

SKRIPSI

ANALISIS KELELAHAN KAPAL FSO MENJADI FPSO

Disusun dan diajukan oleh

ADRIANI PHADY

D081 17 1017



DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2021

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI
ANALISIS KELELAHAN KAPAL FSO MENJADI FPSO

Disusun dan diajukan oleh

ADRIANI PHADY

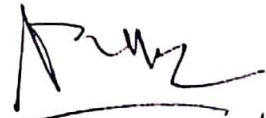
D081 17 1017

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Teknik Kelautan Fakultas
Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 20 Mei 2021 dan dinyatakan
telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing utama,

Pembimbing Pendamping,



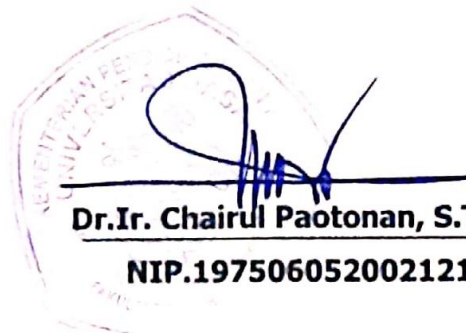
Muhammad Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D.

Ir. Juswan, ST., MT.

NIP.197606062005011003

NIP. 196212311989031031

Ketua Program Studi



Dr. Ir. Chairul Paotonan, S.T., M.T.

NIP.197506052002121003

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Adriani Phady
Nomor Mahasiswa : D081171017
Program Studi : Teknik Kelautan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

“Analisis Kelelahan Kapal FSO Menjadi FPSO”

Adalah karya tulis saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 20 Mei 2021

Yang menyatakan,



Adriani Phady

ABSTRAK

ADRIANI PHADY. *Analisis Kelelahan Kapal FSO Menjadi FPSO* (dibimbing oleh **Muhammad Zubair Muis Alie** dan **Juswan**).

FSO dan FPSO berfungsi untuk menyimpan minyak hasil pengeboran minyak lepas pantai dan memindahkan minyak ke kapal tanker. Perbedaan terletak pada proses pengolahan minyak. Pada kapal FPSO, minyak diolah pada saat sebelum proses offloading, sedangkan pada kapal FSO minyak tidak diproses. Konversi kapal merupakan perubahan jenis muatan kapal menjadi muatan yang lebih menguntungkan dibandingkan muatan kapal sebelum dikonversi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui umur kapal FSO sebelum dan sesudah dikonversi menjadi kapal FPSO. Analisis kelelahan struktur kapal dilakukan dengan menggunakan metode Palmgren-Miner berdasarkan kurva S-N dengan mencari nilai tegangan signifikan (*stress significant*), jumlah dari siklus kegagalan (*number of cycle*) dan rentang tegangan (*stress range*) yang menghasilkan umur kapal FSO dan FPSO. Pengaruh tegangan rata-rata (*von mises stress*) dan spektrum gelombang JONSWAP akan mempengaruhi nilai dari momen dan gaya yang bekerja pada kapal yang mempengaruhi waktu terjadinya 1 siklus kelelahan (*mean zero crossing period*) lebih cepat apabila beban yang diterima lebih besar yaitu sebesar tegangan maksimal sebesar $127,46 \text{ N/mm}^2$ dan tegangan minimal sebesar $0,75 \text{ N/mm}^2$ pada kapal FSO Surya Putra Jaya dengan periode 3,86 detik, sedangkan untuk kapal FPSO milik PT. Pertamina didapatkan tegangan maksimal sebesar $262,32 \text{ N/mm}^2$ dan tegangan minimal sebesar $1,63 \text{ N/mm}^2$ dengan periode 3,51 detik. Selain itu, pengaruh S-N curve pada nilai siklus yang diizinkan (N) untuk penggunaan siklus rentang tegangan (*stress range*) dari ANSYS dan nilai tegangan referensi (*reference stress*) berbanding lurus dengan umur pada umur struktur kapal. Sehingga pada kapal FSO menjadi lebih lama yaitu 28 tahun dibandingkan umur kapal FPSO yaitu 24 tahun.

Kata kunci: FSO, FPSO, JONSWAP, *von mises stress*, Palmgren-Miner, kelelahan

ABSTRACT

ADRIANI PHADY. *Fatigue Analysis of FSO Ship to be FPSO (supervised by **Muhammad Zubair Muis Alie and Juswan**)*

The function of FSO and FPSO are both to store the oil from offshore oil drilling and to transfer the oil to the tanker ship. The difference of FSO and FPSO is oil treatment process. The oil is processed before offloading in the FPSO, whereas the oil isn't processed in the FSO. Conversion of a ship is a change in the type of cargo from a ship to become a cargo that is more profitable than a ship's cargo before conversion. The objective of the present study is to estimate the fatigue life before and after conversion from FSO to FPSO. The analysis of the fatigue of the ship structure was carried out using the Palmgren-Miner method based on the S-N curve by looking for the value of significant stress (significant stress), the number of failure cycles (number of cycles) and the stress range that resulted in the lifetime of the FSO and FPSO ship. The effect of the effect of the average stress (von mises stress) and the JONSWAP wave spectrum will affect the value of the moment and the force acting on the ship which affects the time of 1 fatigue cycle occurs (mean zero crossing period) faster if the load received is greater, namely the maximum stress amounting to 127.46 N/mm² and a minimum tension of 0.75 N/mm² on the FSO Surya Putra Jaya ship with a period of 3.86 seconds, while for the FPSO ship owned by PT. Pertamina obtained a maximum stress of 262.32 N/mm² and a minimum stress of 1.63 N/mm² with a period of 3.51 seconds. Also, the S-N effect curve on the allowable cycle value (N) for the use of the ANSYS stress range cycle and the reference stress value is directly proportional to the lifetime of the ship structure. So that the FSO ship is 28 years longer than the FPSO ship, which is 24 years.

Keywords: FSO, FPSO, JONSWAP, von mises stress, Palmgren-Miner, fatigue

PRAKATA

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Alhamdulillah, Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Dan atas kehendakNya lah segala hambatan dalam penelitian serta penulisan skripsi ini dapat diselesaikan. Salawat serta salam penulis panjatkan kehadiran Nabi Muhammad SAW. Skripsi ini dibuat penulis sebagai syarat untuk menyelesaikan pendidikan di Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, dengan judul:

“ANALISIS KELELAHAN KAPAL FSO MENJADI FPSO”

Doa, dorongan moril dari kedua orang tua Bapak **Supriadi Akkas** dan Ibu **Jumiati Tahir** merupakan dukungan yang selalu menguatkan hati untuk setiap tahapan penelitian dan penulisan skripsi ini, serta keberhasilan penulis sampai tahap skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Keberhasilan skripsi ini, tak luput pula berkat bantuan dari berbagai pihak yang diterima penulis, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Untuk itu dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan secara tulus dan ikhlas kepada yang terhormat:

1. Bapak **Muhammad Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D.** selaku dosen pembimbing utama yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.
2. Bapak **Ir. Juswan, ST. MT.** selaku dosen pembimbing pendamping yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini.
3. Bapak **Dr. Taufiqur Rachman, ST., MT.** selaku Ketua Program Studi Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.

4. Bapak **Daeng Paroka, ST., MT., Ph.D** selaku penasehat akademik (PA) selama menjadi mahasiswa Teknik Kelautan sehingga saya dapat menyelesaikan studi.
5. **Seluruh Dosen pengajar dan Staff Administrasi** Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas bantuannya selama penulis menjalankan studi hingga menyelesaikan tugas akhir.
6. **Kanda Senior** atas bantuannya selama masa perkuliahan dan bimbingannya selama ini.
7. **Teman-teman Mahasiswa khususnya Teknik Kelautan 2017 dan Semua rekan di Labo OSAREL** yang selalu memberi motivasi dan dukungannya serta waktu yang telah dilalui bersama dalam suka dan duka.
8. **Nurhidayah Nurdin dan Annisya Alifvia Soehartono** yang telah memberikan semangat dan motivasi.

Penulis menyadari dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik sangat penulis harapkan sebagai bahan untuk menutupi kekurangan dari penulisan skripsi ini. Penulis berharap semoga tulisan ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu Teknik Kelautan, bagi pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Gowa, 09 Mei 2021

Adriani Phady

DAFTAR ISI

ABSTRAK	iv
PRAKATA	viii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR ISTILAH.....	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
1.6. Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Pengertian FSO dan FPSO	6
2.2. Desain Struktur <i>Topside</i> FPSO	7
2.3. Desain Struktur Lambung FPSO	10
2.4. Desain Struktur <i>Topside</i> dan Lambung FSO	15
2.5. Tegangan yang Bekerja	16
2.6. Beban-Beban yang Bekerja.....	17
2.7. Analisis Kelelahan	20
2.8. Kurva S-N.....	23
2.9. Metode Palmgren-Miner	25
2.10. <i>Response Amplitude Operator</i> (RAO).....	25
2.11. Spektrum Gelombang	27
2.12. <i>Stress Response Spectra</i>	29
BAB III METODE PENELITIAN	31
3.1. Jenis Penelitian.....	31
3.2. Lokasi dan Waktu Penelitian	31

3.3. Penyajian Data	31
3.4. Analisa Data	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1. Distribusi Tegangan	37
4.2. Spektrum Gelombang.....	38
4.3. <i>Response Amplitude Operator</i> (RAO)	39
4.4. <i>Stress Response Spectra</i>	41
4.5. Umur Kelelahan (<i>Fatigue Life</i>)	42
BAB V PENUTUP	47
5.1. Kesimpulan	47
5.2. Saran	47
DAFTAR PUSTAKA	48
LAMPIRAN	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. <i>Floating Production Storage and Offloading</i> (FPSO)	6
Gambar 2.2. <i>Layout Topsides</i> Kapal FPSO	7
Gambar 2.3. Midship Kapal FPSO.....	14
Gambar 2.4. Kapal FSO.....	16
Gambar 2.5. Kurva S-N API.....	24
Gambar 3.1. <i>Midship</i> Kapal FPSO (SANTOS SAMPANG) PTY.LTD	33
Gambar 4.1. Distribusi tegangan untuk kapal FSO	37
Gambar 4.2. Distribusi tegangan untuk kapal FPSO	37
Gambar 4.3. Grafik variasi spektrum gelombang di Batam	38
Gambar 4.4. Grafik variasi spektrum gelombang di Medan	39
Gambar 4.5. <i>Response Amplitude Operator</i> kapal FSO	40
Gambar 4.6. <i>Response Amplitude Operator</i> kapal FPSO	40
Gambar 4.7. <i>Stress Response Spectra</i> kapal FSO.....	41
Gambar 4.8. <i>Stress Response Spectra</i> kapal FPSO	42

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Parameter desain lambung utama dan dependensinya	13
Tabel 2.2. Formulasi <i>fatigue S-N curves</i>	24
Tabel 3.1. Konfigurasi ukuran <i>stiffener</i>	32

DAFTAR ISTILAH

- ANSYS* : *Software* yang digunakan untuk menghitung kekuatan struktur
- BKI* : Biro Klasifikasi Indonesia
- IACS* : International Association of Classification Societies
- FSO : Floating Storage and Offloading
- FPSO : Floating Production Storage and Offloading
- JONSWAP : Joint North Sea Wave Project
- Kelelahan : Kondisi yang dialami struktur akibat adanya beban berulang secara terus-menerus
- Modulus Elastisitas : Sebuah ukuran yang digunakan untuk merepresentasikan kekakuan suatu bahan.
- Von Mises Stress : Nilai dari tegangan rata-rata yang digunakan untuk menentukan apakah suatu material akan patah.
- Momen : Sebuah besaran yang menyatakan besarnya gaya yang bekerja pada sebuah benda sehingga mengakibatkan benda tersebut berotasi.
- Software* : Istilah khusus untuk data yang diformat dan disimpan secara digital, termasuk program komputer, dokumentasinya dan berbagai informasi yang bisa dibaca dan bisa ditulis oleh komputer.
- Failure* : Kegagalan suatu struktur yang tidak mampu mencapai atau melampaui nilai-nilai kinerja tertentu.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia adalah negara dengan luas wilayah 2/3 dari daratan. Dengan luas lautan yang sangat besar menjadikan Indonesia memiliki potensi sumber daya yang lautan melimpah, terutama minyak dan gas bumi. Dengan banyaknya potensi sumber daya lautan yang ada, maka diperlukan struktur yang dapat mengangkut semua hasil produksi dari sumber daya yang ditemukan tersebut. Salah satu jenis bangunan struktur lepas pantai adalah kapal *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO). Konversi kapal adalah suatu proses perubahan kapal untuk menyesuaikan kebutuhan kapal dari tipe perencanaan awal ke tipe kapal lainnya baik dari segi konstruksi maupun sistem yang digunakan. Konversi kapal dilakukan bertujuan untuk merubah jenis muatan kapal menjadi muatan yang lebih menguntungkan dibandingkan muatan kapal sebelum dikonversi. Selain merubah jenis muatan, konversi juga dapat dilakukan untuk merubah fungsi kapal. Konversi kapal belakangan ini marak dilakukan karena konversi kapal-kapal bekas lebih menguntungkan dibandingkan membangun kapal baru apabila hanya untuk digunakan dalam jangka waktu selama beberapa tahun (jangka pendek). Salah satu konversi kapal yang banyak dilakukan saat ini adalah konversi kapal *Floating Storage and Offloading* (FSO) menjadi *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO).

Secara umum fungsi FSO dan FPSO adalah sama-sama untuk menyimpan minyak hasil pengeboran minyak lepas pantai (*offshore*) dan menyalurkan minyak tersebut pada kapal tanker yang membawa minyak tersebut (*offloading*). Perbedaan terletak pada proses pengolahan minyak. Pada kapal FPSO, minyak diolah pada saat sebelum proses offloading, sedangkan pada kapal FSO minyak tidak diproses. Saat ini 70% FPSO yang

beroperasi di dunia adalah hasil konversi. Waktu pembuatan secara konversi yang lebih singkat sekitar 1-2 tahun dari pada pembuatan baru menjadi salah satu alasannya. Keuntungan lain yang didapatkan dalam proses secara konversi adalah antisipasi pada umur reservoir yang singkat hingga menengah (5-15 tahun) dan jadwal proses operasi FPSO yang lebih cepat. Maraknya konversi kapal FSO menjadi FPSO dapat digunakan bagi pihak industri galangan kapal untuk meraih keuntungan dengan melakukan konversi tersebut termasuk FSO milik SANTOS (SAMPANG) PTY. LTD yang dikonversi menjadi FPSO dan sekarang milik PERTAMINA. Tetapi konversi tersebut memerlukan analisa perubahan kekuatan untuk memastikan bahwa konversi kapal FSO menjadi FPSO layak dilakukan. Karena masa konstruksi yang singkat, proses desain yang sederhana dan biaya yang relatif rendah, anjungan lepas pantai seperti FPSO banyak digunakan untuk memproduksi sumber daya laut. Lingkungan laut yang keras pasti mengakibatkan kerusakan korosi dan melemahkan kekuatan kapal. Efeknya lebih parah untuk kapal yang sudah tua atau kapal layanan yang diperpanjang. Umumnya efek ganda seperti gempa bumi dan korosi dapat menyebabkan kegagalan pada struktur kapal meningkat pesat [1].

Permasalahan yang selalu terjadi pada bangunan apung atau struktur kapal adalah kerusakan yang dapat menyebabkan struktur tersebut mengalami kegagalan. Kerusakan bangunan laut terutama terjadi akibat kelelahan (*fatigue*), baik pada komponen struktur utama maupun sekunder dan tersier [2]. Unit lepas pantai yang menua dapat mengalami kerusakan struktur yang terkait dengan berbagai jenis kerusakan yang ditimbulkan, termasuk elemen yang dibelokkan, penyok, robekan, retakan, kehilangan material dan perforasi. Masing-masing dapat mempengaruhi kekuatan struktur secara berbeda, dan harus dianalisis dengan teknik tertentu. Penilaian integritas anjungan lepas pantai dapat digunakan untuk memastikan kesesuaian struktur dengan tujuan kapal tersebut, mengingat kondisi operasi yang berkaitan dengan lingkungan laut yang parah, dapat

menyebabkan kerusakan akibat kelelahan dan beban yang ekstrem. Seringkali, struktur kapal FPSO diperlukan untuk akomodasi pada kondisi operasional yang baru, oleh karena itu beban dek juga meningkat [3]. Bangunan apung cenderung mengalami kelelahan karena beban gelombang yang bersifat siklis yang terjadi pada struktur. Kajian dan penelitian mengenai analisa kelelahan dalam memperkirakan umur kelelahan pada konstruksi kapal FSO dan kapal FPSO telah banyak dilakukan dan menggunakan metode yang bermacam-macam. Diantara banyak metode yang digunakan, salah satunya adalah metode Palmgren-Miner.

Berdasarkan uraian sebelumnya, maka fokus utama penelitian ini adalah "Analisis Kelelahan Kapal FSO Menjadi FPSO".

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah berapa umur kapal FSO setelah dan sesudah diubah menjadi FPSO.

1.3. Batasan Masalah

Agar penelitian dapat terarah sesuai dengan kerangka yang direncanakan, maka penelitian dibatasi dengan beberapa hal sebagai berikut:

1. Menggunakan spektrum gelombang JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) sesuai dengan nilai variasi spektum gelombang tertinggi
2. Kurva S-N digunakan untuk perhitungan umur struktur
3. Ketidakterampilan awal, tegangan sisa pengelasan, cacat pengelasan, korosi dan *crack base* diabaikan

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui umur kapal FSO sebelum dan sesudah dikonversi menjadi kapal FPSO.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian analisis kelelahan kapal FSO menjadi

kapal FPSO dengan menggunakan nilai tegangan rata-rata (*Von Mises Stress*) dari metode numerik dan diolah dengan spektrum gelombang JONSWAP ini adalah:

1. Bagi bidang akademis, dapat memperdalam wawasan mahasiswa dan memberikan masukan bagi ilmu pengetahuan, khususnya mengetahui analisis struktur baja.
2. Bagi bidang industri, memberikan kontribusi dan perbandingan kekuatan kepada perusahaan-perusahaan.
3. Sebagai informasi dalam hal menentukan kebijakan dalam hal regulasi/peraturan pada galangan kapal untuk membuat perencanaan struktur kapal FSO dan FPSO.

1.6. Sistematika Penulisan

Untuk mendapatkan alur penulisan yang jelas dan sistematis sekaligus memungkinkan pembaca dapat menginterpretasikan hasil tulisan secara tepat, maka tugas akhir ini disusun menjadi beberapa bagian, yaitu:
BAB I Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang permasalahan atau alasan yang mendasari penulis dalam melakukan penelitian mengenai analisis kelelahan kapal FSO menjadi kapal FPSO dengan menggunakan nilai tegangan rata-rata dari metode numerik dan diolah dengan spektrum gelombang JONSWAP. Selain itu berisi juga mengenai perumusan masalah yang dianalisis, batasan masalah penelitian yang tidak dipertimbangkan dalam penelitian ini karena keterbatasan alat bantu dan membatasi agar penelitian lebih spesifik juga dalam bab ini terdapat tujuan dari penelitian dan manfaat penelitian yang dapat diambil dari penelitian ini serta sistematika penulisan skripsi.

BAB II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi kajian pustaka yang mendukung permasalahan yang dihadapi berupa teori-teori dasar mengenai gambaran umum kapal FSO (*Floating Storage and Offloading*) dan kapal FPSO (*Floating Production*

Storage and Offloading), mengenai konstruksi kapal FPSO, teori tentang cara menganalisis kelelahan kapal FSO sebelum dan sesudah dikonversi menjadi kapal FPSO dengan analisis tegangan rata-rata (*Von Mises Stress*) serta cara perhitungan spektrum gelombang JONSWAP yang mempengaruhi beban pada struktur kapal.

BAB III Metode Penelitian

Bab ini berisi jenis penelitian, lokasi dan waktu penelitian, objek penelitian yaitu penampang *midship* pada kapal FSO, jenis dan sumber data dimana penelitian ini bersifat kuantitatif yaitu penelitian yang menggunakan angka, mulai dari pengumpulan data, penafsiran terhadap data tersebut, serta penampilan dari hasilnya dengan melakukan investigasi untuk mendapatkan nilai umur kapal FSO menjadi FPSO dengan mengetahui perbandingan antara pengaruh beban yang berbeda pada bagian *deck* dan spektrum gelombang JONSWAP pada lokasi yang berbeda serta kerangka alur pemikiran.

BAB IV Pembahasan

Bab ini berisi pembahasan tentang investigasi umur kelelahan kapal FSO yang dikonversi menjadi kapal FPSO, mulai dari dimensi kapal yang digunakan, material, gambar penampang kapal FSO dan FPSO yang diteliti dan juga berupa hasil investigasi tegangan rata-rata menggunakan metode numerik berupa nilai momen yang bekerja pada kondisi *hogging* dan *sagging*, nilai tegangan rata-rata akan diolah dengan spektrum gelombang JONSWAP untuk menganalisis umur dari struktur kapal FSO dan FPSO.

KESIMPULAN

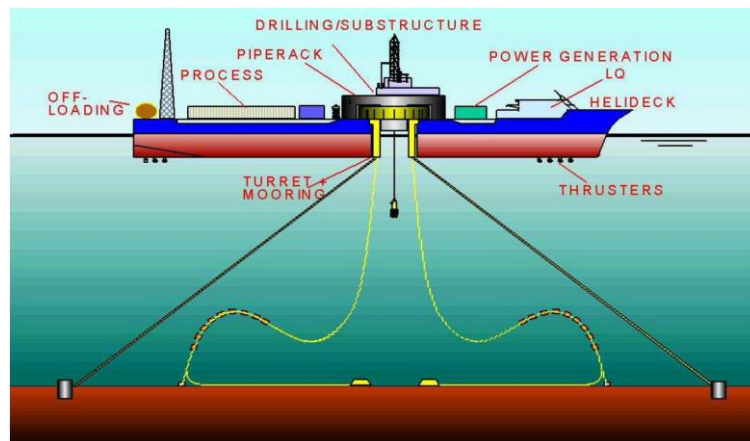
Bab ini merupakan penutup dari keseluruhan dari isi penelitian yang mencakup kesimpulan dari hasil pembahasan masalah yang dibahas pada bab-bab sebelumnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian FSO dan FPSO

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) adalah bangunan terapung paling produktif di bidang industri lepas pantai yang dikembangkan pada tahun 1970 untuk menghasilkan minyak dan gas dengan menggunakan jaringan pipa atau struktur tetap. Awalnya, FPSO dibatasi pada daerah dengan beban lingkungan yang ringan. Hal ini memungkinkan konversi kapal tanker menjadi FPSO [4]. FPSO merupakan bangunan pengeboran dan penyimpanan minyak lepas pantai yang bersifat *portable*, dalam artian dapat berpindah-pindah. Adapun hasil pemisahan dari produk pengeboran adalah *crude oil*, air dan gas. Sebuah kapal yang hanya digunakan untuk menyimpan minyak disebut sebagai *Floating Storage and Offloading* (FSO). FPSO memiliki karakteristik berbeda dengan FSO, walaupun demikian FPSO dapat dibangun dengan konversi FSO, adapun ciri umum FPSO adalah konstruksi gading-gading lebih kuat daripada kapal dengan ukuran yang sama, disebabkan adanya beban di atas *deck* yang sangat besar berupa *equipment*/pabrik produksi minyak dan gas seperti yang terlihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. *Floating Production Storage and Offloading System* (FPSO)

[4]

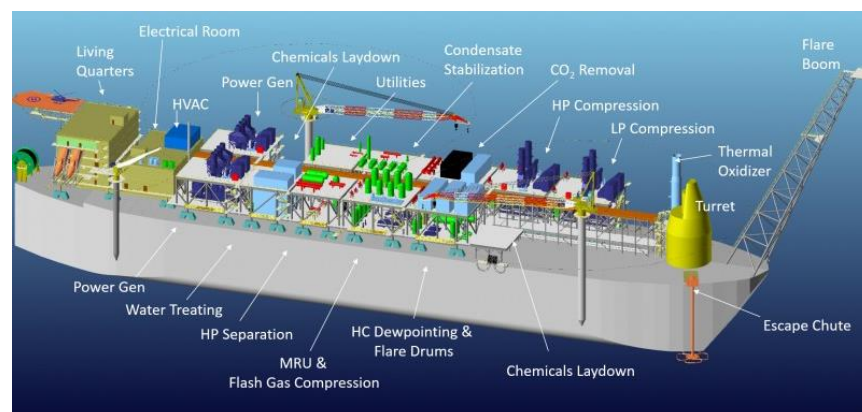
FPSO terdiri dari kapal jenis tanker besar yang ditambatkan ke lautan. FPSO dirancang untuk memproses dan menghentikan produksi dari sumur bawah laut di dekatnya dan untuk secara berkala mengisi oli yang tersimpan ke tanker ulang-alik yang lebih kecil. Tanker ulang-alik kemudian mengangkut minyak ke fasilitas darat untuk diproses lebih lanjut. Sebuah FPSO mungkin cocok untuk lahan ekonomi sedikit yang terletak di daerah perairan dalam yang terpencil di mana infrastruktur pipa tidak ada. Saat ini, tidak ada FPSO yang disetujui untuk digunakan di Teluk Meksiko. Namun, ada lebih dari 70 sistem ini yang digunakan di tempat lain di dunia [5].

2.2. Desain Struktur *Topside* FPSO

Desain struktur *topside* yang direncanakan mempunyai tujuan untuk memusatkan pembebanan pada lambung FPSO. Untuk menilai dengan benar beban ini perlu diketahui:

1. Struktur utama *topsides*.
2. Berat dan pusat gravitasi perlengkapan utama.
3. Berat, pusat gravitasi dan inersia sisa bagian atas (baik struktur dan peralatan yang lebih kecil).

Beban *topside* yang ditransmisikan ke lambung seperti pada Gambar 2.2 juga bergantung dari lambung yang mengalami gerak dan akselerasi. Hasil ini berasal dari analisa hidrodinamika.



Gambar 2.2. *Layout Topsides* Kapal FPSO [6]

Tempat kru dan *deck house* diposisikan di buritan kapal. Selain itu, area *helipad* terletak di belakang tempat tersebut. Terdapat dua *dereck*

untuk membantu proses produksi dan penyimpanan pada ruang muat. Pengelolaan fasilitas diwakili oleh blok di bagian atas dek utama. Menara suar terletak di seberang dek tempat tinggal kru di haluan kapal [7].

Faktor yang mempengaruhi muatan dek utama yang harus dibawa FPSO dalam bentuk fasilitas produksi adalah:

1. Jumlah sistem utama
2. Karakteristik reservoir
3. Pilihan jalur ekspor
4. Sistem tunggal atau dua produksi
5. Pemindahan yang mungkin dilakukan pada bidang lain

Sistem utama yang memiliki pengaruh signifikan terhadap ukuran dan konfigurasi fasilitas produksi FPSO adalah pemisahan minyak mentah, pengolahan gas (dehidrasi dan kompresi) dan kemungkinan ekspor, pengolahan dan penanganan air yang dihasilkan termasuk injeksi ulang, perawatan dan injeksi air laut, ekspor minyak mentah melalui kapal tanker atau pipa penyalur pembangkit listrik utama yaitu ukuran dan jumlah unit.

Sebagaimana dinyatakan di atas, karakteristik reservoir lapangan memiliki pengaruh besar yang mana perancang fasilitas perlu mendapat informasi yang baik mengenai profil produksi untuk minyak, gas dan air yang dihasilkan, kemungkinan durasi produksi tinggi atau puncak, potensi dan waktu pengembangan sumur dimasa yang akan datang yang mana bisa memperpanjang pada puncak produksi, tekanan reservoir dan luasnya dukungan tekanan reservoir untuk menentukan jumlah injeksi ulang air dan gas, rasio minyak-gas dan kemungkinan kebutuhan gas angkat, dan suhu kedatangan cairan di FPSO. Dukungan injeksi air mungkin diperlukan lebih awal di muka untuk injeksi ulang. Dalam hal ini, fasilitas pengolahan air laut seperti unit deaerasi harus berukuran sesuai.

Tingkat keakuratan dalam data reservoir dan kinerja yang diprediksi diinginkan untuk meminimalkan kemungkinan perubahan desain yang terlambat dan karenanya dampaknya terhadap jadwal dan anggaran proyek

serta mengurangi risiko kendala produksi karena sistem atau peralatan pada kondisi yang awalnya tidak dirancang. FPSO juga dapat digunakan di daerah dengan kepercayaan reservoir rendah sebagai sistem produksi jangka pendek dan mempersiapkan sistem produksi jangka panjang yang optimal.

Pemilihan sistem ekspor minyak mentah juga mempengaruhi ukuran fasilitas karena tidak hanya mengalirkan minyak mentah ke pipa dan kapal tanker yang berbeda, tetapi juga tingkat pemisahan di pengolah minyak untuk mencapai spesifikasi minyak mentah yang berbeda untuk setiap rute. Dalam kasus minyak mentah yang berat, kental atau licin, suhu kedatangan cairan yang rendah mungkin memerlukan fasilitas pemanas ekstensif yang melibatkan, antara lain, unit pemulihan panas limbah pada penggerak turbin gas. Profil produksi memerlukan satu atau dua pemisah minyak mentah dan kompresi gas. Pertimbangan hilangnya pendapatan yang timbul dari pemadaman berlarut-larut dari satu arus produksi 100% terhadap biaya tambahan yang terkait dengan penyediaan dua aliran 50%. Jika sebuah aliran produksi tunggal dipilih maka pemilihan peralatan hemat yang bijaksana di dalam pemisah harus dilakukan agar dapat memastikan setinggi mungkin ketersediaan sistem. Fasilitas pemisahan uji berukuran yang sesuai dapat dimanfaatkan untuk memberi tingkat cadangan serta juga pengelolaan sumur yang lebih efisien.

Apabila FPSO digunakan di lapangan dengan masa kerja singkat, sepeti, lima sampai tujuh tahun, pemilik harus memutuskan apakah akan merancang fasilitas produksi untuk kehidupan lapangan tersebut atau untuk membuat ketentuan mengenai pemindahan FPSO yang mungkin dilakukan ke sumur lain; di lokasi lain. Dalam kasus tersebut, peluang pemasaran potensial yang dirasakan dapat menentukan konfigurasi fasilitas, tingkat fleksibilitas yang ada untuk memproses berbagai jenis cairan, tingkat produksi dan ketentuan ruang dan berat untuk penambahan modul atau peralatan sedikit demi sedikit. FPSO dilengkapi dengan peralatan *hydroprocessing* di atas dek dan fasilitas penyimpanan hidrokarbon di

bawah dek. Kapal juga bisa dilengkapi dengan sistem tambat yang memungkinkannya tinggal di tempat jika perlu.

2.3. Desain Struktur Lambung FPSO

Sesuai dengan tingkat kedalaman air, kepekaan sistem tambak dan *riser* FPSO terhadap gerakan frekuensi gelombang meningkat dengan cepat mempengaruhi bentuk lambung FPSO yang dapat dioptimalkan untuk mengatasi hal ini dengan memvariasikan panjang, lebar tinggi, sarat dan distribusi massa pada struktur apung. Panjang lambung FPSO dapat disesuaikan dengan panjang gelombang yang direncanakan untuk memastikan bahwa kondisi lingkungan yang ekstrem tidak menghasilkan panjang gelombang yang berada pada kisaran respons *heave* dan *pitching* puncak, sehingga mengurangi gerakan vertikal *topsides* dan beban dinamis yang terkait.

Salah satu penyebab terjadinya kegagalan *ultimate strength* pada suatu struktur bangunan apung umumnya adalah disebabkan oleh beban ekstreme dan atau kurangnya daya tahan struktur terhadap degradasi material. Misalnya korosi yang terjadi secara menerus dapat mengurangi dimensi *scantling*, sehingga *girder* penopang pada lambung kapal rawan mengalami tekuk ataupun retak ketika ditimpa beban ekstrem. Beban ekstrem juga dapat menyebabkan komponen struktur mengalami *plastic deformation* yang menyebabkan struktur tersebut tidak dapat kembali ke bentuk semula. Untuk itu, perlu suatu pertimbangan jangka panjang untuk mengantisipasi adanya degradasi material ketika mendesain sebuah struktur.

Bentuk lambung juga dapat disesuaikan untuk mengendalikan perilaku *rolling* dan *pitching* sehingga mengurangi persyaratan desain *bend stiffener rise*, terutama untuk kondisi melintang. Pengoptimalan ini juga mengurangi kebutuhan persyaratan desain peralatan proses *topside* khusus seperti *baffle* untuk pemisah. Optimalisasi bentuk lambung yang disebutkan di atas dapat memberikan kontribusi yang bermanfaat bagi kinerja

operasional FPSO jangka panjang, namun hal ini harus dinilai secara hati-hati terhadap biaya pabrikasi dan biaya *life of field* (LOF) [8].

FPSO tidak diharuskan untuk bergerak maju; akibatnya resistensi tidak menjadi masalah. Namun, dalam model *weathervaning*, rasio kelangsingan lambung (rasio panjang terhadap balok) berfungsi untuk menyajikan daerah beban lingkungan yang ada dan membentuk gerakan alami pada pembebanan.

Rasio kelangsingan yang rendah menghasilkan gerakan yang lebih baik dengan perilaku tambat di atas lambung yang lebih pendek yang lebih besar. Lambung yang lebih pendek dapat mengefisienkan baja dan pengurangan biaya titik rentang perbandingan perbandingan luas lempeng ke lambung adalah prospek yang bekerja karena FPSO, tidak seperti kapal tanker yang tidak dibatasi oleh syarat maksimum, sehingga rasio 2:1 dapat dioptimalkan. Hal ini membantu desain struktur dan *seakeeping* dengan meningkatkan *freeboard*. Identifikasi syarat utama untuk lambung pada FPSO mengenai ukuran lambung kapal dan ukuran fasilitas produksi harus dipertimbangkan oleh pemilik, operator, dan perancang FPSO dalam memilih unit yang sesuai untuk mengembangkan FPSO di lapangan.

Untuk FPSO yang dirancang khusus untuk pembuatan baru rumah ukuran lambung biasanya didorong oleh kebutuhan penyimpanan minyak mentah. Hal ini juga dipengaruhi oleh waktu siklus kapal FPSO saat melakukan pembongkaran terdiri dari:

1. Waktu memuat di Lapangan
2. Waktu berlayar ke atau dari pelabuhan (termasuk penundaan cuaca dalam perjalanan)
3. Durasi debit pelabuhan
4. Menghubungkan atau memutuskan waktu untuk FPSO
5. Menunggu waktu cuaca untuk mengatasi cuaca ekstrem. Hal ini tergantung pada tinggi gelombang dan kecepatan angin untuk koneksi dan pemutusan.

Pengukuran lambung FPSO juga harus menyediakan kapasitas pemberat yang baik untuk memastikan rancangan pemberat yang memadai agar memberikan kinerja stabilitas yang diperlukan untuk performa *seakeeping*.

Pada kapal tanker yang telah dikonversi, biasanya tidak mungkin untuk mendapatkan kapal tanker yang sesuai dengan persyaratan penyimpanan minyak mentah yang optimal. Maka jika tanker yang dipilih memiliki volume penyimpanan yang kurang dari volume penyimpanan yang disyaratkan frekuensi pembongkaran tanker dapat meningkat selama puncak produksi titik dan sebaliknya, kapal tanker yang sangat besar untuk peran FPSO dapat berdampak pada nilai ekonomisnya.

Umumnya, bentuk lambung konvensional dapat dirancang, dari pengalaman desain dan data yang memadai untuk memberikan kinerja gerakan yang baik dengan *down time* fasilitas produksi yang minim, serta fasilitas dengan gerak sensitif (desain separator, turbin gas, dll) yang efisien sehingga tidak memerlukan pemeriksaan rinci karakteristik gerak pada tahap desain awal.

Tujuan utama desain lambung pada FPSO adalah:

1. Keandalan

Desain lambung FPSO harus memperhitungkan fungsi FPSO yang lebih berat dibandingkan dengan kapal tanker. Pembebanan lambung yang meningkat akibat penyiangan di lingkungan yang ekstrem dan penghindaran cuaca dan efek lingkungan *non-collinear* merupakan indikator yang penting. Oleh karena itu, mengenai kasus keselamatan, lingkungan dan ekonomi untuk desain lambung harus tepat dan memenuhi nilai keandalan yang mana FPSO diperlakukan sebagai instalasi lepas pantai dan bukan sebagai kapal tanker pada umumnya.

2. Kinerja

Kinerja diukur dalam hal uptime FPSO secara keseluruhan yang terdiri dari *uptime* fasilitas produksi dan waktu kerja sistem ekspor serta

nilai ekonomi dari *downtime* cuaca ekstrem. Desain lambung (terutama melalui ukuran lambung) perlu meminimalkan *downtime* dengan menyediakan *platform* yang stabil untuk fasilitas produksi dan penyimpanan *buffer* yang cukup untuk mencakup kemungkinan jarak tempuh kapal tanker.

3. Fleksibilitas untuk ekspansi

Desain lambung harus mengenali kemungkinan kebutuhan masa depan untuk mengembangkan sumur yang memerlukan slot *riser* tambahan dan mungkin modul ekstra.

4. Desain untuk operasi

Desain lambung juga harus mengenali inspeksi insitu khusus dan kebutuhan pemeliharaan FPSO untuk penggunaan jangka Panjang.

Bentuk lambung FPSO harus dioptimalkan untuk menghasilkan desain ekonomi yang paling mungkin dalam batasan desain yang ada pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Parameter desain lambung utama dan dependensinya

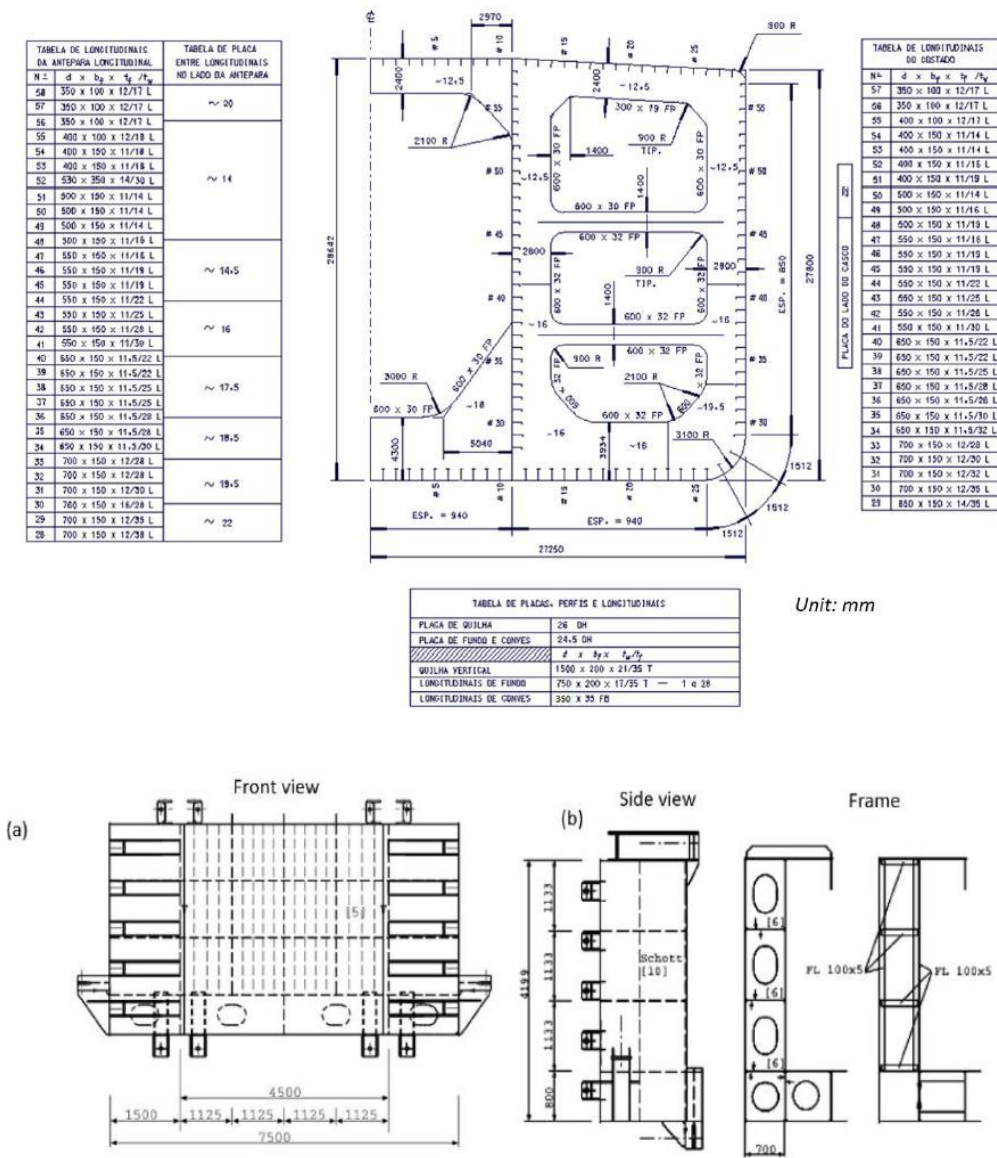
<i>Parameter</i>	<i>Function of</i>
<i>Hull steel weight</i>	<i>Length/depth ratio and size of hull</i>
<i>Deck space</i>	<i>Length and breadth</i>
<i>Stability</i>	<i>Breadth/length</i>
<i>Sea-keeping (Primary pitch)</i>	<i>Breadth/depth</i>
<i>Green water on deck</i>	<i>Freeboard</i>
<i>Bottom slamming forward</i>	<i>Ballast capacity</i>
<i>Bow wave impact</i>	<i>Bow fineness</i>

Sumber: [4]

Bobot keseluruhan perpindahan FPSO adalah fungsi berat baja berat dan bobot mati kargo minyak mentah. Biasanya berat baja lambung tidak termasuk *topside* adalah 13 sampai 16% perpindahan dan bobot mati sekitar 75% titik lambung kapal juga harus memiliki volume yang cukup untuk menampung penyimpanan minyak mentah dan tangki pemberat terpisah untuk mencapai jarak pemberat yang diperlukan dan menghindari

pergerakan yang berarti. Kapasitas pemberat adalah 35% perpindahan.

Secara umum, panjang lambung FPSO adalah dimensi yang paling mahal dan harus dikurangi semaksimal mungkin, namun konsisten dengan pencapaian ruang dek yang memadai seperti yang terlihat pada gambar 2.3. Luas harus dikurangi untuk menghindari beban *mooring* tinggi dan stabilitas yang berlebihan yang dapat menyebabkan percepatan rol tinggi, dalam batasan yang diberlakukan oleh stabilitas dan ruang dek titik keselarasan melambung harus seimbang antara meminimalkan beban gelombang dan meminimalkan berat baja lambung.



Gambar 2.3. Midship Kapal FPSO [9]

Lambung FPSO berfungsi seperti balok dan deformasi di bidang vertikal (distribusi bobot dan *bouyancy* yang tidak merata) dan pembuatan gelombang. Hal ini diperlukan untuk mempertimbangkan nilai ekstrem dari kedua jenis penguatan untuk mendapatkan nilai dari tegangan rata-rata pada dek dan bagian bawah. Untuk FPSO, kondisi ekstrem muatan menjadi beban penuh dalam tangki penyimpanan minyak mentah ditambah dengan gelombang yang mengenai panjang kapal dan bagian di tengah kapal.

2.4. Desain Struktur *Topside* dan Lambung FSO

Meskipun bentuk konstruksi lambung yang biasa digunakan sebagai kapal FSO (*Floating Storage and Offloading*) sama dengan bentuk lambung kapal tanker, namun terdapat beberapa perbedaan diantara keduanya, yaitu adanya tambahan fasilitas penunjang operasional di antaranya:

1. Menggunakan *external turret mooring system* pada haluan
2. Memiliki *helideck* sedekat mungkin dengan ruang akomodasi
3. Memiliki *man riding crane*
4. Memiliki *heavy duty deck crane* untuk menunjang operasional dan perawatan FSO
5. Memiliki *metering skid* untuk mengukur intensitas minyak yang masuk/keluar tangki
6. Memiliki pipa tersendiri khusus untuk menyalurkan minyak dari *flexible riser* menuju ke tangki- tangki ruang muat
7. Memiliki laboratorium untuk penelitian minyak mentah

FSO hanya digunakan sebagai tempat untuk menyimpan *crude oil*. *Crude oil* ini biasanya dari FPS (*Floating Production System*) atau FPU (*Fixed Processing Unit*) yang ditransfer ke FSO melalui *system submerged turret loading* (STL), Kemudian dipindahkan ke *shelter tanker* melalui *flexible hoses* pada bagian belakang FSO.

Adapun contoh kapal FSO (*Floating Storage and Offloading*) dapat dilihat pada gambar 2.4:



Gambar 2.4. Kapal FSO [10]

2.5. Tegangan yang Bekerja

Tegangan didefinisikan sebagai tahapan terhadap gaya-gaya luar. Ini diukur dalam bentuk gaya per satuan luas. Dalam praktek tegangan sering diberikan dua pengertian: (1) gaya per satuan luas, (2) tegangan total gaya adalah gaya total pada suatu bidang [11] .

Tegangan yang bekerja pada struktur kapal umumnya disebabkan oleh beban aksial dan beban lentur. Akibat dari beban-beban tersebut menghasilkan tegangan aksial dan tegangan lentur yang menyebabkan kelelahan pada struktur kapal.

Tegangan aksial (*axial stress*), adalah tegangan yang bekerja secara tegak lurus terhadap sumbu penampang.

Tegangan lentur (*bending stress*), adalah tegangan yang bekerja secara sesajar sepanjang balok dengan arah yang membujur.

Tegangan geser (*shear stress*), berbeda dengan tegangan tarik dan tekan dimana tegangan ini umumnya disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja secara transversal pada suatu batang.

Hubungan antara tegangan yang dihasilkan oleh suatu gaya (P) yang bekerja pada setiap luas satuan (A) mengalami tegangan yaitu:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Dimana: σ = Tegangan (N/mm²)

P = Gaya total (N)

A = Luas penampang batang (mm²)

Analisis tegangan metode numerik dengan bantuan *software* umumnya menggunakan tegangan ekuivalen atau yang biasa disebut dengan *Von Mises Stress*. Tegangan ekuivalen atau tegangan rata-rata (σ_e) ini dituliskan dengan bentuk sebagai berikut:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right]} \quad (2.2)$$

Dimana x , y , dan z menyatakan arah sumbu tegangan-tegangan pada setiap elemen yang bekerja. Secara umum mempertimbangkan adanya tekuk (*buckling*) dan luluh (*yielding*). Tegangan-tegangan yang bekerja terdistribusi pada setiap bagian/elemen konstruksi kapal FSO dan kapal FPSO termasuk besaran tegangan yang dihasilkan [12].

2.6. Beban-Beban yang Bekerja

Untuk setiap Kasus Beban, beban yang diterapkan yang digunakan untuk analisis struktur kapal harus mencakup bagian statis dan dinamis dari setiap komponen beban. Kasus Muatan menunjukkan efek gabungan dari beban dominan dan beban lain yang bekerja secara bersamaan pada struktur lambung termasuk tekanan gelombang eksternal, tekanan tangki internal dan beban inersia pada komponen dan peralatan struktur. Dalam menghitung bagian dinamis suatu beban, perlu mempertimbangkan berbagai kondisi laut, yang menghasilkan respons kritis yang dipertimbangkan dari struktur lambung. Kasus Beban yang dikembangkan kemudian digunakan dalam analisis struktur untuk menentukan tegangan yang dihasilkan dan efek beban lainnya di dalam struktur lambung [13].

Fasilitas produksi biasanya terletak pada dek produksi dan pada

umumnya diposisikan 2.5 m di atas dek utama. Hal ini bertujuan untuk meminimalisir *green water* (kejadian dimana geladak pada haluan kapal tersentuh oleh permukaan air laut) dan untuk meminimalisir efek yang terjadi ledakan atau api yang mengenai *module* agar tidak banyak memengaruhi lambung. *Topside Module* merupakan struktur yang berada di atas FPSO Terdapat beberapa module di atas *deck* FPSO, diantaranya adalah *export compressors module, gas processing module, gas cooling module, utility module, oil separation module*, dan lain-lain [14]. Untuk kapal FSO beban yang terdapat pada bagian dek kapal hanya beban geladak cuaca.

Beban dari struktur dan peralatan kapal FPSO terdiri dari komponen statis dan dinamis. Beban statis dihasilkan dari gaya gravitasi. Beban dinamis selanjutnya dapat diuraikan menjadi komponen statis dan inersia. Beban statik dihasilkan dari gravitasi, dengan mempertimbangkan kemiringan *roll* dan *pitch* sesaat kapal. Beban inersia dihasilkan dari percepatan lokal sesaat dari struktur dan peralatan kapal penerangan yang disebabkan oleh gerakan kapal dalam enam derajat kebebasan. Beban statis dan dinamis dari peralatan dan fasilitas sisi atas harus diterapkan ke struktur pendukung modul sisi atas yang terletak di dek utama instalasi [13].

a. Beban Geladak Cuaca (*Load on Weather Decks*)

Geladak cuaca merupakan semua geladak bebas terkecuali geladak tidak efektif yang terletak dibelakang 0,15 L dari garis tegak haluan (FP) [15]. Dimana beban geladak cuaca dapat dihitung dengan Persamaan 2.3.

$$P_D = P_o \frac{20 \times T}{(10 + z - T) \times H} \times C_D \tag{2.3}$$

Dimana: Satuannya adalah (N/mm²)

b. Beban Luar Sisi Kapal (*Load on The Ship's Side*)

Beban luar sisi kapal merupakan beban yang timbul karena adanya gelombang air laut yang menghempas sisi luar kapal [15]. Beban luar sisi kapal dibagi atas dua beban yaitu:

1. Beban luar sisi kapal di bawah garis muat air (P_{S_1})
2. Beban luar sisi kapal di atas garis muat air (P_{S_2})

$$P_{S_1} = 10 \times (T - z) + P_o \times C_f \left(1 + \frac{z}{T}\right) \quad (2.4)$$

$$P_{S_2} = P_o \times C_f \times \frac{20}{10 + z - T} \quad (2.5)$$

Dimana:

P_D = Beban geladak cuaca (N/mm²)

P_{S_1} = Beban luar sisi kapal di bawah garis muat air (N/mm²)

P_{S_2} = Beban luar sisi kapal di atas garis muat air (N/mm²)

P_o = *Basic external dynamic load* (N/mm²)

C_f = Faktor distribusi = C_D

z = Jarak tengah antara pusat beban dengan garis bawah (m)

T = Sarat kapal (m)

h_{db} = Tinggi *double bottom* (m)

H = Tinggi gelombang (m)

c. Beban Luar Alas Kapal (*External Load on The Ship's Bottom*)

Beban luar alas kapal merupakan beban yang terjadi atau timbul karena adanya tekanan dari pemindahan volume air oleh kapal [15]. Beban luar alas kapal dapat dihitung dengan Persamaan 2.6.

$$P_B = 10 \times T + P_o \times C_f \quad (2.6)$$

Dimana:

P_B = Beban luar alas kapal (N/mm²)

P_o = *Basic external dynamic load* (N/mm²)

$$C_f = \text{Faktor distribusi} = C_D$$

T = Sarat kapal (m)

d. Beban Geladak Muatan Kapal (*Load on Cargo Decks*)

Beban geladak muatan merupakan beban yang ditimbulkan karena adanya muatan pada geladak [15]. Beban geladak muatan ini dapat dihitung dengan Persamaan 2.7.

$$P_L = P_C(1 + a_v) \quad (2.7)$$

Dimana:

P_L = Beban geladak muatan (N/mm²)

P_C = Beban statik kapal (N/mm²)

a_v = Faktor distribusi = C_D

T = Sarat kapal (m)

e. Beban Alas Dalam Kapal (*External Load on The Ship's Bottom*)

Beban alas dalam kapal merupakan beban yang terjadi karena adanya tekanan beban dari dalam kapal [15]. Beban alas dalam kapal ini dapat dihitung dengan Persamaan 2.8.

$$P_i = 9,81 \times \left(\frac{G}{V}\right) \times h \times (1 + a_v) \quad (2.8)$$

Dimana:

G = Massa cargo di ruang palka (Ton)

V = Volume Ruang (m³) (Tidak termasuk palka)

h = Ketinggian titik tertinggi kargo di atas dasar dalam [m], dengan asumsi palka

a_v = Faktor distribusi = C_D

2.7. Analisis Kelelahan

Umur kapal disebabkan oleh respon spektrum tegangan dan *Response Amplitude Operator* (RAO). Respon spektrum tegangan merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan umur

kelelahan. Dari sudut pandang ini, dapat disimpulkan bahwa analisis beban tekuk kritis dan umur kelelahan merupakan aspek yang sangat penting dalam desain kapal FSO dan FPSO. Metode Elemen Hingga digunakan untuk menghitung kekuatan yang disebabkan oleh beban aksial dan lentur [16]. Di antara berbagai metode analisis, yang paling umum digunakan saat ini didasarkan pada elemen hingga. Elemen Hingga merupakan salah satu metode untuk menyelesaikan analisis struktur secara kompleks dan detail serta penggunaannya sudah berkembang [17]. Di sisi lain, metode analisis memerlukan analisis yang kompleks untuk mendapatkan solusi yang hasilnya mendekati yang diperoleh dengan menggunakan elemen hingga. Secara umum metode tersebut menyajikan perbedaan yang signifikan [18].

Finite Element Method (FEM) nonlinier yang dikembangkan yang dapat sepenuhnya mengakomodasi perilaku kabel dan tiang yang sangat nonlinier baik terkena beban statis atau beban dinamis. Formulasi elemen FEM yang mampu mensimulasikan deformasi besar diperkenalkan terlebih dahulu untuk elemen *truss*, kabel, dan *beam* [19]. Serangkaian analisis FEM telah menyelidiki perilaku elastis dan tekuk serta keruntuhan plastis dari ujung atas lambung kapal dari pelat lengkung yang tidak dikeraskan dan, berdasarkan hasil, formula sederhana telah diturunkan untuk menghitung tekuk dan kekuatan batas [20].

Kelelahan melewati tiga tahap: inisiasi, pertumbuhan lambat, dan timbulnya patahan yang tidak stabil. Retakan kelelahan biasanya berasal dari permukaan. Setelah retakan dimulai, retakan tumbuh perlahan pada siklus tegangan yang berulang, bahkan jika tingkat tegangan di bawah hasil. Dalam Struktur lepas pantai variasi tegangan siklik terutama disebabkan oleh gelombang dan beban angin [21]. Struktur baja yang dilas dan dikenakan beban siklik lebih kecil daripada yang menjadi dasar rancangan untuk menginisiasi *microscopic cracks* yang sedikit demi sedikit bertambah ukurannya sampai, setelah mengalami sejumlah siklus tertentu, *crack* tersebut menjadi cukup besar sehingga retak terjadi. Kegagalan struktur ini

diketahui sebagai fenomena kelelahan (*phenomenon of fatigue*). Dengan kata lain, kelelahan adalah proses akumulasi kerusakan siklus demi siklus dalam sebuah struktur yang dikenakan tegangan fluktuatif, menjalani beberapa tahapan dari inisial "*crack-free*" sampai pada tahapan "*Failure*". Parameter efek pembebanan yang paling penting adalah komponen tegangan yang berfluktuasi, seringkali disebut dengan stress range. Ada dua jenis berbeda dari kelelahan [7]:

1. *Low-cycle fatigue* terjadi untuk jumlah siklus rendah, kurang dari 5×10^3 , dalam rentang *plastic deformations*.
2. *High-cycle fatigue* terjadi untuk jumlah siklus tinggi dalam rentang *elastic deformations*.

Umumnya kelelahan yang terjadi pada struktur kapal adalah tipe kedua. Umur kelelahan dari sebuah sambungan yang dilas bergantung pada banyak faktor. Antara lain karakteristik material, cacat dan retak mikro, bentuk geometris las dan lainnya. Kerusakan akibat kelelahan pada struktur lepas pantai secara dominan disebabkan oleh beban gelombang. Tegangan yang disebabkan oleh beban ini selalu berubah arah dan besarnya serta berlangsung secara acak. Biasanya ketika bagian struktur yaitu *stiffener* membujur mengalami tekan, itu adalah sesuatu yang bagus. Struktur tersebut tidak akan gagal kecuali dengan menghancurkan atau melebihi kekuatan luluh tekannya. Kemudian kelelahan tidak terjadi untuk elemen dalam kondisi tertekan [22].

Sejumlah variabel-variabel lain yang menyebabkan kelelahan yang cenderung mengubah kondisi kelelahan, seperti korosi, suhu, kelebihan beban, struktur metalurgi, tegangan sisa dan tegangan kombinasi. Kelelahan merupakan pertimbangan untuk pembangunan rinci dari struktur yang bagian-bagiannya terdapat konsentrasi tegangan misalnya pada daerah pengelasan. Perhitungan kelelahan dilakukan untuk mendapatkan faktor keamanan yang harus dicapai oleh suatu struktur, selama struktur tersebut beroperasi sesuai dengan perencanaan.

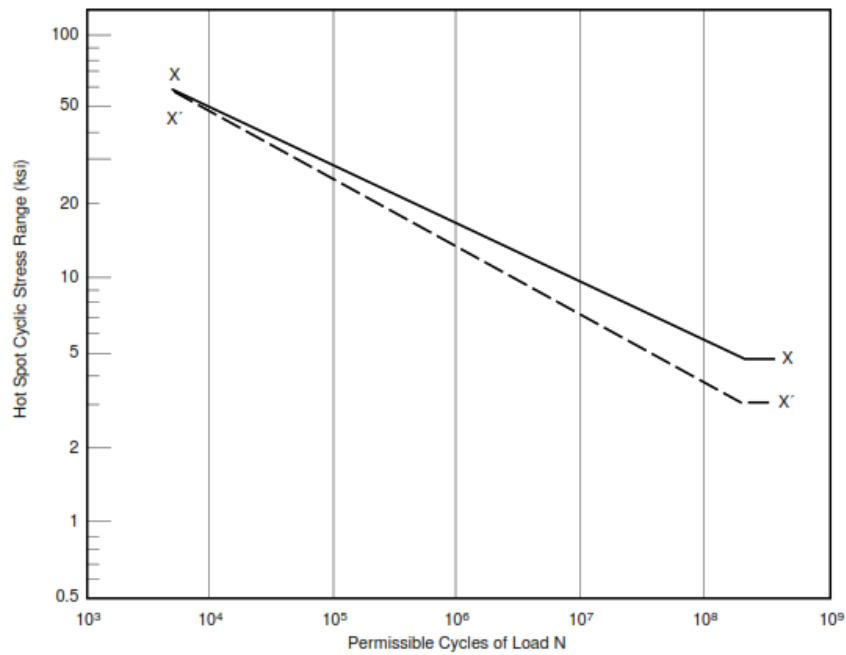
Analisis kelelahan dapat dilakukan dengan menggunakan dua metode berikut [5]:

1. Metode Deterministik. Dalam metode ini, energi laut merupakan simulasi menggunakan frekuensi diskrit dan gelombang tinggi dengan angka yang sesuai dengan karakteristik lokasi beroperasi. Tekanan struktur dan *hot spot* yang dihasilkan untuk masing-masing gelombang diskrit. Penjumlahan dari kerusakan kelelahan karena ini beban gelombang diskrit kasus kemudian dijumlahkan untuk mendapatkan total kerusakan selama umur struktur.
2. Metode Spektral. Metode ini menggunakan energi laut sebagai analisa spektrum yang digunakan terhadap fungsi transfer untuk respon struktur yang telah dikonversi. Fungsi transfer ini kemudian digunakan untuk menghasilkan tekanan *hot spot* pada *joint* tersebut.

2.8. Kurva S-N

Metode kurva S-N adalah pendekatan pertama yang digunakan dalam upaya untuk memahami dan mengukur kelelahan pada struktur. Kurva S-N adalah metode desain kelelahan standar selama hampir 100 tahun. Pendekatan S-N masih banyak digunakan dalam aplikasi desain di mana tegangan yang diterapkan adalah rentang elastis material dan umur yang dihasilkan untuk siklus kegagalan. Kurva S-N digunakan untuk menyatakan karakteristik kelelahan pada material yang mengalami pembebanan yang berulang pada *magnitude* konstan. Dimana N adalah jumlah siklus pada tegangan yang menyebabkan kerusakan pada struktur. Tingkat keyakinan akurasi penentuan kurva S-N dipengaruhi oleh parameter ini mempunyai ketidaktentuan. Kombinasi ketidaktentuan dari kedua parameter menjadikan ketidaktentuan total kurva S-N.

Dasar dari kurva S-N atau *Wohler curve* adalah plot dari *stress* (S) *versus* jumlah siklus (N). Kurva ini digunakan untuk menyatakan karakteristik kelelahan pada material yang mengalami pembebanan yang berulang pada *magnitude* konstan [23].



Gambar 2.5. Kurva S-N API [22]

Gambar 2.5 dapat dijadikan pendekatan untuk analisa kelelahan. Pada formulasi *fatigue S-N curves American Petroleum Institute Recommended Practice 2A-Working Stress Design* [24] untuk menganalisa umur kelelahan struktur bangunan lepas pantai akibat tegangan kerja yang dialami menggunakan persamaan:

$$N = 2 \times 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{ref}} \right)^{-m} \quad (2.9)$$

Dimana N adalah nilai siklus yang di izinkan untuk penggunaan siklus rentang tegangan $\Delta\sigma$ dengan $\Delta\sigma_{ref}$ dan m seperti pada penjelasan

Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Formulasi *fatigue S-N curves* [24]

Curve	$\Delta\sigma_{ref}$ Stress range at 2 million cycles	M inverse log-log slope	Endurance limit at 200 million cycles
X	14,5 ksi (100 MPa)	4,38	5,07 ksi (35 MPa)
X'	11,4 ksi (79 MPa)	3,74	3,33 ksi (23 MPa)

Tabel ini dapat digunakan untuk profil las terkontrol (*with weld profile control*) dan memiliki ketebalan cabang sambungan kurang dari 25 mm. Untuk profil las terkontrol yang sama tetapi ketebalannya lebih besar, perlu menggunakan efek skala. Kurva X' dapat digunakan untuk profil las tanpa kontrol (*without weld profile control*), tetapi sesuai dengan profil dasar standar pelat (ANSI/AWS) dan memiliki ketebalan cabang sambungan kurang 16 mm. Dalam penelitian ini terfokus dengan menggunakan kurva X dimana semua profil las dalam kondisi terkontrol.

2.9. Metode Palmgren-Miner

Kerusakan akibat kelelahan pada struktur lepas pantai secara dominan disebabkan oleh beban gelombang. Tegangan yang disebabkan oleh beban ini selalu berubah arah dan besarnya berlangsung secara acak. Tegangan ini terbagi menjadi variasi pengelompokan tegangan yang secara kumulatif mengakibatkan total kerusakan kelelahan. Gesekan pada umur kelelahan diasumsikan oleh *stress range* yang diberikan dalam satu tahun didefinisikan oleh [25] sebagai perbandingan jumlah siklus dalam stress range itu yang menyebabkan kerusakan [26]. Total kerusakan per tahun yang diberikan oleh jumlah gesekan pada umur pakai (*consume life*) adalah sebagai berikut [16]:

$$D = \sum_i^k \frac{n_i}{N_i} \quad (2.10)$$

Dimana:

n_i = Jumlah siklus kegagalan

N_i = Jumlah siklus kegagalan yang diizinkan

k = Jumlah total dari interval-interval rentangan tegangan

D = Rasio kerusakan jumlah kumulatif

2.10. Response Amplitude Operator (RAO)

Akibat adanya gelombang regular, struktur memberikan respon berupa gerakan (*motion*). Sebelum menghitung gerakan terlebih dahulu dihitung gaya yang bekerja pada struktur. Ada beberapa teori untuk

menghitung gaya gelombang yang mengenai struktur seperti teori Morrison, difraksi, dan strip. Meskipun rumus matematik dari teori-teori ini berbeda satu sama lain, semua teori tersebut menghitung hal yang sama yaitu gaya eksitasi, beban tambahan, dan redaman pada struktur sebagai fungsi dari frekuensi dan *heading*. Jika persamaan gerak diselesaikan per satuan amplitude gelombang, maka didapatkan sejumlah nilai yang disebut *Response Amplitude Operator* (RAO).

$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)} \quad (2.11)$$

Dimana, $X_p(\omega)$ = amplitude struktur (mm)

$\eta(\omega)$ = amplitude gelombang (mm)

Sedangkan fungsi respon pada frekuensi gelombang dapat ditulis sebagai berikut [8]:

$$\text{Respon}(\omega) = (RAO)\eta(\omega) \quad (2.12)$$

Dimana, η = Amplitude struktur (mm)

ω = Frekuensi sudut (rad/detik)

RAO sering disebut sebagai fungsi transfer karena RAO mentransfer beban luar (gelombang) menjadi suatu respon pada struktur. Dalam perhitungan RAO, gelombang dianggap regular dan sejumlah frekuensi digunakan untuk mencakup keseluruhan rentang frekuensi yang ada pada spektrum gelombang.

Menurut [2], respon gerakan RAO terbagi menjadi dua yaitu:

1. Respons gerakan RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitude gerakan *disbanding* dengan amplitude gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang)
2. Respons gerakan RAO untuk gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitude gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni yang merupakan perkalian antara gelombang

$(k_w = \frac{\omega^2}{g})$ dengan amplitudo gelombang insiden.

2.11. Spektrum Gelombang

Keadaan laut ditentukan oleh tinggi gelombang signifikan, periode gelombang signifikan, periode puncak, dan arah gelombang. Pengumpulan data dilakukan dengan investigasi visual dan observasi instrumental dengan pelampung, radar, laser, dan satelit. Keadaan laut, dalam jangka pendek, yang biasanya 3 jam, diasumsikan sebagai proses Gaussian ergodik rata-rata nol. Ini dapat ditentukan sepenuhnya oleh spektrum gelombang. Untuk Laut Utara, spektrum JONSWAP direkomendasikan. Untuk kondisi laut terbuka, disarankan menggunakan spektrum Pierson Moskowitz (PM). Dalam jangka panjang, variasi keadaan laut lebih lambat daripada fluktuasi jangka pendek. Hal ini sering didekati dengan serangkaian proses Gaussian yang tidak bergerak dan rata-rata, yang ditentukan oleh tinggi gelombang signifikan (H_s) dan periode gelombang puncak (T_p). Berikut adalah beberapa spektrum yang relevan, dapat diterapkan dalam desain anjungan lepas pantai [27]. Hal tersebut dapat diungkapkan melalui teori gelombang dan persamaan Morrison. Terlihat bahwa beban gelombang dan arus berubah secara berkala, dan memiliki nilai maksimum pada periode $\frac{3}{4}$ [28].

Spektrum gelombang menggambarkan distribusi energi dari frekuensi yang berbeda dari laut suatu negara. Spektrum harus dipilih berdasarkan karakteristik frekuensi lingkungan gelombang [27].

a. Spektrum Pierson Moskowitz Untuk Beban Gelombang

Spektrum Pierson Moskowitz adalah salah satu spektrum parameter dan digunakan untuk kondisi laut yang berkembang penuh yang dihasilkan oleh angin yang relatif moderat pada tarikan yang besar.

$$S^+(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^{-4} \right] \quad (2.13)$$

Dimana, α adalah konstanta phillips $\cong 0,0081$

b. Modifikasi Spektrum Pierson Moskowitz (2 Parameter H_s, ω_o)

Ini adalah spektrum dua parameter yang dikembangkan untuk memperhitungkan tinggi gelombang. Spektrum ini cocok untuk kondisi

laut yang berkembang sepenuhnya dan biasanya digunakan untuk menggambarkan gelombang badai tropis yang ditimbulkan oleh angin topan. Ini memiliki *bandwidth* frekuensi yang lebih besar.

$$S^+(\omega) = \frac{5}{16} H_s \frac{\omega_o^4}{\omega^5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^{-4} \right] \quad (2.14)$$

c. Spektrum ISSC (*International Ship Structures Congress*) (2 Parameter H_s, ϖ)

Spektrum ISSC merupakan modifikasi kecil dari spektrum Bretschneider dan direkomendasikan untuk kondisi laut yang berkembang sepenuhnya. Persamaan spektral ini berlaku hanya untuk spektrum berpita sempit dan ketinggian gelombang mengikuti distribusi Gaussian.

$$S^+(\omega) = 0,1107 H_s \frac{\omega^{-4}}{\omega^5} \exp \left[-0,4427 \left(\frac{\omega}{\varpi} \right)^{-4} \right] \quad (2.15)$$

$$\varpi = \frac{M_1}{M_0}$$

Dimana, M_1 dan M_0 adalah momen spectral

d. Spektrum JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) (5 Parameter $H_s, \omega_o, \gamma, \tau_a, \tau_b$)

Spektrum JONSWAP adalah bentuk modifikasi dari spektrum PM dan direkomendasikan untuk digunakan dalam analisis keandalan. Spektrum ini hanya berlaku untuk pengambilan terbatas dan digunakan untuk menggambarkan gelombang badai musim dingin di Laut Utara.

$$S^+(\omega) = \frac{\bar{\alpha} g^2}{\omega^5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^{-4} \right] \gamma^{a(\omega)} \quad (2.16)$$

Dimana γ adalah parameter puncaknya. Nilai 3,3 menghasilkan spektrum rata-rata untuk kecepatan angin tertentu dan panjang tarikan tertentu. Variasi dari puncaknya parameter tergantung pada durasi angin dan tahap pertumbuhan dan kerusakan badai.

$$\alpha(\omega) = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\bar{\sigma}^2 \omega_0^2}\right] \quad (2.17)$$

Dimana, $\bar{\sigma}$ adalah parameter lebar spektral dan bentuk parameter yang diperoleh dari:

$$\bar{\sigma}_a = 0,07; \omega \leq \omega_0 \quad (2.18)$$

$$\bar{\sigma}_b = 0,09; \omega > \omega_0 \quad (2.19)$$

Dengan konstanta Phillips yang dimodifikasi diberikan oleh:

$$\bar{\alpha} = 3,25 \times 10^{-3} H_s^2 \omega_0^4 [1 - 0,287 \ln(\gamma)] \quad (2.20)$$

$$\gamma = 5 \quad \text{untuk} \quad \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3,6 \quad (2.21)$$

$$= \exp\left[5,75 - 1,15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}\right] \quad \text{untuk} \quad \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} > 3,6 \quad (2.22)$$

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (2.23)$$

Dimana, Variasi γ dari 1 sampai 7

2.12. *Stress Response Spectra*

Response spectra didefinisikan sebagai respon kerapatan pada struktur akibat gelombang, dalam hal ini berupa *energy density spectrum*. Untuk sistem linear, fungsi dari RAO merupakan fungsi kuadrat. Persamaan dari *response spectra* adalah sebagai berikut [8]:

$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \quad (2.24)$$

Dimana, S_R = Spektra gelombang, mm²/detik

$S(\omega)$ = Spektrum gelombang, mm²/detik

RAO = *Response Amplitude Operator*, N/mm

ω = Frekuensi sudut, rad/detik

Response spectra dapat digunakan untuk mengetahui besar respon maksimum yang mungkin terjadi dalam suatu rentang waktu tertentu. Setelah spektrum tegangan didapat langkah selanjutnya dalam mencari umur kelelahan (*fatigue life*) dengan cara di bawah ini:

Mencari *zero moment* dan *second moment*, semuanya didapat dari

perhitungan spektrum tegangan (*stress*) yaitu:

$$m_o = \int_0^\infty S_R(\omega) d\omega \quad m_2 = \int_0^\infty \omega^2 S_R(\omega) d\omega \quad (2.25)$$

Mencari *mean zero crossing period* pada tegangan:

$$T_{z\sigma} = 2\pi \sqrt{\frac{m_o}{m_2}} \quad (2.26)$$

Stress significant

$$\sigma = \sqrt{4m_o} \quad (2.27)$$

Mendapatkan tegangan amplitudo efektif

$$\sigma_{eff} = 0,776 \times \text{Stress Significant} \quad (2.28)$$

Menentukan nilai *stress range* dan *number of cycle* kegagalan S-N

$$n = \frac{T}{T_{z\sigma}} \quad (2.27)$$

Setelah itu umur kelelahan (*fatigue life*) bisa didapatkan dari Persamaan Miner [29] :

$$D = \sum \frac{n}{N_i} \quad (2.29)$$

Fatigue Life

$$FL = \frac{1}{D}, \quad D \text{ adalah perhitungan untuk satu tahun} \quad (2.30)$$

Dimana, T = Periode dalam 1 tahun (s)

$T_{z\sigma}$ = Periode *mean zero crossing* (s)

n = Jumlah dari siklus

σ_{eff} = Tegangan amplitude efektif (N/mm²)

N_i = Jumlah dari siklus berdasarkan kurva S-N

D = *Fatigue Damage* untuk kondisi *sea states*

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini termasuk penelitian kuantitatif. Penelitian kuantitatif yaitu penelitian yang menggunakan angka, mulai dari pengumpulan data, penafsiran terhadap data tersebut, serta menampilkan hasil dari studi kasus mengenai kelelahan yang terjadi pada kapal FSO menjadi FPSO untuk mendapatkan nilai dari umur kapal FSO sebelum dan sesudah dikonversi menjadi FPSO dengan menggunakan nilai tegangan rata-rata (*Von Mises Stress*) melalui metode numerik dan diolah dengan spektrum gelombang JONSWAP.

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di *Ocean Structure Analysis Research Laboratory* (OSAREL) Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa dengan waktu penelitian dilaksanakan dari bulan Januari 2021 sampai dengan bulan April 2021.

3.3 Penyajian Data

Data pada penelitian ini menggunakan data konversi kapal FSO yang sebelumnya adalah milik SANTOS (SAMPANG) PTY. LTD menjadi FPSO milik PERTAMINA, dengan ukuran utama sebagai berikut:

Panjang kapal, L	: 181,61	m
Lebar kapal, B	: 30	m
Tinggi kapal, D	: 18,40	m
<i>Type of material</i>	: H36	
<i>Elastic modulus</i>	: 210000	N/mm ²
<i>Density</i>	: 7,7 x 10 ⁻⁵	N/mm ³
<i>Yield strength</i>	: 355	N/mm ²
Rasio Poisson	: 0,33	

Serta konfigurasi penampang dari FSO seperti pada Lampiran Gambar 1.