

Terbit online pada laman: <https://ejurnal.umri.ac.id/index.php/JST>

Jurnal Surya Teknika

| ISSN (Print) 2354-6751 | ISSN (Online) 2723-7222 |



Literature Review

Kajian Sistematis Mekanisme Kegagalan Struktural Wire Rope pada Sistem Crane Industri dan Efektivitas Metode Inspeksi Non-Destructive Testing (NDT)

Femas Arraffi, Kulud Nur Jasmine*, Satriya Canda Purnama, Talita Andina Putri, Onny Andre Priyana, Kaleb Priyanto

Universitas Negeri Semarang, Gunungpati, Semarang 50229, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diserahkan : 21 Mei 2026
Diterima : 25 Juni 2026
Diterbitkan : 30 Juni 2026

KATA KUNCI

Wire Rope, Kegagalan Struktural, Fatigue, Fretting Wear, Non-Destructive Testing, Magnetic Flux Leakage, Crane Industry

KORESPONDENSI

*E-mail:

khuludjasmine@students.unnes.ac.id

A B S T R A K

Wire rope merupakan komponen kritis pada sistem crane industri yang rentan terhadap kegagalan struktural akibat beban siklik, fretting wear, korosi, dan faktor operasional. Kajian terdahulu umumnya membahas mekanisme kegagalan atau metode inspeksi secara parsial, sementara integrasi keduanya sekaligus literatur nasional Indonesia masih minim. Penelitian ini menggunakan Systematic Literature Review (SLR) mengikuti protokol PRISMA pada basis data Scopus, ScienceDirect, Google Scholar, dan Portal Garuda (2002–2025). Dari 159 artikel teridentifikasi, 35 artikel memenuhi kriteria inklusi dan dinilai kualitasnya menggunakan rubrik adaptasi CASP/NOS (rata-rata skor 7,2/10). Hasil kajian menunjukkan bahwa fatigue yang dipicu fretting wear merupakan modus kegagalan paling sering dilaporkan (84% studi), dengan tegangan Von Mises pada zona kontak strand-sheave yang konsisten melampaui kekuatan luluh material (≈ 650 MPa). Di antara metode NDT yang dievaluasi, Magnetic Flux Leakage (MFL) menunjukkan performa relatif tertinggi, dengan akurasi klasifikasi hingga 95,3% dan batas deteksi kehilangan penampang logam 1–2% pada kondisi laboratorium, meski nilai ini bersifat heterogen antarstudi dan belum dikonfirmasi melalui meta-analisis formal. Sintesis temuan menghasilkan kerangka konseptual manajemen integritas wire rope berbasis NDT dan condition-based maintenance (CBM) sebagai kontribusi utama penelitian ini. Penelitian lanjutan disarankan untuk memvalidasi korelasi kuantitatif parameter sinyal NDT dengan umur sisa wire rope pada kondisi operasional industri nyata.

A B S T R A C T

Wire rope is a critical component in industrial crane systems, susceptible to structural failure due to cyclic loading, fretting wear, and corrosion. Prior reviews have addressed failure mechanisms or Non-Destructive Testing (NDT) methods in isolation, without integrating both perspectives or incorporating Indonesian national literature. This study systematically analyzes wire rope structural failure mechanisms and comparatively evaluates the effectiveness of various NDT methods through a Systematic Literature Review (SLR) following the PRISMA protocol. Searches across Scopus, ScienceDirect, Google Scholar, and Portal Garuda (2002–2025) identified 159 articles, of which 35 met the inclusion criteria. Literature quality was assessed using an adapted CASP/NOS rubric, yielding a mean score of 7.2/10. Findings indicate that fatigue induced by fretting wear is the most frequently reported failure mode (84% of studies), with Von Mises stress concentrations at strand-sheave contact points consistently exceeding the yield strength of wire steel (≈ 650 MPa). Among NDT methods evaluated, Magnetic Flux Leakage (MFL) demonstrated the highest relative performance, with defect classification accuracy reaching 95.3% and a minimum detectable metallic area loss of 1–2% under laboratory conditions. Synthesis of findings yields a conceptual framework for NDT-

1. PENDAHULUAN

Wire rope merupakan elemen transmisi beban yang paling banyak digunakan pada sistem crane industri, pelabuhan, pertambangan, dan konstruksi. Sebagai komponen kritis dalam rantai operasional pengangkatan, integritas struktural wire rope berdampak langsung terhadap keselamatan kerja dan keandalan sistem produksi secara keseluruhan. Komponen ini tersusun dari ratusan kawat baja yang dipilin membentuk strand dan kemudian disusun mengelilingi inti pusat, sehingga menghasilkan sistem pembebanan yang bersifat paralel dan redundan [1]. Keunggulan konstruksi ini memungkinkan wire rope mendistribusikan beban secara merata di antara kawat-kawat penyusunnya, sehingga setiap kawat berperan menahan gaya tarik selama proses pengangkatan [1]. Berbeda dengan rantai yang susunan elemen linearnya menjadikan putusnya satu mata rantai sebagai penyebab kegagalan total sistem, putusnya satu kawat pada wire rope hanya menimbulkan penurunan kekuatan tarik yang sangat kecil karena masih terdapat ratusan kawat lain yang tetap menahan beban [2]. Sifat redundansi ini, meskipun menguntungkan dari perspektif keandalan, juga berpotensi menyembunyikan akumulasi kerusakan internal yang berkembang secara progresif hingga mencapai kondisi kritis.

Meskipun memiliki tingkat redundansi yang tinggi, wire rope tetap rentan terhadap degradasi yang bersifat progresif dan kumulatif. Selama operasi, wire rope mengalami pembebanan aksial dan lentur berulang ketika melewati sheave dan drum, yang secara bertahap memicu terbentuknya retak mikro pada permukaan kawat [3]. Gesekan mikro yang terjadi antarkawat di dalam strand, yang dikenal sebagai fretting wear, mempercepat inisiasi retak tersebut hingga menyebabkan patah kawat [4]. Korosi, yang umumnya berkembang pada bagian dalam rope yang sulit diinspeksi, berinteraksi secara sinergis dengan mekanisme fatigue sehingga mereduksi luas penampang efektif dan memperpendek umur pakai secara signifikan [5]. Pelumasan yang tidak memadai dan kesalahan operasional turut berperan sebagai faktor akselerator yang dapat menyebabkan wire rope

mengalami kegagalan sebelum mencapai umur layanan yang direncanakan.

Kegagalan wire rope pada sistem crane berpotensi menimbulkan kecelakaan kerja yang serius dan kerugian produksi yang signifikan. Beberapa studi melaporkan kasus putusnya wire rope sling saat pengangkatan beban berat meskipun beban masih dalam batas kapasitas yang diizinkan, akibat kerusakan internal yang tidak terdeteksi sebelumnya [6]. Investigasi terhadap kasus-kasus tersebut secara konsisten menunjukkan bahwa kerusakan material telah berkembang secara progresif jauh sebelum perubahan yang dapat diamati secara visual muncul di permukaan [7]. Temuan ini menggarisbawahi keterbatasan mendasar dari inspeksi visual konvensional: metode tersebut hanya mampu mengidentifikasi kerusakan pada permukaan luar tali dan tidak dapat mendeteksi degradasi internal yang seringkali merupakan penyebab utama kegagalan [8]. Kondisi ini menciptakan kesenjangan kritis antara kondisi aktual wire rope dan penilaian kondisi berdasarkan inspeksi visual semata, yang berpotensi menghasilkan keputusan pemeliharaan yang tidak tepat waktu.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, metode Non-Destructive Testing (NDT) berbasis elektromagnetik khususnya Magnetic Flux Leakage (MFL) telah berkembang menjadi solusi inspeksi yang paling banyak diterapkan pada wire rope industri. Metode ini mampu mendeteksi kawat putus internal dan kehilangan luas penampang logam secara kuantitatif tanpa menghentikan operasi [9]. Perkembangan terkini juga mencakup teknologi berbasis acoustic emission, ultrasonic guided wave, dan computer vision yang masing-masing menawarkan keunggulan spesifik untuk jenis kerusakan tertentu [9],[10],[11].

Kebutuhan akan pemahaman yang komprehensif dan sistematis mengenai mekanisme kegagalan wire rope serta efektivitas metode inspeksinya semakin mendesak seiring meningkatnya intensitas operasi crane di berbagai sektor industri nasional dan global. Analisis terhadap literatur yang ada mengidentifikasi tiga kesenjangan penelitian yang signifikan. Pertama, kajian terdahulu sebagian besar membahas mekanisme kegagalan atau metode NDT secara

terpisah, sehingga belum terdapat sintesis terintegrasi yang menghubungkan kedua aspek tersebut dalam satu kerangka analitik. Kedua, evaluasi komparatif berbasis data kuantitatif terhadap efektivitas berbagai metode NDT pada konteks wire rope crane industri masih terbatas dan belum dilakukan secara sistematis mengikuti protokol review standar. Ketiga, representasi literatur nasional Indonesia yang relevan bagi konteks industri lokal sangat minim dalam publikasi review internasional yang ada [12]. Penelitian ini hadir untuk mengisi kesenjangan tersebut melalui pendekatan systematic literature review yang komprehensif dan metodologis.

Beberapa kajian review terdahulu telah membahas aspek-aspek parsial dari topik ini. Schlanbusch dkk. [13] mereview teknologi condition monitoring wire rope secara umum tanpa fokus pada mekanisme kegagalan. Zhou dkk. [9] mengkaji metode NDT untuk deteksi kerusakan wire rope, namun tidak mengintegrasikannya dengan analisis mekanisme kegagalan struktural. Peng dkk. [12] membahas mekanisme kegagalan wire rope pada kondisi beban berat, tetapi tidak mencakup evaluasi komparatif metode inspeksi secara sistematis. Berbeda dari kajian-kajian tersebut, penelitian ini secara eksplisit mengintegrasikan dua perspektif sekaligus, yakni mekanisme kegagalan struktural dan evaluasi efektivitas komparatif metode NDT, dalam satu kerangka SLR yang terstruktur mengikuti protokol PRISMA. Kontribusi metodologis tambahan dari penelitian ini adalah penerapan rubrik penilaian kualitas literatur (quality assessment) berbasis adaptasi CASP/NOS, yang memungkinkan diferensiasi tingkat kepercayaan evidensi secara lebih transparan dibandingkan review naratif konvensional. Selain itu, kajian ini secara eksplisit menyertakan literatur nasional terindeks Sinta sebagai representasi konteks industri Indonesia, yang belum dilakukan pada review internasional sebelumnya, sehingga menghasilkan perspektif yang lebih relevan bagi pengembangan praktik manajemen integritas wire rope di Indonesia.

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi kesenjangan penelitian yang telah dipaparkan, penelitian ini bertujuan: (1) mengkaji struktur wire rope sebagai sistem redundan dan karakteristik distribusi tegangan selama operasi berdasarkan bukti eksperimental dan simulasi yang tersedia dalam literatur; (2) menganalisis secara sistematis

mekanisme kegagalan struktural dominan berdasarkan studi kasus dari berbagai sektor industri; (3) mengevaluasi dan membandingkan efektivitas berbagai metode inspeksi NDT dalam mendeteksi dan memantau degradasi wire rope menggunakan data kuantitatif dari literatur berkualitas tinggi; dan (4) merumuskan kerangka konseptual strategi pemeliharaan berbasis kondisi yang terukur dan berbasis bukti ilmiah sebagai kontribusi utama penelitian ini bagi pengembangan praktik manajemen integritas wire rope.

2. METODOLOGI

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) mengikuti protokol PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) yang telah diadaptasi untuk konteks riset rekayasa dan material. Pendekatan SLR dipilih dengan pertimbangan bahwa kegagalan wire rope pada sistem crane bersifat multifaktorial, melibatkan aspek mekanik, material, operasional, dan lingkungan secara bersamaan, sehingga sintesis lintas studi memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh dibandingkan penelitian tunggal [14]. Protokol PRISMA memastikan transparansi dan reproduibilitas pada setiap tahap proses seleksi literatur, mulai dari identifikasi awal, skrining judul dan abstrak, evaluasi kelayakan teks penuh, hingga inklusi artikel final. Pendekatan SLR juga memungkinkan identifikasi pola konsisten dan inkonsistensi antar studi secara sistematis, yang tidak dapat dilakukan melalui kajian naratif konvensional. Dalam penelitian ini, sintesis dilakukan pada tingkat naratif yang diperkuat oleh data kuantitatif komparatif (narrative synthesis with quantitative support), mengingat heterogenitas kondisi pengujian antar studi yang tidak memungkinkan pelaksanaan meta-analisis statistik formal.

2.2 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi dan eksklusi ditetapkan sebelum proses penelusuran dilakukan (a priori) untuk meminimalkan bias seleksi. Literatur diinklusi apabila memenuhi seluruh kriteria berikut: pertama, merupakan artikel penelitian atau review peer-reviewed yang terindeks Scopus atau Sinta; kedua, diterbitkan antara tahun 2002 hingga 2025, dengan batas awal dipilih untuk mencakup era modern analisis kegagalan wire rope berbasis komputasi; ketiga,

membahas secara langsung mekanisme kegagalan struktural wire rope dan/atau efektivitas metode NDT pada sistem crane industri atau aplikasi pengangkatan industri; dan keempat, tersedia dalam bahasa Indonesia atau Inggris dengan teks penuh yang dapat diakses. Artikel dieksklusi apabila memenuhi salah satu kriteria berikut: tidak berkaitan langsung dengan wire rope pada sistem crane atau pengangkatan industri (misalnya kabel jembatan atau aplikasi tambang tanpa relevansi metodologis langsung); merupakan publikasi non-peer-reviewed, prosiding konferensi tanpa proses review ketat, laporan teknis, atau tesis tanpa publikasi; merupakan duplikat dari artikel yang telah diidentifikasi melalui basis data lain; memiliki data yang tidak lengkap atau metodologi yang tidak dapat diverifikasi dari teks yang tersedia; atau tidak tersedia dalam bahasa Indonesia atau Inggris. Pemilihan rentang tahun 2002–2025 mencakup perkembangan signifikan dalam teknologi MFL digital dan simulasi FEM yang menjadi fokus kajian ini.

2.3 Sumber Data dan Strategi Penelusuran

Penelusuran dilakukan secara sistematis melalui empat basis data: Scopus (basis data utama untuk literatur internasional terindeks), ScienceDirect (untuk akses teks penuh jurnal Elsevier yang relevan), Google Scholar (untuk cakupan yang lebih luas termasuk artikel grey literature yang memiliki indeksasi Sinta), dan Portal Garuda (basis data nasional untuk literatur terindeks Sinta). Strategi penelusuran menggunakan kombinasi string Boolean terstruktur. Untuk basis data berbahasa Inggris (Scopus dan ScienceDirect), string pencarian utama yang digunakan mencakup: (“wire rope” OR “steel wire rope” OR “wire cable”) AND (“failure analysis” OR “structural failure” OR “fatigue” OR “fretting wear”) AND (“crane” OR “hoist” OR “lifting”); serta (“wire rope” OR “steel wire rope”) AND (“non-destructive testing” OR “NDT” OR “magnetic flux leakage” OR “MFL” OR “acoustic emission” OR “ultrasonic”) AND (“inspection” OR “damage detection”). Untuk Portal Garuda, pencarian menggunakan kata kunci dalam bahasa Indonesia: “analisis kegagalan wire rope”, “kegagalan tali kawat baja”, “inspeksi tali kawat baja”, dan “magnetic flux leakage wire rope”. Seluruh penelusuran dibatasi pada rentang tahun 2002–2025 dan dieksekusi pada bulan Januari–Februari 2025. Backward citation tracking (penelusuran daftar pustaka dari artikel terpilih) dilakukan secara manual

terhadap referensi dari artikel yang memiliki skor quality assessment tinggi ($\geq 8/10$) untuk memastikan kelengkapan cakupan literatur, khususnya pada artikel seminal yang diterbitkan sebelum era indeksasi digital yang komprehensif. Proses ini mengidentifikasi 12 referensi kandidat tambahan, di mana 3 di antaranya akhirnya diinklusi ke dalam korpus final (Verreet [1]; Chaplin [2]; Torkar & Arzenšek [15]) karena memenuhi seluruh kriteria inklusi yang telah ditetapkan a priori. Kesembilan referensi lainnya dieksklusi terutama karena tidak tersedia teks penuh yang dapat diakses ($n=5$) atau topik tidak sesuai setelah evaluasi teks penuh ($n=4$). Ketiga artikel yang diterima melalui jalur ini telah diintegrasikan ke dalam diagram alur PRISMA (Gambar 1) di bawah kategori “artikel tambahan melalui backward citation tracking.”

Gambar 13. Diagram Alur Seleksi Literatur (Protokol PRISMA)



Gambar 1. Diagram alur seleksi literatur mengikuti protokol PRISMA.

Proses seleksi artikel mengikuti alur PRISMA empat tahap sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1. Pada tahap identifikasi, ditemukan total 156 artikel melalui penelusuran basis data (Scopus: 67, ScienceDirect: 38, Google Scholar: 31, Portal Garuda: 20), ditambah 3 artikel yang diterima melalui backward citation tracking, sehingga total artikel yang masuk proses seleksi adalah 159. Dari 156 artikel hasil penelusuran basis data, 22 duplikat dihapus sehingga tersisa 134 artikel unik yang masuk ke tahap skrining. Pada tahap skrining (screening), judul dan abstrak 134 artikel dievaluasi oleh peneliti; sebanyak 45 artikel dieksklusi karena tidak memenuhi kriteria relevansi

topik (tidak membahas wire rope pada crane/sistem pengangkatan industri) atau bukan merupakan artikel peer-reviewed. Tersisa 89 artikel yang masuk ke tahap kelayakan (eligibility), di mana teks penuh dibaca secara menyeluruh. Dari 89 artikel tersebut, 54 artikel dieksklusi dengan alasan: data tidak lengkap atau tidak dapat diverifikasi ($n=21$), topik tidak sesuai setelah pembacaan penuh ($n=19$), metodologi tidak memadai ($n=9$), dan teks penuh tidak dapat diakses ($n=5$). Sebanyak 32 artikel dari penelusuran basis data memenuhi seluruh kriteria inklusi, ditambah 3 artikel dari backward citation tracking (Verreet [1]; Chaplin [2]; Torkar dan Arzenšek [15]), sehingga total 35 artikel digunakan dalam analisis final penelitian ini (tahap inklusi).

2.4 Prosedur Analisis

Setiap artikel yang lolos seleksi PRISMA dibaca secara penuh dan datanya diekstraksi menggunakan formulir ekstraksi data terstruktur yang mencakup: (1) identitas publikasi (penulis, tahun, jurnal, indeksasi); (2) desain dan metode penelitian (eksperimental, simulasi FEM/FEA, studi kasus lapangan, atau review); (3) karakteristik spesimen wire rope yang digunakan (tipe konstruksi, diameter, material); (4) modus kegagalan yang diidentifikasi dan mekanisme yang diusulkan; (5) jenis metode NDT yang dievaluasi beserta parameter performa kuantitatif yang dilaporkan; dan (6) temuan utama serta implikasi praktis. Ekstraksi data dilakukan oleh peneliti utama dan diverifikasi ulang untuk memastikan akurasi. Analisis tematik induktif dilakukan untuk mengidentifikasi pola konsisten, inkonsistensi, dan kontroversi antar studi. Data kuantitatif dari setiap studi (nilai tegangan Von Mises, persentase kerusakan yang terdeteksi, akurasi klasifikasi NDT) dikompilasi dalam tabel komparatif dan dibandingkan secara kontekstual dengan mempertimbangkan perbedaan kondisi pengujian.

2.5 Penilaian Kualitas Literatur (Quality Assessment)

Untuk memastikan objektivitas dan transparansi dalam evaluasi kekuatan evidensi, setiap artikel yang lolos seleksi PRISMA dinilai kualitasnya menggunakan rubrik penilaian yang diadaptasi dari Critical Appraisal Skills Programme (CASP) dan Newcastle-Ottawa Scale (NOS), disesuaikan dengan karakteristik studi rekayasa dan material. Rubrik ini mencakup lima dimensi penilaian: (1) kejelasan tujuan penelitian dan pertanyaan riset; (2) kesesuaian desain

penelitian dengan tujuan; (3) validitas metode pengukuran atau pengujian yang digunakan; (4) kejelasan pelaporan hasil dan data kuantitatif; serta (5) relevansi temuan dengan konteks aplikasi industri crane. Setiap dimensi diberi skor 0–2 (0 = tidak terpenuhi, 1 = terpenuhi sebagian, 2 = terpenuhi penuh), sehingga skor maksimum per artikel adalah 10. Penilaian dilakukan oleh peneliti utama; mengingat penelitian ini merupakan karya tunggal, penilaian oleh reviewer independen kedua tidak dapat dilaksanakan. Kondisi ini merupakan keterbatasan metodologis yang diakui secara eksplisit: tidak terdapat data inter-rater agreement atau Cohen's Kappa yang dapat dilaporkan. Oleh karenanya, skor kualitas yang dihasilkan bersifat indikatif dan harus diinterpretasikan dengan mempertimbangkan potensi bias penilai tunggal, sebagaimana juga dicatat dalam Subbab 3.9.

Hasil penilaian kualitas terhadap 35 artikel menunjukkan distribusi skor sebagai berikut: 18 artikel (51,4%) memperoleh skor tinggi (8–10), mencakup mayoritas studi eksperimental Scopus yang memiliki prosedur pengujian terstandarisasi dan pelaporan data kuantitatif yang lengkap; 14 artikel (40,0%) memperoleh skor sedang (5–7), umumnya berupa studi kasus lapangan dengan keterbatasan dalam generalisasi sampel; dan 3 artikel (8,6%) memperoleh skor rendah (3–4), terutama artikel Sinta dengan pelaporan metodologi yang kurang rinci. Rata-rata skor kualitas keseluruhan adalah 7,2 dari 10, mengindikasikan bahwa korpus literatur yang digunakan memiliki kualitas metodologi yang memadai untuk mendukung sintesis naratif. Studi dengan skor rendah tetap diikutsertakan dalam sintesis namun diberi bobot interpretatif yang lebih rendah dan dikutip secara kontekstual, bukan sebagai sumber data kuantitatif primer.

Tabel 1 di bawah merangkum distribusi skor kualitas berdasarkan jenis penelitian. Studi eksperimental dan analisis FEM/FEA yang diterbitkan di jurnal Scopus Q1–Q2 secara konsisten memperoleh skor lebih tinggi dibandingkan studi kasus dan kajian deskriptif. Temuan ini menginformasikan tingkat kepercayaan yang berbeda terhadap klaim yang disajikan pada bagian Hasil dan Pembahasan: klaim yang bersumber dari studi skor tinggi diperlakukan sebagai evidensi kuat, sedangkan klaim dari studi skor sedang-rendah disajikan sebagai temuan yang memerlukan konfirmasi lebih lanjut.

Tabel 1.

Distribusi Skor Penilaian Kualitas Literatur Berdasarkan Jenis Penelitian

Jenis Penelitian	Jumlah	Rata-rata Skor	Rentang Skor	Tingkat Evidensi
Eksperimental / Metalurgi	17	8,1	6–10	Tinggi
Simulasi FEM/FEA	9	7,6	6–9	Tinggi
Studi Kasus Lapangan	6	6,3	5–8	Sedang
Kajian Komprehensif / Review	3	5,0	3–7	Sedang–Rendah
Keseluruhan (35 artikel)	35	7,2	3–10	Memadai

Sumber: Hasil penilaian kualitas menggunakan rubrik adaptasi CASP/NOS, 2025

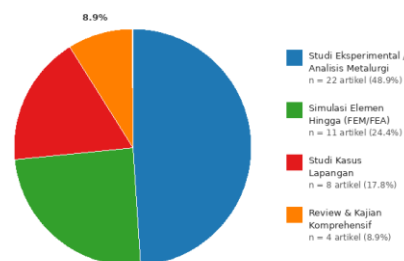
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Literatur yang Dikaji

Dari 35 artikel final yang digunakan, sebanyak 24 artikel (68,6%) bersumber dari jurnal internasional terindeks Scopus, sedangkan 11 artikel (31,4%) berasal dari jurnal nasional terakreditasi Sinta. Proporsi ini mencerminkan keseimbangan yang disengaja antara literatur internasional berkualitas tinggi dan literatur nasional yang relevan dengan konteks industri Indonesia. Ditinjau dari jenis penelitian, 17 artikel (48,6%) merupakan studi eksperimental atau analisis metalurgi, 9 artikel (25,7%) menggunakan simulasi elemen hingga (FEM/FEA), 6 artikel (17,1%) adalah studi kasus lapangan, dan 3 artikel (8,6%) merupakan kajian komprehensif. Dominansi studi eksperimental dan FEM/FEA (74,3% gabungan) mengindikasikan bahwa basis evidensi untuk topik ini relatif kuat dari sisi metodologis, meskipun terdapat keterbatasan dalam hal variabilitas kondisi lapangan. Distribusi tahun publikasi menunjukkan peningkatan yang signifikan sejak tahun 2015, di mana 12 dari 35 artikel (34,3%) diterbitkan dalam periode 2015–2019 dan 12 artikel tambahan (34,3%) diterbitkan pada periode 2020–2025. Tren peningkatan ini berkorelasi dengan perkembangan teknologi sensor MFL digital dan metode machine learning untuk interpretasi sinyal

NDT, serta meningkatnya perhatian industri terhadap program pemeliharaan prediktif pada crane berbeban berat. Analisis komparatif antara literatur Scopus dan Sinta mengungkap beberapa perbedaan kontekstual yang relevan: literatur Sinta (Mawardi dan Yulijaji [16]; Andri dan Nurdin [17]; Ariani dan Pulungan [18]) secara konsisten menyoroti pengaruh ketidaksesuaian geometri sheave sebagai faktor dominan dalam konteks crane industri Indonesia, yang kemungkinan berkaitan dengan keterbatasan standarisasi perawatan komponen pada industri menengah-kecil. Sementara itu, literatur Scopus lebih banyak membahas kondisi korosi ekstrem (lingkungan laut, tambang) yang kurang relevan untuk crane di lingkungan manufaktur dalam ruangan yang lebih umum di Indonesia. Perbedaan kontekstual ini menjadi justifikasi ilmiah bagi pentingnya pengembangan panduan inspeksi NDT wire rope yang diadaptasi untuk kondisi industri dan iklim tropis Indonesia.

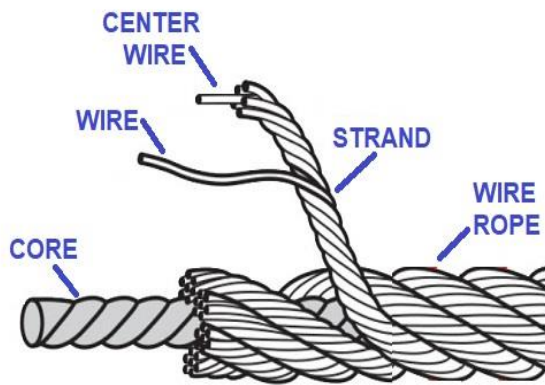
Gambar 9. Distribusi jenis Penelitian dalam 35 Literatur yang Dikaji



Gambar 2. Distribusi jenis penelitian dalam 35 literatur yang dikaji.

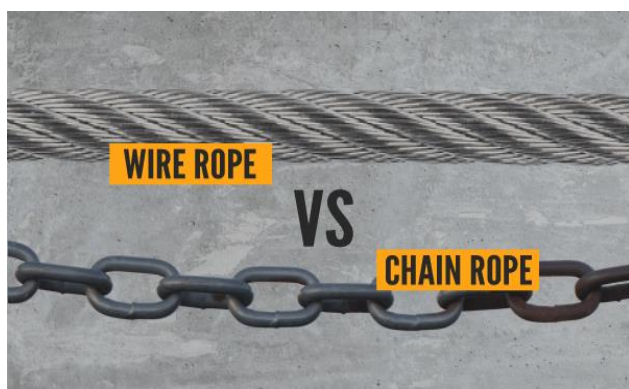
3.2 Struktur Wire Rope sebagai Sistem Redundan

Wire rope merupakan elemen mekanis dengan tingkat redundansi yang tinggi karena tersusun dari sejumlah besar kawat baja yang dipilin menjadi strand dan kemudian disusun mengelilingi inti pusat. Verreet [1] menjelaskan bahwa struktur ini membuat wire rope bekerja sebagai sistem paralel dari elemen penahan beban, di mana setiap kawat berperan menahan gaya tarik selama proses pengangkatan. Berbeda dengan rantai yang memiliki susunan elemen secara linear, kegagalan satu elemen pada rantai dapat menyebabkan kegagalan seluruh sistem [1]. Pada wire rope, putusnya satu kawat hanya menimbulkan penurunan kekuatan tarik yang sangat kecil dan bersifat lokal karena masih terdapat ratusan kawat lain yang tetap menahan beban.



Gambar 3. Struktur dasar wire rope yang terdiri dari kawat (wire), strand, dan inti (core) [1].

Shamsudin dkk. [19] melaporkan bahwa wire rope pada crane offshore tersusun dari beberapa strand yang mengelilingi inti pusat dengan diameter kawat yang bervariasi. Susunan tersebut memungkinkan redistribusi beban apabila sebagian kawat mengalami kerusakan; beban yang sebelumnya ditanggung kawat yang putus akan dialihkan ke kawat lain yang masih utuh, sehingga sistem masih dapat berfungsi tanpa kegagalan langsung. Mawardi dan Yuliaji [16] menganalisis kekuatan tali baja pada tower crane berkapasitas 300 kg dan mengonfirmasi bahwa desain multi-strand memberikan faktor keamanan yang lebih tinggi dibandingkan elemen pengangkat tunggal.



Gambar 4. Perbandingan sistem penahan beban antara chain rope dan wire rope [1].

Konstruksi wire rope tipe 6×19 yang tersusun dari 6 strand dengan masing-masing 19 kawat menghasilkan distribusi tegangan yang lebih tidak merata dibandingkan konstruksi 6×7 , sehingga lebih rentan terhadap inisiasi retak lokal di zona kontak antar kawat [20]. Kemampuan redundansi ini memiliki batas tertentu: jika jumlah kawat yang putus semakin banyak atau terkonsentrasi pada satu bagian rope, kekuatan struktural wire rope akan menurun secara signifikan [21]. Standar keselamatan internasional

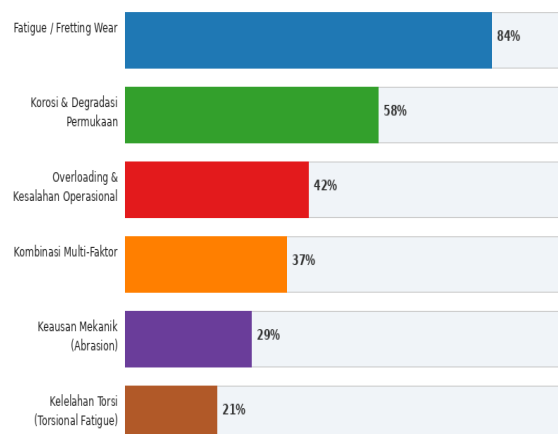
seperti ISO 4309 dan EN 12385 menetapkan batas jumlah kawat putus dalam satu panjang tertentu sebagai kriteria penggantian rope, guna memastikan wire rope yang mengalami degradasi tidak terus digunakan hingga kondisi berbahaya [8].

3.3 Mekanisme Kegagalan Wire Rope

3.3.1 Kelelahan Material (Fatigue)

Kelelahan material (fatigue) merupakan modus kegagalan yang paling sering dilaporkan dalam literatur yang dikaji, teridentifikasi pada 84% studi yang dianalisis (yakni 29 dari 35 artikel; lihat Gambar 5 dan Tabel 2 di bawah). Perlu dicatat bahwa angka ini mencerminkan frekuensi pelaporan dalam korpus literatur yang terseleksi dan bukan prevalensi statistik dari populasi kegagalan wire rope di lapangan secara umum. Selama proses pengangkatan dan penurunan beban, wire rope mengalami siklus tegangan tarik dan lentur berulang ketika melewati sheave dan drum. Kondisi pembebanan siklik ini secara progresif memicu terbentuknya retak mikro pada permukaan kawat, yang kemudian berkembang menjadi patahan kawat setelah jumlah siklus pembebanan tertentu tercapai [3]. Shamsudin dkk. [19] melaporkan bahwa patahan pada kawat wire rope pada crane offshore umumnya diawali oleh retak kelelahan yang berasal dari permukaan luar kawat akibat tegangan torsi siklik selama operasi, temuan yang konsisten dengan studi-studi eksperimental di sektor industri lain.

Gambar 8. Distribusi Modus Kegagalan Wire Rope Berdasarkan 35 Literatur yang Dikaji



Gambar 5. Distribusi modus kegagalan wire rope berdasarkan 35 literatur yang dikaji.

Tabel 2.

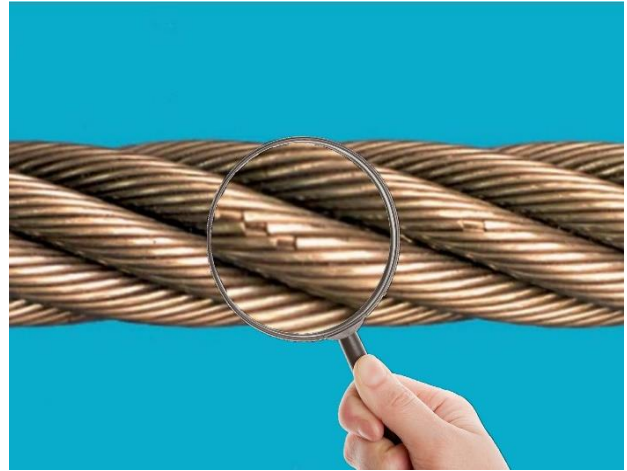
Frekuensi Pelaporan Modus Kegagalan Wire Rope pada 35 Artikel yang Dikaji

N o	Modus Kegagalan	Juml ah Artik el	Persent ase (%)	Contoh Referensi Utama
1	Fatigue / Kelelahan Material	29	84%	[3],[5],[22], [23],[21],[24] ,[15]
2	Fretting Wear	22	63%	[4],[23],[20],[3]
3	Korosi / Corrosion Fatigue	18	51%	[5],[25],[26],[27]
4	Beban Berlebih / Overload	9	26%	[6],[28],[29]
5	Defek Manufak tur	5	14%	[25],[21]

Sumber: Klasifikasi modus kegagalan dari 35 artikel yang dikaji; satu artikel dapat melaporkan lebih dari satu modus kegagalan.

Sintesis berbagai studi eksperimental menunjukkan konsistensi mekanisme kerusakan fatigue pada level mikro. Zhang dkk. [3] membuktikan melalui pengujian eksperimental pada tali hoist bahwa gesekan berulang antarkawat menghasilkan fenomena fretting wear yang berfungsi sebagai pemicu dominan inisiasi retak mikro. Mekanisme ini mencakup tiga tahap sekuensial yang diidentifikasi Zhang dkk. [3]: nucleation dari inti retak yang dipicu oleh pergerakan dislokasi siklik, propagasi retak mikro (microcrack propagation) akibat tegangan siklik yang berulang, dan akhirnya rupture ketika retak mencapai ukuran kritis. Pratowo dan Apriansyah [30] mengonfirmasi melalui pengujian rotary bending pada baja karbon rendah bahwa terdapat hubungan eksponensial negatif antara amplitudo beban siklik dengan umur fatigue material, yang memberikan justifikasi kuantitatif bagi pentingnya pengendalian beban operasional. Hu dkk. [22] memberikan evidensi tambahan bahwa penambahan beban torsi pada kondisi pembebanan lentur yang sudah ada secara signifikan memperburuk

perilaku fatigue dan dapat mempercepat timbulnya kegagalan kawat, suatu kondisi yang relevan pada crane dengan momen puntir tinggi. Konvergensi temuan dari ketiga studi ini, meskipun dilakukan dengan metodologi yang berbeda, memperkuat validitas mekanisme fatigue berbasis fretting sebagai jalur degradasi dominan pada wire rope crane industri.



Gambar 6. Mekanisme kegagalan wire rope akibat pembebanan berulang pada sheave [3].

3.3.2 Keausan Akibat Fretting (Fretting Wear)

Fretting wear merupakan fenomena keausan yang terjadi akibat gesekan amplitudo kecil yang berulang antara kawat di dalam strand maupun antara wire rope dengan komponen eksternal seperti sheave dan drum. Gesekan berulang ini secara progresif mereduksi diameter kawat dan merusak permukaan material, sehingga menciptakan konsentrasi tegangan lokal yang mempercepat proses inisiasi dan propagasi retak [4]. Kontak berulang dengan permukaan pulley menghasilkan tekanan Hertzian lokal yang tinggi

pada kawat luar strand, yang secara konsisten dilaporkan sebagai titik awal kerusakan material dalam studi-studi metalografi [23]. Interaksi antara fretting wear dan mekanisme fatigue bersifat sinergis: wear menghasilkan topografi permukaan yang kasar (roughened surface) yang berfungsi sebagai stress concentrator, sementara pembebanan siklik mempercepat propagasi retak dari geometri permukaan yang telah terdegradasi tersebut.

Pal dkk. [23] menganalisis kegagalan wire rope pada ladle crane di pabrik baja menggunakan kombinasi SEM dan analisis metalografi, dan melaporkan bahwa pelumasan yang tidak memadai menyebabkan fretting wear antarstrand internal yang berujung pada kegagalan strand secara individual. Ketika sebagian

strand gagal, redistribusi beban ke strand yang tersisa mempercepat degradasi secara non-linear karena strand yang berfungsi kini menanggung beban yang melampaui kapasitas desainnya. Temuan ini dikonfirmasi dari perspektif yang berbeda oleh Peng dkk. [4] yang mengkaji pengaruh pelumas berbasis gel terhadap pengurangan fretting wear melalui pengujian tribologi terstruktur. Studi tersebut melaporkan bahwa pelumasan yang tepat dapat memperpanjang umur fatigue wire rope hingga sekitar 40% pada kondisi beban berat tertentu, memberikan evidensi kuantitatif yang mendukung pentingnya program pelumasan preventif yang terstruktur. Perbandingan kedua studi ini mengindikasikan bahwa intervensi pelumasan merupakan salah satu strategi mitigasi dengan efektivitas tertinggi berbasis literatur untuk mengurangi laju fretting wear pada wire rope crane industri.

3.3.3 Korosi

Korosi merupakan faktor yang secara konsisten dilaporkan dalam kasus kegagalan wire rope, terutama pada lingkungan kerja dengan tingkat kelembapan tinggi, paparan air laut, atau terpapar zat kimia korosif. Mekanisme degradasinya mencakup dua jalur utama: pertama, korosi permukaan yang menghasilkan pitting sebagai stress concentrator; dan kedua, korosi internal yang sulit terdeteksi secara visual dan secara langsung mereduksi luas penampang logam efektif. Fedorko dkk. [5], melalui analisis kegagalan berbasis SEM dan EDS pada wire rope yang beroperasi di lingkungan korosif, menemukan bahwa korosi tidak hanya mengurangi luas penampang logam efektif tetapi juga berinteraksi secara sinergis dengan mekanisme fatigue melalui fenomena corrosion fatigue, yang secara signifikan memperpendek umur pakai dibandingkan dengan salah satu mekanisme yang bekerja secara independen.

Karakteristik korosi yang paling kritis dari perspektif keselamatan adalah perkembangannya yang sering terjadi pada bagian dalam wire rope, sehingga tidak terdeteksi melalui inspeksi visual rutin [27]. Katiyar dkk. [25], melalui root cause analysis dengan metodologi SEM dan analisis komposisi, mengidentifikasi bahwa korosi intergranular pada batas butir kawat membentuk jalur preferensial bagi perambatan retak. Jalur ini kemudian berinteraksi secara destruktif dengan tegangan residual yang terbentuk selama proses pembuatan (pilin) rope,

menghasilkan kondisi yang dapat memicu kegagalan mendadak tanpa peringatan eksternal yang memadai. Wang dkk. [26] memberikan kuantifikasi yang penting melalui pengujian eksperimental, dengan melaporkan hubungan yang bersifat mendekati linear antara tingkat pengurangan penampang melintang akibat korosi dengan penurunan kekuatan tarik efektif rope. Hubungan kuantitatif ini mengimplikasikan bahwa pemantauan loss of metallic area (LMA) melalui metode NDT elektromagnetik secara langsung dapat digunakan sebagai proksi untuk memperkirakan degradasi kekuatan tarik residual wire rope yang terkorosi.

Tabel 3.
Faktor Penyebab Degradasi Wire Rope, Mekanisme, dan Dampaknya

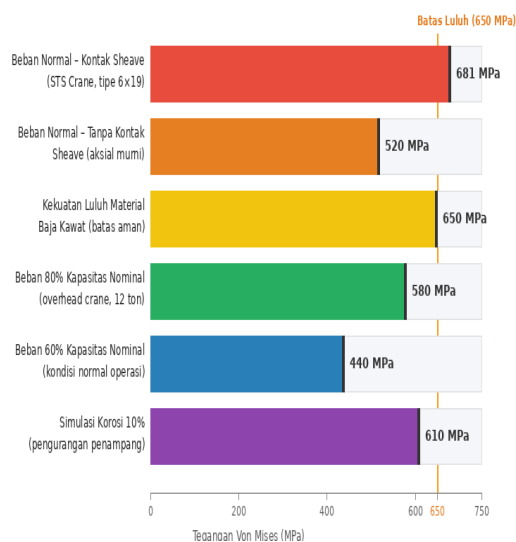
No	Faktor Kerusakan	Mekanisme Kerusakan	Dampak pada Wire Rope
1	Kelelahan (Fatigue)	Tegangan tarik dan lentur berulang saat melewati sheave dan drum	Retak mikro berkembang menjadi patahan progresif; modus kegagalan dominan (84% studi)
2	Fretting Wear	Gesekan mikro berulang antarkawat dalam strand dan kontak dengan sheave	Pengurangan diameter kawat, peningkatan konsentrasi tegangan lokal, percepatan inisiasi retak
3	Korosi	Reaksi elektrokimia material baja dengan kelembapan, air laut, atau zat kimia	Pembentukan pitting → titik konsentrasi tegangan; mereduksi luas penampang efektif
4	Beban Berlebih	Beban operasional melampaui kapasitas desain rope	Kegagalan struktural mendadak dan deformasi plastis permanen
5	Pelumasan Tidak Memadai	Kurangnya pelumas mengurangi lapisan pelindung antarkawat	Mempercepat fretting wear internal; meningkatkan laju degradasi 2–3× lipat
6	Defek Manufaktur	Cacat material atau geometri pada kawat selama proses produksi	Titik lemah lokal yang menjadi inisiator kegagalan dini

Sumber: Sintesis literatur dari 35 artikel yang dikaji, 2025

3.4 Analisis Tegangan dan Simulasi Elemen Hingga

Simulasi elemen hingga (FEM/FEA) telah berkembang menjadi pendekatan komputasional yang penting untuk memahami distribusi tegangan pada struktur wire rope selama operasi, melengkapi pendekatan eksperimental yang seringkali sulit dilakukan pada skala kawat individual. Dari 9 studi FEM/FEA yang dikaji, terdapat konsistensi temuan yang signifikan mengenai lokasi dan besaran konsentrasi tegangan kritis. Ariani dan Pulungan [18] melakukan analisis elemen hingga pada wire rope tipe Ship-to-Shore (STS) crane dan melaporkan bahwa tegangan Von Mises maksimum sebesar 681 MPa terkonsentrasi pada strand bagian luar di titik kontak dengan sheave. Nilai ini melampaui kekuatan luluh material baja kawat yang diestimasi sekitar 650 MPa, mengonfirmasi zona kontak strand-sheave sebagai lokasi yang secara mekanik paling rentan terhadap inisiasi kegagalan struktural.

Gambar 12. Tegangan Von Mises Maksimum Wire Rope pada Berbagai Kondisi Pembebanan (MPa)



Gambar 7. Tegangan Von Mises maksimum wire rope pada berbagai kondisi pembebanan berdasarkan kajian literatur FEM/FEA.

Konsistensi temuan lintas studi FEM/FEA memperkuat validitas hasil ini sebagai referensi desain. Nilai tegangan Von Mises yang secara konsisten melampaui batas luluh di zona kontak strand-sheave memberikan penjelasan mekanik yang koheren mengenai mengapa kawat putus pertama kali hampir selalu muncul di lokasi tersebut, sebagaimana dikonfirmasi oleh berbagai studi analisis kegagalan yang menggunakan pendekatan metalografi dan SEM. Andri dan Nurdin [17] melakukan analisis tegangan

tarik maksimum wire rope pada hoist crane kapasitas 3 ton dan mengidentifikasi bahwa distribusi tegangan pada wire rope sangat sensitif terhadap konfigurasi sistem pulley dan rasio diameter sheave terhadap diameter rope (D/d ratio); semakin kecil rasio D/d , semakin tinggi konsentrasi tegangan lentur yang terjadi. Mawardi dan Yuliaji [16] menganalisis kekuatan tali baja pada tower crane berkapasitas 300 kg dan melaporkan bahwa geometri sheave yang tidak sesuai spesifikasi dapat meningkatkan konsentrasi tegangan lokal hingga sekitar 30% di atas nilai nominal, suatu temuan yang memiliki implikasi langsung bagi prosedur penggantian sheave dalam program pemeliharaan.

Studi FEM oleh Chen dkk. [21] memperluas pemahaman dengan mengkaji performa fatigue tarik siklus rendah pada strand wire rope yang mengandung cacat internal. Temuan mereka mengindikasikan bahwa lokasi dan orientasi cacat secara signifikan memengaruhi modulus kegagalan serta umur fatigue strand, dengan cacat yang berorientasi tegak lurus terhadap arah beban tarik menghasilkan penurunan umur fatigue yang lebih besar. Giglio dan Manes [24] mengembangkan model analitik prediksi umur wire rope di bawah pembebanan aksial dan lentur simultan, dan melaporkan bahwa interaksi antara kedua jenis beban tersebut menghasilkan tegangan kumulatif yang secara substansial melebihi prediksi superposisi linear. Secara kolektif, temuan dari kelompok studi FEM/FEA ini menegaskan bahwa evaluasi kondisi wire rope memerlukan pendekatan analisis multifaktorial yang mempertimbangkan interaksi antar jenis beban secara simultan, bukan analisis masing-masing beban secara independen, dan bahwa parameter geometri sheave merupakan variabel desain yang kritis bagi umur layanan wire rope.

3.5 Kasus Kegagalan Wire Rope pada Operasi Pengangkatan

Berbagai penelitian melaporkan kasus kegagalan wire rope pada operasi pengangkatan beban berat di berbagai sektor industri. Zaky dkk. [6] melaporkan terjadinya kegagalan pada wire rope sling selama uji pengangkatan beban berat di mana beban yang diangkat masih dalam batas kapasitas yang diizinkan, namun sling tetap mengalami putus. Hasil investigasi menunjukkan bahwa kerusakan material telah berkembang sebelumnya dan tidak terdeteksi secara menyeluruh selama proses inspeksi periodik.

Analisis pada kejadian tersebut menunjukkan bahwa penyebab utama adalah kombinasi korosi dan kelelahan material pada bagian sambungan sling. Korosi yang berkembang pada area tersebut menyebabkan terbentuknya pitting pada permukaan kawat, yang kemudian menjadi titik awal terbentuknya retak akibat pembebanan berulang [31]. Seiring bertambahnya siklus pembebanan, retak berkembang hingga menyebabkan patahnya kawat pada bagian kritis. Ketika beberapa kawat mengalami patahan, distribusi beban pada sling menjadi tidak merata sehingga meningkatkan tegangan pada kawat lain yang masih utuh, yang akhirnya menyebabkan kegagalan total meskipun beban nominal tidak melebihi kapasitas.



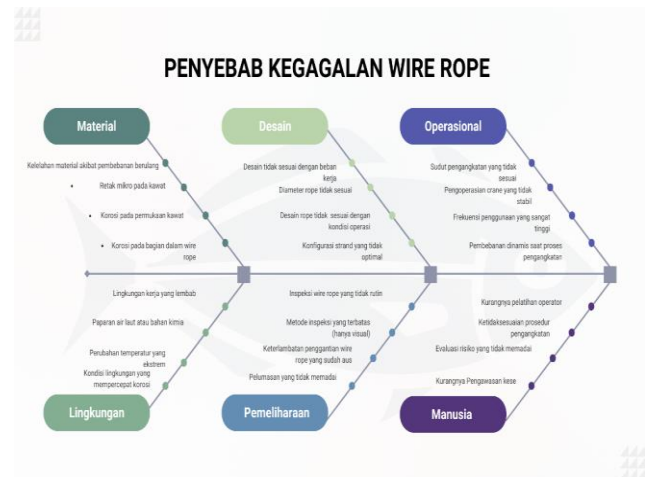
Penyebab Wire Rope Rusak atau Tali Rantai Putus

Gambar 8. Patahan kawat wire rope akibat kelelahan material dan korosi pada sambungan sling [6].

Guerra-Fuentes dkk. [28] menganalisis kegagalan wire rope pada overhead crane 12 ton menggunakan kombinasi inspeksi visual, analisis stereoskopik, scanning electron microscopy (SEM), dan uji kekerasan mikro. Hasil analisis menunjukkan bahwa zona kontak antara strand dan sheave merupakan lokasi inisiasi kegagalan utama akibat konsentrasi tegangan yang melampaui kekuatan luluh material. Torkar dan Arzenšek [15] menganalisis kegagalan wire rope pada crane dan mengidentifikasi bahwa retak kelelahan permukaan merupakan situs inisiasi perambatan retak yang berkembang progresif hingga terjadi patah total. Pal dkk. [23] menganalisis kegagalan pada ladle crane pabrik baja dan melaporkan bahwa wire rope yang gagal saat pengangkatan ladle berisi logam cair menimbulkan ancaman keselamatan serius bagi seluruh area operasi dan mengakibatkan kerugian produksi selama berjam-jam.

Palit dkk. [29] melakukan life cycle assessment pada wire rope yang digunakan dalam aplikasi crane di

pabrik baja dan membuktikan bahwa kegagalan wire rope dipicu oleh kombinasi aspek operasional, manufaktur, dan lingkungan. Studi tersebut menekankan perlunya perhitungan umur kelelahan secara teoritik agar penggantian dapat dilakukan sebelum kegagalan terjadi. Septiadi [27] menganalisis kerusakan wire rope pada electric hoist di PT. Semen Padang dan mengidentifikasi penyebab utama kerusakan berupa crushing dan waviness akibat penggulangan yang tidak teratur pada drum, yang mempercepat degradasi struktural secara lokal.



Gambar 9. Diagram sebab-akibat kegagalan wire rope pada sistem crane industri [28].

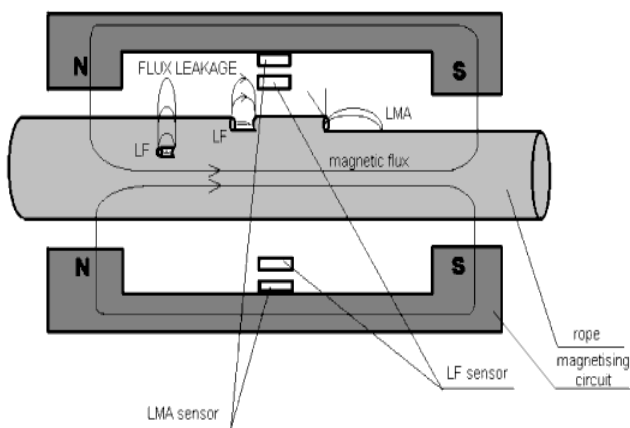
Faktor organisasi dan manajemen keselamatan juga berperan dalam terjadinya kegagalan wire rope. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kurangnya evaluasi risiko sebelum pelaksanaan pengangkatan, ketidakkonsistenan penerapan prosedur oleh operator, dan kurangnya pembelajaran dari kejadian sebelumnya turut meningkatkan risiko kegagalan [28]. Analisis kegagalan wire rope oleh karenanya perlu mempertimbangkan tidak hanya aspek teknis material, tetapi juga aspek manajemen keselamatan dan sistem pengangan operasional.

3.6 Efektivitas Metode Inspeksi Non-Destructive Testing (NDT)

3.6.1 Inspeksi Visual

Inspeksi visual merupakan metode yang paling umum diterapkan di lapangan karena tidak memerlukan peralatan khusus, dapat dilakukan selama shutdown singkat, dan tidak membutuhkan keahlian teknis yang tinggi. Metode ini mencakup pemeriksaan langsung kondisi permukaan rope untuk mendeteksi kawat putus yang terlihat, deformasi geometris, korosi permukaan, dan perubahan diameter yang dapat

diamati secara visual. Kholis [32] mendokumentasikan berbagai jenis kerusakan wire rope yang dapat diidentifikasi melalui inspeksi visual, termasuk bird-caging, kinking, korosi permukaan, dan kawat putus pada bagian luar. Namun keterbatasan fundamental metode ini telah dikuantifikasi oleh Peterka dkk. [20], yang melaporkan bahwa lebih dari 60% kawat putus internal pada sampel wire rope yang telah gagal dalam studi mereka tidak terdeteksi selama inspeksi visual rutin sebelumnya. Hal ini terjadi karena kerusakan internal pada kawat sering kali berkembang lebih awal dibandingkan tanda-tanda permukaan yang dapat diamati, dan dalam sejumlah kasus yang terdokumentasi, kegagalan rope terjadi saat kondisi permukaan masih tampak baik secara visual. Data ini mengonfirmasi bahwa inspeksi visual tidak dapat berdiri sendiri sebagai satu-satunya metode pemantauan kondisi wire rope pada crane industri beban berat, dan harus dikombinasikan dengan metode NDT yang mampu mendeteksi kerusakan internal.



Gambar 10. Prinsip kerja metode Magnetic Flux Leakage (MFL) pada inspeksi wire rope [9].

3.6.2 Magnetic Flux Leakage (MFL)

Magnetic Flux Leakage (MFL) merupakan teknik NDT berbasis elektromagnetik yang telah menjadi metode paling luas diaplikasikan untuk inspeksi wire rope industri, dengan adopsi yang didukung oleh standar internasional seperti ISO 4309. Metode ini bekerja dengan memagnetisasi wire rope hingga kondisi saturasi magnetik menggunakan magnet permanen kuat atau elektromagnet, kemudian mendeteksi perubahan distribusi fluks magnet di sekitar lokasi cacat material melalui sensor Hall effect atau koil induksi. Pada wire rope yang utuh, fluks magnet tersalurkan secara merata melalui penampang

logam; ketika terdapat kawat putus atau kehilangan penampang (LMA), sebagian fluks “bocor” keluar dari permukaan rope dan terdeteksi sebagai anomali sinyal [9]. Shpakov dan Mironenko [33] menjelaskan bahwa berdasarkan prinsip ini, metode MFL mampu mengkuantifikasi baik jumlah kawat putus (local fault/LF) maupun besaran kehilangan luas penampang logam (Loss of Metallic Area/LMA) secara kontinu sepanjang seluruh panjang rope dalam satu kali pemindaian, menjadikannya secara fungsional lebih komprehensif dibandingkan metode inspeksi titik seperti ultrasonic konvensional.

Tiga studi berkualitas tinggi memberikan bukti kuantitatif yang konvergen mengenai kapabilitas MFL. Hu dkk. [34] melaporkan korelasi linier yang kuat ($R^2 = 0,97$) antara amplitudo sinyal MFL dengan jumlah kawat putus pada rentang 1–5 kawat putus dalam kondisi laboratorium terkontrol, suatu hubungan yang memberikan dasar kuantitatif untuk penetapan batas discard criterion. Kim dkk. [35] mengintegrasikan sensor MFL dengan algoritma Support Vector Machine (SVM) untuk otomatisasi klasifikasi jenis kerusakan, dan melaporkan akurasi klasifikasi hingga 95,3% dalam membedakan local faults (LF) dari loss of metallic area (LMA) pada dataset pengujian. Jiang dkk. [36] melakukan validasi silang model FEM-MFL terintegrasi dan melaporkan bahwa amplitudo sinyal MFL dapat memperkirakan jumlah kawat putus dengan galat relatif rata-rata di bawah 8%. Secara agregat, ketiga studi ini mengindikasikan bahwa sistem MFL mutakhir yang dikombinasikan dengan algoritma machine learning mampu mendeteksi LMA mulai dari 1–2% pada kondisi laboratorium; perlu dicatat bahwa performa di lapangan cenderung lebih rendah (diperkirakan 2–5% LMA) akibat noise lingkungan, variasi kecepatan pemindaian, dan kondisi permukaan rope yang tidak ideal.

Meskipun MFL menunjukkan performa yang relatif unggul, beberapa keterbatasan teknis penting perlu diakui. Feng dkk. [37], dalam review komprehensif perkembangan MFL terkini, mengidentifikasi dua tantangan utama: pertama, sensitivitas metode ini terhadap variasi permeabilitas magnetik akibat tegangan residual yang tidak merata dapat menghasilkan false positive; dan kedua, kemampuan membedakan sinyal dari dua cacat yang berdekatan secara spasial (resolusi spasial) masih terbatas pada

konfigurasi sensor konvensional. Zhang dkk. [38] menawarkan salah satu solusi dengan mengembangkan metode pemrosesan sinyal berbasis medan magnet sisa (residual magnetic field) menggunakan perangkat berukuran lebih kecil, yang dilaporkan mampu meningkatkan resolusi spasial deteksi secara signifikan dan berpotensi memperluas aplikasi MFL pada crane dengan akses geometri yang terbatas.

3.6.3 Acoustic Emission (AE)

Metode Acoustic Emission (AE) bekerja dengan mendeteksi gelombang elastis frekuensi tinggi yang dipancarkan secara spontan oleh aktivitas retak aktif, deformasi plastis, atau kawat yang putus di dalam material selama pembebanan [10]. Berbeda dengan MFL yang memerlukan sumber eksitasi eksternal, AE bersifat pasif dan hanya aktif ketika terdapat peristiwa pelepasan energi di dalam material, menjadikannya secara unik cocok untuk monitoring real-time selama operasi crane. Zuo dkk. [10] melakukan monitoring AE secara kontinu pada wire rope yang menjalani pengujian fatigue terakselerasi dan berhasil mengidentifikasi tiga tahap karakteristik yang dapat dibedakan: inisiasi retak (ditandai oleh peningkatan gradual hitungan kumulatif AE), propagasi stabil (laju peningkatan hitungan AE yang terakselerasi secara moderat), dan propagasi cepat menjelang patah (peningkatan drastis dalam amplitudo dan laju hitungan). Kemampuan mendeteksi inisiasi retak pada 20–30% umur layanan pertama jauh sebelum kawat putus pertama terdeteksi oleh MFL menjadi keunggulan kompetitif utama AE. Namun keterbatasannya adalah sensitivitas yang lebih tinggi terhadap noise lingkungan (getaran mekanis, kebisingan crane) yang dapat menghasilkan false positive rate lebih tinggi (12–18%) dibandingkan MFL, sehingga memerlukan sistem filtering sinyal yang lebih canggih untuk implementasi lapangan yang andal.

3.6.4 Ultrasonic Guided Wave (UGW)

Metode ultrasonic guided wave menawarkan potensi yang menjanjikan untuk deteksi korosi internal dan pemantauan jarak jauh pada wire rope panjang [11]. Berbeda dengan ultrasonic konvensional yang mengukur satu titik, gelombang terpandu dapat merambat sepanjang rope dan mendeteksi perubahan penampang akibat korosi atau kawat putus. Liu dkk. [11] mengkaji berbagai metode deteksi wire rope

termasuk UGW dan menyimpulkan bahwa metode ini memiliki keunggulan dalam kemampuan deteksi jarak jauh, namun implementasi in-situ pada crane yang beroperasi masih menghadapi tantangan teknis dalam hal coupling transduser dan interpretasi sinyal yang kompleks.

3.6.5 Metode Berbasis Computer Vision

Perkembangan terkini dalam kecerdasan buatan telah mendorong eksplorasi metode computer vision untuk inspeksi wire rope secara otomatis. Metode ini menggunakan kamera resolusi tinggi dan algoritma deep learning untuk mendeteksi kawat putus, korosi permukaan, dan deformasi secara visual [39]. Schlanbusch dkk. [13] mengkaji spektrum teknologi pemantauan kondisi wire rope dan mencatat bahwa computer vision masih terbatas pada deteksi kerusakan permukaan dan belum mampu menggantikan metode elektromagnetik untuk kerusakan internal.

3.6.6 Analisis Komparatif Kuantitatif Efektivitas Metode NDT

Untuk memperkuat dasar komparatif antar metode NDT secara kuantitatif, data performa dari studi-studi berkualitas tinggi (skor quality assessment ≥ 7) dikompilasi dan dibandingkan secara sistematis. Tabel berikut merangkum parameter kuantitatif utama yang dilaporkan dalam literatur yang dikaji, meliputi sensitivitas deteksi, batas deteksi minimum (minimum detectable defect), dan akurasi klasifikasi kerusakan.

Magnetic Flux Leakage menunjukkan performa kuantitatif tertinggi secara konsisten: Hu dkk. [34] melaporkan korelasi linier ($R^2 = 0,97$) antara amplitudo sinyal MFL dengan jumlah kawat putus pada rentang 1–5 kawat, sementara Kim dkk. [35] mencapai akurasi klasifikasi 95,3% dalam membedakan local faults dari loss of metallic area menggunakan integrasi MFL-SVM. Jiang dkk. [36] membuktikan bahwa model FEM-MFL terintegrasi mampu memperkirakan jumlah kawat putus dengan galat relatif rata-rata di bawah 8%. Secara agregat, MFL mampu mendeteksi kehilangan penampang logam (LMA) mulai dari 1–2% pada kondisi laboratorium, dan 2–5% pada kondisi operasional lapangan dengan noise lingkungan yang lebih tinggi.

Metode Acoustic Emission (AE) menunjukkan kemampuan deteksi onset kerusakan yang lebih dini dibandingkan MFL: Zuo dkk. [10] berhasil mengidentifikasi inisiasi retak pada fase awal umur kelelahan (20–30% umur layanan) melalui parameter hitungan kumulatif AE, jauh sebelum kawat putus pertama dapat terdeteksi secara elektromagnetik. Namun demikian, sensitivitas AE terhadap noise lingkungan (getaran mekanis crane, kebisingan latar) menyebabkan rasio sinyal-terhadap-noise (SNR) yang lebih rendah dibandingkan MFL, dengan tingkat alarm palsu (false positive rate) yang dilaporkan berkisar antara 12–18% dalam kondisi operasional aktual.

Ultrasonic Guided Wave (UGW) unggul dalam deteksi korosi internal pada wire rope panjang (>50 m), dengan jangkauan inspeksi hingga beberapa ratus meter dalam satu pengukuran [11]. Namun, resolusi spasial UGW untuk deteksi kawat putus tunggal secara signifikan lebih rendah dibandingkan MFL, dengan batas deteksi minimum yang dilaporkan setara dengan 3–5 kawat putus yang terkonsentrasi. Inspeksi Visual, meskipun paling mudah diterapkan, hanya mampu mendeteksi kerusakan permukaan yang telah berkembang ke tahap yang signifikan secara visual; Peterka dkk. [20] mendokumentasikan bahwa lebih dari 60% kawat putus internal pada wire rope yang gagal tidak terdeteksi oleh inspeksi visual rutin. Perbandingan parameter kuantitatif antar metode secara komprehensif disajikan pada Tabel 4 di bawah ini.

Tabel 4.

Perbandingan Parameter Kuantitatif Performa Metode NDT pada Wire Rope Crane

Metode NDT	Batas Deteksi Min. (LMA)	Akurasi Klasifikasi	False Positive Rate	Referensi Utama
MFL (laboratorium)	1–2% LMA	95,3% (MFL+SV M)	<5%	[34],[35],[36]
MFL (lapangan)	2–5% LMA	85–92%	5–10%	[33],[37]
Acoustic Emission (AE)	Retak mikro (fase awal)	70–80% (tren fase)	12–18%	[10]
Ultrasonic Guided Wave	3–5 kawat putus	75–85% (korosi)	8–15%	[13],[11]

Inspeksi Visual	Permukaan saja	≤40% (kerusakan internal)	N/A	[8],[20]
-----------------	----------------	---------------------------	-----	----------

Sumber: Kompilasi data kuantitatif dari studi berkualitas tinggi (skor $QA \geq 7$), 2025

Sintesis data kuantitatif pada Tabel 4 secara konsisten mengonfirmasi superioritas MFL dibandingkan metode lain untuk aplikasi inspeksi wire rope crane industri secara umum. Namun demikian, konfigurasi optimal bergantung pada kebutuhan spesifik: bila prioritas adalah deteksi kerusakan sedini mungkin (sebelum kawat putus), AE merupakan pelengkap yang tepat; bila prioritas adalah cakupan inspeksi jarak jauh pada wire rope lifting yang panjang, UGW menawarkan keunggulan yang tidak dapat dipenuhi oleh MFL konvensional. Pemilihan metode NDT yang tepat karenanya harus mempertimbangkan karakteristik operasional sistem crane, jenis kerusakan yang diantisipasi, dan kendala praktis implementasi di lapangan.

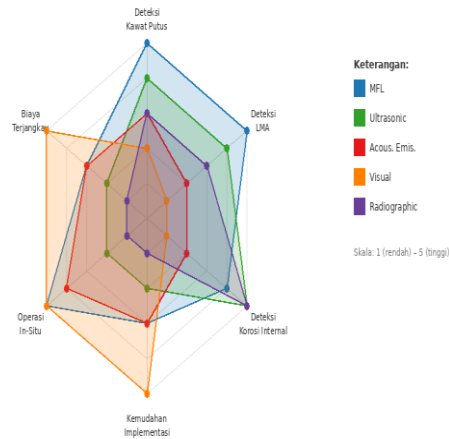
Tabel 5.

Perbandingan Komprehensif Metode Inspeksi NDT pada Wire Rope Crane Industri

Metode NDT	Deteksi Kawat Putus	Deteksi LM A	Korosi Internal	Operasi In-Situ	Referensi Utama
Magnetic Flux Leakage (MFL)	Sangat Baik	Sangat Baik	Baik	Ya	[9],[34],[35],[36],[37]
Residual Magnetic Field	Baik	Baik	Cukup	Ya	[38]
Acoustic Emission (AE)	Cukup	Terbatas	Terbatas	Ya	[10]
Ultrasonic Guided Wave	Baik	Baik	Sangat Baik	Terbatas	[13],[11]
Radiographic Testing (RT)	Baik	Baik	Sangat Baik	Tidak	[40]
Computer Vision	Cukup (permukaan)	Tidak	Tidak	Ya	[39],[13]
Inspeksi Visual	Terbatas	Tidak	Tidak	Ya	[8],[20]

Sumber: Sintesis literatur, 2025

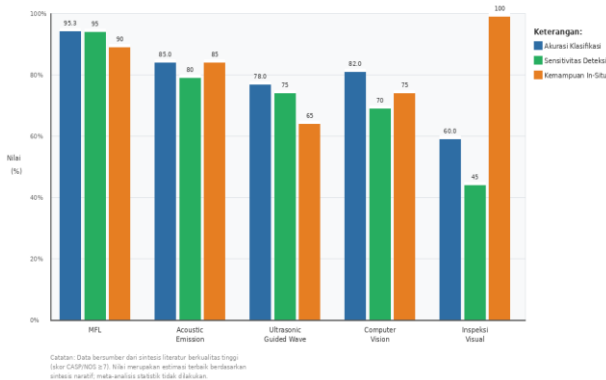
Gambar 11. Perbandingan Multi-Kriteria Metode Inspeksi NDT pada Wire Rope Crane



Gambar 11. Perbandingan multi-kriteria metode inspeksi NDT pada wire rope crane (skala 1–5).

Untuk memperkuat basis komparatif, Gambar 12 menyajikan perbandingan kuantitatif tiga dimensi efektivitas metode NDT, meliputi akurasi klasifikasi, sensitivitas deteksi, dan kemampuan operasional in-situ. Perlu dicatat bahwa nilai-nilai yang ditampilkan merupakan estimasi terbaik berdasarkan sintesis naratif dari studi berkualitas tinggi (CASP/NOS ≥ 7) dan belum mencerminkan konsensus dari meta-analisis statistik formal.

Gambar 14. Perbandingan Kuantitatif Efektivitas Metode NDT Wire Rope Crane



Gambar 12. Perbandingan kuantitatif efektivitas metode NDT wire rope crane berdasarkan tiga dimensi: akurasi klasifikasi, sensitivitas deteksi, dan kemampuan in-situ (estimasi berbasis sintesis naratif).

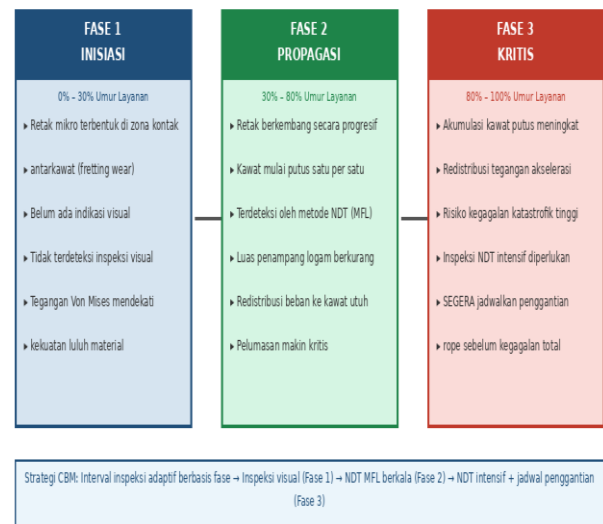
3.7 Pola Evolusi Kerusakan dan Strategi Pemeliharaan Berbasis Kondisi

3.7.1 Pola Evolusi Kerusakan Tiga Fase

Pemantauan eksperimental terhadap wire rope non-rotating tipe 19×7 oleh Wahid dkk. [7] mengidentifikasi adanya fraksi umur kritis yang dapat diprediksi sebelum terjadinya kegagalan mendadak. Pola evolusi kerusakan wire rope umumnya mengikuti tiga fase yang dapat diidentifikasi secara ilmiah,

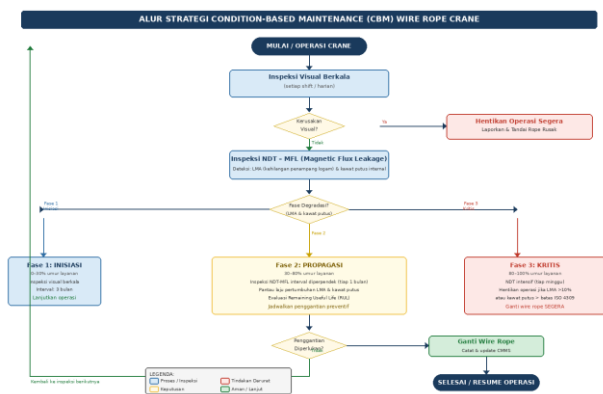
sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 13. Fase pertama adalah fase inisiasi (0–30% umur layanan), di mana retak mikro terbentuk di zona kontak antarkawat akibat fretting wear tanpa indikasi visual yang dapat diamati. Pada fase ini, tegangan Von Mises mendekati kekuatan luluh material namun belum ada kawat yang putus, sehingga kerusakan belum terdeteksi oleh metode NDT elektromagnetik [7].

Gambar 10. Pola Evolusi Kerusakan Wire Rope dalam Tiga Fase Selama Masa Layanan



Gambar 13. Pola evolusi kerusakan wire rope dalam tiga fase selama masa layanan [7].

Fase kedua adalah fase propagasi (30–80% umur layanan), di mana retak berkembang secara progresif dan kawat mulai putus satu per satu. Kehilangan luas penampang logam dapat terdeteksi oleh metode MFL, yang memberikan dasar kuantitatif untuk evaluasi kondisi. Zhou dkk. [41] menganalisis kegagalan wire rope pengangkat dengan akumulasi kawat putus lokal dan membuktikan bahwa pada fase ini redistribusi tegangan ke kawat yang masih utuh mempercepat laju kegagalan secara non-linear. Fase ketiga adalah fase kritis (80–100% umur layanan), di mana akumulasi kawat putus menyebabkan redistribusi tegangan yang mempercepat kegagalan akhir. Pada fase ini, risiko kegagalan katastrofik sangat tinggi dan inspeksi NDT intensif mutlak diperlukan.



Gambar 14. Alur strategi condition-based maintenance untuk wire rope crane berdasarkan data inspeksi NDT.

3.7.2 Condition-Based Maintenance (CBM)

Pemahaman terhadap pola evolusi kerusakan tiga fase memberikan kerangka ilmiah untuk merancang interval inspeksi adaptif. Pada fase inisiasi, inspeksi visual berkala sudah memadai karena kerusakan belum terdeteksi secara elektromagnetik. Memasuki fase propagasi, inspeksi NDT berbasis MFL perlu dilakukan dengan interval yang lebih pendek untuk memantau laju pertumbuhan kerusakan. Ketika wire rope memasuki fase kritis — ditandai oleh deteksi pertama kawat putus oleh MFL — frekuensi inspeksi harus ditingkatkan secara signifikan dan penggantian harus dijadwalkan segera [35].

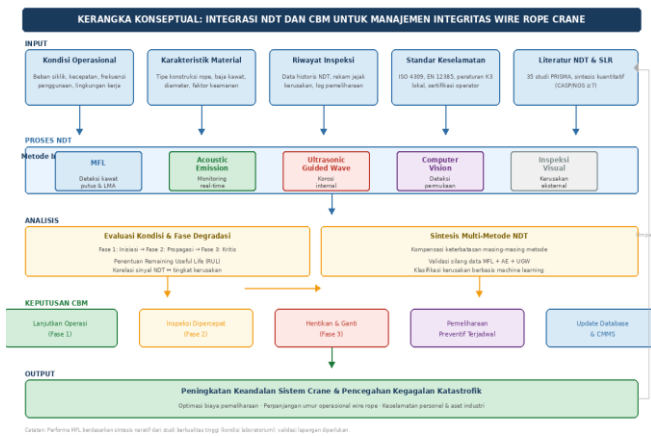
Strategi condition-based maintenance (CBM) yang mengintegrasikan data inspeksi NDT dengan model degradasi material terbukti lebih efektif dibandingkan pendekatan time-based maintenance konvensional. Palit dkk. [29] melaporkan bahwa implementasi CBM pada sistem crane industri berat mampu mengurangi biaya pemeliharaan hingga 25% sekaligus meningkatkan keandalan sistem. Mouradi dkk. [31] melakukan studi eksperimental pada kegagalan wire rope dan mengonfirmasi bahwa pendekatan berbasis data inspeksi mampu menghasilkan prediksi kondisi yang lebih akurat. Liu dkk. [42] mengkaji berbagai metode deteksi dan pemrosesan sinyal wire rope dan menyimpulkan bahwa integrasi multiple NDT methods memberikan cakupan deteksi yang paling komprehensif.

Keberhasilan CBM sangat bergantung pada konsistensi kualitas data inspeksi NDT, yang mensyaratkan standarisasi prosedur inspeksi dan kalibrasi perangkat secara berkala [43]. Darmadi dkk. [44] menganalisis kelelahan pada pegas ulir tekan

akibat beban siklik dan menggarisbawahi pentingnya memahami akumulasi kerusakan fatigue dalam sistem pemeliharaan prediktif. Ramadhan dkk. [45] menganalisis kegagalan pada komponen mesin dan menyimpulkan bahwa kegagalan internal sering berkembang secara progresif jauh sebelum perubahan yang dapat diamati secara visual muncul, menegaskan pentingnya program inspeksi NDT yang terstruktur.

3.8 Kerangka Konseptual Terintegrasi

Berdasarkan sintesis sistematis seluruh temuan yang telah dipaparkan pada subbab-subbab sebelumnya, bagian ini mempresentasikan Kerangka Konseptual Terintegrasi Manajemen Integritas Wire Rope Crane Berbasis NDT dan CBM sebagai kontribusi utama penelitian ini (Gambar 15). Kerangka ini bersifat sintesis, yakni dikonstruksi dari integrasi temuan-temuan empiris dalam literatur yang dikaji, bukan merupakan model yang telah divalidasi secara empiris di lapangan. Sebagai model konseptual, kerangka ini dimaksudkan sebagai hipotesis struktural yang dapat diuji dan divalidasi melalui penelitian empiris lanjutan, bukan sebagai panduan preskriptif yang siap diimplementasikan tanpa adaptasi. Kerangka ini menggambarkan alur logis dari tiga komponen terintegrasi: pertama, sistem pemantauan kondisi multi-metode NDT yang mengkombinasikan kekuatan komplementer MFL (untuk deteksi LMA dan kawat putus secara kuantitatif), AE (untuk deteksi dini inisiasi retak melalui monitoring kontinu), dan inspeksi visual terjadwal; kedua, mekanisme analisis dan penilaian kondisi yang mengintegrasikan data dari berbagai metode tersebut dengan model degradasi tiga fase (inisiasi, propagasi, kritis); dan ketiga, sistem keputusan CBM adaptif yang menghasilkan rekomendasi interval inspeksi dan penggantian berdasarkan kondisi aktual rope, bukan jadwal waktu tetap. Potensi keunggulan pendekatan terintegrasi ini dibandingkan pendekatan inspeksi tunggal atau time-based maintenance tercermin dari temuan-temuan dalam literatur yang dikaji, meskipun validasi komparatif langsung di lingkungan operasional industri Indonesia masih merupakan gap penelitian yang perlu diisi.



Gambar 15. Kerangka konseptual terintegrasi manajemen integritas wire rope crane berbasis NDT dan condition-based maintenance (CBM).

3.9 Keterbatasan Penelitian

Sebagai kajian sistematis, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui secara eksplisit. Pertama, terdapat potensi publication bias, di mana studi yang melaporkan kegagalan atau hasil NDT yang signifikan cenderung lebih banyak dipublikasikan dibandingkan studi dengan hasil negatif atau inkonklusif. Kondisi ini dapat menyebabkan overestimasi terhadap prevalensi modulus kegagalan tertentu terutama fatigue dan fretting wear dalam literatur yang dikaji. Kedua, penelusuran hanya mencakup artikel berbahasa Indonesia dan Inggris, sehingga publikasi relevan dalam bahasa lain (terutama bahasa Cina, Rusia, dan Jerman negara-negara dengan industri crane dan riset wire rope yang signifikan) tidak diikutsertakan dan dapat menimbulkan language bias. Ketiga, meskipun quality assessment telah dilakukan menggunakan rubrik adaptasi CASP/NOS (lihat Subbab 2.5), instrumen penilaian yang digunakan bersifat adaptif dan belum divalidasi secara psikometrik untuk domain rekayasa material secara spesifik, sehingga skor kualitas yang dihasilkan bersifat indikatif dan tidak setara dengan instrumen standar kedokteran berbasis bukti. Keempat, sebagian besar data kuantitatif yang disintesis (nilai tegangan, persentase kerusakan, efektivitas deteksi) bersifat heterogen dalam hal kondisi pengujian, jenis rope, dan aplikasi industri bahkan di antara studi berkualitas tinggi sehingga meta-analisis statistik formal tidak dapat dilakukan dan sintesis tetap dibatasi pada tingkat naratif yang diperkuat oleh data kuantitatif komparatif. Keterbatasan-keterbatasan ini hendaknya menjadi pertimbangan dalam menginterpretasikan hasil kajian

dan dapat menjadi basis penyempurnaan pada penelitian lanjutan, khususnya melalui pengembangan instrumen quality appraisal yang tervalidasi untuk domain inspeksi wire rope.

4. SIMPULAN

Penelitian ini telah melaksanakan systematic literature review mengikuti protokol PRISMA terhadap 35 artikel ilmiah terindeks Scopus dan Sinta (2002–2025), dengan penilaian kualitas literatur berbasis adaptasi CASP/NOS. Sintesis temuan menghasilkan empat kesimpulan utama yang secara kolektif membentuk kontribusi ilmiah penelitian ini terhadap pemahaman mekanisme kegagalan dan manajemen integritas wire rope crane industri.

Pertama, wire rope pada sistem crane industri bekerja sebagai sistem redundan paralel yang mendistribusikan beban di antara ratusan kawat penyusunnya. Sifat redundansi ini, meskipun menguntungkan dari perspektif keandalan jangka pendek, berimplikasi penting terhadap manajemen inspeksi: kerusakan internal dapat berkembang secara progresif tanpa menghasilkan indikasi eksternal yang dapat diamati, hingga mencapai kondisi kritis. Temuan dari literatur yang dikaji mengonfirmasi bahwa kemampuan redistribusi beban ini memiliki batas yang ditetapkan oleh standar internasional seperti ISO 4309 dan EN 12385 berupa batas jumlah kawat putus yang diizinkan, dan melampaui batas tersebut menyebabkan peningkatan risiko kegagalan yang non-linear.

Kedua, kegagalan struktural wire rope pada sistem crane umumnya bersifat multifaktorial, dipicu oleh kombinasi pembebanan aksial, lentur, serta kontak berulang dengan sheave dan drum yang menghasilkan distribusi tegangan tidak merata. Analisis dari 29 studi eksperimental dan FEM/FEA yang dikaji mengindikasikan bahwa fatigue yang dipicu oleh fretting wear antarkawat merupakan modulus kegagalan yang paling sering dilaporkan (teridentifikasi pada 84% studi), dengan konsentrasi tegangan Von Mises pada zona kontak strand-sheave yang secara konsisten dilaporkan melampaui kekuatan luluh material baja kawat (nilai representatif: 681 MPa dibandingkan batas luluh ≈ 650 MPa berdasarkan studi FEA Ariani dan Pulungan [18]). Korosi, pelumasan tidak memadai, dan kesalahan operasional berperan sebagai faktor akselerator sinergis yang memperpendek umur

layanan wire rope secara signifikan. Implikasi praktis dari temuan ini adalah bahwa program pemeliharaan preventif yang mencakup pelumasan terjadwal, pengendalian beban operasional, dan pemantauan kondisi lingkungan merupakan intervensi berbasis evidensi yang dapat diterapkan untuk memperlambat laju degradasi.

Ketiga, evaluasi komparatif berbasis data kuantitatif dari studi berkualitas tinggi (skor CASP/NOS ≥ 7) mengindikasikan bahwa Magnetic Flux Leakage (MFL) secara relatif menunjukkan performa yang lebih unggul dibandingkan metode NDT lain untuk aplikasi inspeksi wire rope crane industri secara umum, berdasarkan kombinasi akurasi klasifikasi (dilaporkan mencapai 95,3% dengan integrasi SVM), batas deteksi minimum LMA (1–2% pada kondisi laboratorium), dan kemampuan operasional in-situ. Namun demikian, superioritas ini bersifat kontekstual: Acoustic Emission (AE) terbukti lebih sensitif dalam mendeteksi inisiasi retak pada fase awal umur kelelahan (0–30% umur layanan), jauh sebelum MFL dapat mendeteksi kawat putus pertama; sementara Ultrasonic Guided Wave (UGW) menawarkan keunggulan yang tidak tergantikan untuk deteksi korosi internal pada wire rope panjang (>50 m). Implikasi metodologis dari temuan ini adalah bahwa pendekatan inspeksi terpadu, yakni kombinasi MFL untuk inspeksi periodik kuantitatif dengan AE untuk monitoring kondisi kontinu, berpotensi memberikan cakupan deteksi yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan metode tunggal. Penting untuk dicatat bahwa seluruh nilai performa yang dikutip bersumber dari kondisi laboratorium atau studi lapangan spesifik dan belum dikonfirmasi melalui meta-analisis statistik formal, sehingga perlu diperlakukan sebagai estimasi indikatif yang memerlukan validasi lebih lanjut.

Keempat, pola evolusi kerusakan wire rope yang mengikuti tiga fase teridentifikasi (inisiasi: 0–30%, propagasi: 30–80%, dan kritis: 80–100% umur layanan) menyediakan kerangka ilmiah yang dapat dioperasionalkan untuk perancangan interval inspeksi adaptif berbasis fase degradasi. Kerangka konseptual terintegrasi manajemen integritas wire rope crane berbasis NDT dan condition-based maintenance (CBM) yang dihasilkan dari sintesis penelitian ini merupakan kontribusi utama penelitian ini, dimaksudkan sebagai model konseptual yang dapat

menjadi titik tolak bagi penelitian empiris lanjutan. Strategi CBM yang mengintegrasikan data inspeksi NDT secara real-time menunjukkan potensi yang lebih besar dibandingkan pendekatan time-based maintenance konvensional dalam hal efisiensi biaya dan keandalan sistem, sebagaimana dilaporkan dalam beberapa studi yang dikaji. Efektivitas aktual implementasi CBM sangat bergantung pada kualitas dan konsistensi data inspeksi NDT, yang mensyaratkan standarisasi prosedur dan kalibrasi perangkat secara berkala. Agenda penelitian selanjutnya yang diprioritaskan mencakup: (1) validasi korelasi kuantitatif antara parameter sinyal MFL dengan umur sisa wire rope pada kondisi operasional industri nyata di Indonesia — hal ini merupakan hipotesis peneliti yang didasarkan pada observasi bahwa seluruh studi MFL berkualitas tinggi dalam kajian ini dilakukan di lingkungan iklim sedang (temperate) atau subtropis, sehingga terdapat celah empiris yang nyata untuk kondisi kelembapan tinggi dan suhu rata-rata tinggi khas iklim tropis Indonesia yang berpotensi mempercepat korosi dan mempengaruhi permeabilitas magnetik bahan kawat baja; (2) pengembangan dan validasi algoritma machine learning untuk interpretasi sinyal NDT multi-metode secara terintegrasi; (3) studi longitudinal untuk mengkuantifikasi efektivitas CBM berbasis NDT dibandingkan time-based maintenance pada populasi crane industri Indonesia; dan (4) pengembangan instrumen quality appraisal yang tervalidasi secara psikometrik untuk domain inspeksi rekayasa wire rope, guna mendukung systematic review masa depan yang lebih rigorous.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Verreet, "Wire rope damage and discard criteria," CASAR Drahtseilwerk Saar GmbH, Wire Rope Technology, Aachen, 2003. [Scholar]
- [2] C. R. Chaplin, "Failure mechanisms in wire ropes," *Engineering Failure Analysis*, vol. 2, no. 1, hal. 45–57, 1995. doi:10.1016/1350-6307(95)00005-5 [Scopus]
- [3] D. Zhang, X. Feng, L. Chen, dan D. Wang, "Fatigue and fretting fatigue of steel wires in wire ropes under bending loads," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 26, no. 9, hal. 815–823, 2003. doi:10.1046/j.1460-2695.2003.00671.x [Scopus]

- [4] K. Peng, H. Liu, C. Zhu, X. Song, Y. Jiang, dan J. Shi, "Effect of lubrication on fretting wear and fatigue behavior of steel wire rope," *Tribology International*, vol. 141, hal. 105945, 2020. doi:10.1016/j.triboint.2019.105945 [Scopus]
- [5] G. Fedorko, V. Molnar, J. Krešák, dan P. Peterka, "Failure analysis of steel wire ropes degraded in a corrosive environment," *Engineering Failure Analysis*, vol. 36, hal. 384–394, 2014. doi:10.1016/j.engfailanal.2013.11.012 [Scopus]
- [6] A. Zaky, M. Attia, dan A. El-Hamid, "Failure analysis of wire rope sling used in heavy lift operations," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 19, no. 3, hal. 745–751, 2019. doi:10.1007/s11668-019-00658-8 [Scopus]
- [7] A. Wahid, N. Mouhib, A. Ouardi, F. Sabah, H. Chakir, dan M. ELghorba, "Experimental prediction of wire rope damage by energy method," *Engineering Structures*, vol. 201, hal. 109794, 2019. doi:10.1016/j.engstruct.2019.109794 [Scopus]
- [8] P. Mazurek, "A comprehensive review of steel wire rope degradation mechanisms and recent damage detection methods," *Sustainability*, vol. 15, no. 6, hal. 5441, 2023. doi:10.3390/su15065441 [Scopus]
- [9] P. Zhou, G. Zhou, Z. Zhu, Z. He, X. Ding, dan C. Tang, "A review of non-destructive damage detection methods for steel wire ropes," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 13, hal. 2771, 2019. doi:10.3390/app9132771 [Scopus]
- [10] D. Zuo, Y. Peng, F. Xu, dan Y. Kang, "Acoustic emission monitoring of wire rope degradation under fatigue loading," *Engineering Structures*, vol. 220, hal. 111040, 2020. doi:10.1016/j.engstruct.2020.111040 [Scopus]
- [11] S. Liu, Y. Sun, X. Jiang, dan Y. Kang, "A review of wire rope detection methods, sensors and signal processing techniques," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 39, no. 4, hal. 85, 2020. doi:10.1007/s10921-020-00732-y [Scopus]
- [12] H. Peng, X. Ding, H. Qin, dan J. Tang, "Review of failure mechanisms of steel wire ropes under heavy-load conditions and the anti-friction effects of gel-like grease," *Gels*, vol. 11, no. 11, hal. 900, 2025. doi:10.3390/gels11110900 [Scopus]
- [13] R. Schlanbusch, E. Oland, dan E. R. Bechhoefer, "Condition monitoring technologies for steel wire ropes a review," *International Journal of Prognostics and Health Management*, vol. 8, no. 1, 2017. [Scopus]
- [14] A. Liberati, D. G. Altman, J. Tetzlaff, C. Mulrow, P. C. Gotzsche, J. P. Ioannidis, M. Clarke, P. J. Devereaux, J. Kleijnen, dan D. Moher, "The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration," *Journal of Clinical Epidemiology*, vol. 62, no. 10, hal. e1–e34, 2009. doi:10.1016/j.jclinepi.2009.06.006 [Scopus]
- [15] M. Torkar dan B. Arzenšek, "Failure of crane wire rope," *Engineering Failure Analysis*, vol. 9, no. 2, hal. 227–233, 2002. doi:10.1016/S1350-6307(01)00005-4 [Scopus]
- [16] S. Mawardi dan D. Yuliaji, "Analisis Kekuatan Tali Baja Pada Tower Crane Berkapasitas 300 Kg," *ALMIKANIK*, vol. 5, no. 2, hal. 86–92, 2023. [Sinta]
- [17] R. Andri dan H. Nurdin, "Analisis Tegangan Tarik Maksimum Wire Rope pada Hoist Crane Kapasitas 3 Ton," *MASALIQ: Jurnal Pendidikan dan Sains*, vol. 4, hal. 463–471, 2024. [Sinta]
- [18] F. Ariani dan B. S. P. N. Pulungan, "Finite Element Analysis and Root Cause Analysis of Wire Rope Failure in STS Cranes," *DINAMIS*, vol. 13, no. 2, hal. 82–87, 2025. [Sinta]
- [19] S. H. Shamsudin, N. A. Rahman, dan M. Z. Nuawi, "Failure analysis of wire rope in offshore crane: a case study," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 7, no. 4, hal. 23–29, 2018. [Scholar]
- [20] P. Peterka, J. Krešák, S. Kropuch, G. Fedorko, V. Molnar, dan M. Vojtko, "Failure analysis of hoisting steel wire rope," *Engineering Failure Analysis*, vol. 45, hal. 96–105, 2014. doi:10.1016/j.engfailanal.2014.06.025 [Scopus]
- [21] Y. Chen, Z. Qu, Y. Zhang, J. Xu, Y. He, dan J. Zhou, "Low-cycle tensile fatigue performance of a wire rope strand with an internal flaw in varied position and direction," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C*, vol. 237, no. 24, hal. 5992–6008, 2023. doi:10.1177/09544062231170494 [Scopus]
- [22] Z. Hu, E. Wang, F. Jia, dan M. Dong, "Experimental study on effect of additional torsional load on bending fatigue behavior and failure mechanism of steel wire rope," *International Journal of Fatigue*, vol. 167, hal. 107399, 2023. doi:10.1016/j.ijfatigue.2022.107399 [Scopus]
- [23] U. Pal, G. Mukhopadhyay, A. Sharma, dan S. Bhattacharya, "Failure analysis of wire rope of ladle crane in steel making shop," *International Journal of Fatigue*, vol. 116, hal. 149–155, 2018. doi:10.1016/j.ijfatigue.2018.06.030 [Scopus]
- [24] M. Giglio dan A. Manes, "Life prediction of a wire rope subjected to axial and bending loads," *Engineering Failure Analysis*, vol. 12, no. 4, hal. 549–568, 2005. doi:10.1016/j.engfailanal.2004.09.002 [Scopus]
- [25] L. K. Katiyar, M. S. Khan, dan C. Sasikumar, "The failure of a steel wire rope: a root cause

- analysis," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 24, no. 4, hal. 1699–1706, 2024. doi:10.1007/s11668-024-01895-2 [Scopus]
- [26] Y. B. Wang, G. H. Xie, P. D. Zhang, dan Y. X. Ding, "Residual strength assessment of corroded wire rope," *Corrosion Science*, vol. 52, hal. 2092–2097, 2010. doi:10.1016/j.corsci.2010.02.008 [Scopus]
- [27] I. Septiadi, "Analisa Kerusakan Wire Rope (Tali Baja) Pada Electric Hoist Di PT. Semen Padang," *Jurnal Sains dan Teknologi Keilmuan dan Aplikasi Teknologi Industri*, 2023. [Sinta]
- [28] L. Guerra-Fuentes, M. Torres-López, M. A. L. Hernandez-Rodriguez, dan E. Garcia-Sanchez, "Failure analysis of steel wire rope used in overhead crane system," *Engineering Failure Analysis*, vol. 118, hal. 104893, 2020. doi:10.1016/j.engfailanal.2020.104893 [Scopus]
- [29] P. Palit, S. K. Kushwaha, J. Mathur, dan A. K. Chaturvadi, "Life cycle assessment of wire rope used in crane application in a steel plant," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 19, no. 3, hal. 752–760, 2019. doi:10.1007/s11668-019-00647-x [Scopus]
- [30] B. Pratowo dan N. Apriansyah, "Analisis Kekuatan Fatik Baja Karbon Rendah SC10 dengan Tipe Rotary Bending," *Jurnal Teknik Mesin Universitas Bandar Lampung*, vol. 2, no. 1, hal. 49–58, 2016. [Sinta]
- [31] H. Mouradi, A. El Barkany, dan A. El Biyaali, "Steel wire ropes failure analysis: Experimental study," *Engineering Failure Analysis*, vol. 91, hal. 234–242, 2018. doi:10.1016/j.engfailanal.2018.04.024 [Scopus]
- [32] I. Kholis, "Kerusakan Crane Wire Rope dan Metode Pemeriksaannya," *Swara Patra: Majalah Ilmiah PPSDM Migas*, vol. 4, no. 2, 2014. [Sinta]
- [33] V. Shpakov dan D. Mironenko, "Electromagnetic inspection of wire ropes: principles and applications," *NDT & E International*, vol. 101, hal. 45–54, 2019. doi:10.1016/j.ndteint.2018.09.004 [Scopus]
- [34] Z. Hu, M. Dong, F. Jia, dan E. Wang, "Fatigue damage evaluation and verification of steel wire rope based on magnetic flux leakage," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 14, no. 1, hal. 223–235, 2024. doi:10.1007/s13349-023-00718-6 [Scopus]
- [35] J.-W. Kim, K. D. Tola, D. Q. Tran, dan S. Park, "MFL-based local damage diagnosis and SVM-based damage type classification for wire rope NDE," *Materials*, vol. 12, no. 18, hal. 2894, 2019. doi:10.3390/ma12182894 [Scopus]
- [36] S. Jiang, Y. Zhao, dan X. Jiang, "Quantitative evaluation of wire rope damage using MFL method based on finite element modeling," *Measurement*, vol. 152, hal. 107350, 2020. doi:10.1016/j.measurement.2019.107350 [Scopus]
- [37] B. Feng, J. Wu, H. Tu, J. Tang, dan Y. Kang, "A review of magnetic flux leakage nondestructive testing," *Materials*, vol. 15, no. 20, hal. 7362, 2022. doi:10.3390/ma15207362 [Scopus]
- [38] D. Zhang, E. Zhang, dan S. Pan, "A new signal processing method for the nondestructive testing of a steel wire rope using a small device," *NDT & E International*, vol. 114, hal. 102299, 2020. doi:10.1016/j.ndteint.2020.102299 [Scopus]
- [39] F. Xu, Y. Yang, D. Hu, dan E. Wang, "Digital twin-based condition monitoring of wire ropes in industrial cranes," *IEEE Access*, vol. 9, hal. 98345–98356, 2021. doi:10.1109/ACCESS.2021.3095640 [Scopus]
- [40] A. K. Abdul Jawwad, "Metallurgical Failure Analysis of a Steel Wire Rope Used at a Copper Smelting Facility," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 25, no. 2, hal. 567–582, 2025. doi:10.1007/s11668-025-02237-5 [Scopus]
- [41] P. Zhou, G. Zhou, L. Han, X. Yan, H. Wang, dan Z. He, "Failure analysis for hoisting wire ropes with local accumulated broken wire damage on the surface," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 37, no. 7, hal. 3459–3468, 2023. doi:10.1007/s12206-023-0617-6 [Scopus]
- [42] S. Liu, Y. Kang, Y. Sun, dan X. Jiang, "Detection of broken wires in wire rope using MFL method," *Sensors*, vol. 19, no. 19, hal. 4285, 2019. doi:10.3390/s19194285 [Scopus]
- [43] W. Wang, X. Zhang, dan Q. Zhao, "Experimental investigation on fatigue life of wire rope used in hoisting system," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 57, hal. 182–192, 2021. [Scopus]
- [44] H. Darmadi, N. Tarigan, R. Sitompul, dan D. Kurnia, "Kekuatan Lelah (Fatigue) pada Pegas Ulir Tekan di Unit Vibrating Screen Akibat Beban Siklik yang Dihasilkan oleh Getaran Bandul," *Jurnal Mekanova: Mekanik, Inovasi dan Teknologi*, vol. 10, no. 1, hal. 190–201, 2024. [Sinta]
- [45] H. Ramadhan, S. Nugroho, dan M. Tauviqirrahman, "Analisis Kegagalan pada Komponen Connecting Rod Mobil Kapasitas 1300 CC," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 9, no. 3, hal. 375–380, 2021. [Sinta]