

Analisis Pengaruh *Settlement* terhadap Kekuatan Struktur *Jacket* dan Konfigurasi Rigging pada Proses *Roll-up* Tahap Fabrikasi

Elyta Adriyanti Dwi Apsari, Yoyok Setyo Hadiwidodo, dan Nur Syahroni
 Departemen Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh (ITS)
e-mail: yoyoksetyo@oe.its.ac.id

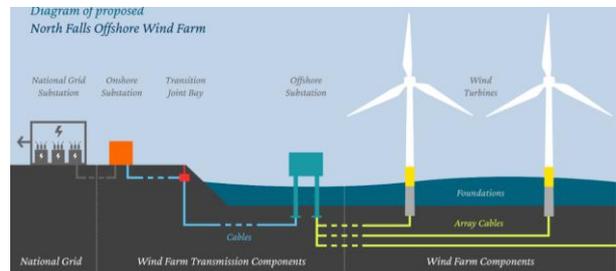
Abstrak—*Offshore Substation* merupakan infrastruktur yang sangat penting untuk menunjang aktivitas eksploitasi energi angin di lepas pantai. Untuk membangun *platform substation*, diperlukan beberapa tahapan fabrikasi dan konstruksi salah satunya yaitu proses *roll-up*. Pada proses *roll-up* tersebut, terjadi penurunan tanah pada *fabrication yard* yang mengakibatkan struktur *jacket* mengalami kemiringan dan memungkinkan terpapar risiko terjadinya kegagalan, sehingga dapat mengurangi efektivitas dari integritas struktur *jacket*. Pada penelitian Tugas Akhir ini, akan dilakukan analisis konfigurasi *roll-up* seperti *rigging*, dan *temporary structure* digunakan pada proses *roll-up*. Pemodelan dan analisis statis struktur *jacket* menggunakan software SACS v11.3 dengan variasi *roll-up angle* yaitu $0^\circ, 50^\circ, 75^\circ, 81^\circ, 85^\circ$, dan 94.74° untuk mengetahui nilai *unity check* (UC) pada *member* dan *joint strength* dari struktur *jacket*. Kemudian, analisis dilanjutkan pada respon/reaksi *support* akibat *roll-up* dan penurunan tanah. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur *jacket* masih memenuhi kriteria desain dan tidak mengalami kegagalan dengan *unity check* maksimum untuk *member jacket* yaitu 0.630 dan *unity check* maksimum untuk *joint strength* 0.809. Pada analisis *rigging* didapatkan konfigurasi 12 *slings*, 16 *shackles*, dan 4 *crane* untuk mendukung proses *roll-up* ini. Diperoleh efisiensi maksimum untuk *slings* yaitu sebesar 85.35%; 72.17% untuk *shackles* dan 89.44% untuk *crane*. Untuk analisis reaksi tumpuan akibat *settlement* didapatkan reaksi maksimum 2432.91 kN pada *U-Saddle 1* dan 1462.31 kN pada *V-Saddle A2*.

Kata Kunci—Fabrikasi, *Jacket*, *Roll-Up*, *Settlement*, *Unity Check*.

I. PENDAHULUAN

SISTEM energi kini memasuki masa perubahan yang transformatif, mulai dari beralihnya pembangkit listrik berbahan bakar fosil menuju pasar yang semakin terpusat pada sumber energi terbarukan yang didistribusikan secara luas seiring dengan respons dunia terhadap kebutuhan untuk mengurangi emisi karbon. Energi angin kini berhasil bersaing di seluruh dunia, membangun industri baru, dan memimpin jalan menuju masa depan energi bersih serta diharapkan dapat memecahkan masalah ketersediaan energi yang tentunya akan berdampak langsung pada industri fabrikasi. Pada tahun 2021, energi terbarukan yang dihasilkan oleh angin di seluruh dunia mencapai 1861,9 *Terawatt-hours*, dengan tingkat pertumbuhan tahunan yang luar biasa sebesar 17%, sesuai data dari *BP Statistical Review of World Energy* [1]. *Jacket Substation* merupakan *offshore substation fixed platform* untuk *wind farm* yang berfungsi sebagai infrastruktur yang dirancang untuk mengelola daya reaktif (sistem kelistrikan) dari turbin angin lepas pantai. *Substation* ini terletak di antara ladang angin lepas pantai dan *onshore*.

Dalam membangun *jacket platform*, proses *roll-up* menjadi salah satu tahap penting pembangunan struktur *jacket*. Proses ini menegakkan bagian struktur *jacket* beserta



Gambar 1. Sistem koneksi *offshore wind farm*.

Tabel 1.
Data Berat dan CoG Struktur *Jacket*

Komponen Berat	Berat Struktur (MT)	x axis y axis z axis		
		(m)		
<i>Jacket</i>				
<i>J-Tubes</i>	555.45	-15.76	11.44	2.71
<i>Anode</i>				

Tabel 2.
Data Komponen *Rigging*

<i>Sling</i>	<i>Shackle</i>	<i>Crane</i>
115mm <i>Steel Wire Rope</i>		
78mm <i>Cable Laid Grommet</i>	<i>Crosby</i>	QUY 650
58mm <i>Wire Rope</i>	<i>Bolt Anchor</i>	SANY 250
64mm <i>Wire Rope</i>		TEREX CC2800-1

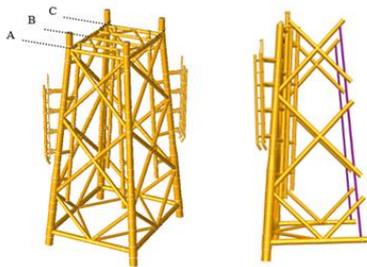
panel-panelnya dari posisi awal yang diletakkan secara horizontal menjadi berdiri tegak dengan konfigurasi akhir yang diinginkan. Hal-hal yang perlu dipertimbangkan dalam penentuan konfigurasi adalah penentuan *lifting aids* seperti *trunnion*, *sling*, *shackle*, dan lainnya yang akan dipasang pada struktur *jacket* [2].

Untuk mengurangi risiko terjadinya kegagalan pada struktur *jacket* selama proses *roll-up* akibat penurunan tanah, perlu dilakukan analisis kekuatan dan reaksi yang dihasilkan struktur *jacket* untuk setiap kenaikan sudut proses *roll-up*. Dengan demikian, dapat dijamin keamanan dan integritas struktur *jacket* selama proses fabrikasi dan konstruksi, serta memastikan bahwa struktur *jacket* dapat menahan beban yang diberikan dengan baik.

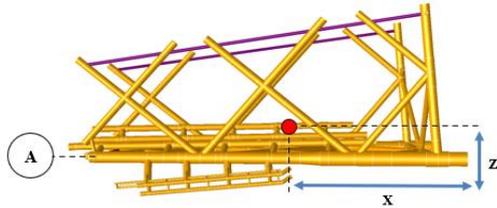
II. DASAR TEORI

A. *Offshore Substation*

Offshore Substation merupakan *offshore fixed platform* yang terdiri dari *topside module*, *jacket*, dan *pile*. *Platform* ini berfungsi sebagai infrastruktur yang dirancang untuk mengelola daya reaktif (sistem kelistrikan) dari turbin angin lepas pantai. Anjungan ini terletak di antara ladang angin lepas pantai dan *onshore*. Struktur *jacket* terdiri dari 4 kaki dengan *pile sleeve* di 4 kaki terluarnya dengan tinggi *jacket* yaitu 43.45-meter atau 142.55 ft. Sistem koneksi *offshore wind farm* disajikan pada Gambar 1.



Gambar 2. Model keseluruhan *jacket*.



Gambar 3. Lokasi *center of gravity* dari satu *row*.

B. Penurunan Tanah (Settlement)

Daya dukung tanah (*Soil Bearing Capacity*) adalah kapasitas tanah untuk menahan beban yang diterapkan pada permukaan tanah. Teori daya dukung tanah menurut Terzaghi merupakan salah satu metode yang paling awal diusulkan pada tahun 1943. Grafik Terzaghi dan Peck pada Eurocode 7 memberikan tekanan dukung yang diijinkan berdasarkan nilai SPT (*Standard Penetration Test*) tanah dengan asumsi penurunan maksimum 25 mm (2.5 cm) yang menurut pengalaman telah terbukti untuk mempertahankan penurunan total dan diferensial dalam batas yang dapat diterima. Pada penelitian ini menggunakan tiga variasi penurunan tanah yaitu sebesar 2.5 cm, 5 cm, dan 10 cm untuk kondisi ekstrem.

C. Proses Roll-up

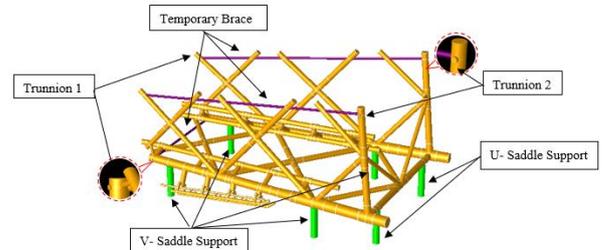
Roll-up merupakan rangkaian proses menegakkan sebagian rangka struktur *jacket* yang sudah dirakit sebelumnya sesuai dengan *rolling angle* yang ditetapkan dalam *fabrication sequence*. Pada umumnya metode pemasangan/penegakkan saat *roll-up* ditentukan oleh dimensi rencana struktur yang di fabrikasi. *Jacket* yang akan beroperasi pada perairan dangkal, pemasangan rangka dilakukan secara vertikal. Sedangkan untuk *jacket* yang beroperasi pada perairan dalam, *roll-up* dilakukan secara menyamping (sisi samping struktur) [3]. Selama tahap fabrikasi jika member tidak memiliki kekuatan yang memadai, maka diperlukannya *strongback*. *Temporary brace* juga mungkin diperlukan untuk menjaga struktur tetap stabil selama operasi *roll-up* [4].

D. Dynamic Amplification Factor (DAF)

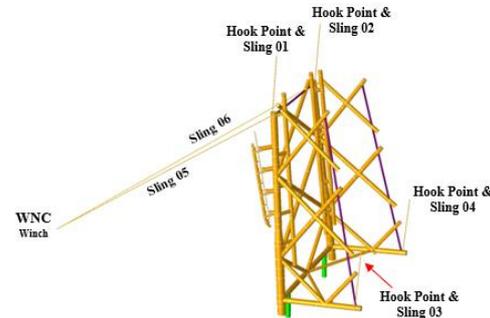
Dynamic Amplification Factor (DAF) sendiri adalah faktor yang memperhitungkan efek dinamis global yang biasanya dialami selama pengangkatan. Faktor ini didefinisikan sebagai rasio antara (*Dynamic Load + Static Load*)/*Static Load*. Penentuan nilai faktor DAF ditentukan oleh nilai *Static Hook Load* (SHL) dan lokasi yang akan dilakukannya proses *lifting*. Pada penelitian ini digunakan faktir DAF sebesar 1.12. DAF mengacu pada rules DNV OS H205 [5].

E. Defleksi pada Struktur Baja

Defleksi pada bidang rekayasa struktur merupakan besar displasemen yang dialami elemen struktur ketika mengalami



Gambar 4. Lokasi *temporary support*.



Gambar 5. Konfigurasi *rigging*.

pembebanan, sehingga struktur tersebut mengalami deformasi yang diukur dari perubahan sudut atau jarak dari kondisi awal sebelum mengalami pembebanan. Defleksi pada *member* struktur dan sistem struktur harus diminimalisir agar tidak mengganggu *serviceability* dari struktur itu sendiri. Hal ini juga dipaparkan pada standard DNVGL-OS-C101 LRFD *Method* untuk batas defleksi vertikal dan akan digunakan L/200 sebagai batas pada penelitian ini [6].

F. Unity Check (UC)

Analisis statis struktur dengan mempertimbangkan *unity check* (UC) *member*, yaitu rasio antara tegangan yang terjadi pada member struktur terhadap tegangan izin. Besar nilai UC disyaratkan kurang dari satu (<1) sebagai batas maksimum yang dapat diterima struktur.

$$UC = \frac{\sigma_{actual}}{\sigma_{allowable}} \times SF \tag{1}$$

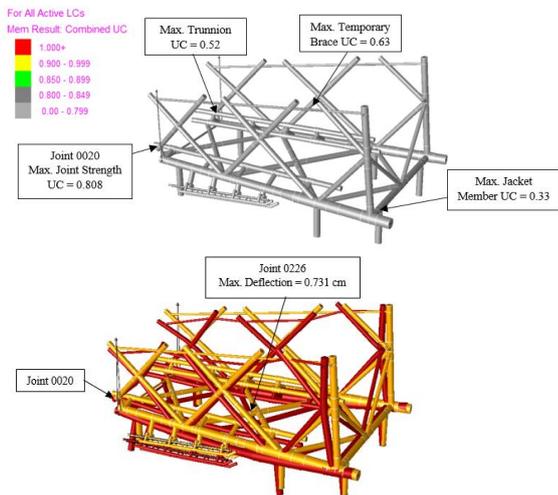
III. URAIAN PENELITIAN

A. Pengumpulan Data

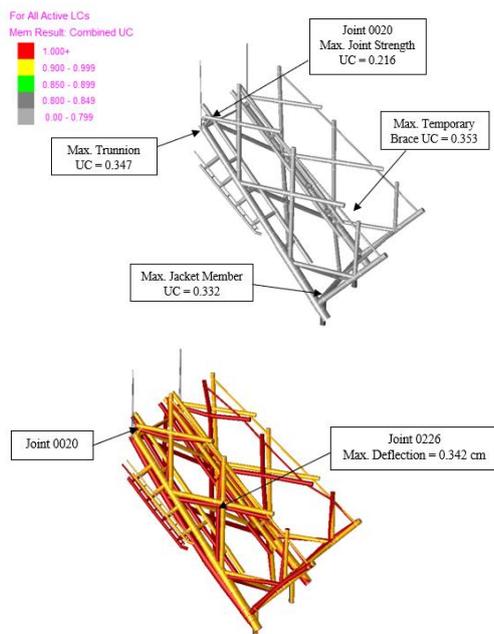
Data yang dibutuhkan untuk melakukan penelitian ini berupa data struktur *jacket* seperti *Weight Control Report* (WCR), *engineering drawing*, *saddle support* tipe "U" dan "V", dan *rigging arrangement*. Data *weight control report* (WCR) digunakan sebagai referensi untuk membandingkan hasil simulasi dengan struktur asli sebagai validasi berat dan posisi CoG, seperti yang disajikan pada Tabel 1. Untuk mendukung proses *roll-up* struktur *jacket*, komponen *rigging* yang diperlukan meliputi *sling*, *shackle*, dan *crane* disajikan pada Tabel 2.

B. Pemodelan Struktur Jacket

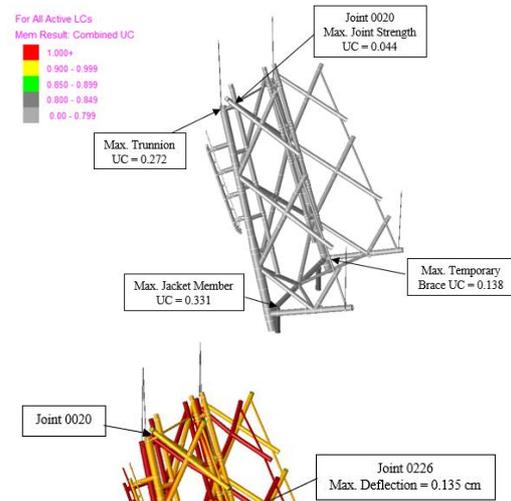
Pemodelan struktur dilakukan menggunakan data yang telah diperoleh sebelumnya yang akan menjadi input ke dalam perangkat lunak SACS v11.3. Pemodelan dilakukan untuk keseluruhan struktur kemudian dipotong hanya pada struktur satu *row* saja yang nantinya akan dilakukan analisis *roll-up*.



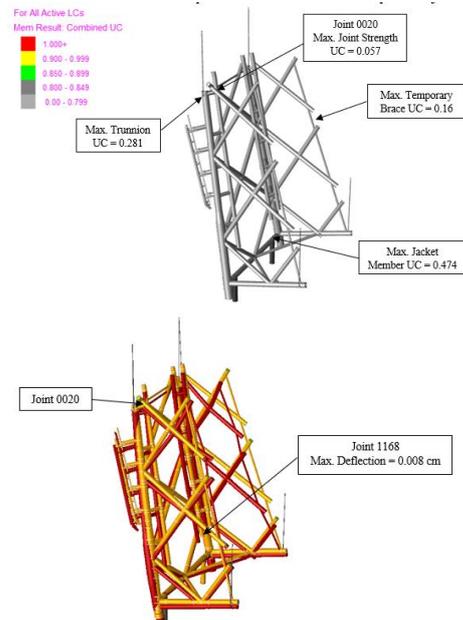
Gambar 6. Hasil analisis untuk sudut 0 derajat.



Gambar 7. Hasil analisis untuk sudut 50 derajat.



Gambar 8. Hasil analisis untuk sudut 75 derajat.



Gambar 9. Hasil analisis untuk sudut 81 derajat.

C. Validasi Model Struktur

Setelah melakukan pemodelan struktur *jacket*, selanjutnya melakukan validasi untuk menyamakan bentuk struktur asli dengan membandingkan berat struktur aslinya dari data WCR dengan struktur hasil pemodelan menggunakan perangkat lunak SACS v11.3. Besar nilai perbedaan berat model harus <5% dari berat model aslinya sesuai dengan spesifikasi DNV-GL-ST-N001. Jika model struktur belum memenuhi kriteria, maka harus dilakukan pemodelan ulang (*redesign*) sampai memenuhi kriteria validasi.

D. Penentuan Komponen dan Konfigurasi Roll-up

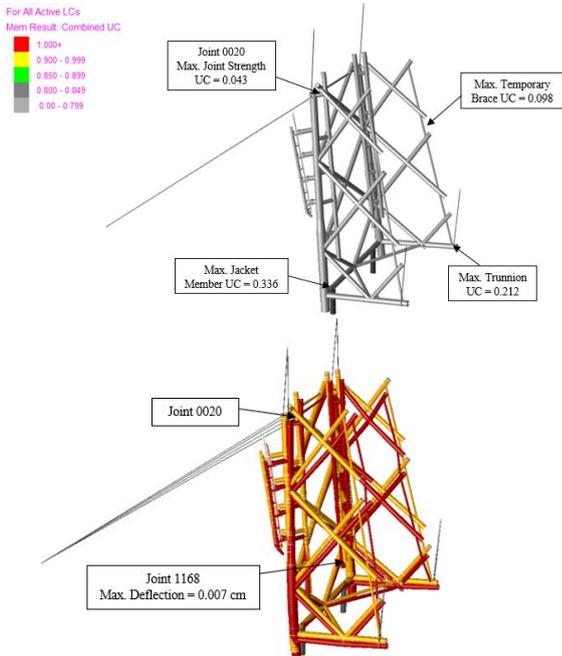
Menentukan komponen dan konfigurasi *rigging* dan *temporary structure* merupakan hal yang perlu dipertimbangkan sebelum melakukan analisis *roll-up jacket*. Penentuan komponen dan konfigurasi *rigging* seperti jumlah *sling* yang digunakan, letak *lifting point* untuk mengangkat struktur *jacket*, jumlah *shackle* dan penempatan sekaligus kapasitas *crane* yang digunakan. *Temporary structure* terdiri dari *trunnion* dan *temporary brace*. Struktur ini bersifat sementara dalam mendukung proses *roll-up*.

E. Analisis Roll-up

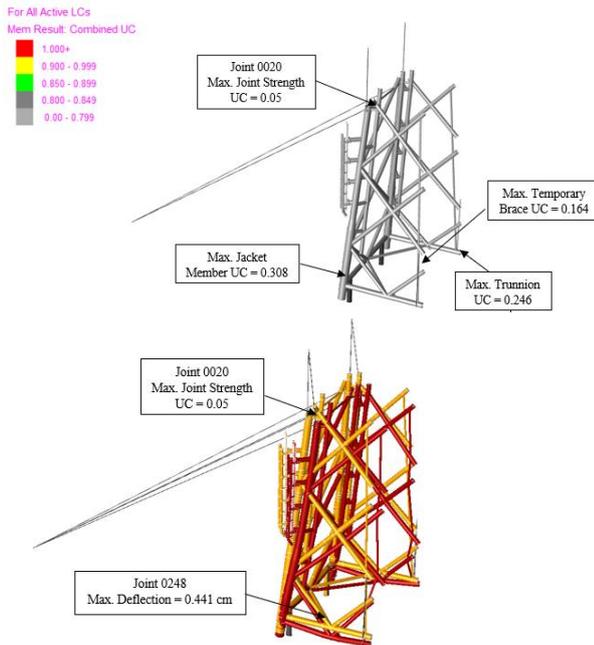
Setelah menentukan konfigurasi *roll-up*, selanjutnya dilakukan analisis *roll-up* dengan memvariasikan *roll-up angle* yaitu 0°, 50°, 75°, 81°, 85°, dan 94,7°. Analisis *roll-up* ini bertujuan untuk mengetahui beban, tegangan dan reaksi maksimum dari *sling*, *crane* maupun struktur *jacket* yang disebabkan oleh proses *roll-up*.

F. Analisis Kekuatan Struktur Jacket

Setelah dilakukan running untuk proses analisis *roll-up*, maka akan didapatkan nilai UC pada masing-masing *member* struktur *jacket* untuk setiap sudut kenaikan proses *roll-up*. Kemudian, akan didapatkan juga respon struktur *jacket* berupa *unity check* (UC) tiap *joint* untuk melihat fenomena *punching shear* yang terjadi. Kriteria nilai UC yaitu harus <1.0.



Gambar 10. Hasil analisis untuk sudut 85 derajat.



Gambar 11. Hasil analisis untuk sudut 94.74 derajat.

G. Analisis Kekuatan Komponen Rigging

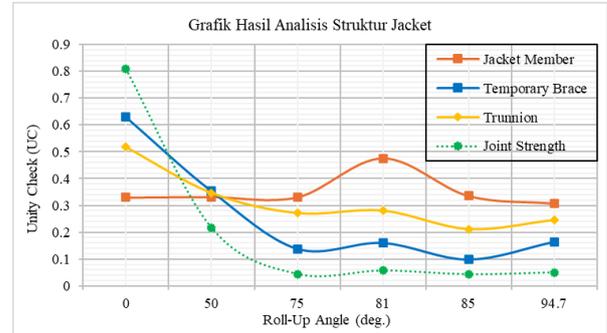
Analisis kekuatan komponen rigging merupakan analisis kekuatan sling dan shackle serta kapasitas crane yang dibutuhkan dengan menggunakan perhitungan manual yang mengacu pada codes/standard. Beban yang digunakan berdasarkan output dari perangkat lunak SACS v11.3.

H. Perhitungan Reaksi Saddle Support Akibat Proses Roll-up dan Penurunan Tanah

Perhitungan reaksi saddle support dilakukan pada kondisi normal/akibat proses roll-up dan kondisi penurunan tanah. Perhitungan ini bertujuan untuk membandingkan reaksi saddle support pada dua kondisi dan dilihat penambahan beban yang terjadi pada salah satu saddle support. Penurunan ekstrem diasumsikan pada salah satu saddle support sebesar 10 cm menggunakan software SACS v11.3.

Tabel 4. Maksimum Joint Deflection akibat Proses Roll-up

Angle (deg.)	Joint ID	Span (cm)	Max. Displacement (cm)	Allowable Deflection (cm) [L/200]	Ket.
0	0026	0218	0.731	4.190	Aman
50	0026	0218	0.342	4.190	Aman
75	0026	0218	0.135	4.190	Aman
81	1168	1210	0.008	2.308	Aman
85	1168	1210	0.007	2.308	Aman
94.74	0248	0244	0.441	5.641	Aman



Gambar 12. Grafik hasil UC setiap roll-up angle.

Tabel 5. Summary Maximum Static Sling Tension

Roll-up Angle (deg.)	HP01 ^{*)}	HP02	HP03	HP04
	Sling 01	Sling 02	Sling 03	Sling 04
0	154.62	143.85	0.00	0.00
50	111.90	99.45	0.00	0.00
75	87.68	73.85	16.64	19.14
81	67.46	58.06	31.85	33.07
85	60.34	51.72	39.85	40.64
94.74	0.00	0.00	73.77	79.95

*) HP [Hook Point]

Tabel 6. Summary Maximum Static Sling Tension Winch

Roll-up Angle (deg.)	Winch	
	Sling 05	Sling 06
85	109.41	118.47
94.74	363.875	389.26

IV. HASIL DAN DISKUSI

A. Pemodelan Struktur Jacket

Dari data yang telah didapatkan selanjutnya dilakukan pemodelan menggunakan software SACS 11.3 untuk keseluruhan struktur hingga satu row dari jacket sesuai dengan engineering drawing sehingga nantinya dapat dilakukan analisis terkait roll-up hingga reaksi tiap tumpuannya. Data Weight Control Report (WCR) untuk jacket disajikan pada Tabel 1. Model keseluruhan jacket disajikan pada Gambar 2.

B. Validasi Model Struktur Jacket

Validasi model dari struktur jacket dilakukan dengan membandingkan total berat keseluruhan model dengan total berat struktur yang sebenarnya atau berdasarkan WCR. Posisi CoG juga dilakukan validasi karena berpengaruh terhadap distribusi beban yang akan dianalisis. Batas error yang digunakan untuk validasi ini adalah kurang dari 5%. Didapatkan perbedaan sebesar 1.66% yang mana model dapat dikatakan valid dikarenakan masih dibawah dari batas yang sudah ditentukan terkait berat struktur begitu juga dengan

Tabel 7.
Rigging Capacity Summary

Deskripsi	SWL	Design Load	Eff.	Safety Factor
	(MT)	(MT)	(%)	
<i>Rigging on QUY 650 Crane</i>				
115mm Steel Wire Rope	180	154.62	50.53	6.49
<i>Rigging on SANY 250 & Terex CC2800-1 Crane</i>				
78mm Cable Laid Grommet	116.50	79.95	85.35	6.14
<i>Rigging on Hold Back System</i>				
58mm Wire Rope	40.00	39.69	58.37	6.05
64mm Wire Rope	50.00	39.69	79.38	7.33
Crosby Bolt Type Shackle	55.00	39.69	72.17	4.16

Tabel 8.
Crane Capacity Summary

Roll-up Angle (deg.)	QUY 650 [HP01]	QUY 650 [HP02]	Terex CC2800-1 [HP03]	SANY 250 [HP04]
	Efficiency (%)	Efficiency (%)	Efficiency (%)	Efficiency (%)
0	89.44	83.75	-	-
50	77.50	69.87	-	-
75	75.64	65.39	19.54	24.15
81	60.66	53.69	29.10	37.80
85	55.39	49.00	34.63	45.22
94.74	-	-	55.47	83.76

CoG. Lokasi *center of gravity* dari satu row disajikan pada Gambar 3. Validasi perbandingan berat dan CoG struktur Jacket disajikan pada Tabel 3.

C. Konfigurasi Temporary Structure dan Rigging

Terdapat 4 *trunnion* yaitu *trunnion* 1 yang berada di atas dan *trunnion* 2 yang berada di bawah yang digunakan pada proses *roll-up* struktur *jacket* ini dan terdapat *temporary brace* seperti yang mana untuk lokasi dari struktur tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.

Penentuan konfigurasi *rigging* mencakup dari lokasi *hook point* hingga lokasi dan jumlah *sling* yang digunakan. Untuk analisis *roll-up* pada kasus ini dibedakan menjadi 4 konfigurasi sesuai dengan *roll-up angle* untuk analisis ini. Untuk *roll-up angle* pada 0°-50° menggunakan 2 *hook point*, yang mana ini menandakan ada 2 *crane* yang digunakan. Pada *hook point* 1 (HP01) dan *hook point* 2 (HP02) terpasang masing-masing 1 *sling* yang terhubung langsung pada *trunnion* 1 sebagai titik hubungannya. Untuk *roll-up angle* pada 75°-81° menggunakan 4 *hook point*, sehingga ada penambahan *hook point* yang menandakan ada 4 *crane* yang digunakan yaitu *hook point* 3 (HP03) dan *hook point* 4 (HP04) masing-masing terdiri dari 1 *sling* yang langsung terhubung ke *trunnion* 2. Pada *roll-up angle* 85° dan 94.74° tetap menggunakan 4 *hook point* dengan ditambahkan *winch* sebagai *hold back system* untuk menahan momen terbalik selama proses *roll-up*. Konfigurasi *rigging* disajikan pada Gambar 5.

D. Analisis Kekuatan (Unity Check) Struktur Jacket

Seluruh member struktur *jacket* dilakukan analisis *static in-place* untuk mendapatkan hasil dari kekuatan struktur (*unity check*), *joint strength*, maupun dari hasil reaksi yang terjadi. Analisis dilakukan untuk setiap tahapan *roll-up angle* pada proses *roll-up* dari struktur *jacket* untuk dilihat respon yang terjadi.

Untuk analisis 0°, didapatkan nilai UC maksimum pada *member temporary brace* dengan nilai 0.63. Hal ini

Tabel 9.
U-Support Reaction Summary akibat Roll-up

Roll-up Angle (deg.)	UC	U-Saddle 1 (kN)		
		Fx	Fy	Fz
0	0.0444	0.00	-374.59	1942.32
50	0.0467	-3.41	-450.17	1950.36
75	0.0443	-2.44	-501.13	1983.11
81	0.0445	-40.26	-503.69	2086.22
85	0.0447	-62.82	-506.11	2063.79
94.74	0.0473	47.74	-506.65	2113.08

Tabel 10.
U-Support Reaction Summary akibat Roll-up

Roll-up Angle (deg.)	UC	U-Saddle 2 (kN)		
		Fx	Fy	Fz
0	0.0439	0.00	374.59	1782.32
50	0.0441	3.41	452.33	1812.09
75	0.0419	2.44	501.13	1910.80
81	0.0418	-22.38	506.00	1964.41
85	0.0420	-43.57	506.65	1967.83
94.74	0.0443	61.08	508.06	1988.59

Tabel 11.
V-Support Reaction Summary akibat Roll-up

Deskripsi	Support Reaction – Roll-up Angle 0 Degree (kN)			
	Fx	Fy	Fz	UC
V-Saddle A1	121.29	93.78	982.64	0.0157
V-Saddle A2	-100.19	100.91	1448.43	0.0193
V-Saddle B1	83.85	-97.04	915.67	0.0138
V-Saddle B2	-66.85	-101.93	1344.34	0.0166

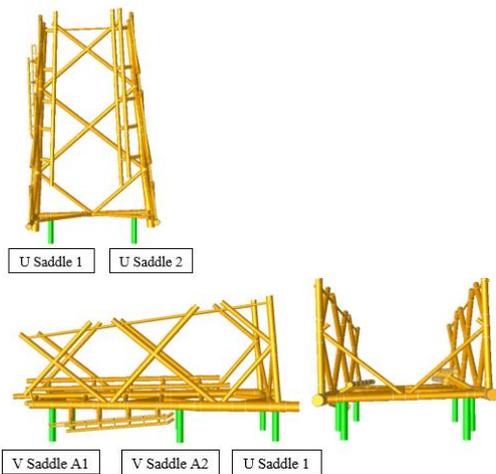
dikarenakan terjadinya *bending* pada *member temporary brace*. Sedangkan untuk *joint strength* maksimum terjadi pada *joint* 0020 dengan *unity check* sebesar 0.808. Maksimum *deflection* terjadi pada *joint* 0226 sebesar 0.731 cm. Hasil analisis untuk sudut 0 derajat disajikan pada Gambar 6.

Untuk analisis 50°, didapatkan nilai UC maksimum pada *member temporary brace* dengan nilai 0.353. Hal ini dikarenakan terjadinya *bending* pada *member temporary brace*. Sedangkan untuk *joint strength* maksimum terjadi pada *joint* 0020 dengan *unity check* sebesar 0.216. Maksimum *deflection* terjadi pada *joint* 0226 sebesar 0.342 cm. Hasil analisis untuk sudut 50 derajat disajikan pada Gambar 7.

Untuk analisis 75°, didapatkan nilai UC maksimum pada *member jacket* dengan nilai 0.331. Hal ini dikarenakan terjadinya *bending* pada *member temporary brace*. Sedangkan untuk *joint strength* maksimum terjadi pada *joint* 0020 dengan *unity check* sebesar 0.044. Maksimum *deflection* terjadi pada *joint* 0226 sebesar 0.135 cm. Hasil analisis untuk sudut 75 derajat disajikan pada Gambar 8.

Untuk analisis 81°, didapatkan nilai UC maksimum pada *member jacket* dengan nilai 0.474. Hal ini dikarenakan terjadinya *bending* pada *member temporary brace*. Sedangkan untuk *joint strength* maksimum terjadi pada *joint* 0020 dengan *unity check* sebesar 0.057. Maksimum *deflection* terjadi pada *joint* 1168 sebesar 0.008 cm. Hasil analisis untuk sudut 81 derajat disajikan pada Gambar 9.

Untuk analisis 85°, didapatkan nilai UC maksimum pada *member jacket* dengan nilai 0.336. Hal ini dikarenakan terjadinya *bending* pada *member temporary brace*. Sedangkan untuk *joint strength* maksimum terjadi pada *joint* 0020 dengan *unity check* sebesar 0.043. Maksimum *deflection* terjadi pada *joint* 1168 sebesar 0.007 cm. Hasil analisis untuk sudut 85 derajat disajikan pada Gambar 10.



Gambar 13. Ilustrasi support mengalami penurunan tanah.

Tabel 12.

Roll-up Angle (deg.)	UC	U-Saddle 1 (kN)		
		Fx	Fy	Fz
94.74	0.0473	47.74	-506.65	2113.08
94.74 (2.5 cm)	0.0484	41.16	-502.58	2217.62
94.74 (5 cm)	0.0497	34.53	-497.49	2231.74
94.74 (10 cm)	0.051	30.57	-434.92	2432.91

Tabel 13.

Roll-up Angle (deg.)	UC	U-Saddle 2 (kN)		
		Fx	Fy	Fz
94.74	0.0443	61.08	508.06	1988.59
94.74 (2.5 cm)	0.0423	58.75	516.02	1981.16
94.74 (5 cm)	0.0415	56.71	522.49	1973.27
94.74 (10 cm)	0.0408	53.94	528.03	1967.09

Untuk analisis 94.74°, didapatkan nilai UC maksimum pada member jacket dengan nilai 0.336. Hal ini dikarenakan terjadinya bending pada member temporary brace. Sedangkan untuk joint strength maksimum terjadi pada joint 0020 dengan unity check sebesar 0.043. Maksimum deflection terjadi pada joint 0248 sebesar 0.441 cm. Hasil analisis untuk sudut 94,74 derajat disajikan pada Gambar 11. Maksimum Joint Deflection akibat proses Roll-up disajikan pada Tabel 4.

Sehingga dapat dikatakan bahwa konfigurasi roll-up yang digunakan dan struktur jacket tidak mengalami kegagalan (failure) selama proses roll-up dilakukan. Untuk defleksi yang terjadi akibat proses roll-up ini dapat dikatakan masih aman karena masih dibawah kriteria desain untuk defleksi yang terjadi. Grafik hasil UC setiap roll-up angle disajikan pada Gambar 12.

E. Maksimum Sling Tension

Didapatkan hasil maksimum sling forces yang terjadi selama proses roll-up berlangsung dari hasil analisis menggunakan software SACS sebelumnya (member force). Maksimum static sling forces untuk mengetahui reaksi yang terjadi pada setiap slingnya selama proses roll-up pada angle 0 derajat sampai 95.74 derajat. Ringkasan hasil maksimum static sling tension disajikan pada Tabel 5.

Summary maximum static sling tension winch disajikan pada Tabel 6. Dari hasil static sling tension yang telah didapatkan, maka maksimum static sling tension adalah 154.62 MT atau 1516.31 kN pada sling 01 di hook point 01 saat posisi 0 derajat.

Tabel 14.

Support Reaction (kN)					
Roll-up Angle (deg.)	Fx	Fy	Fz	UC	
V-Saddle A1					
0	121.29	93.78	982.64	0.0157	
0 (2.5 cm)	112.45	94.10	982.93	0.0162	
0 (5 cm)	106.97	94.18	983.21	0.0179	
0 (10 cm)	102.03	95.22	983.71	0.0183	
V-Saddle A2					
0	-100.19	100.91	1448.43	0.0193	
0 (2.5 cm)	-109.78	104.47	1451.79	0.0198	
0 (5 cm)	-115.27	106.11	1455.16	0.0213	
0 (10 cm)	-127.81	107.07	1462.31	0.0237	

Tabel 15.

Support Reaction (kN)					
Roll-up Angle (deg.)	Fx	Fy	Fz	UC	
V-Saddle B1					
0	83.85	-97.04	915.67	0.0138	
0 (2.5 cm)	81.17	-96.11	914.90	0.0124	
0 (5 cm)	78.61	-95.97	914.08	0.0113	
0 (10 cm)	73.57	-94.54	912.30	0.0107	
V-Saddle B2					
0	-66.85	-101.93	1344.34	0.0166	
0 (2.5 cm)	-67.38	-99.88	1341.46	0.0154	
0 (5 cm)	-67.51	-97.97	1338.64	0.0141	
0 (10 cm)	-68.13	-95.15	1332.82	0.0138	

F. Rigging Check

Pengecekan seluruh rigging equipment adalah langkah penting dalam proses roll-up yang memastikan beban diamankan dengan benar dan stabil sebelum diangkat. Hal ini berlaku untuk menghitung kapasitas sling dan shackle yang digunakan selama proses roll-up berlangsung terhadap sling tension yang sudah didapatkan dari hasil analisis sebelumnya.

$$SF = \frac{MBL/SWL^*}{F_{SD}} \tag{2}$$

$$SWL_{eff} = \frac{SWL}{F_{SD}} \times 100 \tag{3}$$

*) SWL digunakan untuk mencari Safety Factor Shackle

Dimana, F_{SD} adalah nilai maksimum static sling tension. Untuk meningkatkan keselamatan dalam perencanaan perlu adanya desain faktor dalam menentukan kapasitas rigging equipment. Rigging equipment yang didesain harus mempertimbangkan efisiensi yang optimal karena berkaitan untuk menghemat biaya fabrikasi [2]. Untuk mendukung proses roll-up ini digunakan 12 sling dan 16 shackle yang disajikan pada Tabel 7. Dari analisis rigging didapatkan maksimum efisiensi terjadi pada cable laid grommet (Ø78 mm) dengan efisiensi sebesar 85.35%. Sedangkan untuk shackle diperoleh efisiensi maksimum yaitu 72.17%.

G. Crane Check

Konfigurasi crane perlu dilakukan dalam proses roll-up untuk mempertimbangkan kapasitas yang dapat ditahan dan efisiensi yang terjadi untuk setiap crane. Penentuan konfigurasi crane bergantung pada jumlah dan tipe crane, posisi roll-up angle serta beban yang diangkat hingga ketersediaan crane. Dimana, Rated Capacity didapatkan berdasarkan katalog crane dan DHL merupakan dynamic hook load [Max.Sling Tension + DAF x (Hook Block Weight + Rigging Weight)].

Didapatkan kapasitas crane pada roll-up angle 0°-50°

efisiensi maksimum terjadi pada *hook point* 01 (*Crane* QUY 650) yaitu sebesar 89.44%. Pada *roll-up angle* 75°-85° efisiensi maksimum terjadi pada *hook point* 01 (*Crane* QUY 650) yaitu sebesar 75.64%. Pada *roll-up angle* 94.74° efisiensi maksimum terjadi pada *hook point* 04 (*Crane* SANY 250) yaitu sebesar 83.76%. *Crane capacity summary* disajikan pada Tabel 8.

$$Eff = \frac{\text{Rated Capc.}}{DHL} \times 100 \quad (4)$$

H. Support Reaction Akibat Proses Roll-up

Selama proses *roll-up* berlangsung, setiap titik tumpu pada *saddle support* menimbulkan reaksi untuk setiap posisi *roll-up angle*. Maksimum *saddle reaction* untuk tipe U yaitu 2113.08 kN atau 215.47 MT pada *saddle* 1 dengan *unity check* sebesar 0.0473 dan posisi sudut 94.74 derajat. Sedangkan maksimum *saddle reaction* untuk tipe V yaitu 1448.43 kN atau 147.70 MT pada *saddle* A2 dengan *unity check* sebesar 0.0193 dan posisi sudut 0 derajat. Hasil analisis *U-saddle 1 reaction summary* akibat *roll-up* disajikan pada Tabel 9. Hasil analisis *U-saddle 2 reaction summary* akibat *roll-up* disajikan pada Tabel 10. Hasil analisis *V-support reaction summary* akibat *roll-up* disajikan pada Tabel 11.

I. Support Reaction Akibat Penurunan Tanah

Setelah melakukan analisis pada kondisi normal atau akibat proses *roll-up*, perlu dilakukan juga analisis pada kondisi penurunan tanah untuk mengetahui *support reaction* yang terjadi pada setiap "U" dan "V" *saddle*. Pemodelan dilakukan menggunakan bantuan *software* SACS dengan menurunkan salah satu *U-saddle support* dari posisi normalnya dan mengasumsikannya sebesar 2.5 cm, 5 cm, dan 10 cm

Hasil analisis didapatkan *u-saddle 1 reaction* akibat kondisi *settlement* disajikan pada Tabel 12. Hasil analisis didapatkan *u-saddle 1 reaction* akibat kondisi *settlement* disajikan pada Tabel 13. *Saddle reaction* maksimum yaitu 2432.91 kN dengan *unity check* sebesar 0.051 pada penurunan tanah 10 cm. Jika dibandingkan dengan kondisi normal, reaksi maksimum adalah 2113.08 kN. Sehingga dapat disimpulkan terjadi penambahan beban akibat *settlement* pada *u-saddle* 1 sebesar 319.83 kN. Ilustrasi *support* mengalami penurunan tanah disajikan pada Gambar 13.

Hasil analisis didapatkan *v-saddle A reaction* akibat kondisi *settlement* disajikan pada Tabel 14. Hasil analisis didapatkan *v-saddle B reaction* akibat kondisi *settlement* disajikan pada Tabel 15. *Saddle reaction* maksimum yaitu 1462.31 kN dengan *unity check* sebesar 0.0237 pada *v-saddle* A2 saat penurunan tanah 10 cm. Jika dibandingkan dengan

kondisi normal, reaksi maksimum adalah 1448.43 kN. Sehingga dapat disimpulkan terjadi penambahan beban akibat *settlement* pada *v-saddle* A2 sebesar 13.88 kN. Terjadinya reaksi maksimum pada *v-saddle* A2 dikarenakan posisi *v-saddle* A2 merupakan *support* terdekat dari posisi *settlement*.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, hasil analisa perhitungan kekuatan struktur *jacket* pada proses *roll-up* masih memenuhi kriteria desain sehingga tidak mengalami kegagalan pada saat proses *roll-up* pada struktur *jacket*. Dengan *unity check* maksimum adalah 0.630 yaitu pada *temporary brace* yang terjadi pada sudut *roll-up* 0°, sedangkan *unity check* untuk kekuatan *joint strength* adalah 0.808 yaitu pada *joint* 0020 yang terjadi pada sudut *roll-up* 0°. Pada perhitungan konfigurasi *rigging* tidak ada yang melebihi batas kriteria desain, sehingga *rigging* yang ditentukan dapat digunakan dengan aman. Efisiensi maksimum untuk *slings* yang digunakan adalah 85.35%, yaitu *cable laid grommet* (78 mm). Untuk *shackel*, efisiensi maksimumnya adalah 72.17% dengan menggunakan *Crosby Bolt Anchor*. Sedangkan untuk *crane*, efisiensi maksimum adalah 89.44% yang terjadi pada titik *hook* 01 (QUY 650) pada variasi sudut *roll-up* 0°. Reaksi maksimum yang didapatkan akibat proses *roll-up* pada *U-Saddle Support* adalah sebesar 2113.08 kN (*saddle* 1) dan pada *V-Saddle Support* adalah 1448.43 kN (*Saddle* A2). Sedangkan reaksi maksimum akibat *settlement* pada *V-Saddle Support* adalah sebesar 1462.31 kN yang terjadi pada *saddle* A2 dan pada *U-Saddle Support* adalah sebesar 2432.91 kN yang terjadi pada *saddle* 1.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zhou, Xue and Ke, Yajian and Zhu, Jianhui and Cui, Weiwei, "Sustainable operation and maintenance of offshore wind farms based on the deep wind forecasting," vol. 16, no. 1, pp. 1–26, 2023.
- [2] Yuzri, Rico Firdani and Prastianto, Rudi Walujo and Syahroni, Nur, "Analisis kekuatan struktur *jacket* dan konfigurasi *rigging* saat proses *roll-up* pada fase fabrikasi," *J. Tek. POMITS*, vol. 12, no. 1, 2023.
- [3] Gerwick, B, "Construction of marine and offshore structure," in *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 3rd ed., California: CRC Press, 2007.
- [4] Choo, Yeun Su, "Installation Engineering and Execution of Offshore Projects. Southampton", Departement Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, 2011.
- [5] Det Norske Veritas AS, "Lifting Operations (VMO Standard - Part 2-5)," Det Norske Veritas (DNV), 2014.
- [6] American Petroleum Institute, "Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design", United Kingdom: American Petroleum Institute, 2020.