersebut mengubah gelombang yang terjadi. Kriteria pemilihan teori gaya gelombang dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

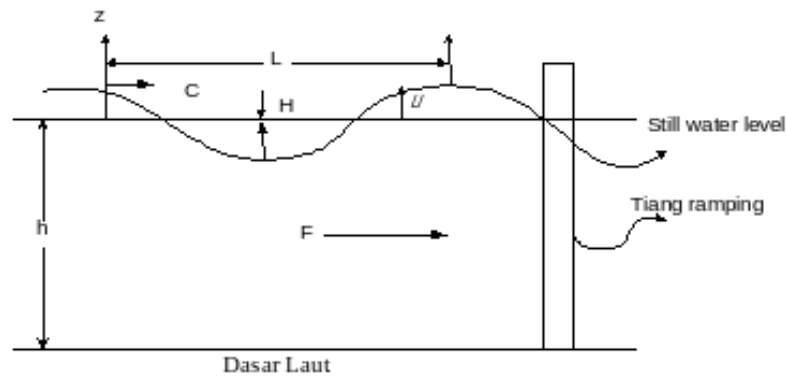
Tabel 2.1 Kriteria Pemilihan Teori Gaya Gelombang

Syarat	Teori Gaya Gelombang
$D/L < 0.2$	Persamaan Morison
$D/L = 0.2$	Teori <i>Froude-Krylov</i>
$D/L > 0.2$	Teori Difraksi

Dalam Tugas Akhir ini, analisis gaya gelombang terhadap riser menggunakan persamaan Morison yang diuraikan pada 2.1.6.

2.1.6 Persamaan Morison

Untuk menghitung gaya gelombang pada silinder digunakan persamaan Morison, yang menyatakan bahwa gaya gelombang dapat diekspresikan sebagai penjumlahan gaya seret (*drag force*, F_D) dan gaya inersia (*inertia force*, F_I) akibat percepatan partikel air. Ilustrasi pengaruh persamaan Morison ditunjukkan pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4 Gaya gelombang pada silinder tegak.

Sumber: dc345.4shared.com/doc/iQMufLop/preview_html_4487a658.gif

a) Gaya Seret (*Drag Force*)

Gaya seret terjadi akibat gesekan yang terjadi antara fluida dan dinding serta vortex yang terjadi di bagian belakang struktur. Besarnya gaya gesek dipengaruhi oleh sebuah koefisien hidrodinamik yang disebut koefisien seret, dimana besar koefisien ini dipengaruhi oleh bentuk penampang, bilangan Reynolds, bilangan Keulegan-Carpenter, dan rasio kekasaran. Besarnya gaya seret per satuan panjang yang terjadi dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D |U| U \quad (2.25)$$

Dimana:

F_D : Gaya seret [kN]

ρ : Massa jenis fluida [kg/m³]

C_D : Koefisien seret

D : Diameter struktur [m]

U : Kecepatan arus arah horizontal [m/s]

Besar kecepatan partikel air akibat *wave induced current* ini didapat dari penurunan kecepatan potensial berdsarakan teori gelombang linier, teori Stokes orde ke-5, dan sebagainya. Pemilihan teori gelombang bergantung pada karakteristik kondisi laut lokasi studi.

b) Gaya Inersia (*Inertia Force*)

Gaya inersia terjadi pada struktur akibat gaya oleh perubahan perpindahan massa air yang disebabkan oleh keberadaan benda di dalam air, misalnya tiang silinder. Faktor yang mempengaruhi gaya inersia adalah percepatan arus. Nilai gaya inersia per satuan panjang yang terjadi pada suatu struktur silinder dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

$$F_I = \rho C_M A \dot{U} \quad (2.26)$$

Dimana:

F_I : Gaya inersia [kN]

ρ : Massa jenis fluida [kg/m³]

C_M : Koefisien inertia

A : Luas penampang struktur [m²]

$\dot{U}$: Percepatan arus arah horizontal [m/s²]

Gaya Morison total per satuan panjang yang terjadi adalah hasil penjumlahan dari gaya seret dan gaya inersia yang dituliskan oleh persamaan berikut :

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D D |U| U + \rho C_M A \dot{U} \quad (2.27)$$

2.2 Arus

Arus di laut biasanya terjadi akibat adanya pasang surut (*tidal current*) dan gesekan angin pada permukaan air (*wind drift current*). Kecepatan arus diasumsikan pada arah horizontal bervariasi menurut kedalaman.

Besar dan arah arus pasang surut di permukaan biasanya ditentukan berdasarkan pengukuran di lokasi. *Wind drift current* di permukaan biasanya diasumsikan sekitar 1% dari kecepatan angin pada ketinggian 30 ft di atas permukaan air. Untuk kebutuhan rekayasa, variasi arus pasang surut terhadap kedalaman biasanya diasumsikan mengikuti profil pangkat 1/7 dan variasi arus akibat gesekan angin diasumsikan linier terhadap kedalaman.

Variasi distribusi arus berdasarkan kedalaman dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$U_T = U_{OT} \left(\frac{z}{h} \right)^{1/7} \quad (2.25)$$

$$U_W = U_{OW} \left(\frac{z}{h} \right) \quad (2.26)$$

$$U = U_T + U_W \quad (2.27)$$

Dimana:

U_T : kecepatan pasang surut

U_W : kecepatan angin

Dalam kondisi badai, arus terjadi bersamaan dengan gerakan air akibat gelombang. Arah arus pasang surut biasanya tidak sama dengan arah rambat gelombang, tetapi *wind drift current* biasanya diasumsikan searah dengan gerakan gelombang.

Arus yang terjadi bersamaan dengan gelombang akan mempengaruhi karakteristik gelombang. Besar pengaruh arus terhadap gelombang tergantung pada rasio kecepatan maksimum arus terhadap kecepatan gelombang. Tetapi, pengaruh arus bisa diabaikan untuk kondisi gelombang saat badai (*storm*). Sehingga untuk kebutuhan desain, dalam perhitungan gaya akibat arus dan gelombang yang bekerja pada struktur dilakukan dengan menambahkan kecepatan arus dengan kecepatan horizontal akibat gelombang. Pengaruh arus terhadap gaya yang bekerja pada silinder telah diperhitungkan ke dalam perhitungan gaya gelombang.

Dalam Tugas Akhir ini, arus akan dimodelkan sesuai dengan data arus yang tersedia di lokasi studi.

2.3 Dinamika Struktur Benda Terapung

Pengaruh dari gaya luar (gelombang) terhadap struktur terapung dapat menyebabkan struktur tersebut bergerak. Gerakan dari struktur terapung merupakan respon dari struktur akibat adanya gaya luar. Respon dari suatu struktur tergantung pada karakteristik struktur tersebut. Respon struktur terhadap suatu gelombang sinusoidal digambarkan sebagai *Response Amplitude Operator* (RAO). RAO dapat berupa RAO gaya atau RAO simpangan. RAO dapat didefinisikan sebagai amplitudo respon struktur per satuan amplitudo gelombang. RAO biasanya ditentukan dengan bantuan *software*.

Beban lingkungan seperti gelombang merupakan parameter esensial yang harus dipertimbangkan dalam analisis dinamik. Karena ketidaktersediaan data RAO kapal, analisis dinamik akan disederhanakan dengan memperhitungkan sebuah angka yang disebut faktor pembesaran dinamik atau biasa disebut dengan *Dynamic Amplification*

Factor (DAF). DAF digunakan untuk merepresentasikan efek dinamis gerakan kapal terhadap tegangan yang bekerja pada pipa, *wire* atau sistem tambat.

2.3.1 Response Amplitude Operator (RAO)

Untuk sistem linear, fungsi respon pada suatu gelombang dengan frekuensi tertentu dapat dituliskan dengan persamaan berikut ini:

$$\text{Respon}(t) = RAO \cdot \eta(t) \quad (2.28)$$

Dimana $\eta(t)$ merupakan profil gelombang sebagai fungsi waktu dan RAO merupakan amplitudo respon struktur per satuan amplitudo gelombang terhadap periode gelombang. Besarnya frekuensi untuk nilai RAO dapat mempengaruhi nilai DAF struktur. Dalam konteks spektrum, untuk suatu sistem yang linier, fungsi RAO dikuadratkan dan dikalikan dengan spektrum gelombang untuk memperoleh spektrum respon dan dituliskan dengan:

$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \quad (2.29)$$

Untuk tahap pemodelan instalasi *rigid riser* ini menggunakan RAO kapal yang merupakan *default* dari OrcaFlex sendiri.

2.3.2 Dynamic Amplification Factor (DAF)

DAF merupakan rasio antara amplitudo gerakan dinamik terhadap amplitudo statik. DAF dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$DAF = \frac{X}{\delta_{st}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2}} \quad (2.30)$$

Dimana:

β : Rasio antara frekuensi gelombang terhadap frekuensi alami masing-masing gerakan

ζ : Rasio redaman = $\frac{c}{2m\omega_0} = 5\%$



BAB 3

SISTEM SUBSEA RISER

Analisis Transportasi dan Instalasi Rigid Riser pada Sistem Free Standing Hybrid Riser

Yonathan Mozes Mandagi - 15508008

Program Studi Teknik Kelautan

Sistem riser merupakan fasilitas yang mempunyai fungsi utama menyalurkan fluida dari fasilitas produksi yang berada di dasar laut dengan fasilitas produksi terapung di permukaan laut. Konsep riser yang lazim digunakan untuk laut dalam adalah flexible riser, steel catenary riser, dan hybrid riser.

3.1 Definisi Riser

Sistem riser merupakan saluran yang menghubungkan antara fasilitas produksi terapung di permukaan laut dengan fasilitas produksi yang berada di dasar laut. Fungsi utama riser adalah untuk menyalurkan fluida, seperti minyak, gas atau air. Fungsi tambahan riser berdasarkan wilayah penggunaan adalah sebagai berikut:

- Menyalurkan dan menginjeksi fluida antara sumur-sumur dan struktur terapung
- Menyalurkan fluida dari struktur terapung ke pipa bawah laut
- Memandu proses pengeboran dari struktur terapung ke dalam sumur

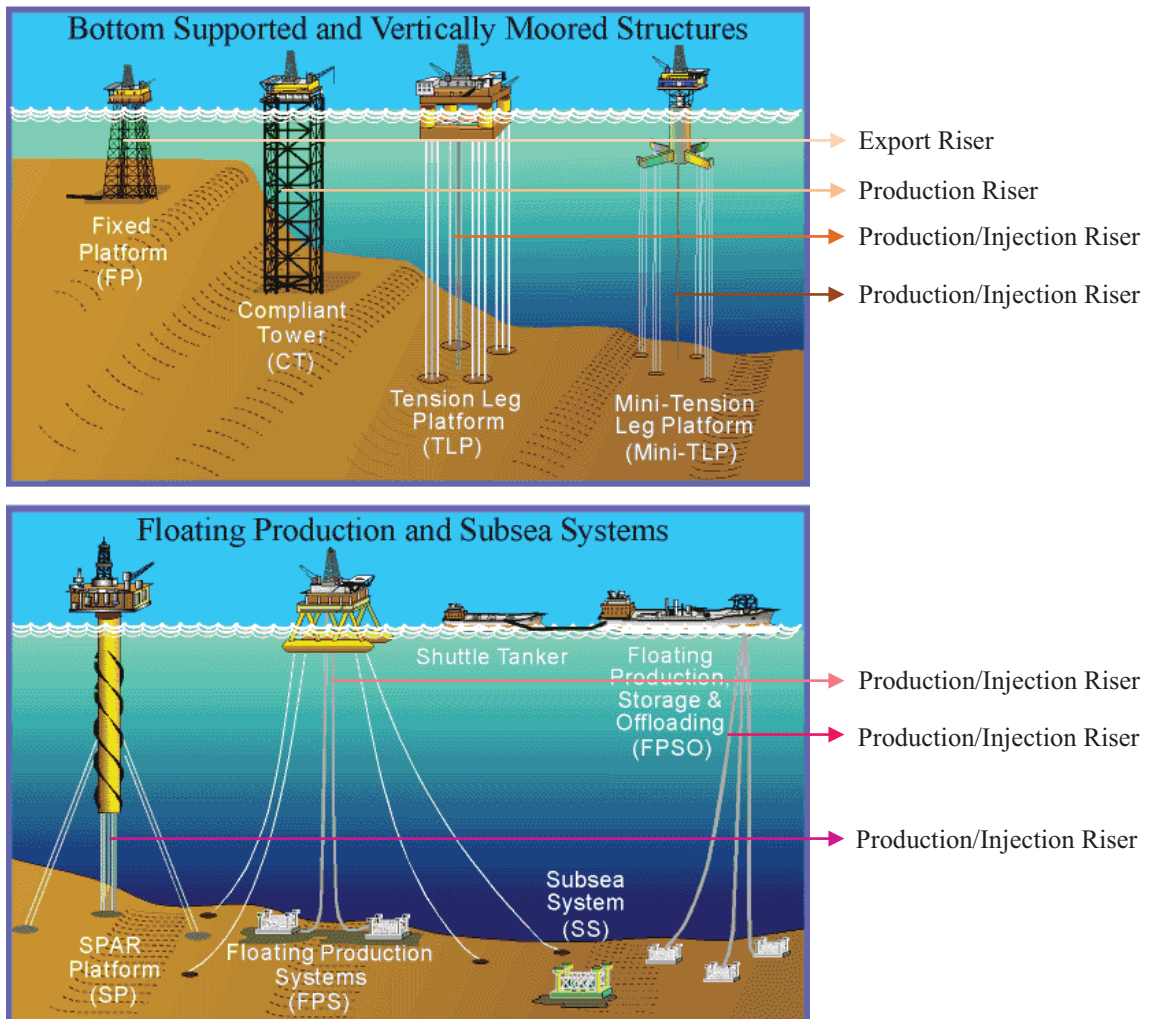
Penggunaan sistem riser bergantung pada kedalaman perairan dan kondisi lingkungan. Perancangan sistem riser untuk perairan dalam lebih sulit daripada perairan dangkal. Sistem riser laut dalam sudah banyak digunakan di Teluk Meksiko, Brazil, dan Afrika Barat. Dalam hal kondisi lingkungan, lokasi tersebut dipertimbangkan sebagai kondisi lingkungan menengah, sedangkan Laut Utara mempunyai kondisi lingkungan yang tergolong kasar. Kedalaman perairan digolongkan menjadi 3 kelompok, yaitu *shallow water* dimana kedalaman perairan kurang dari 300 m, *mid-deepwater* antara 300 m hingga 1000 m, *deepwater* antara 100 m hingga 2000 m, dan *ultra deep water* lebih dari 2000 m. Kedalaman perairan merupakan faktor utama dalam menentukan jenis riser yang digunakan. **Gambar 3.1** menunjukkan perbedaan antara riser pada struktur anjungan lepas pantai tipe *fixed platform* dengan struktur terapung.

Berdasarkan fungsinya, sistem riser dibedakan menjadi beberapa jenis, yaitu:

- 1) Sebagai *production riser*, untuk menyalurkan fluida dari reservoir menuju fasilitas produksi terapung (**Gambar 3.1**)
- 2) Sebagai *drilling riser*, untuk memandu proses pengeboran ke dalam sumur (**Gambar 3.2**)

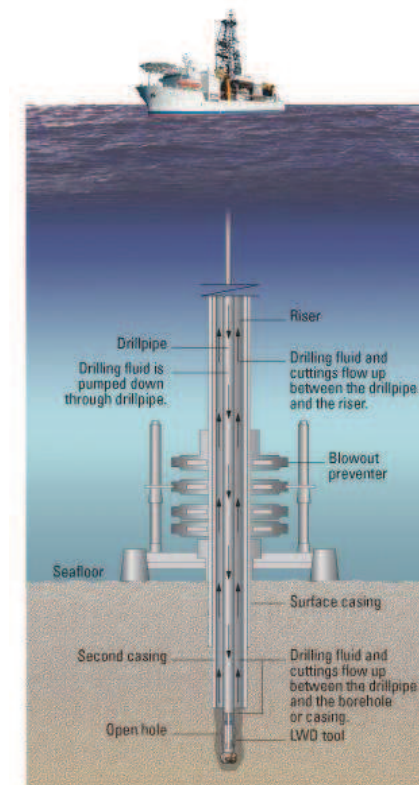
- 3) Sebagai *export riser*, untuk menghubungkan antara fasilitas produksi terapung dengan pipa bawah laut (**Gambar 3.1**)
- 4) Sebagai *injection riser*, untuk menyalurkan air atau *inhibitor* dari fasilitas produksi terapung menuju reservoir (**Gambar 3.1**)

Deepwater Development Systems



Gambar 3.1 Perbandingan sistem riser pada fixed platform dan struktur terapung.

Sumber: http://www.bsee.gov/uploadedImages/BSEE/Exploration_and_Production/Development_and_Production/Gulf_of_Mexico_Region/deepsys.gif



Gambar 3.2 Konfigurasi *drilling riser*.

Sumber: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/files/OGL05017.jpg>

3.2 Konfigurasi Riser

Konfigurasi riser merupakan komposisi komponen atau elemen-elemen penyusun dari riser itu sendiri. Tipikal elemen utama pada sebuah sistem riser terdiri dari:

- Badan riser : pipa logam atau pipa fleksibel
- Sistem penghubung : bagian atas dan bawah

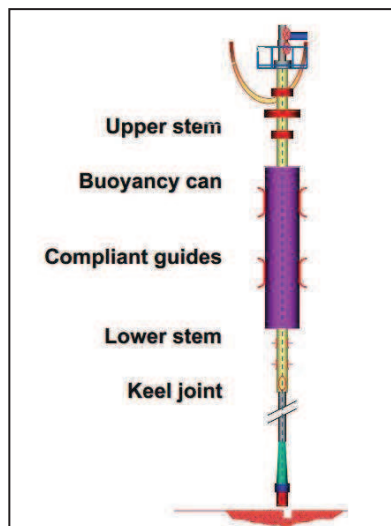
Sistem riser merupakan penghubung antara bagian statik di bagian bawah dan struktur terapung di bagian atas. Perilaku dinamik struktur terapung di permukaan merupakan tantangan utama dalam merancang sistem riser. Sehingga hal ini

merupakan alasan untuk mengkategorikan sistem riser berdasarkan kemampuannya terhadap gerakan struktur terapung, yaitu:

- *Top Tensioned Riser*
- *Compliant Riser*
- *Hybrid riser*

3.2.1 *Top Tensioned Riser*

Konsep *Top Tensioned Riser* (TTR) didukung oleh sistem *buoyancy* dengan memberikan gaya tegangan ke atas untuk menjaga riser tetap dalam keadaan tegang. Konfigurasi TTR dapat dilihat pada **Gambar 3.3**. *Top Tensioned Riser* diaplikasikan untuk kegiatan *drilling* dan produksi dengan sistem *dry tree*, seperti SPAR atau TLP. Kedua struktur terapung tersebut mempunyai gerakan *heave* yang kecil, sehingga cocok dengan konsep TTR. Efek dari gerakan kapal tidak mempengaruhi perilaku riser karena sambungan di ujung atas tidak berhubungan secara langsung dengan struktur terapung.



Gambar 3.3 Konfigurasi *Top Tensioned Riser* (TTR).

Sumber: www.aade.org/houston/study/DETG/Feb06/DIG_2_14_06_Stanton_Presentation.pdf

Penggunaan di laut dalam, kebutuhan tegangan bagian atas riser menjadi signifikan untuk mendukung berat riser dan mencegah kompresi di bagian bawah. Penambahan tegangan atas pada riser akan mempengaruhi ukuran sistem tegangan atas dan kebutuhan gaya apung. Selain itu, lingkungan yang kasar akan memberikan gerakan yang signifikan pada struktur terapung dan TTR itu sendiri. Oleh karena itu, pada beberapa tingkat kombinasi antara kedalaman perairan dan kondisi lingkungan, TTR secara teknis menjadi tidak mungkin untuk dikerjakan dan tidak ekonomis.

3.2.2 *Compliant Riser*

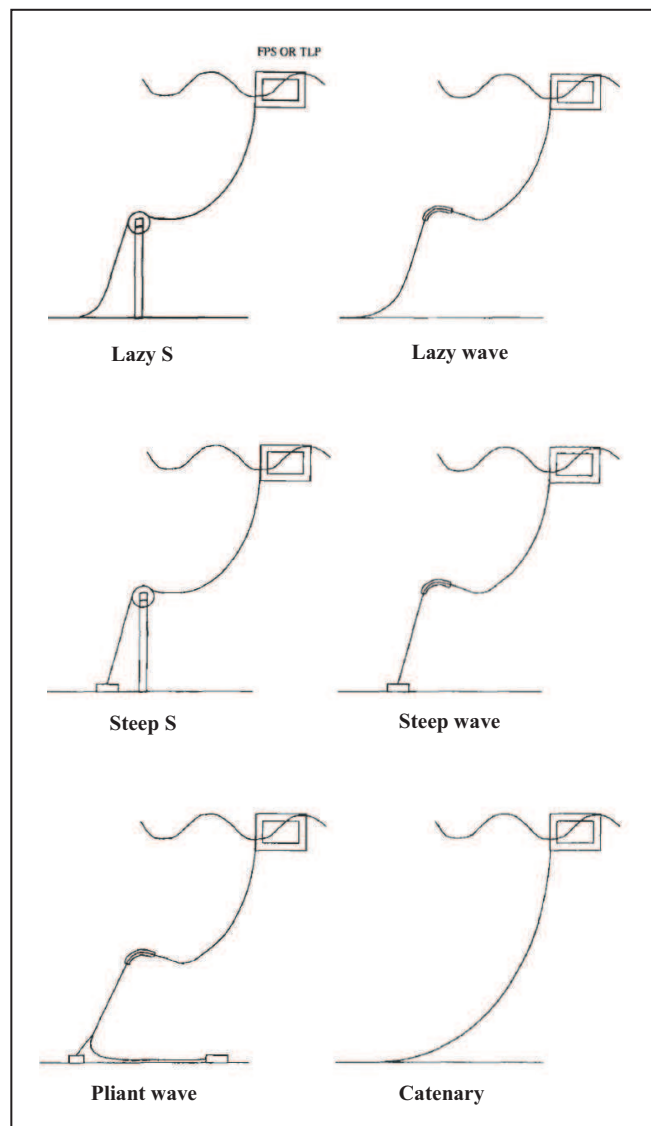
Compliant riser memiliki kemampuan fleksibilitas untuk mengikuti gerakan struktur terapung. Konfigurasi *compliant riser* dibentuk untuk menyerap gerakan struktur terapung tanpa menggunakan peralatan tambahan, seperti sistem kompensasi *heave*. Kemampuan fleksibilitas untuk menahan gerakan dinamik memungkinkan *compliant riser* bekerja di perairan yang lebih dalam dan lingkungan yang kasar. Beberapa konfigurasi dari *compliant riser* dapat dilihat pada **Gambar 3.4**.

Compliant riser biasa digunakan untuk produksi, ekspor, dan injeksi. Hal ini juga dapat diaplikasikan pada berbagai macam variasi struktur terapung, seperti TLP, *semi-submersible*, dan kapal.

Berdasarkan pemilihan material, *compliant riser* dapat dibagi menjadi:

- *Rigid Riser*
- *Flexible Riser*

Komponen utama *rigid riser* terdiri dari dari pipa baja dengan menggunakan sistem koneksi antar pipa berupa las atau *bolted*. Tipikal grade material yang digunakan adalah X60 atau X65. Penjelasan tentang properti fisik grade material ini dapat dilihat pada **Tabel 3.1**.



Gambar 3.4 Macam-macam konfigurasi *compliant riser*.

Sumber: Yong Bai, 2001

Selain pipa baja, titanium memberikan solusi yang menjanjikan karena tingkat fleksibilitas yang tinggi, tegangan leleh yang tinggi dan lebih ringan.

Tabel 3.1 Sifat fisik line pipe API 5L

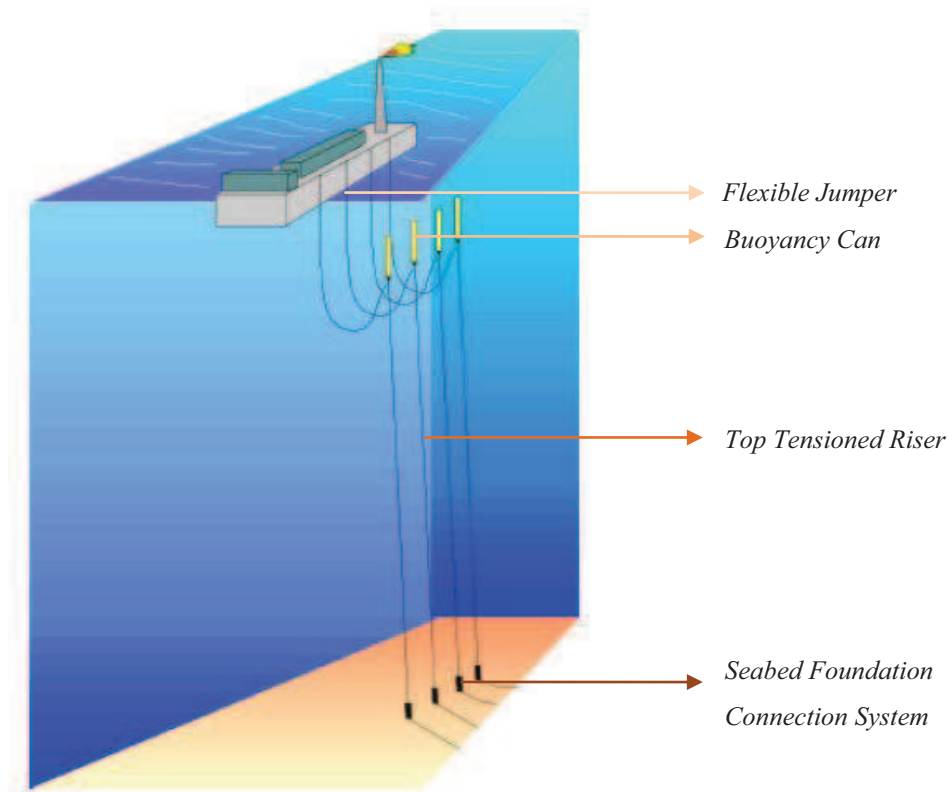
Sumber: www.woodcousa.com/line_pipe_properties.htm

API 5L Grade	Yield Strength min. (ksi)	Tensile Strength min. (ksi)	Yield to Tensile Ratio (max.)
A	30	48	0.93
B	35	60	0.93
X42	42	60	0.93
X46	46	63	0.93
X52	52	66	0.93
X56	56	71	0.93
X60	60	75	0.93
X65	65	77	0.93
X70	70	82	0.93
X80	80	90	0.93

Flexible riser dibuat dari beberapa lapisan pipa spiral yang tidak bergantung satu sama lain dan lapisan *thermoplastic*. Teknologi ini sudah terbukti dan sering diaplikasikan di seluruh dunia. *Flexible riser* dapat mengakomodasi lekukan yang tinggi, memudahkan proses instalasi dan dapat digunakan kembali.

3.2.3 Hybrid Riser

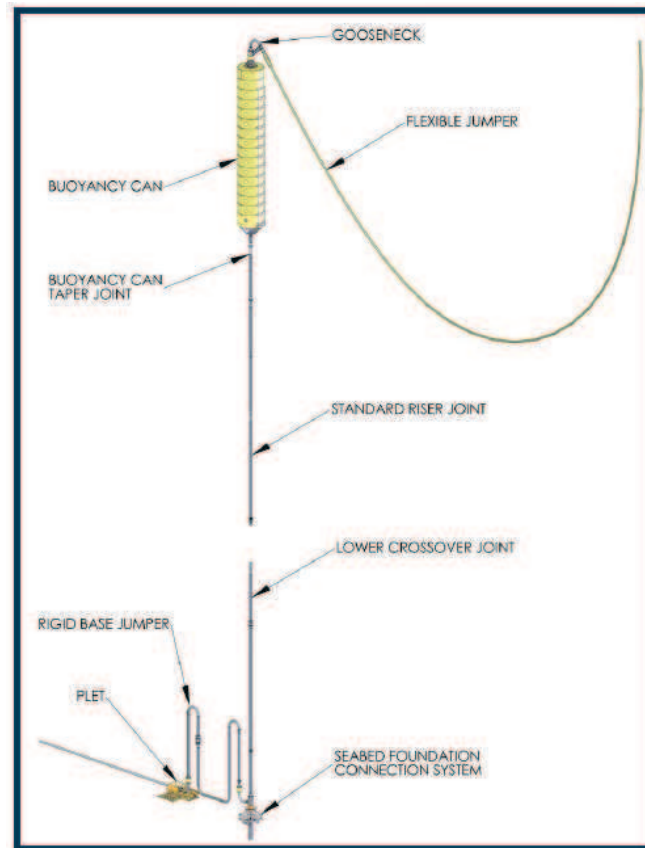
Hybrid riser merupakan kombinasi antara konfigurasi TTR dengan *compliant riser*. *Hybrid riser* terdiri atas sebuah pipa baja vertikal yang memiliki tegangan atas akibat sistem *buoyancy* yang berada di dekat permukaan, dilengkapi dengan *flexible jumper* tersambung pada bagian atas riser ke struktur fasilitas terapung. Dasar fondasi menggunakan sistem *drilled* dan *grouted piles*. Konfigurasi *hybrid riser* dapat ditunjukkan pada **Gambar 3.5**.



Gambar 3.5 Konfigurasi *hybrid riser*.

Sumber: Hatton & Lim, 1999.

Bagian riser diposisikan vertikal di bawah permukaan air dengan kedalaman tertentu dengan maksud untuk mengurangi beban akibat gelombang. Terdapat jarak *offset* antara *host platform* dengan bagian atas riser, *offset* tersebut akan dihubungkan dengan pipa fleksibel dari atas riser dengan struktur terapung sehingga dapat mengakomodasi gerakan struktur terapung. *Hybrid riser* dapat digunakan untuk berbagai macam jenis *host platform* dan cocok untuk aplikasi laut dalam dan laut sangat dalam untuk semua kondisi lingkungan. Komponen-komponen dari *hybrid riser* ditunjukkan pada **Gambar 3.6**.



Gambar 3.6 Komponen-komponen *hybrid riser*.

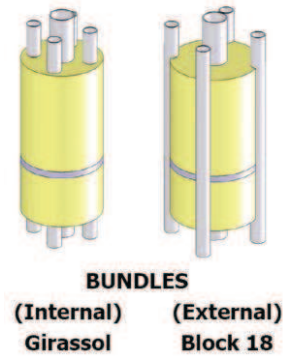
Sumber: Ki Li, 2012.

Berdasarkan bentuk penampang dari pipa riser vertikal, *hybrid riser* dapat diklasifikasikan menjadi:

- *Bundle Hybrid Riser* (BHR)

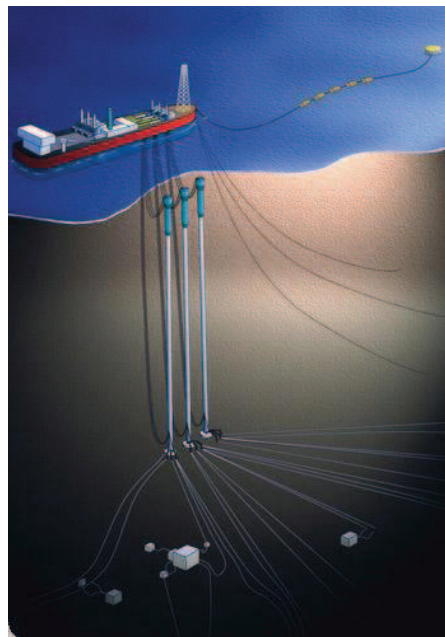
Bundle hybrid riser terdiri atas sejumlah pipa berdiameter kecil dan *umbilical* yang dikelompokkan bersama, umumnya di sekitar sistem *buoyancy*. Penampang BHR dapat dilihat pada **Gambar 3.7** dengan beberapa konsep *bundle*, diantaranya konsep pertama dengan semua pipa berada di dalam *bundle*, seperti yang diaplikasikan di Girossol field, dan konsep kedua dimana beberapa pipa berada disisi *bundle*

yang dipakai pada Block 18 *field*, keduanya berlokasi di Angola. Konsep BHR ini dipakai dalam sistem *Free Standing Hybrid Riser* (FSHR) seperti pada **Gambar 3.8**.



Gambar 3.7 Tipikal penampang *Bundle Hybrid Riser*.

Sumber: Ki Li, 2012.

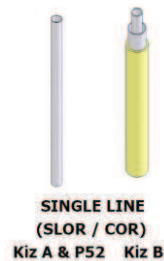


Gambar 3.8 Sistem Bundle Hybrid Riser

Sumber: <http://www.balmoral-group.com/boe/images/press-supatherm-field-layout.jpg>

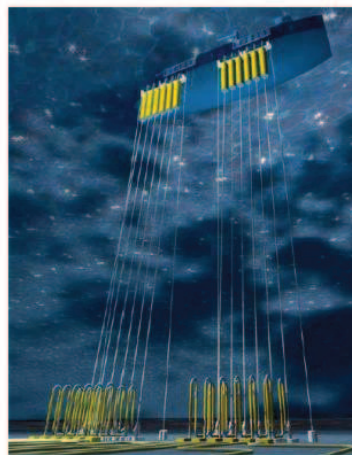
- *Single Hybrid Riser (SHR)*

Single hybrid riser terdiri dari sebuah penampang konsentrik riser baja *pipe-in-pipe*. Untuk tipikal sistem *offset hybrid riser*, SHR terdiri dari *Single Line Offset Riser (SLOR)* yang diaplikasikan di Kizomba A field, Angola dan *Concentric Offset Riser (COR)* yang diaplikasikan di Petrobras P-52 field, Campos Basin, Brazil, dengan tipikal penampang seperti pada **Gambar 3.9**. Pengembangan lebih lanjut dari SLOR adalah *Grouped-SLOR* seperti pada **Gambar 3.10** yang terdiri dari sekelompok *single riser*. Hal ini berguna untuk menahan gerakan riser dan mengurangi resiko tabrakan antar SLOR.



Gambar 3.9 Tipikal penampang *Single Line Offset Risers (SLORs)*

Sumber: Ki Li, 2012.



Gambar 3.10 *Grouped SLOR*

Sumber: OMAE2009-79487

3.3 Kriteria Pemilihan Riser

Perancangan konfigurasi riser harus dilakukan sesuai dengan kebutuhan produksi dan kondisi lapangan. Berikut dasar yang harus diperhitungkan dalam memilih konfigurasi riser :

- Karakteristik sumur (terpusat/tersebar),
- Jenis struktur terapung (Spar/Semi-submersible/FPSO/TLP),
- Kedalaman dan kondisi perairan,
- Umur layan,
- Fungsi riser (produksi/injeksi/export), dan
- Biaya

Sejumlah konsep riser menawarkan keuntungan dari sisi teknis dan komersial sebagai solusi untuk laut dalam. Konsep riser yang lazim digunakan di laut dalam adalah:

- *Flexible Riser*
- *Steel Catenary Riser*
- *Hybrid Riser*

3.3.1 *Flexible Riser*

Sebagian besar *floating production system* di seluruh dunia dikombinasikan dengan *flexible riser*. *Flexible riser* dianggap sebagai teknologi yang terbukti khususnya laut dangkal hingga kedalaman menengah. Riser fleksibel mempunyai kemampuan untuk mengakomodasi lengkungan yang tinggi dan gerakan dinamik sehingga cocok untuk lingkungan yang kasar seperti lepas pantai di Norway. Riser ini mudah untuk diinstal, dilepaskan, ketahanan korosi dan dapat digunakan ulang.

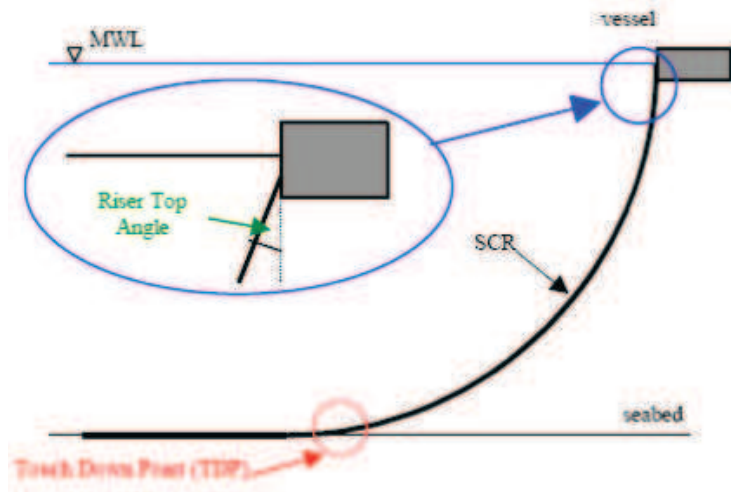
Namun seiring dengan eksplorasi ke laut yang lebih dalam, *flexible riser* mempunyai batasan dari sisi teknis dan ekonomis terutama diakibatkan karena biaya produksi. Biaya pipa fleksibel secara signifikan lebih mahal daripada

pipa baja kaku. Kebutuhan untuk memiliki lapisan-lapisan yang kuat untuk menahan beban radial direpresentasikan sebagai batasan yang berhubungan dengan ketersediaan proses manufaktur dan peralatan. Selanjutnya, di masa depan, kebutuhan jumlah riser yang tinggi, diameter yang besar, kedalaman perairan yang semakin dalam, durasi operasional yang lama dan berpasangan dengan lingkungan yang kasar mendorong teknologi pipa fleksibel menjadi terbatas.

3.3.2 *Steel Catenary Riser*

Steel Catenary Riser (SCR) merupakan salah satu alternatif langsung setelah *flexible riser*. SCR dapat digunakan dalam diameter yang besar, tekanan tinggi, temperatur tinggi dan mudah untuk dikonstruksi. SCR dapat dipasang dalam ukuran yang cukup panjang dan tidak membutuhkan sistem *buoyancy* tambahan. Pipa baja lebih murah daripada pipa fleksibel, dan dapat digunakan pada laut yang lebih dalam dengan penambahan biaya yang sepadan. Di dasar laut, riser tidak membutuhkan sistem koneksi bagian bawah yang khusus. Hal ini mengurangi tingkat kerumitan dan menghemat biaya, sehingga SCR dapat dikatakan sebagai sistem riser yang sederhana.

Namun, SCR sangat sensitif terhadap beban lingkungan. Gerakan struktur yang tinggi akibat lingkungan yang kasar menghasilkan permasalahan pada wilayah *touchdown point* (TDP) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.11**. Ketika struktur bergerak, maka panjang pipa antar tumpukan akan berubah. Gerakan struktur secara siklik dapat menyebabkan perubahan tegangan antara maksimum dan minimum. Akibatnya, bagian bawah dari SCR akan rentan terhadap kerusakan *fatigue*. Akibat arus yang memiliki kecepatan cukup tinggi juga dapat menyebabkan permasalahan lain pada SCR, yakni *Vortex Induced Vibration* (VIV).



Gambar 3.11 Ilustrasi Touch Down Point (TDP) pada SCR

Sumber: OMAE2009-79487

Persoalan ini mendorong industri untuk mengembangkan solusi SCR yang baru sehingga dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan yang ada. Sudah banyak studi yang dilakukan oleh industri dengan maksud optimasi perancangan SCR. Beberapa studi optimasi perancangan SCR antara lain:

- *Lazy wave steel catenary riser*
- Optimasi berat SCR dengan memvariasikan berat *coating* dan ketebalan pipa pada riser.
- Optimasi berat SCR dengan memasang *clump weight* pada bagian riser yang membutuhkan.

3.3.3 Hybrid Riser

Hybrid riser muncul sebagai solusi yang menjanjikan untuk laut dalam dan lingkungan yang kasar. *Hybrid riser* memiliki pengaruh penambahan beban yang kecil terhadap struktur terapung daripada *flexible riser* maupun SCR, perilaku dinamik yang sangat baik, tidak memerlukan *pipelay vessel* yang besar untuk proses instalasi, sensitivitas terhadap *fatigue* rendah, dapat digunakan untuk berbagai macam bentuk struktur terapung.

Namun, *hybrid riser* merupakan solusi yang mahal akibat banyak komponen yang harus dipasang seperti *buoyancy can*, *riser bundle*, *hybrid riser foundation*, dan lain-lain. Sebagai tambahan, riser dipasang sebagai satu satuan barang yang telah difabrikasi terlebih dahulu, yakni selalu ada resiko pada saat *towing* dan instalasi.

3.4 Tantangan Desain

Dalam mendesain sistem riser, ada banyak faktor yang menentukan seperti kedalaman perairan, tekanan, temperatur, kondisi lingkungan, komponen fluida, proses instalasi dan sebagainya. Kombinasi antara laut dalam dengan kondisi lingkungan yang kasar dianggap sebagai perancangan sistem riser yang paling menantang. Berikut beberapa tantangan yang muncul pada saat perancangan sistem riser.

3.4.1 Kedalaman Perairan

Kedalaman perairan merupakan tantangan utama dalam merancang sistem riser. Seiring dengan bertambahnya kedalaman, maka muncul beberapa tantangan lain sebagai berikut:

a) Penambahan berat riser

Berat riser harus semakin besar untuk mengatasi gaya ke atas dari tekanan air yang berbanding lurus dengan kedalaman. Persoalan utama yang berkaitan dengan penambahan berat riser adalah meningkatnya tegangan di bagian atas riser. Pengaruh lain akibat penambahan berat riser, yaitu:

- Selama proses instalasi pipa di laut dalam, sistem tensioner pada kapal penggelar harus mampu mengakomodasi kebutuhan tegangan atas yang tinggi. Namun, kondisi ini terbatas pada beberapa kapal saja.

- Situasi yang sama selama waktu operasional, dimana berat riser yang berat akan meningkatkan beban pada struktur terapung.
- Meningkatnya biaya produksi riser. Untuk pipa fleksibel secara signifikan akan lebih mahal daripada pipa kaku, sehingga penambahan berat riser akan menyebabkan biaya pengembangan yang tidak ekonomis.

b) Tekanan hidrostatik tinggi

Tekanan eksternal hidrostatik meningkat seiring kedalaman air. Tekanan eksternal yang berlebihan pada pipa akan menyebabkan *collapse* pada pipa. Sehingga penampang riser lebih tebal dibutuhkan untuk mencegah *collapse*.

c) Pengaruh arus

Dalam aplikasi laut dalam, kecepatan arus yang besar harus diperhatikan. Riser akan rentan terhadap *Vortex Induced Vibration* (VIV). Getaran yang ditimbulkan oleh arus secara terus menerus dapat menyebabkan SCR mengalami kelelahan. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan *helical strakes*, yang merupakan sebuah *passive control device* yang sering digunakan untuk mereduksi VIV, di sepanjang bagian yang kritis pada riser, namun di sisi lain akan menambah gaya seret.

d) Temperatur rendah di dasar laut

Semakin dalam suatu perairan, temperatur air yang berada di dasar laut menjadi sangat rendah berkisar dimana air dapat membeku. Hal ini akan mempengaruhi fluida yang mengalir di dalam riser. Fluida yang mengalir harus dijaga temperaturnya untuk menghindari terjadinya

pembekuan menjadi *wax* atau *hydrates*, sehingga dapat mengganggu *flow assurance*. Agar fluida tidak mengalami penurunan temperatur, sistem riser harus dipasang *thermal insulation*.

e) Kebutuhan *vessel* dengan spesifikasi tinggi

Untuk melakukan instalasi riser dibutuhkan *vessel* tertentu yang dirancang khusus. *Vessel*, untuk kasus tertentu disebut *laybarge*, harus memiliki spesifikasi tertentu agar riser dapat dipasang secara tepat dan aman. Pengaruh kedalaman yang signifikan sangat mempengaruhi pemilihan *vessel*, namun ketersediaan *laybarge* di dunia sangat terbatas.

3.4.2 Kondisi Lingkungan

Selain kedalaman perairan, kondisi lingkungan yang kasar juga dapat menambah tingkat kesulitan dalam mendesain riser, seperti :

- Gerakan struktur terapung yang besar

Sistem riser harus mampu menyerap gerakan struktur. Gerakan struktur yang besar secara langsung akan mempengaruhi perilaku riser. *Offset* struktur meningkat akibat lingkungan yang kasar, pilihan untuk konfigurasi riser menjadi terbatas. *Top Tensioned Riser* tidak dapat diterapkan, atau *conventional free hanging steel catenary riser* akan mengalami momen lentur yang tinggi pada bagian bawah SCR.

- Perilaku dinamik yang signifikan

Salah satu permasalahan yang potensial dari perilaku dinamik adalah *displacement* arah lateral yang tinggi. Kemungkinan terjadinya tabrakan antara riser yang berdekatan cukup tinggi. Masalah potensial lainnya adalah resiko kompresi pada *touchdown point* (TDP).

- Kerusakan *fatigue*

Fatigue disebabkan oleh beban siklus cukup tinggi dan terjadi pada bagian sambungan riser, dimana sambungan dilakukan dengan cara las. Untuk mengatasi masalah *fatigue* dibutuhkan kualitas las yang tinggi.



BAB 4

FREE STANDING HYBRID RISER

Analisis Transportasi dan Instalasi Rigid Riser pada Sistem Free Standing Hybrid Riser

Yonathan Mozes Mandagi - 15508008

Program Studi Teknik Kelautan

Free Standing Hybrid Riser secara umum merupakan gabungan dari beberapa komponen utama seperti flexible riser, buoyancy tank, dan rigid riser. Dalam hal mendesain suatu FSHR disediakan beberapa rekomendasi-rekomendasi praktis yang universal, salah satunya API RP 2RD. Setelah itu, untuk menunjang proses instalasi, diperlukan untuk melaksanakan transportasi, dimana tersedia beberapa metode alternatif yang dapat digunakan dalam transportasi rigid riser, yang nantinya dapat diinstal dengan memperhatikan kriteria-kriteria instalasi yang telah ada.

4.1 Deskripsi *Free Standing Hybrid Riser*

Free Standing Hybrid Riser (FSHR) merupakan kombinasi dari susunan baja vertikal yang terhubung dengan fondasi di dasar laut, dengan pipa fleksibel di antara bagian atasnya dengan FPS. Pipa baja vertikal di-*support* oleh suatu kotak terapung di dekat permukaan laut yang dapat memberikan tegangan pada sistem. Komponen utama dari *hybrid riser* ditunjukkan pada **Gambar 4.1** dengan penjelasan sebagai berikut.

a. Member struktural

Tubular baja sebagai tulang punggung struktur untuk pipa baja vertikal dan modul apung, menopang bagian atas riser dan memberikan reaksi ke bagian dasar riser. Member struktural dapat juga memberikan daya apung dan mengandung saluran fluida untuk impor atau ekspor.

b. Modul apung

Busa apung sintetik dibentuk dalam dua segmen atau lebih di sekeliling riser, menjadi pipa penuntun untuk *peripheral lines* dan dipasang ke member struktural dengan cara dililit.

c. *Peripheral lines*

Jalur pipa baja vertikal sepanjang bagian metal riser.

d. *Flexible jumper hoses*

Pipa fleksibel yang dihubungkan dari *goosenecks* pada bagian atas metal riser ke titik perletakkan dari FPS, memberikan kefleksibelan yang diperlukan untuk mengatasi gerakan relatif antara kapal dan bagian atas riser.

e. *Top assembly* atau *Upper Riser Connector Package* (URCP)

Titik perhentian atas untuk *metal peripheral lines* dengan *isolation valves* dan *emergency disconnect package* (EDP). Sebuah tali tambat dapat dipasang dari titik ini ke FPS untuk menjaga kesesuaian dari perpindahan lateral pada

kondisi ekstrim. *Goosenecks* dan struktur pendukungnya diberikan untuk memasang *flexible jumpers*.

f. *Air tanks*

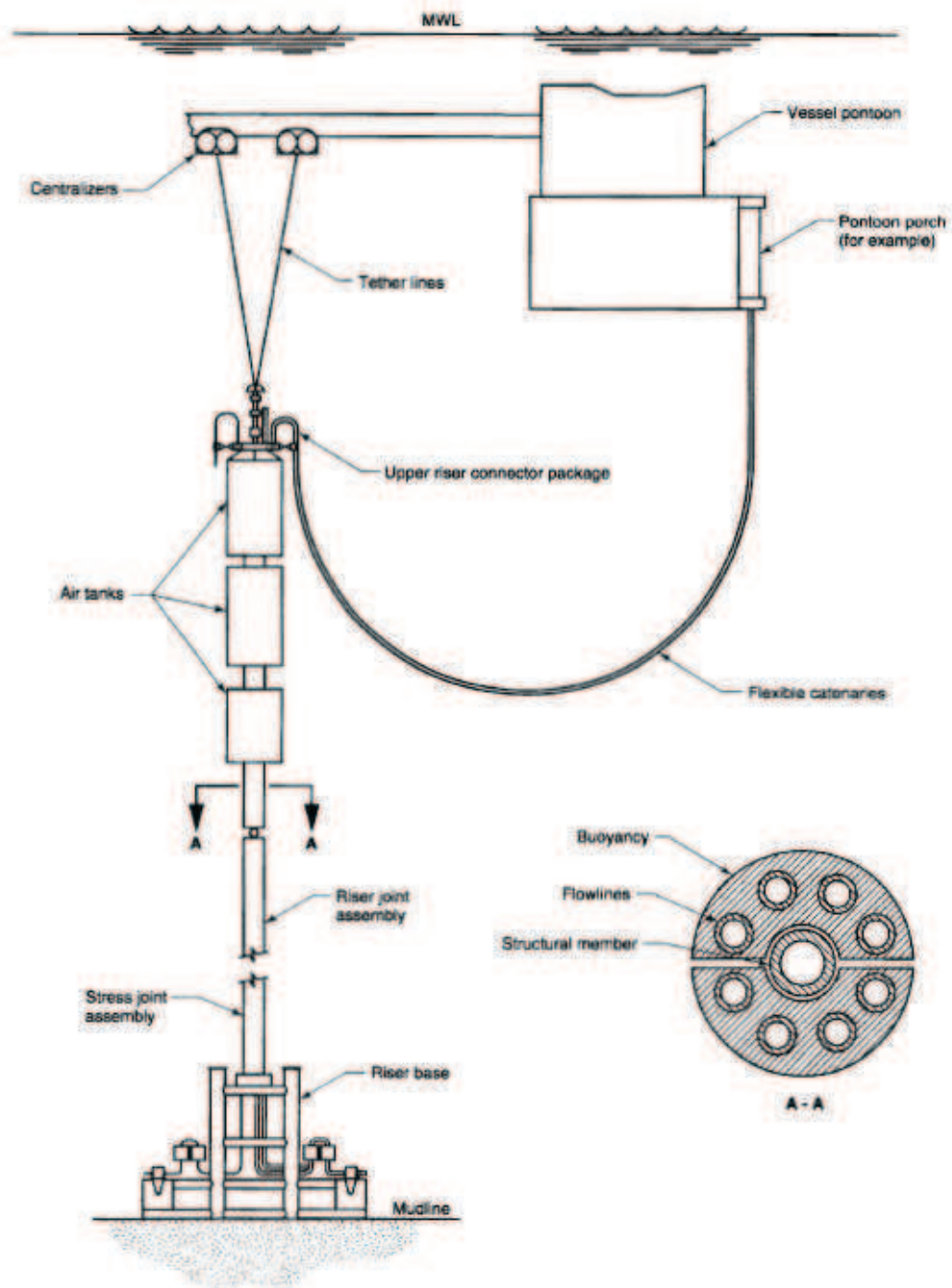
Tank terapung di dekat permukaan air dipasang di bagian atas riser untuk memberikan komponen tetap dan variabel dari tegangan untuk bagian riser metal.

g. *Riser base*

Fondasi dimana riser dipasang dengan suatu titik tegang dan konektor hidrolik. Dasar riser ini memberikan ketahanan terhadap *tensioning forces* pada riser, momen guling, dan beban lateral, dapat juga terdiri dari struktur pancang baja independen. Selain itu, riser dapat disambungkan secara langsung pada sebuah *well template*.

FSHR pada dasarnya didesain sebagai sebuah sistem riser dengan bundel yang menawarkan sejumlah keuntungan utama, yaitu:

- Gerakan tower riser tidak terpengaruh pada gerak struktur terapung, mengurangi tegangan dan masalah *fatigue* pada sistem riser
- Keberlangsungan aliran ditentukan oleh insulasi termal, pengangkutan gas, dan pemanasan aktif.
- Mempunyai jejak yang kecil dan tidak mempunyai masalah interaksi dengan *flowlines* dan *mooring lines*.
- Fleksibilitas jadwal pada saat pra-instalasi *hybrid risers*



Gambar 4.1 Konfigurasi FSHR

Sumber : API RP 2RD

Bundel riser terdiri dari riser, sebuah pipa struktural utama, dan element apung. Konsep bundel mempunyai fitur-fitur sebagai berikut:

- Riser eksternal fix pada bagian atas dan dapat bergerak secara aksial untuk mengakomodir ekspansi termal. Riser untuk produksi dan pengangkutan gas dapat terinsulasi secara termal.
- Pipa bagian tengah adalah element penanggung beban struktur antara tank apung dan fondasi jangkar.
- Element apung dibentuk dari busa sintetik memastikan bahwa bundel riser kurang lebih berbobot sangat kecil di dalam air selama proses tow dan upending.
- *Guide rings* diantara element apung menjaga bagian-bagian bundel tetap bersama dan memperbolehkan pipa riser bergerak secara aksial.

Beberapa sekat sepanjang bundel riser untuk memindahkan gaya-gaya *uplift* dari element apung ke pipa struktur tengah.

Prinsip desain *hybrid riser* serupa dengan sistem riser lainnya, yaitu melewati tahapan-tahapan berikut.

a. Sizing

Sizing bertujuan untuk menentukan ukuran pipa, mengembangkan desain yang dapat menahan beban fungsional seperti beban sendiri dan efek tekanan.

b. Preliminary analysis

Menentukan kondisi minimum untuk tension, *tethering*, dan *VIV suppression*.

c. Analisis beban ekstrim

Melakukan analisis storm, menentukan susunan global optimum, mendefinisikan pembebanan dan menyaring komponen kunci untuk menahan kondisi beban ekstrim.

d. Analisis fatigue dan fracture

Mengubah desain global, mendefinisikan detail desain yang diperlukan untuk memenuhi persyaratan umur layan, mendefinisikan persyaratan inspeksi manufaktur dan memastikan analisis fatigue dengan analisis fracture.

e. Analisis Instalasi

Mendefinisikan persyaratan peralatan instalasi, memastikan desain sesuai dengan kondisi lingkungan, dan mengubah desain sesuai yang dibutuhkan.

4.2 Rekomendasi Praktis Desain FSHR

Dalam mendesain riser termasuk FSHR, ada 2 metode untuk membangun sebuah kriteria yang dapat diterima dalam desain. Salah satu metode yang menjadi referensi adalah *Working Stress Design* (WSD) dimana satu faktor keamanan terpusat digunakan untuk membatasi ketidakpastian dari tahanan dan kapasitas. Dalam merancang sistem riser, WSD disediakan di dalam API RP 2RD. Berikut penjelasan mengenai kriteria desain riser berdasarkan API RP 2RD.

4.2.1 API RP 2RD

Rekomendasi praktis untuk desain riser pada sistem produksi terapung pada API menekankan pada tegangan yang bekerja pada desain atau disebut dengan *Working Stress Design* (WSD). Berikut ini kriteria yang digunakan sebagai syarat minimum dalam mendesain FSHR.

a) Tegangan Izin

Dalam sistem riser, pipa akan mengalami tegangan utama di 3 arah, yakni arah longitudinal, arah melingkar dan radial. Gaya geser melintang dan torsi dapat diabaikan untuk bidang melingkar pipa. Ada 3 tegangan utama dihitung untuk membentuk sebuah kombinasi tegangan yang direpresentasikan sebagai tegangan ekuivalen Von Mises dan didefinisikan melalui persamaan berikut:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4.1)$$

Dimana:

σ_e : Tegangan ekuivalen Von Mises [MPa]

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Tegangan utama [MPa]

Berdasarkan API RP 2 RD, bagian 5.2.3, kriteria desain WSD untuk bidang pipa adalah:

$$(\sigma_p)_e < C_f \sigma_a \quad (4.2)$$

Dimana:

$(\sigma_p)_e$: Tegangan ekuivalen Von Mises [MPa]

σ_a : Kombinasi tegangan yang diizinkan [MPa], $\sigma_a = C_a \cdot \sigma_y$

C_a : Faktor tegangan izin = 2/3

σ_y : Tegangan leleh [MPa]

C_f : Faktor desain (Normal = 1.0, Ekstrim = 1.2, *Survival* = 1.5)

b) *Hydrostatic Collapse*

Tekanan hidrostatik cukup tinggi untuk aplikasi laut dalam. Tekanan eksternal yang berlebihan akan *hydrostatic collapse*. Sehingga, pipa riser harus mempunyai ketahanan *collapse* selama instalasi atau operasi. Berdasarkan API RP 2 RD, 1998, bagian 5.4.1.3, kriteria desain untuk tekanan *collapse* diberikan pada persamaan berikut:

$$P \leq 0.67 \cdot D_f \cdot P_o \quad (4.3)$$

Dimana:

P : Tekanan luar eksternal bersih [MPa], $P = G \cdot h \cdot P_i$

G : Berat jenis air laut [kg/m^3]

h : Kedalaman perairan [m]

P_i : Tekanan internal [MPa], $P_i = 0$ MPa (kondisi kritis dimana pipa dalam keadaan kosong)

D_f : Faktor desain, $D_f = 0.75$ untuk pipa *seamless* atau $D_f = 0.6$ untuk pipa DSAW

P_o : Kapasitas tekanan pipa [MPa], $P_o = P_e P_y (P_e^2 + P_y^2)^{-1/2}$

P_e : Tekanan tekuk elastik [MPa], $P_e = \left[\frac{2E}{(1-\nu^2)} \right] \left(\frac{t}{D} \right)^3$

P_y : Tekanan leleh dengan tegangan bersamaan [MPa], $P_y = \frac{2 \cdot Y_r \cdot t}{D}$

E : Modulus elastisitas [MPa]

ν : Poisson's ratio

t : Tebal pipa tanpa toleransi korosi [mm]

D : Diameter luar nominal pipa [mm]

$$Y_r : \text{Tegangan leleh tereduksi [MPa]}, Y_r = \sigma_y \left[\left\{ 1 - 3 \left(\frac{S_a}{2\sigma_y} \right)^2 \right\}^{1/2} - \left(\frac{S_a}{2\sigma_y} \right) \right]$$

$$\sigma_y : \text{Tegangan leleh [MPa]}$$

$$S_a : \text{Tegangan aksial rata-rata [MPa]}, S_a = \frac{(T_e - PA)}{a - P_i}$$

$$T_e : \text{Tegangan efektif tubular [MPa]}, T_e = 0.6 \cdot \sigma_y \cdot a$$

$$a : \text{Luas penampang dinding pipa [mm}^2\text{]}, a = \frac{\pi}{4} \{ D^2 - (D - 2t)^2 \}$$

$$A : \text{Luas penampang pipa [mm}^2\text{]}, A = \frac{\pi}{4} D^2$$

c) *Buckle Propagation*

Selain akibat tekanan hidrostatik, salah satu penyebab *collapse* pada pipa ada adanya lekuk yang berlebihan. *Collapse* dapat berpropagasi dan menjalar sepanjang pipa dan mengakibatkan tekanan eksternal turun. Untuk mencegah propagasi yang lebih panjang, maka dibutuhkan pipa dengan dinding yang lebih tebal. Dinding pipa yang tebal dapat menyebabkan bertambahnya beban pada struktur terapung dan menambah biaya produksi yang signifikan. Selain dengan menambah ketebalan pipa, metode lain yang dapat digunakan adalah dengan menggunakan sistem *buckle arrestor*, dimana sistem tersebut memiliki dimensi yang lebih tebal daripada diameter pipa, sehingga dapat menghentikan propagasi *collapse*. *Buckle arrestor* dipasang pada bagian pipa yang dianggap kritis dengan interval tertentu khususnya bagian pipa yang berada di dekat dasar laut karena tekanan hidrostatik yang tinggi.

Kriteria desain untuk mencegah propagasi diberikan pada persamaan berikut:

$$P \leq 0.67 \cdot D_p \cdot P_p \quad (4.4)$$

Dimana:

$$P_p : \text{Kapasitas tekanan propagasi pipa [MPa]}, P_p = 24 \cdot \sigma_y \left(\frac{t}{D} \right)^{2.4}$$

$$D_p : \text{Faktor desain, } D_p = 0.72$$

d) Umur *Fatigue*

Kriteria desain untuk *fatigue* diberikan pada persamaan berikut ini:

$$\sum_i SF_i D_i < 1.0 \quad (4.5)$$

Dimana:

$$SF_i : \text{Faktor keamanan}$$

$$D_i : \text{Rasio kerusakan } fatigue \text{ untuk masing-masing pembebanan}$$

4.3 Tantangan Desain FSHR

FSHR merupakan konsep rekayasa yang sedang dikembangkan dan dianggap paling efektif dan efisien untuk kriteria laut dalam. Namun, ada beberapa kompleksitas yang harus diperhatikan sehingga memberikan tantangan dalam melakukan desain FSHR yang diuraikan sebagai berikut.

4.3.1 Kedalaman Perairan

Kedalaman perairan merupakan salah satu parameter utama dalam mendesain FSHR. Perancangan untuk aplikasi laut dalam akan mempunyai solusi yang berbeda dibandingkan dengan aplikasi laut dangkal. Salah satu parameter pengendali adalah kebutuhan tebal dinding pipa. Aplikasi laut dalam membutuhkan dinding yang lebih tebal untuk menahan tekanan hidrostatik

yang tinggi, namun dinding lebih tebal menyebabkan penambahan berat dan meningkatkan biaya pengembangan.

4.3.2 Gerakan Struktur Terapung

Gerakan struktur terapung diakibatkan oleh beban lingkungan seperti angin atau gelombang. Struktur ini akan bergerak ke berbagai arah dengan 6 derajat kebebasan. Perbedaan properti dan geometri antara struktur terapung dan riser menyebabkan perilaku yang berbeda dalam merespon gelombang. Pada saat struktur terapung bergerak, riser harus mampu mengikuti gerakan dari struktur tersebut. Apabila riser memiliki kekakuan yang besar, hal ini dapat menyebabkan terbatasnya defleksi yang terjadi pada riser terutama pada bagian atas riser yang terhubung langsung dengan struktur terapung. Untuk mengantisipasi hal ini, diperlukan sebuah komponen yang disebut *flex joint* yang memberikan fleksibilitas pada riser untuk mengalami defleksi sudut.

4.3.3 Arus

Arus memberikan 2 pertimbangan yang berbeda, yaitu: efek *drag* hidrodinamika dan *Vortex Induced Vibration* (VIV). VIV akan menjadi kritis apabila frekuensi getaran yang dihasilkan akibat arus sama dengan frekuensi natural yang dimiliki oleh riser. Fenomena ini biasa disebut dengan efek resonansi. Akibatnya, riser akan bergerak dimana amplitudo getaran yang dihasilkan semakin membesar sehingga juga dapat menimbulkan kegagalan *fatigue*. Efek VIV dapat direduksi dengan menambah komponen pada riser yang disebut dengan *helical strakes*.

4.3.4 Fatigue

Kerusakan *fatigue* pada FSHR bukan merupakan persoalan yang paling menantang selayaknya dalam mendesain SCR dikarenakan desain FSHR tidak terlalu sensitif terhadap karakteristik gerakan struktur terapung. Namun,

kerusakan *fatigue* yang diakibatkan oleh gelombang secara langsung merupakan salah satu sumber utama, selain akibat VIV.

4.3.5 Tekanan dan Temperatur Tinggi

Tekanan dan temperatur yang tinggi berpengaruh kepada kebutuhan penampang yang lebih tebal, namun penampang yang lebih tebal meningkatkan biaya, dan tegangan pada pipa rigid pada FSHR. Selain itu juga, temperatur yang tinggi dapat mengakibatkan kekuatan material baja turun.

4.3.6 Kualitas Pengelasan

Segmen pipa rigid FSHR disambung dengan teknik pengelasan di darat. Ada kemungkinan hasil pengelasan mengalami cacat akibat kesalahan fabrikasi atau beban dinamik eksternal. Propagasi pada cacat las ini dapat menyebabkan kegagalan pada riser.

4.3.7 Metode Transportasi

Kondisi proyek yang berbeda-beda memberikan tantangan dalam menentukan metode transportasi selain aspek-aspek yang telah disebutkan sebelumnya. Kesalahan dalam pemilihan metode transportasi dapat menyebabkan kegagalan pada riser.

4.4 Metode Transportasi *Rigid Riser*

Metode transportasi yang digunakan untuk *rigid riser* adalah metode *towing*. Pada metode *towing*, pipa difabrikasi di darat dengan masing-masing segmen sekitar 200-300 meter yang kemudian akan diberi akses menuju perairan melalui *launching ramp* atau *roller* yang dibangun sepanjang pantai menuju *surf zone*. Setelah itu, segmen pipa yang telah selesai difabrikasi akan ditarik ke laut dengan menggunakan *tow*

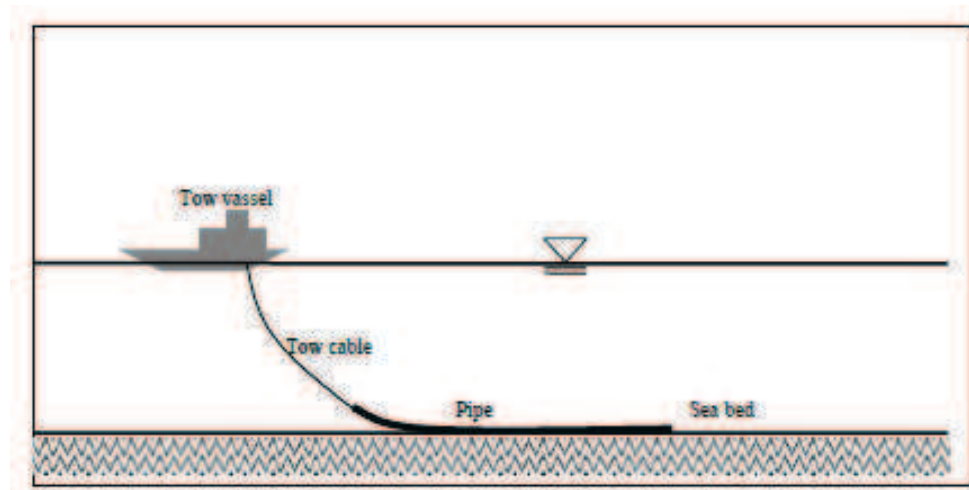
vessel yang berada 1000 meter atau lebih dari pantai. Setelah segmen pipa pertama ditarik, ujung segmen yang berada di darat akan dilas dengan segmen berikutnya, sementara *barge* berpindah maju untuk bersiap menarik kembali. Hal ini akan dilakukan sampai dengan panjang pipa yang direncanakan. Metode *towing* terdiri dari 4 macam metode, yaitu:

4.5.1 Bottom Tow

Pada metode ini, pipa yang telah difabrikasi di darat akan ditarik ke laut sampai ke lokasi yang telah ditentukan tanpa menggunakan pelampung. Panjang pipa pada setiap segmen ditentukan sesuai dengan kapasitas dari *barge* penarik yang digunakan. Kapasitas *barge* penarik harus lebih besar dengan berat pipa di air (W_s) ditambah dengan gesekan yang dialami pipa dengan tanah. Oleh karena itu, besarnya koefisien gesek tanah sepanjang jalur pipa harus diketahui.

Dalam perencanaannya, survey rute penarikan pipa menjadi hal yang sangat mendasar untuk dilakukan. Rute yang ditentukan sangat berpengaruh terhadap desain selimut pipa (*coating*) untuk perhitungan kriteria abrasi, stabilitas selama proses penarikan (*towing*), ukuran kapal penarik dan panjang optimum segmen pipa. Survey rute dan survey tempat instalasi menyangkut detail investigasi terhadap kondisi tanah, arus dasar perairan, kontur dasar perairan, dan identifikasi terhadap halangan sepanjang jalur penarikan.

Untuk pipa yang dibangun di daerah perairan dangkal, maka pembuatan parit (*trench*) perlu dilakukan sesuai dengan peraturan yang berlaku dan untuk kepentingan stabilitas pipa itu sendiri. Ilustrasi dari metode ini dapat dilihat pada **Gambar 4.2**.

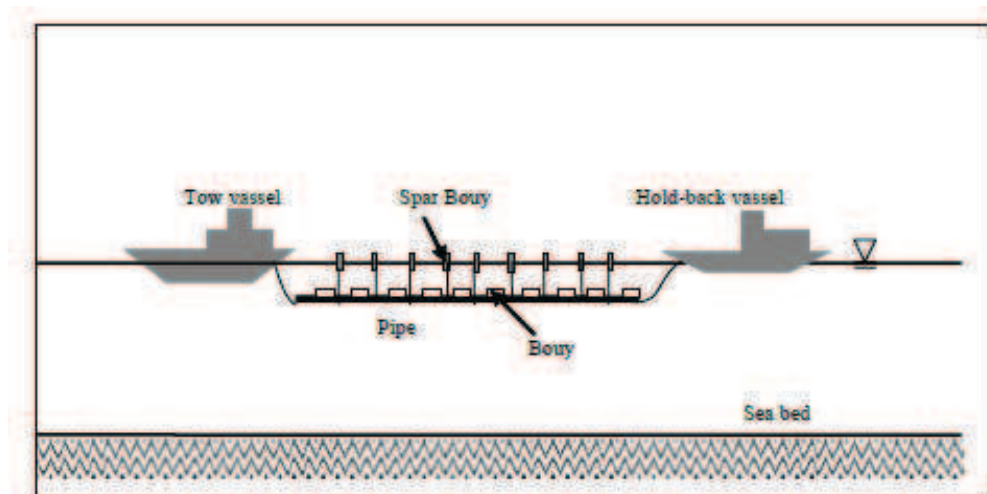


Gambar 4.2 Sketsa *bottom tow*

Sumber: Santika, A.R, 2011

4.5.2 *Mid-Depth Tow*

Mid-depth tow menggunakan peralatan untuk mengapungkan pipa di bawah permukaan air untuk menghindari beban gaya gelombang yang besar selama proses penarikan, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.3**.

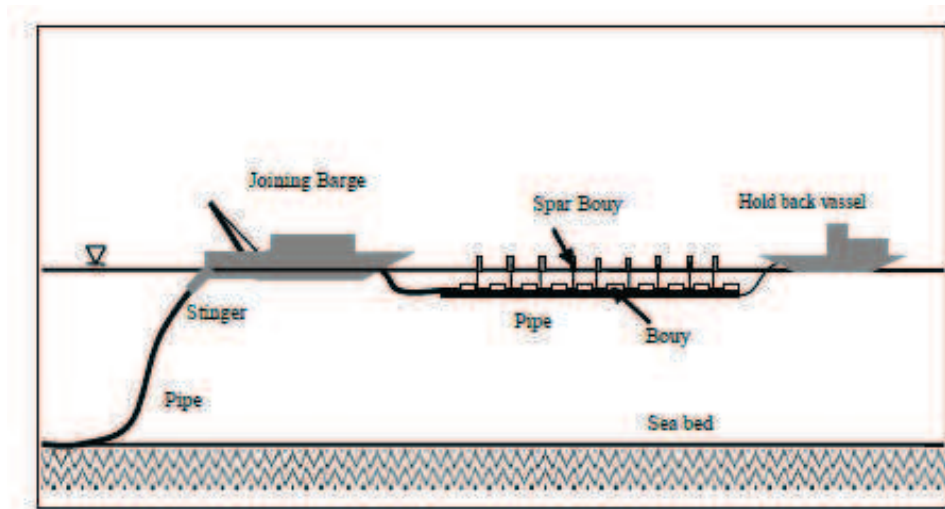


Gambar 4.3 Sketsa *mid-depth tow*

Sumber: Santika, A.R, 2011

Pada pelaksanaan metode ini diperlukan dua buah kapal untuk mengontrol pengapungan rangkaian pipa, dimana dua kapal tersebut terdiri dari kapal penarik (*tow vessel*) dan kapal penahan (*hold-back vessel*).

Pelampung pada rangkaian pipa ini dipasang ketika pipa masih di darat, dan ketika sudah berada pada tempat pipa tersebut digelar menggunakan *lay-barge* yang dilengkapi dengan *stinger* seperti pada **Gambar 4.4**.

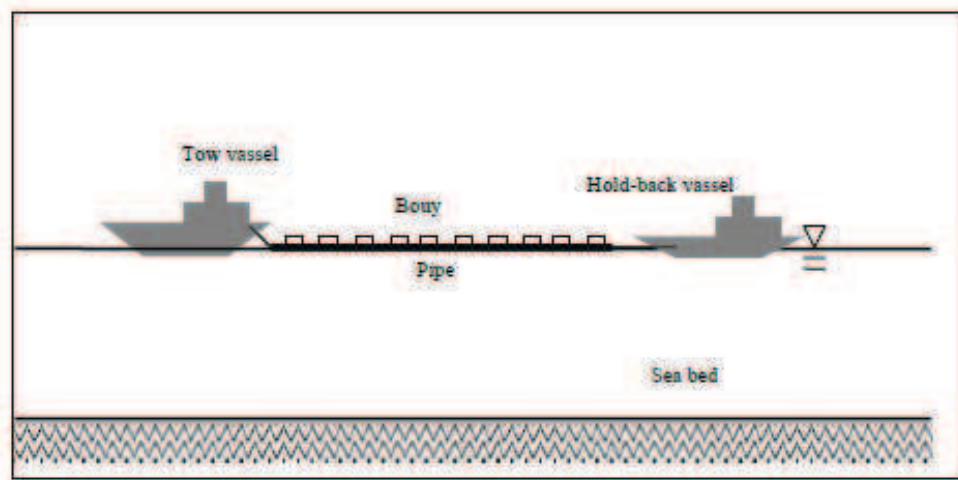


Gambar 4.4 Penggelaran *riser* untuk *mid-depth tow*

Sumber: Santika, A.R, 2011

4.5.3 *Surface Tow*

Surface tow menggunakan ponton untuk menopang pipa agar berada di permukaan atau dekat permukaan air seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.5**.



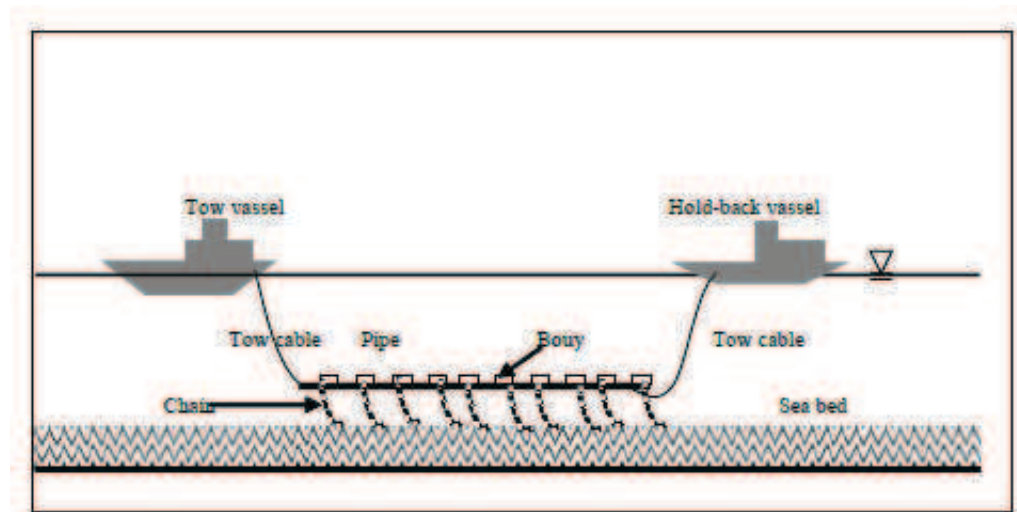
Gambar 4.5 Sketsa *surface tow*

Sumber: Santika, A.R, 2011

Dalam pelaksanaannya, metode ini sama dengan metode *mid-depth tow*.

4.5.4 Off-Bottom Tow

Off-bottom tow merupakan metode instalasi yang diadaptasi dari metode *mid-depth tow*. Dalam pelaksanaannya metode ini juga menggunakan dua buah kapal sama seperti metode *mid-depth tow*, namun yang membedakan adalah penggunaan rantai yang menggantung pada setiap pelampung. Rantai ini berfungsi sebagai penyeimbang agar rangkaian pipa berada pada kedalaman yang telah ditentukan dan dapat menahan pipa tetap stabil ketika ada arus lateral selama proses penarikan. Ilustrasi metode ini dapat dilihat pada **Gambar 4.6**.

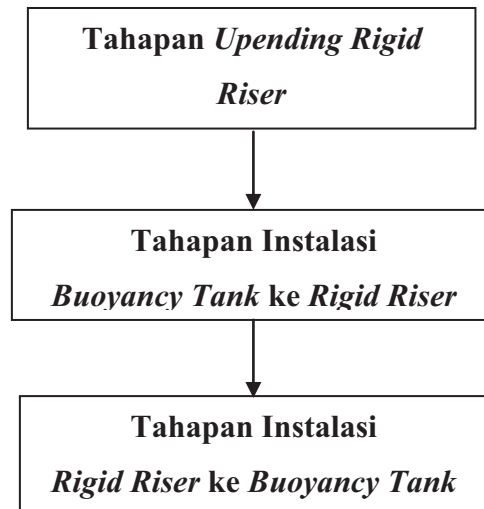


Gambar 4.6 Sketsa *off-bottom tow*

Sumber: Santika, A.R, 2011

4.5 Proses Instalasi *Rigid Riser*

Setelah proses transportasi yang mencakup mobilisasi bagian-bagian *riser* yang telah difabrikasi di darat sampai pada persiapan riser untuk *towing* selesai, *rigid riser* siap untuk menjalani proses instalasi. Proses instalasi *rigid riser* mempunyai tahapan-tahapan khusus yang sedikit berbeda dengan tahapan yang dijalankan untuk instalasi SCR. Tahapan ini mencakup *upending rigid riser*, dimana *riser* diangkat menggunakan kabel kawat sampai tegak, kemudian *buoyancy tank* dipasang ke bagian atas *rigid riser* yang sudah terangkat, setelah itu masuk ke tahap instalasi ke *riser base*. Tahapan terakhir adalah instalasi *flexible riser* yang menghubungkan antara rigid riser dan sistem produksi terapung. **Gambar 4.7** menunjukkan garis besar tahapan-tahapan instalasi FSHR.



Gambar 4.7 Bagan alir garis besar tahapan instalasi *rigid riser*

4.6 Kriteria Instalasi

Kriteria instalasi di bawah ini merupakan syarat minimum yang harus dipenuhi pada saat proses instalasi FSHR.

4.6.1 Kombinasi Tegangan Maksimum izin

Tegangan yang bekerja pada FSHR merupakan kombinasi tegangan yang terdiri dari momen lentur, tegangan tarik, dan tegangan tekan. Menurut API RP 2RD, kombinasi tegangan direpresentasikan dengan tegangan ekuivalen Von Mises. Persamaan untuk mendapatkan tegangan ekuivalen tersebut telah diuraikan pada sub-subbab 4.2.1 bagian a. Untuk kasus instalasi, besarnya tegangan ekuivalen atau sering disebut dengan tegangan von Mises yang diizinkan dihitung dengan menggunakan faktor desain 1.0 sama seperti kondisi normal, dimana kondisi ini memberikan nilai tegangan izin yang paling minimum.

4.6.2 Radius Tekuk Minimum

Pada saat proses instalasi FSHR, khususnya pipa fleksibel akan mengalami kondisi tekuk. Besarnya radius tekuk yang terjadi tidak boleh melebihi kondisi plastis material baja yang digunakan. Untuk mengetahui besarnya radius tekuk minimum, dapat dilakukan perhitungan sederhana dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\frac{r}{R} > \frac{\sigma_y}{\varepsilon} \quad (4.1)$$

Dimana:

r : Radius luar pipa [mm]

R : Radius tekuk minimum [mm]

σ_y : Tegangan leleh [MPa]

ε : Modulus elastisitas young [MPa]

Untuk kasus dimana penggelaran pipa dilakukan menggunakan metode *Reel lay*, pipa akan mengalami deformasi plastis pada saat digulung. Namun, pipa akan kembali seperti semula pada saat penggelaran di lepas pantai. Besar radius tekuk minimum pada saat penggulangan ditentukan dari regangan yang diizinkan. Namun, pada Tugas Akhir ini tidak akan membahas tentang pipa fleksibel.



BAB 5

STUDI KASUS

Analisis Transportasi dan Instalasi Rigid Riser pada Sistem Free Standing Hybrid Riser

Yonathan Mozes Mandagi - 15508008

Program Studi Teknik Kelautan

Analisis instalasi rigid riser yang akan dilakukan dalam Tugas Akhir ini tentunya memerlukan data-data untuk menunjang pengerjaan. Data-data ini didapatkan berdasarkan data suatu proyek oil export yang berlokasi di Laut Utara, Norwegia. Sebelum masuk ke tahap instalasi rigid riser, harus ditentukan terlebih dahulu metode transportasi seperti apa yang akan dilaksanakan untuk rigid riser agar efektif dan efisien dimana akan sangat menentukan kondisi rigid riser agar siap dipasang.

5.1 Gambaran Umum

Oil Platform pada proyek ekspor minyak ini terletak di 140 km sebelah utara Kristiansund atau pada $064^{\circ} 21' 10''$ N, $007^{\circ} 46' 51''$ E seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 5.1** dengan kedalaman 254 meter. Kondisi lingkungan untuk wilayah *oil platform* termasuk kondisi lingkungan yang ekstrim dibandingkan dengan kondisi lingkungan perairan yang ada di Indonesia. Proyek ekspor minyak ini dibuat untuk instalasi sistem *loading* yang baru dan melepaskan sistem yang ada. Fabrikasi bagian-bagian dari FSHR dilakukan di tempat-tempat yang berbeda di sekitar wilayah Norwegia.



Gambar 5.1 Lokasi Platform Minyak

Sumber: Google Earth

5.2 Basis Desain

Berikut ini merupakan data-data yang akan digunakan dalam analisis instalasi *rigid riser* pada sistem FSHR. Data-data yang ditampilkan diperoleh dari suatu perusahaan yang menangani proyek instalasi sistem *loading* baru FSHR ini.

5.2.1 Properti Geometri *Rigid Riser* pada Sistem FSHR

Properti FSHR khususnya *rigid riser* yang digunakan dalam Tugas Akhir ini diberikan pada **Tabel 5.1**.

Tabel 5.1 Properti Rigid Riser

Parameter	Value
Weight in air (ton)	130
ID (inch)	22
Material	API 5L X90
Material yield stress (MPa)	620.5
Nominal wall thickness (mm)	<i>to be determined</i>
Length (m)	152

Untuk properti FSHR yang digunakan dalam pemodelan instalasi *rigid riser* yaitu *buoyancy tank* ditunjukkan oleh **Tabel 5.2**.

Tabel 5.2 Properti *Buoyancy Tank*

Parameter	Value
Weight in air (Te)	104
Weight in water (Te)	-220 / 70 (empty / flooded)
Height (m)	30
OD (m)	5

5.2.2 Data Lingkungan

a) Properti Air Laut

Data properti air laut seperti massa jenis dan viskositas ditunjukkan pada **Tabel 5.3**.

Tabel 5.3 Data Properti Air Laut

Parameter	Value
Density (kg/m ³)	1025.64
Viscosity (m ² /s)	1.188 x 10 ⁻⁶

Sedangkan untuk temperatur, digunakan data dengan periode ulang 100 tahun seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 5.4**.

Tabel 5.4 Data Temperatur dengan Periode Ulang 100 Tahun

Location	Temperature (°C)	
	Minimum	Maximum
Air	-10.9	27.7
Sea Surface	3.7	18.3
Sea Bed	6.0	9.0

b) Gelombang

Pada Tugas Akhir ini, analisis instalasi akan menggunakan properti gelombang dengan periode ulang 1 tahun untuk bulan Mei – Agustus sebagai kondisi desain normal operasional seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 5.5**.

Tabel 5.5 Data Properti Gelombang dengan Periode Ulang 1 Tahun

Properti Gelombang	Nilai
Maximum Wave Height, H_{max} (m)	14
Period Associated with H_{max} , T_{ass} (sec)	9.8
Significant Wave Height, H_s (m)	7.4
Peak Period, T_p (sec)	10.6

Berdasarkan perhitungan dari grafik untuk teori gelombang sesuai dengan API RP 2A-WSD, 2002, yang akan digunakan pada pemodelan adalah Stokes orde 5.

c) Arus

Profil arus yang digunakan seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 5.6** menggunakan profil arus dengan periode ulang 1 tahun untuk bulan Mei – Agustus sebagai kondisi desain normal operasional.

Tabel 5.6 Data Kecepatan Arus dengan Periode Ulang 1 Tahun

Depth Below Surface (m)	Current Speed (m/s)
0	0.73
63.075	0.60
126.15	0.21
176.61	0.21
227.07	0.25
239.685	0.24
251.3	0.24

d) Angin

Data kecepatan angin yang diambil adalah kecepatan angin dengan periode rata-rata 1 jam untuk periode ulang 1 tahun sebagai kondisi desain normal operasional, 10 m di atas permukaan laut, seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 5.7**.

Tabel 5.7 Data Kecepatan Angin Terbesar
Periode Rata-Rata 1 Jam dengan Periode Ulang 1 Tahun

Average Period	Wind Speed (m/s)
1-hr	25.6

5.2.3 Kapal Instalasi

Informasi yang didapatkan untuk data kapal yang digunakan sebagai kapal instalasi ditunjukkan pada **Tabel 5.8**.

Tabel 5.8 Data Kapal Instalasi

General Information	Value
Built	yr-1997
Length	142 m
Width	20 m
Transit speed	12 knots
Accommodation	114 people

5.3 Pemilihan Metode Transportasi *Rigid Riser*

Seperti yang telah dijelaskan di dalam bab sebelumnya tentang alternatif metode transportasi *rigid riser*, untuk menentukan metode transportasi yang paling tepat, pada Tugas Akhir ini dilakukan dengan analisis kondisi lingkungan yang dirangkum

dalam tabulasi dengan membandingkan parameter penentu dan alternatif metode transportasi *rigid riser* yang ada, kemudian diberikan *scoring* atau penilaian dengan skala 1 sampai dengan 5. Dimana skala tersebut menjelaskan kecenderungan suatu metode untuk digunakan. Skala 1 menunjukkan suatu metode mempunyai resiko yang paling besar, sebaliknya, skala 5 menunjukkan suatu metode mempunyai resiko yang paling kecil. Analisis ini dilakukan dengan memperkirakan dampak dari kondisi proyek yang sebenarnya terhadap transportasi *rigid riser*.

Parameter-parameter yang digunakan adalah kedalaman, gelombang, arus, tekanan, temperatur, wetpark, permukaan dasar laut, dan biaya.

5.3.1 Kedalaman

Kedalaman pada lokasi *riser* yang akan dipasang adalah 254 m sesuai data yang diberikan dimana termasuk dalam perairan dalam. Semakin dalam suatu *riser* akan ditow, maka tingkat kesulitan dalam pemasangan dan kontrol akan semakin besar, dan ketebalan pipa yang dibutuhkan akan semakin besar juga. Sehingga, untuk parameter ini, metode *surface tow* dinilai mempunyai resiko yang paling kecil.

5.3.2 Gelombang

Gelombang yang digunakan pada pemodelan diambil dari tinggi gelombang signifikan yang terbesar sebesar 7.4 m, akibat data angin yang ekstrim untuk wilayah Laut Utara. Tinggi gelombang ini termasuk tinggi gelombang yang cukup ekstrim sehingga membawa dampak negatif terhadap *riser* yang ditow semakin dekat dengan permukaan laut.

5.3.3 Arus

Distribusi arus pada umumnya akan berbanding terbalik dengan kedalaman, dimana semakin dalam, nilai arus akan semakin kecil. Sehingga, semakin

dalam suatu *riser* ditow, maka pengaruh pada proses towing akan semakin kecil.

5.3.4 Tekanan

Pengaruh tekanan berdasarkan kedalaman berbanding terbalik dengan distribusi arus, dimana tekanan akan semakin besar seiring dengan bertambahnya kedalaman. Sehingga akan sangat menguntungkan untuk lokasi *rigid riser* yang ditow berada lebih dekat ke permukaan laut.

5.3.5 Temperatur

Data temperatur dan data kedalaman berbanding terbalik, dimana semakin mendekati permukaan laut, temperatur akan semakin tinggi. Hal ini dapat menyebabkan turunnya kekuatan material *riser*, sehingga memerlukan properti *riser* yang lebih tebal. Pemilihan metode *surface tow* tidak disarankan.

5.3.6 Wetpark

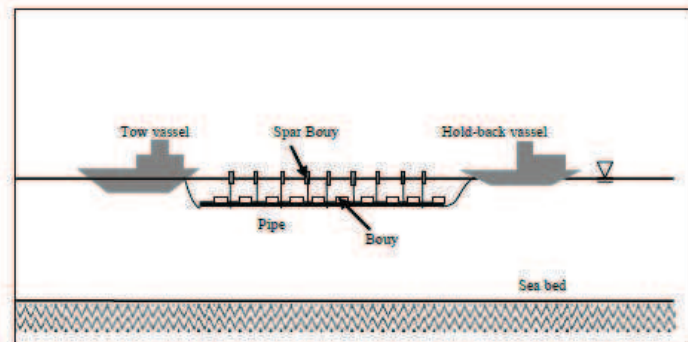
Wetpark merupakan proses penurunan *rigid riser* yang telah sampai pada lokasi pemasangan sampai di dekat dasar permukaan tanah. Semakin dekat dengan permukaan tanah, resiko *rigid riser* untuk terjadi kerusakan dalam tahap *wetpark* akan semakin kecil.

5.3.7 Permukaan Dasar Laut

Kriteria ini paling mempengaruhi metode transportasi *off-bottom tow*, dimana *riser* yang ditow hanya membutuhkan satu buah kapal dengan koneksi ke *rigid riser* yang dibiarkan di atas permukaan tanah dan diseret sampai ke lokasi tujuan. Permukaan dasar laut yang kasar terlalu beresiko untuk melakukan *off-bottom tow*.

5.3.8 Biaya

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, semakin dalam suatu *riser* ditow, maka desain tebal dinding *riser* yang dibutuhkan akan semakin besar. Selain itu pengaruh kondisi lingkungan yang ekstrim juga menuntut desain dinding *riser* yang lebih tebal. Sehingga metode yang paling aman dari segi biaya adalah metode *mid-depth tow* seperti pada **Gambar 5.2**.



Gambar 5.2 *Mid-depth tow* dipilih menjadi metode transportasi yang tepat

Rangkuman dari penjelasan serta penilaian kriteria-kriteria di atas terhadap feasibilitas metode transportasi ditunjukkan pada **Tabel 5.9**.

Tabel 5.9 Tabulasi parameter penentu dan alternatif metode transportasi *rigid riser*

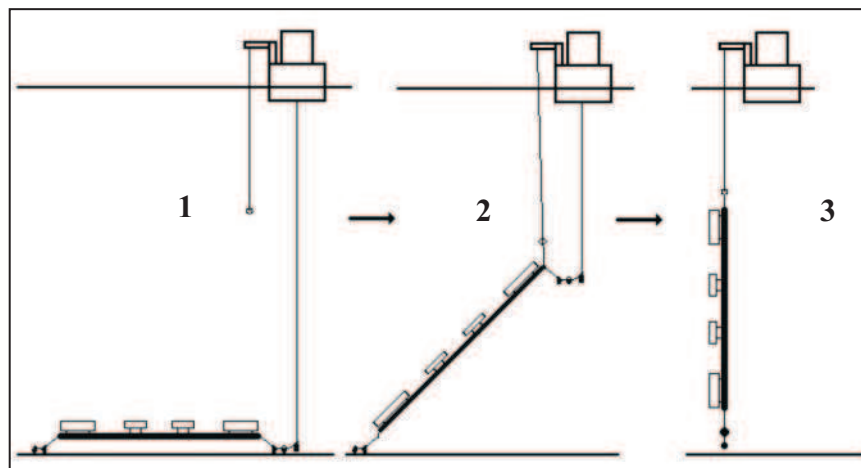
Parameter	Surface Tow	Mid-depth Tow	Bottom Tow	Off-Bottom Tow
Kedalaman	4	3	2	2
Gelombang	2	3	4	4
Arus	2	3	4	4
Tekanan	4	3	2	2
Temperatur	3	3	2	2
Wetpark	2	3	4	4
Permukaan dasar laut	4	4	3	2
Biaya	3	4	2	2
Total	23	25	22	22

Perolehan nilai paling banyak dinilai sebagai metode transportasi yang paling efektif dan efisien untuk diimplementasikan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa metode transportasi *mid-depth tow* merupakan metode transportasi yang dinilai paling efektif dan efisien untuk membawa *rigid riser* dari lokasi fabrikasi sampai ke lokasi pemasangannya.

5.4 Tahapan Instalasi *Rigid Riser* pada Sistem FSHR

Secara umum tahapan instalasi *rigid riser* pada sistem FSHR dibagi dalam 3 tahap yaitu tahap *upending rigid riser*, tahap instalasi *buoyancy tank* ke *rigid riser*, dan tahap instalasi *rigid riser* ke *riser base*. Tahap instalasi *rigid riser* lebih detail diuraikan sebagai berikut.

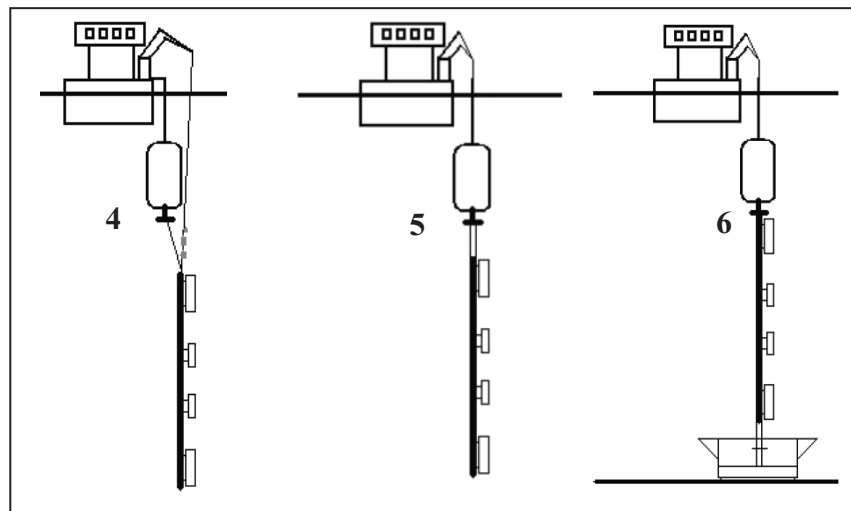
- Persiapan *upending riser*. (**Gambar 5.3 (1)**)
- *Upending rigid riser* dari *wet store* dengan menggunakan A&R winch. (**Gambar 5.3 (2)**)
- *Flooding rigid riser* saat digantung A&R di AHC. (**Gambar 5.3 (3)**)



Gambar 5.3 Riser diupending sampai tergantung vertikal

- Hubungkan *subsea winches* antara *buoyancy tank* dan bagian atas *rigid riser* dan transfer berat riser ke *subsea winches*. (**Gambar 5.4 (4)**)

- Transfer *buoyancy tank* dan *rigid riser* dari balok gantung ke A&R winch.
- Tarik ke atas dan hubungkan *rigid riser* ke *buoyancy tank* dengan menggunakan *subsea winches* sementara A&R di AHC. (Gambar 5.4 (5))
- Hubungkan *subsea winches* antara bagian ujung bawah *riser* dan *riser base*. (Gambar 5.4 (6))



Gambar 5.4 Riser dihubungkan dengan *buoy* hingga dipasang pada *base*

- De-ballast *buoyancy tank* dari 70 Te negatif menjadi 20 Te positif sementara *supporting riser/buoy* pada A&R di AHC.
- Putuskan hubungan A&R *wire* dari *buoyancy tank*.
- Tarik ke bawah dan hubungkan *rigid riser* ke *riser base*.
- De-ballast *buoyancy tank* menjadi 200 Te positif.



BAB 6

Analisis Instalasi Rigid Riser

Analisis Transportasi dan Instalasi Rigid Riser pada Sistem Free Standing Hybrid Riser

Yonathan Mozes Mandagi - 15508008

Program Studi Teknik Kelautan

Tahapan instalasi rigid riser pada Tugas Akhir ini dibagi atas 3 tahap, tahap yang pertama adalah upending rigid riser, kemudian instalasi buoyancy tank ke rigid riser, dan yang terakhir adalah instalasi rigid riser ke riser base. Sebelum masuk ke dalam pemodelan, perlu dilaksanakan penentuan tebal dinding riser optimum yang dilakukan berdasarkan pengecekan hydrostatic collapse dan pengecekan buckle propagation, dimana tebal dinding riser optimum akan digunakan sebagai salah satu input pada tahap pemodelan simulasi dinamik dengan OrcaFlex 8.2a.

6.1 Penentuan Tebal Dinding Riser Optimum

Kebutuhan minimum tebal *rigid riser* dihitung dengan menggunakan rumus dari referensi standard yang diakui yaitu API RP 2RD untuk kriteria *hydrostatic collapse* dan *buckle propagation*. Penentuan tebal dinding *riser* ditentukan dengan cara *trial and error* sampai menemukan nilai yang paling optimum.

6.1.1 Hydrostatic Collapse Check

Tekanan eksternal hidrostatik yang berlebihan akan menyebabkan *hydrostatic collapse* pada *riser*. Hasil desain tebal dinding untuk ketahanan *collapse* selama instalasi *riser* didapat dari persamaan 4.3, yakni sebagai berikut.

$$P \leq 0.67 \cdot D_f \cdot P_o$$

Dimana, dengan memasukkan nilai tebal dinding, **t** sebesar **13.5 mm** dalam komponen P_o sehingga $P_o = 5.296 \text{ MPa}$. Dengan memasukkan data D_f dan P , pengecekan *hydrostatic collapse* menjadi:

$$2.533 \leq 0.67 \cdot 0.75 \cdot 5.296$$

$$2.533 \leq 2.661 \quad \text{OK}$$

Perhitungan kebutuhan tebal *rigid riser* untuk kriteria *hydrostatic collapse* secara detail diberikan pada **Lampiran A**.

6.1.2 Buckle Propagation Check

Lekuk yang berlebihan akan menyebabkan *collapse* pada pipa yang dapat menjalar sepanjang pipa. Hasil desain tebal dinding untuk mencegah propagasi yang lebih panjang didapat dari persamaan 4.4 sebagai berikut.

$$P \leq 0.67 \cdot D_p \cdot P_p$$

Dimana, dengan memasukkan nilai tebal dinding, **t** sebesar **22.5 mm** dalam komponen P_p , sehingga $P_p = 5.547 \text{ MPa}$. Dengan memasukkan data D_p dan P , pengecekan *buckle propagation* menjadi:

$$2.533 \leq 0.67 \cdot 0.72 \cdot 5.547$$

$$2.533 \leq 2.675 \text{ OK}$$

Perhitungan kebutuhan tebal *rigid riser* untuk kriteria *buckle propagation* secara detail diberikan pada **Lampiran A**.

Dari pengecekan dua kriteria di atas, didapatkan hasil t berdasarkan *hydrostatic collapse check* adalah 13.5 mm, dan t berdasarkan *buckle propagation check* adalah 22.5 mm. Sehingga nilai yang paling optimum untuk tebal dinding *riser* yang digunakan adalah **$t = 22.5 \text{ mm}$** .

6.2 Analisis Instalasi *Rigid Riser*

Instalasi *rigid riser* pada sistem FSHR dalam Tugas Akhir ini dibagi dalam 3 tahap. Tahap *upending rigid riser*, tahap instalasi *buoyancy tank* ke *rigid riser*, dan tahap instalasi *rigid riser* ke *riser base*. Analisis ini dilakukan dengan melakukan pemodelan menggunakan *software* simulasi statik dan dinamik yaitu Orcaflex. Pemodelan dilakukan dengan 2 tahap, yaitu yang pertama tahap *upending rigid riser* dan yang kedua adalah tahap instalasi *rigid riser* ke *riser base*. Hasil dari pemodelan ini yang diambil adalah tegangan maksimum von Mises yang terjadi pada komponen-komponen pendukung dalam pemodelan terutama *rigid riser*. Tegangan von Mises yang didapat akan dibandingkan dengan tegangan izin, apakah melewati batas atau tidak.

6.2.1 Perhitungan Tegangan Izin

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada bagian 4.2.1a tentang perhitungan tegangan izin, formula yang digunakan dalam analisis ini ditunjukkan pada persamaan 4.2, dalam analisis ini ada 2 komponen yang akan dilihat hasil tegangannya yaitu *rigid riser* dan *chain*.

a) *Rigid Riser*

Untuk *rigid riser* material grade API 5L X90 dengan perhitungan sebagai berikut.

$$\sigma_y = 90 \text{ksi} = 620.5 \text{MPa}$$

$$C_a = \frac{2}{3}$$

$$\sigma_a = \frac{2}{3} \cdot 620.5 = 413.67 \text{MPa}$$

Dengan mengambil faktor desain normal, $C_f = 1.0$, maka:

$$(\sigma_p)_e < C_f \cdot \sigma_a$$

$$(\sigma_p)_e < 413.67 \text{MPa}$$

Dari perhitungan tersebut disimpulkan bahwa nilai tegangan von Mises yang terjadi pada *rigid riser* harus kurang dari **413.67 MPa**.

b) *Chain*

Pada pemodelan kali ini menggunakan *chain grade* R4, dengan perhitungan sebagai berikut.

$$\sigma_y = 580 \text{MPa}$$

$$C_a = \frac{2}{3}$$

$$\sigma_a = \frac{2}{3} \cdot 580 = 386.67 \text{MPa}$$

Dengan mengambil faktor desain normal, $C_f = 1.0$, maka:

$$(\sigma_p)_e < C_f \cdot \sigma_a$$

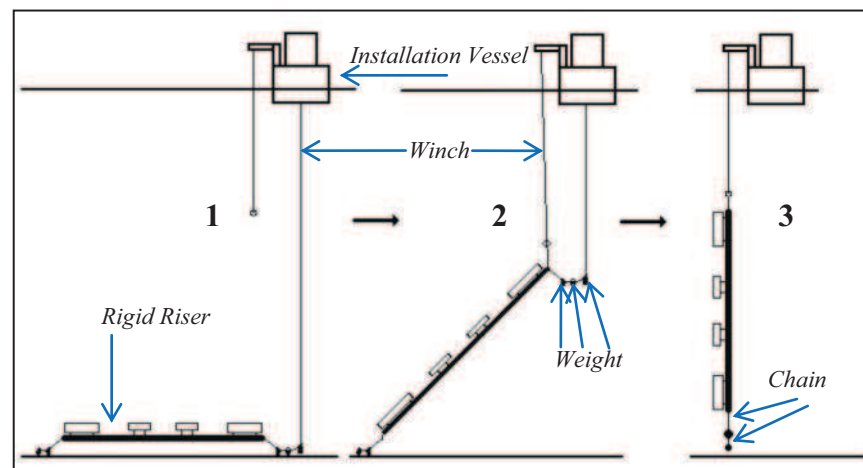
$$(\sigma_p)_e < 386.67 \text{MPa}$$

nilai tegangan von Mises yang terjadi pada *rigid riser* harus kurang dari **386.67 MPa**.

6.2.2 Pemodelan dan Analisis Tahap *Upending Rigid Riser*

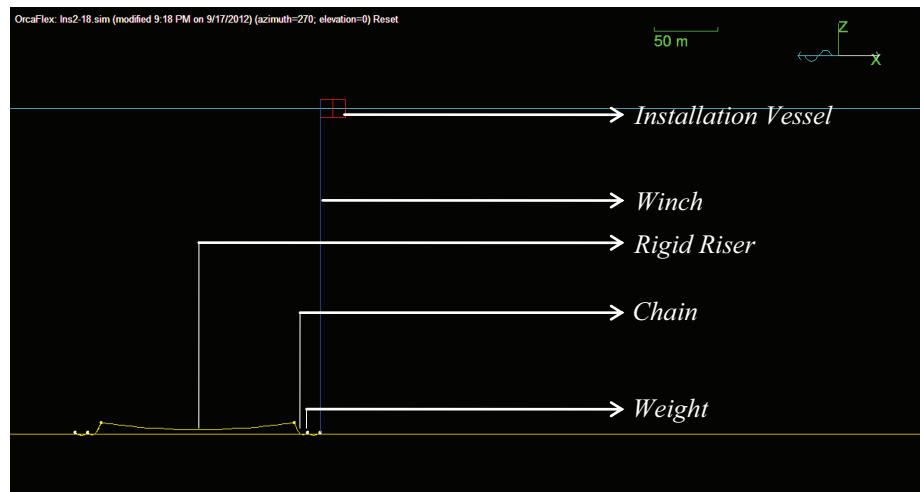
Setelah ditow sampai ke lokasi pemasangan, *rigid riser* diwetpark. *Wetpark* adalah kondisi dimana *rigid riser* diletakkan dekat dengan dasar laut setelah melewati tahap *towing* ke lokasi instalasi seperti pada **Gambar 6.1**. Pemberat yang berada di bagian paling ujung kanan dihubungkan ke kapal instalasi dengan menggunakan *winch*.

Seperti yang telah dijelaskan pada bagian 5.4, tahapan yang menunjukkan proses *upending* adalah pada *sequence* nomor 1, 2, dan 3, dimana *riser* diangkat sampai pada posisi tegak (**Gambar 6.1**). Kondisi awal tahap *upending rigid riser* oleh Orcaflex ditunjukkan pada (**Gambar 6.2**).



Gambar 6.1 Komponen-komponen dalam tahap *upending rigid riser*

Untuk pemodelan menggunakan OrcaFlex 8.2a, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 6.2**, komponen-komponen yang dipakai dalam pemodelan adalah *installation vessel*, *winch*, *rigid riser*, *chain*, dan *weight*.



Gambar 6.2 *Rigid riser* dalam keadaan *wetpark* sebelum *upending* pada pemodelan *OrcaFlex*

a) Installation Vessel

Input parameter *installation vessel* dengan panjang 142 m adalah sebagai berikut.

Tabel 6.1 Posisi *vessel* dalam sumbu global dan orientasinya

Position (m)			Orientation (deg)		
X	Y	Z	Heel	Trim	Heading
120	0	0	0	0	90

Untuk data RAO menggunakan *default* dari OrcaFlex yang ditunjukkan pada **Lampiran B**. Data RAO kapal pada OrcaFlex akan berubah secara otomatis sesuai dengan data input geometri kapal yang diberikan.

b) Winch

Winch merupakan sebuah kabel atau tali kawat yang berfungsi untuk menarik atau menurunkan objek bawah laut yang terhubung dengan salah satu ujungnya, atau dengan kata lain sebagai pengatur tegangan kepada objek yang secara langsung terhubung dengan *winch*. Dalam pemodelan, *winch*

dinamakan *Abandon & Removal (A&R) Winch* yang terhubung dengan *installation vessel* di ujung A, dan *weight4* di ujung B. **Tabel 6.1** menunjukkan posisi *winch* untuk koordinat sumbu global dimana kemudian dihubungkan dengan *installation vessel* dan *weight4* dengan sumbu lokalnya seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 6.3**.

Tabel 6.2 Posisi *winch* untuk koordinat sumbu global

End A			End B		
x	y	z	x	y	z
110	612.3E-18	7	110	0	-253

Edit Winch Data: A&R Winch

Name: **A&R Winch** Type: **Simple** [Ok] [Cancel]

Connections: **2**

Connect to Object	x	y	z
1 Installation Vessel	0.000	10.000	7.000
2 Weight4	0.000	0.000	0.000

Winch Wire: Stiffness (kN): **10.00E3** Damping (s): **0.010**

Release: Release at Start of Stage [~]

Pen: Width: **1** Style: [~] Colour: [~]

Control

Stage	Duration (s)	Mode	Value
Statics		Specified Length	100.000
0	2.000	Specified Payout	0.000
1	30.000	Specified Payout	-50.000
2	10.000	Specified Payout	0.000

Note: Tensions are specified in kN; lengths and payouts are specified in m.

Gambar 6.3 Input data A&R Winch di Orcaflex

Pada **Gambar 6.3** ditunjukkan bahwa mode *winch* yang digunakan adalah *specified payout* dengan nilai -50, dengan nilai negatif berarti *winch* ditarik sampai dengan 50 m, sebaliknya nilai positif berarti *winch* akan diturunkan.

c) *Rigid Riser*

Dalam pemodelan dengan Orcaflex, *rigid riser* dihubungkan ke *connector1* di ujung A dan *connector2* di ujung B. *Connector* dimodelkan dengan 3D *buoy*

namun perhitungan statisnya diabaikan karena hanya berfungsi untuk menghubungkan satu komponen dengan komponen lainnya.

Tabel 6.3 Posisi *Rigid Riser* untuk koordinat sumbu global

End A (<i>connector1</i>)			End B (<i>connector2</i>)		
x	y	z	x	y	z
90	0	-245	-62	0	-245

Pemodelan *rigid riser* pada Orcaflex menggunakan perintah *line*. Tipe *line* yang digunakan untuk *rigid riser* adalah *homogenous pipe* dengan panjang 152 m dengan jumlah segmen sebanyak 20 segmen. Ilustrasi input parameter untuk *rigid riser* ditunjukkan pada **Gambar 6.4**.

Gambar 6.4 Input parameter untuk *rigid riser* pada Orcaflex

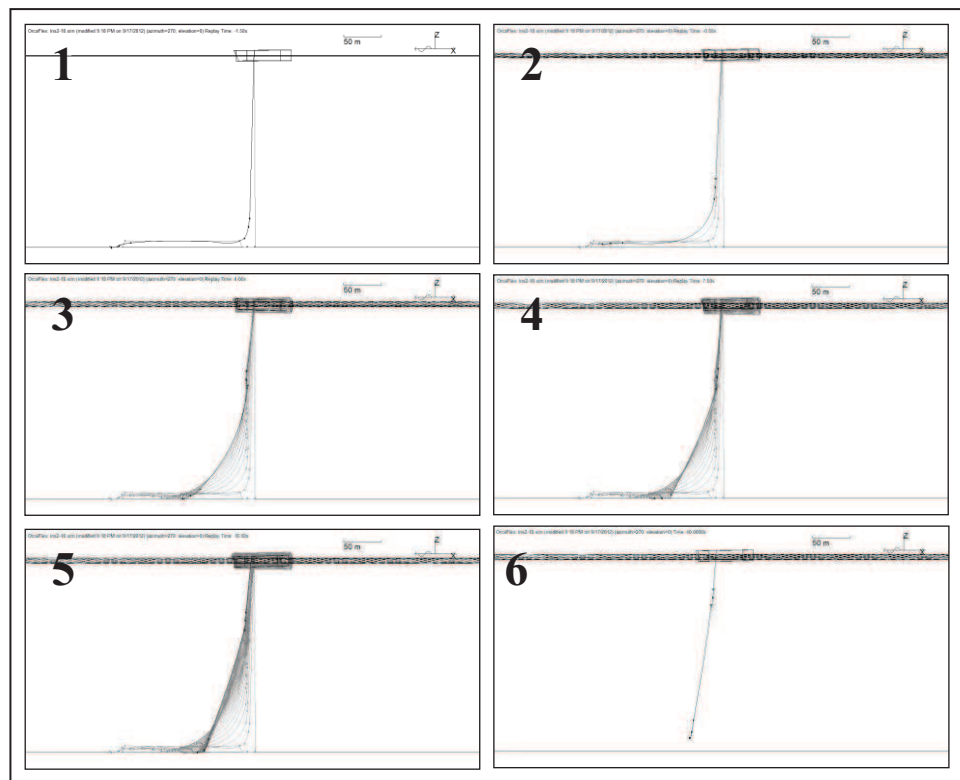
d) Chain

Chain adalah rantai baja yang berfungsi untuk menghubungkan antara *rigid riser* dengan *weight*, serta *weight* dengan *weight*. Dalam pemodelan ini, digunakan 4 buah *chain* untuk masing-masing koneksi untuk mengurangi tegangan yang terjadi pada saat *upending*. Detail tentang *chain* dapat dilihat di **Lampiran B**.

e) *Weight*

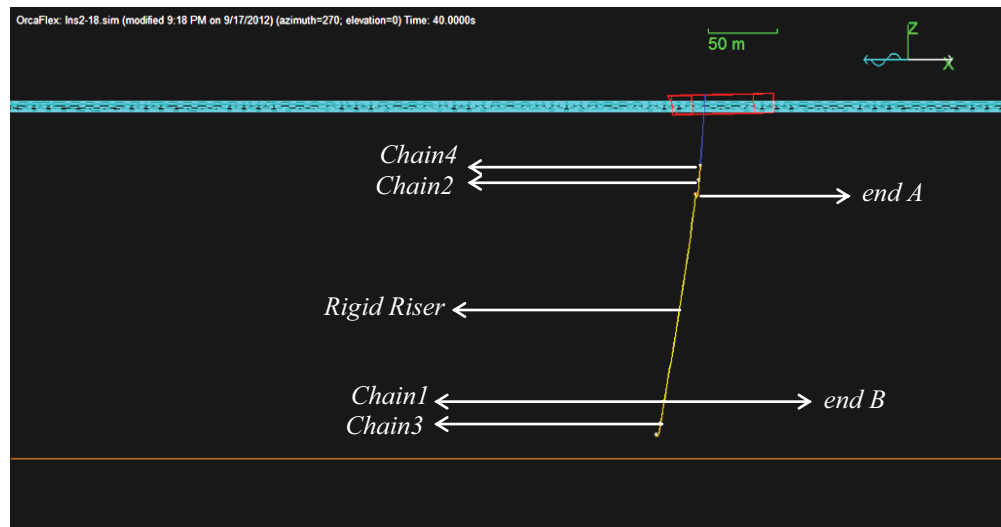
Weight adalah pemberat yang berfungsi untuk menahan gaya apung yang dihasilkan oleh *rigid riser* selama *wetpark* dan *upending*. Detail tentang *weight* dapat dilihat di **Lampiran B**.

Simulasi dinamik *upending rigid riser* oleh OrcaFlex 8.2a ditunjukkan pada **Gambar 6.5**.

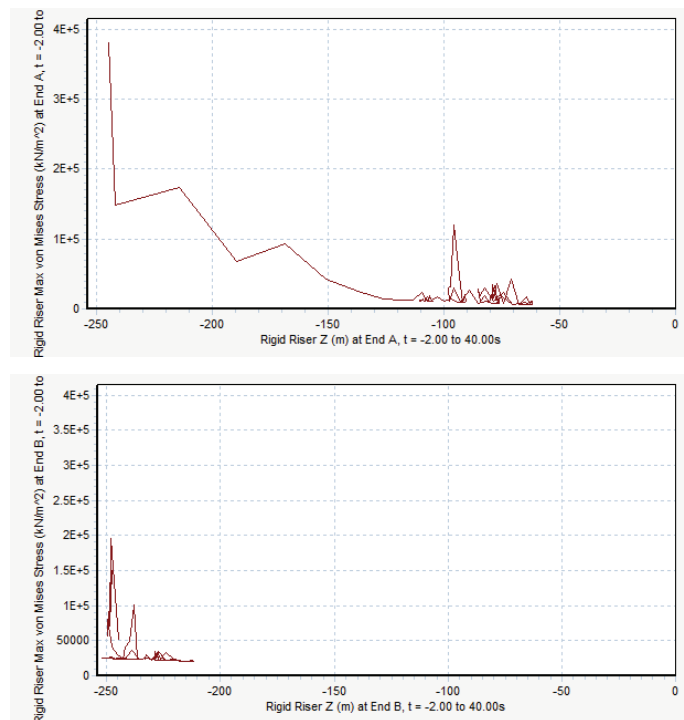


Gambar 6.5 *Rigid riser upending*

Tahap terakhir pada simulasi dinamik yang menunjukkan *rigid riser* telah di-*upend* lebih jelas lagi ditunjukkan pada **Gambar 6.6** dengan titik tegangan von Mises yang akan dianalisis berada pada ujung A dan ujung B. Grafik tegangan von Mises untuk di kedua ujung, yaitu ujung A dan ujung B *rigid riser* ditunjukkan pada **Gambar 6.7**.



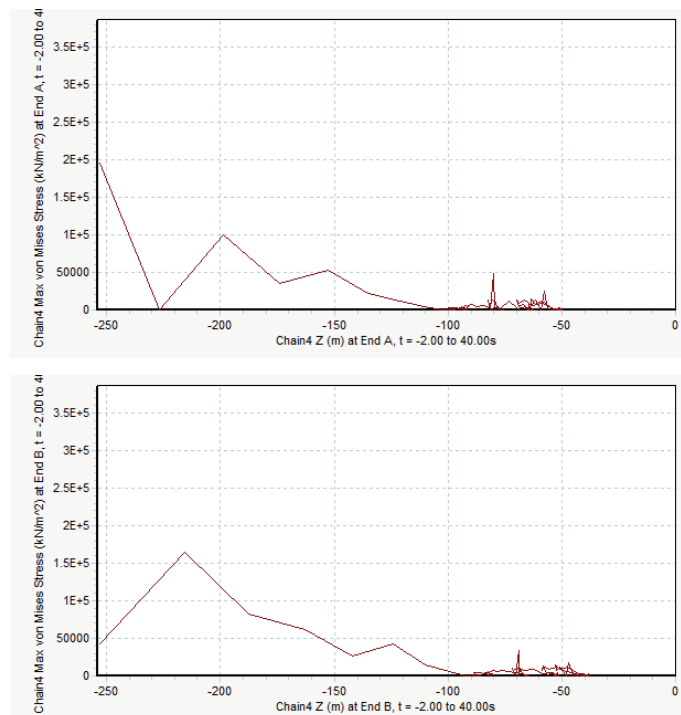
Gambar 6.6 Posisi *rigid riser* dan *chain* setelah *upending riser* di OrcaFlex



Gambar 6.7 Grafik tegangan maksimum von Mises pada ujung A dan B *rigid riser* terhadap kedalaman selama tahap *upending riser*

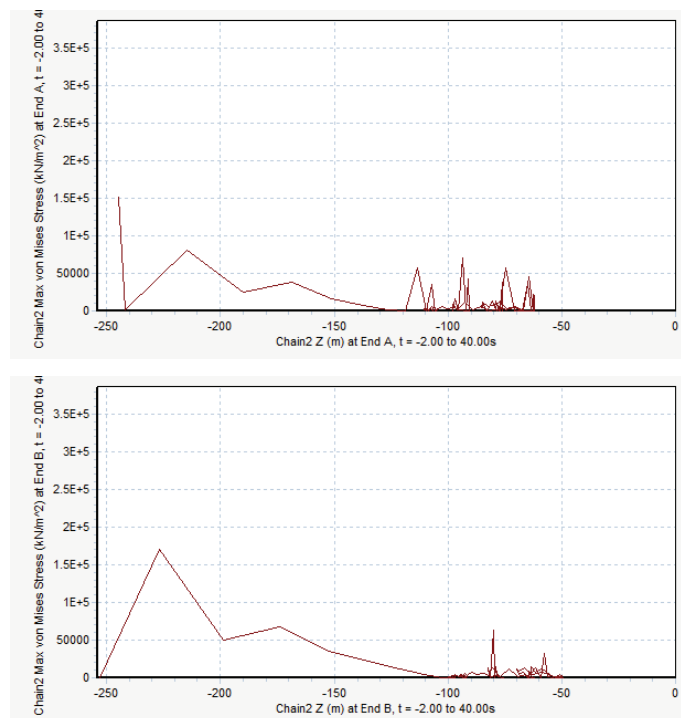
Grafik yang ditampilkan adalah grafik tegangan maksimum von Mises yang terjadi di titik A dan B sepanjang proses *upending riser* yang berubah terhadap kedalaman. Tegangan von Mises paling tinggi dari hasil simulasi dinamik untuk *rigid riser* pada tahapan ini adalah **380.957,0306 kN/m²** pada ujung A *riser*. Hasil lebih lengkap dari tegangan von Mises di *rigid riser* untuk tahapan ini ditunjukkan pada **Lampiran B**.

Setiap bagian yang memiliki *chain* sebetulnya terdiri dari 4 buah *chain* yang dimodelkan, sehingga total ada 16 *chain* yang dimodelkan pada tahapan ini. Tegangan von Mises yang terjadi disebar merata di setiap *chain*, namun yang akan ditampilkan pada laporan ini hanya masing-masing 1 *chain* untuk setiap bagian, karena memiliki nilai tegangan yang sama.



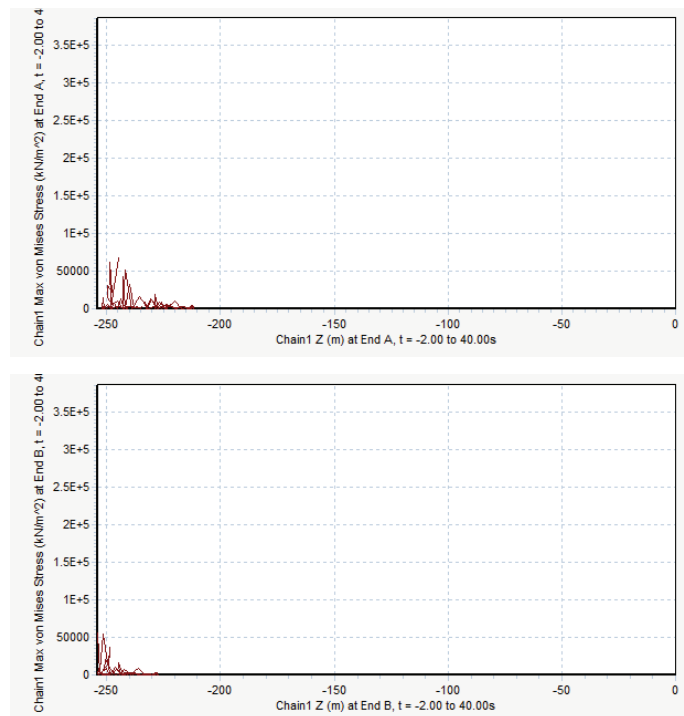
Gambar 6.8 Grafik tegangan maksimum von Mises pada ujung A dan B *chain4* terhadap kedalaman selama tahap *upending riser*

Dalam pemodelan tahap ini, *chain* merupakan komponen yang perlu untuk dicek apakah mengalami kegagalan saat *upending* atau tidak. Grafik yang ditampilkan merupakan perbandingan antara tegangan maksimum von Mises yang dihasilkan *chain* di kedua ujung A dan B yang berubah terhadap kedalaman selama proses *upending* riser berlangsung. *Chain* yang digunakan adalah *chain* dengan grade R4 yang memiliki *minimum breaking load* (MBL) sebesar 9864 kN dengan nilai SMYS sebesar 580 MPa setara dengan 580.000 kN/m². Pada **Gambar 6.8** dapat dilihat bahwa maksimum tegangan von Mises yang terjadi pada *chain4* di ujung A tidak melebihi 200.000 kN/m², yaitu **195.109,836 kN/m²**, sehingga *chain4* dinyatakan aman, sedangkan nilai tegangan von Mises maksimum yang terjadi di *chain2* di ujung B sebesar **170.308,0952 kN/m²** lebih kecil dibanding *chain4*. Grafik tegangan von Mises terhadap *chain2* ditunjukkan pada **Gambar 6.9**.



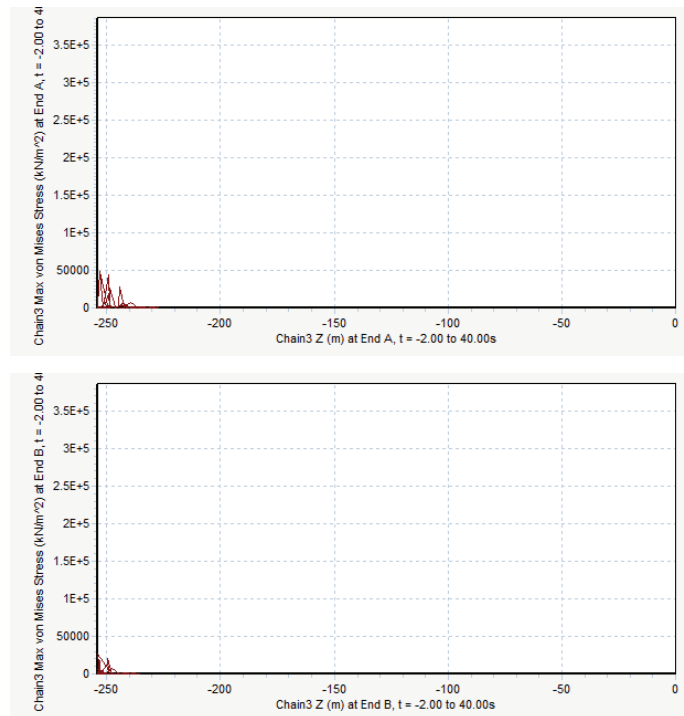
Gambar 6.9 Grafik tegangan maksimum von Mises pada ujung A dan B *chain2* terhadap kedalaman selama tahap *upending riser*

Chain yang berada di bagian bawah, yaitu *chain1* dan *chain3* memiliki nilai tegangan yang lebih kecil dibanding dua *chain* sebelumnya. Hal ini disebabkan karena *chain* tersebut tidak mengalami kontak langsung dengan *winch* yang memberikan tegangan saat *upending riser*. Grafik tegangan von Mises terhadap *chain1* dan *chain3* masing-masing ditunjukkan oleh **Gambar 6.10** dan **Gambar 6.11**.



Gambar 6.10 Grafik tegangan maksimum von Mises pada ujung A dan B *chain1* terhadap kedalaman selama tahap *upending riser*

Nilai tegangan von Mises maksimum yang terjadi pada *chain1* seperti yang ditunjukkan grafik, yaitu tidak melebihi 70.000 kN/m^2 , yaitu **$67.697,8 \text{ kN/m}^2$** , sehingga *chain1* dinyatakan aman, begitu juga dengan *chain3* yang memiliki tegangan von Mises yang paling kecil dari keseluruhan *chain*. Tegangan von Mises maksimum pada *chain3* seperti yang ditunjukkan pada grafik di **Gambar 6.11**, tidak melebihi 50.000 kN/m^2 , yaitu **$47.537,144 \text{ kN/m}^2$** .



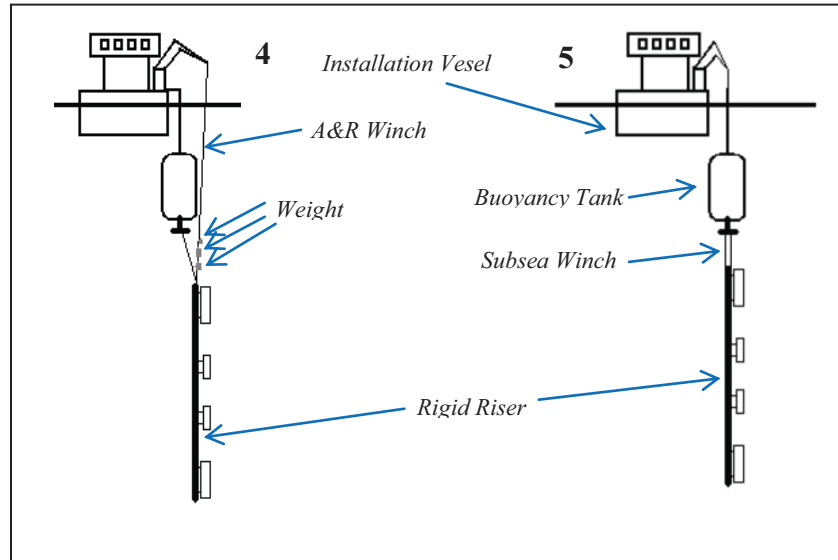
Gambar 6.11 Grafik tegangan maksimum von Mises pada ujung A dan B *chain3* terhadap kedalaman selama tahap *upending riser*

Hasil lebih lengkap mengenai tegangan von Mises yang terjadi pada seluruh *chain* ditunjukkan di **Lampiran B**.

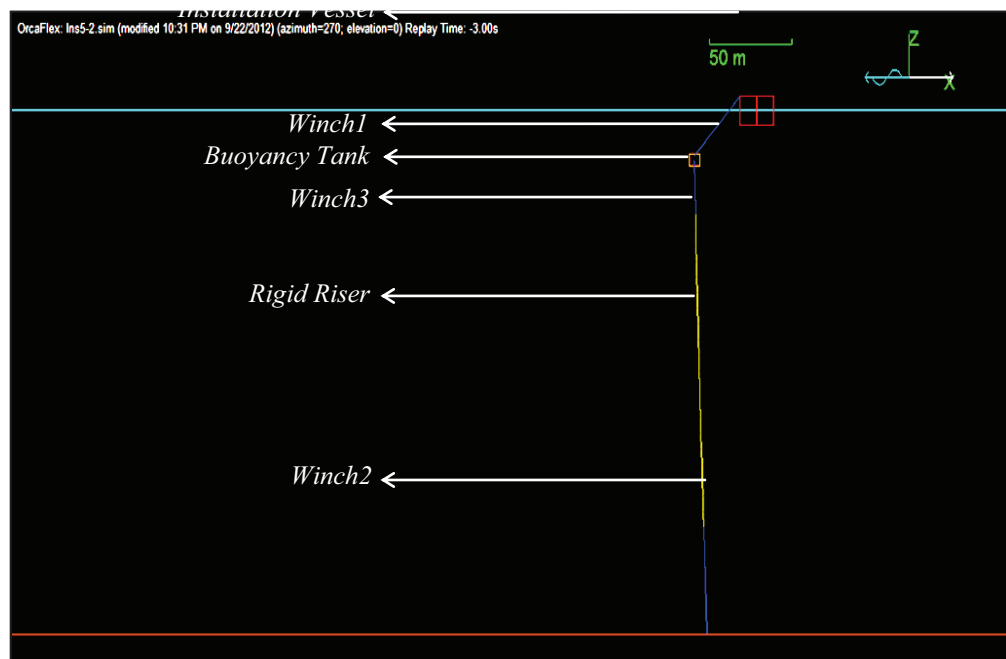
6.2.2 Pemodelan dan Analisis Tahap Instalasi *Buoyancy Tank* ke *Rigid Riser*

Setelah *rigid riser* melewati proses *upending*, tahap selanjutnya adalah tahap instalasi *buoyancy tank* yang sudah ditenggelamkan sejak awal ke bagian atas *rigid riser*. Pada kondisi ini, pemodelan dilakukan dengan membuang *chain* dan *weight* yang terhubung pada *rigid riser* sebelumnya kemudian diganti dengan *subsea winch* yang menghubungkan antara bagian atas *rigid riser* dan *buoyancy tank*, serta bagian bawah *rigid riser* dengan dasar laut. *Winch* yang semula dihubungkan pada *weight4* pada **Gambar 6.2**, dipindahkan ke

buoyancy tank. Kondisi awal tahap instalasi *buoyancy tank* ke *rigid riser* ini ditunjukkan pada **Gambar 6.12** dengan model OrcaFlex pada **Gambar 6.13**.



Gambar 6.12 Komponen-komponen dalam tahap instalasi *buoyancy tank* ke *rigid riser*



Gambar 6.13 Kondisi awal instalasi *buoyancy tank* ke *rigid riser*

Dalam tahapan ini tegangan von Mises yang diambil dan dilakukan analisis adalah hanya untuk *rigid riser* saja.

a.) *Rigid Riser*

Setelah *chain* dan *weight* yang semula terhubung dengan *rigid riser* dihilangkan, *connector* di kedua ujung *riser* juga dihilangkan, kemudian dipasang subsea winch yang menghubungkan ujung A *rigid riser* dengan dasar laut yang dinamakan '*winch2*' dan subsea winch yang menghubungkan ujung B *rigid riser* dengan *buoyancy tank* yang dinamakan '*winch3*'. Posisi *rigid riser* pada kondisi awal tahap ini ditunjukkan pada **Gambar 6.14**.

Edit Line Data: Rigid Riser

Name: **Rigid Riser** Include Torsion: **No** [Ok]

Connection:

End	Connect to Object	Object Relative Position (m)			End Orientation (deg)			Release at
		x	y	z	Azimuth	Declination	Gamma	
A	Free	77.331	-11.957	-35.001	0.00	0.00	0.00	
B	Free	82.178	-11.312	-186.93	0.00	0.00	0.00	

Connection Stiffness:

End	x bending	y bending	Twisting
A	0.00	~	~
B	0.00	~	~

Statics:

Statics Method	Full Statics	Include Friction	Lay Azimuth (deg)	Pre-Tension (kN)
Catenary	Yes	Yes	180.00 set	0.000

Structure | Attachments | Catenary Convergence | Full Statics Convergence | Hydrodynamics | VIV | Drawing

Sections: **1** Line Length = 152.00 m

No.	Line Type	Section Length (m)	No. of Segments	Clash Check
1	Homogenous Pipe	152.000	20	No

Gambar 6.14 Kondisi awal *riser* tahap instalasi *buoyancy tank* ke *rigid riser*

b.) *Winch*

Ada 3 *winch* yang digunakan dalam pemodelan tahap ini. *Winch1* atau *A&R Winch* adalah *winch* yang menghubungkan kapal instalasi dengan *buoyancy tank* dengan kondisi awal seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 6.15**. *Winch2* digunakan untuk menghubungkan bagian ujung A *riser* ke dasar laut

dengan kondisi *anchored* atau jepit. Kondisi awal dari *winch2* diberikan pada **Gambar 6.16**. *Winch3* menghubungkan bagian ujung B *riser* dengan *buoyancy tank* dengan kondisi awal yang ditunjukkan pada **Gambar 6.17**.

Edit Winch Data: Winch1

Name: Winch1 Type: Simple

Connections: 2

	Connect to Object	Object Relative Position (m)		
		x	y	z
1	Installation Vessel	0.000	10.000	7.000
2	6D Buoy1	0.000	0.000	2.000

Winch Wire: Stiffness (kN): 10.00E3 Damping (s): 0.010

Release: Release at Start of Stage

Pen: Width: 1 Style: Colour: [Blue]

Stage	Duration (s)	Mode	Value
Statics		Specified Length	180.000
0	3.000	Specified Payout	0.000
1	10.000	Specified Payout	0.000
2	20.000	Specified Payout	0.000
3	6.000	Specified Payout	15.000
4	3.000	Specified Payout	5.000

Note: Tensions are specified in kN; lengths and payouts are specified in m.

Gambar 6.15 Kondisi *winch1* tahap instalasi *buoyancy tank* ke *rigid riser*

Edit Winch Data: Winch2

Name: Winch2 Type: Simple

Connections: 2

	Connect to Object	Object Relative Position (m)		
		x	y	z
1	Rigid Riser	0.000	0.000	152.000
2	Anchored	85.000	0.000	0.000

Winch Wire: Stiffness (kN): 10.00E3 Damping (s): 0.010

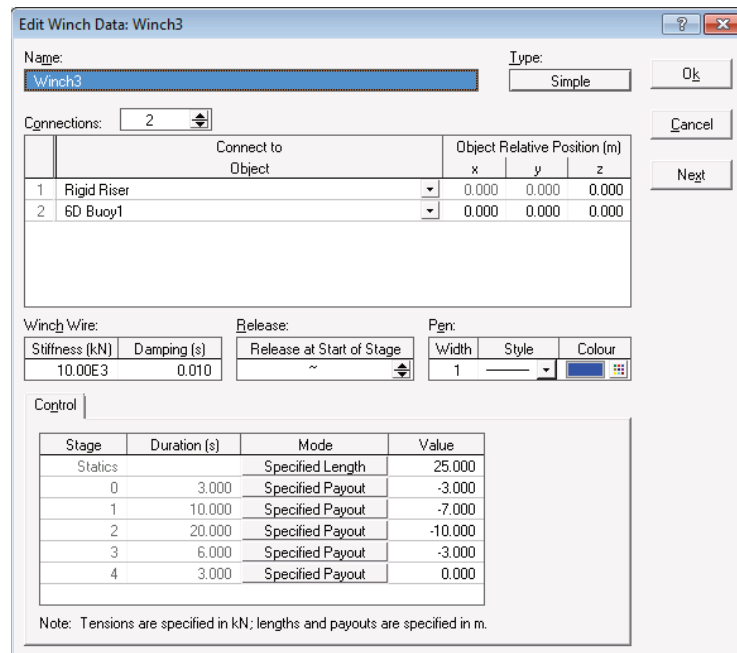
Release: Release at Start of Stage

Pen: Width: 1 Style: Colour: [Blue]

Stage	Duration (s)	Mode	Value
Statics		Specified Length	50.000
0	3.000	Specified Payout	0.000
1	10.000	Specified Payout	0.000
2	20.000	Specified Payout	0.000
3	6.000	Specified Payout	-10.000
4	3.000	Specified Payout	-5.000

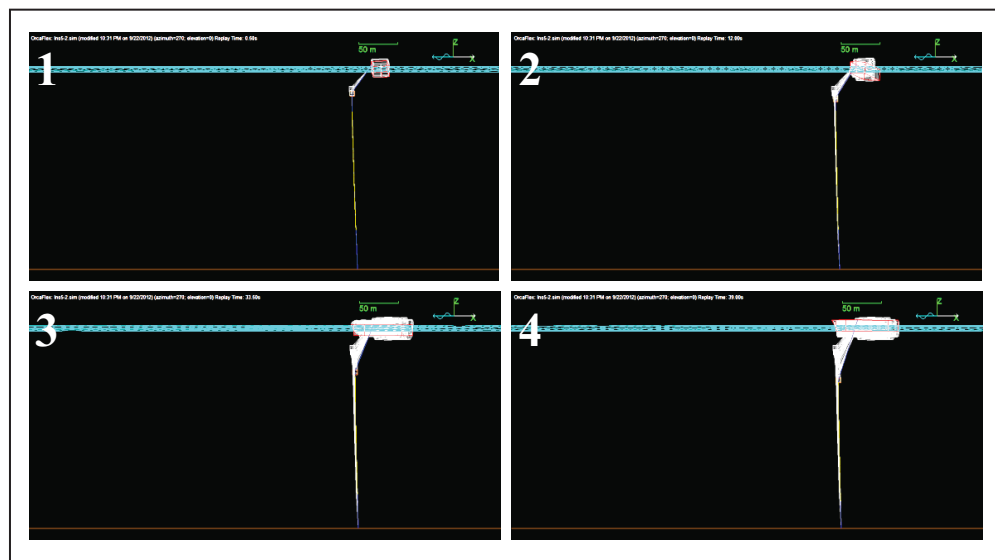
Note: Tensions are specified in kN; lengths and payouts are specified in m.

Gambar 6.16 Kondisi *winch2* tahap instalasi *buoyancy tank* ke *rigid riser*



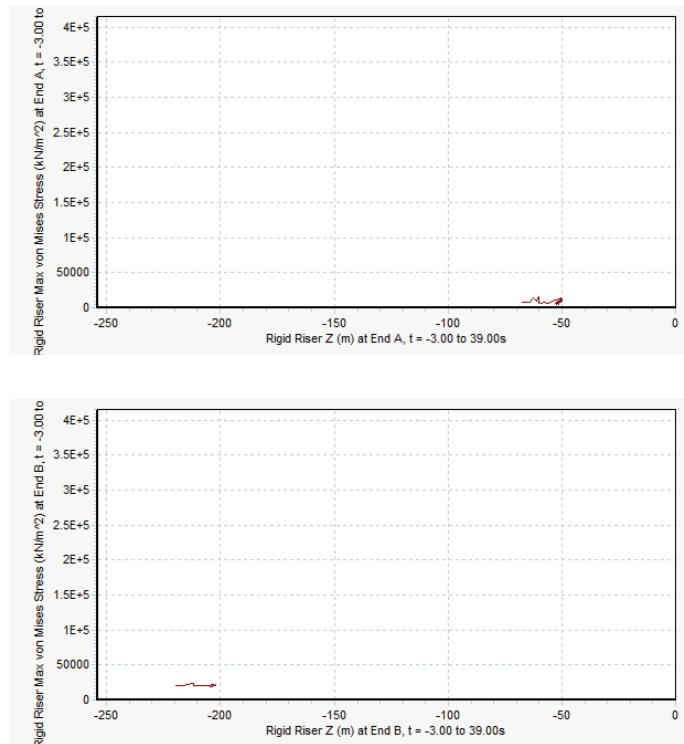
Gambar 6.17 Kondisi *winch3* tahap instalasi *buoyancy tank* ke *rigid riser*

Simulasi dinamik dari tahapan instalasi *buoyancy tank* ke *rigid riser* ditunjukkan oleh **Gambar 6.18**.



Gambar 6.18 Simulasi dinamik instalasi *buoyancy tank* ke *rigid riser*

Dalam pemodelan tahap ini, tegangan von Mises yang ditinjau adalah yang terjadi pada *rigid riser* selama proses instalasi *buoyancy tank* ke *rigid riser*. Grafik tegangan von Mises yang terjadi di sepanjang *riser* untuk tahap ini ditunjukkan oleh **Gambar 6.19**.



Gambar 6.19 Grafik tegangan von Mises terhadap *rigid riser* pada tahap instalasi *buoyancy tank* ke *rigid riser*

Tegangan von Mises yang ditampilkan adalah tegangan yang terjadi di ujung A dan B *rigid riser*. Seperti yang ditunjukkan oleh **Gambar 6.19**, tegangan dengan nilai yang besar terjadi di ujung B, dengan nilai maksimum yaitu **23.734,35 kN/m²**. Nilai maksimum tegangan von Mises yang terjadi pada *rigid riser* pada tahap ini dinyatakan aman karena tidak melebihi tegangan izin yang telah dihitung sebelumnya.

6.2.3 Tahap Instalasi *Rigid Riser* ke *Riser Base*

Setelah *buoyancy tank* terpasang pada *rigid riser*, tahap terakhir adalah instalasi *rigid riser* ke *riser base*. Pada tahap ini komponen-komponen yang digunakan tidak banyak berubah dengan tahap sebelumnya, hanya *winch3* yang sebelumnya menghubungkan ujung A *rigid riser* dengan *buoyancy tank* pada tahap ini dilepaskan. *Winch* yang bekerja pada tahap ini adalah *winch2* yang akan menarik *rigid riser* ke sampai terpasang ke *riser base*, sedangkan *winch1* lebih digunakan untuk menahan *buoyancy tank* agar lebih stabil selama proses instalasi. Kondisi awal dari *rigid riser*, *winch1*, dan *winch2* pada pemodelan tahap ini ditunjukkan masing-masing oleh **Gambar 6.19**, **Gambar 6.20** dan **Gambar 6.21**.

Edit Line Data: Rigid Riser

Name: **Rigid Riser** Include Torsion: **No**

Connection:

End	Connect to Object	Object Relative Position (m)			End Orientation (deg)			Release at Start of Stage
		x	y	z	Azimuth	Declination	Gamma	
A	6D Buoy1	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	~
B	Free	82.178	-11.312	-186.93	0.00	0.00	0.00	~

Connection Stiffness:

End	Stiffness (kN.m/deg)		
	x bending	y bending	Twisting
A	0.00	~	~
B	0.00	~	~

Statics:

Statics Method	Full Statics	Include Friction	Lay Azimuth (deg)	Pre-Tension (kN)
Catenary	Yes	Yes	180.00	set

Structure | Attachments | Contents | Catenary Convergence | Full Statics Convergence | Hydrodynamics | VIV | Drawing

Sections: **1** Line Length = 152.00 m

No.	Line Type	Section Length (m)	No. of Segments	Clash Check
1	Homogenous Pipe	152.000	20	No

Gambar 6.20 Kondisi awal *rigid riser* pada tahapan instalasi *rigid riser* ke *riser base*

Edit Winch Data: Winch1

Name: Winch1 Type: Simple

Connections: 2

	Connect to Object	Object Relative Position (m)		
		x	y	z
1	Installation Vessel	0.000	10.000	7.000
2	6D Buoy1	0.000	0.000	0.000

Winch Wire: Stiffness (kN) 10.00E3 Damping (s) 0.010

Release: Release at Start of Stage 3

Pen: Width 1 Style Colour

Control

Stage	Duration (s)	Mode	Value
Statics		Specified Length	160.000
0	1.000	Specified Payout	0.000
1	3.000	Specified Payout	0.000
2	0.500	Specified Payout	0.000

Note: Tensions are specified in kN; lengths and payouts are specified in m.

Gambar 6.21 Kondisi awal *winch1* tahap instalasi *rigid riser* ke *riser base*

Edit Winch Data: Winch2

Name: Winch2 Type: Simple

Connections: 2

	Connect to Object	Object Relative Position (m)		
		x	y	z
1	Rigid Riser	0.000	0.000	152.00
2	Anchored	85.000	0.000	0.000

Winch Wire: Stiffness (kN) 10.00E3 Damping (s) 0.010

Release: Release at Start of Stage ~

Pen: Width 1 Style Colour

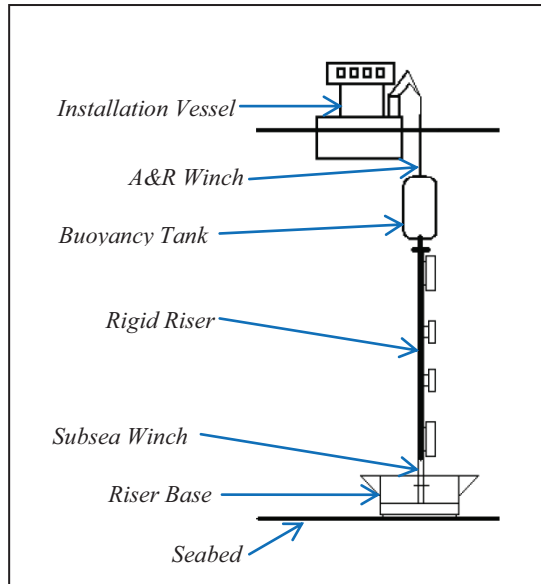
Control

Stage	Duration (s)	Mode	Value
Statics		Specified Length	50.000
0	1.000	Specified Payout	-1.000
1	3.000	Specified Payout	-3.000
2	0.500	Specified Payout	-10.000

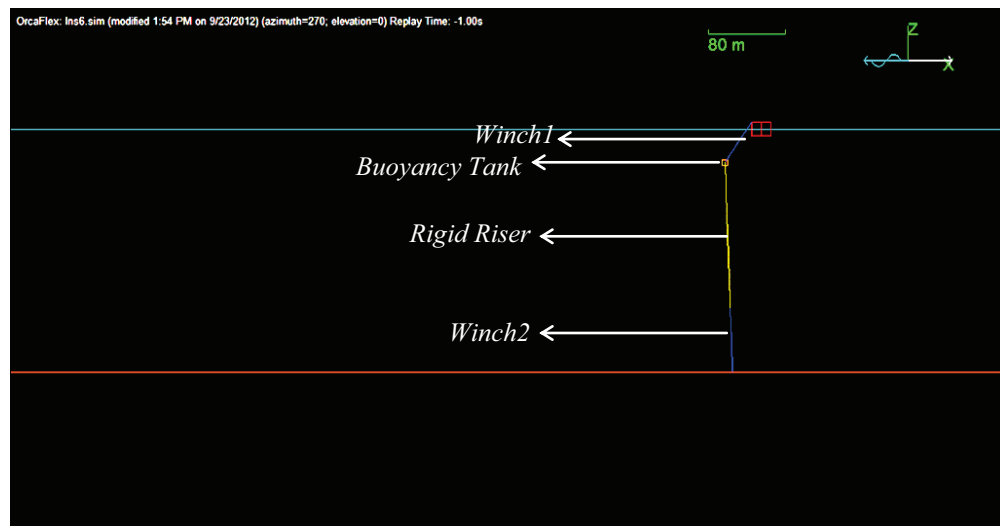
Note: Tensions are specified in kN; lengths and payouts are specified in m.

Gambar 6.22 Kondisi awal *winch2* tahap instalasi *rigid riser* ke *riser base*

Kondisi-kondisi awal tersebut seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 6.23**, kemudian dimodelkan menggunakan OrcaFlex 8.2a.

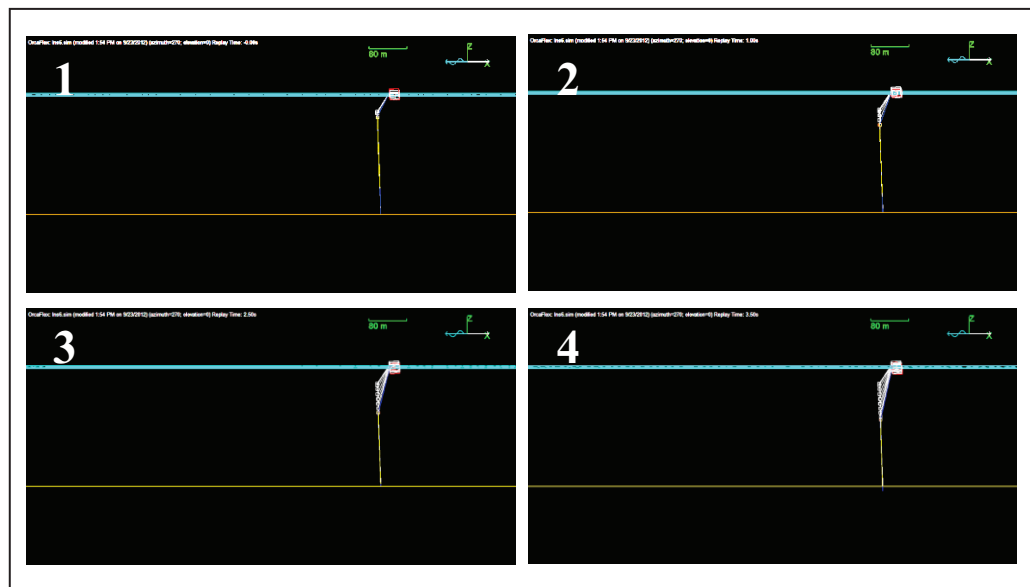


Gambar 6.23 Komponen-komponen dalam tahapan instalasi *rigid riser* ke *riser base*



Gambar 6.24 Pemodelan awal pada tahap instalasi *rigid riser* ke *riser base*

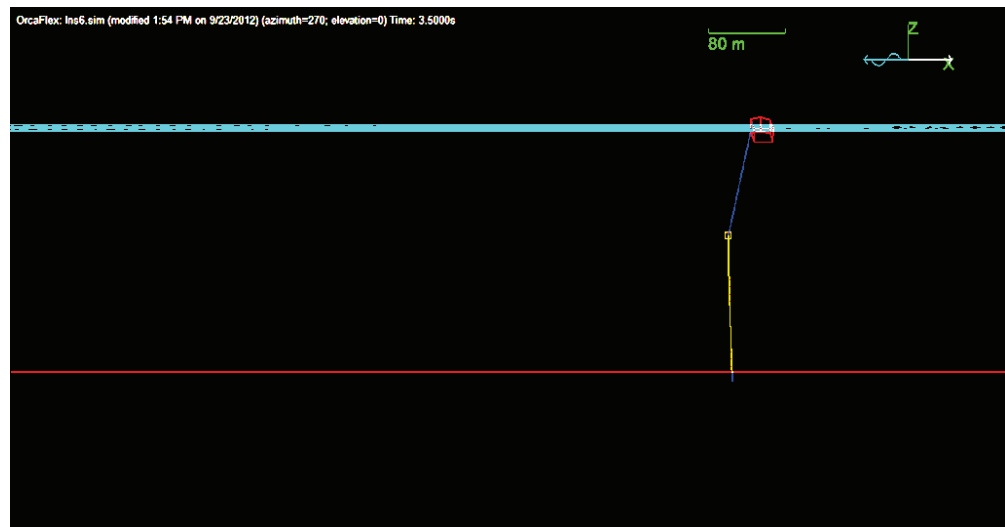
Riser base merupakan bagian terbawah dari sistem FSHR yang nantinya akan menghubungkan riser dengan pipa bawah laut dengan bantuan beberapa komponen tambahan lain, namun tidak dimodelkan. *Rigid riser* dibuat sampai menyentuh dasar laut dianggap telah terpasang pada *riser base*. Proses instalasi ini yang telah dimodelkan dengan OrcaFlex, ditunjukkan pada **Gambar 2.25**.



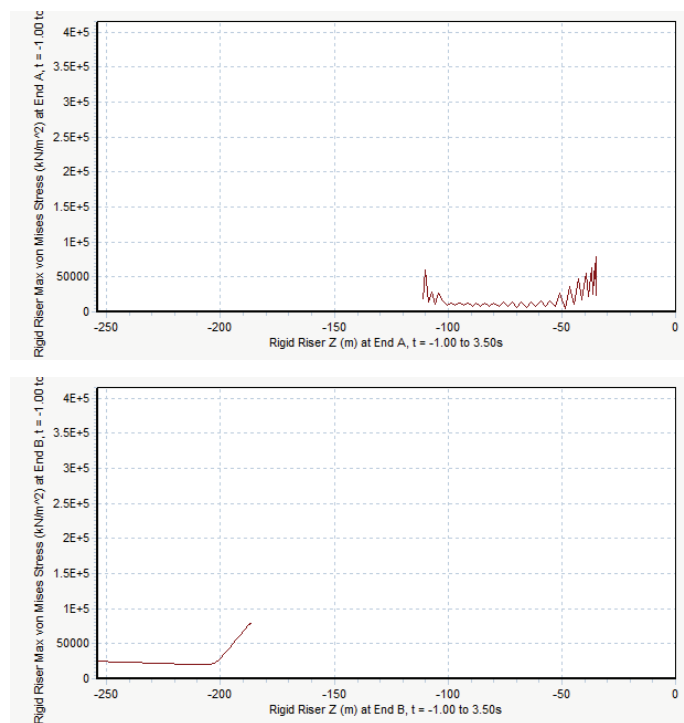
Gambar 6.25 Proses instalasi *rigid riser* ke *riser base*.

Bentuk *rigid riser* yang telah terpasang ke *riser base* ditunjukkan pada **Gambar 6.26**. Sesaat setelah ini kemudian akan memasuki tahapan instalasi dari *flexible hose* yang mana tidak akan dibahas pada Tugas Akhir ini.

Hasil dari pemodelan tahap ini yang diambil adalah tegangan von Mises yang terjadi sepanjang *rigid riser* selama proses pemodelan ditunjukkan oleh **Gambar 6.27**. Seperti yang dapat dilihat pada grafik tersebut, tegangan yang terjadi pada *rigid riser* tidak melebihi 80.000 kN/m^2 , dengan nilai maksimum pada ujung B, yaitu $79.291,218 \text{ kN/m}^2$.



Gambar 6.26 *Rigid riser* yang telah terpasang pada *riser base*



Gambar 6.27 Tegangan von Mises di *rigid riser* pada tahap instalasi *rigid riser* ke *riser base*

Dari hasil pemodelan ketiga tahapan instalasi *rigid riser* untuk sistem FSHR, dapat diketahui bahwa tahapan *upending rigid riser* merupakan tahapan yang paling kritis, diketahui dari nilai tegangan von Mises maksimum untuk *rigid riser* yang sangat besar, yaitu **380.957,0306 kN/m²** yang mendekati nilai tegangan izin dari baja tipe X90 yaitu sebesar 413.670 kN/m², namun *riser* masih dinyatakan aman. Sedangkan untuk *chain* hanya berpengaruh di tahap pertama, dengan kondisi *chain* yang paling kritis terletak pada *chain4* dengan nilai tegangan sebesar **195.109,836 kN/m²** namun tetap masih berada di bawah tegangan izinnya yaitu, 386.670 kN/m². Rangkuman dari hasil tegangan von Mises maksimum untuk setiap komponen di setiap tahap, ditunjukkan pada **Tabel 6.4**.

Tabel 6.4 Nilai tegangan von Mises maksimum setiap komponen di setiap tahapan

Parameter	Nilai Tegangan von Mises Maksimum (kN/m ²)
Tahap Upending Riser	
<i>Rigid Riser</i>	380.957,03
<i>Chain1</i>	67.697,8
<i>Chain2</i>	170.308,0952
<i>Chain3</i>	47.537,144
<i>Chain4</i>	195.109,836
Tahap Instalasi Buoyancy Tank ke Rigid Riser	
<i>Rigid Riser</i>	23.734,35
Tahap Instalasi Rigid Riser ke Buoyancy Tank	
<i>Rigid Riser</i>	79.291,218

INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG 2012



BAB 7

Penutup

Analisis Transportasi dan Instalasi Rigid Riser pada Sistem Free Standing Hybrid Riser

Yonathan Mozes Mandagi - 15508008

Program Studi Teknik Kelautan

7.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis deskriptif yang dilakukan untuk menentukan metode transportasi *rigid riser* yang paling tepat, serta pemodelan dan analisis instalasi yang dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak OrcaFlex 8.2a, dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Metode transportasi *rigid riser* dilakukan dengan metode *towing*. Metode *towing* sendiri memiliki beberapa alternatif *towing* berkaitan dengan proses *wetpark*, biaya, dan tergantung kondisi lingkungan di sekitar lokasi instalasi, seperti kedalaman, gelombang, arus, tekanan, temperatur, serta kondisi permukaan dasar laut.

Dari hasil analisis yang dilakukan dengan membandingkan kriteria-kriteria di atas, dihasilkan bahwa metode *mid-depth tow* merupakan metode transportasi yang paling efektif dan efisien.

2. Penentuan tebal optimum *rigid riser* dilaksanakan sesuai standar API RP 2RD, dengan melakukan *hydrostatic collapse check* dan *buckle propagation check*. Penentuan tebal optimum ini dilakukan dengan metode *trial and error* sampai mendapatkan nilai minimum dari tebal *rigid riser* yang melewati proses pengecekan. Rangkuman hasil pengecekan ditunjukkan pada **Tabel 7.1**.

Tabel 7.1 Rangkuman hasil pengecekan tebal dinding *rigid riser*

API RP 2RD	
Hydrostatic Collapse (mm)	Buckle Propagation (mm)
13.45	22.5

Dari kedua hasil pengecekan ini, diambil nilai tebal dinding *rigid riser* sebesar 22.5 mm sebagai tebal dinding optimum untuk *rigid riser* yang nantinya akan

digunakan pada pemodelan dan analisis instalasi *rigid riser* untuk material grade API 5L X90.

3. Analisis instalasi *rigid riser* dilakukan melalui pemodelan dengan menggunakan perangkat lunak OrcaFlex 8.2a yang dibagi dalam tiga tahap, yaitu tahap *upending riser*, tahap instalasi *buoyancy tank* ke *rigid riser*, serta tahap instalasi *rigid riser* ke *riser base*.

Analisis dilakukan dengan membandingkan tegangan von Mises maksimum yang terjadi di sepanjang *rigid riser* serta tegangan pada *chain* yang memiliki pengaruh signifikan terhadap pemodelan, dengan tegangan izin dari setiap properti yang digunakan baik *rigid riser* maupun *chain*.

Tegangan yang terjadi paling maksimum untuk *rigid riser* terjadi di ujung A pada saat *upending riser* dengan nilai tegangan **380.957,0306 kN/m²** yang masih berada di bawah tegangan izinnya yaitu 413.670 kN/m². Sedangkan untuk *chain* yang hanya dipakai pada tahap *upending riser* mempunyai nilai tegangan paling besar di *chain4* di ujung A dengan nilai **195.109,836 kN/m²** yang masih lebih kecil dengan tegangan izinnya yaitu 386.670 kN/m².

Dari hasil tegangan maksimum von Mises ini dapat disimpulkan bahwa tahap *upending riser* merupakan kondisi paling kritis pada proses instalasi *rigid riser* untuk sistem FSHR.

7.2 Saran

Ada beberapa saran yang dapat menunjang pengembangan topik ini, yaitu:

1. Pemodelan dalam analisis instalasi *rigid riser* menggunakan perangkat lunak OrcaFlex 8.2a dimana ada beberapa fitur yang masih belum *compatible* dengan fitur-fitur yang tersedia pada versi OrcaFlex yang lebih baru, sehingga disarankan untuk menggunakan perangkat lunak OrcaFlex paling baru sebisa mungkin agar hasil dari pemodelan dan analisis lebih optimal.

2. Untuk data kapal, khususnya RAO kapal, pada Tugas Akhir ini menggunakan *default* dari OrcaFlex, sehingga disarankan untuk menggunakan data RAO kapal yang asli apabila tersedia untuk hasil yang lebih akurat.
3. Instalasi FSHR terdiri dari beberapa tahap setelah instalasi *rigid riser*, yaitu instalasi *flexible hose* dan perlengkapan lainnya untuk mendukung jalannya FSHR yang perlu dilakukan analisis lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

API – “*Recommended Practice for Design of Risers for Floating Production Systems and TLPs*”. API-RP-2RD, 1st Edition, June 1998.

Burgess, M., Lim, F. ----. *Installation of Deepwater Risers*. 2H Offshore Engineering Limited, UK.

Hatton, S. A. 1997. *Low Cost Deepwater Hybrid Riser System*. OTC 8523.

Hatton, S.A., Brownridge, J. 1995. *Hybrid Risers: A Cost Effective Deepwater Riser System?*. Makalah disampaikan pada Deeptec '95, Aberdeen, 28 Februari – 1 Maret 1995.

Hatton, S.A., Howells, H., Dr. 1996, *Catenary and Hybrid Risers for Deepwater Locations Worldwide*. Makalah disampaikan pada Advances in Riser Technologies, Aberdeen, Juni 1996.

Hatton, S.A., Lim, F., Dr. 1999. *Third Generation Deepwater Risers*. Makalah disampaikan pada World Wide Deepwater Technologies, IBC, London, Juni 1999.

Hatton, S.A., Lim, F., Dr., Luffrum, S. 2005. *Hybrid Riser Foundation Design and Optimisation*. OTC 17199.

Hatton, S.A, McGrail, J., Walters, D. 2002. *Recent Developments in Free Standing Riser Technology*. Makalah disampaikan pada 3rd Workshop on Subsea Pipelines, Rio de Janeiro, Brazil, 3-4 Desember 2002.

Howells, H., Dr., Hatton, S. A. 1995. *Riser Selection for Deep Water Floating Production Systems*. Makalah disampaikan pada The Deepwater Pipeline Technology Congress, Paris, Desember 1995.

Lim F. 2006. *Installation of Risers in Deep Waters*. Makalah disampaikan pada 4th PetroMin Deepwater & Subsea Technology Conference & Exhibition, Hotel Istana, Kuala Lumpur, Malaysia, 20-21 Juni 2006.

McGrail, J., Lim, F. ----. *SLOR vs. SCR for Deepwater Applications Technical Appraisal*. Paper No. 2004-FKL-01. 2H Offshore Engineering Limited Woking, UK.

Natarajan, S., Hatton, S. ----. *Recent Development in Freestanding Riser – The Grouped SLOR*. 2H Offshore Engineering Sdn Bhd, Kuala Lumpur, Malaysia.

Rombado, G., Yue, B., Rueda, C. 2012. *Steel Catenary Jumper for Single Hybrid Riser in Deepwater Applications*. OTC 23704.

Santika, A.R. 2011. *Desain dan Analisis Instalasi Pipa Bawah Laut Menggunakan DNV OS F101 2010 & DNV 1981*. Tugas Akhir tidak Diterbitkan. Bandung. Program Sarjana Institut Teknologi Bandung.

Swornm, A. 2005. *Hybrid Riser Towers form an Operator's Perspective*. OTC 17397.

Thiébaud, F., Alliot, V., Hatton, S. 1998. *Innovative Hybrid Riser Concept for FPSO's*. Makalah disampaikan pada Advances in Riser Technologies, Singapura, 29-30 Juni 1998.

Thurman, H. V., 1997. *Introductory Oceanography*. Prentice Hall. Ch. 9.

INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG 2012



LAMPIRAN A

PENGECEKAN TEBAL DINDING OPTIMUM RISER DENGAN
API RP 2RD, 1998 UNTUK KRITERIA HYDROSTATIC
COLLAPSE DAN BUCKLE PROPAGATION

API RP 2RD

HYDROSTATIC COLLAPSE CHECK

Input Data Parameter:

Inner Diameter	$ID := 22\text{in} = 558.8\text{-mm}$
Wall Thickness	$t := 13.5\text{mm}$
Outside Diameter	$OD := ID + 2t = 585.8\text{-mm}$
Modulus of Elasticity	$E := 207000\text{MPa}$
Poisson's Ratio	$\nu := 0.3$
Material Grade API 5L-X90	
Specified minimum yield stress	$SMYS := 90\text{ksi} = 620.528\text{-MPa}$
Cross sectional area of pipe	$A1 := \frac{\pi \cdot OD^2}{4} = 2.695 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2$
Cross sectional area of wall	$A2 := \frac{\pi \cdot [OD^2 - (OD - 2t)^2]}{4} = 2.427 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$
Effective tension on tubular	$T_e := 0.6 \cdot SMYS \cdot A2 = 9.037 \times 10^6 \text{N}$
Seawater density	$\rho := 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Water depth	$h := 254\text{m}$

Hydrostatic Collapse Check:

Internal pressure	$P_i := 0\text{psi}$
Hydrostatic pressure	$P := \rho \cdot g \cdot h - P_i = 2.553\text{-MPa}$
Mean axial stress	$S_a := \frac{(T_e - P \cdot A1)}{A2} - P_i = 343.966\text{-MPa}$
Reduced yield stress	$Y_r := SMYS \cdot \left[\left[1 - 3 \cdot \left(\frac{S_a}{2 \cdot SMYS} \right)^2 \right]^{0.5} - \left(\frac{S_a}{2 \cdot SMYS} \right) \right] = 372.37\text{-MPa}$
Elastic buckling pressure	$P_e := \left[2 \frac{E}{(1 - \nu^2)} \right] \cdot \left(\frac{t}{OD} \right)^3 = 5.568\text{-MPa}$

Yield pressure with simultaneous tension $P_y := 2 \cdot Y_r \cdot \frac{t}{OD} = 17.163 \cdot \text{MPa}$

Collapse pressure (round pipe) $P_o := P_e \cdot P_y \cdot \left(P_e^2 + P_y^2 \right)^{-0.5} = 5.296 \cdot \text{MPa}$

Design factor, seamless pipe $D_f := 0.75$

Net allowable external design pressure $P_a := P = 2.553 \cdot \text{MPa}$

Utility Ratio $U1 := \frac{P_a}{0.67 \cdot D_f \cdot P_o} = 0.959$

Check1 := if($U1 \leq 1$, "OK!", "Not OK!")

Check1 = "OK!"

API RP 2RD

BUCKLE PROPAGATION CHECK

Input Data Parameter:

Inner Diameter	$ID := 22\text{in} = 558.8\text{-mm}$
Wall Thickness	$t := 22.5\text{mm}$
Outside Diameter	$OD := ID + 2t = 603.8\text{-mm}$
Modulus of Elasticity	$E := 207000\text{MPa}$
Poisson's Ratio	$\nu := 0.3$
Material Grade API 5L-X90	
Specified minimum yield stress	$SMYS := 90\text{ksi} = 620.528\text{-MPa}$
Cross sectional area of pipe	$A1 := \frac{\pi \cdot OD^2}{4} = 2.863 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2$
Cross sectional area of wall	$A2 := \frac{\pi \cdot [OD^2 - (OD - 2t)^2]}{4} = 4.109 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$
Effective tension on tubular	$T_e := 0.6 \cdot SMYS \cdot A2 = 1.53 \times 10^7 \text{ N}$
Seawater density	$\rho := 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Water depth	$h := 254\text{m}$

Buckle Propagation Design Check:

Internal pressure	$P_i := 0\text{psi}$
Hydrostatic pressure	$P := \rho \cdot g \cdot h - P_i = 2.553\text{-MPa}$
Design pressure differential	$P_d := P = 2.553\text{-MPa}$
Predicted propagation pressure	$P_p := 24 \cdot SMYS \cdot \left(\frac{t}{OD}\right)^{2.4} = 5.547\text{-MPa}$
Design factor	$D_p := 0.72$
Utility Ratio	$U2 := \frac{P_d}{0.67 \cdot D_p \cdot P_p} = 0.954$

Check2 := if($U2 \leq 1$, "OK!", "Not OK!")

Check2 = "OK!"

INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG 2012



LAMPIRAN B

HASIL KELUARAN ORCAFLEX UNTUK CHAIN DAN RIGID
RISER SETIAP TAHAPAN

Full Results for Chain1 at time 40.000s									
OrcaFlex: Seq1-sim.sim (modified 9:18 PM on 9/17/2012)									
End A									
Total Force (kN)		31.1715							
End Tension (kN)		31.1712							
End Shear Force (kN)		0.1256							
Total Moment (kN.m)		0.0							
End Bend Moment (kN.m)		0.0							
End Torque (kN.m)		0.0							
End Curvature (rad/m)		0.0							
End Curvature (rad/m)		0.0							
End Force Azimuth (deg)		182.6789							
End Force Declination (deg)		173.1411							
End Force Ez-angle (deg)		173.1411							
End Force Exy-angle (deg)		182.6789							
End A components									
							</		

[illegible]

Mid-Segment Loads; * indicates seabed contact									
Segment	Arclength (m)	Effective Tension (kN)	Shear Force (kN)	Bend Radius (m)	Curvature (rad/m)	Bend Moment (kN.m)	Wall Tension (kN)	Max von Mises Stress (kN/m^2)	
1	0.6667	30.397	0.0	Infinity	0.0	0.0	-29.8493	1083.4709	
2	2.0	28.8198	0.0	Infinity	0.0	0.0	-31.7996	1027.2549	
3	3.3333	27.2137	0.0	Infinity	0.0	0.0	-33.7789	970.0065	
4	4.6667	25.579	0.0	Infinity	0.0	0.0	-35.7872	911.7376	
5	6.0	23.9264	0.0	Infinity	0.0	0.0	-37.8131	852.8316	
6	7.3333	22.2711	0.0	Infinity	0.0	0.0	-39.841	793.8327	
7	8.6667	20.6019	0.0	Infinity	0.0	0.0	-41.8824	734.3328	
8	10.0	18.9368	0.0	Infinity	0.0	0.0	-43.9189	674.982	
9	11.3333	17.2795	0.0	Infinity	0.0	0.0	-45.9463	615.9124	
10	12.6667	15.6163	0.0	Infinity	0.0	0.0	-47.9793	556.6265	
11	14.0	13.9488	0.0	Infinity	0.0	0.0	-50.0161	497.1918	
12	15.3333	12.273	0.0	Infinity	0.0	0.0	-52.061	437.4598	
Segment Load Components; * indicates seabed contact									
Segment	Arclength (m)	Shear Components x (kN)	Shear Components y (kN)	Curvature Components x (rad/m)	Curvature Components y (rad/m)	Bend Moment Components x (kN.m)	Bend Moment Components y (kN.m)		
1	0.6667	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
2	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
3	3.3333	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
4	4.6667	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
5	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
6	7.3333	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
7	8.6667	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
8	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
9	11.3333	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
10	12.6667	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
11	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
12	15.3333	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Full Results for Chain2 at time 40.000s									
OrcaFlex: Seq1-sim.sim (modified 9:18 PM on 9/17/2012)									
End A									
Total Force (kN)		1.8504							
End Tension (kN)		1.8472							
End Shear Force (kN)		0.1087							
Total Moment (kN.m)		0.0							
End Bend Moment (kN.m)		0.0							
End Torque (kN.m)		0.0							
End Curvature (rad/m)		0.0							
End Curvature (rad/m)		0.0							
End Force Azimuth (deg)		158.5838							
End Force Declination (deg)		171.2752							
End Force Ez-angle (deg)		171.2752							
End Force Exy-angle (deg)		158.5838							
End A components									
Load	Magnitude	End Axes			Global Axes				
		Ex	Ey	Ez	GX	GY	GZ		
Force (kN)	1.8504	-0.2613	0.1025	-1.8289	-0.2613	0.1025	-1.8289		
Moment (kN.m)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
End B									
Total Force (kN)	24.7383								
End Tension (kN)	24.7382								
End Shear Force (kN)	0.0739								
Total Moment (kN.m)	0.0								
End Bend Moment (kN.m)	0.0								
End Torque (kN.m)	0.0								
End Curvature (rad/m)	0.0								
End Curvature (rad/m)	0.0								
End Force Azimuth (deg)	347.9931								
End Force Declination (deg)	6.3792								
End Force Ez-angle (deg)	6.3792								
End Force Exy-angle (deg)	347.9931								

Segment Positions and Orientations; * indicates seabed contact							
Segment	Arclength (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Azimuth (deg)	Declination (deg)	Gamma (deg)
1	0.5	93.6066	-6.0494	-63.2656	168.3068	168.367	-168.3068
2	1.5	93.7744	-6.0363	-64.1783	358.4219	147.7723	22.4183
3	2.5	94.0542	-6.0271	-65.0887	51.2171	177.5046	74.6414
4	3.5	94.4086	-6.0031	-65.2106	1.2473	43.0296	29.3505
5	4.5	94.8724	-6.0024	-64.3604	356.8778	14.2177	33.3108
6	5.5	95.0348	-6.0197	-63.3774	345.0682	4.7307	45.0002
7	6.5	95.1472	-6.027	-62.3844	2.6514	8.3467	27.521
8	7.5	95.3071	-6.0151	-61.3975	5.5379	10.118	24.6715
9	8.5	95.4794	-5.9965	-60.4126	6.8134	9.8461	23.4153
10	9.5	95.6234	-5.9907	-59.4235	355.812	6.8013	34.3054
11	10.5	95.7224	-6.0079	-58.4287	342.0779	4.8157	47.9717
12	11.5	95.774	-6.0382	-57.4309	304.0234	2.3934	85.9642
13	12.5	95.7858	-6.0756	-56.4318	270.3943	2.3124	119.5665
14	13.5	95.805	-6.1133	-55.4328	317.4717	2.9668	72.533
15	14.5	95.8665	-6.1462	-54.4355	339.9956	5.1778	50.0604
16	15.5	95.9621	-6.1741	-53.4405	346.8095	6.2683	43.2801

Mid-Segment Loads; * indicates seabed contact							
Segment	Arclength (m)	Effective Tension (kN)	Shear Force (kN)	Bend Radius (m)	Curvature (rad/m)	Bend Moment (kN.m)	Wall Tension (kN)
1	0.5	1.3618	0.0	Infinity	0.0	0.0	-16.4795
2	1.5	0.5234	0.0	Infinity	0.0	0.0	-17.5753
3	2.5	0.0	0.0	Infinity	0.0	0.0	-18.3554
4	3.5	2.7043	0.0	Infinity	0.0	0.0	-15.6855
5	4.5	4.2455	0.0	Infinity	0.0	0.0	-13.9045
6	5.5	6.0057	0.0	Infinity	0.0	0.0	-11.867
7	6.5	7.8374	0.0	Infinity	0.0	0.0	-9.7554
8	7.5	9.6184	0.0	Infinity	0.0	0.0	-7.6961
9	8.5	11.3727	0.0	Infinity	0.0	0.0	-5.664
10	9.5	13.148	0.0	Infinity	0.0	0.0	-3.6098
11	10.5	14.9374	0.0	Infinity	0.0	0.0	-1.5399
12	11.5	16.7496	0.0	Infinity	0.0	0.0	0.5537
13	12.5	18.5196	0.0	Infinity	0.0	0.0	2.6055
14	13.5	20.3025	0.0	Infinity	0.0	0.0	4.6702
15	14.5	22.0894	0.0	Infinity	0.0	0.0	6.7383
16	15.5	23.8566	0.0	Infinity	0.0	0.0	8.7861

Segment Load Components; * indicates seabed contact									
Segment	Arclength (m)	Shear Components		Curvature Components		Bend Moment Components			
		x (kN)	y (kN)	x (rad/m)	y (rad/m)	x (kN.m)	y (kN.m)		
1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
2	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
3	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
4	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
5	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
6	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
7	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
8	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
9	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
10	9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
11	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
12	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
13	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
14	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
15	14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
16	15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Full Results for Chain3 at time 40.000s									
OrcaFlex: Seq1-sim.sim (modified 9:18 PM on 9/17/2012)									
End A									
Total Force (kN)		11.9024							
End Tension (kN)		11.9022							
End Shear Force (kN)		0.0535							
Total Moment (kN.m)		0.0							
End Bend Moment (kN.m)		0.0							
End Torque (kN.m)		0.0							
End Curvature (rad/m)		0.0							
End Curvature (rad/m)		0.0							
End Force Azimuth (deg)		166.1164							
End Force Declination (deg)		172.846							
End Force Ez-angle (deg)		172.846							
End Force Exy-angle (deg)		166.1164							
End A components									
Load	Magnitude	End Axes			Global Axes				
		Ex	Ey	Ez	GX	GY	GZ		
Force (kN)	11.9024	-1.439	0.3557	-11.8097	-1.439	0.3557	-11.8097		
Moment (kN.m)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
End B									
Total Force (kN)	1.6399								
End Tension (kN)	1.6396								
End Shear Force (kN)	0.0307								
Total Moment (kN.m)	0.0								
End Bend Moment (kN.m)	0.0								
End Torque (kN.m)	0.0								
End Curvature (rad/m)	0.0								
End Curvature (rad/m)	0.0								
End Force Azimuth (deg)	204.901								
End Force Declination (deg)	5.0565								
End Force Ez-angle (deg)	5.0565								
End Force Exy-angle (deg)	204.901								

[illegible]

Mid-Segment Load; * indicates seabed contact									
Segment	Arclength (m)	Effective Tension (kN)	Shear Force (kN)	Bend Radius (m)	Curvature (rad/m)	Bend Moment (kN.m)	Wall Tension (kN)	Max von Mises Stress (kN/m^2)	
1	0.4583	11.3203	0.0	Infinity	0.0	0.0	-53.3264	403.5015	
2	1.375	10.1554	0.0	Infinity	0.0	0.0	-54.7473	361.9801	
3	2.2917	8.9934	0.0	Infinity	0.0	0.0	-56.1644	320.5621	
4	3.2083	7.8334	0.0	Infinity	0.0	0.0	-57.5786	279.2142	
5	4.125	6.6722	0.0	Infinity	0.0	0.0	-58.9936	237.8257	
6	5.0417	5.509	0.0	Infinity	0.0	0.0	-60.4108	196.3641	
7	5.9583	4.3442	0.0	Infinity	0.0	0.0	-61.8294	154.8454	
8	6.875	3.1817	0.0	Infinity	0.0	0.0	-63.2444	113.4095	
9	7.7917	2.0284	0.0	Infinity	0.0	0.0	-64.6465	72.2996	
10	8.7083	0.8911	0.0	Infinity	0.0	0.0	-66.0247	31.763	
11	9.625	0.1784	0.0	Infinity	0.0	0.0	-66.8431	6.3592	
12	10.5417	1.1131	0.0	Infinity	0.0	0.0	-65.7674	39.6753	
Segment Load Components; * indicates seabed contact									
Segment	Arclength (m)	Shear Components		Curvature Components		Bend Moment Components			
		x (kN)	y (kN)	x (rad/m)	y (rad/m)	x (kN.m)	y (kN.m)		
1	0.4583	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
2	1.375	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
3	2.2917	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
4	3.2083	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
5	4.125	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
6	5.0417	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
7	5.9583	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
8	6.875	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
9	7.7917	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
10	8.7083	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
11	9.625	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
12	10.5417	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Full Results for Chain4 at time 40.000s									
OrcaFlex: Seq1-sim.sim (modified 9:18 PM on 9/17/2012)									
End A									
Total Force (kN)		24.5514							
End Tension (kN)		24.5513							
End Shear Force (kN)		0.0493							
Total Moment (kN.m)		0.0							
End Bend Moment (kN.m)		0.0							
End Torque (kN.m)		0.0							
End Curvature (rad/m)		0.0							
End Curvature (rad/m)		0.0							
End Force Azimuth (deg)		351.6192							
End Force Declination (deg)		7.9696							
End Force Ez-angle (deg)		7.9696							
End Force Exy-angle (deg)		351.6192							
End A components									
Load	Magnitude	End Axes			Global Axes				
		Ex	Ey	Ez	GX	GY	GZ		
Force (kN)	24.5514	3.3677	-0.4961	24.3143	3.3677	-0.4961	24.3143		
Moment (kN.m)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
End B									
Total Force (kN)	44.1817								
End Tension (kN)	44.1814								
End Shear Force (kN)	0.1515								
Total Moment (kN.m)	0.0								
End Bend Moment (kN.m)	0.0								
End Torque (kN.m)	0.0								
End Curvature (rad/m)	0.0								
End Curvature (rad/m)	0.0								
End Force Azimuth (deg)	328.0821								
End Force Declination (deg)	3.9131								
End Force Ez-angle (deg)	3.9131								
End Force Exy-angle (deg)	328.0821								

[illegible]

Mid-Segment Loads; * indicates seabed contact									
Segment	ArcLength (m)	Effective Tension (kN)	Shear Force (kN)	Bend Radius (m)	Curvature (rad/m)	Bend Moment (kN.m)	Wall Tension (kN)	Max von Mises Stress (kN/m^2)	
1	0.5	25.4329	0.0	Infinity	0.0	0.0	10.6422	906.5306	
2	1.5	27.1884	0.0	Infinity	0.0	0.0	12.6771	969.1035	
3	2.5	28.9414	0.0	Infinity	0.0	0.0	14.7098	1031.5891	
4	3.5	30.7064	0.0	Infinity	0.0	0.0	16.7548	1094.4982	
5	4.5	32.477	0.0	Infinity	0.0	0.0	18.8063	1157.6112	
6	5.5	34.2604	0.0	Infinity	0.0	0.0	20.8709	1221.1767	
7	6.5	36.0626	0.0	Infinity	0.0	0.0	22.9546	1285.4162	
8	7.5	37.8668	0.0	Infinity	0.0	0.0	25.0403	1349.7238	
9	8.5	39.662	0.0	Infinity	0.0	0.0	27.117	1413.7137	
10	9.5	41.4631	0.0	Infinity	0.0	0.0	29.1996	1477.9118	
11	10.5	43.2753	0.0	Infinity	0.0	0.0	31.2932	1542.5041	
Segment Load Components; * indicates seabed contact									
Segment	ArcLength (m)	Shear Components		Curvature Components		Bend Moment Components			
		x (kN)	y (kN)	x (rad/m)	y (rad/m)	x (kN.m)	y (kN.m)		
1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
2	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
3	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
4	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
5	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
6	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
7	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
8	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
9	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
10	9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
11	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Full Results for Rigid Riser at time 40.000s									
OrcaFlex: Seq1-sim.sim (modified 9:18 PM on 9/17/2012)									
End A									
Total Force (kN)		29.2065							
End Tension (kN)		28.9759							
End Shear Force (kN)		3.6631							
Total Moment (kN.m)		0.0							
End Bend Moment (kN.m)		0.0							
End Torque (kN.m)		0.0							
End Curvature (rad/m)		0.0							
End Curvature (rad/m)		0.0							
End Force Azimuth (deg)		248.8434							
End Force Declination (deg)		174.0318							
End Force Ez-angle (deg)		174.0318							
End Force Exy-angle (deg)		248.8434							
End A components									
Load	Magnitude	Ex	Ey	Ez	GX	GY	GZ		
Force (kN)	29.2065	-1.096	-2.8321	-29.0482	-1.096	-2.8321	-29.0482		
Moment (kN.m)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
End B									
Total Force (kN)	89.0761								
End Tension (kN)	89.0048								
End Shear Force (kN)	3.5638								
Total Moment (kN.m)	0.0								
End Bend Moment (kN.m)	0.0								
End Torque (kN.m)	0.0								
End Curvature (rad/m)	0.0								
End Curvature (rad/m)	0.0								
End Force Azimuth (deg)	189.4774								
End Force Declination (deg)	172.0793								
End Force Ez-angle (deg)	172.0793								
End Force Exy-angle (deg)	189.4774								

[illegible]

[illegible]

Full Results for Rigid Riser at time 39.000s									
OrcaFlex: Seq2-sim.sim (modified 10:31 PM on 9/22/2012)									
End A									
Total Force (kN)		217.7848							
End Tension (kN)		217.6757							
End Shear Force (kN)		6.893							
Total Moment (kN.m)		0.0							
End Bend Moment (kN.m)		0.0							
End Torque (kN.m)		0.0							
End Curvature (rad/m)		0.0							
End Curvature (rad/m)		0.0							
End Force Azimuth (deg)		225.0348							
End Force Declination (deg)		178.7933							
End Force Ez-angle (deg)		0.0							
End Force Exy-angle (deg)		225.0348							
End A components									
Load	Magnitude	End Axes			Global Axes				
		Ex	Ey	Ez	GX	GY	GZ		
Force (kN)	217.7848	-3.241	-3.245	-217.7365	-3.241	-3.245	-217.7365		
Moment (kN.m)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
End B									
Total Force (kN)	0.0								
End Tension (kN)	0.0								
End Shear Force (kN)	0.0								
Total Moment (kN.m)	0.0								
End Bend Moment (kN.m)	0.0								
End Torque (kN.m)	0.0								
End Curvature (rad/m)	0.0								
End Curvature (rad/m)	0.0								
End Force Azimuth (deg)	0.0								
End Force Declination (deg)	0.0								
End Force Ez-angle (deg)	0.0								
End Force Exy-angle (deg)	180.0								

Mid-Segment Loads; * indicates seabed contact									
Segment	Arclength (m)	Effective Tension (kN)	Shear Force (kN)	Bend Radius (m)	Curvature (rad/m)	Bend Moment (kN.m)	Wall Tension (kN)	Max von Mises Stress (kN/m^2)	
1	3.8	212.2207	6.3528	16266.1086	0.0001	24.1412	32.8419	10629.0126	
2	11.4	201.3254	4.8676	5880.2963	0.0002	66.7796	2.1183	16412.098	
3	19.0	190.4416	3.1132	4043.8463	0.0002	97.1065	-28.5936	20959.4703	
4	26.6	179.5675	1.5514	3419.6567	0.0003	114.8313	-59.2951	23625.4463	
5	34.2	168.7003	0.5996	3192.5922	0.0003	122.9984	-89.9891	24840.5508	
6	41.8	157.8358	0.2245	3114.0720	0.0003	126.0998	-120.6795	25294.3005	
7	49.4	146.9713	0.0999	3102.6387	0.0003	126.5644	-151.3689	25364.5442	
8	57.0	136.1064	0.8569	3194.0058	0.0003	122.944	-182.0576	24850.104	
9	64.6	125.2417	2.0567	3510.0868	0.0003	111.8729	-212.745	23299.5761	
10	72.2	114.376	3.1185	4258.7026	0.0002	92.2074	-243.4321	20957.9114	
11	79.8	103.5062	3.3572	5808.9827	0.0002	67.5994	-274.1223	18722.3923	
12	87.4	92.6296	2.6379	8761.7792	0.0001	44.8178	-304.8184	17242.1303	
13	95.0	81.7462	1.554	13593.0774	0.0001	28.8885	-335.5209	16797.5418	
14	102.6	70.8572	0.8612	19921.3154	0.0001	19.7117	-366.2284	17011.2123	
15	110.2	59.9638	0.8458	29689.0970	0.0	13.2265	-396.9401	17470.5032	
16	117.8	49.0667	1.1144	67952.1664	0.0	5.7788	-427.6554	18012.7758	
17	125.4	38.1664	0.9818	179314.4147	0.0	2.1899	-458.3738	18692.0447	
18	133.0	27.2634	0.2765	56356.0697	0.0	6.9679	-489.0948	19470.935	
19	140.6	16.3588	0.4892	63755.9954	0.0	6.1592	-519.8176	20189.773	
20	148.2	5.4531	0.5658	182629.1633	0.0	2.1502	-550.5415	20901.6753	

Full Results for Rigid Riser at time 3.500s									
OrcaFlex: Seq3-sim.sim (modified 1:54 PM on 9/23/2012)									
End A									
Total Force (kN)									
End Tension (kN)									
End Shear Force (kN)									
Total Moment (kN.m)									
End Bend Moment (kN.m)									
End Torque (kN.m)									
End Curvature (rad/m)									
End Curvature (rad/m)									
End Force Azimuth (deg)									
End Force Declination (deg)									
End Force Ez-angle (deg)									
End Force Exy-angle (deg)									
End A components									
Load	Magnitude	End Axes			Global Axes			GZ	
		Ex	Ey	Ez	GX	GY			
Force (kN)	1525.886	-27.3136	-40.3942	1525.1067	-27.3136	-40.3942	1525.1067		
Moment (kN.m)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
End B									
Total Force (kN)	0.0								
End Tension (kN)	0.0								
End Shear Force (kN)	0.0								
Total Moment (kN.m)	0.0								
End Bend Moment (kN.m)	0.0								
End Torque (kN.m)	0.0								
End Curvature (rad/m)	0.0								
End Curvature (rad/m)	0.0								
End Force Azimuth (deg)	0.0								
End Force Declination (deg)	0.0								
End Force Ez-angle (deg)	0.0								
End Force Exy-angle (deg)	180.0								

Segment Load Components; * indicates seabed contact									
Segment	Arclength (m)	Shear Components		Curvature Components		Bend Moment Components			
		x (kN)	y (kN)	x (rad/m)	y (rad/m)	x (kN.m)	y (kN.m)		
1	3.8	7.5542	10.1532	0.0001	-0.0001	38.5758	-28.7013		
2	11.4	6.6875	8.7281	0.0003	-0.0002	110.3127	-82.8107		
3	19.0	2.8245	3.6526	0.0004	-0.0003	157.3512	-118.9499		
4	26.6	-2.7096	-3.6044	0.0004	-0.0003	157.5343	-119.3866		
5	34.2	-3.8142	-5.2096	0.0003	-0.0002	124.0472	-94.601		
6	41.8	-0.1797	-0.0456	0.0003	-0.0002	104.0811	-79.427		
7	49.4	4.0475	5.6396	0.0003	-0.0002	125.3339	-94.1212		
8	57.0	5.9557	8.0381	0.0005	-0.0003	177.2979	-132.1252		
9	64.6	4.4938	6.1885	0.0006	-0.0004	231.3468	-171.8244		
10	72.2	0.5766	0.9416	0.0007	-0.0005	258.4349	-191.0873		
11	79.8	-4.0984	-5.4921	0.0006	-0.0005	241.1474	-177.708		
12	87.4	-8.1036	-10.8323	0.0005	-0.0003	179.1313	-131.3527		
13	95.0	-9.842	-13.297	0.0002	-0.0002	87.4651	-63.1779		
14	102.6	-9.4868	-12.29	0.0	0.0	-9.738	10.2506		
15	110.2	-6.8207	-7.9352	-0.0002	0.0002	-86.5709	72.2008		
16	117.8	-1.1431	-0.2673	-0.0003	0.0003	-117.731	102.4541		
17	125.4	4.4749	4.9326	-0.0003	0.0002	-100.009	89.7976		
18	133.0	5.2711	5.2254	-0.0002	0.0001	-61.4217	52.7755		
19	140.6	2.7349	0.6647	-0.0001	0.0001	-39.0473	22.3632		
20 *	148.2	1.5759	4.8067	0.0	0.0	-18.2612	5.9872		