

Analisis Integritas *Padeye* pada Proses *Upending* Struktur *Jacket*

Retnani A. Primastuti, Yoyok Setyo Hadiwidodo, dan Rudi Walujo Prastianto
Departemen Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: yoyoksetyo@oe.its.ac.id

Abstrak—Proses penegakan (*upending*) struktur *jacket* dari anjungan lepas pantai (*Offshore Platform*) di lokasinya di tengah laut menjadi salah satu proses yang menentukan keberhasilan fase instalasi anjungan lepas pantai. Makalah ini memaparkan analisis tegangan pada komponen *padeye* yang digunakan pada struktur *jacket* saat diinstalasi dengan metode *lifting* pada saat proses penagakannya. Proses *upending* dilakukan agar *jacket* berdiri tegak secara vertikal sebelum dipancangkan di tempatnya di dasar laut. Dalam penelitian ini, terlebih dulu dilakukan analisis global untuk mendapatkan gaya-gaya yang terjadi saat proses pengangkatan (*lifting*) *jacket*. Selanjutnya dilakukan analisis tegangan lokal pada *padeye* dengan bantuan *software* berbasis Metode Elemen Hingga. Hasilnya menunjukkan bahwa tegangan maksimum pada struktur *padeye* saat proses *upending* struktur *jacket* adalah 172,85 MPa yang mana masih di bawah batas tegangan izin materialnya.

Kata Kunci—Analisis Kekuatan, *Jacket*, *Padeye*, *Upending*.

I. PENDAHULUAN

PADA proses eksplorasi dan eksploitasi bahan tambang seperti minyak bumi dan gas alam yang lokasinya berada di tengah laut diperlukan suatu struktur anjungan lepas pantai yang disebut *Offshore Platform*. Pada pembangunannya, proses konstruksi bangunan lepas pantai (*Offshore Platform*) terdiri dari dua proses operasi yang saling berhubungan, yaitu *Dynamic Positioning* dan *Heavy Lifting Operation* [1]. Bagian utama struktur *offshore platform* ini terdiri dari 2 bagian, yaitu sub-struktur *topside/super structure* dan *jacket*. Proses instalasi sub-struktur tersebut terdiri dari beberapa tahap seperti proses *pre-lifting*, *lifting*, *lifted*, *rotating*, *positioning*, *lowering*, *mating*, dan instalasi tahap akhir [2]. Dari penjelasan tersebut, proses *lifting* memegang peranan penting dalam pembangunan *Offshore Platform*.

Ketika pelaksanaannya, proses *lifting* biasanya dilakukan menggunakan bantuan *crane vessel*. Selain menggunakan bantuan *crane vessel*, proses *lifting* juga dibantu dengan bantuan peralatan seperti *slings* (*wire* atau *belt*), *shackle*, tali pandu (*tag line*) dan kupingan angkat *padeye* dan *trunnion*. Pada proses *lifting operation* dengan skala makro, dibutuhkan jumlah *padeye* yang lebih banyak [3]. Selain itu, biasanya pada proses *lifting* juga dilakukan penentuan konfigurasi variasi desain *rigging*. Hal tersebut dilakukan untuk mencari tegangan minimum pada setiap kondisi variasi. Selain itu, pada konfigurasi *rigging* biasanya digunakan bantuan *spreader bar*, yang akan akan berakibat pada perubahan sudut kemiringan *slings* yang dikaitkan pada struktur *padeye* itu sendiri yang nantinya akan memiliki hasil yang berbeda ketika dilakukan analisa terhadap kekuatan *padeye*. Menurut fungsinya, *spreader bar* digunakan untuk mengurangi gaya tekan pada struktur yang dijadikan objek *lifting*.

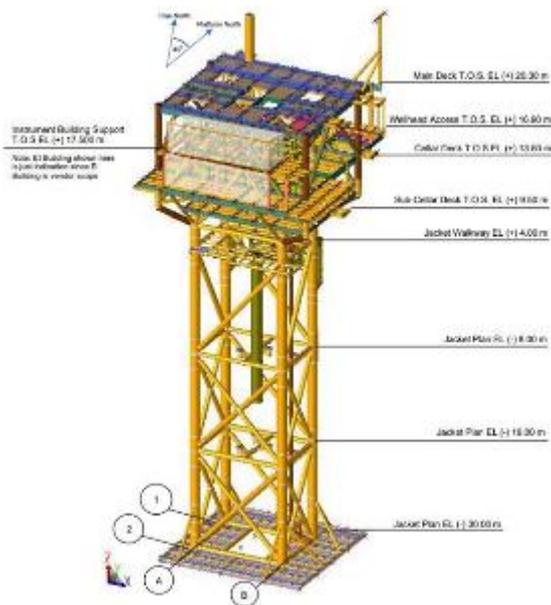
Dari proses *lifting* suatu struktur, terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan. Yang pertama, perlu diperhatikan

data-data yang ada pada lapangan seperti data *crane barge*, data *crane spesification*, data lingkungan, dan data *jacket* (untuk mengetahui kondisi struktur yang dilakukan *lifting* oleh *crane*). Pengaruh stabilitas *vessel* akibat gaya gelombang pada *floating crane* atau *crane vessel* yang ditinjau dari berat dan ukuran struktur yang diangkat juga menjadi indikator yang harus diperhatikan dalam proses *lifting*. Selain itu, perpindahan titik berat harus diperhatikan agar tidak melebihi batas yang ditentukan yang bisa menyebabkan ketidakstabilan struktur ketika dipindahkan. Yang terakhir, material dan dimensi yang digunakan untuk membuat struktur penunjang proses *lifting* seperti *padeye* ataupun *trunnion* juga harus diperhatikan dan harus sesuai dengan aturan yang berlaku.

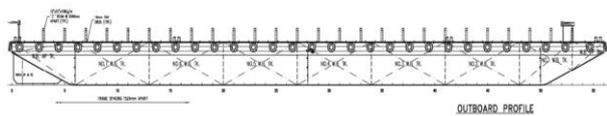
Selain itu, faktor keamanan dan keselamatan sangatlah penting dalam *marine operation*, termasuk pada proses *lifting*. Terdapat beberapa teknik khusus yang diimplementasikan untuk meningkatkan sisi keamanan dan keselamatan pada proses *lifting*. Salah satu contohnya dengan menggunakan sistem *multi cranes*. *Multi cranes* merupakan struktur-struktur rigid yang disambungkan dengan berbagai variasi *joints* dan *wire rope* [4]. *Multi crane* digunakan untuk mengetahui respon dinamik seperti gerakan *lifting* dan beban yang bertujuan untuk mencegah insiden fatal saat *lifting operation* dilakukan. Proses penegakan struktur *jacket* sesuai posisi yang diinginkan memerlukan operasi *heavy lifting* yang sangat berperan penting. Pengangkatan struktur *jacket* akan membutuhkan *crane* dan harus dijalan dengan beban terangkat oleh *crane* [5]. Oleh karena itu, *lifting operation* di lokasi konstruksi harus meninjau berbagai faktor yang harus dipertimbangkan seperti penempatan dan penggunaan peralatan pengangkatan serta orang yang berkompoten untuk mengoperasikan peralatan tersebut. Pada penelitian di Inggris yang melakukan studi mengenai proses *lifting*, terdapat 6 poin utama untuk meningkatkan keselamatan dalam operasi *lifting*, yaitu perencanaan, pemilihan peralatan, penggunaan dan inspeksi, umpan balik atau komunikasi, peran orang yang ditunjuk, dan basis data [6].

Dari penjelasan di atas, maka dari itu perlu ditentukan indikator-indikator keamanan dari *lifting operation*. Yang pertama, yaitu, struktur yang diangkat harus memiliki nilai *Unity Check* (UC) di bawah 1 yang artinya tegangan yang ada tidak melebihi tegangan yang diizinkan [7]. Variasi pada desain *rigging* harus memiliki nilai UC dan tegangan *slings* seminimum mungkin. Lalu, perpindahan titik berat tidak boleh melebihi batas yang telah ditentukan agar stabilitas struktur yang diangkat tetap terjaga. Selain itu, nilai *buckling check* masih harus dalam batas aman serta hasil analisis global relatif lebih kecil.

Setelah proses pengangkatan struktur *jacket* dilakukan dan posisi *jacket* telah berada di bawah permukaan air, maka selanjutnya struktur *jacket* perlu ditegakkan pada lokasi target atau yang dinamakan dengan proses penegakan (*upending*).



Gambar 1. Jacket platform.



Gambar 2. Barge.



Gambar 3. Crane LR 1500.

Salah satu komponen penting yang diperlukan dalam proses *upending* ini adalah *padeye* yang dipasang pada beberapa titik di *jacket* yang berfungsi sebagai titik angkat di mana *shackle* akan dikaitkan di situ. Pada umumnya, *padeye* digunakan hanya 1 kali selama *lifting operation* yang artinya *padeye* tidak dapat digunakan pada proses *lifting operation* selanjutnya [8].

Maka dari itu, pada penelitian kali ini, penulis akan membahas mengenai integritas struktur *padeye* pada proses *upending* struktur *jacket*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kondisi *padeye* yang digunakan dalam proses tersebut aman digunakan atau tidak. Penulis akan menggunakan bantuan *software ANSYS Workbench* untuk melakukan analisis gerakan pada *padeye*. Harapannya, penelitian ini bisa menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya di masa mendatang.

II. URAIAN PENELITIAN

Secara umum analisis struktur yang dilakukan dalam penelitian ini adalah secara numerik dengan bantuan *software* ber-

Tabel 1.
Jacket Platform Properties

Deskripsi	Appurtenance
Jenis Struktur	Wellhead Platform
Tinggi Jacket	34 m
Jumlah Kaki	4
Kemiringan Kaki	1:1 XYZ
Orientasi Platform	(+) 45°

Tabel 2.
Barge Principal Dimension

Principal Dimension	Ukuran
Length Over All	85,344 m
Breadth (Moulded)	24,384 m
Depth (Moulded)	4,880 m
Draft (Extreme)	3,772 m

Tabel 3.
Crane Properties (LR 1500)

Crane Properties (LR 1500)	Ukuran
Max. load capacity	500 t
Max. Hoist Height	164 m
Max. Radius at radius	144 m
Main boom, lightweight/heavy weight up to	7,50 m
Max. load torque	132 m
Derrick boom	5,896 tm
Central ballast	30 m
Counterweight at superstructure	40 t
Derrick ballast	170 t
Engine power	280 t
	350 kW

Tabel 4.
Data Geometry Padeye

Parameter	Symbol	Nilai (mm)
Pinhole Radius	Re	55
Cheek Plate 1 Radius	R1	250
Cheek Plate 1 Thickness	T1	25
Cheek Plate 2 Radius	R2	175
Cheek Plate 2 Thickness	T2	20
Main Plate Thickness	Tm	40
Length	L	690
Height	H	655

basis Metode Elemen Hingga, baik untuk analisis global maupun analisis tegangan lokalnya. Data yang diperlukan berupa data *jacket* dan komponen *lifting*.

A. Data Jacket dan Peralatan Lifting

Struktur *jacket platform* yang menjadi objek pada proses *upending* kali ini ditunjukkan pada Gambar . Uraian data *jacket* yang digunakan dalam penelitian ini yang ditunjukkan pada Tabel 1. *Barge* yang digunakan dalam penelitian ini merupakan *barge* 280 FT yang ditunjukkan pada Gambar . Uraian data yang ditunjukkan pada Tabel 2. Sedangkan untuk *crane* yang digunakan sebagai alat utama untuk melakukan melakukan proses *upending* struktur *jacket*, yaitu *Crane LR 1500* yang ditunjukkan pada Gambar . Rincian *technical data* pada Tabel 3.

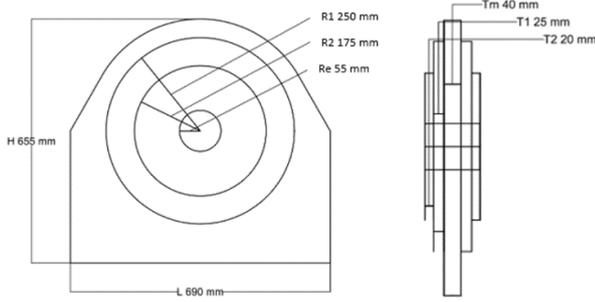
1) Data Geometry Padeye

Komponen struktur *padeye* menggunakan material API 2H Gr.50 dengan *material properties*, yaitu *yield strength* sebesar 345 MPa dan *poisson ratio* senilai 0,3. Sementara itu geometri dari struktur *padeye* ditunjukkan pada

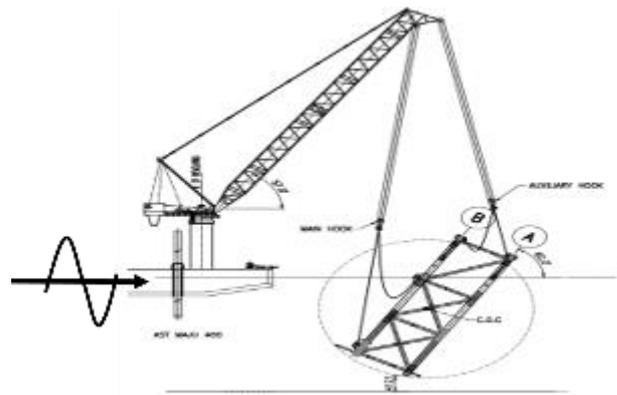
Gambar dan Tabel .

2) Proses Upending

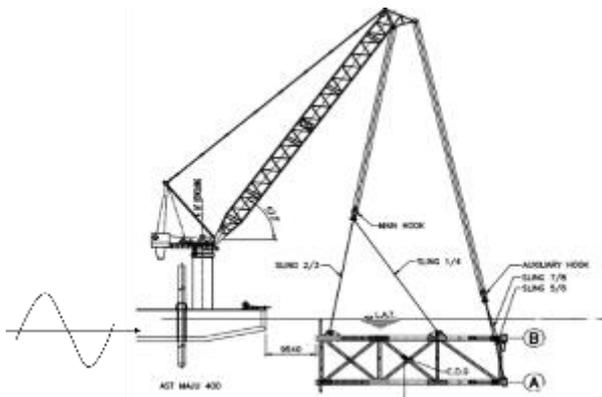
Proses *upending* struktur *jacket* yang digunakan untuk keperluan penelitian ini secara garis besar dijelaskan dengan



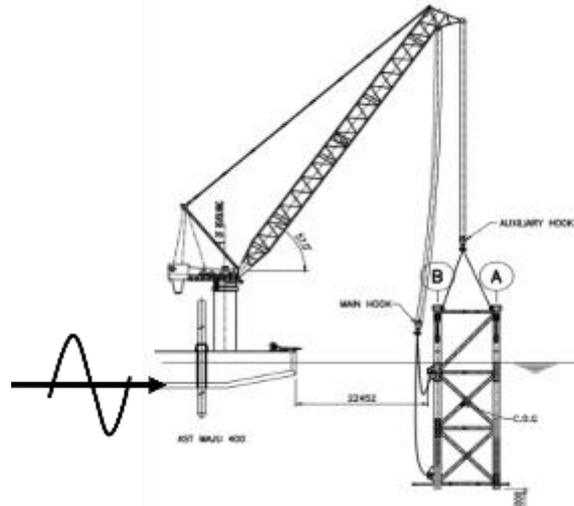
Gambar 4. Struktur *padeye*: tampak samping dan tampak atas.



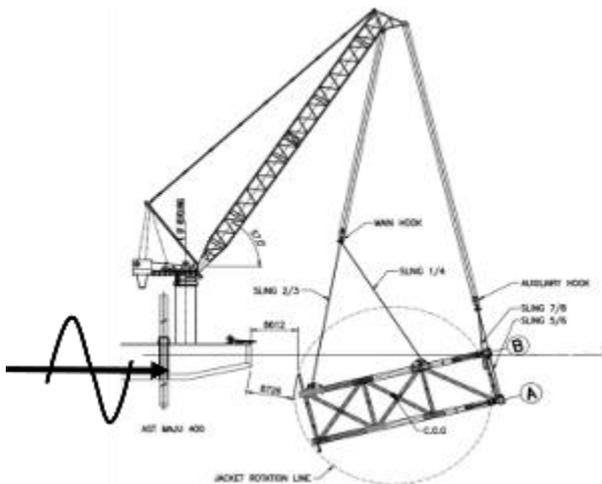
Gambar 7. Skema *upending jacket* kemiringan 60° (*step 3*).



Gambar 5. Skema *upending jacket* kemiringan 0° (*step 1*).



Gambar 8. Skema *upending jacket* kemiringan 90° (*step 4*).



Gambar 6. Skema *upending jacket* kemiringan 14° (*step 2*).

urutan proses yang dievaluasi pada beberapa tahap (*step*). Tiap tahapan ini akan dimodelkan secara numerik dan dianalisis secara global untuk memperoleh *tension* pada *sling* yang bekerja pada *padeye*.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, pada tahap ini (*step 1*), struktur *jacket* diposisikan secara horizontal (kemiringan 0°) pada elevasi di bawah permukaan air. Selanjutnya (*step 2*) *sling* ditarik secara perlahan hingga struktur *jacket* berputar dengan kemiringan 14° pada posisinya di bawah permukaan air seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Pada kondisi ini *auxiliary hook* ditarik secara perlahan hingga *sling* dalam kondisi menegang/mengencang.

Kemudian proses dilanjutkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7 (*step 3*), di mana *main hook* diturunkan dan *auxiliary hook* diangkat hingga sebagian *jacket* muncul di atas *sea water level* (SWL) mencapai ketinggian maksimum 10 m. Pada kondisi ini struktur *jacket* berada pada orientasi kemiringan 60°.

Akhirnya *main hook* terus diturunkan sampai *sling* pada *main hook* mengendur dan posisi *jacket* dipertahankan pada elevasi yang diinginkan, yaitu 5 m di atas *seabed*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8 struktur *jacket* telah mencapai orientasi 90° dari posisi awal, yaitu sudah dalam posisi vertikal.

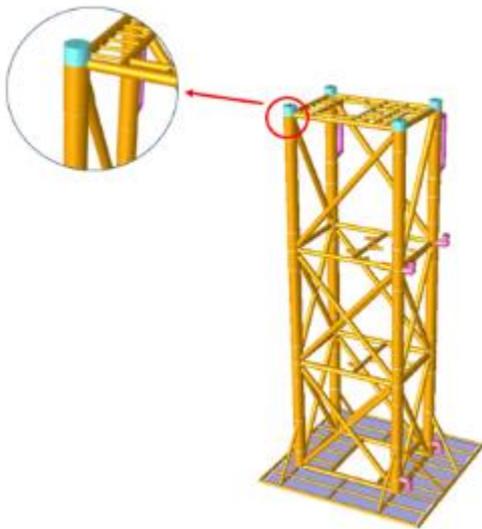
Pada analisis global yang dilakukan sebelumnya, yaitu pemodelan skema *upending* struktur *jacket* menggunakan software ORCAFLEX, didapatkan bahwa *tension sling* terbesar terjadi ketika *jacket* hampir dalam posisi berdiri sempurna. Ketika struktur *jacket* mencapai posisi tersebut, besar *tension sling*, yaitu 1.172.575,68 N atau 1.173 kN. Pada analisis yang dilakukan, *sling* yang digunakan memiliki spesifikasi tipe *rope/wire sling* dengan diameter 0.086 m dan *minimum breaking load* sebesar 5.165 kN sehingga *sling* masih dalam keadaan aman ketika melakukan *upending* struktur *jacket*.

III. ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

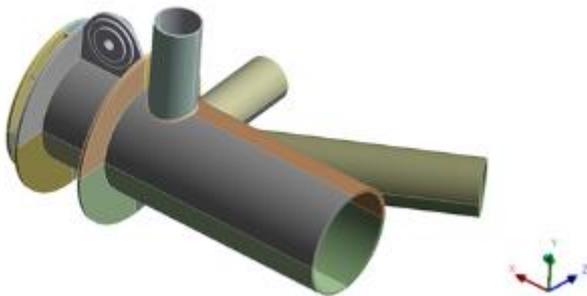
A. Pemodelan Struktur *Padeye*

Dari hasil analisis struktur global, maka struktur *padeye* yang dipilih untuk pemodelan lokal nantinya adalah yang mendapat beban paling kritis selama proses *upending* berlangsung, yaitu berada pada kaki *jacket row 2-A*. *Padeye* pada lokasi kaki *jacket* tersebut ditunjukkan pada Gambar 9.

Model lokal struktur *padeye* dibuat dengan cara memotong sebagian struktur *jacket* yang terhubung langsung dengan struktur *padeye*. Pemotongan bagian strukturnya tersebut



Gambar 9. Posisi *padeye* kritis pada kaki *jacket*.



Gambar 1. Model geometri struktur *padeye* dan sambungannya.

dilakukan sedemikian rupa sehingga tetap representatif dengan kondisi utuhnya saat terkena beban. Model lokal tersebut meliputi struktur *padeye*, *ring stiffener*, *plat stiffener*, *chord*, dan 3 *brace* seperti dapat dilihat pada Gambar 10.

Pada penelitian ini, analisis integritas struktur *padeye* ditinjau dari 4 langkah/*step* proses *upending* struktur *jacket* tersebut. Analisis tegangan ini dilakukan ketika *upending jacket* berlangsung pada kondisi arah kerja pembebanan 180° (dari kiri ke kanan pada Gambar 5). Bentuk geometri struktur *padeye* dimodelkan dengan *software* ANSYS DesignModeler seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.

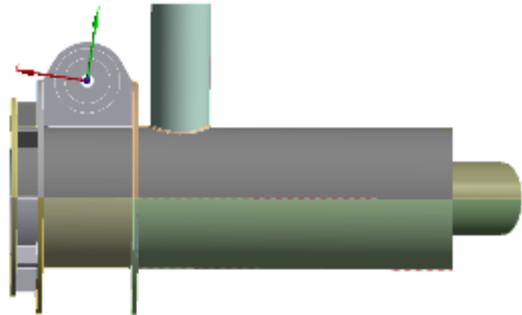
Pada model lokal stuktur *padeye*, beban lokal yang diberikan berasal dari *sling tension* yang bekerja pada *padeye* dari hasil analisis global dengan *software* ORCAFLEX yang telah dilakukan sebelumnya. Terdapat 5 total variasi *tension* dari *sling* (*step* 1–4 dan *tension sling maximum*) dengan masing-masing arah bekerjanya gaya dengan rincian ditunjukkan pada Tabel 5. Arah kerja gaya bekerja terhadap Sumbu Z yang ditunjukkan pada Gambar 10.

Berdasar Tabel 5, semua beban dengan besar dan arahnya masing-masing dikenakan pada model sehingga representatif dengan kondisi asli/utuh strukturnya. Salah satu contoh model dengan bebannya pada kondisi *step* 1 yang ditunjukkan pada Gambar 11. Arah kerja gaya bekerja pada Sumbu Z yang ditunjukkan pada Gambar 10.

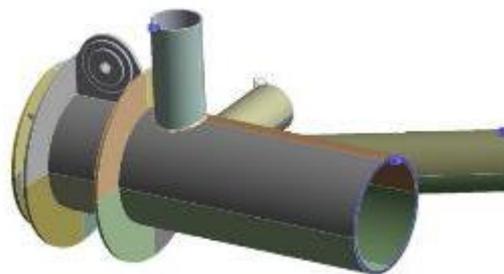
Sementara itu pada Gambar 12 ditunjukkan pemberian kondisi batas pada model lokal struktur *padeye*. Kondisi batas diberikan pada 4 *face* yang ditunjukkan dengan Label A, B, C, dan D yang berupa *fixed support*. Hal ini karena pada bagian tersebut merupakan potongan dari *chord* dan *brace* struk-

Tabel 1.
Variasi Gaya dan Arah Kerjanya

Step	Force (N)	Arah Kerja Gaya
1.	59.391,89	8°
2.	144.118,30	-8°
3.	391.997,70	-56°
4.	433.603,10	-64°
<i>Tension Sling Maximum</i>	1.172.575,68	-62°



Gambar 2. Arah gaya pada *step* 1.



Gambar 3. Pemberian kondisi batas pada model.

tur *jacket* di mana kecenderungan defleksinya cukup kecil saat terkena beban pada saat proses *upending* berlangsung.

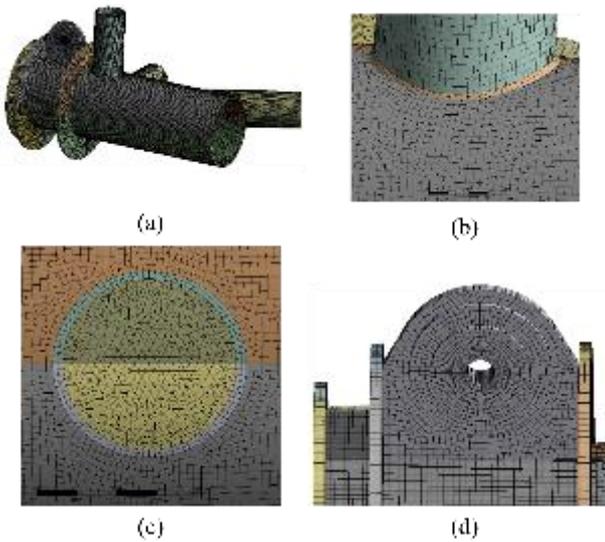
B. Elemen dan Meshing Model

Jenis elemen yang digunakan untuk model lokal adalah elemen solid dengan 3 macam bentuk elemen, yaitu prisma, *tetrahedron*, dan *hexahedron*. Pada bagian *padeye* digunakan elemen campuran bentuk prisma dan *hexahedron* karena *padeye* memiliki bentuk yang lebih kompleks jika dibandingkan dengan bagian struktur *tubular* dan *stiffener*. Sedangkan jenis elemen *tetrahedron* diaplikasikan pada daerah transisi sambungan antara *brace* dan *chord* (las-lasan). Hal ini dikarenakan bentuk elemen tersebut memiliki kemampuan yang adaptif terhadap bentuk struktur yang rumit.

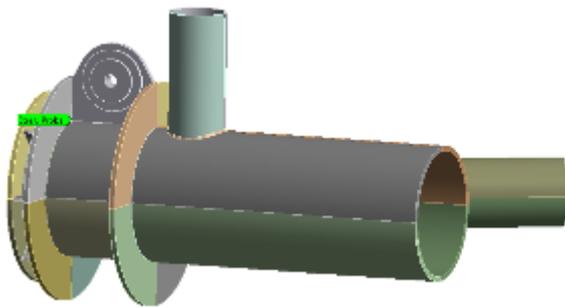
Sementara itu untuk bagian struktur yang memiliki bentuk yang lebih sederhana seperti *tubular*, *ring stiffener* dan struktur yang mempunyai bentuk teratur lainnya dimodelkan dengan jenis elemen *hexahedron*. Daerah yang semakin jauh dengan las-lasan juga menggunakan jenis elemen *hexahedron* untuk mendapatkan hasil *meshing* yang semakin baik. Bentuk *meshing* pada model lokal struktur *padeye* dan sambungannya ditunjukkan pada Gambar 13.

C. Analisis Tegangan Lokal Struktur *Padeye*

Setelah dilakukan pemodelan struktur *padeye*, perlu dilakukan analisis *meshing sensitivity* untuk mengukur ketepatan ukuran dari suatu tegangan yang dimodelkan untuk melihat pengaruh dari jumlah elemen yang ada. Pengerjaan *meshing sensitivity* dilakukan dengan menganalisis tegangan *von mises* setiap dilakukan perubahan jumlah elemen pada struktur *padeye*. Dalam hal ini dilakukan pengecekan



Gambar 5. Elemen *meshing* pada: (a) sambungan keseluruhan, (b) las-lasan antara *brace* dan *chord*, (c) *plug*, dan (d) *padeye*.



Gambar 6. Penempatan *stress probe* pada struktur *padeye*.

tegangan *von mises* pada suatu titik yang telah ditentukan menggunakan *stress probe* seiring dilakukannya perubahan jumlah elemen. Titik yang dijadikan acuan berada di salah satu sudut di struktur *padeye* yang menempel dengan tubular dan *ring stiffner* bagian atas yang ditunjukkan pada Gambar 14.

Jumlah elemen akan dipilih jika tegangan *von mises* sudah mencapai nilai yang stabil pada setiap perubahan elemennya. Pada penelitian kali ini, dilakukan analisis *meshing sensitivity* dengan menggunakan *sample* pada *upending* step 1 dengan besar *force* sebesar 59.391,89 N pada arah kerja gaya sebesar 8° terhadap Sumbu Z seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Hasil analisis *meshing sensitivity* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6 dan Gambar 15.

Perbedaan yang ditunjukkan pada Tabel 6 menunjukkan persentase perbedaan hasil tegangan *von mises* pada jumlah elemen tersebut dengan tegangan *von mises* pada jumlah elemen sebelumnya.

Setelah dilakukan *meshing sensitivity*, dipilih model *meshing* yang dengan jumlah elemen yang diberikan tanda berwarna kuning pada Tabel 6. Hasil deformasi yang terjadi pada sambungan di sekitar *padeye* ketika kondisi *upending* step 1 ditunjukkan pada Gambar 16.

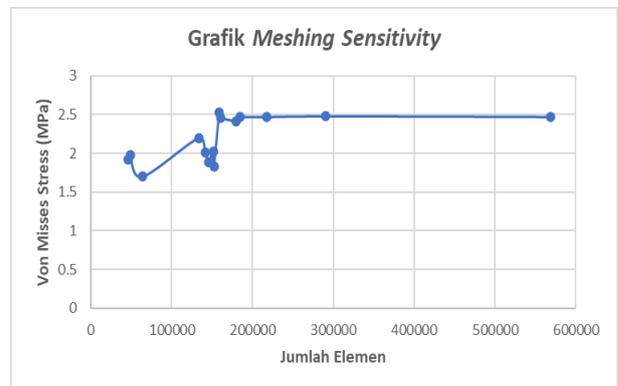
Dari Gambar 17 diketahui ketika sambungan *padeye* terkena *tension sling* pada kondisi *upending* step 1, titik dengan tegangan *maximum* terjadi pada las-lasan antara *chord* dan *brace*. Berdasarkan hasil *running* tersebut, kemudian dilakukan analisis tegangan struktur *padeye*

Tabel 2. *Meshing Sensitivity*

Jumlah Elemen	Von Mises Stress (MPa)	Perbedaan
45.961	1,919	-
48.681	1,983	3,361
64.249	1,700	14,284
133.466	2,196	29,182
141.698	2,007	8,597
146.010	1,891	5,799
151.268	2,020	6,827
152.376	1,832	9,297
159.143	2,524	37,758
160.733	2,462	2,456
179.986	2,418	1,787
184.880	2,466	1,985
217.603	2,469	0,122
290.116	2,478	0,365
568.738	2,470	0,323

Tabel 3. Validasi Hasil Pemodelan ANSYS dan Perhitungan Manual

Hasil ANSYS (MPa)	Perhitungan Manual (MPa)	Error
2.469	2.410	2.59%



Gambar 4. Grafik *meshing sensitivity*.

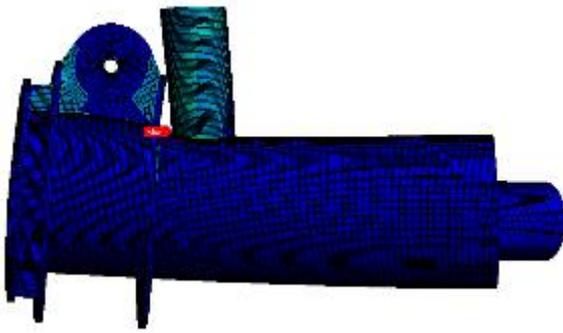
dengan menggunakan perhitungan manual untuk memastikan bahwa struktur *padeye* tidak mengalami kegagalan pada proses *upending*. Analisis ini dilakukan dengan membandingkan hasil tegangan *von mises* yang didapat dari ANSYS dengan hasil perhitungan manual. Berikut merupakan formula yang digunakan dalam menghitung tegangan *von mises* secara manual:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2}{2} + 6(\tau_{xy} + \tau_{yz} + \tau_{xz})} \quad (1)$$

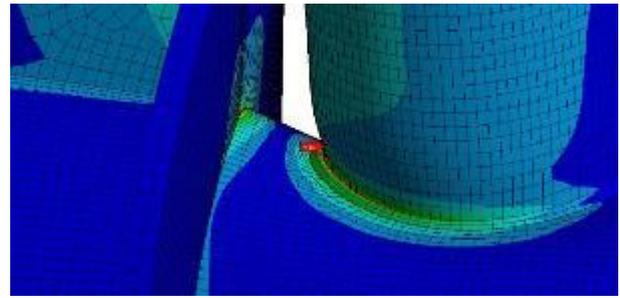
dengan σ_{VM} merupakan tegangan *von mises* (Mpa), σ merupakan tegangan normal (Mpa) dan τ merupakan tegangan geser.

Setelah dilakukan perhitungan, didapatkan hasil validasi antara perhitungan manual dan hasil *output* dari ANSYS seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Dari perbandingan yang ditunjukkan pada Tabel 7, dapat dilihat bahwa *error* dari hasil perhitungan manual dengan hasil *output* ANSYS memiliki perbedaan kurang dari 5%. Oleh karena itu, dapat dipastikan bahwa perhitungan manual dengan hasil *output* dari ANSYS sudah sesuai dengan kondisi sebenarnya.

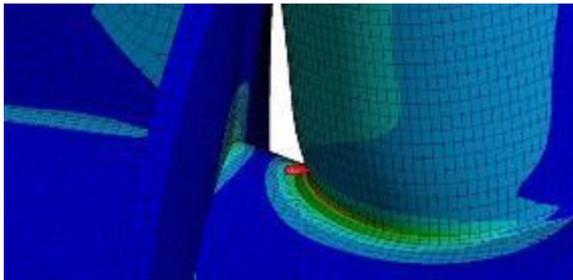
Setelah dilakukan validasi pada bagian di atas, dilakukan *running* untuk variasi gaya dan arah kerja gaya lain, sehingga didapat hasil berikut. Dari Gambar 18 diketahui ketika sambungan *padeye* terkena *tension sling* pada kondisi *upending* step 2, titik dengan tegangan *maximum* terjadi pada las-lasan antara *chord* dan *brace*.



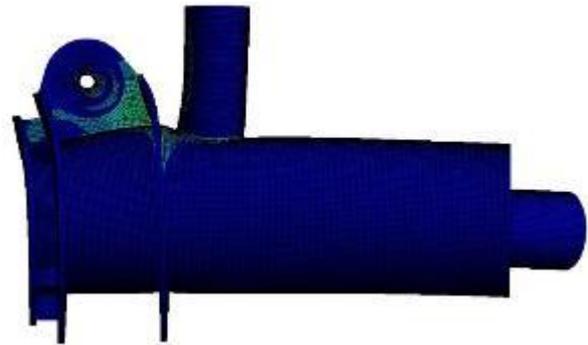
Gambar 7. Deformasi pada sambungan *padeye* ketika *step 1 upending*.



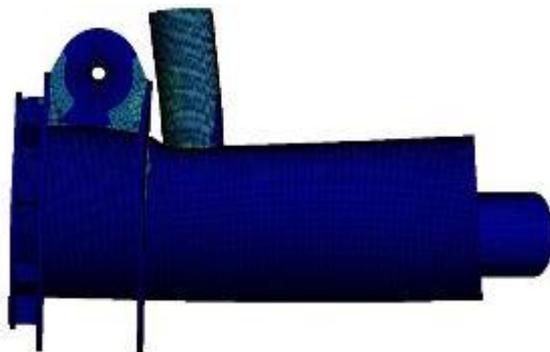
Gambar 10. Titik dengan tegangan *maximum* pada sambungan *padeye* ketika *step 2 upending*.



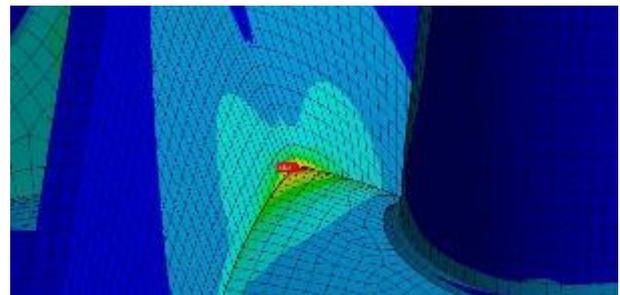
Gambar 8. Titik dengan tegangan *maximum* pada sambungan *padeye* ketika *step 1 upending*.



Gambar 11. Deformasi pada sambungan *padeye* ketika *step 3 upending*.



Gambar 9. Deformasi pada sambungan *padeye* ketika *step 2 upending*.



Gambar 12. Titik dengan tegangan *maximum* pada sambungan *padeye* ketika *step 3 upending*.

Dari Gambar 19 diketahui ketika sambungan *padeye* terkena *tension sling* pada kondisi *upending step 2*, titik dengan tegangan *maximum* terjadi pada las-lasan antara *chord* dan *brace*. Gambaran deformasi yang terjadi pada sambungan *padeye* ketika kondisi *upending step 3* berlangsung seperti yang ditunjukkan pada Gambar 20.

Dari Gambar 21, diketahui ketika sambungan terkena *tension sling* pada kondisi *upending step 3*, titik dengan tegangan *maximum* terjadi pada perpotongan antara *ring stiffener* bawah dan *chord*. Gambaran deformasi yang terjadi pada sambungan *padeye* terkena *tension sling* pada kondisi *upending step 4* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 22.

Dari Gambar 23, diketahui ketika sambungan *padeye* terkena *tension sling* pada kondisi *upending step 4*, titik dengan tegangan *maximum* terjadi pada perpotongan antara *ring stiffener* bawah dan *chord*. Hasil deformasi yang terjadi pada sambungan *padeye* ketika terkena *tension sling maximum* yang ditunjukkan pada Gambar 24. Dari Gambar 25 diketahui ketika sambungan *padeye* terkena *tension sling maximum*, titik dengan tegangan *maximum* terjadi pada perpotongan antara *ring stiffener* bawah dan *chord*.

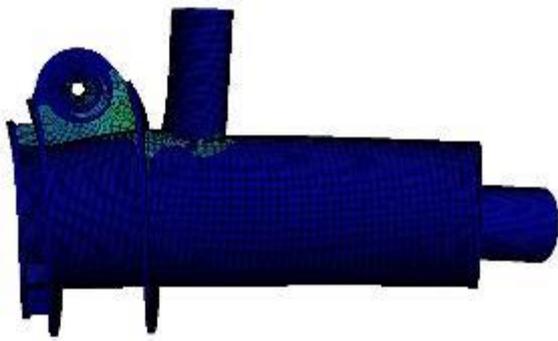
Setelah dilakukan *running* untuk semua variasi, didapatkan besar tegangan maksimum yang terjadi pada sambungan struktur *padeye* yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Dari hasil yang ditunjukkan pada Tabel 4, dapat diketahui bahwa tegangan maksimum yang terjadi pada proses *upending* struktur *jacket* adalah sebesar 226,440 MPa dengan arah kerja gaya -62° terhadap Sumbu Z (ditunjukkan pada Gambar 1).

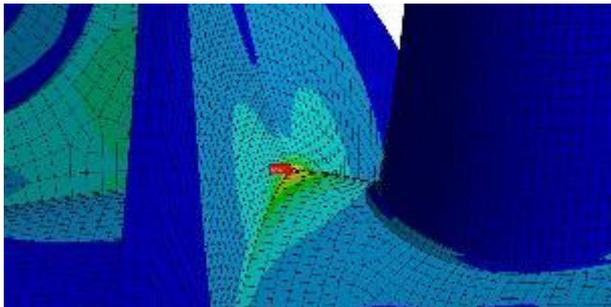
Sedangkan pada struktur *padeye* sendiri, tegangan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 172,85 MPa yang terletak di bagian *padeye* yang menempel dengan *ring stiffener* bawah (dekat dengan perpotongan antara *ring stiffener* bawah dan *chord*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

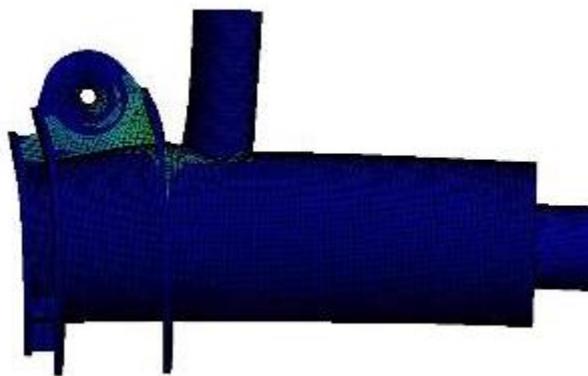
Berdasarkan analisis dan pembahasan yang sudah dilakukan pada bab sebelumnya, maka dari penelitian ini dapat ditarik kesimpulan bahwa hasil analisis tegangan pada sambungan di sekitar struktur *padeye*, yaitu sebesar 15,462 MPa, 34,347 Mpa, 77,364 MPa, dan 82,924 masing-masing ketika struktur mencapai kemiringan 0° , 14° , 60° , dan 90° . Hal ini dapat disimpulkan bahwa semakin banyak bagian struktur *jacket* yang muncul di atas permukaan air, maka tegangan maksimum yang dihasilkan juga semakin besar akibat bertambahnya beban. Selama proses *upending* struktur *jacket* berlangsung, tegangan paling besar yang terjadi di sambungan sekitar *padeye* mencapai 226,440 MPa. Sedangkan untuk tegangan *maksimum* yang terjadi di struktur



Gambar 15. Deformasi pada sambungan *padeye* ketika *step 4 upending*.



Gambar 16. Titik dengan tegangan *maximum* pada sambungan *padeye* ketika *step 4 upending*.



Gambar 17. Deformasi pada sambungan *padeye* ketika kondisi *tension sling maximum*.

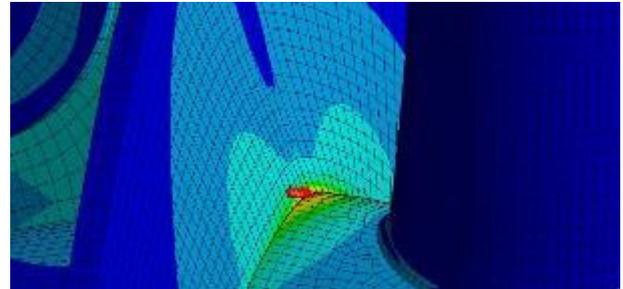
padeye sendiri sebesar 172,85 MPa dimana nilai tersebut mencapai 50% dari *yield strength* material yang digunakan, sehingga dapat disimpulkan bahwa *padeye* aman untuk digunakan pada struktur *jacket* selama dilakukannya proses *upending*.

V. DAFTAR PUSTAKA

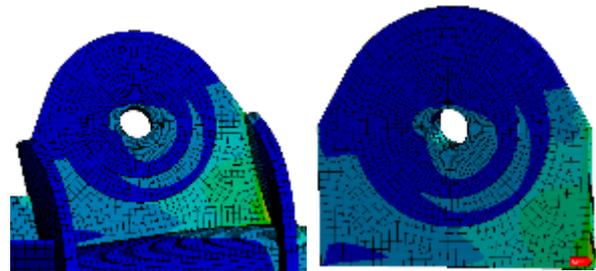
[1] J. Ye, V. Reppa, M. Godjevac, dan R. R. Negenborn, "Construction mode detection for autonomous offshore heavy lift operations," *Saf. Sci.*, vol. 133, hal. 104991, 2021, doi: 10.1016/J.SSCI.2020.104991.
 [2] "Analytical Research of Topside Installation in Mating phase with

Tabel 4.
 Summary Tegangan Maksimum pada Semua Variasi

Step	Force (N)	Arah Kerja F.	Tegangan Maksimum (MPa)
1.	59,391.89	8°	15,462
2.	144,118.30	-8°	34,347
3.	391,997.70	-56°	77,364
4.	433,603.10	-64°	82,924
<i>Tension Sling Maximum</i>	1,172,575.68	-62°	226,440



Gambar 13. Titik dengan tegangan *maximum* pada sambungan *padeye* ketika kondisi *tension sling maximum*.



Gambar 14. Titik dengan tegangan *maximum* pada struktur *padeye* ketika kondisi *tension sling maximum*.

Crane Vessel," *J. Ocean Eng. Technol.*, vol. 25, no. 4, hal. 1–6, 2011, doi: 10.5574/KSOE.2011.25.4.001.
 [3] Z. C. Liu, B. Zhou, dan S. K. Tan, "Finite element analysis and structure optimum design of lifting padeye," *Adv. Mater. Res.*, vol. 658, hal. 399–403, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.658.399.
 [4] N. Ku dan S. Ha, "Dynamic response analysis of heavy load lifting operation in shipyard using multi-cranes," *Ocean Eng.*, vol. 83, hal. 63–75, Jun 2014, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2014.03.026.
 [5] R. F. Yuzri, R. W. Prastianto, dan N. Syahrone, "Analisis kekuatan struktur jacket dan konfigurasi rigging saat proses roll-up pada fase fabrikasi," *J. Tek. ITS*, vol. 12, no. 1, hal. G35–G40, 2023, doi: 10.12962/j23373539.v12i1.110435.
 [6] B. Sertyesilisik, A. Tunstall, dan J. McLouglin, "An investigation of lifting operations on UK construction sites," *Saf. Sci.*, vol. 48, no. 1, hal. 72–79, 2010, doi: 10.1016/j.ssci.2009.06.001.
 [7] S. Soelarso, "Analisa struktur ula well platform tahap lifting dengan menggunakan software sacs 5.2," *Fondasi J. Tek. Sipil*, vol. 4, no. 1, 2015, doi: 10.36055/jft.v4i1.1220.
 [8] R. Y. Giri Kautsar, R. W. Prastianto, M. J. Rifqy, dan R. F. Farhana, "Analysis of a Lower Deck Rigging Configuration and Reusable Padeye Design based on Finite Element Model for Improving Stacking Operation Efficiency," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1081, no. 1, hal. 12043. doi: 10.1088/1755-1315/1081/1/012043.