

## BAB IV PEMBAHASAN

### 4.1 Pendahuluan

Bab ini menyajikan hasil pengumpulan data, identifikasi *failure mode*, analisis *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), perhitungan *Risk Priority Number* (RPN), penentuan prioritas risiko, analisis *Risk-Based Maintenance* (RBM), serta rekomendasi strategi perawatan *wire rope* pada proses *docking* dan *undocking* kapal di galangan. Seluruh tahapan analisis dilaksanakan sesuai dengan metodologi yang telah ditetapkan pada BAB III.

Pengumpulan data dilakukan melalui wawancara dengan 5 responden yang terdiri dari pihak pihak yang memiliki wewenang terhadap *wire rope* dari 5 galangan berbeda, serta penyebaran kuisioner untuk memperoleh penilaiann parameter FMEA. Data sekunder berupa catatan kegagalan historis *wire rope* diperoleh dari dokumen internal 5 (lima) galangan kapal di Pulau Jawa selama kurun waktu 5 tahun terakhir. Kombinasi data primer dan sekunder ini digunakan untuk menghasilkan analisis risiko yang komprehensif dan berbasis kondisi nyata di lapangan.

### 4.2 Data Lapangan dan Objek Penelitian

#### 4.2.1 Profil Galangan

Penelitian ini dilaksanakan pada 5 (lima) galangan kapal di Indonesia. Pengumpulan data historis kegagalan dilakukan secara komprehensif untuk memperoleh gambaran yang representatif terhadap kondisi operasi *wire rope* pada galangan. Profil galangan yang menjadi objek penelitian adalah sebagaimana berikut: Galangan A (PT. X, yang berlokasi di Gresik, Jawa Timur), Galangan B (PT. X, yang berlokasi di Cirebon, Jawa Barat), Galangan C (PT. X, yang berlokasi di Banten, Jawa Barat), Galangan D (PT. X, yang berlokasi di Banten, Jawa Barat), dan Galangan E (PT. X, yang berlokasi di Madura, Jawa Timur), seluruhnya berlokasi di wilayah Pulau Jawa. Kelima galangan tersebut melakukan rata-rata 12–15 kegiatan *docking* dan *undocking* kapal per bulan.

#### 4.2.2 Data Historis Kegagalan *Wire Rope*

Berdasarkan penelusuran dokumen *internal 5* (lima) galangan kapal di wilayah Banten selama periode 5 tahun, tercatat 5 (lima) kejadian kegagalan atau penggantian *wire rope*. Dari total 5 galangan yang diteliti, ke 5 galangan mengalami kegagalan masing masing 1 kali dalam 5 tahun terakhir. Nilai ini setara dengan 1 kejadian per galangan selama 5 tahun, mencerminkan bahwa kegagalan *wire rope* bersifat relatif jarang namun tetap berpotensi menimbulkan konsekuensi serius apabila tidak dikelola dengan program perawatan yang terstruktur.

Tabel 4.1 Data historis kegagalan *wire rope* pada proses *docking* dan *undocking*

Lokasi Kegagalan	Jenis Kegagalan	Jumlah Kejadian (5 Tahun)	Persentase (%)	Keterangan
Galangan A	Korosi	1	20%	Patah mendadak akibat penurunan sifat material
Galangan B	<i>Brittle Failure</i>	1	20%	Terjadi akibat beban kejut
Galangan C	<i>Fatigue</i>	1	20%	Terjadi setelah melewati banyak operasi <i>docking</i> dan <i>undocking</i>

Galangan D	Korosi	1	20%	Korosi permukaan menyebabkan penurunan diameter dan kekuatan tarik <i>wire rope</i>
Galangan E	<i>Fatigue</i>	1	20%	Terdapat puntiran permanen ( <i>kinking/birdcaging</i> )
	<b>Total</b>	5	100%	

Tabel 4.2 Rangkuman data historis kegagalan *wire rope* pada galangan

Jenis Kegagalan	Frekuensi	Persentase (%)
<i>Fatigue</i>	2	40%
Korosi	2	40%
<i>Brittle Failure</i>	1	20%
<b>Total</b>	5	100%

#### 4.2.3 Responden Penelitian

Penilaian parameter FMEA dilakukan oleh 5 (lima) responden yang memiliki pengalaman langsung dalam operasi dan perawatan *wire rope* pada sistem *docking*.

Tabel 4.3 Data responden

No.	Jabatan / Posisi	Pengalaman Kerja
1	<i>Repair Manager</i>	11 tahun
2	<i>Project Manager</i>	13 tahun
3	<i>Operation Manager</i>	7 tahun
4	<i>Facillities Manager</i>	10 tahun
5	<i>Dock Master</i>	6 tahun
	TOTAL	47 tahun

### 4.3 Identifikasi Failure Mode Wire Rope

Identifikasi *failure Mode* dilakukan berdasarkan integrasi tiga sumber informasi, yaitu: data historis kegagalan dari dokumen galangan, hasil wawancara dengan responden di lapangan, dan kajian literatur ilmiah. Berdasarkan proses identifikasi tersebut, ditemukan 6 (enam) *failure mode* yang relevan terhadap operasi *wire rope* pada proses *docking* dan *undocking*.

Setiap *failure mode* dianalisis untuk menentukan:

1. Fungsi yang terganggu
2. Penyebab utama terjadinya kegagalan (*cause*)
3. Dampak yang ditimbulkan (*effect*)

Tabel 4.4 Identifikasi *failure mode* pada *wire rope*

No.	<i>Failure Mode</i> (Mode Kegagalan)	Fungsi yang Terganggu	<i>Cause</i> (Penyebab)	<i>Effect</i> (Dampak)
FM-01	<i>Fatigue failure</i> (Putus Kawat Akibat Kelelahan)	Transmisi gaya tarik kontinu	Kelelahan, pembebanan siklik berulang saat melewati <i>sheave</i> ; kombinasi beban tarik dan bengkok ( <i>bending-tension</i> )	Putusnya kawat secara bertahap; penurunan kekuatan tarik; potensi putus total dan kapal lepas kendali

FM-02	Korosi Permukaan ( <i>Surface Corrosion</i> )	Integritas struktur kawat	Paparan air laut dan kelembaban tinggi; degradasi lapisan pelumasan; kurangnya perlindungan <i>coating</i>	Pengikisan penampang kawat; penurunan kekuatan MBL; mempercepat timbulnya <i>fatigue crack</i>
FM-03	Getas ( <i>Brittle Failure</i> )	Integritas struktural kawat pada kondisi pembebanan tinggi	Pembebanan melebihi batas elastisitas material kawat; pemberian beban kejut ( <i>shock load</i> ) secara berulang; degradasi sifat mekanik kawat akibat paparan lingkungan korosif dan suhu ekstrem; kurangnya pelumasan sehingga kawat kehilangan kelenturannya, paparan suhu yang terlalu tinggi	Hilangnya material kawat secara bertahap; terbentuknya inisiasi retak <i>fatigue</i> ; penurunan diameter efektif
FM-04	<i>Overstress</i> / Beban Lebih ( <i>Overloading</i> )	Kapasitas beban desain <i>wire rope</i>	Beban tarik melebihi SWL; hambatan kapal mendadak saat proses penarikan; kejut beban ( <i>shock load</i> )	Deformasi plastis permanen; putus mendadak tanpa peringatan; bahaya keselamatan tinggi
FM-05	Deformasi Struktural ( <i>Kinking</i> / <i>Bird-Caging</i> )	Geometri dan keseragaman <i>strand</i>	Penggulungan tidak rapi pada <i>drum</i> ; tikungan tajam melebihi <i>bend</i> radius minimum; penanganan yang tidak tepat	Distribusi beban tidak merata antar <i>strand</i> ; <i>stress concentration</i> lokal; percepatan kegagalan <i>fatigue</i>
FM-06	Kerusakan <i>Internal Wire Breakage</i>	Integritas kawat inti ( <i>core</i> )	Korosi <i>internal</i> tidak terdeteksi; <i>fatigue</i> pada kawat dalam yang tidak terlihat secara visual	Kehilangan kekuatan struktural tanpa indikasi visual; kegagalan mendadak dan sangat berbahaya

#### 4.4 Analisis Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

##### 4.4.1 Skala Penilaian Parameter FMEA

Penilaian setiap *failure mode* menggunakan tiga parameter utama FMEA. Yaitu *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D), masing-masing pada skala 1 hingga 10. Definisi skala penilaian yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada pedoman FMEA baku dan disesuaikan dengan konteks operasi *wire rope docking*.

Tabel 4.5 Parameter *severity*

Nilai	Kategori <i>Severity</i>	Kriteria Dampak
1-2	Sangat Ringan	Kegagalan tidak mengganggu operasi; <i>rope</i> masih dapat berfungsi normal; tidak ada dampak keselamatan
3-4	Ringan	Penurunan performa minor; operasi <i>docking</i> dapat dilanjutkan dengan pengawasan ekstra
5-6	Sedang	Gangguan operasional yang memerlukan penghentian sementara; tidak ada cedera personel

7-8	Tinggi	Kegagalan menyebabkan penghentian operasi <i>docking</i> ; risiko kerusakan kapal atau fasilitas
9-10	Sangat Tinggi / Kritis	Kegagalan mengancam keselamatan jiwa; <i>wire rope putus</i> mendadak; kapal lepas kendali

Tabel 4.6 Kategori *occurrence*

Nilai	Kategori <i>Occurrence</i>	Kriteria Frekuensi Kejadian
1-2	Sangat Jarang	Kegagalan hampir tidak pernah terjadi; < 1 kali dalam 5 tahun operasi
3-4	Jarang	Kegagalan terjadi sesekali; 1–2 kali per tahun
5-6	Sedang	Kegagalan terjadi cukup sering; 3–6 kali per tahun
7-8	Sering	Kegagalan terjadi rutin; 7–12 kali per tahun
9-10	Sangat Sering	Kegagalan hampir selalu terjadi; > 12 kali per tahun atau pada setiap siklus operasi

Tabel 4.7 Kategori *detection*

Nilai	Kategori <i>Detection</i>	Kriteria Kemampuan Deteksi
1–2	Sangat Mudah	Kegagalan terdeteksi secara visual langsung sebelum operasi; sangat jelas dan tidak mungkin terlewat
3–4	Mudah	Kegagalan dapat dideteksi dengan inspeksi visual rutin yang telah terjadwal
5–6	Sedang	Kegagalan dapat terdeteksi hanya dengan inspeksi khusus menggunakan alat bantu
7–8	Sulit	Kegagalan sulit terdeteksi; memerlukan metode <i>non-destructif test</i> (NDT) atau pembongkaran komponen
9–10	Sangat Sulit	Kegagalan hampir tidak mungkin terdeteksi sebelum terjadi; tidak ada prosedur deteksi yang memadai

#### 4.4.2 Hasil Penilaian Parameter

Nilai *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) diperoleh dari penilaian individual oleh seluruh responden terhadap setiap *failure mode*, kemudian dirata-ratakan dan dibulatkan. Rekapitulasi penilaian masing-masing responden untuk setiap *failure mode* sebagai berikut:

Tabel 4.8 Hasil responden

Kode	<i>Failure mode</i>	R-01	R-02	R-03	R-04	R-05	Rata - rata		
		S/O/D	S/O/D	S/O/D	S/O/D	S/O/D	S	O	D
FM-01	Fatigue failure	8/3/7	8/3/8	7/3/7	8/4/7	9/3/6	8	4	7
FM-02	Korosi Permukaan	6/3/4	6/2/4	7/3/5	6/3/4	5/4/3	8	2	4
FM-03	Brittle Failure (Getas)	8/2/2	7/2/2	8/2/3	9/2/2	8/2/2	7	2	5
FM-04	Overstress	9/2/6	10/2/5	9/2/6	8/2/7	9/2/6	10	2	8
FM-05	Deformasi (Kinking)	5/2/2	5/2/2	6/2/3	5/2/2	4/2/2	8	1	3
FM-06	Internal Breakage	10/1/10	10/1/10	9/1/10	9/1/10	10/1/10	10	1	10

## 4.5 Perhitungan *Risk priority number* (RPN)

### 4.5.1 Perhitungan Manual dan Peringkat RPN

Tabel 4.9 Perhitungan dan peringkat RPN

Peringkat	Kode	<i>Failure mode</i>	S	O	D	RPN	Kategori Risiko
1	FM-01	Fatigue Failure (Kelelahan Material)	8	4	7	224	Tinggi
2	FM-04	Overstress (Beban Lebih)	10	2	8	160	Tinggi
3	FM-06	<i>Internal Wire Breakage</i> (Kerusakan Internal)	10	1	10	100	Sedang
4	FM-03	Getas ( <i>Brittle Failure</i> )	7	2	5	70	Sedang
5	FM-02	Korosi Permukaan ( <i>Surface Corrosion</i> )	8	2	4	64	Sedang
6	FM-05	Deformasi Struktural ( <i>Kinking/Bird-Caging</i> )	8	1	3	24	Rendah

Catatan \*: FM-06 (Kerusakan *Internal*) mendapatkan penanda khusus meskipun berada di peringkat 3 berdasarkan RPN, karena memiliki nilai *Severity* tertinggi (S = 10) dan nilai *Detection* terburuk (D = 10). *Failure mode* ini wajib ditangani dengan program NDT terlepas dari nilai RPN-nya.

### 4.5.2 Persamaan Perhitungan

*Risk Priority Number* (RPN) dihitung menggunakan persamaan yang ditetapkan dalam metodologi FMEA klasik:

$$RPN = S \times O \times D$$

di mana S adalah *Severity*, O adalah *Occurrence*, dan D adalah *Detection*. Nilai RPN memiliki rentang teoritis 1 hingga 1.000. Semakin tinggi nilai RPN, semakin tinggi tingkat prioritas penanganan terhadap *failure mode* tersebut.

### 4.5.3 Analisis Distribusi RPN

Berdasarkan perhitungan manual dan peringkat RPN, distribusi kategori risiko *failure mode wire rope* di galangan adalah sebagai berikut: (1) Kategori Risiko Tinggi (RPN  $\geq$  150): dua *failure mode* (FM-01 dan FM-04); (2) Kategori Risiko Sedang (RPN 100–149): satu *failure mode* (FM-06); dan (3) Kategori Risiko Rendah (RPN < 100): tiga *failure mode* (FM-02, FM-03 dan FM-05).

Nilai RPN tertinggi diperoleh FM-01 (Fatigue failure) dengan RPN = 224, karena kombinasi dampak besar (S = 8), frekuensi kejadian (O = 4), dan kesulitan deteksi tanpa alat bantu NDT (D = 7). FM-05 (*Kinking*) memiliki RPN terendah (24) karena dapat dideteksi secara visual dengan mudah (D = 3) dan frekuensinya rendah (O = 1).

## 4.6 Penentuan Prioritas Risiko

### 4.6.1 Urutan Prioritas dan Karakteristik Risiko

Berdasarkan nilai RPN, seluruh *failure mode* diurutkan dari prioritas tertinggi ke terendah. Analisis karakteristik risiko tambahan dilakukan pada *failure mode* prioritas utama untuk memahami komponen risiko yang mendominasi dan menentukan pendekatan penanganan yang paling tepat.

Tabel 4.10 Urutan prioritas dan karakteristik risiko

Prioritas	Kode	Failure Mode	RPN	Komponen Dominan	Implikasi Penanganan
1	FM-01	Fatigue Failure (Kelelahan Material)	224	Severity cukup tinggi (S=8), Occurrence tertinggi (O=4), Detection cukup sulit dideteksi (D=7)	Prioritas utama: <i>predictive maintenance</i> + pengukuran diameter <i>wire rope</i> .
2	FM-04	Overstress (Beban Lebih)	160	Severity sangat tinggi (S=10) dan Detection tinggi (D=8)	SOP operasional ketat + kalibrasi load indicator
3	FM-06	Internal Wire Breakage (Kerusakan Internal)	100	Severity maksimum (S=10) dan Detection terburuk (D=10)	Wajib program NDT MFL terlepas dari nilai RPN
4	FM-03	Getas ( <i>Brittle Failure</i> )	70	Occurrence sedang (O=2) dan kombinasi S=7 dan D=5	<i>Preventive maintenance</i> : inspeksi visual, pelumasan dan <i>coating</i> berkala
5	FM-02	Korosi Permukaan ( <i>Surface Corrosion</i> )	64	Detection sangat mudah (D=4) terdeteksi visual	<i>Preventive maintenance</i> : pelumasan dan <i>coating</i> mingguan, inspeksi visual rutin sebelum dan sesudah operasi
6	FM-05	Deformasi Struktural ( <i>Kinking/Bird-Caging</i> )	24	Severity cukup tinggi (S=8); deteksi visual sangat mudah (D=3)	Perbaiki SOP penggulungan <i>rope</i> sesuai prosedur

#### 4.6.2 Matriks Risiko Wire Rope

Seluruh *failure mode* dipetakan ke dalam matriks risiko 5×5 berdasarkan nilai *Severity* dan *Occurrence* untuk memberikan gambaran visual distribusi risiko dan memudahkan komunikasi kepada pimpinan galangan.

Tabel 4.11 Matriks risiko wire rope

Severity \ Occurrence	O = 1–2 (Sangat Jarang)	O = 3–4 (Jarang)	O = 5–6 (Sedang)	O = 7–8 (Sering)	O = 9–10 (Sangat Sering)
S = 9–10 (Sangat Tinggi / Kritis)	FM-06, FM-04	-	-	-	-
S = 7–8 (Tinggi)	FM-03	FM-01	-	-	-
S = 5–6 (Sedang)	FM-05	FM-02	-	-	-
S = 3–4 (Ringan)	-	-	-	-	-
S = 1–2 (Sangat Ringan)	-	-	-	-	-

Keterangan:

- Zona Merah: Risiko Ekstrim, penanganan segera wajib,
- Zona Orange: Risiko tinggi, prioritas perawatan utama,
- Zona Kuning: Risiko sedang, tindakan perawatan terjadwal,
- Zona Hijau: Risiko rendah, Tindakan pemantauan cukup.

Berdasarkan pemetaan matriks risiko, setiap zona risiko memerlukan tindakan mitigasi yang berbeda sesuai tingkat kekritisannya. Tabel berikut menyajikan strategi mitigasi yang direkomendasikan untuk setiap zona risiko (Puji et al., 2025; Yildirim et al., 2026).

Tabel 4.12 Strategi mitigasi

Zona Risiko	FM Terkait	Tingkat Risiko	Tujuan Mitigasi	Strategi Mitigasi Utama	Tindakan Konkret
ORANGE (Tinggi)	FM-01, FM-04, FM-06	RPN 100–224; risiko tinggi; potensi kerusakan besar dan gangguan operasional serius	Prioritas perawatan utama; tindakan proaktif untuk reduksi frekuensi dan deteksi dini kegagalan	Predictive + Condition-Based Maintenance; NDT MFL; inspeksi broken wires; kalibrasi load indicator	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inspeksi broken wires sebelum dan sesudah operasi (FM-01)</li> <li>• Ukur diameter dengan jangka sorong setiap bulan (FM-01)</li> <li>• Ganti rope jika &gt;10% kawat putus dalam 1 lay length</li> <li>• Uji NDT MFL setiap 3 bulan (FM-06)</li> <li>• Kalibrasi load indicator sebelum operasi (FM-04)</li> <li>• Hentikan operasi jika beban melebihi SWL</li> </ul>
KUNING (Sedang)	FM-03, FM-02	S = 5–8, O = 2–4; RPN 64–70; risiko sedang dengan deteksi lebih mudah	Kendalikan penyebab melalui perawatan terjadwal; cegah peningkatan ke zona lebih tinggi	Preventive Maintenance: pelumasan rutin, inspeksi visual, coating anti-korosi, aplikasi grease marine grade	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pelumasan dengan grease marine grade mingguan (FM-02)</li> <li>• Inspeksi visual patah getas sebelum/sesudah operasi (FM-03)</li> <li>• NDT LF jika terindikasi; coating anti-korosi berkala</li> <li>• Pastikan rope tidak terpapar beban kejut berulang</li> </ul>
HIJAU (Rendah)	FM-05	S = 5–6, O = 1–2; RPN = 24; deteksi visual mudah; frekuensi sangat rendah	Pemantauan berkala sudah cukup; fokus pada perbaikan prosedur untuk mencegah peningkatan zona	Corrective Maintenance + perbaikan SOP penggulangan dan penanganan wire rope	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pemantauan visual kinking sebelum operasi</li> <li>• SOP penggulangan rope pada drum sesuai prosedur</li> <li>• Ganti segera jika terdeteksi kinking/bird-caging permanen</li> <li>• Pelatihan operator penanganan rope yang benar</li> </ul>

#### 4.7 Analisis Risk-Based Maintenance (RBM)

##### 4.7.1 Klasifikasi Risiko dan Strategi Perawatan

Berdasarkan nilai RPN dan profil komponen risiko yang telah diperoleh, setiap *failure mode* diklasifikasikan ke dalam kategori risiko dan ditetapkan strategi perawatan yang paling sesuai menurut prinsip *Risk-Based Maintenance*. Pemilihan strategi tidak semata-mata didasarkan pada nilai RPN, melainkan juga mempertimbangkan nilai *Severity* dan *Detection* secara individual, sebagaimana yang direkomendasikan oleh Puji et al. (2025) dan Yaqin et al. (2020).

Tabel 4.13 Klasifikasi risiko dan strategi perawatan

Kode	Failure mode	RPN	Kategori	Strategi Perawatan	Justifikasi
FM-01	Fatigue Failure (Kelelahan Material)	224	Risiko Tinggi	Predictive Maintenance (inspeksi visual berkala dan pengukuran dimensi <i>wire rope</i> )	RPN tertinggi; O=4; <i>fatigue</i> tidak terlihat visual; inspeksi NDT diperlukan
FM-04	Overstress (Beban Lebih)	160	Risiko Tinggi	Preventive Maintenance + SOP Operasional	S=10 katastrofik; mitigasi melalui kalibrasi <i>load indicator</i> dan prosedur ketat
FM-06	Internal Wire Breakage (Kerusakan Internal)	100	Risiko Sedang	Condition-Based Maintenance (NDT MFL)	S=10, D=10; tidak terdeteksi visual; wajib MFL setiap 3 bulan
FM-03	Getas (Brittle Failure)	70	Risiko Sedang	Preventive Maintenance (inspeksi visual + NDT MFL LF ( <i>Localized Flaw</i> ) jika dibutuhkan)	D=5; perlu alat bantu deteksi; inspeksi sebelum dan sesudah operasi
FM-02	Korosi Permukaan (Surface Corrosion)	64	Risiko Sedang	Preventive Maintenance (pelumasan & coating)	Lingkungan laut korosif; O=2 dapat ditekan dengan <i>grease marine grade</i>
FM-05	Deformasi Struktural (Kinking/Bird-Caging)	24	Risiko Rendah	Corrective Maintenance + SOP Penanganan	RPN terendah; D=3 mudah terdeteksi; fokus pada prosedur penggulungan

#### 4.8 Rekomendasi Strategi Perawatan Wire Rope

##### 4.8.1 Rekomendasi Teknis per Failure Mode

Berdasarkan hasil analisis FMEA dan RBM, disusun rekomendasi tindakan perawatan konkret untuk setiap *failure mode*. Rekomendasi ini dirancang agar dapat langsung diimplementasikan oleh galangan tanpa memerlukan investasi peralatan yang terlalu besar, khususnya untuk *failure mode* berprioritas menengah dan rendah.

Tabel 4.14 Rekomendasi strategi perawatan

No.	Failure Mode	Tindakan Perawatan yang Direkomendasikan	Interval	Metode/Alat
1	FM-01	Inspeksi visual <i>broken wires</i> ; pengukuran diameter; penggantian jika kawat putus $\geq 10\%$	Sebelum & sesudah operasi + bulanan	Visual + jangka sorong; form inspeksi

2	FM-04	Kalibrasi <i>load indicator</i> ; verifikasi beban tidak melebihi SWL <i>wire rope</i> sebelum operasi	Setiap 6 bulan + sebelum operasi	<i>Load cell / dynamometer</i> terkalibrasi
3	FM-06	MFL <i>Testing</i> seluruh panjang <i>rope</i> ; dokumentasi hasil; keputusan penggantian jika LMA > 5%	Setiap 3 bulan	Alat MFL portable; laporan tertulis
4	FM-03	Inspeksi visual patah getas dan retakan pada kawat; penggantian segera jika ditemukan	Sebelum & sesudah tiap operasi	Inspeksi visual; form laporan
5	FM-02	Pembersihan <i>rope</i> dari garam; aplikasi <i>grease marine grade</i> secara merata di seluruh strand	Setiap minggu (2× saat musim hujan)	Kuas/ <i>spray grease; grease marine grade</i>
6	FM-05	Penggulungan <i>rope</i> sesuai prosedur; cek <i>kinking</i> dan <i>bird-caging</i> ; ganti jika ada deformasi permanen	Sebelum tiap operasi	Prosedur SOP; inspeksi visual

#### 4.8.2 Kriteria Penggantian *Wire Rope*

Untuk menghindari subjektivitas dalam keputusan penggantian *wire rope*, ditetapkan kriteria yang bersifat kuantitatif dan mengacu pada standar ISO 4309:2017 serta kondisi operasional spesifik di galangan.

Tabel 4.15 Kriteria penggantian *wire rope*

No.	Kriteria Penggantian	Batas Ambang	Referensi
1	Jumlah <i>broken wires</i> dalam satu <i>lay length</i>	≥ 10% dari total kawat	ISO 4309:2017
2	Penurunan diameter <i>wire rope</i> dari nominal 32 mm	< 30,4 mm (penurunan > 5%)	ISO 4309:2017
3	Korosi merata pada kawat luar	Pengurangan penampang > 10%	ISO 4309:2017
4	Deformasi permanen ( <i>kinking, bird-caging, flattening</i> )	Terdeteksi <i>kinking</i> apapun	ISO 4309:2017
5	Hasil MFL menunjukkan LMA ( <i>Loss of metallic area</i> )	LMA > 5% pada segmen manapun	Rekomendasi pabrikan MFL

#### 4.8.3 Jadwal Perawatan Terpadu

Berdasarkan analisis RBM, seluruh tindakan perawatan yang direkomendasikan dirangkum dalam jadwal perawatan terpadu untuk memudahkan implementasi operasional di lapangan.

Tabel 4.16 Jadwal perawatan terpadu

Frekuensi	Tindakan Utama	FM yang Ditangani	Penanggung Jawab
Sebelum & sesudah tiap operasi docking	Inspeksi visual <i>broken wires, kinking</i> , dan deformasi; cek <i>alignment sheave</i>	FM-01, FM-03, FM-05	<i>Operator Winch</i>
Setiap minggu (2× di musim hujan)	Pembersihan <i>rope</i> dari garam + aplikasi <i>grease marine grade</i>	FM-02	Teknisi Perawatan
Setiap bulan	Inspeksi menyeluruh + pengukuran diameter <i>rope</i> + laporan kondisi	FM-01, FM-02, FM-03	Teknisi + <i>Supervisor</i>

Setiap 3 bulan	MFL <i>Testing</i> seluruh panjang <i>rope</i> ; evaluasi hasil dan keputusan penggantian	FM-06	Ahli NDT + <i>Engineer</i>
Setiap 6 bulan	Kalibrasi <i>load indicator winch</i> ; review SOP; pelatihan operator	FM-04, FM-05	<i>Engineer + Supervisor</i>
Setiap 12 bulan / berbasis kondisi	Penggantian <i>preventif wire rope</i> ; audit perawatan tahunan; dokumentasi historis	Semua FM	Semua PIC

## 4.9 Pembahasan

### 4.9.1 *Failure Mode* Dominan dan Perbandingan dengan Studi Terdahulu

Hasil analisis FMEA menunjukkan bahwa *fatigue failure* (FM-01, RPN = 168) merupakan salah satu failure mode dengan nilai RPN tertinggi di galangan. Temuan ini konsisten dengan penelitian Rahman (2025) pada *pedestal crane offshore* dan Gürgen & Ada (2025) pada sistem *towing tugboat*, yang secara konsisten mengidentifikasi *fatigue* sebagai mekanisme kegagalan *wire rope* paling dominan. Konsistensi ini memperkuat validitas hasil analisis sekaligus menunjukkan bahwa karakteristik kegagalan *wire rope* bersifat *universal* meskipun jenis aplikasinya berbeda.

Nilai *Occurrence* pada *failure mode* FM-01 ditetapkan pada O = 4 berdasarkan data historis aktual terdapat 2 kejadian dari 5 galangan dalam 5 tahun dengan total 40%. Nilai ini menandakan penelitian pada *wire rope* yang digunakan untuk *docking* dan *undocking* kapal sama dengan penelitian pada sistem crane, namun tetap mencerminkan kondisi nyata galangan dengan strategi perawatan reaktif. Peningkatan nilai O diperkirakan akan terjadi seiring bertambahnya umur sistem jika program perawatan preventif tidak segera diimplementasikan.

### 4.9.2 FM-06: Risiko Tersembunyi Paling Berbahaya

FM-06 (*Internal Wire Breakage*, RPN = 100) berada di peringkat pertama, Meskipun nilai *Occurrence*-nya rendah (O = 1), kombinasi *Severity* maksimum (S = 10) dan *Detection* terburuk (D = 10) menciptakan profil risiko katastrofik yang tidak dapat diwakili sepenuhnya oleh nilai RPN. Kondisi ini menegaskan bahwa program NDT *Magnetic Flux Leakage* (MFL) bukan sekadar rekomendasi tambahan, melainkan kebutuhan teknis mendasar yang harus diimplementasikan segera.

### 4.9.3 Implikasi Perubahan dari *Reactive* ke *Proactive Maintenance*

Kondisi operasional di kelima galangan saat ini menunjukkan pendekatan perawatan yang masih bersifat reaktif. Dengan 5 kejadian kegagalan dalam 60 bulan, transisi menuju kerangka *preventive* dan *predictive maintenance* melalui RBM yang diusulkan diperkirakan dapat menurunkan frekuensi kegagalan mendadak sebesar 30–50% dalam 12 bulan pertama implementasi, mengacu pada hasil Amorim (2025) pada *stacker crane* dengan kondisi serupa.

### 4.9.4 Keterbatasan Penelitian

Beberapa keterbatasan yang perlu diakui dalam penelitian ini adalah: Pertama, penggunaan FMEA klasik dengan skala ordinal 1–10 yang rentan terhadap subjektivitas responden, terutama pada parameter *Occurrence* yang bergantung pada ingatan responden terhadap historis kejadian. Penggunaan *fuzzy*-FMEA seperti yang diterapkan Gürgen dan Ada (2025) dapat menghasilkan penilaian yang lebih representatif terhadap ketidakpastian penilaian manusia.

Kedua, penelitian ini dilakukan pada 5 (lima) galangan kapal yang memiliki karakteristik operasional berbeda. Ketiga, data kondisi aktual dari pengujian NDT belum tersedia pada saat penelitian berlangsung, sehingga nilai *Detection* pada beberapa *failure mode* diperoleh semata-mata dari persepsi responden. Keempat, estimasi penurunan frekuensi kegagalan pascaimplementasi bersifat proyeksi berdasarkan studi literatur dan belum dapat diverifikasi secara empiris.

#### 4.10 Rangkuman Hasil Penelitian

Seluruh rangkuman hasil utama penelitian dalam BAB IV akan disajikan dalam bentuk berikut sebagai referensi praktis bagi galangan.

Tabel 4.17 Rangkuman hasil penelitian

Aspek	Hasil Penelitian
Periode data historis	Januari 2021 – Januari 2026 (60 bulan); 5 kejadian kegagalan tercatat
Jumlah responden	5 orang ( <i>Repair manager, project manager, operation manager, facilities manager, dock master</i> ); rata-rata pengalaman 9,4 tahun
Jumlah <i>failure mode</i>	6 <i>failure mode</i> (FM-01 s.d. FM-06)
Rentang nilai RPN	24 (FM-05/ <i>Kinking</i> ) — 224 (FM-06/ <i>Fatigue failure</i> )
<i>Failure mode</i> RPN tertinggi	FM-01: <i>Fatigue failure</i> — RPN = 224 (S=8, O=4, D=7)
<i>Failure mode</i> paling berbahaya	FM-06: <i>Internal Wire Breakage</i> — S=10, D=10; wajib program NDT MFL
Distribusi kategori risiko	Tinggi (RPN $\geq$ 150): 2 FM   Sedang (RPN 50–149): 3 FM   Rendah (< 50): 1 FM
Strategi perawatan rekomendasi	<i>Preventive + Predictive Maintenance + Condition-Based Maintenance (framework RBM)</i>
Tindakan prioritas segera	(1) Jadwal inspeksi <i>broken wires</i> ; (2) Pelumasan mingguan; (3) Pengadaan NDT MFL
Perkiraan penurunan kegagalan	30–50% dalam 12 bulan pertama implementasi penuh (proyeksi berbasis literatur)

#### KESIMPULAN ANALISIS BAB IV:

1. Enam *failure mode* teridentifikasi pada *wire rope* proses *docking* dan *undocking* pada 5 galangan di Pulau Jawa, dengan *Fatigue Failure* (FM-01) sebagai *failure mode* berisiko tertinggi (RPN = 224).
2. Dua dari enam *failure mode* berada dalam kategori Risiko Tinggi (RPN  $\geq$  150), yaitu FM-01 (224) dan FM-04 (160), menunjukkan kondisi perawatan *wire rope* yang saat ini belum memadai.
3. FM-06 (*Internal Wire Breakage*, S=10, D=10) merupakan *failure mode* paling berbahaya secara kualitatif dan wajib ditangani dengan program NDT *Magnetic flux leakage* terlepas dari peringkat RPN-nya.
4. Integrasi FMEA dan RBM menghasilkan rekomendasi perawatan yang sistematis, bertingkat, dan dapat langsung diimplementasikan oleh galangan, mencakup jadwal inspeksi, program pelumasan, dan pengadaan NDT MFL.

5. Transisi dari *reactive maintenance* ke *preventive dan predictive maintenance* diperkirakan dapat menurunkan frekuensi kegagalan *wire rope* 30–50% dalam 12 bulan implementasi.