

PERANCANGAN STRUKTUR ANJUNGAN LEPAS PANTAI TIPE TETAP TIGA KAKI DI BLOK MAHAKAM, KALIMANTAN TIMUR

Offshore Structures Design of Three-legged Fixed Jacket Platform in Mahakam Block, East Kalimantan

Ignatius Kristian Danarko¹ dan Rildova, Ph.D²

Program Studi Teknik Kelautan
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung
Jln. Ganeca No. 10 Kota Bandung 40132

¹kristiandanarko@gmail.com dan ²rildova@ocean.itb.ac.id

Abstrak: Penurunan laju produksi minyak dan gas bumi (migas) dalam negeri yang terjadi selama 10 tahun terakhir merupakan imbas dari inefisiensi kegiatan produksi di lapangan yang beroperasi. Diperlukan penanganan serius dari pelaku industri hulu migas untuk mengatasi kemerosotan angka produksi – mengingat bahwa kontribusi sektor migas dalam bauran energi nasional masih signifikan, setidaknya hingga tahun 2050 mendatang. Salah satu solusi yang dapat dilakukan yakni menambah jumlah fasilitas produksi pada wilayah kerja lepas pantai yang sudah beroperasi. Pada Tugas Akhir ini, dilakukan desain struktur anjungan lepas pantai berupa *production platform* tipe *fixed jacket* dengan tiga kaki sebagai struktur produksi migas yang baru di Blok Mahakam, Kalimantan Timur. Studi kelayakan struktur anjungan dievaluasi melalui analisis struktur *inplace*, analisis seismik, dan analisis *fatigue* yang mengacu pada standar desain API RP 2A-WSD, 21st edition.

Kriteria desain yang diperiksa dalam analisis *inplace* dan analisis seismik meliputi rasio tegangan setiap *member*, *joint punching shear*, kapasitas tiang pancang, dan defleksi. Dalam analisis *fatigue*, akan diperiksa kelayakan dari umur kelelahan struktur berdasarkan kriteria umur layan yang digunakan (40 tahun). Berdasarkan hasil pemeriksaan analisis *inplace*, diketahui bahwa struktur memenuhi keempat kriteria yang berlaku dengan *horizontal bracing* menjadi komponen dengan rasio tegangan *member* terbesar (UC=0.78). Struktur juga memenuhi kriteria yang berlaku pada pemeriksaan analisis seismik, dengan rasio tegangan *member* terbesar dialami oleh komponen *secondary framing* di *main deck* (UC=0.45). Hasil pemeriksaan analisis *fatigue* menunjukkan bahwa umur kelelahan dari komponen sambungan memenuhi kriteria umur layan yang berlaku, dengan umur kelelahan minimum dialami oleh komponen *X-bracing* (1108 tahun). Setelah dilakukan optimasi desain pada struktur *jacket*, diperoleh nilai umur kelelahan yang lebih rendah dari sambungan yang sama, yakni 107 tahun.

Kata Kunci: *production platform*, *fixed jacket*, API RP 2A-WSD, analisis *inplace*, analisis seismik, analisis *fatigue*, optimasi

Abstract: The decline rate of domestic oil and gas production in the last ten years occurs as a result of the production inefficiency in the existing field. Necessary effort should be held responsible by the government and oil and gas practitioner to overcome this problem – considering that oil and gas contribution to our energy main resources is as yet significant, at least until 2050. Increasing the number of production facilities to the existing field should come as a solution in addressing the problem. In this final project, offshore structures design of a fixed-jacket type production platform is carried out as a supporting production structure in Mahakam Block, East Kalimantan. Feasibility study of this structure is evaluated through in-place structural analysis, seismic analysis, and fatigue analysis, referring to API RP 2A-WSD, 21st edition.

The design criteria examined in the in-place analysis and seismic analysis include the stress ratio of structural member, joint punching shear, pile axial capacity, and deflection. In the fatigue analysis, the fatigue life of the structure will be examined based on the service life requirements used in this final project (40 years). Based on in-place analysis' results, the structure satisfies the applicable criteria with horizontal bracing being the component with the largest member stress ratio ($UC=0.78$). The structure also satisfies the criteria applicable to seismic analysis, with the largest member stress ratio is taken place by the secondary framing component on the main deck ($UC=0.45$). Results of the fatigue analysis show that the fatigue life of the joint components satisfy the service life criteria, with the minimum fatigue life occurs in the X-bracing connection (1108 years). Some adjustments have been made by modifying the jacket tubular profile, with the fatigue life result of the same connection turns out to have a lower value (107 years) compared to the initial condition.

Keywords: *production platform, fixed jacket, API RP 2A-WSD, in-place analysis, seismic analysis, fatigue analysis, adjustments*

1. PENDAHULUAN

Data realisasi produksi minyak dan gas bumi yang diterbitkan dalam Laporan Tahunan SKK Migas pada tahun 2019 menunjukkan bahwa tren penurunan produksi migas telah terjadi selama 10 tahun terakhir. Maka itu, dibutuhkan antisipasi dari pemerintah dan pelaku industri hulu migas dalam meningkatkan kinerja dan efisiensi operasional untuk memperkuat pondasi hulu migas masa kini dan masa yang akan datang. Salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah meningkatkan produksi dari wilayah kerja yang sudah beroperasi dan menggencarkan eksplorasi untuk menemukan cadangan migas baru.

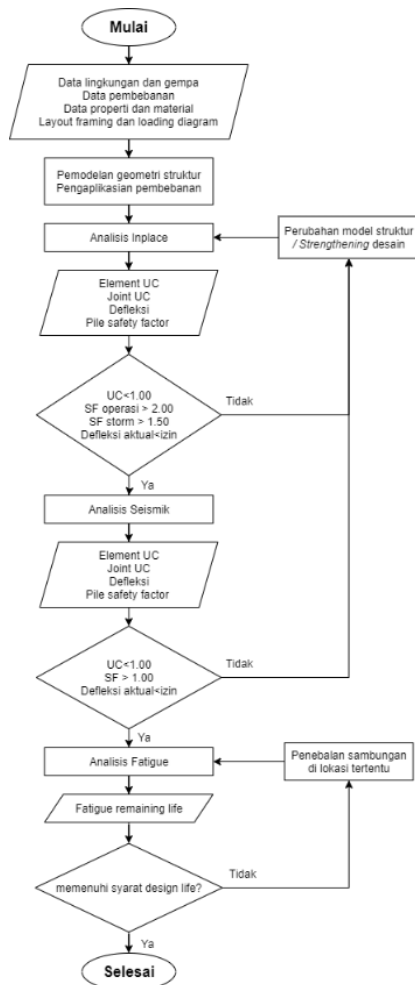
Potensi migas dari blok-blok yang masih beroperasi diyakini masih menjanjikan seiring dengan modernisasi teknologi di dunia migas. Optimasi pengembangan lapangan-lapangan yang sudah beroperasi terus dilakukan untuk menahan laju penurunan produksi, dimana salah satunya yakni Wilayah Kerja (WK) Blok Mahakam di Kalimantan Timur.

Dalam Tugas Akhir ini, akan dilakukan desain struktur anjungan lepas pantai berupa *production platform* tipe *fixed jacket* di Blok

Mahakam. Studi kelayakan anjungan lepas pantai ini akan dievaluasi dengan melakukan analisis struktur *inplace*, analisis seismik, dan analisis *fatigue* sesuai dengan standar API RP 2A-WSD, 21st edition. Adapun, tujuan dari penulisan Tugas Akhir adalah sebagai berikut:

1. Melakukan pemodelan struktur anjungan lepas pantai tipe *fixed jacket* dengan tiga kaki di Blok Mahakam, Kalimantan Timur, sesuai dengan standar *API Recommended Practice 2A-Working Stress Design (RP 2A-WSD)*, 21st edition.
2. Melakukan analisis *inplace* untuk mengetahui kekuatan struktur anjungan lepas pantai akibat penerapan dari kombinasi antara beban mati, beban hidup, dan beban lingkungan yang berlaku pada struktur tersebut.
3. Melakukan analisis seismik untuk mengetahui kekuatan struktur anjungan lepas pantai akibat beban gempa sesuai dengan kriteria kekuatan dan daktilitas.
4. Melakukan analisis *fatigue* untuk mengetahui umur kelelahan pada struktur anjungan lepas pantai akibat beban siklik yang diterima selama masa layan struktur.

Diagram alir dari pengerjaan Tugas Akhir tersaji pada **Gambar 1.1**.



Gambar 1.1 Diagram alir pengerjaan

2. TEORI DASAR

Teori dasar yang dibahas meliputi konsep pembebanan pada anjungan lepas pantai tipe tetap dan konsep mengenai ketiga analisis *in-service* yang dilakukan.

Konsep Pembebanan pada *Fixed Platform*

Konsep pembebanan mengacu kepada standar *API RP 2A-WSD 21st Edition*, dimana penerapan beban pada anjungan lepas pantai terdiri dari beban mati, beban hidup, dan beban lingkungan. Masing-masing kategori pembebanan akan dijelaskan sebagai berikut:

- Beban mati merupakan gabungan dari berat sendiri struktur dan peralatan yang terpasang tetap pada anjungan dan tidak berubah selama operasi berlangsung dalam berbagai macam kondisi.
- Beban hidup merupakan beban yang dikenakan kepada struktur selama masa layannya, dimana beban ini dapat berubah-ubah dari satu mode operasi ke mode operasi lainnya.
- Beban lingkungan merupakan beban yang timbul akibat fenomena alam seperti gelombang, arus, angin, es, gempa bumi, dan penggerusan tanah di lokasi struktur. Besar beban lingkungan dalam satu lokasi dapat bervariasi dengan pertimbangan berbagai arah datang beban.

Beban lingkungan yang diterapkan mencakup beban gelombang, beban arus, dan beban angin.

Analisis Struktur

Kelayakan dan kekuatan struktur anjungan lepas pantai dalam menerima berbagai beban yang berlaku perlu dievaluasi secara *in-service*. Evaluasi *in-service* yang dilakukan meliputi analisis *inplace*, seismik, dan *fatigue*. Masing-masing analisis akan dijelaskan sebagai berikut:

1. Analisis *Inplace*

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan struktur ketika telah terbangun secara utuh pada lokasi *offshore*, dan beroperasi secara baik dalam kondisi normal maupun ekstrem. Kriteria yang diperiksa dalam analisis ini meliputi rasio tegangan *member* dan sambungan (*joint*) utama pada struktur, kapasitas tiang pancang, dan defleksi.

Pemeriksaan rasio tegangan *member* dan sambungan secara sederhana menggunakan **Persamaan 2.1**.

$$UC = \frac{\sigma_{actual}}{\sigma_{allowable} \times AMOD} \quad 2.1$$

Dimana,

- σ_{actual} , tegangan aktual yang bekerja akibat beban yang berlaku
- $\sigma_{allowable}$, tegangan yang diizinkan
- $AMOD$, faktor pengali terhadap tegangan yang diizinkan (bernilai 1.0 untuk kondisi operasi dan 1.33 untuk kondisi ekstrem).

Pemeriksaan defleksi pada struktur mengacu kepada syarat batas lendutan yang diatur dalam SNI-03-1729-2002, dengan nilai batas lendutan maksimum tersaji pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1 Batas lendutan maksimum sesuai SNI-03-1729-2002

Komponen struktur dengan beban tidak terfaktor	Beban tetap	Beban sementara
Balok pemikul dinding atau finishing yang getas	$L/360$	-
Balok biasa	$L/240$	-
Kolom dengan analisis orde pertama saja	$h/500$	$h/200$
Kolom dengan analisis orde kedua	$h/300$	$h/200$

Pemeriksaan kapasitas aksial tiang pancang menggunakan syarat faktor keamanan yang diatur dalam standar *API RP2A-WSD 21st Edition*. Nilai faktor keamanan ditentukan melalui **Persamaan 2.2**.

$$SF = \frac{Pile\ Capacity}{Max.\ Axial\ Load} \quad 2.2$$

Nilai faktor keamanan minimum untuk kondisi operasi dan ekstrem sesuai dengan standar API RP2A-WSD secara berturut-turut adalah 2.00 dan 1.50.

2. Analisis Seismik

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan struktur akibat pengaruh aktivitas seismik atau gempa bumi. Analisis seismik dapat diabaikan apabila struktur berada pada daerah dengan aktivitas seismik yang rendah, yakni nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) di bawah 0.05 g.

Berdasarkan standar API RP2A-WSD, terdapat dua (2) level kekuatan seismik yang perlu diperiksa, yakni *strength level earthquake* (SLE) dan *ductility level earthquake* (DLE).

API RP2A-WSD mengatur bahwa penerapan beban gempa harus dikombinasikan dengan pembebanan simultan lainnya seperti beban gravitasi, gaya apung (*buoyancy*), dan tekanan hidrostatik. Kombinasi pembebanan pada analisis seismik adalah sebagai berikut:

$$D + 0.75 L + E$$

Dimana,

- D , berat sendiri struktur dan beban peralatan yang terpasang tetap
- L , beban hidup
- E , beban gempa

Penambahan nilai tegangan izin sebanyak 70 persen juga direkomendasikan oleh API RP2A-WSD untuk analisis seismik.

3. Analisis Fatigue

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan struktur dalam menerima beban siklik selama masa layannya. Moda kegagalan ini disebut *fatigue*, sehingga diperlukan suatu prosedur analisis untuk memprediksi kemungkinan terjadinya kegagalan tersebut.

API RP2A-WSD merekomendasikan metode *fatigue* spektral sebagai pendekatan statistik untuk memperhitungkan kerusakan akibat kelelahan (*fatigue damage*) yang terjadi pada struktur. Aturan Miner digunakan untuk memperhitungkan rasio *fatigue damage* secara kumulatif, seperti pada Persamaan 2.3.

$$D = \sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \quad 2.3$$

Dimana,

- D , rasio *fatigue damage* kumulatif

- n_i , jumlah siklus pada rentang tegangan ke- i
- N_i , jumlah siklus yang diizinkan oleh kurva S-N tertentu pada rentang tegangan ke- i

Nilai rasio *fatigue damage* dari Aturan Miner dinilai masih konservatif, sehingga diperlukan faktor faktor keamanan sesuai dengan lokasi sambungan yang diperiksa dan konsekuensi kegagalannya untuk menentukan rasio *fatigue damage* yang sebenarnya.

Norwegian Petroleum Directorate (NPD) merekomendasikan nilai faktor keamanan seperti pada **Tabel 2.2**.

Tabel 2.2 Rekomendasi faktor keamanan fatigue life

Damage Consequence	Access for inspection and repair		
	No access or in the splash zone	Accessible	
		Below the splash zone	Above the splash zone or internal
With substantial consequences	10	3	2
Without substantial consequences	3	2	1

Nilai sisa umur kelelahan struktur atau *fatigue life* dapat diketahui melalui Persamaan

$$L = \frac{D_L}{D \times SF} \quad 2.4$$

Dimana,

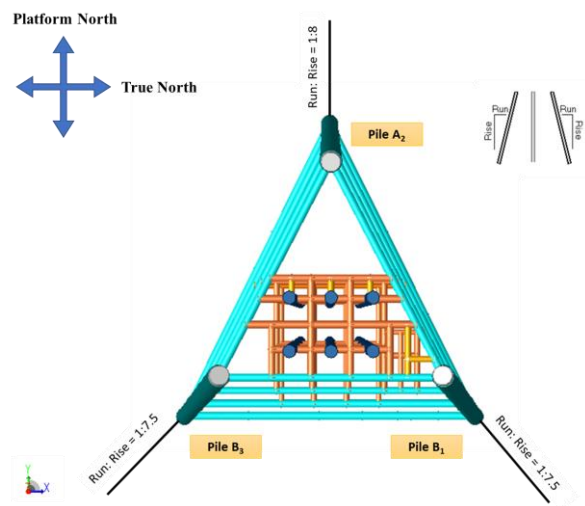
- L , umur kelelahan (*fatigue life*)
- D_L , umur layan yang direncanakan
- D , rasio *fatigue damage* kumulatif dari perhitungan Miner
- SF , faktor keamanan

Apabila nilai umur kelelahan lebih besar daripada umur layan yang direncanakan, maka struktur dinyatakan tidak mengalami kegagalan akibat kelelahan (*fatigue failure*).

3. DATA DAN PEMODELAN

Dimodekan struktur anjungan berupa *production platform* dengan konfigurasi *fixed jacket* tiga kaki di Blok Mahakam, Kalimantan Timur. Orientasi *Platform North* dari desain anjungan ini adalah sebesar 90° dari *True North*. Rasio kemiringan kaki *jacket* (*true batter*) adalah 1:7.5 pada dua kaki sejajar dan 1:8 pada satu kaki yang lainnya. Ilustrasi keduanya tersaji **Gambar 3.1**.

Referensi elevasi yang digunakan dalam desain adalah *Chart Datum* (elevasi 0.00 m), dengan kedalaman perairan berada pada elevasi (-) 46.7 m dari *Chart Datum* (CD). Elevasi penting lain yang dipertimbangkan tersaji pada **Tabel 3.1**.



Gambar 3.1 Orientasi Platform North

Tabel 3.1 Elevasi penting pada lokasi desain

Elevasi Penting	1 Year Opr.	100 Years Str.
Water Depth (m)	46.7	
Mean High Water Spring (m)	2.48	
Highest Astronomical Tide (m)	3.08	
Mean Sea Level (m)	1.58	
Lowest Astronomical Tide (m)	0.48	
Storm Surge (m)	0.2	0.5

Dalam analisis *inplace*, perlu diperhitungkan kedalaman perairan untuk masing-masing kondisi pembebanan (operasi dan eskترم). Hasil perhitungan kedalaman perairan untuk setiap kondisi tersaji pada **Tabel 3.2**.

Tabel 3.2 Kedalaman perairan berbagai kondisi

Kondisi Perairan		Water Depth (m)
Minimal Water Depth	1-year operating	47.18
	100-year extreme	47.18
Maximum Water Depth	1-year operating	49.38
	100-year extreme	49.68

Profil *marine growth*, data gelombang, data arus, data angin, dan area *splash zone* yang digunakan dalam desain ini tersaji pada **Tabel 3.3** hingga **Tabel 3.7**.

Tabel 3.3 Profil Marine Growth

Area	Rentang elevasi (m)		Kete-balan (mm)	Densitas (kg/m ³)
	UB	LB		
I	Above	+2.48 m	0	1400
II	+2.48 m	-14.52 m	100	
III	-14.52 m	-29.52 m	50	
IV	-29.52 m	-46.70 m	25	

Tabel 3.4 Data Gelombang

Deskripsi	Periode Ulang	
	1-year opr.	100-years ext.
H _{max} (m)	3.3	6.2
T _{max} (s)	6.9	8.6

Tabel 3.5 Profil kecepatan arus

Profil Arus	Periode Ulang	
	1-year operating	100-year extreme
Surface current (m/s)	0.80	1.45
Mid depth current (m/s)	0.70	1.00
Seabed current (m/s)	0.65	0.85

Tabel 3.6 Profil kecepatan angin

Periode Ulang	Kecepatan Angin (m/s)
1-year operating	16.1
100-year extreme	26.3

Tabel 3.7 Area splash zone

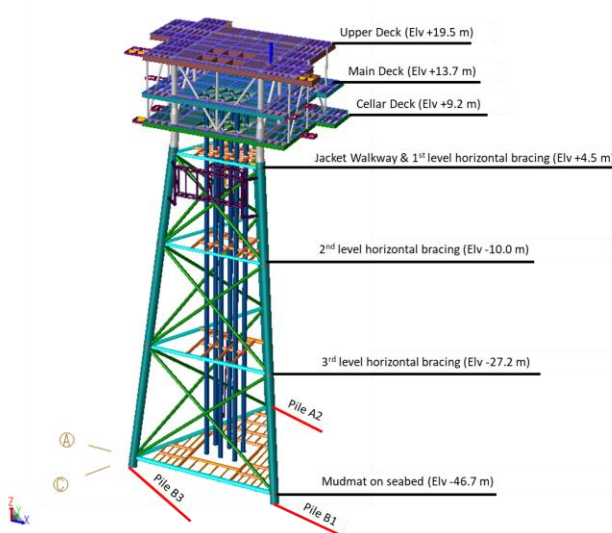
Keterangan Batas	Elevasi
Upper Bound (batas atas)	(+) 7.11 m
Lower Bound (batas bawah)	(-) 1.69 m

Data gempa yang digunakan meliputi nilai *peak ground acceleration* (PGA), perioda, dan *pseudo spectral acceleration* (PSA) untuk kondisi SLE dan DLE (tersaji pada **Tabel 3.8**).

Tabel 3.8 Data spektrum gempa

Periode (s)	Spectral Acceleration (S _A)	
	SLE (PGA = 0.050g)	DLE (PGA = 0.126g)
0.01	0.166	0.419
0.5	0.137	0.345
1	0.073	0.183
1.5	0.049	0.124
2	0.037	0.094
2.5	0.030	0.076
3	0.025	0.064
3.5	0.022	0.055
4	0.019	0.049
4.5	0.019	0.049

Pemodelan struktur anjungan lepas pantai ini meliputi beberapa komponen utama seperti dek, *jacket*, fondasi tiang pancang, dan *boat landing*. Ilustrasi isometrik struktur tersaji pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.2 Model isometrik anjungan
Pemilihan profil *member* dalam pemodelan
struktur tersaji pada **Tabel 3.9** dan **Tabel 3.10**.

Tabel 3.9 Properti member tubular

Member Group	Dimensi (in)	
	OD	WT
Jacket Leg		
LG1 – LG3	54.5	2.5
LG4	54.5	2.625
LG5	48	1.5
Jacket to Deck Leg		
DLC	48	1.5
Primary Deck Leg		
DLM	36	1.5
DLU	36	1.5
Secondary Deck Leg		
MSA	24	1
MSB	20	1
Tertiary Deck Leg		
MSC	16	1
MSD	12.75	1
Pile		
PL1 – PL4	48	1.5
Horizontal Bracing		
HOR	19.75	0.5
HR1	20	0.5
HR2	20	0.5
Vertical / X-Bracing		
XBR & XBS	18	0.625
Boat Landing		
BL3	10.75	0.5
BL1	18	1
BL2	18	0.75
BL4	8.75	0.5

Tabel 3.10 Properti member wide flange

Member Group	Dimensi (mm)			
	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>tf</i>	<i>tw</i>
Cellar Deck				
CD1	773	381	27.1	16.6
CD2	617	230	22.2	13.1
CD3	330	160	11.5	7.5
Main Deck				
MD1	622	327	24.4	15.4
MD2	603	228	14.9	10.5
MD3	270	135	10.2	6.6
Upper Deck				
UD1	786	384	33.4	19.7
UD2	617	230	22.2	13.1
UD3	330	160	11.5	7.5

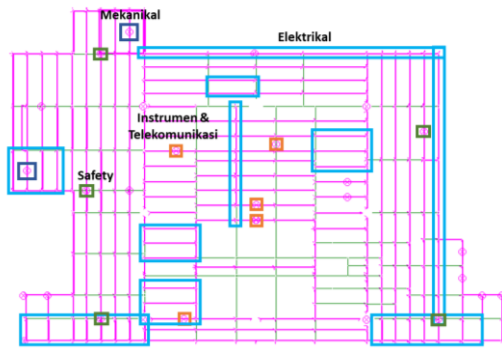
Pembebanan struktur yang diterapkan meliputi beban mati struktur, beban peralatan, beban hidup, dan beban lingkungan. Beban lingkungan di antaranya meliputi beban gelombang, beban arus, dan beban angin.

Perhitungan beban mati struktur untuk masing-masing kondisi tersaji pada **Tabel 3.11**.

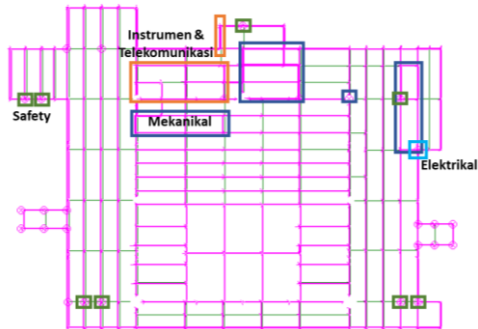
Tabel 3.11 Perhitungan beban mati struktur

Kondisi	Total Dead Load (kN)	Total Buoyancy Load (kN)	Total F_z (kN)
Opr - Min WD	-18905.707	7397.874	-11507.869
Opr – Max WD	-18905.705	7933.149	-10972.589
Str – Min WD	-18905.707	7397.874	-11507.869
Str – Max WD	-18905.707	7968.619	-10937.119

Beban peralatan yang dimaksud meliputi komponen perlengkapan dan perlengkapan struktur yang terpasang secara tetap. Berdasarkan lokasi perletakkannya, beban peralatan terpasang pada dek (*topside*), *jacket*, *boat landing*, dan beban *crane*. Ilustrasi penerapan beban peralatan tersaji pada **Gambar 3.3** hingga **Gambar 3.8**.



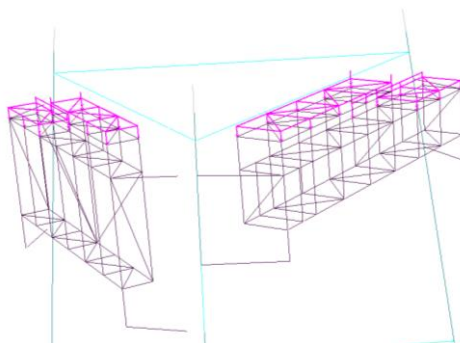
Gambar 3.3 Beban peralatan pada upper deck



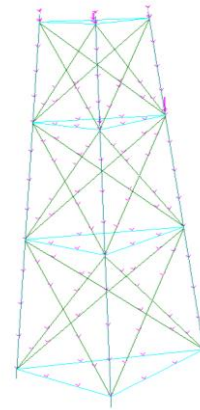
Gambar 3.4 Beban peralatan pada main deck



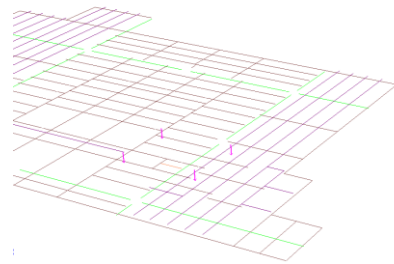
Gambar 3.5 Beban peralatan pada cellar deck



Gambar 3.6 Beban pada boatlanding

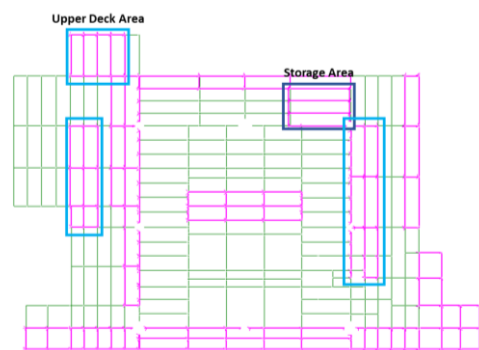


Gambar 3.7 Beban jacket appurtenances

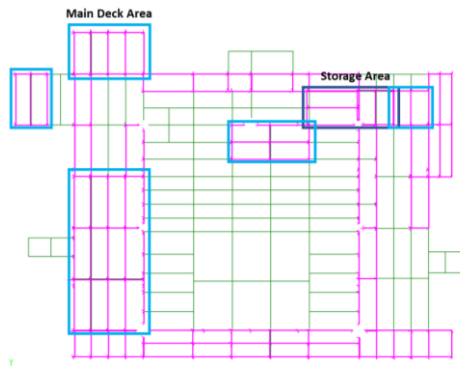


Gambar 3.8 Beban crane pada upper deck

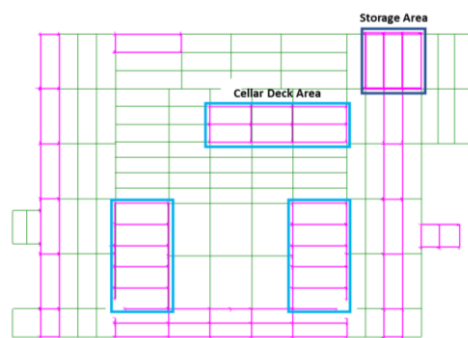
Beban hidup diterapkan dalam tiga (3) area berbeda pada masing-masing elevasi dek berdasarkan perbedaan nilai beban (dalam kN) per satuan luas. Masing-masing dek memiliki ketiga area berikut: *storage area* (20 kN/m²), *deck area* (5 kN/m²), dan *walkway area* (2.5 kN/m²). Ilustrasi penerapan beban hidup untuk setiap elevasi dek tersaji pada **Gambar 3.9** hingga **Gambar 3.11**.



Gambar 3.9 Beban hidup pada upper deck

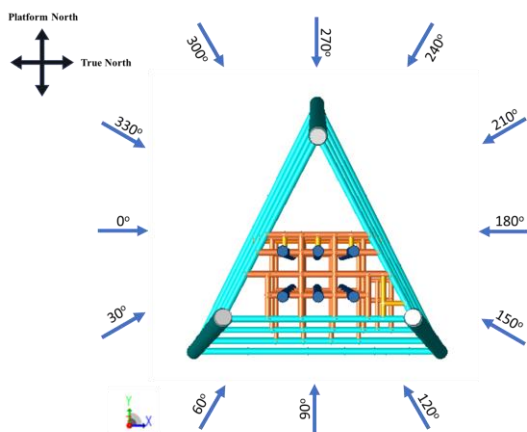


Gambar 3.10 Beban hidup pada main deck



Gambar 3.11 Beban hidup pada cellar deck

Beban lingkungan diterapkan secara *omni-directional*, dengan syarat desain berdasarkan API RP-2A WSD merekomendasikan bahwa arah datang dari beban lingkungan untuk anjungan tipe tetap yang memiliki tiga kaki terbagi menjadi dua belas (12) arah berbeda. Ilustrasi arah datang beban lingkungan tersaji pada **Gambar 3.12**.



Gambar 3.12 Arah datang dari beban lingkungan

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Analisis dan pembahasan akan dibagi menjadi tiga (3) bagian besar sesuai dengan lingkup analisis yang dilakukan, meliputi analisis *inplace*, seismik, dan *fatigue*.

Analisis *Inplace*

Analisis *inplace* merupakan analisis *in-service* yang pertama kali dilakukan setelah proses pemodelan dan penerapan beban yang bekerja kepada struktur selesai dikerjakan. Variasi pembebanan lingkungan yang dianalisis dalam analisis *inplace* antara lain:

- Beban lingkungan kondisi *operating*, saat kedalaman perairan minimum
- Beban lingkungan kondisi *operating*, saat kedalaman perairan maksimum
- Beban lingkungan kondisi ekstrem, saat kedalaman perairan minimum
- Beban lingkungan kondisi ekstrem, saat kedalaman perairan maksimum

Beban lingkungan dengan periode ulang 1-tahunan diterapkan dalam kondisi *operating*, dan beban lingkungan dengan periode ulang 100-tahunan diterapkan dalam kondisi ekstrem.

Hasil pemeriksaan rasio tegangan *member* untuk kondisi *operating* dan ekstrem tersaji pada **Tabel 4.1** dan **Tabel 4.2**.

Tabel 4.1 Pemeriksaan tegangan member - operating

Deskripsi	Properti	Member	Load Case	Max UC
Pile				
Pile	48" OD x 1.5" WT	103P-203P	OP05	0.33
Jacket Leg				
Jacket Leg	48" OD x 1.5" WT	503L-603L	OP30	0.28
Jacket Horizontal Bracing				
Horizontal Frame Elv (-) 10.0 m	19.75" OD x 0.5" WT	J153-403L	OP05	0.40
Horizontal Frame Elv (-) 27.2 m	20" OD x 0.5" WT	K216-303L	OP06	0.52
Horizontal Frame Elv (-) 46.7 m	20" OD x 0.5" WT	S023-103L	OP01	0.33
Jacket Vertical Bracing				
Jkt. Vertical Bracing - 1 st level	18" OD x 0.625" WT	102L-1B1X	OP11	0.21

Tabel 4.1 Pemeriksaan tegangan member - operating

Deskripsi	Properti	Member	Load Case	Max UC
Boat Landing				
Boat Landing Brace	8.75" OD x 0.5" WT	B145-B137	OP08	0.37
Deck Leg				
Jacket to Deck Leg	48" OD x 1.5" WT	C003-603L	OP30	0.28
Primary Deck Leg	36" OD x 1.5" WT	U002-M002	OP01	0.19
Secondary Deck Leg	24" OD x 1.0" WT	U004-M005	OP10	0.39
Tertiary Deck Leg	16" OD x 1.0" WT	U004-M402	OP10	0.59
Cellar Deck				
C.D Primary Framing	W 760 x 380	C003-C136	OP26	0.49
C.D Secondary Framing	W 610 x 230	C073-C188	OP30	0.41
C.D Tertiary Framing	IPE 330	C186-C184	OP27	0.41
Main Deck				
M.D Primary Framing	W 610 x 325	M003-M045	OP28	0.44
M.D Secondary Framing	W 610 x 230	M201-M098	OP24	0.64
M.D Tertiary Framing	IPE 270	M055-M307	OP27	0.31
Upper Deck				
U.D Primary Framing	W 760 x 380	U198-U180	OP30	0.57
U.D Secondary Framing	W 610 x 230	U505-U504	OP24	0.58
U.D Tertiary Framing	IPE 330	U175-U509	OP27	0.75

Tabel 4.2 Pemeriksaan tegangan member - ekstrem

Deskripsi	Properti	Member	Load Case	Max UC
Pile				
Pile	48" OD x 1.5" WT	103P-203P	ST04	0.59
Jacket Leg				
Jacket Leg	48" OD x 1.5" WT	503L-603L	ST04	0.26
Jacket Horizontal Bracing				
Horizontal Frame Elv (-) 10.0 m	19.75" OD x 0.5" WT	J153-403L	ST05	0.51
Horizontal Frame Elv (-) 27.2 m	20" OD x 0.5" WT	K216-303L	ST06	0.78
Horizontal Frame Elv (-) 46.7 m	20" OD x 0.5" WT	S023-103L	ST07	0.72
Jacket Vertical Bracing				
Jkt. Vertical Bracing - 1 st level	18" OD x 0.625" WT	102L-1B1X	ST11	0.54
Boat Landing				
Boat Landing Brace	BL4	8.75" OD x 0.5" WT	B145-B137	ST08
Deck Leg				
Jacket to Deck Leg	48" OD x 1.5" WT	C003-603L	C003-603L	ST06
Primary Deck Leg	36" OD x 1.5" WT	U002-M002	U003-M003	ST04
Secondary Deck Leg	24" OD x 1.0" WT	U004-M005	U004-M005	ST04
Tertiary Deck Leg	16" OD x 1.0" WT	U004-M402	U004-M402	ST05
Cellar Deck				

Tabel 4.2 Pemeriksaan tegangan member - ekstrem

Deskripsi	Properti	Member	Load Case	Max UC
C.D Primary Framing	W 760 x 380	C003-C136	ST02	0.55
C.D Secondary Framing	W 610 x 230	C073-C188	ST01	0.39
C.D Tertiary Framing	IPE 330	C186-C184	ST12	0.40
Main Deck				
M.D Primary Framing	W 610 x 325	M003-M045	ST08	0.42
M.D Secondary Framing	W 610 x 230	M201-M098	ST04	0.64
M.D Tertiary Framing	IPE 270	M055-M307	ST01	0.28
Upper Deck				
U.D Primary Framing	W 760 x 380	U198-U180	ST04	0.31
U.D Secondary Framing	W 610 x 230	U505-U504	ST05	0.34
U.D Tertiary Framing	IPE 330	U175-U509	ST03	0.27

Hasil pemeriksaan rasio *joint punching shear* untuk kondisi *operating* dan ekstrem tersaji pada **Tabel 4.3** dan **Tabel 4.4**.

Tabel 4.3 Pemeriksaan punching shear - operating

Elevasi	Joint	Chord		Brace		Load Case	Max UC
		OD (in)	WT (in)	OD (in)	WT (in)		
(-) 46.7 m	101L	54.5	2.5	20	0.625	OP09	0.041
	102L	54.5	2.5	20	0.625	OP11	0.041
	103L	54.5	2.5	20	0.625	OP12	0.032
(-) 27.2 m	201L	54.5	2.5	20	0.625	OP08	0.048
	202L	54.5	2.5	20	0.625	OP12	0.047
	203L	54.5	2.5	20	0.625	OP11	0.044
(-) 10.0 m	301L	54.5	2.5	20	0.625	OP08	0.044
	302L	54.5	2.5	20	0.625	OP12	0.044
	303L	54.5	2.5	20	0.625	OP12	0.042
(+) 4.5 m	401L	54.75	2.5	20	0.625	OP07	0.035
	402L	54.75	2.5	20	0.625	OP01	0.042
	403L	54.75	2.5	20	0.625	OP21	0.042

Tabel 4.4 Pemeriksaan punching shear - ekstrem

Elevasi	Joint	Chord		Brace		Load Case	Max UC
		OD (in)	WT (in)	OD (in)	WT (in)		
(-) 46.7 m	101L	54.5	2.5	20	0.625	ST09	0.079
	102L	54.5	2.5	20	0.625	ST11	0.081
	103L	54.5	2.5	20	0.625	ST03	0.070
(-) 27.2 m	201L	54.5	2.5	20	0.625	ST08	0.095
	202L	54.5	2.5	20	0.625	ST12	0.094
	203L	54.5	2.5	20	0.625	ST09	0.088
(-) 10.0 m	301L	54.5	2.5	20	0.625	ST08	0.079
	302L	54.5	2.5	20	0.625	ST12	0.080

Tabel 4.4 Pemeriksaan punching shear - ekstrem

Elevasi	Joint	Chord		Brace		Load Case	Max UC
		OD (in)	WT (in)	OD (in)	WT (in)		
(+) 4.5 m	303L	54.5	2.5	20	0.625	ST12	0.078
	401L	54.5	2.5	20	0.625	ST07	0.070
	402L	54.5	2.5	20	0.625	ST01	0.074
	403L	54.5	2.5	20	0.625	ST01	0.073

Hasil pemeriksaan kapasitas aksial tiang pancang untuk kondisi *operating* dan ekstrem tersaji pada **Tabel 4.5** dan **Tabel 4.6**.

Tabel 4.5 Pemeriksaan pile SF - operating

Pile Joint	Compression				Safety Factor Remarks
	Kapasitas (kN)	Beban maks (kN)	LC	SF	
103P	-17242.4	-7211.2	OP04	2.39	>2.00, accepted
101P	-13333.2	-4643.4	OP08	2.87	>2.00, accepted
102P	-13333.2	-4972.6	OP12	2.68	>2.00, accepted

Tabel 4.6 Pemeriksaan pile SF - ekstrem

Pile Joint	Compression				Safety Factor Remarks
	Kapasitas (kN)	Beban maks (kN)	LC	SF	
103P	-17242.4	-9724.3	ST04	1.77	>1.50, accepted
101P	-13333.2	-7662.1	ST08	1.74	>1.50, accepted
102P	-13333.2	-7809.4	ST12	1.71	>1.50, accepted

Hasil pemeriksaan defleksi maksimum untuk kondisi *operating* dan ekstrem tersaji pada **Tabel 4.7** dan **Tabel 4.8**.

Tabel 4.7 Pemeriksaan defleksi - operating

Lokasi	Defleksi Absolut				Defleksi Relatif (cm)	Span (cm)	Izin (cm)	Remarks
	Joint Observasi		Joint Referensi					
	Joint	DZ (cm)	Joint	DZ (cm)				
CD	C252	-4.836	C151	-3.159	1.677	750	3.125	OK
MD	M028	-4.611	M029	-4.367	0.243	330	1.375	OK
UD	U296	-4.640	U293	-4.361	0.279	330	1.375	OK

Tabel 4.8 Pemeriksaan defleksi - ekstrem

Lokasi	Defleksi Absolut				Defleksi Relatif (cm)	Span (cm)	Izin (cm)	Rem-arks
	Joint Observasi		Joint Referensi					
	Joint	DZ (cm)	Joint	DZ (cm)				
CD	C252	- 5.006	C151	- 3.334	1.673	750	3.125	OK
MD	M028	- 4.911	M029	- 4.674	0.237	330	1.375	OK
UD	U296	- 4.972	U293	- 4.687	0.285	330	1.375	OK

Analisis Seismik

Analisis seismik yang dilakukan menggunakan metode respon spektra. Sebanyak dua (2) level kekuatan seismik diperiksa dalam analisis ini, meliputi *strength level earthquake* (SLE) dan *ductility level earthquake* (DLE). Periode ulang kejadian gempa yang digunakan untuk kedua level tersebut adalah 200 tahun dan 5000 tahun.

Hasil pemeriksaan rasio tegangan *member* untuk kondisi analisis SLE dan DLE tersaji pada **Tabel 4.9** dan **Tabel 4.10**.

Tabel 4.9 Pemeriksaan tegangan member - SLE

Deskripsi	Properti	Member	Max UC
Pile			
Pile	48" OD x 1.5" WT	103P-203P	0.17
Jacket Leg			
Jacket Leg	48" OD x 1.5" WT	503L-603L	0.15
Jacket Horizontal Bracing			
Horizontal Frame Elv (-) 10.0 m	19.75" OD x 0.5" WT	J153-403L	0.17
Horizontal Frame Elv (-) 27.2 m	20" OD x 0.5" WT	K216-303L	0.21
Horizontal Frame Elv (-) 46.7 m	20" OD x 0.5" WT	S023-103L	0.13
Jacket Vertical Bracing			
Jkt. Vertical Bracing - 1 st level	18" OD x 0.625" WT	102L-1B1X	0.04
Boat Landing			
Boat Landing Brace	8.75" OD x 0.5" WT	B145-B137	0.12
Deck Leg			
Jacket to Deck Leg	48" OD x 1.5" WT	C003-603L	0.15
Primary Deck Leg	36" OD x 1.5" WT	U002-M002	0.07
Secondary Deck Leg	24" OD x 1.0" WT	U005-M004	0.20
Tertiary Deck Leg	16" OD x 1.0" WT	U004-M402	0.29
Cellar Deck			
C.D Primary Framing	W 760 x 380	C003-C136	0.24
C.D Secondary Framing	W 610 x 230	C073-C188	0.28
C.D Tertiary Framing	IPE 330	C186-C184	0.27
Main Deck			

Tabel 4.9 Pemeriksaan tegangan member - SLE

Deskripsi	Properti	Member	Max UC
M.D Primary Framing	W 610 x 325	M003-M045	0.20
M.D Secondary Framing	W 610 x 230	M201-M098	0.45
M.D Tertiary Framing	IPE 270	M055-M307	0.17
Upper Deck			
U.D Primary Framing	W 760 x 380	U253-U005	0.19
U.D Secondary Framing	W 610 x 230	U126-U007	0.20
U.D Tertiary Framing	IPE 330	U175-U509	0.14

Tabel 4.10 Pemeriksaan tegangan member - DLE

Deskripsi	Properti	Member	Max UC
Pile			
Pile	48" OD x 1.5" WT	103P-203P	0.18
Jacket Leg			
Jacket Leg	48" OD x 1.5" WT	503L-603L	0.15
Jacket Horizontal Bracing			
Horizontal Frame Elv (-) 10.0 m	19.75" OD x 0.5" WT	J153-403L	0.18
Horizontal Frame Elv (-) 27.2 m	20" OD x 0.5" WT	K216-303L	0.22
Horizontal Frame Elv (-) 46.7 m	20" OD x 0.5" WT	S023-103L	0.14
Jacket Vertical Bracing			
Jkt. Vertical Bracing - 1 st level	18" OD x 0.625" WT	102L-1B1X	0.05
Boat Landing			
Boat Landing Brace	8.75" OD x 0.5" WT	B145-B137	0.12
Deck Leg			
Jacket to Deck Leg	48" OD x 1.5" WT	C003-603L	0.15
Primary Deck Leg	36" OD x 1.5" WT	U002-M002	0.07
Secondary Deck Leg	24" OD x 1.0" WT	U005-M004	0.20
Tertiary Deck Leg	16" OD x 1.0" WT	U004-M402	0.29
Cellar Deck			
C.D Primary Framing	W 760 x 380	C003-C136	0.25
C.D Secondary Framing	W 610 x 230	C073-C188	0.28
C.D Tertiary Framing	IPE 330	C186-C184	0.27
Main Deck			
M.D Primary Framing	W 610 x 325	M003-M045	0.20
M.D Secondary Framing	W 610 x 230	M201-M098	0.45
M.D Tertiary Framing	IPE 270	M055-M307	0.18
Upper Deck			
U.D Primary Framing	W 760 x 380	U253-U005	0.19
U.D Secondary Framing	W 610 x 230	U126-U007	0.20
U.D Tertiary Framing	IPE 330	U175-U509	0.15

Hasil pemeriksaan rasio *joint punching shear* untuk kondisi analisis SLE dan DLE tersaji pada **Tabel 4.11** dan **Tabel 4.12**.

Tabel 4.11 Pemeriksaan punching shear - SLE

Elevasi	Joint	Chord		Brace		Max UC
		OD (in)	WT (in)	OD (in)	WT (in)	
(-) 46.7 m	101L	54.5	2.5	20	0.625	0.007
	102L	54.5	2.5	20	0.625	0.007
	103L	54.5	2.5	20	0.625	0.006
(-) 27.2 m	201L	54.5	2.5	20	0.625	0.007
	202L	54.5	2.5	20	0.625	0.007
	203L	54.5	2.5	20	0.625	0.008
(-) 10.0 m	301L	54.5	2.5	20	0.625	0.007
	302L	54.5	2.5	20	0.625	0.009
	303L	54.5	2.5	20	0.625	0.008
(+) 4.5 m	401L	54.75	2.5	20	0.625	0.013
	402L	54.75	2.5	20	0.625	0.013
	403L	54.75	2.5	20	0.625	0.013

Tabel 4.12 Pemeriksaan punching shear - DLE

Elevasi	Joint	Chord		Brace		Max UC
		OD (in)	WT (in)	OD (in)	WT (in)	
(-) 46.7 m	101L	54.5	2.5	20	0.625	0.009
	102L	54.5	2.5	20	0.625	0.009
	103L	54.5	2.5	20	0.625	0.009
(-) 27.2 m	201L	54.5	2.5	20	0.625	0.009
	202L	54.5	2.5	20	0.625	0.009
	203L	54.5	2.5	20	0.625	0.011
(-) 10.0 m	301L	54.5	2.5	20	0.625	0.007
	302L	54.5	2.5	20	0.625	0.011
	303L	54.5	2.5	20	0.625	0.010
(+) 4.5 m	401L	54.75	2.5	20	0.625	0.014
	402L	54.75	2.5	20	0.625	0.014
	403L	54.75	2.5	20	0.625	0.013

Hasil pemeriksaan kapasitas aksial tiang pancang untuk kondisi analisis SLE dan DLE tersaji pada **Tabel 4.13** dan **Tabel 4.14**.

Tabel 4.13 Pemeriksaan pile SF - SLE

Pile Joint	Compression			Safety Factor Remarks
	Kapasitas (kN)	Beban maks (kN)	SF	
103P	-17242.4	-5094.4	3.38	>2.00, accepted
101P	-13333.2	-2672.8	4.99	>2.00, accepted
102P	-13333.2	-2973.1	4.48	>2.00, accepted

Tabel 4.14 Pemeriksaan pile SF - DLE

Pile Joint	Compression			Safety Factor Remarks
	Kapasitas (kN)	Beban maks (kN)	SF	
103P	-17242.4	-5243.6	3.29	>2.00, accepted
101P	-13333.2	-2830.7	4.71	>2.00, accepted
102P	-13333.2	-3133.1	4.26	>2.00, accepted

Hasil pemeriksaan defleksi maksimum untuk analisis seismik tersaji pada **Tabel 4.15**.

Tabel 4.15 Pemeriksaan defleksi pada analisis seismik

Lokasi	Defleksi Absolut				Defleksi Relatif (cm)	Span (cm)	Izin (cm)	Remarks
	Joint Observasi		Joint Referensi					
	Joint	DZ (cm)	Joint	DZ (cm)				
CD	C252	-4.024	C151	-2.632	1.392	750	3.125	OK
MD	M028	-3.970	M029	-3.766	0.204	330	1.375	OK
UD	U296	-4.026	U293	-3.812	0.214	330	1.375	OK

Analisis Fatigue

Analisis *fatigue* yang dilakukan menggunakan metode *fatigue* spektral sebagai pendekatan statistik untuk memperhitungkan kerusakan akibat kelelahan (*fatigue damage*) yang terjadi pada struktur.

Prosedur analitis dengan metode *fatigue* spektral menggunakan data *directional scatter diagrams*, dimana setiap keadaan gelombang dicirikan dalam tinggi gelombang signifikan, periode *zero-up crossing*, dan probabilitas kejadian gelombang dalam masing-masing sebaran.

Pemeriksaan umur kelelahan menggunakan nilai *safety factor* sesuai dengan rekomendasi NPD. Umur layan (*design life*) yang digunakan adalah 40 tahun sesuai dengan rekomendasi Chakrabarti (2005).

Hasil pemeriksaan umur kelelahan tersaji pada **Tabel 4.16**.

Tabel 4.16 Pemeriksaan fatigue life

Joint	Member	Lokasi Member	Ukuran Chord		Design Life (tahun)	Fatigue Life (tahun)
			OD (in)	WT (in)		
3C1X	403L-3C1X	X-bracing	18	0.625	40	1108.093
3C1X	301L-3C1X	X-bracing	18	0.625	40	1296.171
3B1X	403L-3B1X	X-bracing	18	0.625	40	1335.21
3B1X	302L-3B1X	X-bracing	18	0.625	40	1528.824

Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa selisih dari nilai *fatigue life* (>1000 tahun) yang diperoleh dengan nilai *design life* (40 tahun) relatif terlampau besar. Maka dilakukan optimasi berupa perubahan profil dari komponen *jacket leg* dan *X-bracing*. Detail perubahan profil tersaji pada **Tabel 4.17**.

Tabel 4.17 Perubahan profil pada optimasi

Komponen	Desain Awal		Optimasi	
	OD (in)	WT (in)	OD (in)	WT (in)
Jacket leg	54.5	2.5	54.5	1
X-bracing	18	0.625	18	0.5

Pemeriksaan umur kelelahan sambungan setelah dilakukan perubahan profil menunjukkan bahwa terjadi penurunan nilai *fatigue life* cukup signifikan dibandingkan dengan hasil awal yang diperoleh. Hasil pemeriksaan *fatigue life* setelah dilakukan optimasi tersaji pada **Tabel 4.18**.

Tabel 4.18 Pemeriksaan fatigue life – optimasi

Joint	Member	Lokasi Member	Ukuran Chord		Design Life (tahun)	Fatigue Life (tahun)
			OD (in)	WT (in)		
3C1X	403L-3C1X	X-bracing	18	0.5	40	107.265
3C1X	301L-3C1X	X-bracing	18	0.5	40	119.8606
3B1X	403L-3B1X	X-bracing	18	0.5	40	117.5989
3B1X	302L-3B1X	X-bracing	18	0.5	40	138.2934

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang diperoleh, dapat disimpulkan beberapa hal berikut:

1. Struktur anjungan memenuhi kriteria desain yang disyaratkan dalam pemeriksaan analisis *inplace*, dengan keterangan sebagai berikut:
 - Nilai rasio UC terbesar pada pemeriksaan tegangan *member* dimiliki oleh komponen *tertiary framing* di *upper deck* dengan nilai 0.75 untuk kondisi *operating*, dan komponen *horizontal bracing* dengan nilai 0.78 untuk kondisi ekstrem.
 - Nilai rasio UC terbesar pada pemeriksaan *joint punching shear* dimiliki oleh *joint* 201L untuk kondisi *operating* dan kondisi ekstrem, dengan nilai rasio UC untuk kedua kondisi tersebut adalah 0.048 dan 0.095.
 - Nilai *safety factor* terendah pada pemeriksaan kapasitas tiang pancang dimiliki oleh *pile* A2 dengan nilai 2.39 untuk kondisi *operating*, dan *pile* B1 dengan nilai 1.71 untuk kondisi ekstrem.
 - Nilai defleksi maksimum terjadi pada *joint* C252 yang berlokasi di *cellar deck* untuk kondisi *operating* dan kondisi ekstrem, dengan nilai defleksi untuk kedua kondisi tersebut adalah 1.677 cm dan 1.672 cm.
2. Struktur anjungan memenuhi kriteria desain yang disyaratkan dalam pemeriksaan analisis seismik, dengan keterangan sebagai berikut:
 - Nilai rasio UC terbesar pada pemeriksaan tegangan *member* dimiliki oleh komponen *secondary framing* di *main deck* dengan nilai 0.45.
 - Nilai rasio UC terbesar pada pemeriksaan *joint punching shear* dimiliki oleh *joint* 401L dengan nilai 0.014.
 - Nilai *safety factor* terendah pada pemeriksaan kapasitas tiang pancang dimiliki oleh *pile* A2 dengan nilai 3.29.
 - Nilai defleksi maksimum terjadi pada *joint* C252 yang berlokasi di *cellar deck*, dengan nilai defleksi sebesar 1.392 cm.
3. Struktur anjungan memenuhi kriteria umur layan (40 tahun) yang digunakan dalam pemeriksaan analisis *fatigue*, dengan keterangan sebagai berikut:
 - Umur kelelahan (*fatigue life*) paling minimum terjadi pada sambungan *X-bracing* (*joint* 3C1X), dengan *fatigue life* sebesar 1108 tahun.
 - Optimasi desain dilakukan dengan melakukan perubahan profil *member* dari kaki *jacket* dan *X-bracing*, sehingga diperoleh nilai umur kelelahan struktur yang baru. Hasil pemeriksaan *fatigue life* pada sambungan *X-bracing* yang sama (*joint* 3C1X) mengalami penurunan yang signifikan, dengan nilai *fatigue life* setelah dilakukan optimasi struktur adalah sebesar 107 tahun.

Saran

Berdasarkan hasil analisis yang diperoleh, saran yang dapat diberikan antara lain:

1. Dapat dipertimbangkan desain struktur dengan tipe *braced monopod*, sehingga hasil analisis yang diperoleh dapat

dibandingkan dengan hasil analisis struktur dengan tiga kaki.

2. Dapat dipertimbangkan optimasi desain dalam konteks pemilihan profil *member*, terutama *member* tubular (meliputi dimensi *outside diameter* dan *wall thickness*) yang berkontribusi signifikan dalam menerima beban lingkungan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Barltrop, N. D. P., & Adams, A. J. (1991). *Dynamics of Fixed Marine Structures*. Butterworth-Heinemann.
- Chakrabarti, S. K. (2005). *Handbook of Offshore Engineering*. Elsevier.
- Gerwick, B. C. (2007). *Construction of Marine and Offshore Structures*. CRC Press.
- Goda, Y. (2010). *Random Seas and Design of Maritime Structures*. World Scientific.
- Reddy, D. V., & Swamidas, A. S. J. (2014). *Essentials of Offshore Structures: Framed and Gravity Platforms*. CRC Press.
- El-Reedy, M. A. (2015). *Marine Structural Design Calculations*. Butterworth-Heinemann.
- Bai, Y., & Jin, W. (2016). *Marine Structural Design*. Butterworth-Heinemann.