

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Wire rope*

Wire rope adalah komponen struktural fleksibel yang dibuat dari sejumlah kawat baja yang dipilin bersama menjadi untaian *strand* dan disusun di sekitar inti untuk menahan beban tarik secara efektif (Mazurek, 2023).

Struktur dasar *wire rope* terdiri dari kawat-kawat baja yang masing-masing saling dipilin membentuk *strand-strand*, dimana *strand-strand* tersebut kemudian dipilin bersama di sekitar inti sehingga menghasilkan tali yang kuat sekaligus mampu menahan deformasi akibat beban tarik dan lentur (Mazurek, 2023).

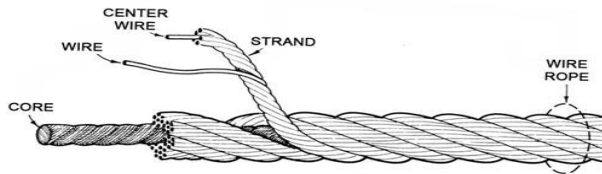
Dalam konteks mekanik, *wire rope* memiliki karakteristik kekuatan tarik yang tinggi sekaligus ketahanan terhadap pengulangan beban yang menyebabkan kelelahan (*fatigue*), sehingga desain dan konstruksinya menjadi aspek penting dalam analisis kegagalan struktur ini (Freddi et al., 2023).

Studi mengenai perilaku *fatigue* pada *wire rope* menunjukkan bahwa bending *fatigue* dan akumulasi kerusakan akibat beban berulang merupakan faktor utama dalam menentukan umur layanan tali baja, sehingga pemodelan numerik maupun eksperimen diperlukan untuk memperkirakan karakteristik lelahnya (Freddi et al., 2023).

Damage mechanisms yang mempengaruhi *Wire rope* meliputi keausan, pembentukan retakan mikro, putusnya kawat individu, dan degradasi lapisan pelumasan, yang semuanya dapat mempercepat penurunan kekuatan tarik dan meningkatkan kemungkinan kegagalan, terutama pada aplikasi beban berat seperti *lifting* dan *docking* kapal (Mazurek, 2023, Xue et al., 2019)

Pendekatan penelitian ini selaras dengan kajian ilmiah yang menekankan pentingnya memahami hubungan antara struktur *wire rope*, pengaruh kondisi beban, dan proses *fatigue*, karena hal ini menjadi dasar untuk melakukan analisis *reliability* atau probabilitas kegagalan dalam kondisi operasi nyata (Mazurek, 2023, Freddi et al., 2023)

Berikut penjelasan mengenai komponen-komponen dasar yang membentuk tali kawat yang kuat dan fleksibel ketika akan digunakan untuk aktivitas bongkar muat tersebut:



Gambar 2.1 Komponen *wire rope* tampak samping
Sumber: Seoasmrines, 2014

2.1.1 Bagian-Bagian *Wire rope*

Menurut (Kumar et al., 2020; Nijjaawan & Nijjaawan, 2010; Polat et al., 2021a) bagian-bagian pada *wire rope* adalah:

a. *Strand*

Strand adalah kumpulan kawat baja yang dipilin bersama secara heliks sehingga membentuk sebuah unit struktural yang lebih besar; beberapa kawat dipilin

sedemikian rupa untuk membentuk *strand* yang menjadi elemen pembawa beban dalam *wire rope* (Kumar et al., 2020; Nijjaawan & Nijjaawan, 2010).

b. *Wire*

Wire merupakan kawat baja individual yang menjadi bahan dasar dari setiap untaian tali baja; kawat-kawat ini dibuat melalui proses *cold-drawing* yang menghasilkan baja dengan kekuatan tarik tinggi sehingga mampu menahan gaya tarik besar (Kumar et al., 2020).

c. *Core*

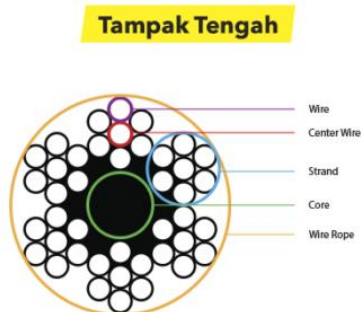
Inti (*core*) pada *wire rope* merupakan bagian tengah tali baja yang menjadi tempat bertumpunya *strand-strand* kawat yang melilit di sekelilingnya. *Core* berperan sebagai elemen penyangga utama yang menjaga posisi *strand* tetap stabil, mempertahankan bentuk geometris *wire rope*, serta membantu mendistribusikan gaya tarik yang bekerja sehingga beban tidak hanya terfokus pada kawat bagian luar saja. Dengan fungsi tersebut, inti memiliki pengaruh penting terhadap kestabilan struktur dan kinerja mekanik *Wire rope* secara keseluruhan (Polat et al., 2021a).

Secara umum, inti *wire rope* dapat berupa bahan serat (*fiber core*) maupun inti berbahan baja (*steel core*, seperti *Independent Wire rope Core/IWRC*). Pemilihan jenis inti disesuaikan dengan tuntutan aplikasi, baik dari sisi kekuatan tarik, tingkat fleksibilitas, maupun kondisi operasi. Pada aplikasi yang memerlukan fleksibilitas lebih tinggi, inti serat sering digunakan, sedangkan untuk kebutuhan kekuatan dan ketahanan deformasi yang lebih besar, inti baja lebih banyak dipilih, khususnya pada peralatan seperti *hoist crane*, *elevator*, dan sistem pengangkatan beban berat lainnya. (Polat et al., 2021a).

d. *Center Wire*

Center wire adalah kawat tunggal yang berada di pusat inti, terutama pada konstruksi inti berbasis *strand*, dan menjadi lokasi awal pembentukan struktur *strand* yang lebih besar di sekitarnya (Kumar et al., 2020)

Dalam beberapa konstruksi, *center wire* berada di dalam inti atau sebagai bagian inti kawat yang kemudian dikelilingi oleh kawat lain untuk membentuk *strand* (Kumar et al., 2020).



Gambar 2.2 Komponen *wire rope* tampak Tengah
Sumber: POWERTEC Indonesia, n.d.

2.1.2 *Wire rope*

a. *Steel Wire rope*

Pembuatan *wire* ini menggunakan baja dengan ketahanan korosi sangat tinggi dan mampu mengalami perenggangan secara andal baik pada suhu rendah maupun tinggi sehingga tetap layak digunakan di berbagai kondisi iklim, tetapi kelemahannya adalah biaya produksinya lebih tinggi, sehingga harga jualnya menjadi

lebih mahal dibandingkan *wire* dari bahan lain dengan ketahanan yang lebih rendah (Zhang et al., 2024).

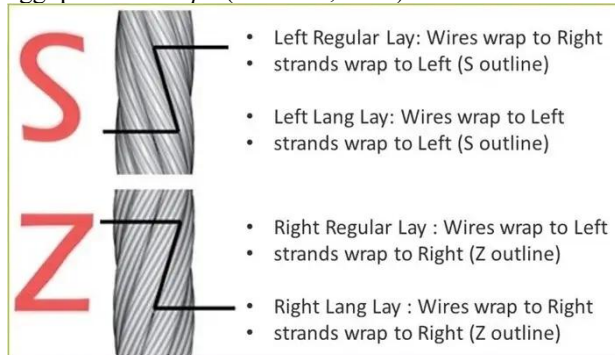


Gambar 2.3 *Steel wire rope*
Sumber: Shutterstock, 2016

b. sZ atau *Right Ordinary Lay*

Konfigurasi sZ atau *Right Ordinary Lay* merupakan jenis pilinan *wire rope* di mana *strand* luar diputar ke arah kanan sehingga membentuk kemiringan menyerupai huruf Z, sementara kawat-kawat penyusun di dalam *strand* tersebut dipilin ke arah yang berlawanan. Susunan ini menghasilkan struktur heliks ganda yang saling mengikat, sehingga *wire rope* memiliki tingkat kekakuan dan stabilitas yang lebih baik serta kecenderungan berputar yang lebih rendah dibandingkan konfigurasi lain seperti *lang lay* (Liu et al., 2021).

Arah pilinan pada konstruksi *wire rope* ini berpengaruh signifikan terhadap perilaku torsi keseluruhan tali, sedangkan kekakuan aksial dan pola distribusi gaya tarik dapat ditingkatkan melalui pengaturan kombinasi arah pilinan yang saling berlawanan atau bersilang. Pendekatan tersebut memungkinkan tercapainya kondisi mendekati keseimbangan torsi sekaligus mempertahankan kapasitas beban aksial yang tinggi pada *wire rope*. (Liu et al., 2021).



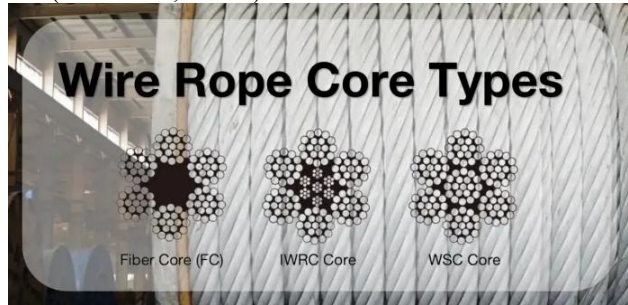
Gambar 2.4 sZ atau *Right ordinary lay*
Sumber: Sing Teck Leong, n.d.

c. *Independent Wire rope Core (IWRC)*

Perbandingan jenis inti pada *wire rope* menunjukkan bahwa konfigurasi inti memengaruhi karakteristik mekanik tali kawat, terutama dalam tahanan terhadap tekanan lateral, kekakuan, dan ketahanan terhadap beban tinggi. Misalnya, *Independent Wire rope Core (IWRC)* yang terbuat dari *wire rope* di bagian tengah memberikan dukungan struktural yang lebih kuat dibandingkan inti serat (*Fiber Core*), sehingga lebih tahan terhadap kompresi pada beban operasi berat. Hal ini

diperlihatkan dalam model mekanis yang mempertimbangkan secara eksplisit konfigurasi heliks kawat dan kontribusi inti pada respons elastik tali, di mana respons mekanik tali yang diprediksi cocok dengan data eksperimen saat digunakan inti baja independen, yang mengindikasikan peran penting inti baja dalam mendistribusikan gaya tarik dan mencegah deformasi lateral (Elata et al., 2004).

Selain itu, studi eksperimental pada variasi inti baja yang dilapisi plastik menunjukkan bahwa modifikasi tersebut dapat meningkatkan *breaking load* dan ketahanan terhadap korosi dibandingkan inti baja biasa, yang berarti pengembangan inti memberikan kontribusi tambahan terhadap performa *rope* di lingkungan kerja yang keras (Polat et al., 2021b).



Gambar 2.5 Tipe *wire rope core*
Sumber: Connect KNKT, n.d.

d. *Minimum Breaking Load (MBL)*

Minimum Breaking Load (MBL) merupakan besaran gaya minimum yang dijamin mampu menyebabkan kegagalan atau putusnya tali, *wire rope*, kabel, maupun rantai berdasarkan hasil pengujian tarik statis, di mana nilai ini diperoleh melalui uji tarik hingga kondisi patah di laboratorium dan digunakan sebagai parameter utama dalam penentuan kapasitas desain, penetapan faktor keamanan, serta perhitungan beban kerja yang diperbolehkan (*Safe Working Load/Working Load Limit*) pada sistem pengangkatan, *mooring*, maupun aplikasi penahan beban lainnya (Hroncek et al., 2023; Yordanova & Yankova, 2025). Dalam praktik perancangan dan standar teknik, beban operasi selalu ditetapkan jauh di bawah nilai MBL dengan menerapkan faktor keamanan tertentu, dengan tujuan memastikan sistem tetap beroperasi dalam kondisi aman meskipun terjadi variasi gaya, pengaruh beban dinamis, ataupun penurunan sifat material akibat kelelahan selama masa pemakaian (Andri & Nurdin, 2024; Lesňák et al., 2020)

2.1.3 Fungsi *Wire rope* dalam Proses *Docking* dan *Undocking*

Wire rope dalam proses *docking* dan *undocking* berperan sebagai elemen utama dalam sistem transmisi gaya yang menghubungkan sumber tenaga mekanis, seperti *winch*, dengan objek yang dipindahkan yaitu kapal. Dalam konteks sistem mekanik, *wire rope* dikategorikan sebagai *force transmission element* yang bekerja di bawah kombinasi beban tarik dan beban dinamis (Cebada-Relea et al., 2025). Fungsi ini sangat krusial karena keberhasilan proses *docking* sangat bergantung pada kemampuan *wire rope* dalam mentransfer gaya secara efisien dan stabil.

Pada proses *docking*, *wire rope* digunakan untuk menarik kapal dari kondisi terapung menuju posisi di atas *slipway* atau *dock*. Proses ini melibatkan gaya tarik yang besar serta interaksi antara kapal dan permukaan landasan, sehingga *wire rope*

harus mampu mempertahankan integritas strukturalnya selama menerima beban kontinu (Moriya et al., 2008). Selain itu, sistem ini sering bekerja dalam kondisi pembebanan tidak konstan akibat variasi gaya gesek dan perubahan posisi kapal.

Dalam proses *undocking*, fungsi *wire rope* tidak hanya sebagai penarik, tetapi juga sebagai pengendali gerakan kapal. *wire rope* digunakan untuk mengatur kecepatan pelepasan kapal ke perairan sehingga tidak terjadi percepatan yang berlebihan yang dapat menyebabkan kerusakan struktural maupun kecelakaan operasional. Hal ini menunjukkan bahwa *wire rope* juga berfungsi sebagai sistem kontrol pasif dalam operasi galangan.

Selain itu, *wire rope* harus mampu mengakomodasi kombinasi pembebanan seperti tegangan tarik dan pembengkokan saat melewati *drum* atau *sheave*. Kondisi ini dikenal sebagai *bending-tension interaction*, yang merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi performa dan umur pakai *wire rope* (Kubiś et al., 2023). Interaksi ini menyebabkan distribusi tegangan yang kompleks di dalam struktur *wire rope*.

Dalam aplikasi maritim, *wire rope* juga beroperasi dalam lingkungan yang agresif, termasuk paparan air laut, kelembaban tinggi, dan fluktuasi temperatur. Lingkungan ini dapat mempercepat degradasi material melalui mekanisme korosi yang pada akhirnya mempengaruhi kemampuan *wire rope* dalam menjalankan fungsinya secara optimal (Moriya et al., 2008).

Dengan demikian, fungsi *wire rope* dalam proses *docking* dan *undocking* tidak hanya terbatas sebagai alat penarik, tetapi juga sebagai elemen pengendali, penstabil, dan komponen kritis dalam sistem keselamatan operasional. Hal ini menegaskan bahwa *wire rope* merupakan komponen vital yang menentukan keberhasilan dan keamanan proses *docking* di galangan kapal.

2.1.4 Potensi Kegagalan *Wire Rope* dalam Proses *Docking*

Wire rope memiliki berbagai potensi kegagalan yang disebabkan oleh kombinasi pembebanan mekanis dan pengaruh lingkungan. Berdasarkan studi literatur, terdapat tiga mekanisme utama kegagalan *wire rope* yaitu *fatigue*, *wear* (abrasi), dan *corrosion* yang secara signifikan mempengaruhi keandalan struktur (Peng et al., 2025). Ketiga mekanisme ini sering terjadi secara bersamaan dan saling mempercepat proses degradasi material.

Kegagalan akibat *fatigue* merupakan mekanisme yang paling dominan dalam *wire rope*, terutama pada kondisi pembebanan siklik. *Fatigue* terjadi akibat pembebanan berulang yang menyebabkan inisiasi dan propagasi retakan mikro hingga akhirnya terjadi kegagalan total (Peng et al., 2025). Dalam studi eksperimental, ditemukan bahwa kerusakan awal biasanya berasal dari deformasi lokal pada kawat yang kemudian berkembang menjadi retakan (Peng et al., 2025).

Selain itu, fenomena *bending-tension fatigue* menjadi salah satu penyebab utama kegagalan pada *wire rope* yang beroperasi melalui *pulley* atau *drum*. Kombinasi antara tegangan tarik dan pembengkokan menyebabkan konsentrasi tegangan lokal yang mempercepat proses kelelahan material (Kubiś et al., 2023). Kondisi ini sangat relevan pada sistem *docking* yang melibatkan perubahan arah gaya secara kontinu.

Korosi juga merupakan faktor kritis yang mempercepat kegagalan *wire rope*, khususnya pada lingkungan laut. Paparan air laut menyebabkan terjadinya reaksi kimia yang mengikis material kawat, sehingga mengurangi luas penampang efektif dan menurunkan kekuatan tarik (Moriya et al., 2008). Selain itu, korosi dapat memicu terjadinya *corrosion fatigue* yang mempercepat kegagalan.

Abrasi atau keausan terjadi akibat kontak antara *wire rope* dengan permukaan lain seperti *drum*, *sheave*, atau struktur pendukung. Gesekan ini menyebabkan hilangnya material secara bertahap dan meningkatkan kemungkinan terjadinya kegagalan struktural (Peng et al., 2025). Keausan juga dapat menjadi titik awal terjadinya retakan *fatigue*.

Selain kegagalan eksternal, *wire rope* juga rentan terhadap kerusakan *internal* yang sulit dideteksi secara visual. Kerusakan ini dapat berupa putusnya kawat di bagian dalam akibat kombinasi *fatigue* dan korosi. Kondisi ini sangat berbahaya karena *wire rope* dapat tampak normal secara eksternal namun telah kehilangan sebagian besar kekuatannya (Peng et al., 2025).

2.1.5 Pentingnya Pemeliharaan dan Analisis Kegagalan

Pemeliharaan *wire rope* merupakan aspek fundamental dalam menjamin keselamatan dan keandalan operasi *docking* dan *undocking*. Mengingat *wire rope* bekerja dalam kondisi pembebanan tinggi dan lingkungan agresif, degradasi material tidak dapat dihindari sehingga diperlukan sistem pemeliharaan yang terstruktur (Peng et al., 2025). Tanpa pemeliharaan yang baik, risiko kegagalan akan meningkat secara signifikan.

Salah satu pendekatan utama dalam pemeliharaan adalah inspeksi berkala untuk mendeteksi kerusakan seperti kawat putus, korosi, dan deformasi. Inspeksi ini dapat dilakukan secara visual maupun menggunakan metode non-destruktif seperti *magnetic testing* untuk mendeteksi kerusakan *internal* (Peng et al., 2025). Pendekatan ini penting karena banyak kegagalan *wire rope* dimulai dari kerusakan yang tidak terlihat.

Analisis kegagalan berbasis *fatigue* menjadi salah satu metode penting dalam memahami perilaku kerusakan *wire rope*. Studi menunjukkan bahwa *fatigue* merupakan penyebab utama kegagalan akibat pembebanan siklik dalam jangka panjang (Cebada-Relea et al., 2025). Oleh karena itu, pemodelan umur lelah (*fatigue life prediction*) menjadi bagian penting dalam perencanaan pemeliharaan.

Metode *Failure mode and Effects Analysis* (FMEA) juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi potensi kegagalan secara sistematis. Dengan pendekatan ini, setiap mode kegagalan dianalisis berdasarkan tingkat keparahan, frekuensi kejadian, dan kemampuan deteksi, sehingga dapat ditentukan prioritas penanganan.

Dengan demikian, kombinasi antara pemeliharaan rutin dan analisis kegagalan yang berbasis metode ilmiah menjadi kunci dalam meningkatkan keandalan *wire rope*. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan keselamatan operasi, tetapi juga memperpanjang umur pakai dan mengoptimalkan biaya perawatan.

2.2 Mode Kegagalan *Wire rope*

Wire rope merupakan komponen kritis yang bekerja di bawah kombinasi pembebanan mekanis, lingkungan, serta kondisi operasional yang kompleks. Kegagalan pada *wire rope* umumnya tidak disebabkan oleh satu faktor tunggal, melainkan hasil interaksi berbagai mekanisme degradasi seperti *fatigue*, abrasi, korosi, serta *overstress*. Oleh karena itu, pemahaman terhadap mode kegagalan menjadi penting sebagai dasar dalam analisis risiko dan pemeliharaan.

Salah satu mode kegagalan utama pada *wire rope* adalah *fatigue failure*, yang terjadi akibat pembebanan siklik selama operasi. Proses *fatigue* diawali dengan inisiasi retak pada titik lemah seperti cacat material atau area yang mengalami konsentrasi tegangan, kemudian berkembang menjadi retakan yang lebih besar hingga menyebabkan putusnya kawat. Pada

wire rope, *fatigue* sering terjadi akibat pembengkokan berulang saat melewati *sheave* serta variasi beban tarik selama operasi (Vukelic & Vizentin, 2017). Retakan *fatigue* biasanya ditandai dengan pola striasi pada permukaan patahan, yang menunjukkan proses kegagalan bertahap akibat siklus beban.

Selain *fatigue*, abrasi (*wear*) merupakan mode kegagalan yang sering ditemukan pada *wire rope*, terutama pada area kontak dengan *sheave* atau *drum*. Abrasi terjadi akibat gesekan antara *wire rope* dengan komponen lain, yang menyebabkan hilangnya material pada permukaan kawat. Dalam kasus nyata, abrasi dapat memicu terbentuknya titik inisiasi retak *fatigue*, sehingga mempercepat kegagalan secara keseluruhan. Hasil observasi menunjukkan adanya bekas gesekan dan kawat putus pada permukaan *rope* akibat interaksi dengan *guide* atau *pulley* (Palit et al., 2019).

Mode kegagalan lainnya adalah *corrosion-fatigue*, yaitu kombinasi antara korosi akibat lingkungan dan pembebanan siklik. Lingkungan laut yang mengandung klorida mempercepat degradasi material, sementara beban siklik mempercepat propagasi retak. Interaksi kedua mekanisme ini menyebabkan penurunan kekuatan material secara signifikan serta memperpendek umur layan *wire rope*. Faktor seperti kelembaban, temperatur, serta paparan lingkungan agresif menjadi faktor yang mempercepat proses ini (Vukelic & Vizentin, 2017).

Overstress failure juga merupakan salah satu mode kegagalan penting, yang terjadi ketika tegangan kerja melebihi kekuatan material. Hasil analisis menunjukkan bahwa tegangan von Mises pada *wire rope* dapat melampaui batas luluh material, yang menyebabkan deformasi plastis dan kegagalan struktural. Kondisi ini umumnya terjadi akibat ketidaksesuaian antara kapasitas desain *wire rope* dengan beban operasional yang diterima (Ariani & Pulungan, 2025). *Overstress* juga sering dikaitkan dengan faktor desain yang tidak optimal atau kesalahan dalam pemilihan spesifikasi *wire rope*.

Selain itu, kegagalan juga dapat dipicu oleh konsentrasi tegangan (*stress concentration*) yang terjadi pada area tertentu, seperti titik kontak antara *wire rope* dan *sheave*. Area ini mengalami kombinasi pembebanan tarik dan bending, sehingga menjadi lokasi paling rentan terhadap inisiasi kerusakan. Analisis numerik menunjukkan bahwa tegangan maksimum sering terjadi pada bagian strand luar yang bersentuhan langsung dengan komponen pendukung (Ariani & Pulungan, 2025).

Faktor operasional juga berperan penting dalam kegagalan *wire rope*, seperti kondisi *off-centering*, *misalignment*, serta praktik operasi yang tidak sesuai. Ketidaksejajaran posisi *rope* terhadap *sheave* dapat menyebabkan gesekan tambahan dan distribusi beban yang tidak merata, sehingga mempercepat keausan dan kegagalan. Dalam beberapa kasus, *wire rope* bahkan dapat keluar dari jalur *sheave* dan mengalami kerusakan serius akibat kontak langsung dengan struktur pendukung (Palit et al., 2019).

Dengan demikian, *mode* kegagalan *wire rope* merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor mekanis, lingkungan, desain, dan operasional. Pemahaman terhadap berbagai mode kegagalan ini menjadi dasar penting dalam penerapan metode analisis seperti FMEA, karena setiap mode kegagalan memiliki karakteristik, penyebab, dan dampak yang berbeda. Identifikasi yang tepat terhadap mode kegagalan akan membantu dalam menentukan prioritas risiko serta strategi pemeliharaan yang lebih efektif.

2.3 Proses Docking dan Undocking Kapal

Proses *docking* dan *undocking* merupakan tahapan operasional yang dilakukan untuk memindahkan kapal dari perairan ke fasilitas perawatan kering, maupun sebaliknya. Secara umum, *docking* adalah proses menempatkan kapal ke dalam fasilitas dok agar bagian lambung yang berada di bawah permukaan air dapat diakses untuk keperluan inspeksi, perbaikan, atau perawatan. Sementara itu, *undocking* merupakan proses pengembalian kapal

ke perairan setelah seluruh pekerjaan selesai dilaksanakan. Kedua proses ini memerlukan koordinasi yang cermat antar operator serta kondisi peralatan yang prima agar dapat berjalan dengan aman dan efisien (Amutenya & Malakia, 2024; Kewalramani, 2023).

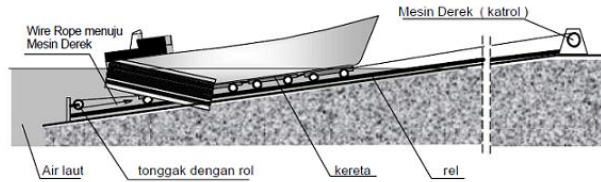
Salah satu metode *docking* yang umum digunakan, khususnya di galangan kapal dengan keterbatasan fasilitas, adalah metode *slipway* berbantuan *airbag* dan *wire rope*. Pada metode ini, kapal tidak dimasukkan ke dalam dok tertutup, melainkan ditarik naik ke darat melalui landasan miring (*slipway*) menggunakan sistem *winch* yang dihubungkan dengan *wire rope*. *Airbag* digunakan sebagai alas yang memungkinkan kapal meluncur di atas permukaan *slipway* dengan gesekan yang lebih rendah, sehingga proses penarikan dapat dilakukan secara lebih terkendali dan efisien. *Wire rope* berperan sebagai elemen utama transmisi gaya tarik dari *winch* menuju badan kapal, sehingga integritas dan keandalan komponen ini menjadi faktor penentu keselamatan seluruh proses (Moriya et al., 2008; SUCI, 2025).

Selain metode *slipway*, terdapat beberapa metode *docking* lain yang juga lazim digunakan di berbagai galangan kapal, di antaranya *graving dock*, *floating dry dock*, dan *syncrolift*. *Graving dock* memanfaatkan struktur *gate* untuk menahan tekanan air laut, sementara *floating dry dock* mengandalkan sistem *ballasting* dan katup otomatis untuk mengatur proses penenggelaman dan pengapungan dok. Adapun *syncrolift* menggunakan platform yang diangkat secara sinkron melalui sistem *hoist*, menjadikannya pilihan yang lebih efisien untuk kapal berukuran sedang. Pemilihan metode yang tepat sangat bergantung pada ukuran kapal, ketersediaan fasilitas galangan, dan waktu yang tersedia (Amutenya & Malakia, 2024; Najeb et al., 2023).

Komponen pengendalian aliran air memegang peranan krusial dalam menjamin kelancaran dan keamanan proses *docking* maupun *undocking*. Pada *graving dock*, struktur *gate* harus mampu menahan tekanan hidrostatis yang besar, sedangkan pada *floating dry dock*, katup otomatis berfungsi mengatur laju *ballasting* dan *de-ballasting* agar dok tetap berada dalam kondisi seimbang. Kegagalan pada komponen-komponen tersebut berpotensi menyebabkan ketidakseimbangan dok yang dapat membahayakan keselamatan kapal maupun personel yang bekerja di dalamnya. Oleh karena itu, perawatan berkala terhadap *gate* dan katup harus diperlakukan sebagai bagian yang tidak terpisahkan dari manajemen operasional galangan (Kewalramani, 2023; SUCI, 2025).

Galangan kapal di Indonesia menghadapi tantangan tersendiri dalam pelaksanaan proses *docking* dan *undocking*, antara lain keterbatasan fasilitas, kondisi cuaca tropis yang dinamis, serta risiko kecelakaan yang dipicu oleh kelalaian operator. Berbagai kasus di lapangan menunjukkan bahwa kejadian *rework* pada tahap *erection* dan *outfitting*, serta insiden kecelakaan saat *undocking*, sering kali bersumber dari faktor manusia maupun kondisi peralatan yang tidak optimal. Risiko tersebut semakin meningkat apabila *wire rope* yang digunakan pada sistem *mooring winch* tidak terpelihara dengan baik. Kondisi ini menegaskan bahwa analisis risiko yang menyeluruh terhadap proses *docking* dan *undocking* merupakan kebutuhan yang mendesak (Amutenya & Malakia, 2024; Winarno et al., 2024).

Pemahaman yang komprehensif terhadap seluruh tahapan *docking* dan *undocking* menjadi hal yang sangat penting bagi setiap pemangku kepentingan di industri galangan kapal. Proses-proses tersebut tidak hanya berdampak langsung pada keselamatan dan efisiensi operasional, tetapi juga menentukan tingkat keandalan seluruh komponen yang terlibat, termasuk *wire rope* sebagai elemen utama sistem penarikan kapal. Kegagalan pada salah satu tahapan maupun komponen pendukungnya dapat menimbulkan konsekuensi serius, mulai dari kerugian material hingga risiko kecelakaan kerja yang membahayakan keselamatan personel. Oleh karena itu, pengelolaan dan perawatan seluruh peralatan yang berperan dalam proses *docking* dan *undocking* harus dilakukan secara sistematis dan terencana dengan baik (Amutenya & Malakia, 2024; Winarno et al., 2024).



Slipway Dock

Gambar 2.6 *Slipway dock*
 Sumber: Ilmu Kapal dan Logistik, 2022

2.4 Jenis-Jenis Pemeliharaan (*Maintenance Strategy*)

Pemeliharaan (*maintenance*) merupakan serangkaian aktivitas teknis, administratif, dan manajerial yang dilakukan untuk mempertahankan atau mengembalikan suatu sistem agar tetap berfungsi sesuai dengan tujuan operasionalnya. Dalam konteks industri, pemilihan strategi pemeliharaan menjadi aspek krusial karena berpengaruh langsung terhadap keandalan peralatan, biaya operasional, serta kontinuitas proses produksi (Akhtar et al., 2024).

Seiring perkembangan teknologi dan kebutuhan industri, strategi pemeliharaan mengalami evolusi dari pendekatan reaktif menuju pendekatan yang lebih proaktif dan berbasis data. Awalnya, industri banyak menggunakan pendekatan *reactive maintenance*, yaitu perbaikan dilakukan setelah terjadi kerusakan. Namun, pendekatan ini dinilai tidak efisien karena menyebabkan *downtime* yang tinggi serta biaya perbaikan yang tidak terkontrol (Akhtar et al., 2024).

Seiring waktu, strategi pemeliharaan berkembang menjadi lebih sistematis, seperti *preventive maintenance* dan *predictive maintenance*, yang bertujuan untuk mencegah kegagalan sebelum terjadi. Bahkan pada modern (Industry 4.0), pemeliharaan telah mengarah pada penggunaan teknologi cerdas berbasis data seperti IoT dan *machine learning* untuk memprediksi kegagalan secara lebih akurat (Jasiulewicz-Kaczmarek & Gola, 2019).

Secara umum, strategi pemeliharaan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kategori utama, yaitu:

- *Reactive / Corrective Maintenance*
- *Preventive Maintenance*
- *Predictive Maintenance*
- *Condition-Based Maintenance*
- *Reliability-Centered Maintenance (RCM)*
- *RiskBased Maintenance (RBM)*

Setiap strategi memiliki karakteristik, keunggulan, serta keterbatasan masing-masing. Oleh karena itu, pemilihan strategi pemeliharaan harus mempertimbangkan faktor seperti tingkat kritis peralatan, biaya pemeliharaan, kondisi operasional, serta kebutuhan produksi (Adaramola et al., 2024).

2.4.1 *Preventive Maintenance (Pemeliharaan Pencegahan)*

Preventive maintenance merupakan strategi pemeliharaan yang dilakukan secara terencana dan berkala untuk mencegah terjadinya kegagalan sebelum kerusakan muncul. Pendekatan ini didasarkan pada asumsi bahwa suatu komponen atau peralatan memiliki pola penurunan kinerja atau umur pakai tertentu, sehingga

tindakan perawatan dapat dijadwalkan sebelumnya berdasarkan interval waktu, jam operasi, atau frekuensi penggunaan (Adaramola et al., 2024; Akhtar et al., 2024).

Tujuan utama *preventive maintenance* adalah mengurangi kemungkinan kegagalan tak terduga dengan cara menjaga kondisi aset tetap berada dalam batas operasional yang aman. Bentuk kegiatannya dapat berupa inspeksi rutin, pelumasan, pengencangan, pembersihan, penyetelan, penggantian komponen aus, dan pemeriksaan periodik. Dibanding *corrective maintenance*, pendekatan ini jauh lebih proaktif karena kerusakan diupayakan dicegah sebelum benar-benar mengganggu operasi (Adaramola et al., 2024).

Salah satu kelebihan utama *preventive maintenance* adalah kemampuannya dalam meningkatkan reliabilitas dan *availability* aset. Dengan melakukan perawatan secara terjadwal, organisasi dapat menurunkan peluang terjadinya kerusakan mendadak, memperpanjang umur pakai komponen, serta membuat perencanaan operasional menjadi lebih stabil. Selain itu, *downtime* yang terjadi cenderung bersifat terencana, sehingga dampaknya terhadap operasi lebih mudah dikendalikan (Jasiulewicz-Kaczmarek & Gola, 2019). Literatur juga menekankan bahwa *preventive maintenance* berkontribusi terhadap peningkatan keselamatan, penurunan kebutuhan lembur perbaikan, serta standarisasi prosedur kerja.

Meski demikian, *preventive maintenance* juga memiliki keterbatasan. Kelemahan utamanya adalah kemungkinan terjadinya *over-maintenance*, yaitu situasi ketika komponen dirawat atau diganti terlalu cepat padahal kondisinya masih *layak* pakai. Jika interval perawatan ditentukan terlalu konservatif, maka sumber daya akan terpakai lebih banyak dari yang diperlukan, sehingga efisiensi biaya menurun. Dengan demikian, keberhasilan *preventive maintenance* sangat bergantung pada ketepatan penentuan interval inspeksi dan interval penggantian (Adaramola et al., 2024; Akhtar et al., 2024).

Dalam praktik nyata, *preventive maintenance* banyak digunakan pada aset yang memiliki pola kerusakan yang relatif dapat diprediksi atau pada aset kritis yang keagalannya tidak dapat ditoleransi. Strategi ini sangat cocok ketika organisasi belum memiliki sistem monitoring kondisi yang canggih, tetapi tetap memerlukan pendekatan yang lebih aman daripada sekadar menunggu kerusakan. Karena itulah *preventive maintenance* menjadi salah satu strategi yang paling luas diterapkan di berbagai sektor industri (Jasiulewicz-Kaczmarek & Gola, 2019).

Untuk *wire rope*, *preventive maintenance* sangat relevan karena degradasi *wire rope* umumnya berlangsung secara bertahap. Tanda-tanda seperti putusnya kawat luar, abrasi, korosi permukaan, deformasi lokal, penurunan diameter, dan kerusakan akibat kontak dengan *sheave* dapat dikenali melalui inspeksi berkala. Pada file kasus *wire rope crane*, ditunjukkan bahwa abrasi, *off-centering*, dan kerusakan pada area kontak berkontribusi terhadap percepatan *fatigue failure*, sehingga inspeksi dan penggantian berkala sangat diperlukan untuk mencegah kegagalan dini. Hal ini menunjukkan bahwa *preventive maintenance* memiliki peran penting dalam mendeteksi gejala awal kerusakan sebelum mencapai tahap kritis.

Dalam konteks *docking* dan *undocking* kapal, *preventive maintenance* dapat berupa pemeriksaan visual berkala, pengecekan kondisi pelumasan, pemeriksaan diameter *rope*, pengamatan jumlah *broken wires*, serta evaluasi kondisi *drum* dan *sheave* yang berinteraksi langsung dengan *rope*. Pendekatan ini lebih aman daripada *corrective maintenance*, karena *wire rope* yang menunjukkan tanda-tanda degradasi dapat diganti sebelum putus atau mengalami kegagalan serius.

Dengan demikian, *preventive maintenance* dapat dipandang sebagai strategi dasar yang tepat untuk *wire rope*, terutama bila tujuan pemeliharaan adalah mengurangi kegagalan mendadak dan menjaga keselamatan operasi. Namun, agar

lebih efisien, *preventive maintenance* idealnya dikombinasikan dengan evaluasi kondisi aktual agar keputusan pemeliharaan tidak hanya berbasis jadwal, tetapi juga mempertimbangkan tingkat degradasi yang sesungguhnya.



Gambar 2.7 *Preventive Maintenance*
Sumber: GetClue, 2023

2.4.2 *Corrective Maintenance (Pemeliharaan Korektif)*

Corrective maintenance merupakan strategi pemeliharaan yang dilakukan setelah suatu komponen atau peralatan mengalami kerusakan atau gagal menjalankan fungsinya. Pendekatan ini sering juga disebut sebagai *reactive maintenance*, karena tindakan pemeliharaan baru dilakukan sebagai respons terhadap kejadian kegagalan. Dalam bentuk yang paling sederhana, *corrective maintenance* berarti memperbaiki, mengganti, atau merekondisi suatu komponen ketika kerusakan telah terjadi dan mengganggu operasi (Adaramola et al., 2024; Akhtar et al., 2024).

Secara historis, *corrective maintenance* adalah bentuk pemeliharaan yang paling awal dan paling mudah dipahami. Banyak organisasi pada masa lalu mengandalkan pendekatan ini karena tidak memerlukan sistem perencanaan yang kompleks, jadwal inspeksi yang terstruktur, maupun teknologi monitoring yang canggih. Dari sisi implementasi, *corrective maintenance* memang terlihat sederhana dan ekonomis dalam jangka pendek, sebab biaya hanya dikeluarkan ketika kerusakan benar-benar terjadi (Akhtar et al., 2024). Namun, kesederhanaan ini justru menjadi kelemahan utamanya ketika diterapkan pada aset yang bersifat kritis.

Kelemahan paling mendasar dari *corrective maintenance* adalah sifatnya yang tidak terencana. Karena kerusakan terjadi secara tiba-tiba, maka waktu perbaikan, kebutuhan suku cadang, tenaga kerja, dan durasi penghentian operasi sering kali tidak dapat diprediksi. Kondisi ini menyebabkan *downtime* tidak terencana yang dapat menurunkan efisiensi operasional dan meningkatkan total biaya kepemilikan aset. Selain itu, kegagalan mendadak pada suatu komponen sering kali memicu kerusakan lanjutan pada bagian lain, sehingga biaya perbaikan dapat jauh lebih besar dibandingkan jika kerusakan dicegah sejak dini (Adaramola et al., 2024).

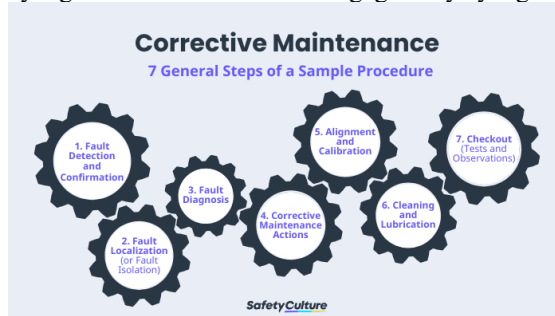
Dalam praktik industri, *corrective maintenance* masih dapat diterapkan pada komponen yang tidak kritis, komponen berbiaya rendah, atau komponen yang konsekuensi kegagalannya tidak signifikan terhadap keselamatan dan kontinuitas operasi. Namun, untuk sistem yang memiliki tingkat risiko tinggi, pendekatan ini kurang tepat karena kerugian yang ditimbulkan akibat kegagalan bisa jauh lebih besar daripada penghematan biaya pemeliharaan. Literatur juga menjelaskan bahwa strategi reaktif cenderung menimbulkan biaya keseluruhan yang lebih tinggi akibat gangguan operasi, keterlambatan produksi, dan kebutuhan perbaikan darurat (Akhtar et al., 2024).

Jika dikaitkan dengan *wire rope*, *corrective maintenance* memiliki keterbatasan yang sangat besar. *Wire rope* bukanlah komponen yang aman untuk dibiarkan sampai

gagal terlebih dahulu, karena kegagalannya dapat terjadi secara mendadak dan menyebabkan konsekuensi serius, seperti terlepasnya beban, gangguan operasi *docking*, kerusakan kapal atau fasilitas, bahkan kecelakaan kerja. Pada *wire rope*, kegagalan akibat *fatigue*, abrasi, korosi, atau *overstress* dapat berkembang secara bertahap dan sering kali tidak sepenuhnya terlihat oleh pengamatan biasa (Palit et al., 2019; Vukelic & Vizentin, 2017). Oleh karena itu, menunggu hingga *wire rope* putus atau tidak berfungsi lagi baru kemudian melakukan penggantian merupakan kebijakan yang berisiko tinggi.

Walaupun demikian, *corrective maintenance* tetap memiliki tempat dalam sistem pemeliharaan, terutama sebagai tindakan akhir ketika suatu kerusakan telah teridentifikasi dan memang memerlukan perbaikan langsung. Dalam sistem pemeliharaan modern, *corrective maintenance* tidak dihilangkan sepenuhnya, tetapi ditempatkan sebagai salah satu jenis tindakan yang melengkapi strategi lain yang lebih proaktif. Dengan kata lain, *corrective maintenance* masih diperlukan, tetapi bukan sebagai strategi utama untuk komponen kritis (Adaramola et al., 2024).

Dari sudut pandang akademis, *corrective maintenance* penting untuk dibahas karena menjadi titik pembandingan bagi strategi pemeliharaan lainnya. Melalui pemahaman terhadap kelemahan pendekatan reaktif, dapat dijelaskan mengapa industri modern semakin beralih ke *preventive*, *predictive*, dan *reliability centered maintenance*. Bagi penelitian ini, *corrective maintenance* dapat dipandang sebagai strategi yang paling tidak sesuai untuk *wire rope* pada proses *docking*, karena sifat komponen yang kritis dan konsekuensi kegagalannya yang tinggi.



Gambar 2.8 *Corrective maintenance*
Sumber: SafetyCulture, 2021

2.4.3 *Predictive Maintenance* (Pemeliharaan Prediktif)

Predictive maintenance merupakan strategi pemeliharaan yang bertujuan memperkirakan kapan suatu komponen akan mengalami kegagalan dengan memanfaatkan data kondisi dan data operasional. Berbeda dengan *preventive maintenance* yang bekerja berdasarkan jadwal tetap, *predictive maintenance* menekankan prediksi terhadap waktu kegagalan melalui analisis tren, gejala kerusakan, dan perubahan parameter kondisi (Akhtar et al., 2024; Jasiulewicz-Kaczmarek & Gola, 2019).

Konsep utama *predictive maintenance* adalah bahwa sebagian besar peralatan menunjukkan gejala tertentu sebelum benar-benar gagal. Gejala tersebut dapat berupa perubahan temperatur, getaran, suara, deformasi, keausan, konsumsi energi, atau indikator teknis lainnya. Dengan memantau dan menganalisis perubahan parameter ini, organisasi dapat menentukan waktu perawatan yang lebih tepat, yaitu mendekati saat komponen benar-benar membutuhkan tindakan (Jasiulewicz-Kaczmarek & Gola,

2019). Pendekatan ini membuat pemeliharaan menjadi lebih efisien karena tidak dilakukan terlalu dini, tetapi juga tidak menunggu sampai terjadi kegagalan.

Salah satu keunggulan paling menonjol dari *predictive maintenance* adalah kemampuannya mengurangi biaya total pemeliharaan melalui optimasi waktu intervensi. Karena tindakan dilakukan hanya ketika data menunjukkan adanya kecenderungan penurunan performa, maka penggantian komponen yang masih sehat dapat diminimalkan. Di sisi lain, risiko *downtime* mendadak juga berkurang karena kegagalan diprediksi sebelumnya (Akhtar et al., 2024). Dengan kata lain, *predictive maintenance* berupaya menyeimbangkan aspek keandalan dan efisiensi biaya.

Perkembangan teknologi digital dan Industry 4.0 mendorong *predictive maintenance* menjadi semakin penting. *Maintenance 4.0* memanfaatkan sensor, *Internet of Things*, *big data*, dan analisis berbasis kecerdasan buatan untuk melakukan prediksi kegagalan secara lebih presisi. Dalam file yang kamu upload, dijelaskan bahwa *Maintenance 4.0* memungkinkan perusahaan memaksimalkan umur pakai peralatan, menghindari unplanned *downtime*, meningkatkan keselamatan, serta menghemat biaya melalui penggunaan data kondisi secara *real-time*. Artinya, *predictive maintenance* kini tidak hanya merupakan konsep teoritis, tetapi telah menjadi praktik penting dalam sistem pemeliharaan modern.

Meski sangat menjanjikan, *predictive maintenance* juga memiliki tantangan. Implementasinya memerlukan infrastruktur monitoring, perangkat sensor, sistem akuisisi data, perangkat lunak analitik, dan tenaga kerja yang mampu membaca serta menginterpretasi hasil analisis. Jika data yang tersedia tidak memadai atau model prediksi tidak akurat, keputusan pemeliharaan yang dihasilkan juga dapat menjadi kurang tepat (Akhtar et al., 2024; Jasiulewicz-Kaczmarek & Gola, 2019). Karena itu, *predictive maintenance* sering kali membutuhkan investasi awal yang lebih besar dibanding *preventive maintenance*.

Pada *wire rope*, *predictive maintenance* dapat dikembangkan melalui pengamatan tren kerusakan seperti penurunan diameter, pertumbuhan jumlah *broken wires*, tingkat deformasi, perubahan respons beban, maupun sinyal-sinyal lain yang berkaitan dengan *fatigue damage* dan *stress concentration*. Dalam penelitian *wire rope marine application*, analisis numerik menunjukkan bahwa kerusakan progresif pada penampang *wire rope* meningkatkan tegangan secara signifikan dan menurunkan sisa umur *layar rope*. Temuan ini mendukung gagasan bahwa monitoring kondisi aktual dapat digunakan untuk memprediksi kapan *rope* mendekati batas aman operasinya.

Untuk aplikasi *docking kapal*, *predictive maintenance* memiliki potensi besar karena *wire rope* bekerja pada lingkungan berisiko tinggi. Jika kondisi *rope* dapat dipantau secara sistematis, maka penggantian dapat dilakukan berdasarkan prediksi sisa umur pakai, bukan sekadar interval waktu tetap. Pendekatan ini dapat meningkatkan efisiensi tanpa mengorbankan keselamatan.

Dengan demikian, *predictive maintenance* merupakan strategi yang lebih maju dibanding *preventive maintenance* karena menambahkan unsur prediksi berbasis data. Pada aset kritis seperti *wire rope*, *predictive maintenance* sangat relevan untuk mendukung keputusan pemeliharaan yang lebih akurat, terutama bila dikombinasikan dengan analisis *fatigue*, *remaining life*, dan evaluasi risiko.



Gambar 2.9 Predictive maintenance
Sumber: Collidu, n.d.

2.4.4 Condition-Based Maintenance (CBM)

Condition based maintenance (CBM) adalah strategi pemeliharaan yang mendasarkan keputusan tindakan perawatan pada kondisi aktual peralatan, bukan semata-mata pada jadwal waktu atau jam operasi. Dalam pendekatan ini, aset dipantau melalui inspeksi atau sistem monitoring untuk mengetahui apakah kondisinya masih berada dalam batas yang dapat diterima atau sudah menunjukkan gejala penurunan performa (Adaramola et al., 2024).

CBM pada dasarnya lahir dari kebutuhan untuk mengatasi kelemahan *preventive maintenance* yang sering menimbulkan *over-maintenance*. Jika *preventive maintenance* mengasumsikan bahwa setiap komponen harus dirawat pada interval tertentu, maka CBM mencoba melihat apakah komponen tersebut benar-benar membutuhkan tindakan pada saat itu. Dengan demikian, pemeliharaan menjadi lebih selektif dan berbasis bukti kondisi nyata (Akhtar et al., 2024).

Keunggulan utama CBM adalah efisiensi. Karena tindakan hanya dilakukan ketika kondisi menunjukkan adanya indikasi degradasi, maka penggunaan suku cadang, waktu kerja, dan biaya perawatan dapat dioptimalkan. Selain itu, CBM juga menurunkan risiko kegagalan mendadak karena kondisi aset dipantau secara kontinu atau periodik dengan fokus pada indikator yang relevan (Adaramola et al., 2024). Pada aset yang bersifat kritis, strategi ini memberikan keseimbangan yang baik antara keselamatan dan efisiensi biaya.

Namun, CBM tidak lepas dari keterbatasan. Keberhasilannya sangat bergantung pada kemampuan sistem inspeksi atau monitoring dalam mendeteksi perubahan kondisi secara akurat. Jika indikator kondisi yang dipilih tidak sensitif terhadap mekanisme kerusakan yang dominan, maka tanda-tanda degradasi dapat terlewat. Selain itu, interpretasi data juga memerlukan keahlian tertentu agar keputusan pemeliharaan tidak keliru (Akhtar et al., 2024).

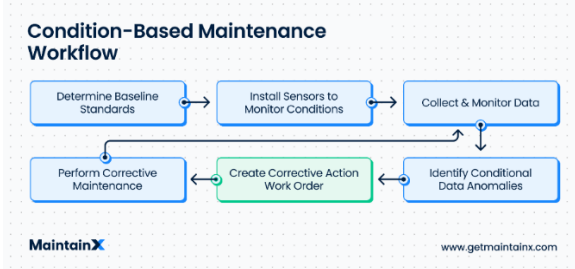
Dalam konteks *wire rope*, CBM sangat sesuai karena *wire rope* menunjukkan berbagai gejala kerusakan yang dapat diamati, seperti *broken wires*, korosi, abrasi, deformasi, perubahan diameter, dan kerusakan lokal akibat kontak dengan *sheave* atau *drum*. Pada studi *wire rope* yang mengalami *premature failure*, ditemukan bahwa abrasi pada area *rope* dan *guard* menandakan adanya *off-centering* yang akhirnya mempercepat *fatigue failure*. Kondisi seperti ini sebenarnya dapat menjadi indikator *condition based maintenance* jika inspeksi dilakukan dengan baik dan tindak lanjutnya tepat.

Selain inspeksi visual, CBM pada *wire rope* juga dapat melibatkan pengukuran yang lebih kuantitatif, misalnya penurunan penampang efektif, evaluasi distribusi tegangan, atau teknik non-destruktif untuk mendeteksi kerusakan *internal*. Dalam lingkungan maritim dan galangan, CBM penting karena kerusakan *wire rope* tidak

hanya dipengaruhi oleh pembebanan mekanis, tetapi juga oleh kondisi lingkungan seperti kelembaban dan korosi. Oleh sebab itu, pemeliharaan berbasis kondisi memberikan pendekatan yang lebih realistis dibanding sekadar mengikuti interval rutin.

Untuk operasi *docking* dan *undocking*, CBM dapat dijadikan strategi praktis yang kuat. Setiap *rope* diperiksa sebelum dan sesudah operasi, kondisi kontak pada *sheave* diamati, kerusakan lokal dicatat, dan *rope* yang menunjukkan tanda degradasi signifikan segera dikeluarkan dari *layanan*. Pendekatan ini cocok karena operasi *docking* memiliki konsekuensi keselamatan yang tinggi.

Dengan demikian, CBM dapat dipandang sebagai strategi pemeliharaan yang sangat relevan bagi *wire rope*. Ia memungkinkan keputusan pemeliharaan dilakukan secara lebih rasional berdasarkan kondisi aktual, sekaligus mengurangi risiko kegagalan yang tidak terdeteksi oleh pendekatan berbasis jadwal semata.



Gambar 2.10 Condition based maintenance
 Sumber: MaintainX, 2026

2.4.5 Reliability-Centered Maintenance (RCM)

Reliability centered maintenance (RCM) merupakan pendekatan pemeliharaan yang berfokus pada fungsi sistem, mode kegagalan, penyebab kegagalan, serta konsekuensi yang ditimbulkan oleh kegagalan tersebut. Tujuan utama RCM adalah menentukan kebijakan pemeliharaan yang paling tepat untuk memastikan bahwa suatu sistem tetap mampu menjalankan fungsi yang diharapkan dalam konteks operasionalnya (Adaramola et al., 2024).

Berbeda dengan strategi lain yang cenderung berorientasi langsung pada bentuk tindakan pemeliharaan, RCM memulai analisis dari pertanyaan yang lebih mendasar: apa fungsi komponen, bagaimana komponen dapat gagal, apa penyebabnya, apa akibat kegagalan itu, dan strategi apa yang paling tepat untuk mengelolanya. Karena itu, RCM bersifat sangat sistematis dan analitis. Ia tidak secara otomatis memilih *preventive maintenance* atau *predictive maintenance*, melainkan menentukan strategi terbaik berdasarkan hasil analisis keandalan dan konsekuensi kegagalan (Adaramola et al., 2024).

Salah satu kekuatan utama RCM adalah kemampuannya mengintegrasikan berbagai strategi pemeliharaan dalam satu kerangka logis. Pada komponen tertentu, hasil analisis dapat menunjukkan bahwa *preventive maintenance* adalah pilihan terbaik. Pada komponen lain, CBM atau *predictive maintenance* lebih sesuai. Bahkan pada beberapa komponen non-kritis, *corrective maintenance* bisa saja tetap dipertahankan karena paling ekonomis. Dengan demikian, RCM bukan satu jenis tindakan, melainkan metode untuk memilih tindakan yang paling efektif dan efisien (Adaramola et al., 2024; Jasiulewicz-Kaczmarek & Gola, 2019).

RCM sangat berguna pada sistem yang kompleks dan kritis, karena pendekatan ini mempertimbangkan bukan hanya kemungkinan kerusakan, tetapi juga konsekuensinya terhadap keselamatan, lingkungan, operasi, dan biaya. Dalam sistem

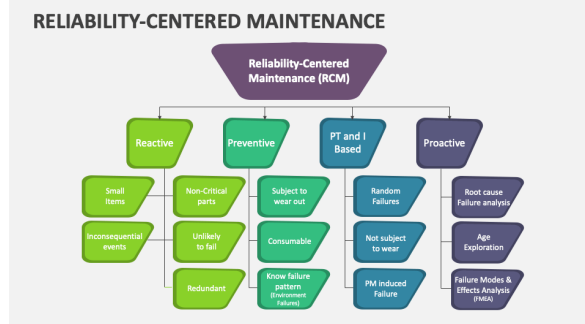
dengan risiko tinggi, kegagalan kecil pada satu komponen dapat berdampak besar terhadap keseluruhan proses. Oleh karena itu, analisis mode kegagalan seperti FMEA sering menjadi bagian penting dalam implementasi RCM (Adaramola et al., 2024).

Untuk *wire rope*, RCM sangat relevan karena komponen ini memiliki fungsi kritis dalam mentransmisikan gaya tarik dan menjaga keselamatan operasi. Kegagalan *wire rope* dapat disebabkan oleh *fatigue*, korosi, abrasi, *overstress*, *misalignment*, atau kesalahan operasional, dan masing-masing mode kegagalan memiliki penyebab serta konsekuensi yang berbeda. Dalam studi FEA dan RCA pada *wire rope crane*, ditemukan bahwa kegagalan *rope* bukan hanya akibat material atau beban, tetapi juga dipengaruhi desain *sheave*, protokol *maintenance*, dan proses pemilihan spesifikasi *rope* yang tidak sesuai. Temuan seperti ini menunjukkan pentingnya pendekatan sistematis seperti RCM.

Melalui RCM, *wire rope* dapat dianalisis dari sisi fungsi utamanya, misalnya sebagai elemen penarik dan pengendali gerak pada proses *docking*. Setelah itu diidentifikasi mode kegagalannya, seperti *broken wires*, korosi, deformasi, dan *fatigue crack*. Kemudian dianalisis konsekuensinya: apakah menyebabkan penghentian operasi, menurunkan keselamatan, atau hanya berdampak kecil. Berdasarkan hasil itu, ditentukan tindakan yang paling tepat, apakah inspeksi berkala, monitoring kondisi, penggantian terjadwal, atau kombinasi dari semuanya.

Dalam konteks penelitian, RCM juga penting karena memberi justifikasi metodologis terhadap pemilihan strategi pemeliharaan. Jika penelitian kamu mengarah pada FMEA, RPN, atau RBM/RCM, maka pembahasan RCM akan menjadi penghubung yang sangat kuat antara teori pemeliharaan dan analisis risiko kegagalan *wire rope*.

Dengan demikian, RCM dapat dipandang sebagai strategi pemeliharaan paling komprehensif di antara jenis-jenis *maintenance* lainnya. Bagi komponen kritis seperti *wire rope* pada proses *docking* dan *undocking*, RCM sangat layak dijadikan pendekatan konseptual karena mampu menghubungkan fungsi, kegagalan, risiko, dan tindakan pemeliharaan dalam satu kerangka analisis yang logis.



Gambar 2.11 Reliability centered maintenance
Sumber: Collidu, n.d.

2.5 Risk Based Maintenance (RBM)

Risk-Based Maintenance (RBM) merupakan pendekatan pemeliharaan yang berfokus pada pengelolaan risiko sebagai dasar dalam pengambilan keputusan perawatan suatu sistem atau aset. Berbeda dengan pendekatan konvensional berbasis waktu (*time-based maintenance*), RBM mengutamakan prioritas pemeliharaan berdasarkan tingkat risiko kegagalan yang dimiliki oleh setiap komponen (Puji et al., 2025). Pendekatan ini menjadi semakin penting dalam sistem industri modern yang kompleks dan memiliki keterbatasan sumber daya.

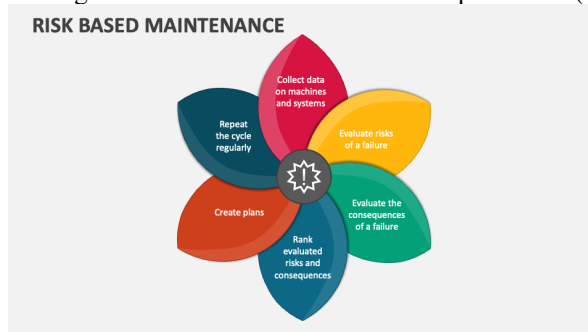
Konsep dasar RBM adalah bahwa tidak semua komponen memiliki tingkat risiko yang sama, sehingga strategi pemeliharaan harus disesuaikan dengan tingkat kritikalitas masing-masing komponen. Risiko dalam RBM umumnya didefinisikan sebagai kombinasi antara probabilitas kegagalan dan konsekuensi yang ditimbulkan (Indra Martadinata et al., 2025). Dengan demikian, komponen dengan probabilitas kegagalan tinggi dan dampak besar akan menjadi prioritas utama dalam pemeliharaan.

Implementasi RBM dimulai dengan proses identifikasi risiko, yang mencakup analisis terhadap potensi kegagalan, penyebab kegagalan, serta dampak yang ditimbulkan terhadap sistem. Setelah itu, dilakukan evaluasi risiko untuk menentukan tingkat prioritas masing-masing komponen. Hasil evaluasi ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam penyusunan strategi pemeliharaan yang optimal (Yaqin et al., 2020).

Salah satu keunggulan utama RBM adalah kemampuannya dalam mengoptimalkan alokasi sumber daya pemeliharaan. Dengan memfokuskan perawatan pada komponen yang memiliki risiko tinggi, organisasi dapat mengurangi biaya operasional tanpa mengorbankan tingkat keandalan sistem. Hal ini sangat penting dalam industri yang memiliki banyak aset dengan tingkat kritikalitas yang berbeda.

Selain itu, RBM juga mendukung penerapan pendekatan pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*) dan pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*). Dengan memanfaatkan data kondisi aktual dari komponen, keputusan pemeliharaan dapat dilakukan secara lebih akurat dan tepat waktu, sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya kegagalan mendadak (Pangestuti et al., 2022).

Dalam konteks *wire rope* pada proses *docking* dan *undocking*, RBM sangat relevan karena *wire rope* merupakan komponen kritis yang bekerja dalam kondisi beban tinggi dan lingkungan yang agresif. Dengan menerapkan RBM, pemeliharaan *wire rope* dapat difokuskan pada kondisi yang paling berisiko, seperti kelelahan material, korosi, dan keausan, sehingga dapat meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional (Cicek et al., 2010).



Gambar 2.12 Riskbased maintenance

Sumber: Collidu, n.d.

2.6 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) merupakan metode analisis risiko yang digunakan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan dalam suatu sistem, menganalisis penyebabnya, serta mengevaluasi dampak yang ditimbulkan terhadap kinerja sistem. Metode ini bersifat sistematis dan banyak digunakan dalam berbagai bidang teknik untuk meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem (Rana Yosaka & Basuki Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, 2022).

Dalam penerapannya, FMEA dilakukan dengan mengidentifikasi setiap kemungkinan mode kegagalan (*failure mode*) yang dapat terjadi pada suatu komponen. Setiap kegagalan kemudian dianalisis berdasarkan penyebab (*cause*) dan dampak (*effect*) yang ditimbulkan

terhadap sistem secara keseluruhan. Pendekatan ini memungkinkan pemahaman yang lebih mendalam terhadap mekanisme kegagalan.

Evaluasi risiko dalam FMEA dilakukan menggunakan tiga parameter utama, yaitu *severity* (tingkat keparahan), *occurrence* (frekuensi kejadian), dan *detection* (kemampuan deteksi). Ketiga parameter ini digunakan untuk menghitung *Risk Priority Number* (RPN), yang merupakan indikator tingkat risiko suatu kegagalan (Puji et al., 2025).

Nilai RPN digunakan untuk menentukan prioritas penanganan terhadap kegagalan yang paling kritis. Kegagalan dengan nilai RPN tertinggi akan menjadi fokus utama dalam tindakan perbaikan dan pencegahan. Pendekatan ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih objektif dan berbasis data.

Selain itu, FMEA juga memiliki keunggulan sebagai metode yang bersifat proaktif, karena memungkinkan identifikasi kegagalan sebelum terjadi. Dengan demikian, tindakan pencegahan dapat dilakukan lebih awal, sehingga dapat mengurangi risiko kegagalan dan meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan (Pamungkas et al., 2023).

Dalam konteks *wire rope*, FMEA dapat digunakan untuk mengidentifikasi berbagai mode kegagalan seperti *fatigue*, korosi, abrasi, dan *overload*. Dengan analisis ini, dapat diketahui kondisi yang paling berisiko sehingga dapat dilakukan tindakan pemeliharaan yang tepat untuk mencegah kegagalan selama proses *docking* dan *undocking*.



Gambar 2.13 *Failure mode and effects analysis*
Sumber: Velosiaims, n.d

2.7 Hubungan Risk Based Maintenance dan FMEA

Risk-Based Maintenance (RBM) dan *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) merupakan dua metode yang saling berkaitan dalam pengelolaan risiko dan pemeliharaan sistem. FMEA berfungsi sebagai alat untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi risiko kegagalan, sedangkan RBM menggunakan hasil analisis tersebut sebagai dasar dalam menentukan strategi pemeliharaan yang optimal (Yaqin et al., 2020).

Dalam praktiknya, FMEA menghasilkan informasi mengenai mode kegagalan, penyebab, dampak, serta nilai risiko yang dinyatakan dalam bentuk RPN. Informasi ini kemudian digunakan dalam RBM untuk menentukan prioritas pemeliharaan berdasarkan tingkat risiko masing-masing komponen. Dengan demikian, FMEA menjadi input utama dalam implementasi RBM.

Integrasi antara FMEA dan RBM memungkinkan pengambilan keputusan pemeliharaan yang lebih berbasis data dan objektif. Dengan mengetahui kegagalan yang paling kritis, organisasi dapat memfokuskan sumber daya pada aspek yang paling membutuhkan perhatian. Hal ini meningkatkan efisiensi pemeliharaan serta mengurangi kemungkinan terjadinya kegagalan mendadak.

Selain itu, kombinasi FMEA dan RBM juga memungkinkan penerapan strategi pemeliharaan yang lebih proaktif. FMEA mengidentifikasi potensi kegagalan sebelum terjadi, sedangkan RBM menentukan tindakan pemeliharaan yang tepat untuk mencegah kegagalan tersebut. Pendekatan ini sangat penting dalam sistem yang memiliki tingkat risiko tinggi terhadap keselamatan.

Dari sisi ekonomi, integrasi kedua metode ini juga memberikan keuntungan dalam bentuk pengurangan biaya operasional. Dengan meminimalkan *downtime* dan kerusakan tidak terduga, organisasi dapat meningkatkan efisiensi produksi dan memperpanjang umur pakai aset (Pangestuti et al., 2022).

Dalam penelitian ini, hubungan antara FMEA dan RBM sangat relevan untuk diterapkan pada *wire rope* dalam proses *docking*. FMEA digunakan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi risiko kegagalan *wire rope*, sedangkan RBM digunakan untuk menentukan strategi pemeliharaan yang optimal berdasarkan hasil analisis tersebut. Dengan demikian, kombinasi kedua metode ini diharapkan dapat meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem secara keseluruhan.

2.8 Risk Priority Number

Risk Priority Number (RPN) merupakan parameter kuantitatif yang digunakan dalam metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) untuk mengevaluasi tingkat risiko suatu mode kegagalan dalam sistem teknik. RPN berfungsi sebagai indikator prioritas yang digunakan untuk menentukan urutan penanganan terhadap potensi kegagalan berdasarkan tingkat risikonya (Puji et al., 2025). Dengan demikian, RPN menjadi alat bantu penting dalam pengambilan keputusan berbasis risiko.

Perhitungan RPN didasarkan pada tiga parameter utama, yaitu *severity* (S), *occurrence* (O), dan *detection* (D). Parameter *severity* menggambarkan tingkat keparahan dampak kegagalan terhadap sistem, *occurrence* menunjukkan kemungkinan terjadinya kegagalan, sedangkan *detection* merepresentasikan kemampuan sistem dalam mendeteksi kegagalan sebelum terjadi dampak yang lebih besar (Cicek et al., 2010). Ketiga parameter ini umumnya dinilai menggunakan skala numerik, sehingga memungkinkan proses evaluasi risiko dilakukan secara kuantitatif.

Nilai RPN diperoleh melalui perkalian ketiga parameter tersebut, yaitu $RPN = S \times O \times D$. Nilai ini memberikan representasi numerik terhadap tingkat risiko suatu kegagalan, di mana semakin tinggi nilai RPN maka semakin tinggi pula tingkat prioritas penanganan yang diperlukan (Indra Martadinata et al., 2025). Pendekatan ini memudahkan dalam membandingkan berbagai mode kegagalan dalam satu sistem.

Dalam praktiknya, RPN digunakan untuk menentukan prioritas tindakan perbaikan dan pencegahan dalam sistem pemeliharaan. mode kegagalan dengan nilai RPN tertinggi akan menjadi fokus utama dalam upaya mitigasi risiko, seperti peningkatan inspeksi, perbaikan desain, atau penggantian komponen (Yaqin et al., 2020). Hal ini memungkinkan alokasi sumber daya pemeliharaan dilakukan secara lebih efektif.

Meskipun RPN banyak digunakan karena kemudahannya, metode ini memiliki beberapa keterbatasan. Salah satunya adalah sifat subjektif dalam penilaian parameter S, O, dan D, yang dapat menyebabkan variasi hasil analisis tergantung pada penilai (Pangestuti et al., 2022). Selain itu, kombinasi nilai yang berbeda dapat menghasilkan nilai RPN yang sama, sehingga dapat menimbulkan ambiguitas dalam interpretasi prioritas risiko.

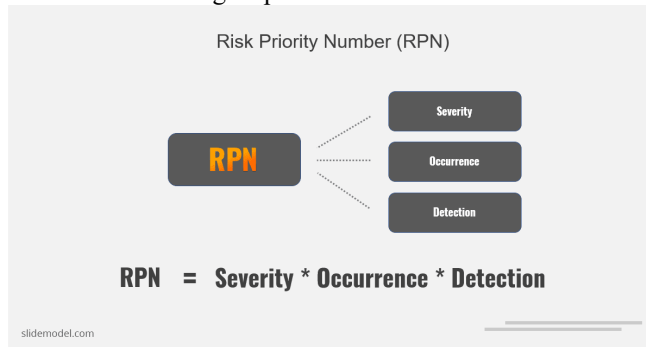
Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, beberapa penelitian mengembangkan metode alternatif seperti *Fuzzy FMEA* dan pendekatan multi-kriteria untuk meningkatkan akurasi penilaian risiko. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi risiko yang lebih representatif terhadap kondisi nyata sistem (Pamungkas et al., 2023). Meskipun demikian, RPN tetap

menjadi metode yang широко digunakan karena kesederhanaan dan kemudahan implementasinya.

Dalam konteks penelitian ini, RPN digunakan untuk menentukan prioritas kegagalan pada *wire rope* dalam proses *docking* dan *undocking*. Dengan mengidentifikasi nilai RPN dari setiap mode kegagalan, dapat ditentukan komponen atau kondisi yang memiliki tingkat risiko tertinggi, sehingga dapat dirancang strategi pemeliharaan yang lebih efektif dan berbasis risiko.

Selain itu, nilai RPN juga dapat digunakan sebagai dasar dalam penerapan *Risk-Based Maintenance* (RBM). Dengan mengintegrasikan hasil analisis FMEA ke dalam strategi pemeliharaan, proses perawatan dapat difokuskan pada komponen dengan tingkat risiko tertinggi, sehingga meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan (Yaqin et al., 2020).

Dengan demikian, *Risk Priority Number* merupakan alat yang penting dalam analisis risiko teknik, khususnya dalam mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan berbasis risiko. Meskipun memiliki keterbatasan, RPN tetap menjadi metode yang efektif dan широко digunakan dalam berbagai aplikasi industri.



Gambar 2.14 *Risk priority number*

Sumber: SlideModel, n.d.

2.9 Penelitian Terdahulu

Berbagai penelitian terdahulu telah menerapkan metode FMEA pada sistem mekanik yang melibatkan *wire rope*, namun mayoritas masih terbatas pada konteks aplikasi di luar lingkungan maritim. Rahman (2025) dan Rahman et al. (2024) masing-masing mengkaji *wire rope* pada pedestal crane dan mobile crane menggunakan FMEA, Analisis Pareto, dan Cause & Effect Analysis, dan keduanya berhasil mengidentifikasi *wire rope* sebagai komponen dengan risiko tertinggi. Akan tetapi, objek kajian kedua penelitian tersebut adalah sistem crane darat yang tidak terpapar kondisi laut, sehingga faktor pembebanan dinamis dan korosi akibat air laut yang menjadi ciri khas operasi *docking* dan *undocking* kapal sama sekali tidak dipertimbangkan.

Amorim (2025) melangkah lebih jauh dengan mengintegrasikan data sensor ke dalam analisis FMEA pada stacker crane untuk keperluan predictive maintenance, namun pendekatannya masih berorientasi pada industri pergudangan dan sangat bergantung pada infrastruktur sensor yang umumnya tidak tersedia di galangan kapal Indonesia. Dari sisi konteks maritim, Gürgen & Ada (2025) telah menggunakan Fuzzy FMEA pada sistem towing tugboat yang secara operasional lebih dekat dengan penelitian ini, namun metode fuzzy yang diterapkan memerlukan kuantifikasi linguistik kompleks dan ketersediaan pakar yang memadai, serta tidak mengintegrasikan hasilnya dengan strategi Risk-Based Maintenance (RBM).

Yildirim et al. (2025, 2026) dan Mohammadi et al. (2021) juga menghasilkan analisis yang komprehensif pada mooring system offshore dan overhead crane, namun perbedaan

karakteristik pembebanan dan lingkungan operasional menjadikan temuan-temuan tersebut tidak dapat langsung diterapkan pada konteks wire rope di galangan kapal. Indra Martadinata et al. (2025) membuktikan efektivitas integrasi FMEA dan RBM, tetapi pada objek sistem pendingin udara yang jauh dari konteks maritim.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini hadir untuk mengisi celah yang belum dijawab oleh studi-studi sebelumnya, yakni penerapan FMEA klasik yang diintegrasikan dengan RBM secara spesifik pada wire rope dalam proses docking dan undocking kapal di galangan Indonesia, dengan mempertimbangkan beban tarik dinamis selama penarikan melalui slipway, tingginya frekuensi operasional, serta pengaruh lingkungan maritim tropis yang belum pernah dikaji secara sistematis.

Halaman ini sengaja dikosongkan