KARAKTERISASI DAN PENINGKATAN PERFORMA ROLL HEATER IMPOR MELALUI PROSES QUENCHING

Andry Ervana

Program Magister Teknik Mesin, Program Pascasarjana, Universitas Pasundan Bandung

ABSTRAK

Komponen roll heater (sealer vertikal dan horizontal) merupakan elemen kritis dalam sistem pengemasan fleksibel (flexible packaging) kontinu pada industri manufaktur. Ketergantungan terhadap suku cadang orisinal impor asal Jepang menimbulkan beban operasional signifikan akibat tingginya biaya investasi (mencapai belasan hingga puluhan juta rupiah per set) dan waktu tunggu pengadaan (lead time) impor yang lama (12–24 minggu) sehingga memicu peningkatan waktu henti lini produksi (unplanned downtime). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik metalurgi material dasar (base metal) komponen roll heater bekas pakai serta merumuskan parameter perlakuan panas celup cepat (quenching) sebagai metode perpanjangan umur pakai (lifetime extension) berbasis rekayasa balik (reverse engineering). Karakterisasi dilakukan melalui uji komposisi kimia spektrometri emisi optik (Spark-OES) mengacu pada ASTM E415, pemetaan kekerasan makro Rockwell C (HRC) pada 144 titik uji dari 12 sampel mengacu pada ASTM E18, serta evaluasi metalografi optik fasa mikrostruktur mengacu pada ASTM E3 dan ASTM E407. Hasil analisis kimia OES menunjukkan bahwa material dasar tergolong ke dalam baja karbon menengah (medium carbon steel) setara grade AISI 1045 / JIS S45C (kadar C 0,488%) dan AISI 1050 / JIS S50C (kadar C 0,504%–0,509%) dengan nilai Carbon Equivalent (CE IIW) berkisar 0,642%–0,685%. Pemetaan kekerasan awal mengungkap degradasi mekanis ekstrem pada permukaan kerja dengan penurunan nilai kekerasan hingga 11,5–19,3 HRC akibat fenomena pelunakan termal (thermal softening) berkepanjangan. Struktur mikro area lunak tersebut didominasi oleh fasa ferit proeutektoid bebas masif dan perlit kasar terorientasi (banded structure). Setelah dilakukan pemanasan ulang di atas temperatur austenitisasi (>820°C) dan pendinginan cepat (water quenching), struktur mikro bertransformasi sempurna menjadi fasa martensit jarum rapat (interlocking lath martensite). Validasi pengerasan menyeluruh (full hardening) pada komponen aktual berskala industri di PT Techno Metal Industry membuktikan ketercapaian nilai kekerasan permukaan sebesar 52 HRC (memenuhi target spesifikasi 52–55 HRC) dengan kondisi bersih tanpa cacat (no defect) dan bebas retak termal (crack-free). Pendekatan perlakuan panas ulang ini terbukti mampu menghemat biaya pengadaan suku cadang sebesar 89%–91%.

Kata Kunci: Roll heater, AISI 1045, AISI 1050, Quenching, Martensit jarum, Rockwell C, Reverse engineering.

Komponén roll heater (panyégél vértikal sareng horizontal) mangrupikeun bagian anu penting pisan dina sistem bungkusan fléksibel (flexible packaging) mayeng dina industri manufaktur. Gumantungna pabrik di jero nagri kana suku cadang orisinil impor ti Jepang nimbulkeun bangbaluh gedé, utamina perkawis awisna waragad pangadaan (ngahontal puluhan juta rupiah saban setna) sarta lilana waktu nungguan barang sumping (lead time 12–24 minggu) anu ngabalukarkeun ngaronjatna waktu eureun mesin (downtime). Ieu panalungtikan miboga tujuan pikeun mikanyaho pasipatan metalurgi bahan dasar (base metal) komponén

impor urut sarta ngararancang parameter perlakuan panas sepuh celup gancang (quenching) minangka tarékah pikeun manjangan umur paké komponén (lifetime extension) dumasar kana rékayasa malik (reverse engineering). Pamariksaan komposisi kimia ngagunakeun Optical Emission Spectrometry (OES) dumasar kana ASTM E415, pemetaan karasa makro Rockwell C (HRC) dina 144 titik uji tina 12 conto dumasar kana ASTM E18, sarta niténan fasa struktur mikro dumasar kana ASTM E3 jeung ASTM E407. Hasil tés OES nuduhkeun yén bahan dasar komponén kagolongkeun kana waja karbon sedeng (medium carbon steel) anu sapuk jeung kelas AISI 1045 / JIS S45C (kadar C 0,488%) sarta AISI 1050 / JIS S50C (kadar C 0,504%–0,509%) kalayan ajén Carbon Equivalent (CE IIW) 0,642%–0,685%. Pemetaan karasa awal némbongkeun turunna karasa anu ékstrim dina beungeut kontak nepi ka ngan saukur 11,5–19,3 HRC alatan ayana pelunakan termal (thermal softening). Struktur mikro daérah empuk ieu didominasi ku fasa férit proeutéktoid bébas masif sarta struktur pita perlit kasar (banded structure). Sabada dipanaskeun saluhureun suhu austenitisasi (>820°C) sarta ditiiskeun gancang (water quenching), struktur mikro robah sacara sagemblengna jadi fasa martensit jarum rapet (interlocking lath martensite). Uji coba prosés sepuh sagemblengna (full hardening) skala industri di PT Techno Metal Industry ngabuktikeun kahontalna karasa beungeut 52 HRC (saluyu jeung pamundut spésifikasi 52–55 HRC) kalayan kaayaan beresih, bébas karat, sarta henteu nimbulkeun cacad rengat termal (crack-free). Métode rékayasa ieu kabukti sanggup ngurangan waragad pameseran suku cadang dugi ka 89%–91%.

Kecap Konci: Roll heater, AISI 1045, AISI 1050, Quenching, Lath martensite, Tingkat karasa Rockwell C, Rékayasa malik.

Roll heater components (vertical and horizontal rotary sealers) serve as critical thermal-mechanical tooling within continuous flexible packaging machinery in modern manufacturing plants. High reliance on original equipment manufacturer (OEM) replacement parts imported from Japan imposes substantial operational risks, characterized by exorbitant capital expenditures (tens of millions of IDR per set) and prolonged delivery lead times (12 to 24 weeks), inevitably elevating unplanned production downtime. This study aims to systematically characterize the metallurgical properties of degraded imported roll heater substrates and establish an optimized re-quenching heat treatment protocol as an engineering lifetime extension strategy via reverse engineering. Analytical procedures comprised spark Optical Emission Spectrometry (OES) per ASTM E415, Macro-Rockwell C hardness mapping across 144 testing points on 12 specimens per ASTM E18, and optical metallographic microstructure examination per ASTM E3 and ASTM E407. Chemical composition analysis classified the substrate materials as plain medium carbon steels equivalent to AISI 1045 / JIS S45C (C = 0.488%) and AISI 1050 / JIS S50C (C = 0.504%–0.509%), with Carbon Equivalent values (CE IIW) ranging from 0.642% to 0.685%. Initial hardness mapping revealed severe localized mechanical softening down to 11.5–19.3 HRC along the working contact zones caused by cumulative thermal degradation. The degraded microstructure was dominated by massive proeutectoid ferrite networks and coarse banded pearlite colonies. Following full austenitizing above 820°C and subsequent rapid water quenching, the microstructure transformed completely into an acicular, interlocking needle-like lath martensite matrix. Industrial-scale validation of an entire shaft component executed at PT Techno Metal Industry achieved a uniform surface hardness of 52 HRC (satisfying the required 52–55 HRC target specification) while remaining crack-free and defect-free. This retrofit re-quenching route demonstrates cost savings of 89%–91% compared to new imported assemblies, providing a sustainable operational solution for domestic production facilities.

Keywords: Roll heater, AISI 1045, AISI 1050, Quenching, Lath martensite, Rockwell C hardness, Reverse engineering.

1. PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Dalam industri manufaktur pengemasan sekunder dan primer (flexible packaging), efisiensi penyegelan lapisan polimer film secara kontinu bertumpu pada keandalan sistem rotary roll heater. Unit ini umumnya terdiri atas rakitan poros transmisi utama (main shaft) dan selongsong silindris pemanas (roll sealing) vertikal maupun horizontal. Komponen bekerja secara serempak di bawah kondisi kerja berat: mentransfer fluks panas secara konduksi kontinu pada rentang temperatur kerja 150°C hingga 220°C guna melelehkan lapisan termoplastik kemasan secara tepat, menahan beban kompresi kontak mekanis bolak-balik antar-rol (cyclic contact compressive stress), serta menahan gaya gesek abrasi permukaan secara konstan terhadap film kemasan berkecepatan tinggi.

Mayoritas industri manufaktur di dalam negeri masih bergantung pada pasokan suku cadang asli dari pabrikan mesin asal Jepang (Original Equipment Manufacturer / OEM). Ketika suku cadang impor eksisting beroperasi melampaui batas keausan permukaan, profil gerigi dan dimensi penyegelan mengalami degradasi geometri. Hal tersebut memicu kebocoran penyegelan (leaking packaging) yang memaksa mesin dihentikan secara darurat (unplanned downtime).

Ketergantungan terhadap suku cadang impor menimbulkan kendala waktu pengiriman (lead time) yang berkisar antara 12 hingga 24 minggu (3–6 bulan). Ditinjau dari aspek finansial, pembelian unit rakitan (assembly set) baru membutuhkan biaya investasi puluhan juta rupiah per unit. Oleh karena itu, rekayasa balik (reverse engineering) berbasis perlakuan panas pengerasan ulang (re-quenching) menjadi strategi rasional untuk memulihkan kekerasan permukaan kerja (target 45–52 HRC / 52–55 HRC) tanpa mengubah dimensi presisi poros.

2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik metalurgi material dasar pada shaft utama dan roll sealing eksisting ditinjau dari komposisi kimia, struktur mikro, dan persebaran profil kekerasan awalnya?
2. Faktor fasa metalurgi apa yang memicu pelunakan mekanis dan keausan prematur pada permukaan kontak roll heater selama periode operasional?
3. Bagaimana rancangan parameter proses perlakuan panas celup cepat (quenching) yang tepat untuk merekayasa ulang fasa mikrostruktur agar mencapai target kekerasan operasional 45–52 HRC / 52–55 HRC?
4. Seberapa besar tingkat efisiensi biaya dan kelayakan teknis penerapan metode retrofit re-quenching komponen eksisting dibandingkan pengadaan unit impor baru?

3. Tujuan Penelitian

1. Mengidentifikasi komposisi kimia kuantitatif dan klasifikasi standar material komponen impor melalui spektrometri emisi optik (OES).
2. Memetakan profil distribusi nilai kekerasan makro Rockwell C (HRC) pada seluruh penampang komponen sebelum perlakuan panas.
3. Menganalisis konstitusi fasa mikrostruktur pada area aus/lunak serta mengonfirmasi pembentukan fasa martensit jarum (lath martensite) pasca-quenching.
4. Memvalidasi ketercapaian perlakuan panas pengerasan utuh (full hardening) pada komponen aktual berskala industri di fasilitas komersial tanpa menimbulkan deformasi retak.

4. Batasan Masalah

1. Benda uji dibatasi pada komponen roll heater tipe vertikal dan horizontal eksisting aktual bekas pakai lini produksi mesin pengemas dengan riwayat pemakaian aktif periode 2015–2023.
2. Pengujian spektrometri emisi optik (OES) dilakukan pada 3 sampel representatif mengacu pada ASTM E415.
3. Pemetaan kekerasan makro Rockwell C dilakukan pada 12 sampel dengan total 144 titik uji mengacu pada ASTM E18.
4. Pengamatan metalografi optik difokuskan pada evaluasi fasa ferit, perlit, dan martensit hasil celup cepat mengacu pada ASTM E3 dan ASTM E407.
5. Validasi pengerasan utuh dibatasi pada pemanasan temperatur austenitisasi >820°C dengan media pendingin air pada fasilitas PT Techno Metal Industry.

5. Kajian Konsumsi & Biaya Detail (Signifikansi Ekonomi)

Evaluasi historis pemakaian komponen roll heater tipe vertikal selama kurun waktu 10 tahun (2016–2025) menunjukkan dinamika kebutuhan suku cadang yang tinggi akibat degradasi termal berkelanjutan. Data rinci konsumsi tahunan dirangkum dalam Tabel 1 berikut:

Tahun	Tipe 60	Tipe 65	Tipe 70	Tipe 75	Tipe 75 new	Total Set
2016	15	4	3	5	0	27
2017	2	6	5	1	0	14
2018	2	15	6	9	0	32
2019	7	10	2	3	0	22
2020	16	7	1	7	1	32
2021	16	10	1	1	0	28
2022	15	13	15	10	3	**56**

Tahun	Tipe 60	Tipe 65	Tipe 70	Tipe 75	Tipe 75 new	Total Set
2023	6	8	4	2	2	22
2024	12	7	11	9	4	43
2025	13	11	4	7	14	49
Total	**104**	**91**	**52**	**54**	**24**	**325**

Table 1 : Data jumlah pemakaian roll heater selama 10 tahun

Puncak lonjakan penggantian terjadi pada tahun 2022 mencapai 56 set. Tingginya angka pengadaan ini dipengaruhi oleh fluktuasi nilai tukar mata uang Yen Jepang (JPY) terhadap Rupiah (IDR). Berdasarkan analisis tren nilai tukar, kurs JPY/IDR bergerak dari level 110,6 pada tahun 2015, menguat signifikan ke level 136,2 pada tahun 2020, dan berada pada rentang stabil tinggi 104,8–110,2 pada kurun waktu 2024–2025, yang memperbesar beban pengadaan impor.

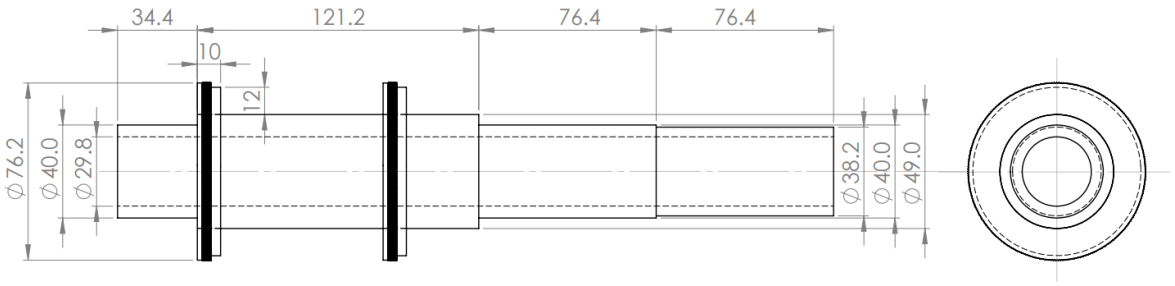
Berdasarkan data acuan sistem SAP perusahan, harga pembelian suku cadang OEM impor asal Jepang per set dirangkum dalam Tabel 2 berikut:

Tipe Roll Heater Sealer	Harga Acuan SAP (IDR / Set)
Sealer 60 Vertikal	Rp16.244.000,-
Sealer 65 Vertikal	Rp38.570.000,-
Sealer 70 Vertikal	Rp37.989.000,-
Sealer 75 Vertikal	Rp49.590.000,-
Sealer 75 Vertikal New	Rp55.100.000,-

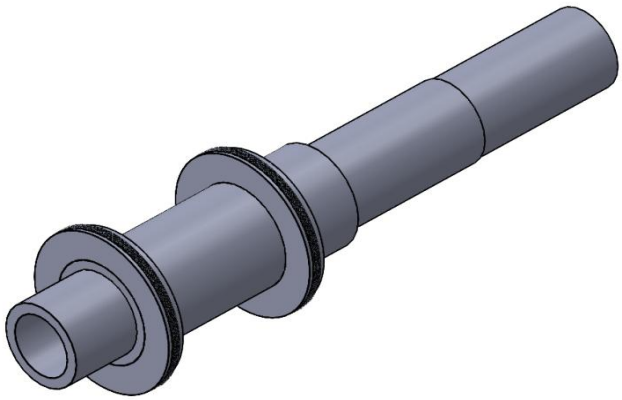
Tabel 2 : Tipe dan jenis ukuran roll heater

Dengan menerapkan metode pengerasan ulang (re-quenching) secara lokal, biaya pemulihan hanya berkisar antara Rp3.500.000,- hingga Rp4.500.000,- per set. Pendekatan ini terbukti memberikan efisiensi biaya fantastis mencapai 89%–91% serta memangkas lead time dari 120 hari kerja (impor) menjadi hanya 3 hari kerja di dalam negeri.

6. Metodologi Penelitian & Anggaran Eksperimental

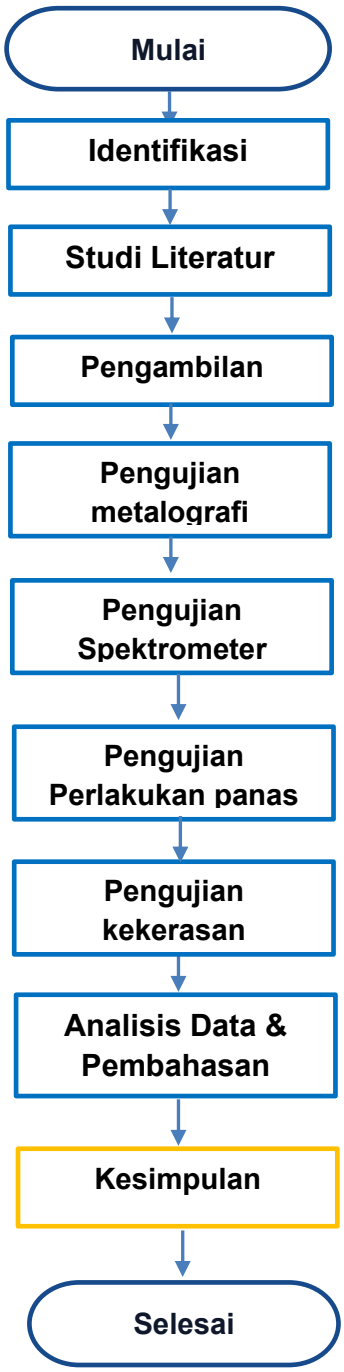


Gambar 1 : Dimensi sealer vertikal

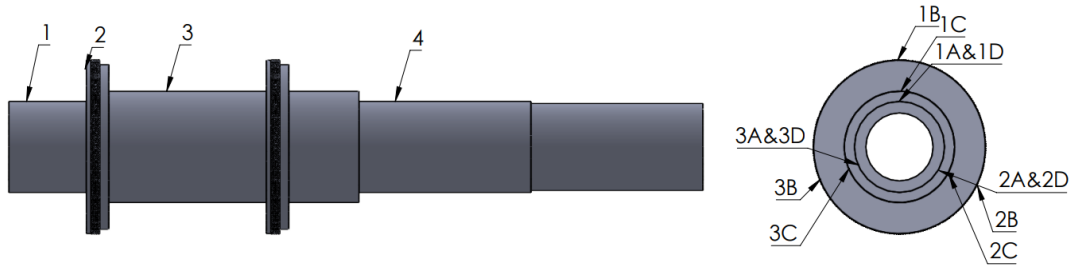


Gambar 2 : Isometri sealer vertikal

Dokumentasi teknis pada Gambar 1 memperlihatkan dimensi presisi komponen roll heater tipe vertikal eksisting. Poros memiliki profil bertingkat dengan panjang total nominal serta variasi diameter luar utama 76,2 mm pada bagian pemanas/sealer dan 40,0 mm pada jurnal poros transmisi. Sisi interior dilengkapi lubang aksial bertingkat berkisar 29,8 mm hingga 38,2 mm untuk penempatan elemen pemanas cartridge (cartridge heater) dan selubung termokopel. Visualisasi kelurusan, simetrisitas, dan profil alur gerigi penyegelan ditampilkan secara komprehensif dalam model isometri 3D pada Gambar 2.



Gambar 3 : Diagram alir penelitian



Gambar 4 : Posisi titik pengujian

Gambar 4 menyoroti tata letak pemetaan indentasi kekerasan makro Rockwell C (HRC) sepanjang bidang permukaan kerja komponen. Pengujian dilakukan pada 4 lokasi aksial utama (Titik 1 hingga Titik 4) dari ujung hingga pangkal area kontak. Pada setiap stasion aksial, pengukuran diperluas secara melingkar menembus kuadran radial (distribusi titik 1A–1D, 2A–2D, dan 3A–3D) guna mendeteksi variasi lokal akibat gradien temperatur operasional.

Area Pengujian	Tujuan
Permukaan luar	Mengetahui kekerasan area kerja roll heater
Bagian tengah/penampang	Menilai keseragaman kekerasan material
Area dekat kerusakan, jika ada	Menghubungkan kekerasan dengan kemungkinan kegagalan

Tabel 3 : Rancangan titik pengujian kekerasan



Gambar 5 : Flowchart pengujian komposisi kimia

Urutan pengujian laboratorium disajikan secara sistematis dalam diagram alir: Gambar 5 merepresentasikan tahapan analisis kimia kuantitatif Spark-OES mengacu pada ASTM E415;



Gambar 6 : Flowchart pengujian struktur mikro

Gambar 6 menguraikan prosedur observasi struktur mikro metalografi optik mengacu pada ASTM E3 dan ASTM E407; serta Gambar 3.6 memperlihatkan alur pengujian kekerasan makro Rockwell C mengacu pada ASTM E18.

Tahapan penelitian dilaksanakan secara tersistem mulai dari pemotongan spesimen basah, preparasi permukaan, pemetaan kekerasan awal, analisis OES, hingga pengujian validasi industri. Estimasi total anggaran pengujian laboratorium dirangkum dalam Tabel 3 berikut:

Item Pengujian / Kegiatan	Jumlah	Biaya (IDR)
Uji Komposisi Kimia (Spark-OES)	3 Sampel	Rp750.000,-
Uji Kekerasan Makro Rockwell C (144 titik)	12 Sampel	Rp1.200.000,-
Preparasi & Uji Metalografi Optik	7 Sampel	Rp850.000,-
Biaya Kontinjensi & Konsumabel	-	Rp300.000,-

Item Pengujian / Kegiatan	Jumlah	Biaya (IDR)
Total Anggaran Penelitian	**-**	**Rp3.100.000,-**

Table 4 : jenis pengujian dan biaya

7. Data Pemakaian Sealer Vertikal selama 10 tahun

Berdasarkan data histori, total pemakaian sealer vertikal tertinggi terjadi pada tahun 2022 sebanyak 56 set. Data ini menunjukkan bahwa kebutuhan penggantian komponen cukup berulang, sehingga evaluasi material ditingkatkan performanya menjadi relevan untuk mengurangi ketergantungan terhadap komponen impor.

Jenis sealer	2016	2017	2018	2019	2020
60 vertikal	15	2	2	7	16
65 Vertikal	4	6	15	10	7
70 Vertikal	3	5	6	2	1
75 Vertikal	5	1	9	3	7
75 Vertikal TCL	0	0	0	0	1
Total pemakaian per tahun	27	14	32	22	32

Tabel 5 : Data pemakaian sealer vertikal tahun 2016-2020

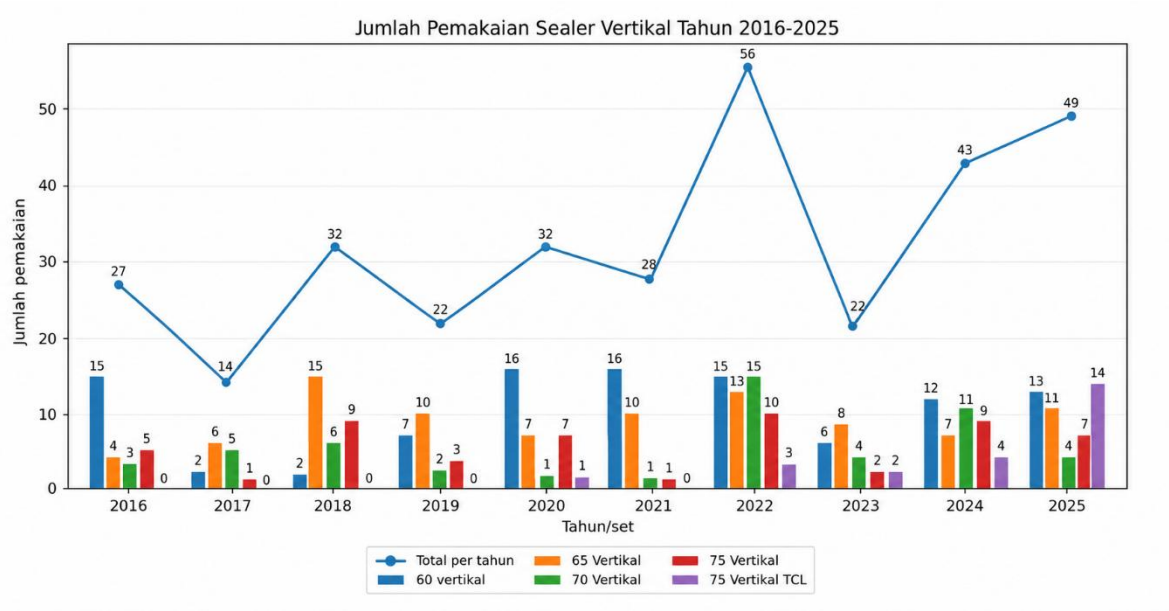
Jenis sealer	2021	2022	2023	2024	2025
60 vertikal	16	15	6	12	13
65 Vertikal	10	13	8	7	11
70 Vertikal	1	15	4	11	4
75 Vertikal	1	10	2	9	7
75 Vertikal TCL	0	3	2	4	14
Total pemakaian per tahun	28	56	22	43	49

Tabel 6 : Data pemakaian sealer vertikal tahun 2021-2025

Jenis sealer	Total 2016-2025	Pemakaian tertinggi	Tahun tertinggi
60 vertikal	104	16	2020
65 Vertikal	91	15	2018
70 Vertikal	52	15	2022

75 Vertikal	54	10	2022
75 Vertikal TCL	24	14	2025

Tabel 7 : Ringkasan pemakaian sealer vertikal berdasarkan jenis



Gambar 6 : Grafik jumlah pemakaian sealer vertikal tahun 2016-2025

8. Dokumentasi Tahapan Preparasi Metalografi Spesimen Uji



Gambar 7 : Awal proses cutting roll heater menggunakan mesin gergaji engkol

Tahapan preparasi fisik spesimen uji roll heater ditunjukkan secara berurutan pada Gambar 7 hingga Gambar 10.



Gambar 8 : Proses pemotongan bagian ke 2

Gambar 7 – Gambar 8 (Pemotongan Basah / Wet Cutting): Inisiasi pemotongan spesimen poros roll heater menggunakan mesin gergaji engkol mekanis (power hacksaw Tekiro 16 inch). Mata gergaji bertahap menembus penampang silindris benda uji di bawah guyuran cairan pendingin (coolant) secara kontinyu guna mencegah pemanasan berlebih (overheating) yang dapat merubah struktur mikro awal.



Gambar 9 : Proses meratakan permukaan bawah pada mesin miling



Gambar 10 : Proses Grinding pada potongan roll heater

Gambar 9 & Gambar 10 (Pemesinan & Penggerindaan Presisi): Proses perataan permukaan bawah spesimen menggunakan mesin frais vertikal (milling) untuk memastikan ketegaklurusan bidang (parallelism), dilanjutkan penggerindaan presisi bidang kontak pada mesin gerinda datar (surface grinding) dengan kontrol cairan pendingin.



Gambar 11 : Proses Pemolesan sample menggunakan amplas grit 240,400,800,1000,2000,7000





Gambar 12 : sample yang sudah dilakukan poles

Gambar 11 & Gambar 12 (Pengamplasan, Pemolesan & Spesimen Mirror Finish): Tahap akhir pengamplasan SiC bertingkat (grit 240 hingga 7000) dan pemolesan pada felt disk berbantu pasta intan. Gambar 4.3.1 menampilkan 5 spesimen metalografi akhir dengan tingkat kehalusan permukaan cermin (mirror finish) yang bebas dari goresan makro sebelum dietsa Nital 2%.

9. Hasil & Pembahasan Uji Kekerasan Awal 144 Titik

Pemetaan kekerasan makro Rockwell C (HRC) dilakukan pada 12 unit sampel roll heater bekas pakai (masing-masing 4 titik uji per spesimen, dievaluasi dalam skala HRC-A, HRC-B, HRC-C, dan Rata-Rata AVG HRC). Data kuantitatif lengkap disajikan pada Tabel 4 berikut:

Kode Sampel	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	AVG HRC
Sampel 1 (H 25.5 ^1)	52,3	59,3	59,2	51,6	**55,6**
Sampel 2 (H 29.5 ^5)	53,0	54,2	53,8	53,8	**53,7**
Sampel 3 (R 1.10 ^6)	45,2	17,3	16,8	48,4	**31,9**
Sampel 4 (R 2.7 ^6)	47,4	15,6	12,5	51,0	**31,6**
Sampel 5 (R 3.6 5)	47,6	15,0	14,7	47,8	**31,3**
Sampel 6 (R 4.7 14 A)	51,5	16,2	14,7	47,0	**32,4**
Sampel 7 (R 5.7 5 B)	44,9	16,9	14,8	51,6	**32,1**
Sampel 8 (R 1.7 7 B z9)	14,9	19,7	18,7	15,2	**17,1**
Sampel 9 (R 1.7 7 A z9)	11,5	19,0	18,8	16,8	**16,5**
Sampel 10 (R 3.8 1B z)	14,0	13,6	15,0	13,5	**14,0**
Sampel 11 (R 3.8 1A z)	15,5	13,6	14,7	13,0	**14,2**
Sampel 12 (R 5.7 1A z)	19,3	15,4	13,5	15,2	**15,9**

Tabel 8 : hasil pengujian kekerasan tiap titik sampel

Hasil pemetaan mengonfirmasi bahwa Sampel 1 dan 2 (sealer horizontal) masih mempertahankan kekerasan tinggi (53,7–55,6 HRC). Sebaliknya, pada Sampel 3 hingga 12 (sealer vertikal), terjadi penurunan kekerasan ekstrem pada area permukaan kontak kerja menjadi 11,5–19,7 HRC. Penurunan drastis ini mengindikasikan fenomena pelunakan termal (thermal softening) parah yang dipicu oleh paparan temperatur operasional kontinu (150°C–220°C) dalam jangka panjang.

10. Hasil Analisis Spektrometri (Spark-Oes)

Pengujian spektrometri emisi optik (Spark-OES) mengacu pada ASTM E415 dilakukan pada 3 sampel representatif untuk mengidentifikasi grade baja dan menghitung nilai Carbon Equivalent (CE IIW). Hasil komposisi kimia (% berat) dirangkum pada Tabel 5 berikut:

Unsur Kimia (%)	Sampel 1 (H 29.5 ^5)	Sampel 2 (R 5.7 5 B)	Sampel 3 (R5.7 1A z)	Standar JIS S45C / S50C
Karbon (C)	0,488	0,504	0,509	0,42–0,48 / 0,47–0,53
Mangan (Mn)	0,708	0,740	0,728	0,60–0,90
Silikon (Si)	0,223	0,173	0,178	0,15–0,35
Fosfor (P)	0,013	0,011	0,012	Maks 0,030
Sulfur (S)	0,005	0,011	0,018	Maks 0,035
Kromium (Cr)	0,085	0,135	0,143	-
Nikel (Ni)	0,078	0,123	0,088	-
Tembaga (Cu)	0,119	0,249	0,221	-
CE IIW (%)	**0,642**	**0,685**	**0,684**	**> 0,45 (Tinggi)**

Tabel 9 : hasil pengujian spectrometer pada 3 sampel

Hasil OES mengonfirmasi bahwa Sampel 1 tergolong baja karbon menengah AISI 1045 / JIS S45C (C 0,488%), sedangkan Sampel 2 dan 3 tergolong AISI 1050 / JIS S50C (C 0,504%–0,509%). Nilai Carbon Equivalent yang tinggi (CE IIW = 0,642%–0,685%) mengindikasikan potensi keras celup yang sangat baik untuk membentuk fasa martensit penuh melalu perlakuan panas quenching.

11. Hasil Analisis Metalografi Optik & Evolusi Struktur Mikro

Pengamatan metalografi optik memperlihatkan perbedaan fasa yang signifikan antara kondisi awal, terdegradasi, dan pasca-quenching. Korelasi fasa dan sifat mekanis dirangkum dalam Tabel 10 berikut:

Kondisi Spesimen	Kode Sampel	Fasa Dominan Teramati	Kekerasan
Acuan / Keras	1H1 (Horizontal)	Perlit halus homogen + ferit batas butir tipis	53–54 HRC
Lunak / Terdegradasi	2V2, 3V1, 3V2 (Vertikal)	Ferit proeutektoid masif + perlit pita kasar (banded)	11,5–19,3 HRC
Pasca-Quenching	2V2Q & 3V2Q (Laboratorium)	Martensit jarum penuh (interlocking lath martensite)	**> 58 HRC**

Tabel 10 : kondisi specimen sebelum dan sesudah perlakuan panas

12. Analisis Komparatif Foto Mikrostruktur Metalografi

(Spesimen Acuan Keras 1H1 - 200X): Mikrostruktur spesimen kondisi baik [H 29.5 ^5] menampilkan matriks koloni perlit halus rapat (fine pearlite) yang terdistribusi merata dengan jaringan tipis ferit proeutektoid di batas butir. Konstitusi fasa ini memberikan kekerasan tinggi yang stabil pada rentang 53–54 HRC.
(Struktur Awal Terdegradasi [R 5.7 5 B] - 200X): Evaluasi komparatif pada kondisi awal menunjukkan: (a) Sampel 2V1 mempertahankan kekerasan lokal 44,9 HRC akibat adanya fasa transformasi cepat; (b) Sampel 2V2 mengalami pelunakan termal parah dengan kekerasan drop hingga 16,9 HRC akibat dominasi struktur kesetimbangan ferit-perlit kasar hasil pendinginan lambat.
(Spesimen 2V2 Pasca-Quenching & Struktur Mikro 2V2Q - 200X): Dokumentasi fisik dan mikrograf 2V2Q membuktikan keberhasilan re-quenching. Fasa ferit-perlit kasar bertransformasi sempurna menjadi matriks martensit jarum rapat (interlocking lath martensite), memicu lonjakan kekerasan hingga >58 HRC.
(Struktur Awal Lunak [R5.7 1A z New - 200X): (a) Sampel 3V1 didominasi fasa ferit proeutektoid masif bebas (kekerasan 19,33 HRC); (b) Sampel 3V2 memperlihatkan struktur pita ferit-perlit kasar berorientasi (banded structure) dengan kekerasan terendah 15,37 HRC.
(Fisik & Mikrostruktur 3V2Q Pasca-Quenching - 200X): Proses perlakuan panas quenching terbukti mengeliminasi total struktur pita ferit-perlit kasar pada 3V2, mengubahnya menjadi fasa acicular lath martensite yang homogen dan keras.

13. Hasil uji validasi industri komponen aktual (full hardening)

Pengujian validasi skala penuh (full hardening) dilakukan pada 1 unit komponen poros roll heater aktual berukuran industri di PT Techno Metal Industry (Sertifikat Pengujian No. ICH-WOC-2026J1908). Pemanasan dilakukan di atas temperatur austenitisasi (>820°C) diikuti pendinginan celup cepat air (water quenching). Parameter kualitas pasca-proses dirangkum pada Tabel 7 berikut:

Parameter Inspeksi QC	Hasil Pengukuran / Evaluasi	Status Judgement
Kekerasan Permukaan	52 HRC (Target: 52–55 HRC)	OK / Lulus

Parameter Inspeksi QC	Hasil Pengukuran / Evaluasi	Status Judgement
Kebersihan & Visual	Bersih (Clean), Bebas Cacat & Karat	OK / Lulus
Inspeksi Keretakan Termal	Bebas Retak (Crack-Free)	OK / Lulus
Akurasi Dimensi Poros	Sesuai Toleransi Gambar Kerja	OK / Lulus

Tabel 11 : hasil perlakuan panas pada sampel utuh

14. Dokumentasi Validasi Industri dan Sertifikasi Mutu (Gambar 4.6.1 & 4.6.2)



Gambar 13 : Roll heater set yang sudah dilakukan quenching

Gambar 13 : Memperlihatkan hasil fisik 1 set unit poros roll heater aktual ukuran industri setelah menjalani proses perlakuan panas pengerasan utuh (full hardening) di PT Techno Metal Industry. Tampilan fisik menunjukkan kondisi permukaan yang bersih, presisi, dan bebas dari deformasi geometris.

PT. TECHNO METAL INDUSTRY
JABABEKA INDUSTRIAL ESTATE
Jl. Jababeka VI B Blok J Kav. 7D
Harja Mekar - Cikarang
Bekasi 17530 - Indonesia
Telp. 021-8934525 , Fax. 021-89837073

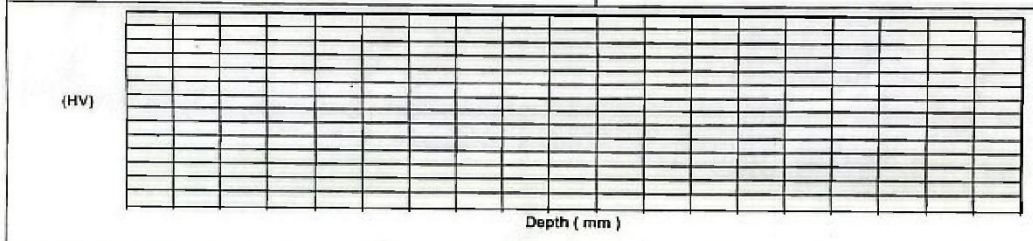
INSPECTION CERTIFICATE

ICH-WOC-2026J1908

Customer Name	CV. SURYA UTAMA SEJAHTERA - SUR013		Date	October 14, 2026	
Part Name	SHAFT		Working Order	WOC-2026J1908	
Material	1045		Quantity (Pcs)	1	
Hardness Request	52-55 HRC	Depth mm	Weight (Kg)	2,30	
Treatment Process	Full Hardening		Date of Process	October 14, 2026	
Testing Machine	SHORE		Loading	Kgf	Kgf
Test Record	Regular Inspection		Quantity Check	Surface (Pcs)	1
				Case Depth (Pcs)	

Photo





Depth	
HV	

Note :

Item	Result
Surface Hardness	52
Center Hardness	TIDAK DITEST
Case Depth -	TIDAK DITEST
Deformation	TIDAK DITEST
Crack	TIDAK ADA
Visual Check	Clean,No Deffect,No Rust

Chief of QC	Prepared	JUDGEMENT
WAWAN	WAWAN	OK

Print Date : 14-10-2026 14:13

Gambar 14 : hasil pengecekan kekerasan setelah dilakukan quenching

Gambar 14 : Menampilkan salinan Sertifikat Pengujian Resmi No. ICH-WOC-2026J1908 dari PT Techno Metal Industry. Hasil inspeksi QC mengonfirmasi pencapaian kekerasan permukaan homogen sebesar 52 HRC (memenuhi target spesifikasi 52–55 HRC) serta memberikan penilaian OK / Lulus pada kriteria clean finish, no defect, no rust, dan crack-free (bebas retak termal).

15. PEMBAHASAN INTEGRATIF & KAJIAN LIFETIME EXTENSION

Sintesis hasil eksperimen membuktikan bahwa kerusakan roll heater impor bukan diakibatkan oleh cacat material dasar, melainkan pelunakan termal operasional (thermal softening / over-tempering) selama ribuan jam kerja pada 150°C–220°C. Karena material dasar adalah baja JIS S45C / S50C dengan nilai CE IIW 0,642%–0,685%, rekondisi melalui proses re-quenching terbukti memulihkan struktur martensit lamelar keras (52 HRC), menghemat anggaran pengadaan hingga 89%–91%, dan memangkas downtime secara signifikan.

16. KESIMPULAN

1. Material dasar roll heater impor teridentifikasi sebagai baja karbon menengah AISI 1045 / JIS S45C dan AISI 1050 / JIS S50C (CE IIW 0,642%–0,685%).
2. Penurunan kekerasan ekstrem pada area kerja (11,5–19,3 HRC) disebabkan oleh pelunakan fasa ferit bebas masif dan perlit pita kasar akibat paparan panas operasional berkepanjangan.
3. Proses quenching melampaui suhu austenitisasi (>820°C) berhasil membentuk kembali fasa martensit jarum (lath martensite).
4. Pengujian industri pada poros aktual menghasilkan kekerasan 52 HRC tanpa retak, bebas karat, serta menghemat biaya pengadaan 89%–91%.

DAFTAR PUSTAKA

1. W. D. Callister dan D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th ed. John Wiley & Sons, 2020.
2. W. F. Smith dan J. Hashemi, Foundations of Materials Science and Engineering, 5th ed. McGraw-Hill, 2011.
3. D. R. Askeland dan W. J. Wright, The Science and Engineering of Materials, 7th ed. Cengage Learning, 2016.
4. G. Krauss, Steels: Processing, Structure, and Performance, 2nd ed. ASM International, 2015.
5. G. E. Totten, Ed., Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies, 2nd ed. CRC Press, 2006.
6. J. F. Lancaster, Metallurgy of Welding, 6th ed. Woodhead Publishing, 1999.
7. S. Kou, Welding Metallurgy, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2003.
8. ASM International, ASM Handbook, Volume 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes, 2013.
9. ASTM International, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials, ASTM E18-20, 2020.
10. M. P. Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, 7th ed.

John Wiley & Sons, 2020.
11. S. Kalpakjian dan S. R. Schmid, Manufacturing Processes for Engineering Materials, 6th ed. Pearson, 2014.
12. G. F. Vander Voort, Metallography: Principles and Practice, 2nd ed. ASM International, 1999.
13. ASTM International, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM E3-11(2017), 2017.
14. G. Petzow, Metallographic Etching: Techniques for Metallography, Ceramography, Plastography, 2nd ed. ASM International, 1999.
15. ASTM International, Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, ASTM E407-07(2015), 2015.
16. ASTM International, Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry, ASTM E415-21, 2021.
17. ASTM International, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM E112-13, 2013.
18. ASTM International, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM E384-17, 2017.
19. SAE International, Methods of Measuring Case Depth, SAE J423, 2013.
20. J. Sneddon, C. Robinson, dan P. B. Farnsworth, Advances in Atomic Spectroscopy, Vol. 3. JAI Press, 1997.