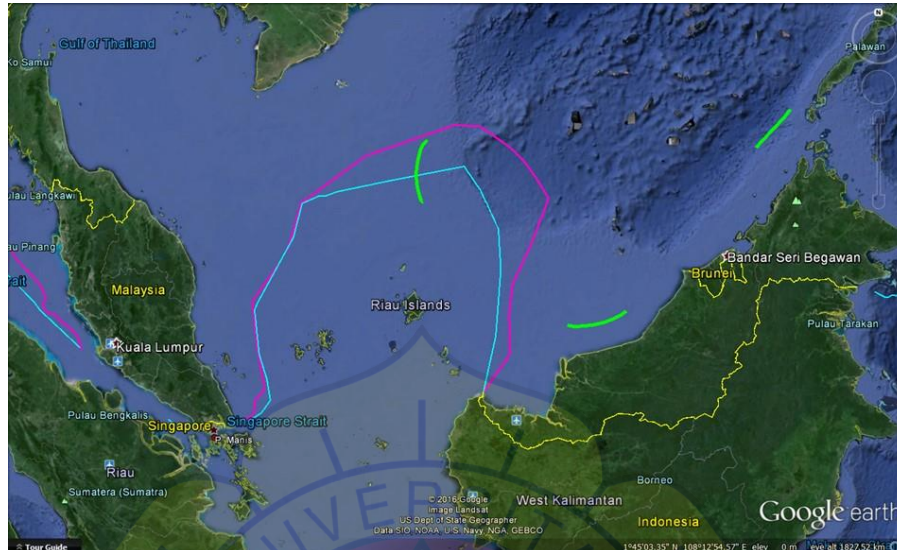


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Laut Natuna



Sumber: Google Earth.com

Gambar 2. 1 Laut Natuna

Kepulauan Natuna merupakan kepulauan paling utara di selat Karimata dan merupakan yang pulau terletak diujung utara Indonesia dengan jarak lebih dari 1.250 km dari Jakarta dan terletak diteras depan Negara Kesatuan Republik Indonesia(Undang-Undang No.53 tahun 1999). Kepulauan Natuna terkenal dengan penghasil minyak dan gas terbesar di kawasan Asia Pasifik bahkan terbesar di Dunia. Hal ini merujuk pada salah satu ladang gas *D-Alpha* yang terletak 225 kilometer (km) sebelah utara Pulau Natuna (di ZEEI). Natuna diselimuti minyak bumi yang seolah tiada pernah ada habisnya. Kepulauan Natuna tersimpan total cadangan gas alam 112.356.680 barel, dengan volume sebesar 222 *Trillion Cubic Feet* (TCT). Sumur-sumur *offshore* yang berada di bagian timur Natuna itu terus memancarkan minyaknya. Cadangan minyak bumi Natuna diperkirakan mencapai 14.386.470 barel.

#### 2.2 *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO)

##### 2.2.1 *Pengertian Floating Production Storage and Offloading* (FPSO)

Menurut Helmidadang (2012) FPSO adalah struktur *monohull* apung atau hasil konversi kapal tanker yang berfungsi untuk tempat menyimpan minyak

dan dilengkapi fasilitas pengolahan minyak serta terletak diantara daerah perbatasan lepas pantai yang bertujuan untuk memudahkan ekspor dan menyimpan minyak tanpa infrastruktur pipa lokal dan biasanya kapal FPSO ini berlabuh untuk waktu yang lama.

Menurut Johan Avianto (2012) FPSO merupakan salah satu bangunan pengerboran lepas pantai yang berfungsi untuk menyimpan minyak yang bersifat *portable* yang berarti dapat berpindah-pindah tempat. Biasanya produk yang dihasilkan dari kapal FPSO berupa *crude oil*, air dan gas. Ciri umum kapal FPSO adalah

- Konstruksi gading cenderung lebih kuat dibanding kapal yang ukurannya sama dengannya dikarenakan beban diatas *deck* yang di desain sebagai pengolah hasil eksplorasi.
- Tempat akomodasi cenderung lebih besar karena diperkirakan terdapat  $\pm 300$  orang yang tinggal dalam kapal FPSO untuk pengoperasian kapal dan pengolahan minyaknya.



Sumber: Modec.com

Gambar 2. 2 FPSO (Floating Production Storage and Offloading)

### 2.2.2 Cara kerja kapal FPSO

Menurut Johan Avianto (2012) minyak yang dihasilkan pada *platform* didistribusikan dengan kapal *tanker* yang nantinya difungsikan bukan hanya sebagai pengangkut minyak tetapi juga sebagai tempat menyimpan minyak. Dalam

hal ini seringkali kapal yang digunakan adalah kapal *tanker* yang sudah nonaktif yang modifikasi dan dilengkapi fasilitas untuk menghubungkan kapal dengan *mooring bouy* yang terletak di buritan yang nantinya memudahkan kapal *tanker* nonaktif ini untuk melakukan transfer minyak pada kapal *tanker* lain.

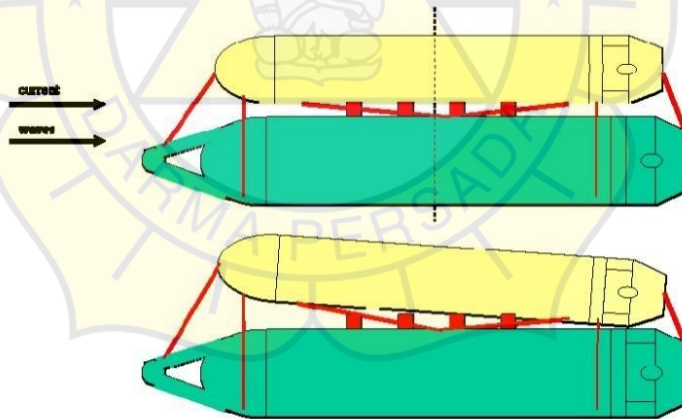
Ada dua jenis kapal FPSO yaitu kapal tanker yang dialih fungsikan untuk tujuan FPSO dan kapal FPSO yang dibangun dengan desain kapal FPSO pada semestinya tetapi bergantung pada daerah operasinya.

### 2.2.3 System offloading pada kapal FPSO

Menurut Mega Ayu Nurfitriana (2016) *System Offloading* (pemindah muatan) antara FPSO dengan kapal tanker (*shuttle tanker*) sebagai berikut:

#### A. Side by side Offloading

Sesuai dengan arti namanya, maka kapal FPSO ini melakukan *offloading* dengan cara bersisian antara kapal FPSO dengan kapal *tanker* yang akan dimuat. Pada sistem ini tentu harus memperhatikan faktor gelombang dan arus agar tidak terjadi tabrakan dan terputusnya sambungan saat melakukan *offloading* antar kapal.



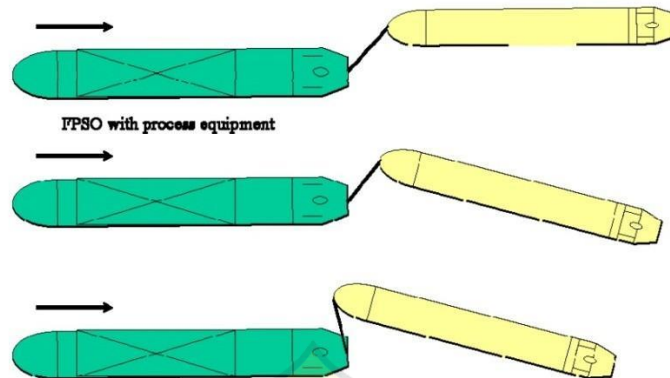
Sumber: Jurnal Sistem *Offloading* Antara FPSO dan Tanker (Aditya Hasmi Nurreza:2018)

Gambar 2. 3 Side by Side Offloading

#### B. Tandem Offloading

Proses *offloading* yang dilakukan dengan cara menghubungkan *hawser rope* antara belakang kapal FPSO dengan bagian depan *tanker* yang akan dimuat. Dalam system ini tentu memiliki resiko kegagalan yang lebih kecil

dibandingkan dengan *system side by side* tetapi beban lingkungan seperti gelombang tetap akan menjadi perhatian agar sambungan *offloading* tidak terputus antar kapal.



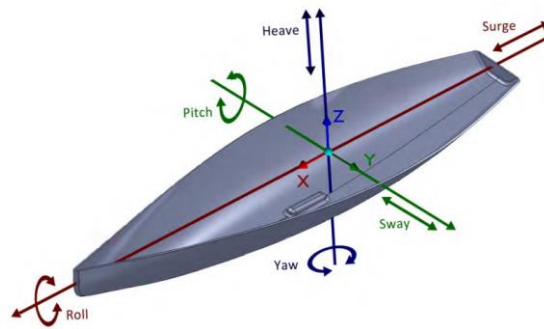
Sumber: Jurnal Sistem *Offloading* Antara FPSO dan Tanker (Aditya Hasmi Nurreza:2018)

Gambar 2. 4 Tandem *Offloading*

### 2.3 Moda Gerak Struktur Terapung

Gerakan *Floating Body* diperairan bergelombang terdiri atas 3 gerakan Translational ( terhadap sumbu  $x, y, z$  ) dan 3 gerakan Rotational ( terhadap sumbu  $x, y, z$  ). Ada 3 gerakan asli dari kapal yaitu: *heave, roll, dan pitch*. Gerakan ini dipengaruhi *Restoring Force* ( gaya pengembali ) atau momen saat struktur terapung ( dalam bentuk kapal ) dipengaruhi dari posisi setimbangnya. Gerakan yang lain tidak dapat mengembalikan kapal pada posisi setimbang, selain itu tidak adanya pengaruh dari *Exciting Force* ( gaya luar ) atau momen yang menyebabkan aktivitas gangguan dari arah kebalikanya ( Bhattacharya, 1978 ).

Gerakan kapal di laut lepas sangat penting untuk diprediksi. Macam gerakan osilasi pada kapal memiliki enam derajat kebebasan yaitu *Surging, Swaying, Heaving, Rolling, Pitching, Yawing*. Enam derajat kebebasan dapat dibedakan menjadi dua macam mode gerak, yaitu Translasiional dan Rotasiional. ( Bhattacharya, 1978 )



Sumber: Bhattacharya, 1978

Gambar 2. 5 Moda gerak struktur apung

Mode gerak osilasi translasional :

- *Surging* : Gerak osilasi translasi pada sumbu-x
- *Swaying* : Gerak osilasi translasi terhadap sumbu-y
- *Heaving* : Gerak osilasi translasi terhadap sumbu-z

Mode gerak osilasi rotasional :

- *Rolling* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-x
- *Pitching* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-y
- *Yawing* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-z

## 2.4 Mooring System

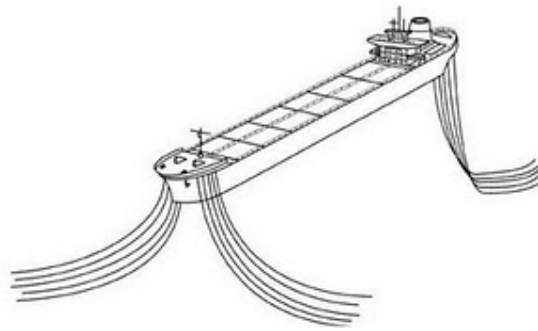
### 2.4.1 Pengertian Mooring System

Sistem tambat (*mooring System*) adalah salah satu cara yang digunakan struktur apung untuk meredam pergerakan yang disebabkan oleh beban lingkungan dengan cara menambatkan pada tali tambat (*Mooring Line*) untuk mempermudah proses *weathervaning*. (M Iqbal Afdhal, Untung Budiarto, Imam Pujo Mulyatno,2019)

### 2.4.2 Jenis-jenis Mooring System berdasarkan Model Tambat

#### A. *Spread Mooring*

Menurut Dian Fiddini Mahanani (2017) *Spread Mooring* merupakan system tambat yang dipasang dibagian *bow* dan *stern* kapal FPSO menggunakan *multiple mooring legs* agar kemungkinan kapal bergerak/berputar karena efek lingkungan seperti gelombang,angin dan arus relatif kecil. Tetapi hasilnya mengakibatkan beban lingkungan terhadap kapal yang besar.



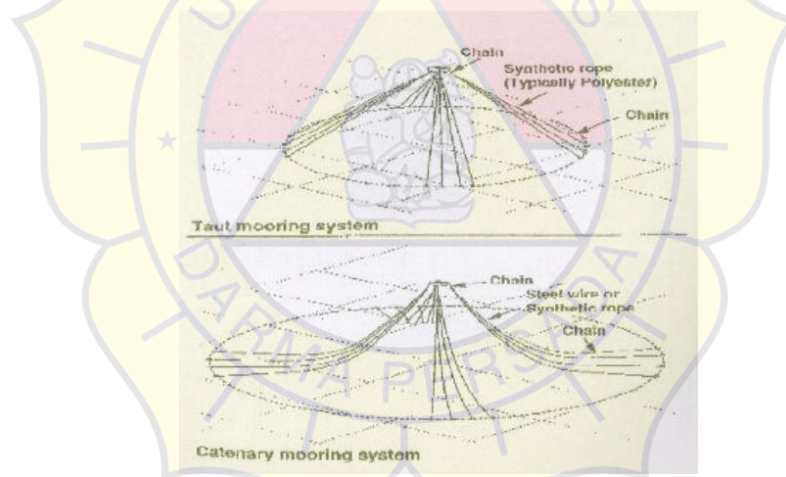
Sumber: (Dian Fiddini Mahanani,2017)

Gambar 2. 6 Spread Mooring

Untuk *Spread Mooring system* dibagi menjadi 2 kelompok yaitu:

- *Catenary mooring*
- *Taut mooring*

Penyebab bentuk *mooring line* yang landai adalah berat *wire rope* atau rantainya. Sehingga mengakibatkan bentangan *mooring line* dari kapal FPSO hingga ke jangkar (*seabed*) tidak tegang tetapi renggang.



Sumber: (Dian Fiddini Mahanani,2017)

Gambar 2. 7 Catenary Mooring & Taut Mooring

### **B. Turret Mooring**

Sistem yang menghubungkan *turret* berupa bearing pada kapal FPSO yang memungkinkan kapal FPSO dapat berputar untuk *weathervaning* (kemampuan berputar nya kapal untuk mencari posisi untuk mendapatkan nilai beban lingkung terkecil pada tali tambat). Sistem *turret* ini memiliki 3 jenis sistem yaitu *internal turret mooring system*, *external turret mooring system*, dan *disconnect turret mooring system*. Yang membedakan adalah

tinggi gelombang, arus, angin, ukuran kapal, dan kedalaman air minimum.  
(Rizki Amalia Prasiwi, Imam Rochani, Dkk, 2013)



Sumber: Sofec.com

Gambar 2. 8 Turret Mooring

### C. Tower Mooring

Sistem yang menggunakan *tower* dengan *temporary hawser* dan terletak di perairan dangkal tetapi berarus kuat.



Sumber: INAMEQ.com

Gambar 2. 9 Tower Mooring

### D. Buoy Mooring

Sistem tambat yang menggunakan *mooring point* yang ditambatkan pada kapal. Komponen-komponennya antara lain:

- *Buoy Body*, sebagai penyedia stabilitas dan buoyancy
- Komponen *mooring* dan *anchoring*, menghubungkan *buoy* dengan *seabed* / jangkar

- *Hawser* menghubungkan *buoy* dengan kapal *Product Transfer System*, *Auxiliary System*, *boatlanding*, *lifting*, dan lain sebagainya.



Sumber: Seakong.com

Gambar 2. 10 *Bouy Mooring*

### 2.4.3 Jenis *Mooring System* berdasarkan kategori bahan

*Mooring system* berdasarkan kategori bahan yang dipakai pada kapal FPSO terbagi menjadi 3 macam (API-RP2SK,2005) yaitu:

#### A. *Wire Rope*

*Wire Rope* adalah *Mooring Line* yang keseluruhannya berbahan Tali Kabel yang tentu lebih ringan daripada rantai. *Wire rope* pada umumnya memiliki tegangan awal (*Pretention*) yang rendah daripada rantai. Untuk bahan ini juga diperlukan *wire rope* yang sangat panjang agar *anchor* didasar laut tidak mudah terangkat. Untuk kelemahan *wire rope* sendiri ialah diperlukan perawatan yang sangat hati-hati serta korosi yang disebabkan oleh kerusakan mekanik atau kurangnya pelumas.

#### B. *Chain*

*Chain* merupakan *mooring line* yang memiliki daya tahan lebih terhadap korosi laut dan memiliki daya cengkram *anchor* yang baik pula. Tetapi dibalik keunggulan tersebut, *Chain* memiliki berat yang besar sehingga tidak cocok terlalu cocok digunakan pada kondisi perairan laut dalam.

#### C. Kombinasi *Chain* dan *Wire Rope*

Kombinasi ini didapatkan jika pemilihan panjang antara *Wire Rope* dan *Chain* tepat. Dengan menggabungkan ini menghasilkan daya tahan



yang lebih besar terhadap korosi laut dan cocok digunakan untuk perairan laut dalam. Selain itu, menghasilkan nilai *pretension* rendah, *retoring force* tinggi serta *holding anchor* yang besar.

#### 2.4.4 Tegangan *Mooring*

Menurut Popov (1984) Tegangan adalah gaya yang bekerja pada permukaan yang sangat kecil pada suatu bagian dan terdiri dari besaran dan arah yang berbeda. Gaya-gaya dalam ini bersifat vektor dan menjaga keseimbangan terhadap gaya-gaya luar yang bekerja padanya. Secara umum, besarnya gaya yang bekerja pada bidang penampang yang sangat kecil bervariasi dari titik ke titik, umumnya besarnya miring pada bidang penampang. Untuk Perhitungan Berat dan ukuran rantai sudah diatur dalam *rules ABS (American Bureau of shipping) MVR Part 3 Chapter 5 Section 1*. Dalam rumus ini dicari nilai *Equipment Number (EN)* terlebih dahulu dan nantinya dari nilai EN ini diketahui berat dari rantai kapal.

#### 2.4.5 Rengangan *Mooring*

Menurut Popov (1984), Perpanjangan per satuan luas disebut regangan, yang merupakan besaran tak berdimensi, tetapi lebih baik diberi dimensi meter/meter atau m/m. terkadang Regangan diberikan sebagai persentase. Besarnya regangan ( $\epsilon$ ) sangat kecil, kecuali beberapa bahan seperti karet. Jika regangan diketahui, regangan total akibat beban aksial adalah  $\epsilon L$ . Hubungan ini berlaku untuk setiap panjang pengukur sampai terjadi deformasi lokal dalam skala yang cukup besar.

### 2.5 *Anchor*

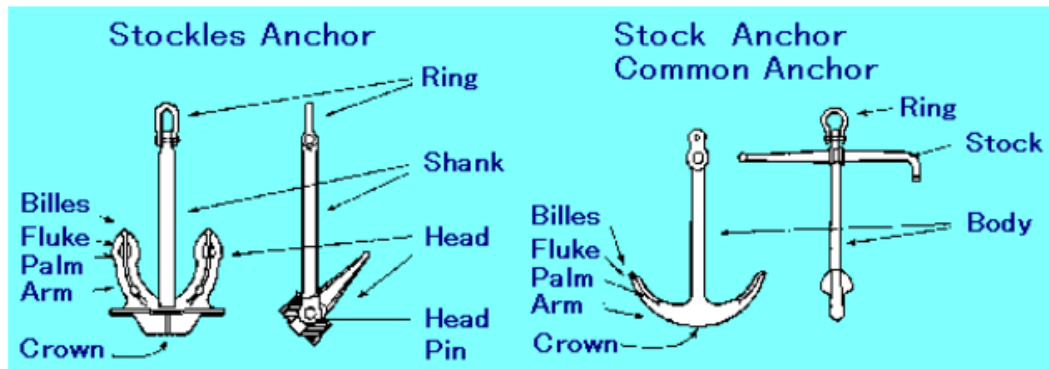
#### 2.5.1 Pengertian *Anchor*

Jangkar atau *anchor* adalah alat penambat kapal yang diturunkan ke dasar perairan agar kapal tidak mudah berpindah karena angin, arus atau gelombang yang terjadi saat jangkar di turunkan. (Capt. Basukarno, MM, 2013)

Fungsi lain dari *anchor* atau jangkar adalah

- ✚ Untuk mencegah tubrukan
- ✚ Untuk menahan kapal terhadap gelombang besar
- ✚ Untuk mencegah kandasnya kapal.

### 2.5.2 Bagian-Bagian pada Anchor



Sumber: Capt. Basukarno, MM: 2013

Gambar 2. 11 Bagian-Bagian pada Anchor

- A. *Arm* (lengan) – bagian dari jangkar membentang dari ujung jangkar (*crown*) akhir dari batang jangkar (*shank*) menghubungkan ke telapak jangkar (*palm*)
- B. *Band* – Logam melingkar mengamankan dua bagian dari stok kayu bersama-sama dengan batang jangkar (*shank*)
- C. *Bill* – sangat ujung, akhir dari lengan jangkar (*palm*)
- D. *Crown* (Mahkota) – ujung runcing akhir dari jangkar yang menghubungkan batang jangkar (*shank*) dengan lengan.
- E. *Eye* (mata) – lubang di akhir batang jangkar (*shank*) yang mana cincin terpasang.
- F. *Fluke* – bentuk sekop bagian dari lengan jangkar (*arm*) yang digunakan untuk menggali dasar laut untuk mengamankan kapal.
- G. *Palm* – bagian datar paling atas sebagian bagian dari sekop (*fluke*)
- H. *Ring* – bagian jangkar dimana tali atau rantai melekat menghubungkan jangkar ke kapal.
- I. *Shank* - batang tegak dari jangkar
- J. *Stock* – lintas bar jangkar yang mengubah jangkar menjadi bersifat dimana memungkinkan sekop pada jangkar (*fluke*) untuk menggali ke dasar laut.

### 2.5.3 Berat dan ukuran anchor

Berat dan ukuran rantai serta anchor sudah diatur dalam *rules ABS* (*American Bureau of shipping*) MVR Part 3 Chapter 5 Section 1. Dalam rumus ini dicari nilai *Equipment Number* (EN) terlebih dahulu dan nantinya dari nilai EN ini diketahui berat dari rantai dan jangkar kapal.

## 2.6 Analisis Dinamis

Analisis Dinamis dilakukan untuk memperhitungkan respon dinamis tali tambat dan *anchor* pada kapal FPSO. Yang diikut sertakan dalam analisis dinamis ini meliputi massa tali tambat, redaman, dan percepatan relatif fluida yang menghasilkan variasi waktu dalam analisis dinamis. Dalam hal ini, pergerakan tali tambat dihitung dari pergerakan *Surge, Sway, Pitch, Roll, Heave* dan *Yaw* dari kapal FPSO. Berdasarkan DNV OS E301 (2021) metode untuk analisa dinamis pada kapal FPSO dibagi menjadi 2 macam, yaitu:

a) *Frequency Domain Analysis*

Adalah analisa dengan simulasi kejadian dengan interval frekuensi yang telah ditentukan sebelumnya. Metode ini digunakan untuk mengetahui repon gelombang seperti gerakan dan percepatan bangunan apung, gaya tendon dan sudut.

b) *Time Domain Analysis*

Adalah analisa dengan berdasarkan fungsi waktu. Metode ini dilakukan dengan integrasi waktu dan menghasilkan *time history response*. *Time Domain Analysis* digunakan untuk menganalisa tali tambat dibawah frekuensi gelombang yang tentunya membutuhkan waktu yang lama dalam menganalisanya. Dalam hal ini dibutuhkan *time history* yang nantinya menghasilkan *Tension* atau tegangan maksimum, beban jangkar dan lain-lain. Menurut DNV OS E301 minimal analisa *time domain* yaitu 3 jam atau 10800 sekon.

Hasil dari analisis dinamis didapatkan berupa *heading* yang nantinya digunakan untuk analisa kapal terhadap beban lingkungan. Hasil yang biasa didapat berupa *heading* 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315° dan 360°. *Heading* pada umumnya yang dimana beban lingkungan untuk *heading* 0° berarti beban tersebut datang dari arah 0°, tetapi untuk kasus *floating structure* (FPSO) beban lingkungan untuk *heading* 0° berarti beban tersebut datang menuju arah 0° (berlawanan arah dengan *heading* pada umumnya), begitu pula untuk *heading* 45°, 90°, 135° dan 180°. (API RP 2SK:2005)

*Heading* ini juga berkaitan erat dengan derajat penyebaran *mooring* serta jumlah *mooring* yang digunakan. *Heading* yang biasa digunakan untuk derajat

penyebaran *mooring* serta menentukan jumlah *mooring* seperti  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $315^\circ$  untuk 4 *mooring*, jika *mooring* diatas 4 seperti 8 dan 12 maka jarak antara *mooring* sebesar  $10-30^\circ$  yang dihitung dari *heading*. Untuk posisi penyebaran *mooring* itu sendiri didapatkan dari hasil analisis dinamis yang diketahui dari nilai analisa *times domain* yang nantinya dijadikan acuan untuk *tension mooring* terhadap *anchor* dan kapal dengan memenuhi nilai faktor lingkungan yang kecil. (API RP 2SK:2005)

### 2.6.1 Spektrum Gelombang

Pemilihan spektrum energi gelombang untuk mendapatkan spektrum respon struktur terapung didasarkan pada kondisi aktual lingkungan laut yang dipertimbangkan. Jika tidak, model spektral yang dikeluarkan oleh instansi berbeda dapat digunakan saat mempertimbangkan kesamaan lingkungan fisik. Persamaan spektral Joint North Sea Waves Project (JONSWAP) merupakan modifikasi dari persamaan spektral Pierson-Morkowitz untuk perairan Laut Utara. Selain itu, spektrum JONSWAP juga dapat diterapkan di lingkungan perairan dengan kondisi pengambilan terbatas dan perairan dangkal. (M Iqbal Afdhal, dkk, 2019)

### 2.6.2 Response Amplitude Operator (RAO) dan Spektrum Respon

*Response Amplitude Operator* (RAO) merupakan alat untuk mengubah muatan eksternal, dalam hal ini gelombang dalam rentang frekuensi, menjadi bentuk respon yang diterima dalam suatu struktur. Jadi secara umum RAO juga dikenal sebagai transfer function. Selanjutnya, RAO juga dapat dipahami sebagai hubungan antara amplitudo respon dan amplitudo gelombang ( $\zeta_{\text{feedback}}/\zeta_{\text{wave}}$ ). Amplitudo respon dapat berupa gerak, tegangan, atau getaran. Sedangkan spektrum respon didefinisikan sebagai respon energi struktur akibat energi gelombang. (Chakrabarty, 1987)

## 2.7 Faktor Lingkungan

Faktor Lingkungan atau Beban Lingkungan terdiri dari gelombang, arus dan angin yang mempengaruhi gerak kapal yang akhirnya menghasilkan suatu gaya yang bekerja pada rantai kapal. (Prasetya Tomi Irianto, dkk, 2020)

### 2.7.1 Gelombang

Beban Gelombang(Gaya Gelombang) merupakan beban terbesar yang ditimbulkan oleh beban lingkungan pada bangunan lepas pantai. Teori *diffraction-radiation* adalah teori yang dipakai untuk perhitungan gaya gelombang pada analisa *system mooring* FPSO. Dalam teori ini dijelaskan bahwa struktur yang mempunyai ukuran yang relative besar maka ukurannya relatif sama dengan panjang gelombangnya. Dan struktur ini mempengaruhi perubahan arah gelombang disekitarnya.( M Ikkal Afdhal, dkk,2019)

### 2.7.2 Angin

Gaya angin merupakan penjumlahan gaya yang diterima oleh masing-masing komponen struktur. Kekuatan angin disebabkan oleh resistensi terhadap viskositas udara dan perbedaan distribusi tekanan di sisi masing-masing bagian struktur yang menghadap angin dan pada permukaan bagian struktur lainnya. Besarnya gaya angin tergantung pada kecepatan angin, ukuran dan bentuk struktur. ( M Ikkal Afdhal, dkk,2019)

### 2.7.3 Arus

Beban arus disebabkan oleh gaya hambat, gaya gesek, dan propeller. Tetapi gaya paling besar pengaruhnya adalah gaya gesek. .( M Ikkal Afdhal, dkk,2019)

Berdasarkan analisa kekuatan rantai *spread mooring* akibat *motion* pada FPSO berbasis *time domain* yang dilakukan oleh Abdul Rozak,dkk (2017) faktor lingkungan yang terjadi untuk analisa *Spread Mooring* FPSO diambil dari sampel siklus 100 tahunan. Seperti pada data berikut:

Tabel 2. 1 Faktor Lingkungan Abdul Rozak,dkk (2017)

<i>Description</i>	<i>Unit</i>	<i>Quantity</i>
<i>Chain type</i>		<i>Studless</i>
<i>Wave</i>	m	3.7
<i>Wave Period</i>	secon	17.8
<i>Water Depth</i>	m	30.0
<i>Wind Speed</i>	m/s	12.87
<i>Current Speed</i>	m/s	1.0

Sumber: : Abdul Rozak,dkk (2017)