

Analisis Risiko Instalasi Penurunan PLEM dengan Pendekatan Metode Semi Kuantitatif

Saif Adam Sauqi, Murdjito, dan Daniel Mohammad Rosyid
Departemen Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: murdjito@oe.its.ac.id

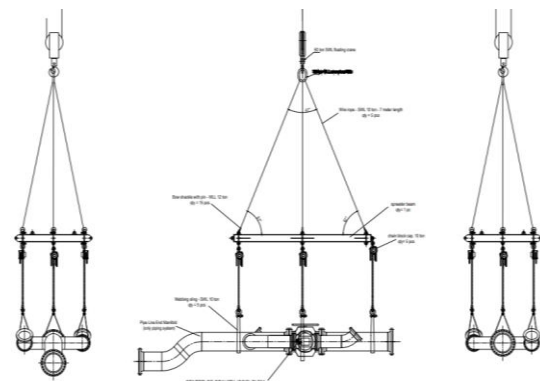
Abstrak—Operasi penurunan Pipeline End Manifold (PLEM) memiliki peranan penting dalam keberhasilan instalasi PLEM. Kegagalan sering terjadi jika operasi ini tidak dipersiapkan dengan baik. Oleh karena itu, penelitian ini melakukan studi analisis risiko secara semi kuantitatif terhadap operasi penurunan PLEM serta memberikan mitigasi risiko yang dianalisis secara numerik. Analisis risiko dalam penelitian ini dilakukan dengan metode kualitatif dan kuantitatif. Identifikasi risiko dilakukan menggunakan Fault Tree Analysis (FTA) dan analisis risiko menggunakan Failure Mode Effect Analysis (FMEA). Analisis risiko kuantitatif dilakukan untuk mengetahui probabilitas kegagalan saat penurunan PLEM. Penelitian ini meninjau tegangan sling dan kekuatan struktur PLEM saat kondisi penurunan. Setelah analisis risiko, mitigasi risiko dipaparkan dan dianalisis secara numerik untuk membuktikan efektivitas mitigasi tersebut. Penelitian ini mengidentifikasi 21 potensi bahaya. Struktur terkena beban splash zone memiliki probabilitas terbesar dengan nilai 0.0027 dan score RPN sebesar 60 (severity 4, likelihood 5, detection 3). Potensi kegagalan diuji secara numerik memiliki nilai PoF 4×10^4 untuk potensi kegagalan (tegangan sling melebihi batas yang diizinkan) A.1.4 dan nilai PoF 3×10^2 untuk potensi kegagalan (tegangan struktur melebihi batas yang diizinkan) A.1.3, dengan hasil analisis yang konsisten dengan pendekatan kualitatif. Mitigasi risiko dilakukan dengan mengubah properties pada sling dan spreader bar, yang terbukti efektif dalam mengurangi potensi kegagalan. Penelitian ini menunjukkan bahwa pengendalian risiko secara kualitatif dan kuantitatif efektif dalam menurunkan potensi kegagalan pada operasi penurunan PLEM.

Kata Kunci—Operasi Penurunan PLEM, Analisis Risiko, FTA-FMEA, Semi Kuantitatif.

I. PENDAHULUAN

SUBSEA production system telah menjadi teknologi yang paling banyak digunakan. Meskipun tergolong mahal, teknologi ini membuat produksi di perairan dalam lebih ekonomis dibandingkan teknologi konvensional yang biasa digunakan di perairan dangkal. Salah satu komponen penting tersebut adalah subsea pipeline end manifold. Subsea pipeline end manifold (PLEM) adalah struktur bawah laut sederhana yang dipasang di ujung pipa yang digunakan untuk menghubungkan rigid pipeline dengan struktur bawah lainnya, seperti manifold atau trees, melalui jumper [1].

Dalam peletakan Subsea pipeline end manifold (PLEM) ke dasar laut dilakukan operasi penurunan dengan menggunakan sebuah crane vessel dengan cara mengangkat dan menurunkan struktur ke dalam laut. Operasi penurunan memainkan peran penting dalam segi jadwal, biaya dan kondisi meteocean tempat struktur diturunkan, sehingga sering kali menjadi kunci keberhasilan operasi ini. Saat proses instalasi, struktur yang sedang diangkat terekspos terhadap beban-beban dinamis, baik yang diakibatkan gerakan dari crane vessel maupun beban langsung dari gelombang di



Gambar 1. Konfigurasi rigging untuk instalasi PLEM.

Tabel 1.
Data Barge AWB Stork

Parameter	Value	Units
Length Overall	76.2	m
Length Between Perpendicular	68	m
Beam	24.4	m
High to Main Deck	4.88	m
Operating Draft	3.877	m
Displacement	3454	ton
Operating Radius	40	m
SWL Crane (Single Falls)	200	ton

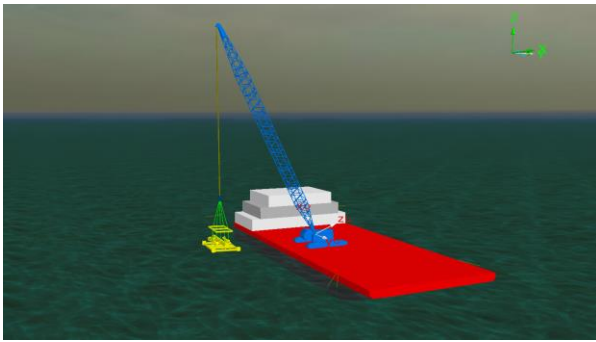
splash zone. Melihat kondisi lingkungan dan pergerakan installation vessel saat proses lowering PLEM dengan beban dan tekanan eksternal yang besar, PLEM memiliki potensi yang besar dalam mengalami risiko kerusakan dan kegagalan saat kondisi tersebut

Setelah melihat identifikasi bahaya yang terjadi, oleh karena itu dalam Tugas Akhir ini dilakukan penilaian risiko atau risk assessment pada lowering PLEM Lawe Lawe dengan kondisi shallow water. Tujuan tersebut adalah untuk mengenali potensi risiko kegagalan dan menganalisis risiko tersebut dengan pendekatan kualitatif dan semi kuantitatif. Hal ini bertujuan untuk menghasilkan evaluasi dari penilaian tingkat risiko yang terjadi. Selanjutnya, dari hasil tersebut, akan ditetapkan tindakan pengendalian risiko atau mitigasi untuk mengurangi dampak potensi kegagalan. Diharapkan bahwa dengan melakukan risk assessment, akan mengurangi kemungkinan terjadinya kecelakaan akibat potensi kegagalan pada lowering PLEM.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Pengumpulan Data

Data yang diperlukan pada penelitian ini adalah data barge untuk proses instalasi, data PLEM data rigging dan data responden. Barge yang digunakan adalah Barge AWB Stork yang memiliki boom crane yang terletak dibagian starboard. Untuk data barge tertera pada Tabel 1. Data yang dianalisis adalah PLEM dengan Panjang total 11.14 m, dengan berat



Gambar 3. Pemodelan kapal PLEM dan rigging.

Tabel 4. Material properties sling

Jenis Sling	Wire Rope	Spreader bar
Diameter (mm)	44	40
MBL (ton)	125.03	103.3
Stiffness (ton)	7975.6	6591.4
Sling Codes	SB	PLEM L

Tabel 5. Data lingkungan

Data (10 yr return period)	Nilai	Satuan
Hs	2.3	m
Tp	7.47	s
Kecepatan angin (1 -minute mean)	9.47	m/s
Kecepatan arus (permukaan)	1.11	m/s
Kecepatan arus (dasar)	0.3	m/s
Kedalaman	30	m

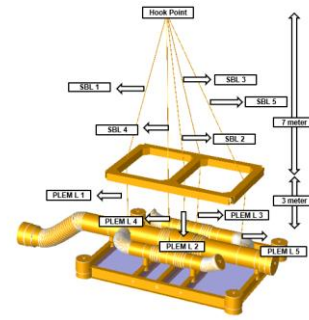
Tabel 6. Data responden

No	Jabatan	Pendidikan	Pengalaman	Umur
1	Praktisi Oil and Gas	S2	28	52
2	Sr QA/QC	S1	26	54
3	Sr QA/QC	S1	24	45
4	Lifting Hoisting Advisor/ Specialist Senior Subsea	S1	23	48
5	Installation Engineer	S2	10	31
6	Installation Analysis Engineer	S1	6	26
7	Naval Architect and Installation Engineer	S1	4	28
8	Junior Naval & Installation Engineer	S1	1	23
9	Junior Installation Engineer	S1	1	23

30.21 ton. Peralatan rigging yang digunakan terdiri dari 1 spreader bar, 5 wire rope sling, dan 5 soft sling. Konfigurasi rigging yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 1, sling properties yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2, data lingkungan terletak pada Tabel 3, dan data responden terletak pada Tabel 4.

Untuk operasi instalasi terdapat rekomendasi terkait kala ulang data lingkungan berdasarkan periode instalasi [2]. Instalasi berlangsung selama 1 bulan, sehingga data kala ulang yang digunakan adalah 10 tahun untuk gelombang dan arus. Untuk data angin yang digunakan adalah 1- Minute mean.

Penelitian ini dilakukan dengan mengumpulkan data responden melalui Google form melibatkan 9 responden. Berikut merupakan informasi mengenai data responden yang telah mengisi kuisioner.



Gambar 2. Penamaan sling pada rigging.

Tabel 2. Identifikasi Risiko

Kode	Nama Kejadian
A.1.1	Terjadi gesekan antara PLEM dan Barge
A.1.2	Struktur terkena beban splash zone
A.1.3	Tegangan struktur melebihi batas yang diizinkan
A.1.4	Tegangan sling melebihi batas yang diizinkan
A.2.1	Letak hook point tidak sesuai lokasi
A.2.2	Tali sling terputus
A.2.3	Wire damage
A.2.4	Gerakan ujung derek berlebihan
A.3.1	Tabrakan ROV dengan struktur PLEM
A.3.2	Tali tambat kapal terputus
A.3.3	Penarik angkat putus
A.3.4	Crane boom putus
A.3.5	Kegagalan struktur saat landing
A.4.1	Terjadi buckling pada pipa
A.4.2	Tekanan eksternal yang terlalu besar
A.4.3	Terjadi collapse pada member struktur
A.4.4	Terjadi bending berlebih pada pipa
B.1.1	SOP tidak diterapkan dengan baik
B.1.2	Prosedur yang digunakan belum di update
B.2.1	Kurangnya pemahaman pekerja
B.2.2	Permasalahan antar sesama pekerja

Tabel 3. Validasi Pemodelan Barge

Parameter	Satuan	Stability Booklet	MOSES	Toleransi	Koreksi
LOA	m	76.2	76.2	1%	0%
Beam	m	24.34	24.34	1%	0%
Height	m	4.87	4.87	1%	0%
Draft	m	2.3	2.3	1%	0%
Displacement	ton	3454	3424	2%	1%

B. Penentuan Identifikasi Risiko dan Analisis Risiko

Penentuan identifikasi risiko dan analisis risiko dilakukan dengan menggabungkan metode Fault Tree Analysis dan Failure Mode & Effect Analysis. FTA merupakan salah satu metode yang mampu untuk menggambarkan dan menjelaskan secara medetail terkait akar atau sumber penyebab kemungkinan kegagalan pada suatu proses. Sebuah fault tree mengilustrasikan keadaan komponen – komponen sistem (basic event) dan hubungan antara basic event dan top event. Hubungan tersebut dapat dinyatakan dalam gerbang logika. Identifikasi risiko tersebut berdasarkan standard DNV dengan beberapa kegagalan yang ditampilkan pada Tabel 5.

C. Pemodelan Barge Kondisi Free Floating

Data barge yang sudah didapatkan digunakan dalam pemodelan kondisi kapal free floating yang menggunakan software MOSES. Data tersebut akan digunakan untuk proses analisis selanjutnya. Validasi barge dilakukan untuk hidrodinamis dan displacement barge hasil pemodelan di software MOSES terhadap data hydrostatics stability booklet dengan disparitas sebesar 2% [3]. Hasil validasi dari

Tabel 7.
Probabilitas Perhitungan FTA

Kode	Nama Kejadian	Probability
A.1.1	Terjadi gesekan antara PLEM dan Barge	0.0011
A.1.2	Struktur terkena beban <i>splash zone</i>	0.0027
A.1.3	Tegangan struktur melebihi batas yang diizinkan	0.0014
A.1.4	Tegangan sling melebihi batas yang diizinkan	0.0014
A.2.1	Letak hook point tidak sesuai lokasi	0.0005
A.2.2	Tali sling terputus	0.0005
A.2.3	<i>Wire damage</i>	0.0011
A.2.4	Gerakan ujung derek berlebihan	0.0012
A.3.1	Tabrakan ROV dengan struktur PLEM	0.0014
A.3.2	Tali tambat kapal terputus	0.0004
A.3.3	Penarik angkat putus	0.0010
A.3.4	Crane boom putus	0.0003
A.3.5	Kegagalan struktur saat landing	0.0003
A.4.1	Terjadi buckling pada pipa	0.0002
A.4.2	Tekanan eksternal yang terlalu besar	0.0007
A.4.3	Terjadi <i>collapse</i> pada member struktur	0.0003
A.4.4	Terjadi bending berlebih pada pipa	0.0003
B.1.1	SOP tidak diterapkan dengan baik	0.0012
B.1.2	Prosedur yang digunakan belum di update	0.0004
B.2.1	Kurangnya pemahaman pekerja	0.0005
B.2.2	Permasalahan antar sesama pekerja	0.0017

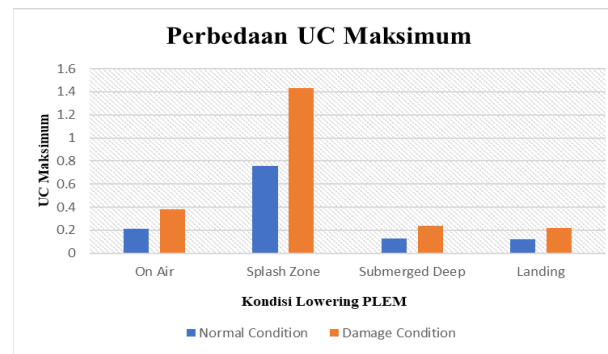
Tabel 8.
Hasil Nilai RPN

Kode	Nama Kejadian	RPN
A.1.1	Terjadi gesekan antara PLEM dan Barge	27
A.1.2	Struktur terkena beban <i>splash zone</i>	60
A.1.3	Tegangan struktur melebihi batas yang diizinkan	36
A.1.4	Tegangan sling melebihi batas yang diizinkan	27
A.2.1	Letak hook point tidak sesuai lokasi	27
A.2.2	Tali sling terputus	36
A.2.3	<i>Wire damage</i>	48
A.2.4	Gerakan ujung derek berlebihan	48
A.3.1	Tabrakan ROV dengan struktur PLEM	48
A.3.2	Tali tambat kapal terputus	27
A.3.3	Penarik angkat putus	27
A.3.4	Crane boom putus	24
A.3.5	Kegagalan struktur saat landing	48
A.4.1	Terjadi buckling pada pipa	36
A.4.2	Tekanan eksternal yang terlalu besar	48
A.4.3	Terjadi <i>collapse</i> pada member struktur	48
A.4.4	Terjadi bending berlebih pada pipa	36
B.1.1	SOP tidak diterapkan dengan baik	36
B.1.2	Prosedur yang digunakan belum di update	36
B.2.1	Kurangnya pemahaman pekerja	48
B.2.2	Permasalahan antar sesama pekerja	36

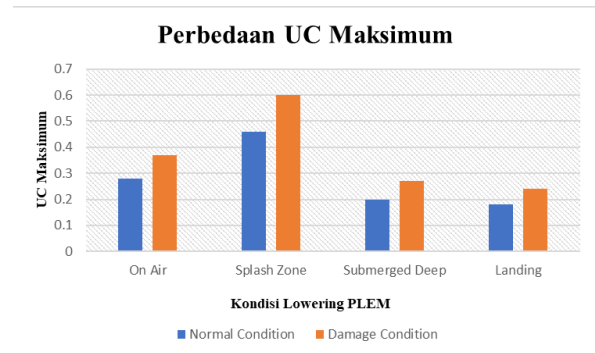
penelitian ini disajikan pada Tabel 6. Berdasarkan Tabel 6 semua parameter memiliki error dibawah 2%. Hasil pemodelan barge yang telah tervalidasi dianalisis respon gerakannya dalam berupa *Response Amplitude Operator* (RAO) di kondisi *free floating*. *Response Amplitude Operator* (RAO) motion dari kapal dengan kondisi *free floating* yang telah dikelompokkan berdasarkan 6 derajat gerakan kebebasannya yaitu, *surge, sway, heave, roll, pitch*, dan *yaw*.

D. Pemodelan Kapal, PLEM, dan Rigging

Analisis instalasi dilakukan pada perangkat lunak. Pada analisis ini kapal diasumsikan *free floating* sesuai RAO. Kecepatan penurunan struktur PLEM adalah 0.1 m/s sesuai dengan kriteria yang ada. PLEM dan *spreader bar* dimodelkan sebagai 6D buoy dengan ukuran dan sifat material yang sama dengan data yang ada. Untuk operasi *lifting* bawah laut yang dapat dilakukan secara independen dari arah kapal, respons kapal harus dianalisis untuk arah gelombang setidaknya $\pm 45^\circ$ dari arah kapal yang dinyatakan dalam prosedur. *Heading* yang digunakan pada operasi ini adalah 0° dan 180° , sehingga pada penelitian ini digunakan arah *heading* $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$. Pemodelan kapal



Gambar 4. Perbandingan nilai UC maksimum (local analysis).



Gambar 5. Perbandingan nilai UC maksimum (distribusi rayleigh).

Goodness-of-Fit

Distribution	Anderson-Darling Correlation (adj)	Coefficient
Weibull	10.924	0.782
Lognormal	13.674	0.696
Exponential	87.559	*
Loglogistic	12.233	0.726
3-Parameter Weibull	2.527	0.981
3-Parameter Lognormal	2.045	0.979
2-Parameter Exponential	87.585	*
3-Parameter Loglogistic	1.227	0.988
Smallest Extreme Value	10.000	0.858
Normal	3.421	0.923
Logistic	2.008	0.937

Gambar 6. Hasil pengujian goodness of fit.

PLEM dan *rigging* dapat dilihat pada Gambar 2 dan penanaman *sling* pada *rigging* tertera pada Gambar 3.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Analisis Risiko Perhitungan Minimal Cut Set

Dalam proses perhitungan probabilitas untuk setiap *basic event*, langkah awal melibatkan dalam penyebaran kuisioner kepada para ahli atau pemangku kepentingan langsung dari perusahaan yang terlibat. Tujuan dari kuisioner ini adalah untuk memperoleh nilai berdasarkan frekuensi atau seberapa sering kejadian pada setiap *basic event*, yang direpresentasikan dalam tabel dan diagram *fault tree*. Setelah dilakukan perhitungan maka telah didapatkan probabilitas pada Tabel 7.

B. Analisis Risiko Perhitungan Risk Priority Number

Perhitungan *Risk Priority Number* (RPN) bisa didapatkan dengan perhitungan nilai *severity, occurrence*, dan *detection* pada masing masing risiko. *Score severity* sendiri berarti

Tabel 9.
Max Hoist-line tension (Local)

Max in Air (tef)	Max in Splash Zone (tef)	Max in Submerged Deep (tef)	Max in Landing (tef)
35.98	93.66	31.76	30.63

Tabel 10.
Max Hoist-line tension (Distribusi Rayleigh)

Max in Air (tef)	Max in Splash Zone (tef)	Max in Submerged Deep (tef)	Max in Landing (tef)
37.51	60.92	33.74	32.10

Tabel 11.
Max tension sling pada kondisi normal

Kondisi	Maksimum tension (ton)									
	SBL 1	SBL 2	SBL 3	SBL 4	SBL 5	PL1	PL2	PL3	PL4	PL5
<i>In Air</i>	22.16	7.33	10.57	7.91	9.16	21.8	14.30	7.85	2.49	8.20
<i>Splash Zone</i>	26.45	19.48	42.05	31.97	16.58	32.01	19.04	40.97	30.38	19.43
<i>Submerged</i>	16.00	6.60	8.47	6.45	3.17	15.50	12.28	5.10	1.71	4.65
<i>Landing</i>	15.30	6.33	7.91	6.34	2.83	14.85	12.08	5.09	1.36	4.65

Tabel 12.
Max tension sling pada kondisi Damage

Kondisi	Maksimum tension (ton)									
	SBL 1	SBL 2	SBL 3	SBL 4	SBL 5	PL1	PL2	PL3	PL4	PL5
<i>Splash Zone</i>	30.38		48.69	24.04	20.60	33.45	18.92	48.25	23.62	20.24

Tabel 13.
Safety factor sling pada kondisi Normal

No	Item	MBL (ton)	SF (ton)	Max Load (ton)	Status
1	SBL 1	125.03	58.16	26.45	OK
2	SBL 2	125.03	58.16	19.48	OK
3	SBL 3	125.03	58.16	42.05	OK
4	SBL 4	125.03	58.16	31.97	OK
5	SBL 5	125.03	58.16	16.58	OK
6	PL 1	103.33	48.06	32.01	OK
7	PL 2	103.33	48.06	19.04	OK
8	PL 3	103.33	48.06	40.97	OK
9	PL 4	103.33	48.06	30.38	OK
10	PL 5	103.33	48.06	19.43	OK

Tabel 14.
Safety factor sling pada kondisi Damage

No	Item	MBL (ton)	SF (ton)	Max Load (ton)	Status
1	SBL 1	125.03	44.84	30.38	OK
3	SBL 3	125.03	44.84	48.69	NOT OK
4	SBL 4	125.03	44.84	24.05	OK
5	SBL 5	125.03	44.84	20.60	OK
6	PL 1	103.33	37.06	33.45	OK
7	PL 2	103.33	37.06	18.92	OK
8	PL 3	103.33	37.06	48.26	NOT OK
9	PL 4	103.33	37.06	23.62	OK
10	PL 5	103.33	37.06	20.24	OK

tingkat keparahan risiko dalam bentuk kerugian aset atau dampak lingkungan. *Score likelihood* digunakan untuk mengukur seberapa sering efek dari kegagalan tersebut muncul. *Score Detection* merupakan tingkat deteksi penyebab terjadinya moda kegagalan. *Score* ini didapatkan melalui penilaian beberapa responden yang diisi lewat gform. Parameter perhitungan *Score RPN* melalui persamaan dibawah ini. Total RPN ditampilkan pada Tabel 8.

$$RPN = Severity \times Likelihood \times Detection$$

C. Analisis Tension Hoist-line dan Sling

Simulasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah berbasis waktu (*time domain*), sesuai dengan lama operasi berlangsung. Penelitian ini meninjau 5 load case dengan arah 90°, yaitu: (*in air, splash zone, submerged, dan landing*) pada

kondisi normal dan pada *splash zone* kondisi damage. Hasil tension Hositline tersebut dapat dilihat pada Tabel 9 dan Tabel 10 dengan nilai local dan distribusi rayleigh. Hasil nilai tension sling dapat dilihat pada Tabel 11 dan Tabel 12.

Setelah dilakukan analisis pada kondisi normal dan damage, lalu diketahui bahwa pada kondisi damage setiap sling mengalami peningkatan tension akibat satu tali sling terputus. Hal ini terjadi karena kekuatan sling yang terputus membuat sling yang lain menjadi penahan kekuatan dari struktur yang diangkat.

Perlu dilakukan cek safety factor dalam kondisi penurunan PLEM dengan menghitung nilai maksimum tension yang diizinkan saat penurunan PLEM. Pada kondisi normal dengan safety factor sebesar 2.15 dan safety factor kondisi damage sebesar 2.79. Sehingga dilakukan penilaian untuk melihat hasil safety factor dari proses lowering tiap

Tabel 15.
DAF Local Analysis

DAF On Air	DAF Splash Zone	DAF Submerged Deep	DAF Landing
1.08	2.82	1.15	1.11

Tabel 16.
DAF Distribusi Rayleigh

DAF On Air	DAF Splash Zone	DAF Submerged Deep	DAF Landing
1.13	1.83	1.22	1.16

Tabel 17.
Maksimum UC (Local Analysis)

Kondisi	Group	In Air	In Splash zone	In Submerged deep	In Landing
UC Max (Normal)	PL	0.31	0.93	0.2	0.18
UC Max (Damage)	SB	0.41	1.31	0.3	0.24

Tabel 18.
Maksimum UC (Distribusi Rayleigh)

Kondisi	Group	In Air	In Splash zone	In Submerged deep	In Landing
UC Max (Normal)	PL	0.28	0.46	0.20	0.18
UC Max (Damage)	SB	0.37	0.60	0.27	0.24

Tabel 19.
Parameter Distribusi 3 – parameter loglogistic

Parameter	Value
Loc (μ)	3.2
Scale (σ)	0.10
Thres (λ)	-13.62
X	44.84

Tabel 20.
Hasil Ranking PoF

Kondisi Damage (Tegangan Sling)				
Condition	Moda kegagalan	CDF	POF	Ranking
1.08	2.82	4×10^{-4}	4×10^{-4}	3

Tabel 21.
Parameter Distribusi 3 – parameter lonormal

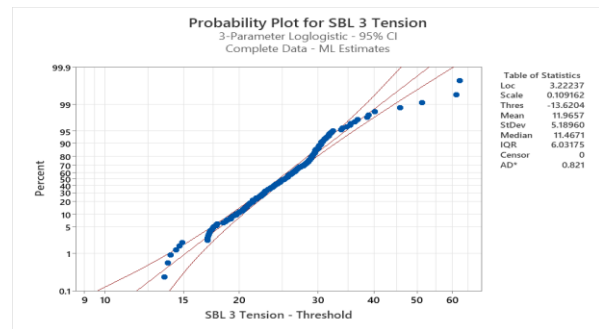
Parameter	Value
Loc (μ)	-2.43
Scale (σ)	1.29
Thres (λ)	0.0158
X	1

kondisi pada Tabel 13 dan Tabel 14. Setelah dilakukan safety faktor check diketahui bahwa dalam kondisi damage terjadi kegagalan dengan tidak memenuhi safety factor pada SBL 3 dan PL 3. Sehingga mengalami kegagalan.

D. Analisis Maksimum UC

Pendekatan yang dianalisis adalah menghitung nilai UC Struktur PLEM pada kondisi in air, splash zone, submerge deep, dan landing. DAF didapatkan melalui standard DnV dengan formula sebagai berikut:

$$DAF = \frac{\text{Dynamic Hook Load}}{\text{Static Hook Load}}$$

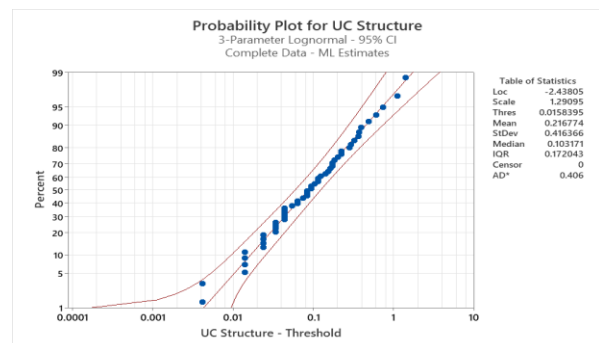


Gambar 7. Probability Plot Distribusi 3- parameter loglogistic.

Goodness-of-Fit

Distribution	Anderson-Darling (adj)	Correlation Coefficient
Weibull	2.987	0.939
Lognormal	0.593	0.989
Exponential	2.640	*
Loglogistic	0.692	0.985
3-Parameter Weibull	0.774	0.985
3-Parameter Lognormal	0.382	0.996
2-Parameter Exponential	3.883	*
3-Parameter Loglogistic	0.435	0.994
Smallest Extreme Value	14.113	0.666
Normal	6.286	0.790
Logistic	5.491	0.803

Gambar 8. Hasil pengujian goodness of fit.



Gambar 9. Probability plot distribusi 3- parameter lognormal.

Tabel 22.
Hasil Ranking PoF

Kondisi Damage (UC Struktur)				
Condition	Moda kegagalan	CDF	POF	Ranking
Damage	UC < 1	3×10^{-2}	3×10^{-2}	4

Nilai *dynamic hook load* didapatkan melalui hoist-line tension dan nilai *static hook load* didapatkan melalui berat statis struktur sebesar 30.21 ton. Sehingga didapatkan nilai DAF pada kondisi local analysis dan melalui distribusi Rayleigh yang tertera pada Tabel 15 dan Tabel 16.

Selain itu ada faktor keamanan untuk proses *lifting* seperti *weight contingency factor* (1.3), *CoG Inaccuracy* (1.05), *Skew Load* (1.1), *Consequence Factor* (1.3) dan *CoG Envelope* (1.05). Semua faktor tersebut akan dikalikan untuk mendapatkan nilai *lifting factor*.

Hasil pada Gambar 4 dan Gambar 5 membuktikan bahwa hasil tali sling terputus dapat memengaruhi UC maksimum pada struktur PLEM saat terjadi operasi penurunan. Berbeda hasil antara local analysis dan distribusi Rayleigh. Hasil UC pada distribusi Rayleigh memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan local analysis dikarenakan nilai DAF menjadi variabel nilai yang memengaruhi kekuatan struktur.

Tabel 23.
Pengendalian Risiko Kualitatif

No	Failure Mode	Sub - No	Nama Kejadian	Pengendalian Risiko (Risk Controlling)
1	Penurunan kekuatan komponen lowering PLEM	A.1.1	Terjadi gesekan antara PLEM dan barge	<ul style="list-style-type: none"> Melakukan inspection pada komponen instalasi Memasang Barrier atau seafastening bracket
		A.1.2	Struktur terkena beban splash zone	<ul style="list-style-type: none"> Pemodelan dan Analisis Operasi Laut Sesuai Standard Mempertimbangkan Instalasi pada kondisi gelombang tinggi
		A.1.3	Tegangan struktur melebihi batas yang diizinkan	<ul style="list-style-type: none"> Melakukan Simulasi Numerik Mengubah Desain Struktur jika diperlukan Melakukan inspection pada struktur PLEM
		A.1.4	Tegangan sling melebihi batas yang diizinkan	<ul style="list-style-type: none"> Mendapatkan Sertifikasi Crane dan lifting equipment Mengubah properties sling jika diperlukan Numerical Analysis (Snap load)
2	Komponen lowering PLEM tidak berfungsi dengan baik	A.2.1	Letak hook point tidak sesuai lokasi	<ul style="list-style-type: none"> Melakukan Monitoring proses penurunan PLEM Melakukan Simulasi Numerik Mendapatkan Sertifikasi Crane dan lifting equipment
		A.2.2	Tali sling terputus	<ul style="list-style-type: none"> Mengubah properties sling jika diperlukan Numerical Analysis (Snap load) Mendapatkan Sertifikasi Crane dan lifting equipment
		A.2.3	Wire Damage	<ul style="list-style-type: none"> Mengubah properties sling jika diperlukan Numerical Analysis (Snap load) Melakukan Monitoring kondisi cuaca
		A.2.4	Gerakan ujung derek berlebihan	<ul style="list-style-type: none"> Simulasi numerik menggunakan tugger line Menghadapkan Kapal ke arah yang benar
3	Gangguan Eksternal	A.3.1	Tabrakan ROV dengan struktur PLEM	<ul style="list-style-type: none"> Melakukan Pengecekan daya pada ROV Mempertimbangkan perhitungan <i>current load</i> pada ROV
		A.3.2	Tali tambat kapal terputus	<ul style="list-style-type: none"> Melakukan Inspection pada tali tambat Memantau kondisi cuaca atau <i>weather forecasting</i>
		A.3.3	Penarik angkat putus	<ul style="list-style-type: none"> Mendapatkan Sertifikasi Crane dan lifting equipment Melakukan inspeksi pada Crane dan lifting equipment
		A.3.4	Crane boom putus	<ul style="list-style-type: none"> Mendapatkan Sertifikasi Crane dan lifting equipment Melakukan inspeksi pada Crane dan lifting equipment
		A.3.5	Kegagalan struktur saat landing	<ul style="list-style-type: none"> Membatasi penurunan kecepatan PLEM saat mendarat Memantau operasi penurunan menggunakan ROV
4	Structure changes	A.4.1	Terjadi buckling pada pipa	<ul style="list-style-type: none"> Melakukan Inspection pada piping system pada PLEM Memberikan Cathodic Protection pada Pipa Numerical analysis kekuatan pipa
		A.4.2	Tekanan eksternal yang terlalu besar	<ul style="list-style-type: none"> Melakukan Inspection pada piping system pada PLEM Memberikan Cathodic Protection pada Pipa Numerical analysis kekuatan pipa Melakukan Penghentian penurunan ketika template sudah terendam
		A.4.3	Terjadi collapse pada member struktur	<ul style="list-style-type: none"> Gunakan ROV untuk memeriksa dan membuka katup jika perlu Melakukan inspeksi pada Struktur PLEM
		A.4.4	Terjadi bending berlebih pada pipa	<ul style="list-style-type: none"> Melakukan Inspection pada piping system pada PLEM Memberikan Cathodic Protection pada Pipa Numerical analysis kekuatan pipa
5	Prosedur yang tidak tepat	B.1.1	SOP tidak diterapkan dengan baik	<ul style="list-style-type: none"> Sebelum memulai kegiatan instalasi PLEM dilakukan internal meeting yang membahas penerapan SOP Melakukan random audit secara berkala tentang penerapan SOP
		B.1.2	Prosedur yang digunakan belum di update	<ul style="list-style-type: none"> Melakukan update informasi ke bagian dokumentum tentang masa berlaku prosedur per tahun Melakukan perbaikan prosedur yang telah expired
6	Produktivitas pekerja yang kurang baik	B.2.1	Kurangnya pemahaman pekerja	<ul style="list-style-type: none"> Seluruh personel yang terlibat memiliki sertifikasi yang kompeten dan update sesuai dengan masa berlakunya Senantiasa memperhatikan dan pengujian jam terbang personel yang terlibat
		B.2.2	Permasalahan antar sesama pekerja	<ul style="list-style-type: none"> Melakukan program teamwork dan komunikasi yang efektif antar pekerja Sebelum memulai kegiatan lowering, dilakukan internal meeting yang membahas detail kegiatan

Kondisi saat local analysis tersebut menjelaskan bahwa sebelum tali terputus terjadi tegangan yang cukup besar pada area frame struktur, dan pada kondisi tali terputus terjadi tegangan yang cukup besar pada area spreader bar saat tali

sling terputus. Maksimum UC yang dihasilkan pada kondisi tersebut melebihi standard DnV dengan UC lebih dari 1 pada area spreader bar. Tabel 17 menunjukkan maksimum UC untuk local analysis dan Tabel 18 untuk distribusi Rayleigh.

Tabel 27.

Maximum Tension Damage (Perubahan Sling Properties)					
No	Item	MBL (ton)	SF (ton)	Max Load (ton)	Status
1	SBL 1	14.83 E3	83.38	37.97	OK
3	SBL 3	14.83 E3	83.38	43.87	OK
4	SBL 4	14.83 E3	83.38	41.31	OK
5	SBL 5	14.83 E3	83.38	24.12	OK
6	PL 1	12.92 E3	72.63	41.22	OK
7	PL 2	12.92 E3	72.63	21.11	OK
8	PL 3	12.92 E3	72.63	42.51	OK
9	PL 4	12.92 E3	72.63	42.16	OK
10	PL 5	12.92 E3	72.63	29.28	OK

Tabel 28.

UC Maksimum (Perubahan Sling Properties)		
Kondisi	Group	In Splash zone
Splash Zone	SB	1.05

Tabel 29.

Penambahan Berat Spreader Bar	
Spreader Bar Properties (SB)	Beam Properties Desain H beam 300 x 300 x 10 x 15
	Berat Desain Berat Redesain
	2.72 Ton 4.4 Ton

Tabel 30.

Maximum Tension Damage (Redesain Spreader Bar)					
No	Item	MBL (ton)	SF (ton)	Max Load (ton)	Status
1	SBL 1	125.03	44.84	30.31	OK
3	SBL 3	125.03	44.84	16.96	OK
4	SBL 4	125.03	44.84	42.30	OK
5	SBL 5	125.03	44.84	26.51	OK
6	PL 1	103.33	37.06	31.18	OK
7	PL 2	103.33	37.06	16.83	OK
8	PL 3	103.33	37.06	39.91	NOT OK
9	PL 4	103.33	37.06	27.92	OK
10	PL 5	103.33	37.06	27.80	OK

Tabel 31.

UC Maksimum (Redesain Spreader Bar)		
Condition	Group	In Splash zone
Splash Zone	SB	0.62

E. Analisis Risiko Kuantitatif

Perhitungan *probability of failure* dilakukan untuk mengetahui peluang kegagalan akibat analisis yang dilakukan. Potensi kegagalan yang ada pada tension maksimum dan maksimum UC saat kondisi damage.

Dilakukan pengujian goodness of fit test untuk mengetahui distribusi yang cocok dengan parameter penilaian Anderson darling dan coefficient correlation. Berikut merupakan hasil pengujian goodness of fit dan probability plot yang dihasilkan dalam moda kegagalan tegangan sling melebihi batas yang diizinkan pada Gambar 6. Setelah dilakukan pengujian goodness of fit didapatkan beberapa parameter yang digunakan dalam analisis keandalan untuk distribusi 3 parameter loglogistic yang tertera pada Tabel 19 dan Gambar 7.

Perhitungan dengan metode CDF dapat digunakan untuk memecahkan persoalan jika hanya mengandung satu variabel acak. Diketahui persamaan CDF untuk distribusi 3-parameter loglogistik sebagai berikut:

$$CFD(X) = \frac{1}{\left\{1 + \exp \left[-\frac{\ln(x - \lambda) - \mu}{\sigma} \right] \right\}}$$

Tabel 32.

Maximum Tension Damage (Penambahan sling lifting point)					
No	Item	MBL (ton)	SF (ton)	Max Load (ton)	Status
1	SBL 1	125.03	44.84	36.26	OK
3	SBL 3	125.03	44.84	16.07	OK
4	SBL 4	125.03	44.84	8.35	OK
5	SBL 5	125.03	44.84	5.83	OK
6	PL 1	103.33	37.06	31.26	OK
7	PL 2	103.33	37.06	17.53	OK
8	PL 3	103.33	37.06	22.92	OK
9	PL 4	103.33	37.06	20.88	OK
10	PL 5	103.33	37.06	19.47	OK
11	SBL 6	125.03	44.84	15.31	OK
12	SBL 7	125.03	44.84	16.68	OK
13	SBL 8	125.03	44.84	27.33	OK
14	SBL 9	125.03	44.84	30.46	OK
15	SBL 10	125.03	44.84	13.79	OK
16	SBL 11	125.03	44.84	13.81	OK

Tabel 33.

Maximum Tension Damage (Penambahan sling lifting point)		
Condition	Group	In Splash zone
Splash Zone	SB	0.54

Dengan acuan *nilai probability of failure* tersebut, maka didapatkan nilai kuantitatif untuk potensi kegagalan terkait tension tali yang melebihi batas yang diizinkan. Perangkingan secara kuantitatif tersebut diberikan penilaian secara kualitatif yang disesuaikan pada Tabel 20.

Selanjutnya dilakukan pengujian goodness of fit test untuk mengetahui distribusi yang cocok dengan parameter penilaian Anderson darling dan coefficient correlation. Gambar 8 merupakan hasil pengujian goodness of fit dan probability plot yang dihasilkan dalam moda kegagalan tegangan sling melebihi batas yang diizinkan. Setelah dilakukan pengujian goodness of fit didapatkan beberapa parameter yang digunakan dalam analisis keandalan untuk distribusi 3 parameter lognormal tertera pada Gambar 9 dan Tabel 21.

Perhitungan dengan metode CDF dapat digunakan untuk memecahkan persoalan jika hanya mengandung satu variabel acak. Diketahui persamaan CDF untuk distribusi 3-parameter lognormal sebagai berikut:

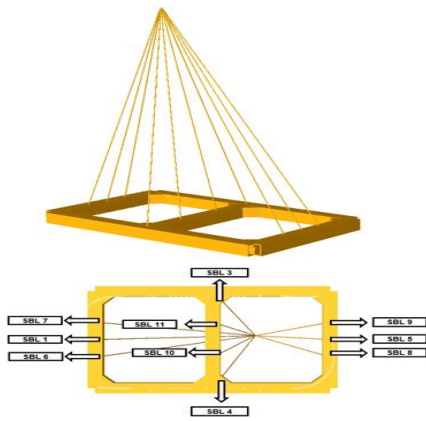
$$CFD(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma(x - \lambda)} \exp \left\{ -\frac{[\ln(x - \lambda) - \mu]^2}{2\sigma^2} \right\}$$

Dengan acuan *nilai probability of failure* tersebut, maka didapatkan nilai kuantitatif untuk potensi kegagalan terkait tension tali yang melebihi batas yang diizinkan. Perangkingan secara kuantitatif tersebut diberikan penilaian secara kualitatif yang disesuaikan pada Tabel 22.

Gambar 10 merupakan hasil Penggolongan tingkat risiko dilakukan untuk mengevaluasi potensi kegagalan dengan menggunakan parameter dari hasil indeks peringkat yang didapat dari *likelihood* dan *severity*.

F. Pengendalian Risiko Kualitatif

Mitigasi dilakukan dengan *hierarchy of control*. Hierarki ini menganalisis risiko dari potensi kegagalan dengan lebih spesifik untuk menentukan tindakan yang paling efektif dalam mengendalikan atau meminimalisir dampak dan probabilitas dari potensi kegagalan tersebut. Tabel 23 merupakan pengendalian risiko secara kualitatif.



Gambar 12. Penambahan sling lifting point.

Manusia	Lingkungan	Aset	Reputasi	Level	Probabilitas (Berkas)				
					1	2	3	4	5
Kemacetan	Kerusakan perlengkapan di area operasi, kapasitas angkat > 100 tbb	Tangki besar > 150 000 kg	Berkembang secara nasional	5	5	10	10	10	10
Gas/Pressure, Corrosi, Hilang Waktu Kerja (HWT)	Terserang energi area operasi, kapasitas angkat > 100 - 100 tbb	Besi (ISM, 100 M)	Berkembang secara nasional	4	4	8	12	10	10
Tertinggalnya Pekerjaan (DTC)	Terserang terjatuh di area pemukiman, kapasitas angkat > 10 - 100 tbb	Indrag (150 1M, 10 tbb)	Berkembang secara lokal	3	3	6	9	12	10
Terdahak Mudi (DTC)	Terserang terjatuh di area pemukiman, kapasitas angkat > 1 - 10 tbb	Kali (150 100K, 1 tbb)	Berkembang internasional	2	2	4	6	9	10
Calon Ringan (Tan: Air Dapur)	Tidak terjatuh terkendala lingkungan, kapasitas angkat > 1 tbb	Tangki kecil < 150 100K	Tidak berkembang pada regional	1	1	2	3	4	5

Gambar 13. Risk matrix setelah pengendalian risiko

G. Pengendalian Risiko Kuantitatif

Dalam pengendalian risiko penulis menyarankan 3 mitigasi risiko, dalam pemilihan mitigasi yang digunakan diperlukan pemilihan yang didasari pada beberapa factor yang tertera pada Tabel 24 dan Tabel 25.

Penulis memberikan strategi untuk pengendalian risiko berupa mengubah diameter tali sling, redesain spreader bar dan penambahan sling pada lifting point. Hasil parameter penilaian tertera pada Tabel 26 dan Tabel 27. UC Maskimum tertera pada Tabel 28.

Gambar 11 merupakan redesain spreader bar dengan

penambahan penegar pada spreader bar dan pada Tabel 29 dan Tabel 30 dan Tabel 31 untuk tension dan UC maksimum.

Gambar 12 merupakan gambar penambahan sling lifting point dengan penambahan penegar pada spreader bar dan pada Tabel 32 dan Tabel 33 untuk tension dan UC maksimum.

Setelah dilakukan analisis diberikan hasil bahwa mitigasi risiko yang dipilih adalah penambahan sling lifting point melalui beberapa faktor. Gambar 13 merupakan penilaian mitigasi risiko setelah dibuktikan secara kuantitatif dan kualitatif.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang dilakukan berdasarkan FTA didapatkan 21 basic event dengan probabilitas terbesar pada struktur terkena beban splash zone (A.1.2) sebesar 0.027 dan juga dengan hasil RPN score 60. Berdasarkan evaluasi kegagalan dengan matriks risiko bahwa dengan pendekatan kuantitatif menghasilkan score PoF 4×10^{-4} setara ranking 4 untuk potensi kegagalan (A.1.4) dan score PoF 3×10^{-2} setara ranking 3 untuk potensi kegagalan (A.1.3) dan memiliki hasil analisis yang sama dengan kualitatif. Strategi mitigasi risiko secara kualitatif ditampilkan pada Tabel 23. Dengan pemilihan penambahan sling pada lifting point dengan beberapa faktor keamanan dari segi faktor tegangan maksimum sling dan maksimum UC.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Koto, *Subsea PLEM & PLET: Theory and Applications*, 2nd ed. Jakarta: Ocean & Aerospace Research Institute, 2017. ISBN: 2017060102.
- [2] K. Dailey, *The FMEA Pocket Handbook: Failure Mode and Effects Analysis*, 1st ed. London: DW Publishing, 2004. ISBN: 978-0974722122.
- [3] E. B. Djatmiko, *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. Surabaya: ITS Press, 2012. ISBN: 978-602-9494-51-8.