

PENGKAJIAN TEKNOLOGI BARU BENTUK LAMBUNG OCTAGONAL SPM (*SINGLE POINT MOORING*) DENGAN PROSEDUR *TECHNOLOGY QUALIFICATION*

Danu Utama¹, Wasis Dwi Aryawan²

¹Program Pascasarjana Teknologi Kelautan, FTK, ITS, Surabaya, Indonesia

²Teknik Perkapalan, FTK, ITS, Surabaya, Indonesia

Email: danuutama65@gmail.com, aryawanwasis@gmail.com

Abstrak

Single Point Mooring atau SPM merupakan sarana bertambatnya kapal di laut, yang sekaligus berfungsi sebagai penyalur minyak dari atau ke kapal yang bertambat. Teknologi baru pada SPM berkembang seiring perkembangan teknologi eksplorasi minyak. Teknologi baru mengandung aspek inovatif yang belum diatur oleh standar yang ada, karena itu, tidak dapat dinilai melalui prosedur sertifikasi umum. Pengkajian perlu dilakukan untuk memastikan bahwa teknologi baru dapat diimplementasikan dengan aman dan dapat diandalkan. Proses pengkajian teknologi baru disebut *Technology Qualification* (TQ). Prosedur pengkajian teknologi baru pada SPM dikembangkan dari *guidance* yang diterbitkan oleh DNV, LR dan ABS. Proses pengkajian dilakukan dengan metode numerik dengan bantuan beberapa software komputer. Beberapa analisa yang dilakukan terkait penerapan teknologi baru bentuk octagonal lambung SPM yaitu analisa *motion response*, analisa *chain tension*, analisa kekuatan struktur dan analisa stabilitas lambung SPM. Penerapan bentuk lambung octagonal pada SPM dapat diterima, karena telah memenuhi kriteria pengkajian teknologi yang diberikan. Dari hasil pengkajian diketahui bahwa, *tension* maksimum yang terjadi pada *chain leg* SPM adalah 157.725 ton, tidak melebihi *breaking load* dari chain yang digunakan. Tegangan maksimum yang terjadi pada struktur SPM adalah 205 MPa, tidak melebihi tegangan ijin dari material yang digunakan. Sedangkan berdasarkan analisa SPM memenuhi kriteria stabilitas, baik *intact stability* maupun *damage stability*.

Kata kunci: *Single Point Mooring*, *Technology Qualification*, Teknologi Baru, Octagonal, Bentuk Lambung SPM

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

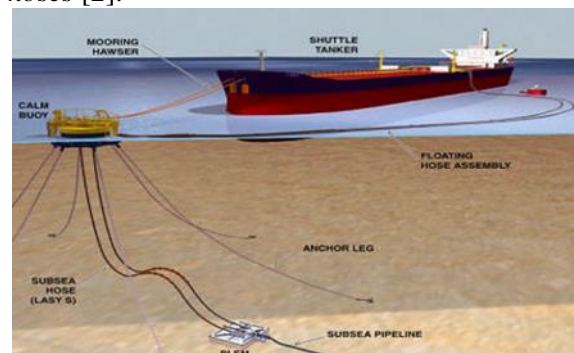
Proses eksplorasi dan eksploitasi untuk memperoleh cadangan minyak tentunya membutuhkan infrastruktur yang baik guna memperoleh hasil yang maksimal. Teknologi eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas semakin berkembang seiring dengan meningkatnya kebutuhan minyak dan gas. Salah satunya adalah dengan penggunaan *Single Point Mooring* atau SPM. SPM merupakan sarana tambat yang terpadu dengan sistem penyaluran minyak dimana kapal tanker harus bertambat dan melakukan bongkar muat minyak melalui rangkaian hose dan jalur pipa bawah laut.

Beberapa tipe SPM berdasarkan API RP 2 SK, 2006, adalah *Turret*, *Catenary Anchor Leg Mooring* (CALM), *Single Anchor Leg Mooring* (SALM), *Vertical Anchor Leg Mooring* (VALM), dan *Single Point Mooring Tower* (SPMT). Namun, jenis SPM yang paling banyak digunakan adalah jenis *Catenary Anchor Leg Mooring* (CALM) [1].

1.1.1 Catenary Anchor Leg Mooring

Sistem CALM buoy tersusun dari sebuah buoy body didukung oleh beberapa catenary

chain leg yang tertambat pada dasar laut. Konfigurasi dari CALM buoy yaitu terdapat *hawser* yang menghubungkan antara kapal tanker dan buoy. Selain itu, terdapat konfigurasi *riser* yang berada dibawah dari buoy tersebut. Dalam sistem kerjanya, CALM buoy dengan *riser*-nya menyalurkan minyak dari atau ke kapal tanker yang tertambat melalui *floating hoses* [2].



Gambar 1. Catenary Anchor Leg Mooring
(sumber: <http://nom.nb.no/eng/The-Field/>)

Pada umumnya, bentuk lambung CALM buoy adalah silinder. Namun, dari segi produksi, bentuk silinder cukup sulit untuk dikerjakan,

karena membutuhkan proses *bending* di beberapa titik. Begitu pula dengan proses pengelasan dan pemotongan pelat. Sebuah inovasi bentuk lambung diusulkan untuk memudahkan proses produksi, yaitu bentuk lambung octagonal (segi delapan).

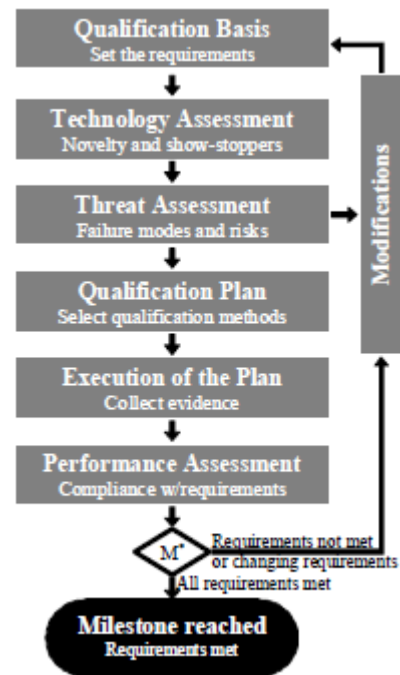
Dari segi operasional di laut, kemampuan SPM dihadapkan dengan gelombang laut. *Tension* dan *stress* yang terjadi pada SPM juga dipengaruhi oleh bentuk lambung. Selain itu, SPM juga diharapkan mempunyai kemampuan stabilitas yang baik. Inovasi bentuk lambung octagonal diharapkan mampu mengatasi permasalahan tersebut.

Studi kasus dalam penelitian ini adalah SPM OCTA 03 yang akan dibangun oleh salah satu perusahaan minyak swasta di Indonesia. Dalam pembangunannya, perlu dilakukan pengkajian terkait bentuk lambungnya, yang diindikasikan merupakan teknologi baru yang sebelumnya belum pernah diterapkan pada SPM.

Teknologi baru biasanya melibatkan aspek inovatif yang tidak ditangani oleh standar normatif yang ada dan karenanya tidak dapat dinilai melalui prosedur sertifikasi umum [3]. Untuk memastikan bahwa teknologi baru dapat diimplementasikan dengan cara yang aman dan dapat diandalkan, sebuah penilaian khusus dilakukan, yang dikenal sebagai *Technology Qualification* (TQ). TQ bertujuan membuktikan dengan tingkat yang dapat diterima dari keyakinan bahwa teknologi baru akan berfungsi dalam batas yang ditentukan [4]. Dalam bahasa Indonesia TQ dapat disebut dengan pengkajian teknologi.

1.1.2 Technology Qualification Procedure

Beberapa badan klasifikasi memberikan prosedur dalam proses pengkajian teknologi baru. *American Bureau of Shipping* (ABS) dalam “*Guidance Notes On Review And Approval Of Novel Concepts June 2003*” menyajikan prosedur yang cukup terperinci [5]. *Lloyds Register* (LR) juga memberikan panduan dalam pengkajian teknologi baru dalam “*Guidance Notes for Technology Qualification*” [6]. Sedangkan *Det Norske Veritas* (DNV) memberikan prosedur pengkajian teknologi baru dalam “*Recommended Practice DNV-RP-A203: Qualification of New Technology*” [7].



Gambar 2. Prosedur *Technology Qualification* DNV [7]

1.2 Tujuan

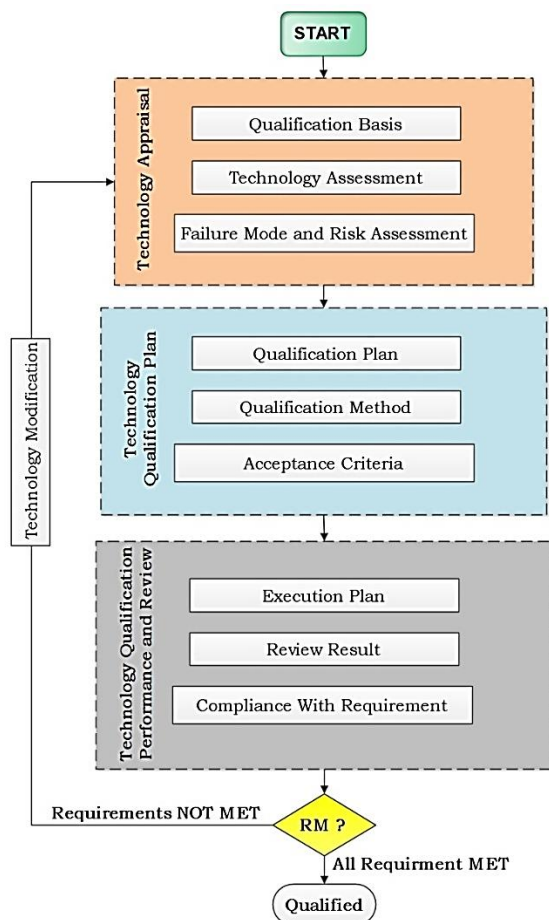
Bentuk lambung *octagonal* pada SPM diindikasikan sebagai teknologi baru yang belum diatur dalam *rule* dan dokumentasi lain, sehingga perlu dilakukan pengkajian. Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengkaji kelayakan penerapan bentuk lambung *octagonal* pada SPM.

2 METODOLOGI PENELITIAN

Beberapa prosedur yang diberikan oleh ABS, LR dan DNV secara umum merekomendasikan tahapan proses pengkajian yang relatif sama. Dengan mengkolaborasi ketiga prosedur dan penyesuaian langkah-langkah yang ada didapatkan tahapan pengkajian yang akan digunakan dalam penelitian ini seperti terlihat pada Gambar 3.

2.1 Qualification Basis

Qualification Basis adalah langkah pertama yang penting dalam proses pengkajian teknologi, karena dalam tahapan ini terdapat informasi dasar dari teknologi yang akan dikaji. *Qualification Basis* mendefinisikan secara spesifik bagaimana bentuk dan ukuran teknologi ini serta bagaimana teknologi ini dimaksudkan untuk digunakan, kondisi lingkungan dimana teknologi ini akan beroperasi, persyaratan dan kriteria umum yang harus dipenuhi sebelum teknologi ini digunakan.



Gambar 3. Metodologi penelitian pengkajian bentuk lambung octagonal SPM

2.2 Technology Assessment

Langkah kedua adalah *Technology Assessment* yang merupakan tahap analisis untuk menentukan tingkat kebaruan dari sebuah teknologi. Penilaian tersebut dilakukan berdasarkan data yang tersedia dari langkah sebelumnya.

2.3 Failure Mode and Risk Assessment

Teknologi baru yang dikaji harus ditindaklanjuti dengan analisa risiko. Ini sangat penting karena berkaitan dengan keselamatan baik dalam bentuk materi bahkan keselamatan jiwa. Analisa risiko akan selalu berkaitan dengan model kegagalan dan mekanisme kegagalan. Analisa risiko dilakukan dengan expert judgement, melalui informasi yang dikumpulkan dari *Technology Qualification Basis*. Penilaian harus mengidentifikasi semua mode dan mekanisme kegagalan yang mungkin terjadi selama siklus hidup (umur) dari teknologi yang direncanakan.

2.4 Qualification Plan

Pada tahap ini, metode pengkajian dan juga kriteria keberhasilan ditentukan. Qualification

Plan dikembangkan untuk membuktikan bahwa teknologi baru mampu mengatasi model kegagalan dan risiko yang telah diidentifikasi. Proses dan metode yang digunakan diharapkan mampu mendapatkan angka kuantitatif yang merepresentasikan kemampuan dari teknologi baru.

2.5 Qualification Method

Beberapa metode yang digunakan dalam proses pengkajian yaitu, metode analitik, metode numerik, atau dapat juga dengan eksperimen di laboratorium. Metode yang dipilih disesuaikan dengan teknologi baru yang dianalisa serta mempertimbangkan risiko yang mengancam teknologi tersebut ketika nanti diterapkan.

2.6 Acceptance Criteria

Semua proses pengkajian harus menetapkan *Acceptance Criteria*, yaitu sebuah acuan yang digunakan untuk memutuskan bahwa sebuah teknologi baru dapat diterima. *Acceptance Criteria* dapat bersumber pada rule atau peraturan umum yang berlaku. *Acceptance Criteria* juga dapat berupa batasan yang diambil dari kriteria sebuah material atau kemampuan maksimal sebuah produk.

2.7 Execution of the Plan

Setelah rencana pengkajian dibuat dengan matang, langkah selanjutnya yaitu menjalankan rencana tersebut. Setiap langkah dilakukan dengan hati-hati karena data yang didapatkan harus valid. Langkah ini merupakan langkah inti dalam pengkajian teknologi yang menghabiskan banyak waktu, biaya dan tenaga. Semua data hasil pengkajian didokumentasikan, termasuk juga kemungkinan risiko yang dapat dinilai pada tahapan eksekusi ini.

2.8 Review Result

Data yang didapatkan dari setiap langkah harus didokumentasikan dengan baik. Pemeriksaan data dilakukan untuk mendapatkan data yang valid dan dapat dibuktikan kebenarannya. Dari data yang dihasilkan juga dapat digunakan untuk mengoreksi ketepatan proses pengkajian yang dilakukan. Data yang didokumentasikan juga harus tepat, sesuai dengan kriteria dan *requirement* yang diminta pada tahap *qualification basis*.

2.9 Compliance With Requirement

Compliance with requirement adalah langkah terakhir sebagai penentuan apakah sebuah teknologi baru layak untuk diterapkan atau tidak. Semua hasil pengkajian dibandingkan dengan permintaan dan

persyaratan yang telah diberikan pada tahap *Qualification Basis*.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

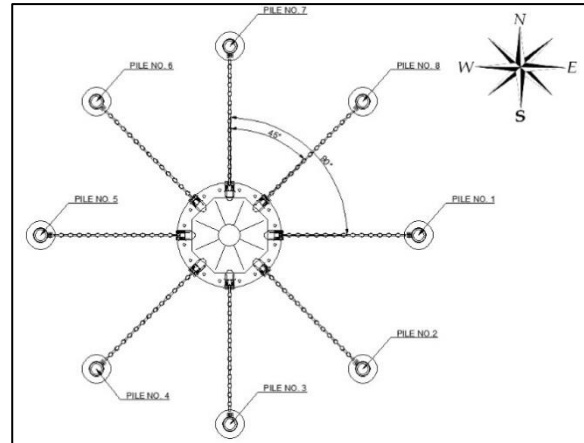
3.1 *Qualification Basis*

Single Point Mooring (SPM) yang dijadikan studi kasus dalam penelitian ini adalah SPM OCTA 03. SPM ini didesain sebagai fasilitas terminal transfer minyak dan atau gas di perairan dangkal. SPM OCTA 03 diharuskan mampu digunakan sebagai tempat bertambatnya tanker dengan ukuran 125.000 DWT, dan dalam keadaan operasional digunakan untuk *loading* dan *offloading* minyak terhadap tanker. Dalam keadaan cuaca badai di laut, tanpa ada kapal tanker yang tertambat, SPM OCTA 03 harus mampu bertahan, tidak tenggelam atau hanyut akibat arus dan gelombang yang terjadi.. Ukuran utama dari SPM OCTA 03 tertera dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Deskripsi SPM

Description	Quantity	Unit
Type of SPM	CALM	-
Hull Form	Octagonal	-
Hull outer diameter	14	m
Buoy Height	5.5	m
Buoy installed draft	3.2	m
Number of compartement	8	-
Buoy Weight	274.15	ton

Bentuk lambung octagonal yang menjadi inovasi pada SPM OCTA 03 perlu dianalisa kelayakan penerapannya, karena bentuk lambung dari SPM mempengaruhi respon gerak terhadap gelombang laut. Gerakan lambung SPM menyebabkan adanya *tension* pada *mooring line* baik yang mengikat terhadap dasar laut, maupun *hawser* yang berfungsi menambatkan kapal. *Tension* yang terjadi pada *mooring line* memberikan beban tambahan pada struktur lambung SPM. Mooring layout SPM direncanakan seperti terlihat pada Gambar mmm Jarak horizontal dari pusat spm ke ujung *pile* 290 m, dengan panjang *chain leg* 302.5 m.



Gambar 4. Rencana mooring layout SPM

3.2 *Technology Assessment SPM*

Pada studi kasus SPM OCTA 03, inovasi yang diusulkan yaitu bentuk lambung octagonal. Untuk mengetahui apakah inovasi yang diusulkan merupakan teknologi baru atau bukan, maka perlu dilakukan penilaian. Penilaian terhadap bentuk lambung octagonal menggunakan tabel “*novel concept*” yang diberikan oleh ABS [5].

Tabel 2. Tipikal pertanyaan “*novel concept*” ABS

Structural Aspec		
S1	Apakah lambung yang diusulkan atau desain struktur utama dianggap dalam batas-batas pengalaman yang ada untuk kapal atau fasilitas lepas pantai?	No
	Apakah sudah ada penerapan konfigurasi struktural seperti yang diusulkan (misalnya, bentuk yang unik, ukuran ekstrim [ditingkatkan dari versi yang ada aplikasi], pengaturan [tata letak baru untuk meningkatkan stabilitas, gerakan, konstruksi atau kecepatan] atau pembebanan yang tidak lazim)?	No
	Apakah sudah ada desain struktural yang menggunakan material, detail sambungan atau toleransi konstruksi untuk aplikasi yang serupa?	No
	Apakah desain yang diusulkan tidak akan membutuhkan peningkatan (yaitu, selain apa yang biasanya diperlukan oleh Aturan kelas) pemeliharaan atau prosedur pemantauan struktural untuk memastikan integritas yang memadai dan kinerja struktural karena fitur baru atau penerapan teknologi baru?	No

ABS menyebutkan bahwa “apabila jawaban dari semua *checklist* yang diberikan adalah “YES” atau “N/A” maka inovasi yang diusulkan bukan merupakan teknologi baru”. Dalam studi kasus SPM OCTA 03, terdapat empat (4) pertanyaan dengan jawaban “NO”, maka dapat disimpulkan bahwa inovasi bentuk lambung octagonal merupakan teknologi baru [5].

3.3 *Failure Mode and Risk Assessment*

Analisa risiko diawali dengan identifikasi bahaya. Penilaian risiko dilakukan mengacu pada FMEA (*Failure mode, Effect and*

Criticality Analysis) sheet dengan sedikit modifikasi pada kolomnya. Ada enam komponen dalam SPM yang dianalisa, beberapa diantaranya menunjuk-kan risiko yang cukup tinggi [8].

1. Lambung SPM dengan fungsi stabilitas mengapung, dengan risiko kebicoran
2. Struktur konstruksi SPM dengan fungsi kekuatan, dengan risiko patah dan robek.
3. *Hawser rope* dengan fungsi penambatan kapal, dengan risiko putus.
4. *Chain leg* dengan fungsi penambatan dasar laut, dengan risiko putus.
5. *Anchor/pile* dengan fungsi penambatan dasar laut, dengan risiko geser.
6. *Riser* dengan fungsi trnsfer minyak dengan risiko bocor atau putus.

Dari tabel FMEA dapat di ekstrak kedalam sebuah matriks risiko, sehingga terlihat lebih jelas penilaian risiko yang dilakukan seperti telah terlihat pada Gambar 5.

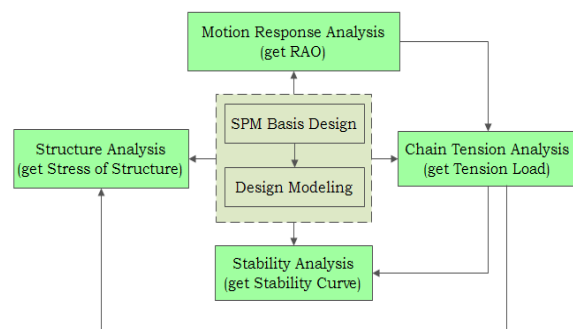
Probability Level	A				
	B	3		2 & 4	1
	C	5	6		
	D				
	E				
		I	II	III	IV
		Severity Category			

Gambar 5. Rangkuman analisa risiko SPM OCTA 03

3.4 Qualification Plan

Berdasarkan analisa risiko yang telah dilakukan, komponen yang beresiko tinggi adalah *chain leg*, kebocoran lambung dan kegagalan struktur SPM. Untuk menganalisa apakah komponen tersebut mampu melawan risiko yang timbul, maka perlu dilakukan analisa lebih mendalam terkait hal tersebut.

Dari data yang ada dan melihat pengaruh bentuk lambung SPM terhadap seluruh sistem maka dikembangkan sebuah rencana pengkajian sepeti terlihat pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Technology Qualification Plan

3.5 Qualification Method

Metode yang digunakan dalam analisa yang digunakan yaitu metode numerik dengan bantuan software komputer.

3.6 Acceptance Criteria

Pertama, analisa tegangan pada *chain leg* akibat *motion response* SPM terhadap gelombang laut. Kriterianya adalah, tension yang terjadi pada *chain leg* tidak boleh melebihi *breaking load* dari jenis *chain leg* yang digunakan dengan mempertimbangkan *safety factor*. ABS dalam peraturannya, “*Rules For Building and Classing Single Point Moorings 2014*”, mensyaratkan *safety factor* sebagai berikut.

- ✓ *Design Operating Load Case* (3)
- ✓ *Design Environmental Load Case* (2.5)
- ✓ *One Line damage condition* (2)

Dari desain basis SPM OCTA 03 diketahui bahwa *chain leg* yang direncanakan adalah *Chain grade R4* diameter 95 mm. Berikut acceptance criteria yang diterapkan pada chain leg SPM OCTA 03.

Tabel 3. Acceptance criteria anchor leg tension

Chain Grade	Nominal diameter	Breaking Load (ton)	Safety Factor	Maximum Actual Tension (ton)
R4	95 mm	918		
For the Design Operating Load Case			3	306
For the Design Environmental Load			2.5	367.2
One Line damage condition			2	459

Kedua, analisa stabilitas pada bentuk lambung octagonal SPM OCTA 03. Kriteria yang harus dipenuhi pada analisa stabilitas, seperti yang disebutkan oleh ABS yaitu:

- ✓ Kondisi lambung utuh (*Intact ctability*)
 - 1 Tinggi titik metacenter lebih dari 0 meter.
 - 2 Energi penegak (luas area dibawah kurva momen penegak, *righting moment*) lebih besar dari 1.4 kali energi pengguling (luas area dibawah kurva

momen pengguling, *overturning moment*).

- 3 Lambung SPM menerima gaya angkat yang cukup untuk melawan pretension dari *anchor leg*.
- ✓ Kondisi lambung bocor (*Damage stability*)
 - 1 SPM harus tetap mampu mengapung dalam kondisi terjadi kebocoran pada satu kompartemen.

Pada analisa struktur, kriteria penerimaan yang harus dipenuhi adalah tegangan yang terjadi pada struktur SPM tidak melebihi tegangan ijin dari material yang digunakan pada SPM OCTA 03 dengan mempertimbangkan *safety factor* yang disyaratkan. ABS memberikan panduan mengenai *safety factor* sebagai berikut.

- ✓ Design Operating Load Case
 1. untuk *Axial Bending Stress* (1.67)
 2. untuk *Shear Stress* (2.50)
- ✓ Design Environmental Load Case
 1. untuk *Axial Bending Stress* (1.25)
 2. untuk *Shear Stress* (1.88)

Material yang digunakan pada pembangunan SPM OCTA 03 adalah baja AH-36. Sehingga tegangan ijin dapat dihitung sebagai berikut.

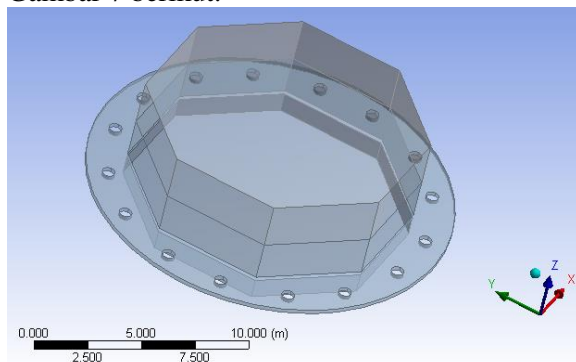
Tabel 4. Acceptance criteria analisa struktur SPM

Material ABS AH36	Yield Stress (MPa)	Operating Load		Extreme Load	
		Factor of Safety	Allowable Stress	Factor of Safety	Allowable Stress
Axial Bending Stress	355	1.67	212.57	1.25	284.00
Shear Stress	355	2.5	142.00	1.88	188.83

3.7 Execution of the Plan dan Review

3.7.1 Motion response analysis

Langkah pertama dari pelaksanaan rencana pengkajian adalah pembuatan model SPM berdasarkan desain basis. Untuk keperluan analisa *motion*, model dibuat langsung di *Ansys Aqwa* atau juga dapat di import dari *software drawing* yang lain. Model SPM terlihat pada Gambar 7 berikut.



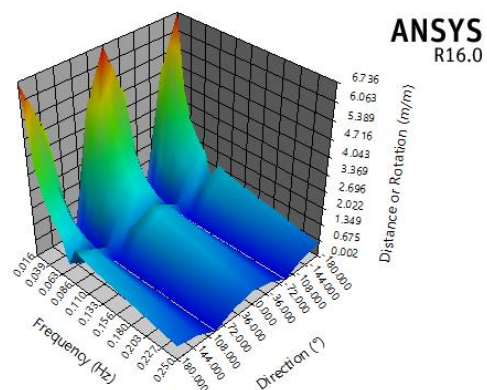
Gambar 7. Model lambung SPM (analisa motion)

Setelah model lambung SPM selesai, selanjutnya yaitu pendefinisian massa dan titik berat SPM. Setelah melalui proses *meshing*, selanjutnya yaitu pendefinisian frekuensi, dan arah gelombang. Data yang menjadi input untuk analisa motion disajikan pada Tabel 5 berikut.

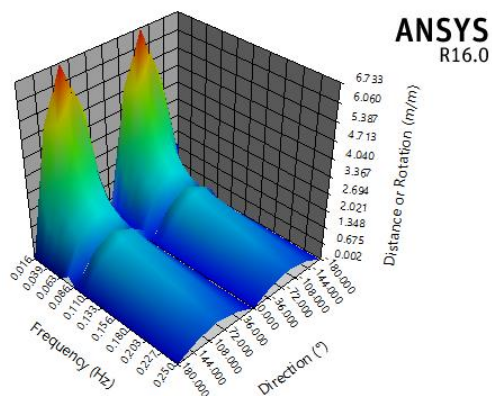
Tabel 5. Input data analisa motion SPM

Details of Point Mass	
Suppressed	Not Suppressed
X	0.26 m
Y	-0.22 m
Z	0.21 m
Mass Definition	Manual
Mass	279047.12 kg
Kxx	6.1557 m
Kyy	6.1581 m
Kzz	6.0663 m
Wave Direction	
Wave Range	-180° to 180°
Interval	45°
Wave Frequency/Period Definition	
Lowest Frequency	0.01592 Hz
Longest Period	62.83185 s
Highest Frequency	0.25 Hz
Shortest Period	4 s
No. of Intermediate Values	18
Interval Frequency	0.01232 Hz

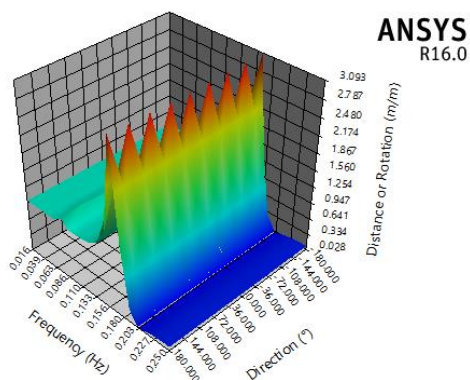
Hasil dari analisa *motion* adalah RAO dari enam gerakan SPM, yaitu *Surge* (Global X), *Sway* (Global Y), *Heave* (Global Z), *Roll* (Global RX), *Pitch* (Global RY) dan *Yaw* (Global RZ). Grafik dari keenam RAO dapat dilihat pada berikut.



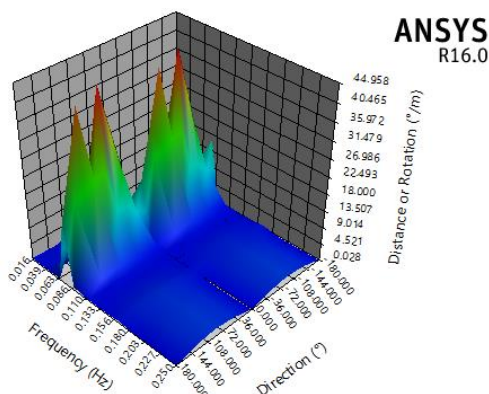
Gambar 8. RAO Surge



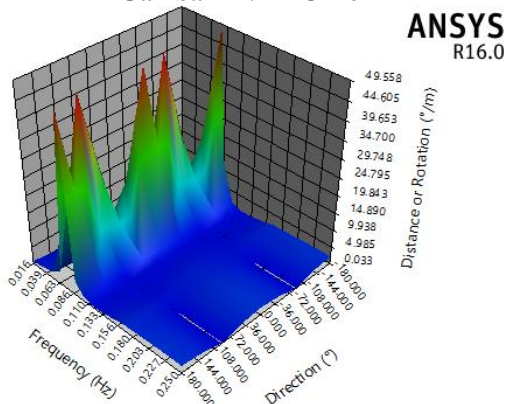
Gambar 9. RAO Sway



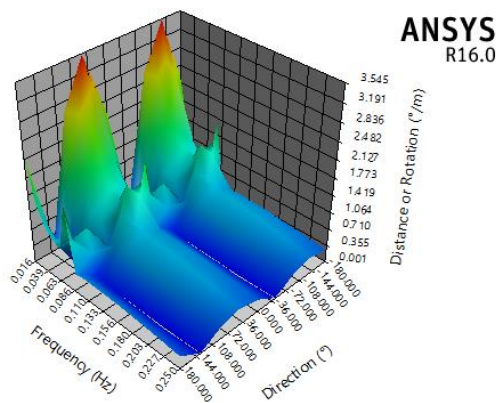
Gambar 10. RAO Heave



Gambar 11. RAO Roll



Gambar 12. RAO Pitch

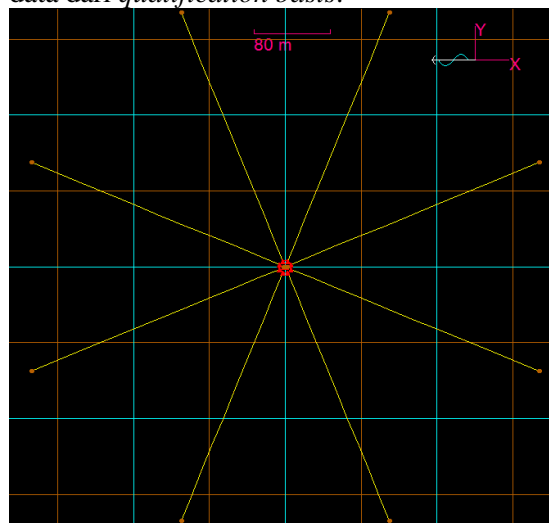


Gambar 13. RAO Yaw

RAO yang didapatkan dari analisa *motion response* dijadikan sebagai input untuk analisa *chain leg tension analysis*.

3.7.2 Chain leg tension analysis

Analisa *Chain leg tension* dilakukan untuk mendapatkan *tension* yang terjadi pada masing-masing *mooring line* akibat gerakan yang merupakan respon dari gelombang air laut yang terjadi. Langkah pertama untuk analisa *Chain leg tension* adalah membuat mooring layout di *Orcaflex*. *Mooring layout* disesuaikan dengan data dari *qualification basis*.



Gambar 14. Mooring layout SPM

Langkah selanjutnya yaitu input RAO dan data lingkungan. SPM direncanakan akan dioperasikan di perairan Intersection Santan dengan data met ocean 100 tahun terlihat dalam berikut.

Tabel 6. Data lingkungan Intersection Santan

No.	Item	10 tahun	100 tahun	Unit
		(operasional)	(Ekstrim)	
1	Significant Wave Height (Hs)	2.3	2.6	m
2	Wave Peak Period (Tp)	6.9	7.3	s
3	Kecepatan angin	15.2	17.5	m/s
4	Surface Current Velocity	0.49	0.51	m/s

a. Kondisi cuaca ekstrim

Analisa *chain leg tension* pada kondisi cuaca ekstrim menggunakan data lingkungan laut 100 tahun (*return period*). Untuk mendapatkan kemungkinan *tension* maksimal yang terjadi pada kondisi cuaca ekstrim, tanpa kapal tanker, analisa dilakukan dengan beberapa load case seperti disajikan pada Tabel 7 berikut.

Tabel 7. Load case analisa chain tension pada SPM kondisi ekstrim

Storm Condition, Colinier (Wave, Current & Wind)			Index
A	Intact	1 Heading to 180	A.1
		2 Heading to 157.5	A.2
B	One Line Damage	1 Heading to 180	B.1
		2 Heading to 157.5	B.2

Hasil analisa *chain leg tension*, yaitu *tension* yang terjadi pada masing-masing *chain leg* seperti disajikan dalam Tabel 8 dan Tabel 9 berikut.

Tabel 8. Tension pada load case A.1 dan A.2

CASE (A.1.1.1)	MOORING LINE	Tension (kN)		CASE (A.1.1.1)	MOORING LINE	Tension (kN)	
		END A	END B			END A	END B
Storm Condition, Intact Line, Heading 180°	Chain - 1	559.28	284.94	Storm Condition, Intact Line, Heading 157.5°	Chain - 1	479.06	188.08
	Chain - 2	419.95	124.16		Chain - 2	396.72	118.97
	Chain - 3	410.56	186.80		Chain - 3	421.00	238.14
	Chain - 4	428.85	269.28		Chain - 4	431.52	275.58
	Chain - 5	418.47	259.42		Chain - 5	405.38	229.42
	Chain - 6	378.29	153.86		Chain - 6	372.66	96.46
	Chain - 7	381.18	80.57		Chain - 7	451.53	162.13
	Chain - 8	536.09	260.77		Chain - 8	553.23	275.01
	Riser 1	63.62	2.77		Riser 1	69.49	2.77
	Riser 2	62.88	2.78		Riser 2	68.45	2.80

Tabel 9. Tension pada load case B.1 dan B.2

CASE (A.1.2.1)	MOORING LINE	Tension (kN)		CASE (A.1.2.2)	MOORING LINE	Tension (kN)	
		END A	END B			END A	END B
Storm Condition, 1 Line Damage, Heading 180°	-	-	-	Storm Condition, 1 Line Damage, Heading 157.5°	-	-	-
	Chain - 2	495.35	166.97		Chain - 2	455.01	134.91
	Chain - 3	412.29	172.09		Chain - 3	429.43	232.59
	Chain - 4	389.71	260.41		Chain - 4	396.07	268.03
	Chain - 5	361.15	251.68		Chain - 5	349.56	222.40
	Chain - 6	333.23	142.10		Chain - 6	327.04	81.07
	Chain - 7	376.89	77.13		Chain - 7	438.66	149.93
	Chain - 8	671.11	371.32		Chain - 8	681.03	384.2
	Riser 1	71.72	3.47		Riser 1	66.99	2.82
	Riser 2	69.62	2.75		Riser 2	65.46	2.83

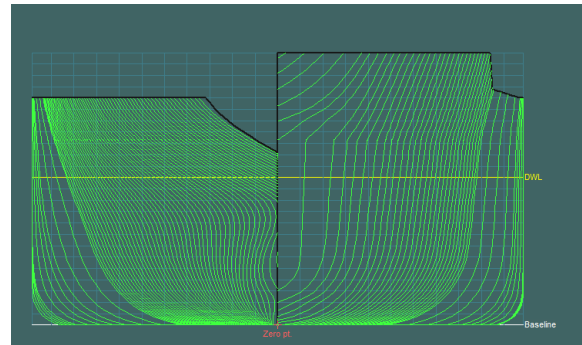
b. Kondisi operasional

Pada kondisi operasional, SPM didesain untuk proses *loading/unloading* pada kapal tanker 125.000 DWT. Kapal tanker yang bertambat pada SPM dianalisa dalam dua kondisi muatan, yaitu kondisi muatan penuh dan pada kondisi ballast. Data kapal yang digunakan untuk simulasi pada analisa *chain tension* diberikan pada berikut.

Tabel 10. Data kapal Tanker

Item	Full Load	Ballast Load
Length between Perpendiculars	: 272.000 m	: 272.000 m
Breadth Moulded	: 43.400 m	: 43.400 m
Depth Moulded	: 20.600 m	: 20.600 m
Draft mean	: 12.878 m	: 8.490 m
Draft Fwd	: 12.878 m	: 8.490 m
Draft Aft	: 12.878 m	: 8.490 m
Displacement	: 127134 tones	: 81992 tones

Data RAO dari kapal tanker dijadikan input pada analisa *chain tension* pada kondisi operasional. RAO dari badan kapal dihitung dalam dua kondisi, muatan penuh dan kondisi *ballast*.



Gambar 15. Body plan tanker 125.000 DWT

Untuk mengetahui *tension* maksimal dari *chain leg* SPM, analisa dilakukan dalam beberapa *load case*. Variasi *load case* dibedakan berdasarkan kondisi muatan tanker, kondisi *chain leg* SPM dan arah datangnya gelombang, arus dan angin di laut. menunjukkan *load case* pada analisa *chain tension* SPM kondisi operasional.

Tabel 11. Load case analisa chain tension pada SPM kondisi operasional

		Kondisi chain leg		Kondisi muatan	Arah wave, current, wind	Index
A	COLINIER	1	Intact	1 Full Load	1 Heading to 180	A.1.1.1
					2 Heading to 157.5	A.1.1.2
				2 Ballast Load	1 Heading to 180	A.1.2.1
					2 Heading to 157.5	A.1.2.2
		2	One Line Damage	1 Full Load	1 Heading to 180	A.2.1.1
					2 Heading to 157.5	A.2.1.2
				2 Ballast Load	1 Heading to 180	A.2.2.1
					2 Heading to 157.5	A.2.2.2
B	NON COLINIER	1	Intact	1 Full Load	1 Heading to 180 Wind 157.5	B.1.1.1
					2 Heading to 180 Wind 135	B.1.1.2
				2 Ballast Load	1 Heading to 180 Wind 150	B.1.2.1
					2 Heading to 180 Wind 135	B.1.2.2
		2	One Line Damage	1 Full Load	1 Heading to 180 Wind 150	B.2.1.1
					2 Heading to 180 Wind 135	B.2.1.2
				2 Ballast Load	1 Heading to 180 Wind 150	B.2.2.1
					2 Heading to 180 Wind 135	B.2.2.2

Dari hasil perhitungan *tension chain leg* pada kondisi operasional, didapatkan bahwa *tension* tertinggi pada *load case* A.2.1.1., yaitu *heading* gelombang, arus dan angin 180°, tanker yang bertambat dalam kondisi *full load* dan salah satu *chain leg* SPM pada kondisi *damage*, 1547.247 kN. *Tension* tertinggi terjadi pada

chain leg no. 1, yang letaknya berada pada arah datangnya gelombang, arus dan angin.

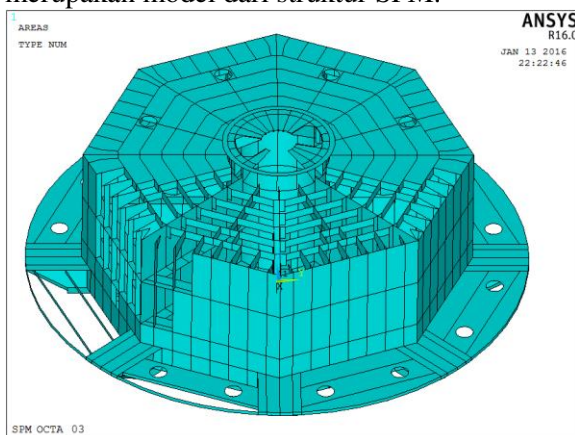
Tabel 12. Tension maksimal pada kondisi operasional load case A.2.1.1

CASE (A.2.1.1)	MOORING LINE	Tension (kN)	
		END A (SPM)	END B
Operational Condition, Colinier, Damage 1 Line, Full Load, 180deg	Chain - 1	1547.247	1307.598
	Chain - 2	647.929	397.732
	Chain - 3	566.825	383.065
	Chain - 4	872.168	372.396
	Chain - 5	851.413	393.810
	Chain - 6	607.117	367.633
	Chain - 7	939.225	706.511
	Chain - 8	x	x
	Hawser 1	906.520	997.984
	Hawser 2	864.779	849.849
	Riser 1	71.897	2.741
	Riser 2	88.189	2.794

3.7.3 Structural analysis

Analisa struktur bertujuan untuk memastikan bahwa struktur lambung SPM mampu mengatasi adanya risiko kegagalan akibat pembebanan maupun tegangan yang terjadi. Apabila struktur atau konstruksi lambung tidak mampu menahan beban yang terjadi, tegangan pada struktur melebihi tegangan ijin dari material yang digunakan, maka dapat mengakibatkan terjadinya kegagalan, seperti deformasi, robekan atau patah.

Untuk keperluan analisa struktur, maka desain gambar struktur dari *Qualification basis* dimodelkan dengan bantuan software struktur yaitu *Ansys structure*. Plat dan penegar didefinisikan sebagai elemen shell. Berikut merupakan model dari struktur SPM.



Gambar 16. Model struktur SPM

Material yang digunakan untuk pembangunan SPM OCTA 03 keseluruhan menggunakan

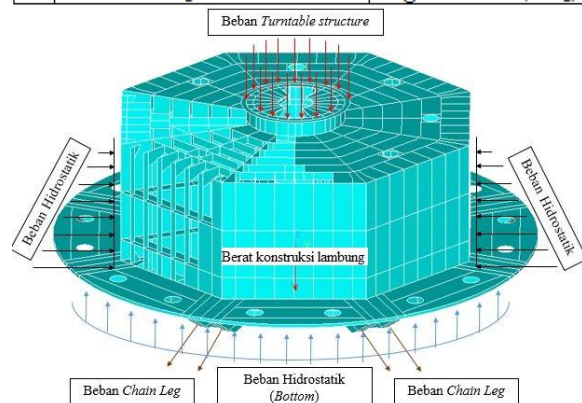
baja AH-36. *Material properties* di-input-kan, sehingga model yang didapatkan memiliki *material properties* jenis baja tersebut. Berikut merupakan data material yang di-input:

- ✓ *Young's modulus* : 200 GPa
- ✓ *Poisson's ratio* : 0.26
- ✓ *Shear modulus* : 75 GPa
- ✓ *Yield strength* : 51,000 psi (355 MPa)
- ✓ *Ultimate strength* : (490–620 MPa).

Beban yang bekerja pada struktur adalah beban hidrostatis air (Buoyancy), beban *tension* dari masing-masing *chain leg*, dan beban dari struktur bangunan atas serta beban berat dari konstruksi lambung itu sendiri.

Tabel 13. Besar beban pada SPM OCTA 03

No	Item	Value
1	Beban struktur lambung (dimodelkan)	142.091 Ton
2	Berar turntable structure	71.618 Ton
3	Beban hidrostatis (Pelat alas)	102.215 kPa
4	Beban hidrostatis (Pelat sisi)	0 - 32.177 kPa
5	Beban Anchor legs	8 x @ 154.725 Ton (35deg)



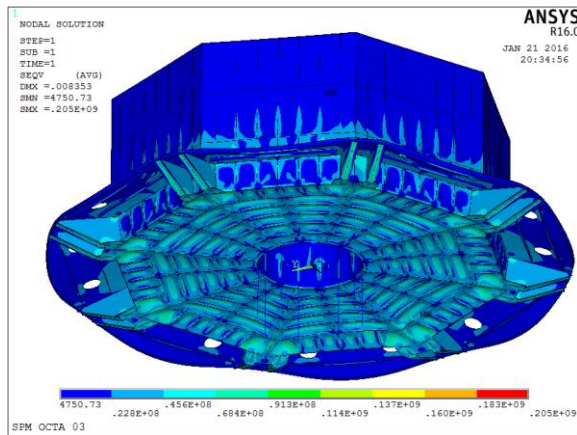
Gambar 17. Arah beban pada struktur SPM

Model struktur SPM siap untuk di-*running* setelah semua beban diberikan pada elemen *shell* yang telah di *meshing*. Data *stress* pada setiap bagian konstruksi yang didapatkan dari hasil *running* ANSYS mechanical APDL disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 14. Tegangan maksimum konstruksi SPM

No.	Item	Hasil Perhitungan			
		Von Misses Stress (MPa)	Shear Atrress XY (MPa)	Shear Atrress YZ (MPa)	Shear Atrress XZ (MPa)
1	Konstruksi Deck	55.1	17.2	18.7	13.1
2	Konstruksi Alas	199.0	81.0	80.8	79.7
3	Konstruksi Sisi	204.0	88.0	63.7	78.7
4	Konstruksi Center well	199.0	81.0	80.8	79.7
5	Konstruksi Sekat	205.0	89.1	80.8	79.7
6	Konstruksi Chain Stopper	205.0	89.1	78.7	78.7

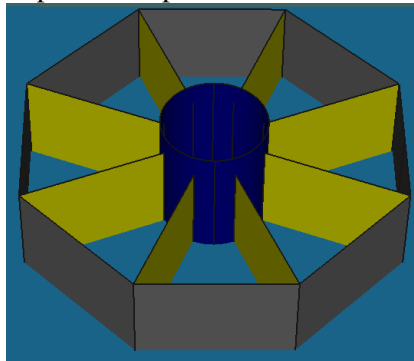
Stress maksimum adalah 205 Mpa, terjadi pada konstruksi sisi, sekat dan konstruksi *chain stopper*, tepatnya pada sudut dimana *chain stopper* berada. Penyebaran tegangan akibat pembebanan yang bekerja ditampilkan pada Gambar 18 berikut.



Gambar 18. Distribusi tegangan pada SPM

3.7.4 Stability analysis

Analisa stabilitas lambung SPM dilakukan dengan bantuan software *Maxsurf*. Model lambung octagonal dibuat di *Maxsurf modeller* yang kemudian dianalisa di *Maxsurf stability*. Model dapat dilihat pada Gambar 14 berikut.



Data yang dibutuhkan untuk analisa stabilitas yaitu ukuran lambung, berat dan titik berat struktur dari SPM. Selain itu, data *tension* yang merupakan output dari analisa *chain leg tension* dijadikan sebagai beban yang bekerja pada lambung SPM.

Berikut data *tension* maksimal yang terjadi pada *chain leg*, hasil dari *static analysis Orcaflex*.

Tabel 15. Tension maksimal analisa statik

Load case B.1/ Chain 8	14.27 Ton
Load case B.1/ Riser 1	13.21 Ton

Analisa stabilitas dilakukan dengan 2 load case, yaitu *intact condition* dan *one compartment damage condition*.

a. Intact Condition

Load case pada analisa stabilitas kondisi utuh sebagai berikut.

Tabel 16 Load case analisa intact stability

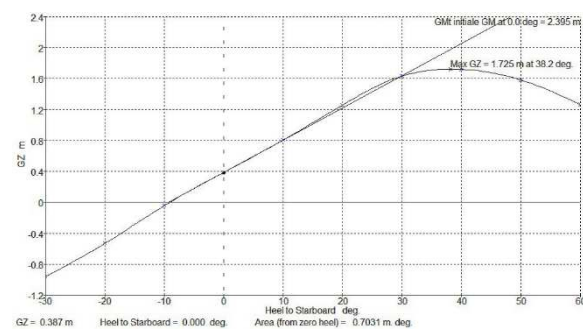
Item	Jumlah	Unit Mass (ton)	Total Mass (ton)
Hull & Skirt Elemen	1	207.429	207.429
Deck House	1	3.881	3.881
Platform & Pipe	1	67.364	67.364

Railing	1	0.373	0.373
Riser Pretension	2	3.210	6.420
Chain Leg Static Tension	8	14.270	114.160
Total Loadcase			399.626

Hasil analisa *intact stability* disajikan pada Tabel 17. sedangkan Gambar 19 menunjukkan kurva stabilitas pada kondisi *intact*.

Tabel 17 Hasil analisa intact stability

Draft at Mid (m)	3.280
Displacement (ton)	399.6
Heel (deg)	-0.8
Draft at Fore (m)	3.380
Draft at After (m)	3.180
Trim (m)	0.200
KB (m)	1.651
GMt corrected (m)	2.683
GML (m)	2.683
Trim angle (deg)	0.9133



Gambar 19 Intact stability curve

b. Damage condition

Load case pada analisa stabilitas kondisi bocor adalah sebagai berikut.

Tabel 18 Load case analisa damage stability

Item Name	Qty.	Unit Mass tonne	Total Mass tonne
Hull & Skirt Elemen	1	207.429	207.429
Deck House	1	3.881	3.881
Platform & Pipe	1	67.364	67.364
Railing	1	0.373	0.373
Riser Pretension	2	3.210	6.420
Anchor Leg Pretension	8	14.270	114.160
Tank 1 (Damaged)	Damaged		
Tank 2	70%	78.969	55.278
Total Loadcase			454.905

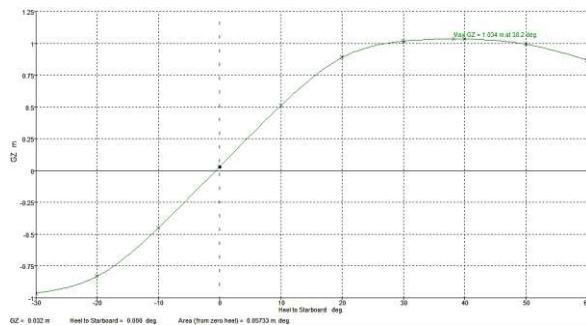
Analisa kondisi bocor, dilakukan dengan keadaan satu kompartmen dalam kondisi bocor. Dalam kondisi ini kompartmen yang letaknya berlawanan dengan kompartmen yang bocor diisi dengan air untuk menggeser titik berat ke posisi tengah.

Hasil analisa *damage stability* disajikan pada Tabel 19. Sedangkan Gambar 20 menunjukkan kurva stabilitas pada kondisi *damage*.

Tabel 19 Hasil analisa damage stability

Draft at Mid (m)	4.251
Displacement (ton)	454.9
Heel (deg)	-0.7
Draft at Fore (m)	4.532
Draft at After (m)	3.971

Trim (m)	0.561
KB m	2.125
GMt corrected m	2.722
GML m	2.079
Trim angle (deg)	2.5640



Gambar 20 Damage stability curve

3.8 Compliance With Requirement

3.8.1 Analisa chain leg tension

Pada kondisi operasional, *tension* maksimum terjadi pada *load case* A.2.1.1. yaitu sebesar 1547.247 kN. Pada kondisi cuaca ekstrim, *tension* maksimum terjadi pada *load case* B.1. yaitu sebesar 684.92 kN.

Tension yang didapatkan dari masing-masing perhitungan dibandingkan dengan *breaking load* dari tipe *chain* yang digunakan, dan juga mempertimbangkan *safety factor* yang disyaratkan.

Tabel 20. Pemenuhan *tension* maksimum *chain leg*

Load Case	Actual Max. Tension (Ton)	Catalog breaking strength (ton)	Allowable Safety Factor	Actual Safety Factor	Status
Operating Condition	154.725	918	3	6	Diterima
Extreme Condition	68.492	918	3	13	Diterima

Dari analisa *chain leg tension* yang dilakukan pada dua kondisi, didapatkan bahwa *tension* maksimal yang terjadi tidak melebihi *breaking load* yang disyaratkan.

3.8.2 Analisa struktur

Analisa struktur dilakukan untuk mendapatkan *stress* maksimum yang terjadi pada struktur konstruksi SPM OCTA 03. *Stress* yang didapatkan dari hasil perhitungan dibandingkan dengan *allowable stress* material yang digunakan dengan mempertimbangkan *safety factor* yang disyaratkan.

Untuk *Axial Bending Stress*, berikut perbandingan antara *stress* yang terjadi terhadap *allowable stress*. *Stress* maksimum adalah 205 Mpa, terjadi pada konstruksi sisi, sekat dan konstruksi *chain stopper*, tepatnya pada sudut dimana *chain stopper* berada. Angka tersebut masih dapat diterima.

Tabel 21. Pemenuhan tegangan ijin stuktur SPM

No.	Item	Von Mises Stress (Mpa)				Status
		Yield Strength AH-36	Safety Factor (ABS)	Allowable stress (Mpa)	Actual stress (Mpa)	
1	Konstruksi Deck	355	1.67	212.6	55.1	Accepted
2	Konstruksi Alas	355	1.67	212.6	199.0	Accepted
3	Konstruksi Sisi	355	1.67	212.6	204.0	Accepted
4	Konstruksi Center well	355	1.67	212.6	199.0	Accepted
5	Konstruksi Sekat	355	1.67	212.6	205.0	Accepted
6	Konstruksi Skirt & Chain Stopper	355	1.67	212.6	205.0	Accepted

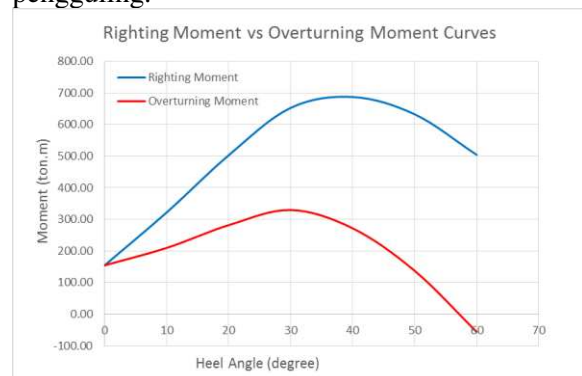
3.8.3 Analisa stabilitas

Perhitungan stabilitas Lambung SPM OCTA 03 telah selesai dilakukan. Telah didapatkan data mengenai letak titik-titik penting dalam stabilitas. Langkah selanjutnya yaitu mengetahui apakah persyaratan yang diberikan sebelumnya dapat dipenuhi oleh Lambung SPM OCTA 03.

a. Intact stability

Dalam kondisi lambung utuh (*intact stability*), didapatkan tinggi metacenter melintang **2.555 meter**. Angka ini masih memenuhi persyaratan yang diberikan. Sarat SPM pada kondisi utuh adalah **3.278 meter**, berarti SPM masih mendapatkan gaya angkat yang cukup pada kondisi ini.

Selanjutnya mengenai persyaratan energi penegak (luas area dibawah kurva momen penegak) harus lebih besar dari 1.4 kali energi pengguling (luas area dibawah kurva momen pengguling). Untuk pengecekan pemenuhan terhadap persyaratan ini, maka perlu dihitung dan dibuat kurva momen penegak dan momen pengguling.



Gambar 21. Kurva *Righting moment* dan *Overturning moment*

Kurva momen penegak dan momen mengguling diplot dalam satu diagram dengan skala yang sama, kemudian didapatkan luasan area dibawah kurva-kurva tersebut. Dari perhitungan didapatkan, luas area dibawah kurva momen penegak adalah **31514.3 ton.m.deg**, sedangkan luas area dibawah kurva momen pengguling adalah **13083.8 ton.m.deg**.

b. Damage stability

Berdasarkan data analisa kondisi equilibrium SPM pada saat salah satu kompartemennya mengalami kebocoran, didapatkan sarat SPM adalah **4.261 meter**. Dapat diartikan bahwa lambung SPM masih memiliki gaya apung cadangan karena sarat masih dibawah tinggi SPM (tinggi SPM = 5.5 meter).

Dari analisa dan perhitungan yang telah dilakukan terhadap komponen stabilitas lambung SPM OCTA 03, baik dalam kondisi lambung utuh maupun dalam kondisi bocor, maka dapat diringkas informasinya dalam sebuah tabel pemenuhan kriteria, seperti terlihat pada

Tabel 22. Pemenuhan kriteria stabilitas SPM

Load Case	Design Criteria	Calculation Result	Status
1. Intact Stability	- $GM > 0$	$GM = 2.555 \text{ m}$	Accepted
	- $A. RM > 1.4 \times A. OM.$	$A. RM = 31514.3 > 1.4 \times A. OM. = 18317.32$	Accepted
	- Draft < Height	Draft = 3.278 m < Height = 5.5 m	Accepted
2. Damage Stability	- Draft < Height	Draft = 4.261 m < Height = 5.5 m	Accepted

4 KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Telah disusun prosedur pengkajian teknologi baru berdasarkan pada *guidance* yang diterbitkan oleh DNV, LR dan ABS. Prosedur tersebut diterapkan pada studi kasus SPM OCTA 03 yang memiliki bentuk lambung octagonal. Dari pengkajian yang telah dilakukan didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Bentuk lambung octagonal dari SPM OCTA 03 merupakan teknologi baru yang harus dikaji terlebih dahulu sebelum diterapkan.
2. Risiko kegagalan tertinggi pada SPM adalah putusnya *chain leg*, kebocoran lambung dan kegagalan struktur akibat beban berlebih.
3. Dari analisa *chain tension* didapatkan *tension* tertinggi 157.725 ton. Desain *chain leg* menggunakan *chain grade R4* diameter 95 mm dengan breaking load 918 ton. Dengan memperhitungkan faktor keamanan yang disyaratkan, *tension* yang terjadi tidak melebihi harga yang diijinkan.

4. Dari analisa struktur didapatkan tegangan tertinggi pada struktur lambung SPM adalah 205 MPa. Struktur SPM OCTA 03 menggunakan material baja grade AH36, yang memiliki tegangan ijin 355 MPa. Dengan memperhitungkan faktor keamanan yang disyaratkan, tegangan yang terjadi tidak melebihi harga yang diijinkan.
5. Dari analisa stabilitas *intact* yang dilakukan diketahui tinggi metacenter adalah $GM = 2.555 \text{ m}$. Harga GM dapat diterima karena masih > 0 . Selain itu dalam kondisi satu kompartemennya mengalami kebocoran, SPM OCTA 03 mampu tetap berada dalam kondisi terapung dengan sarat 4.261 m.
6. Berdasarkan hasil analisa yang telah dilakukan dengan prosedur *Technology Qualification*, maka secara teknis bentuk lambung octagonal dapat diterapkan pada SPM.

4.2 Saran

Analisa motion pada SPM dengan bentuk lambung octagonal agar dibandingkan dengan bentuk lain seperti silinder, hexagonal atau bentuk lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] API-RP-2SK, *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping System for Floating Structures*, Washington DC., 1996.
- [2] R. Maari, *Single Point Moorings*, London: an SBM INC. Publication, 1995.
- [3] D. Utama, "Prosedur Pengkajian Teknologi Baru Dalam Pembangunan SPM (Single Point Mooring) Menggunakan *Technology Qualification*," Tesis Program studi Pascasarjana Teknologi Kelautan ITS, Surabaya, 2015.
- [4] E. Horpestad, "Technology Qualification of Equipment In Subsea Production Equipment In Subsea Production", Master of Science in Product Design and Manufacturing, NTNU, Trondheim, 2012.
- [5] ABS, *Guidance Notes on Review And Approval Of Novel Concepts*, Houston, USA: American Bureau of Shipping,

2003.

- [6] LR, *Guidance Notes for Technology Qualification*, London: Lloyd's Register Group Limited, 2014.
- [7] DNV-RP-A203, *Qualification of New Technology*, Høvik, Norway: Det Norske Veritas, 2011.
- [8] IMCA, *Guidance on Failure Modes & Effects Analyses (FMEAs)*, London: The International Marine Contractors Association, 2002.