



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



**ANALISIS KEGAGALAN LAPISAN *HARD CHROME* PADA
PERMUKAAN BATANG SILINDER HIDROLIK UNTUK PISAU
PEMOTONG DAHAN (*DELIMBING KNIFE*) PADA KEPALA PEMANEN
(*HARVESTING HEAD*)**

TESIS

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Mulyana Yusuf

2409521006

**PROGRAM STUDI MAGISTER TERAPAN
REKAYASA TEKNOLOGI MANUFAKTUR
PASCASARJANA POLITEKNIK NEGERI JAKARTA
DEPOK
JUNI 2026**



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



**ANALISIS KEGAGALAN LAPISAN *HARD CHROME* PADA
PERMUKAAN BATANG SILINDER HIDROLIK UNTUK PISAU
PEMOTONG DAHAN (*DELIMBING KNIFE*) PADA KEPALA PEMANEN
(*HARVESTING HEAD*)**

TESIS

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Mencapai Derajat Magister
Terapan dalam Bidang Rekayasa Teknologi dan Sistem Manufaktur

Disusun oleh :
Mulyana Yusuf

2409521006

**PROGRAM STUDI MAGISTER TERAPAN
REKAYASA TEKNOLOGI MANUFAKTUR
PASCASARJANA POLITEKNIK NEGERI JAKARTA
DEPOK
JUNI 2026**



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis ini saya susun tanpa tindakan plagiarisme sesuai dengan peraturan yang berlaku di Politeknik Negeri Jakarta.

Jika di kemudian hari ternyata saya melakukan tindakan plagiarism, saya akan bertanggung jawab sepenuhnya dan menerima sanksi yang diajukan Politeknik Negeri Jakarta kepada saya.

POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA

Depok, 10 Juni 2026



Mulyana Yusuf
2409521006



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis yang saya susun ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Mulyana Yusuf

NIM : 2409521006

Tanda Tangan :

Tanggal : 10 Juni 2026

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini yang diajukan oleh :

Nama : Mulyana Yusuf

NIM : 2409521006

Program Studi : Magister Terapan Rekayasa Teknologi Manufaktur

Peminatan : Manufaktur

Judul : Analisis Kegagalan Lapisan *Hard Chrome* pada Permukaan Batang Silinder Hidrolik untuk Pisau Pemotong Dahan (*Delimbing Knife*) pada Kepala Pemanen (*Harvesting Head*)

Telah diuji oleh Tim Penguji dalam sidang Tesis pada hari Jumat tanggal 3 Juli tahun 2026 dan dinyatakan LULUS untuk memperoleh Derajat Gelar Magister Terapan pada Program Studi Magister Terapan Rekayasa Teknologi Manufaktur Politeknik Negeri Jakarta.

Disetujui oleh :

Pembimbing I : Dr. Eng. Ir. Muslimin, S.T., M.T., IWE. (.....)

Pembimbing II : Dr. Dianta Mustofa Kamal, S.T., M.T. (.....)

Penguji I : Dr. Vika Rizkia, S.T., M.T. (.....)

Penguji II : Dr. Gun Gun Ramdhan Gunadi, S.T., M.T. (.....)

Penguji III : Dr. Paulus Sukusno, S.T., M.T. (.....)

Tanda tangan

Depok, 3 Juli 2026

Disahkan Oleh :



Kepala Pascasarjana Politeknik Negeri Jakarta

Prof. Dr. Tatun H.N., M. Si.

NIP. 196604161995122001



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan segala rahmat dan karunia-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tesis ini dengan judul “Analisis Kegagalan Lapisan *Hard Chrome* pada Permukaan Batang Silinder Hidrolik untuk Pisau Pemotong Dahan (*Delimbing Knife*) pada Kepala Pemanen (*Harvesting Head*)”. Tesis ini disusun untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Magister Terapan Teknik. Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, saya banyak mengalami masalah dan kesulitan, tetapi berkat bimbingan serta bantuan dari berbagai pihak maka saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Dr. Eng. Ir. Muslimin, S.T.,M.T., IWE. sebagai Pembimbing pertama Tesis saya yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberi arahan agar Tesis ini selesai.
2. Bapak Dr. Dianta Mustofa Kamal, S.T., M.T. sebagai Dosen Pembimbing kedua saya yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberi arahan agar Tesis ini selesai.
3. Seluruh dosen pengajar dan karyawan Program Pascasarjana Politeknik Negeri Jakarta yang telah memberikan ilmu dan membantu dalam proses penyusunan Tesis ini.
4. Berbagai Pihak yang telah membantu dalam penyelesaian Tesis ini. Agar penyusunan lebih sempurna, maka saya mengharapkan kritik dan saran yang membangun.

Bogor, 10 Juni 2026

Mulyana Yusuf
2409521006



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIK

Sebagai sivitas akademik Politeknik Negeri Jakarta, saya bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Mulyana Yusuf

NIM : 2409521006

Program Studi : Magister Terapan Rekayasa Teknologi Manufaktur

Jenis Karya : Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Politeknik Negeri Jakarta Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

“Analisis Kegagalan Lapisan *Hard Chrome* pada Permukaan Batang Silinder Hidrolik untuk Pisau Pemotong Dahan (*Delimbing Knife*) pada Kepala Pemanen (*Harvesting Head*)”

Beserta perangkat yang ada, dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Politeknik Negeri Jakarta berhak menyimpan, mengalih media atau mengalih formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis atau pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Bogor, 10 Juni 2026

Mulyana Yusuf

2409521006



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

ABSTRAK

Mekanisme modernisasi kehutanan sangat bergantung pada efisiensi alat berat seperti *harvester*. Komponen kritis pada *harvesting head*, yaitu batang silinder hidrolik *delimbing knife*, sering mengalami kegagalan prematur di bawah 1000 jam operasional meskipun telah dilindungi lapisan *Hard Chrome Plating (HCP)*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyebab akar masalah (*root cause*) kegagalan tersebut melalui serangkaian pengujian material. Metodologi yang digunakan meliputi inspeksi visual, pengujian kekerasan mikro *Vickers*, pengamatan mikroskop optik, serta analisis *SEM (Scanning Electron Microscope)* dan *EDS (Energy Dispersive Spectroscopy)*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kegagalan didominasi oleh mekanisme keausan abrasif dan fenomena "*Eggshell Effect*". Data pengujian kekerasan mengungkap bahwa material dasar (*substrate*) memiliki kekerasan yang rendah (267,78 – 292,42 HV) dibawah standar (300 - 350 HV), sehingga tidak mampu menopang lapisan krom yang keras namun getas saat menerima beban mekanis ekstrem dan benturan. Analisis SEM mengonfirmasi terjadinya delaminasi total pada antarmuka (*interface*) akibat penetrasi agen korosif seperti getah pohon dan kelembapan melalui retak mikro (*micro-cracks*). Disimpulkan bahwa kegagalan dipicu oleh kombinasi dukungan *substrate* yang tidak memadai dan lingkungan kerja yang agresif. Penelitian ini merekomendasikan penggunaan material dasar dengan *induction hardening* atau sistem *double layer plating* untuk meningkatkan umur pakai komponen.

Kata Kunci: Analisis Kegagalan, *Hard Chrome Plating*, Silinder Hidrolik, *Delimbing Knife*, *Eggshell Effect*.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

ABSTRACT

Forestry modernization relies heavily on the efficiency of heavy equipment such as harvesters. A critical component of the harvesting head, the delimbing knife hydraulic cylinder rod, frequently experiences premature failure in under 1,000 operational hours despite being protected by Hard Chrome Plating (HCP). This study aims to analyze the root cause of these failures through a series of material characterization tests. The methodology includes visual inspection, Vickers micro-hardness testing, optical microscopy, and SEM (Scanning Electron Microscope) with EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) analysis. The results indicate that the failure is dominated by abrasive wear mechanisms and the "Eggshell Effect" phenomenon. Hardness data reveals that the base material (substrate) possesses low hardness (267.78 – 292.42 HV) failing to meet the standard specifications of (300 - 350 HV), making it unable to support the hard yet brittle chrome layer under extreme mechanical loads and impacts. SEM analysis confirms total delamination at the interface due to the penetration of corrosive agents, such as tree sap and high humidity, through micro-cracks. It is concluded that the failure is triggered by a combination of inadequate substrate support and an aggressive working environment. This research recommends the use of induction-hardened base materials or double-layer plating systems to extend the component's service life.

Keywords: *Failure Analysis, Hard Chrome Plating, Hydraulic Cylinder, Delimbing Knife, Eggshell Effect.*



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIK	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR NOTASI DAN ISTILAH	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah Penelitian	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Sistem Hidrolik pada Alat Berat Kehutanan	6
2.1.1 Komponen dan Fungsi Silinder Hidrolik	7
2.1.2 Mekanisme Kerja <i>Delimbing Knife</i> pada <i>Harvesting Head</i>	8
2.1.3 Karakteristik Beban dan Lingkungan Kerja	8
2.2 <i>Hard Chrome Plating</i> Sebagai Metoda Pelapisan Permukaan Logam yang Digunakan (<i>Electroplating</i>)	9
2.2.1 Prinsip Dasar <i>Hard Chrome Plating</i>	10
2.2.2 Karakteristik <i>Hard Chrome</i>	10



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2.2.3 Struktur Mikro dan Fenomena <i>Micro-cracking</i>	11
2.3 Mekanisme Kegagalan Material (Tribologi & Korosi)	11
2.3.1 Keausan Abrasif (<i>Abrasive Wear</i>)	11
2.3.2 Kegagalan Adhesi (<i>Adhesive Failure</i>)	12
2.3.3 Kelelahan Permukaan (<i>Surface Fatigue</i>)	12
2.3.4 Korosi Sumuran (<i>Pitting Corrosion</i>)	12
2.4 Analisis Metalurgi dan Pengujian	13
2.4.1 Pengujian Kekerasan (<i>Hardness Testing</i>)	14
2.4.2 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) dan <i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> (EDX/EDS)	15
2.5 Kajian Literatur	17
2.6 <i>State of the Art</i> Penelitian.....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Diagram Alir Penelitian	21
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	24
3.2 Prosedur Pengambilan Data	30
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1. Visualisasi Kerusakan dan Data Operasional Lapangan.....	33
4.1.1 Batang silinder hidrolik yang mengalami kegagalan	34
4.1.2 Area spesifik pada batang silinder hidrolik yang mengalami kegagalan	35
4.2. Hasil Pengujian Struktur Mikro (<i>Metallography</i>).....	40
4.2.1 Analisis penampang melintang batang silinder (area normal).....	42
4.2.2 Analisis Mekanisme Kegagalan Induksi Korosi (<i>Area Failure</i>)	43
4.3. Hasil Pengujian <i>Micro Hardness</i> (Kekerasan).....	46
4.3.1 Analisis Pengujian Kekerasan <i>Mikro Vickers</i>	48
4.3.2 Profil Kekerasan Sampel.....	48
4.3.3 Analisis Distribusi Kekerasan	49
4.3.4 Korelasi Kekerasan dengan Kegagalan Permukaan.....	49
4.3.5 Kesimpulan Analisis Kekerasan	50
4.4. Analisis SEM (<i>Scanning Electron Microscope</i>)	50
4.4.1 Identifikasi Integritas Antarmuka yang Hilang.....	52



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.4.2 Mekanisme Patahan Berlapis (<i>Laminated Fracture</i>)	53
4.4.3. Analisis Fraktografi Getas & Mikro kavitas	54
4.5. Analisis EDS (<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>)	56
4.5.1 Area 1 (Kondisi Ideal Area Krom Murni).....	56
4.5.2 Area 2 (Kondisi Kegagalan Ekstrem)	59
4.5.3 Area 3 (Area Deformasi Diperkecil).....	63
4.6. Korelasi Kegagalan dengan Masa Pakai (<i>Life Span</i>)	66
4.6.1 Tahap Inisiasi (Awal Masa Pakai)	67
4.6.2 Tahap Propagasi (Pertengahan Masa Pakai)	67
4.6.3 Tahap Kegagalan Katastropik (Akhir Masa Pakai)	67
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran.....	70
DAFTAR PUSTAKA	72

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 :Data Rata-Rata Hasil Pengujian Kekerasan Mikro.....	48
Tabel 4.2 : Tabulasi Data Berdasarkan Mass % (<i>Persentase Massa</i>) Area 1	59
Tabel 4.3 : Tabulasi Data Berdasarkan Mass % (<i>Persentase Massa</i>) Area 2	61
Tabel 4.4 : Tabulasi Data Berdasarkan Mass % (<i>Persentase Massa</i>) Area 3	65
Tabel 4.5 : Tabulasi Data Berdasarkan Mass % (<i>Persentase Massa</i>) Dari Ketiga Area	66
Tabel 4.6 : Ringkasan Hubungan Faktor Kegagalan terhadap Umur Komponen.....	68

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 : Unit ekskavator dengan <i>extension harvesting head</i>	6
Gambar 2.2 : Silinder hidrolik.....	7
Gambar 2.3 : <i>Metallurgical microscope</i>	13
Gambar 2.4 : <i>Micro hardness tester</i>	14
Gambar 2.5 : SEM dan EDS <i>machine</i>	15
Gambar 3.1 : Diagram alir penelitian.....	21
Gambar 3.2 : Foto batang rod silinder hidrolik (bekas/gagal)	24
Gambar 3.3 : Resin <i>mounting</i>	25
Gambar 3.4 : Amplas	25
Gambar 3.5 : Pasta poles alumina.....	26
Gambar 3.6 : Etsa Nital 3%.....	26
Gambar 3.7 : Kamera DSLR.....	27
Gambar 3.8 : Mesin potong presisi	27
Gambar 3.9 : Mesin <i>grinding</i> dan <i>polishing</i>	28
Gambar 3.10 : Mikroskop Metalografi (Optik).....	28
Gambar 3.11 : SEM dan EDS <i>machine</i>	29
Gambar 3.12: <i>Vickers Microhardness Tester</i>	29
Gambar 4.1 : Spesimen batang silinder hidrolik (piston rod) dari mesin pemanen (<i>harvesting head</i>) yang gagal.....	34
Gambar 4.2 : Foto area pengelupasan lapisan.....	36
Gambar 4.3 : Foto area abrasi rod silinder	37
Gambar 4.4 : Foto area sumuran korosi (<i>corrosion pits</i>) dan <i>pitting</i>	38
Gambar 4.5 : Foto area pengelupasan lapisan.....	39
Gambar 4.6 : Foto struktur micro area kegagalan lapisan <i>hard chrom</i>	41
Gambar 4.7 : Foto struktur micro area normal.....	42
Gambar 4.8 : Foto struktur mikro <i>area failure</i>	44
Gambar 4.9 : Area pengujian <i>micro hardness</i>	46



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Gambar 4.10 : Spesimen uji <i>micro hardness test</i>	47
Gambar 4.11 : Penampang melintang antarmuka (<i>interface</i>) antara lapisan <i>hard chrome</i> dan baja dasar (<i>substrate</i>).....	51
Gambar 4.12 : Penampang antarmuka (<i>interface</i>) yang terdapat celah, memisahkan lapisan <i>hard chrome</i> dan <i>substrate</i>	52
Gambar 4.13 : Mekanisme patahan berlapis, <i>fitting</i> dan area yang terkorosi ..	54
Gambar 4.14 : Area kerusakan makro.....	55
Gambar 4.15 : Area 1 (Kondisi Ideal).....	58
Gambar 4.16 : Area 2 (Kondisi Kegagalan Ekstrem)	50
Gambar 4.17 : Area 3 (Area Deformasi Diperkecil)	64

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR NOTASI DAN ISTILAH

<i>Eggshell Effect</i>	:	Efek Kulit Telur yaitu kondisi atau fenomena kegagalan mekanis di mana suatu material memiliki lapisan luar (<i>shell</i>) yang keras, kaku, atau padat, namun lapisan dalamnya (<i>core</i>) bersifat jauh lebih lunak, rapuh, atau berongga.
<i>Kirkendall Effect</i>	:	Fenomena perpindahan antarmuka (<i>interface</i>) yang terjadi di antara dua logam yang berbeda ketika keduanya saling berdifusi pada suhu tinggi.
<i>Interface</i>	:	Permukaan mikro yang memisahkan dua fase atau dua material yang berbeda sifat kimia, struktur, maupun fisiknya.
<i>Cracking</i>	:	Fenomena terbentuknya celah, pemisahan, atau robekan pada struktur material akibat tidak mampu lagi menahan tegangan (<i>stress</i>) yang dialaminya.
<i>Pitting</i>	:	Korosi lokal yang sangat merusak, di mana serangan kimianya terkonsentrasi pada satu titik kecil sehingga menciptakan lubang atau "sumur" (<i>pit</i>) pada permukaan material.
<i>Peeling</i>	:	Fenomena terpisahnya suatu lapisan pelindung, lapisan pelapis (<i>coating</i>), atau lapisan oksida dari permukaan material dasar (<i>substrate</i>).
<i>Mirror finish</i>	:	Kondisi penyelesaian permukaan (<i>surface finishing</i>) material khususnya logam yang sangat halus, mengkilap, dan memiliki tingkat reflektifitas yang sangat tinggi hingga menyerupai cermin.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah Penelitian

Mekanisme kehutanan Indonesia kini telah memasuki fase modernisasi, dimana ketergantungan pada efisiensi alat berat menjadi kuncinya. Salah satunya yaitu *harvester* yang dilengkapi dengan *harvesting head* [1]. Seperti alat berat pada umumnya komponen alat berat pada *harvesting head* adalah sistem hidrolik yang menggerakkan berbagai fungsi, termasuk pisau *delimbing* (pemangkas dahan) [2]. Pisau ini dioperasikan oleh silinder hidrolik yang batang pistonnnya (rod) bekerja pada kondisi yang paling ekstrim. Untuk melindungi batang piston dari keausan dan korosi (*tribo-korosi*), lapisan *Hard Chrome Plating* (HCP) telah menjadi standar industri [3]. Lapisan ini diaplikasikan secara elektrokimia untuk memberikan permukaan yang keras, tahan aus, dan memiliki koefisien gesek yang rendah [4].

Batang silinder pada pisau *delimbing* terekspos pada kombinasi kondisi destruktif yang unik, tidak seperti aplikasi industri pada umumnya. Lingkungan kerja kehutanan tidak hanya basah dan lembab, tetapi juga sangat abrasif. Batang piston secara konstan bergesekan dengan serpihan kayu, kulit kayu, kotoran, dan lumpur. Selain itu, paparan terhadap getah pohon yang bersifat asam menambah tingkat korosifitas lingkungan. Kegagalan dini pada lapisan *Hard Chrome*, seperti retak (*cracking*), korosi lubang (*pitting*), dan pengelupasan (*peeling*), sering terjadi pada batang rod silinder pisau *delimbing*. Kegagalan ini menyebabkan kebocoran oli hidrolik yang merusak *seal* dan mencemari lingkungan, serta mengakibatkan *downtime* alat berat yang sangat merugikan secara finansial [5].

Penelitian mengenai integritas dan mekanisme kegagalan lapisan pelindung permukaan telah menjadi fokus utama dalam upaya meningkatkan durabilitas komponen hidrolik dan alat berat. Kegagalan *hard chrome* pada batang piston sering kali berawal dari retak mikro yang memicu korosi dan pengelupasan [6]. Korosi galvanik pada dongkrak hidrolik terjadi akibat masuknya media korosif

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

melalui pori-pori dan retakan bawaan [7]. Fenomena ini diperumit oleh faktor beban termal dan mekanis ekstrem yang dapat melunakkan matriks logam induk sehingga mempercepat pelepasan lapisan [8]. Kondisi operasional lapangan dengan beban gesek tinggi memicu retak mikro yang menjadi jalur masuk partikel abrasif [9]. Sehingga sejalan dengan perilaku *tribocorrosion* akibat kombinasi korosi dan keausan simultan [10]. Temuan terkait densitas retak mikro (*crack density*) memiliki peran yang lebih menentukan terhadap kecepatan pengelupasan dibandingkan faktor kekerasan semata [4]. Dimana tegangan sisa pada proses pelapisan baja AISI 1045 dengan ketebalan lapisan 93 μ m menimbulkan *microcrack density* mencapai 5.4%[11].

Pengembangan pelapisan Fe-Cr-Ni bebas retak berbasis kromium trivalent telah dilakukan, sebagai upaya mitigasi dan pencarian solusi ramah lingkungan [12]. Efisiensi metode *magnetron sputtering* dan *kinetic metallization* terhadap elektroplating konvensional telah dibandingkan [13][14]. Yang dinilai rentan terhadap abrasi mikro dan memiliki efek karsinogenik [15]. Inovasi metode pelapisan juga dieksplorasi melalui *ultra-high-speed laser cladding* [16]. Dan melalui nanokomposit Ni/W-SiC untuk meningkatkan performa mekanis [17]. Meskipun demikian, *hard chrome* tetap menunjukkan keunggulan fungsional tertentu, ditemukan peningkatan umur pakai hingga belasan kali lipat pada aplikasi industri [18], dimana pentingnya lapisan ini dalam mendukung pembentukan film oli yang optimal pada sistem penyegelan hidrolik [5].

Keberhasilan aplikasi pelapisan ini sangat bergantung pada aspek teknis dan preparasi permukaan. Optimasi rapat arus dan waktu pelapisan untuk menghindari lapisan yang kasar dan rapuh menjadi faktor penting [19]. Sementara pelapisan yang terlalu tebal dapat memicu pelepasan hidrogen dan penyusutan volume yang menyebabkan retakan [20]. Selain itu, kualitas akhir sangat bergantung pada kehalusan dan aktivasi permukaan sebelum proses penyepuhan [21][22]. Hal ini diperkuat oleh parameter *sandblasting* menggunakan *steel grit* G25 sangat menentukan kualitas adhesi [23][24]. Dan perbandingan performa dengan material lain seperti tungsten karbida (WC-Co) yang telah dilakukan secara signifikan

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

[25][26], serta ketahanan erosi superior krom terhadap pengaruh perlakuan panas [27], menjadi landasan krusial bagi penelitian ini dalam menganalisis kegagalan spesifik pada unit *delimbing knife* yang beroperasi di lingkungan kehutanan yang agresif.

Penelitian ini akan mengisi kesenjangan dari penelitian tersebut dengan menganalisis kegagalan lapisan *Hard Cr* pada konteks yang berbeda, yaitu di lingkungan kehutanan yang sangat lembab dan abrasif. analisis forensik material yang komprehensif dan terverifikasi pada lapisan *Hard Cr* yang gagal di lingkungan spesifik *delimbing knife*, sebuah aplikasi dengan profil beban tribo-korosi dampak yang ekstrem dan belum dikaji.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, masalah penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Apakah modus kegagalan dominan yang terjadi pada lapisan *hard chrome plating* di batang silinder hidrolik pisau *delimbing*?
2. Apakah faktor penyebab utama kegagalan adalah korosi kimiawi, keausan abrasif, atau interaksi sinergis antara keduanya (tribo-korosi)?
3. Bagaimana mekanisme kegagalan tersebut berlangsung, mulai dari tahap inisiasi retak hingga terjadinya pengelupasan (*peeling*) lapisan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi dan mengkarakterisasi modus kegagalan dominan apakah pengelupasan, korosi lubang atau retak pada sampel batang silinder yang gagal.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2. Menganalisis faktor penyebab utama kegagalan dengan membandingkan data pengujian dari area yang rusak dan area yang masih utuh.
3. Merekonstruksi dan menjelaskan mekanisme progresif kegagalan tribo-korosi pada lapisan *hard chrome plating* di lingkungan kehutanan.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Objek penelitian terbatas pada batang silinder hidrolik bekas (gagal) dari unit pisau *delimbing* pada *harvesting head*.
2. Analisis kegagalan difokuskan pada kerusakan lapisan *hard chrome plating* dan antarmuka (interface) antara lapisan dan material dasar (substrat).
3. Metode analisis kegagalan yang digunakan mengacu pada metodologi studi kasus, meliputi inspeksi visual, metalografi (mikroskop optik), *Scanning Electron Microscope* (SEM), *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS), dan uji kekerasan mikro *Vickers*.
4. Penelitian ini adalah studi analisis kegagalan (*failure analysis*) dan tidak melakukan perancangan ulang atau pengujian lapisan alternatif, namun akan memberikan rekomendasi berdasarkan temuan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian dilakukan untuk memberikan solusi teknis yang akurat dalam mengidentifikasi akar masalah kegagalan batang silinder, sehingga mampu meminimalisir *downtime* mesin dan menekan biaya operasional akibat penggantian komponen yang prematur. Dan hasil analisis ini dapat berkontribusi pada pemahaman mekanisme tribo-korosi di lingkungan ekstrem serta menjadi dasar rekomendasi strategis dalam menentukan prosedur perawatan preventif dan pemilihan spesifikasi material yang lebih tahan lama bagi industri perhutanan.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada Tesis ini terdiri dari lima bab sebagai berikut:

1. BAB I PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan yang menjadi dasar penentuan adanya topik ini.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas studi pustaka, landasan teori dan penelitian yang terkait *failure analysis*, pelapisan *Hard Chrome* maupun *tribologi* yang serupa namun memiliki aspek-aspek yang berbeda baik dari aplikasi, cara, metode, atau alat yang digunakan.

3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan diagram alir penelitian, metode yang digunakan, dan langkah-langkah kerja yang dilakukan dalam analisis kegagalan lapisan *hard chrome* pada permukaan batang silinder hidrolik untuk pisau pemotong dahan (*delimbing knife*).

4. BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi pembahasan tentang hasil analisis kegagalan lapisan *hard chrome* pada permukaan batang silinder hidrolik untuk pisau pemotong dahan (*delimbing knife*).

5. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian dan saran untuk penelitian dan pihak terkait selanjutnya.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data yang telah dilakukan terhadap kegagalan lapisan *hard chrome* pada batang silinder hidrolik *delimbing knife*, terdapat beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Mekanisme Kegagalan Utama

Kegagalan pada batang silinder diawali oleh mekanisme keausan abrasi dan beban kejut (*impact*) operasional yang menyebabkan timbulnya retak mikro (*micro-cracks*) bawaan alami proses *electroplating* dan retak makro pada lapisan *hard chrome*. Retakan ini menjadi jalur penetrasi bagi agen korosif (getah pohon dan kelembapan) yang memicu korosi sumuran (*pitting*) dan korosi di bawah lapisan (*under-layer corrosion*).

2. Penyebab Akar Masalah (*Root Cause*)

Ditemukan adanya fenomena "*Eggshell Effect*", di mana lapisan *hard chrome* yang sangat keras dan tebal (60 μm) tidak didukung oleh kekerasan material dasar (*substrate*) yang memadai. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan nilai rata-rata *substrate* hanya berkisar antara 267,78 HV hingga 292,42 HV. Kekerasan yang relatif rendah ini menyebabkan deformasi plastis mikro pada baja dasar saat menerima beban berat, sehingga lapisan krom yang getas di atasnya retak dan kehilangan ikatan metalurgi.

3. Rekonstruksi Mekanisme Progresif Kegagalan Tribo-Korosi pada Lapisan Hard Chrome Plating di Lingkungan Kehutanan.

Analisis SEM mengonfirmasi terjadinya delaminasi total pada antarmuka (*interface*) antara krom dan baja. Pola patahan bersifat getas dan berlapis (*laminated fracture*), yang menunjukkan bahwa kegagalan akhir dipicu oleh

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

kombinasi tekanan mekanis dinamis dan pelemahan struktur akibat korosi di bawah lapisan.

4. Korelasi Masa Pakai

Umur pakai (*life span*) batang silinder menjadi jauh lebih pendek dari standar desain akibat percepatan degradasi material yang dimulai dari sisi luar (abrasi) dan diperparah dari sisi dalam (korosi substrate).

5.2 SARAN

Untuk meningkatkan masa pakai dan keandalan batang silinder hidrolik pada unit *harvesting head*, disarankan beberapa langkah perbaikan sebagai berikut:

1. Peningkatan Spesifikasi Material Dasar

Disarankan untuk menggunakan material dasar dengan kekerasan yang lebih tinggi dan melalui proses *Induction Hardening* pada baja S45C atau penggunaan baja paduan AISI 4140 yang di-*quench & temper*, guna memberikan dukungan fondasi yang lebih kaku bagi lapisan krom .

2. Modifikasi Sistem Pelapisan

Mempertimbangkan penggunaan sistem pelapisan ganda (*Double Layer Plating*), seperti aplikasi lapisan Nikel sebelum *Hard Chrome*. Lapisan Nikel akan berfungsi sebagai penghalang (*barrier*) korosi yang lebih efektif meskipun lapisan krom mengalami retakan [67].

3. Optimalisasi Perawatan Preventif

Meningkatkan frekuensi pemeriksaan dan penggantian komponen *wiper seal* pada silinder untuk meminimalkan masuknya kontaminan abrasif (debu, pasir dan serpihan atau serbuk kayu) yang memicu keausan abrasi dini.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4. Penelitian Lanjutan

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai keseimbangan kekerasan material substrat agar dapat mendukung pelapisan *electroplating* dan juga pengaruh variasi arus listrik dan suhu pada proses *electroplating* terhadap densitas retak mikro (*crack density*) untuk mendapatkan keseimbangan antara ketahanan aus dan ketahanan korosi yang lebih baik.





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Nainggolan, H. B. Woesono, K. R. Kusumaningsih, P. S. Kehutanan, F. Kehutanan, and I. Yogyakarta, "Analisis Perbandingan Pengalaman Operator Menggunakan Harvester Terhadap Produktivitas Tebangan pada Kelerengan yang Berbeda di PT . Riau Andalan Pulp And Paper , Estate Teso," vol. 3, pp. 610–614, 2025.
- [2] A. Halim, "KINERJA SISTIM HIDROLIK PADA UNIT EXCAVATOR 320D2," vol. 15, no. 2, pp. 1165–1174, 2024, doi: 10.21776/jrm.v15i2.1756.
- [3] R. C. Singh, "and repair", doi: 10.1088/1757-899X/327/3/032008.
- [4] M. Eckert, "Tribological Characterization of Electrolytic Hard Chrome Coatings," *Acta Mech. Slovaca*, vol. 25, no. 4, pp. 10–15, 2021, doi: 10.21496/ams.2021.021.
- [5] F. Bauer, O. Feuchtmüller, and H. Lothar, "Tribology International Oil film generation of a hydraulic rod seal: an experimental study using ellipsometry," vol. 162, no. February, pp. 0–3, 2021, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107102.
- [6] J. Wang *et al.*, "Failure Analysis of a Chromium Plating Layer on a Piston Rod Surface and the Study of Ni-Based Composite Coating with Nb Addition by Laser Cladding," *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 7, pp. 1–23, 2022, doi: 10.3390/met12071194.
- [7] Q. Zhang, J. Wang, W. Shen, F. Huang, and Y. Zhao, "Failure Analysis of Chromium Plating Layer on the Surface of the Piston Rod of the Hydraulic Jack," *Coatings*, vol. 12, no. 6, pp. 1–10, 2022, doi: 10.3390/coatings12060774.
- [8] Z. M. Wang, C. D. Hu, Y. X. Wang, H. C. Lu, J. S. Li, and H. Dong, "Failure mechanism of gun barrel caused by peeling of Cr layer and softening of bore



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- matrix,” *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 2, pp. 1–10, 2021, doi: 10.3390/met11020348.
- [9] E. P. Georgiou *et al.*, “High performance accelerated tests to evaluate hard cr replacements for hydraulic cylinders,” *Coatings*, vol. 11, no. 12, pp. 1–11, 2021, doi: 10.3390/coatings11121511.
- [10] M. H. Staia, A. Mejias, S. Kossman, and E. S. Puchi-Cabrera, “Tribocorrosion Performance of WC-12Co HVOF-Sprayed Coatings Reinforced with Carbon Nanotubes,” *Crystals*, vol. 13, no. 3, 2023, doi: 10.3390/cryst13030457.
- [11] V. P. Nguyen, H. T. Dang, N. Phi, L. Nguyen, and C. C. Le, “Study on microcracks ’ density and residual stress of the hard chrome electroplating layer in the AISI 1045 steel,” *Can. Metall. Q.*, pp. 1–8, 2024, doi: 10.1080/00084433.2024.2398914.
- [12] V. Meinhold, D. Höhlich, T. Mehner, and T. Lampke, “Electrodeposition of Thick and Crack-Free Fe-Cr-Ni Coatings from a Cr (III) Electrolyte,” *Coatings*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.3390/coatings12010056.
- [13] A. Merlo and G. Léonard, “Magnetron sputtering vs. Electrodeposition for hard chrome coatings: A comparison of environmental and economic performances,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 14, 2021, doi: 10.3390/ma14143823.
- [14] A. Meghwal *et al.*, “Surface & Coatings Technology Mechanical performance and residual stress of WC-Co coatings manufactured by Kinetic Metallization TM,” *Surf. Coat. Technol.*, vol. 421, no. May, p. 127359, 2021, doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127359.
- [15] G. Chişiu, R. A. Gheţa, A. M. Stoica, and N. A. Stoica, “Comparative Micro-Scale Abrasive Wear Testing of Thermally Sprayed and Hard Chromium Coatings,” *Lubricants*, vol. 11, no. 8, pp. 1–13, 2023, doi: 10.3390/lubricants11080350.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- [16] I. Coatings and Y. Ding, "A Comparative Study on Microstructure and Properties of Ultra-High-Speed Laser Cladding and Traditional Laser," 2022.
- [17] N. W. Nanocomposite, M. Steel, Z. Zhu, L. Zou, H. Li, and H. Zhang, "Preparation and Characterization of Pulse Electrodeposited," 2023.
- [18] T. Investigation, O. F. Tungsten, and C. R. Application, "TRIBOLOGICAL INVESTIGATION OF TUNGSTEN CARBIDE AND HARD CHROME COATINGS ON EN19 FOR," vol. 3, pp. 197–205, 2024.
- [19] I. U. Hasanah, "The Effect of Current Density and Hard Chrome Coating Duration on the Mechanical and Tribological Properties of AISI D2 Steel," *J. Mater. Explor. Find.*, vol. 2, no. 2, 2023, doi: 10.7454/jmef.v2i2.1033.
- [20] A. S. Nugroho, R. D. Ramdan, F. Sasmita, S. Rodotun, and A. Ramelan, "MACROCRACK-FREE THICK CHROMIUM DUPLEX PLATING FOR," vol. 12, pp. 42–51, 2022, doi: 10.15587/1729-4061.2022.258728.
- [21] M. A. Mekicha, M. B. De Rooij, D. T. A. Matthews, C. Pelletier, L. Jacobs, and D. J. Schipper, "Tribology International The effect of hard chrome plating on iron fines formation," *Tribol. Int.*, vol. 142, no. August 2019, p. 106003, 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2019.106003.
- [22] D. V. Ardashev and A. S. Degtyareva-Kashutina, "Technological Aspects of Applying High-Quality Hard Chrome Coating To Titanium Parts for the Oil and Gas Industry," *SOCAR Proc.*, vol. 1, no. 1, pp. 44–47, 2022, doi: 10.5510/OGP2022SI100699.
- [23] A. M. Muhamad, "PENGUNAAN STEEL GRIT G25 PADA SANDBLASTING BAJA KARBON RENDAH JIS-G3101-SS400," vol. 17, no. 3, pp. 251–258, 2018.
- [24] M. Muslimin, A. M. Muhamad, F. Triawan, and A. B. Dani, "Surface characteristics of low carbon steel JISG3101SS400 after sandblasting process by steel grit G25," vol. 10, pp. 193–204, 2020, doi:



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- 10.36909/jer.10091.
- [25] V. Dhinakaran and T. Jagadeesha, "Materials Today: Proceedings Tribological characterization of electrolytic hard chrome & WC-CO coatings," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, pp. 4–7, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.197.
- [26] D. R. Y. Sliding, W. Investigation, O. F. Hard, and R. Application, "DRY SLIDING WEAR INVESTIGATION OF HARD CHROME AND NICKEL COATING ON EN19 FOR," vol. 2, pp. 147–154, 2024.
- [27] A. Gonz, J. Asensio-lozano, Á. Florentino, and A. Garc, "Evaluation of Hardness , Sliding Wear and Strength of a Hypoeutectic White Iron with 25 % Cr after Heat Treatments," pp. 1–16, 2021.
- [28] "Using harvester data from on-board computers a review of key.pdf."
- [29] J. Van Der Merwe, R. Pulkki, and P. Ackerman, "Fibre losses during debranching and debarking of Eucalyptus pulp logs using a single-grip harvester Fibre losses during debranching and debarking of Eucalyptus pulp logs using a single-grip harvester," no. March 2016, 2015, doi: 10.2989/20702620.2015.1077416.
- [30] S. P. Dwivedi *et al.*, "Recovery of Cr from chrome - containing leather wastes to develop aluminum - based composite material along with Al₂O₃ ceramic particles : An ingenious approach," pp. 3218–3234, 2022.
- [31] M. Yunaeti, V. Vitry, A. Montagne, and M. H. Staia, "Replacing Toxic Hard Chrome Coatings: Exploring the Tribocorrosion Behaviour of Electroless Nickel-Boron Coatings," *Coatings*, vol. 13, no. 12, 2023, doi: 10.3390/coatings13122046.
- [32] V. Gilhotra *et al.*, "Electrochemical treatment of high strength chrome bathwater : A comparative study for best-operating conditions," *Clean. Eng. Technol.*, vol. 2, no. February, p. 100093, 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100093.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- [33] S. Kumar, V. R. Gaval, and M. Pabbarram, "COLD ROLLING PROCESS THROUGH HARD-," vol. 3, pp. 7–15, 2025.
- [34] C. Zhong, G. Backes, L. M. Johann, J. Kittel, T. Schopphoven, and W. Küppers, "Development of a novel green coating process with laser," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–9, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-10351-4.
- [35] S. Sun, Z. Wu, M. Pang, J. Chang, Y. Xuan, and H. Qi, "Microstructure and corrosion behavior of chromium-rich stainless steel coatings deposited by different laser cladding processes," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 29, no. December 2023, pp. 3879–3890, 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.02.044.
- [36] J. Tuominen, J. Kiviö, C. Balusson, L. Raami, J. Vihinen, and P. Peura, "High-speed laser cladding of chromium carbide reinforced Ni-based coatings," 2023. doi: 10.1007/s40194-023-01557-9.
- [37] T. Varis, J. Lagerbom, T. Suhonen, and S. Terho, "On the Applicability of Iron-Based Coatings Against Abrasion and Cavitation Erosion Wear," *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 32, no. 2, pp. 473–487, 2023, doi: 10.1007/s11666-022-01517-7.
- [38] F. Zhao, H. Hu, J. Yu, J. Lai, and H. He, "Mechanical and Tribological Properties of Ni-B and Ni-B-W Coatings Prepared by Electroless Plating," 2023.
- [39] P. Huang, C. Chou, and L. Hsu, "Surface & Coatings Technology Preparation and tribological research of the electrodeposited Ni – W alloy coatings for piston ring application," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 411, no. February, p. 126980, 2021, doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.126980.
- [40] R. Developments, "Advancements in Nickel-Phosphate / Boron Based Electroless Composite Coatings : A Comprehensive Review of Mechanical," 2023.
- [41] Z. Li *et al.*, "Enhanced Mechanical and Tribological Capabilities of a Silicon Aluminum Alloy with an Electroplated Ni–Co–P/Si₃ N₄ Composite

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Coating,” *Metals (Basel)*., vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.3390/met12010120.
- [42] R. Tu *et al.*, “on Microstructure , Mechanical and Anti-Corrosive Properties of Cr 2 N / TiN Multilayer Coatings,” 2022.
- [43] J. Nyman, “Composition, structure, and mechanical properties of cathodic arc deposited Cr-rich Cr-N coatings,” no. June 2008, 2023, doi: 10.1116/6.0002366.
- [44] M. Wu *et al.*, “Study on wear resistance and corrosion resistance of hvof surface coating refabricate for hydraulic support column,” *Coatings*, vol. 11, no. 12, 2021, doi: 10.3390/coatings11121457.
- [45] W. Tillmann, L. Hagen, I. Baumann, and M. Paulus, “WC Decomposition Phenomena in ID-HVOF-Sprayed WC-CoCr Coatings Using Fine Powder Feedstock,” *Coatings*, vol. 12, no. 2, pp. 1–9, 2022, doi: 10.3390/coatings12020124.
- [46] G. J. Naveen, P. Sampathkumaran, A. Sathyanarayanawamy, and A. Lakshmikanthan, “Analyzing microstructural features, surface topography, and scratch resistance of innovative nano-composites coated with high velocity air-fuel technology,” *Frat. ed Integrita Strutt.*, vol. 17, no. 66, pp. 178–190, 2023, doi: 10.3221/IGF-ESIS.66.11.
- [47] S. Batwa, A. Nourian, S. Julien, and D. Brennan, “Microstructure and Mechanical Properties of Cold-Sprayed Ni / CrC-NiCr Composites with Varying Binder Phases,” 2024, doi: 10.1007/s11666-024-01893-2.
- [48] B. F. A. Bezerra *et al.*, “Surface & Coatings Technology Microstructure and tribological performance of WC-Co cermet strengthened nickel alloy composite coatings manufactured by extreme high-speed laser cladding (EHLA),” *Surf. Coat. Technol.*, vol. 512, no. May, p. 132390, 2025, doi: 10.1016/j.surfcoat.2025.132390.
- [49] S. Kurbanbekov, B. Rakhadilov, D. Kakimzhanov, and B. Seitov, “Characteristics of the Cr 3 C 2 -NiCr Composite Coating Deposited by the



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HVOF Method on E110 Zirconium Alloy,” 2024.

- [50] C. H. Dou *et al.*, “Journal of Materials Science & Technology The Kirkendall effect on erosion resistance of chrome-coated 25Cr3Mo2WNiV and 30SiMn2MoV gun barrel steels,” vol. 177, pp. 246–255, 2024, doi: 10.1016/j.jmst.2023.07.062.
- [51] Y. Xu *et al.*, “The Effect of Heat Treatment on Phase Structure and Mechanical and Corrosion Resistance Properties of High Tungsten Ni-W Alloy Coating,” 2023.
- [52] M. A. Mekicha, M. B. De Rooij, T. Mishra, D. T. A. Matthews, L. Jacobs, and D. J. Schipper, “Study of wear particles formation at single asperity contact : An experimental and numerical approach,” *Wear*, vol. 470–471, no. September 2020, p. 203644, 2021, doi: 10.1016/j.wear.2021.203644.
- [53] A. Mechanics, V. Dimitrov, V. K. Dimitrova, and G. S. Zdravcheva, “SIMULATIVE MODELING AND ANALYSIS OF THERMO-MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROCESSES IN ELECTRO-CHEMICALLY RIFLED FIREARM BARRELS WITH ANODIZED AND,” vol. 1, no. 21, 2025.
- [54] E. A. D. S. de Almeida, J. C. G. Milan, C. E. da Costa, C. Binder, J. D. B. de Mello, and H. L. Costa, “Combined use of surface texturing, plasma nitriding and DLC coating on tool steel,” *Coatings*, vol. 11, no. 2, pp. 1–22, 2021, doi: 10.3390/coatings11020201.
- [55] Y. Liang *et al.*, “Effect of Material Selection and Surface Texture on Tribological Properties of Key Friction Pairs in Water Hydraulic Axial Piston Pumps : A Review,” 2023.
- [56] J. L. G. Jr, J. D. B. De Mello, and H. L. Costa, “Tribological behaviour of alternative surface modifications for cold rolling mill rolls,” *Wear*, vol. 470–471, no. October 2020, p. 203614, 2021, doi: 10.1016/j.wear.2021.203614.
- [57] O. A. Z. D. S. García and S. A. R. J. J. Coronado, “The Mild-Severe Wear



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Transition in Erosion Wear,” *Tribol. Lett.*, vol. 0, no. 0, p. 0, 2018, doi: 10.1007/s11249-018-1046-6.

- [58] J. Tuominen, J. Näkki, H. Pajukoski, J. Miettinen, T. Peltola, and P. Vuoristo, “Wear and corrosion resistant laser coatings for hydraulic piston rods Wear and corrosion resistant laser coatings for hydraulic piston rods,” vol. 022009, 2015, doi: 10.2351/1.4914503.
- [59] P. Kumar *et al.*, “A Review of Hydraulic Cylinder Faults , Diagnostics , and Prognostics,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol.*, no. 0123456789, 2024, doi: 10.1007/s40684-024-00639-3.
- [60] A. History, “Hydraulic systems are an important part of heavy equipment such,” vol. 10, no. 5, 2025.
- [61] T. Dasar, “ANALISA KERUSAKAN SILINDER HIDROLIK PADA EXCAVATOR HITACHI EX 200 LC DENGAN METODE FISHBONE DI PT . ALHAS JAYA GROUP,” vol. 3, no. 1, pp. 1–4, 2019.
- [62] M. H. Kurniawan and K. K. Ayuningtiyas, “Mechanical Xplore (JTMMX) The Influence of Seal Kit Performance on the Pressure of Hydraulic Press Part Roll Cylinder in the Paper Industry,” vol. 4, no. 1, pp. 27–36, 2023.
- [63] C. Liu, S. Huang, Y. Chu, T. Yang, H. Yen, and I. Cheng, “Tribocorrosion Behavior of Medium-Entropy Super Austenitic Stainless Steel in Acidic Environments,” pp. 1–17, 2025.
- [64] S. L. Sankar, G. A. Kumar, and P. Kuppusami, “Surface Modification of EN353 Gear Material by Chromium Plating and Plasma Nitriding to Improve Surface Properties , Corrosion and Wear Resistance,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 17, no. 1, p. 220146, 2022, doi: 10.20964/2022.0.48.
- [65] L. Falat, M. Džupon, and M. Tavodov, “Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Various Alloy Hardfacings for Application on Heavy-Duty Chipper Tools in Forestry Shredding and”.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- [66] E. S. Sungkai, S. Barat, N. Annisa, I. Leilani, and E. Putri, “Mikroklimat di Hutan dan Tempat Terbuka di Kawasan Program Studi Biologi , Universitas Negeri Padang,” vol. 8, pp. 18510–18519, 2024.
- [67] J. Li *et al.*, “The Hardness and Corrosion Properties of Trivalent Chromium Hard Chromium,” pp. 1014–1026, 2017, doi: 10.4236/msa.2017.813074.

