



ANALISA PROSES DOUBLE HARDENING TERHADAP KEKUATAN MATERIAL S48 PADA KOMPONEN AXLE SHAFT

Ardian Dwi Hindarto¹, Budiarto², Surjo Abadi³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia, Jakarta
¹ardianhindarto@gmail.com, ²budidamaz@gmail.com, ³suryo.abadi@uki.ac.id

Abstract

Axle shaft adalah Salah satu komponen penting dalam sistem transmisi kendaraan dan berfungsi mentransmisikan tenaga yang ada dari mesin ke dalam roda penggerak. *Axle shaft* mengalami berbagai macam beban selama beroperasi, beban puntir, beban lentur, serta beban kejut. Kombinasi beban ini berpotensi menyebabkan deformasi plastis, retak, dan akhirnya kegagalan material. Material baja yang digunakan adalah dengan karbon menengah seperti S48 dan sifat mekanik material S48 harus di tingkatkan melalui metode melalui proses perlakuan panas *hardening*, dan untuj meningkatkan kekerasan serta keuletan pada material maka di perlukan Proses *Double Hardening*. Maka dari itu pada tugas akhir ini, penulis meneliti tentang Analisa pengaruh proses Double Hardening terhadap material S48 pada komponen *Axle Shaft*. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen. pengujian ini dilakukan dengan cara. konsep 1 (proses reguler), konsep 2 (2x hardening dan 1x Tempering), konsep 3 (2x hardening dan 2x Tempering), kemudian kita lakukan penelitian melalui pengujian *Microstructure*, Kekerasan (HV), *Fatigue* dan *Statique*. Dari hasil pengujian microstructure proses double hardening tidak mempengaruhi struktur mikro pada masing masing aera utama, kemudian untuk hasil penegecekan kekerasan material terdapat konsep 1 (hardening normal) untuk kedalaman kekerasannya lebih rendah dibandingkan dengan kondisi konsep 2 & 3 (hardening 2x). konsep 2 kekerasannya limit atas dari standard, sedangkan konsep 3 nilai kekerasannya over keluar dari toleransi standard. Untuk hasil pengujian fatigue semua konsep 1, 2 dan 3 memenuhi standard, dimana siklus kegagalan tercapai diatas 200.000 cycle semua yaitu 253.000 cycle dan tidak mengalami patah. Kemudian untuk hasil pengujian *statique* semua konsep 1, 2 dan 3 aman semua masuk dalam standar karena patah di area spline (sudah sesuai standard drawing part). Jadi konsep 1 paling ulet dengan hasil torsi yang didapatkan yaitu 4356,734 Nm dan untuk sudut patahnya sebesar 39,192°. Dari semua penelitian yang di lakukan merekomendasikan konsep 2 yang paling bagus untuk dipakai, sebab tidak mengalami over standar, serta dari hasil uji material menunjukan hasil kekerasan serta keuletan yang masih dalam batas standar toleransi yang di tentukan.

Kata Kunci: *Axle Shaft*, Baja S48, *Hardening*, *Tempering*, *Microstructure*, Kereasan (HV), Uji momen Puntir, *Statique* dan *Fatigue*

Article History:

Received: May 2025
Reviewed: June 2025
Published: June 2025

Plagiarism Checker No 234
Prefix DOI:
10.8734/Kohesi.v1i2.365
Copyright: Author
Publish by: Kohesi



This work is licensed under
a [Creative Commons
Attribution-NonCommercial 4.0
International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Abstract

The axle shaft is one of the crucial components in a vehicle's transmission system, functioning to transmit power from the engine to the drive wheels. The axle shaft is subjected to various loads during operation, including torsional loads, bending loads, and impact loads. These combined stresses can potentially lead to plastic deformation, cracking, and eventually material failure. The steel material used is medium carbon steel such as S48, and the mechanical properties of S48 must be enhanced through heat treatment methods, specifically hardening. To further improve hardness and toughness, a Double Hardening process is required. Therefore, in this final project, the author investigates the analysis of the effect of the Double Hardening process on S48 material used in axle shaft components. This study uses an experimental method. The testing is conducted using three treatment concepts: Concept 1 (regular hardening), Concept 2 (double hardening and one-time tempering), and Concept 3 (double hardening and double tempering). The analysis includes microstructure observation, hardness testing (HV), fatigue testing, and static testing. The microstructure test results show that the double hardening process does not significantly alter the microstructure in the main areas. In terms of material hardness, Concept 1 (normal hardening) results in shallower hardness depth compared to Concept 2 & 3 (double hardening). Concept 2 yields hardness at the upper limit of the standard, while Concept 3 exceeds the standard tolerance. In the fatigue test, all concepts (1, 2, and 3) meet the standard, with failure cycles exceeding 200,000—specifically 253,000 cycles—and none of the specimens broke. For the static test, all concepts meet the standard, as fractures occurred in the spline area (according to the standard part drawing). Concept 1 showed the highest ductility with a torque value of 4356.734 Nm and a fracture angle of 39.192°. From all the tests conducted, Concept 2 is recommended as the best option, as it does not exceed the standard limits and shows optimal material hardness and toughness within the acceptable tolerance range.

Keywords: Axle Shaft, S48 Steel, Hardening, Tempering, Microstructure, Hardness (HV), Torsional Test, Static and Fatigue Test



PENDAHULUAN

Perkembangan industri otomotif global menunjukkan dinamika yang semakin kompleks, didorong oleh permintaan kendaraan yang terus meningkat dan kompetisi yang kian tajam. Di tengah kebutuhan akan kendaraan yang efisien, aman, dan tangguh, kualitas komponen transmisi seperti *axle shaft* menjadi krusial. Komponen ini memiliki peran vital dalam mentransmisikan tenaga dari mesin ke roda penggerak dan secara langsung memengaruhi performa kendaraan dalam berbagai kondisi, mulai dari akselerasi hingga daya angkut.

Namun, tantangan utama yang dihadapi *axle shaft* adalah beban mekanik kompleks yang dialaminya saat beroperasi. Beban puntir dari torsi mesin, beban lentur akibat berat kendaraan, dan beban kejut dari permukaan jalan yang tidak rata, semuanya dapat menyebabkan tegangan tinggi yang berujung pada deformasi plastis, retakan, hingga kegagalan material. Oleh karena itu, dibutuhkan material dengan sifat mekanik tinggi serta teknik pengolahan yang mampu meningkatkan kekuatannya secara optimal.

Salah satu material yang sering digunakan untuk komponen *axle shaft* adalah baja karbon menengah tipe S48, yang dikenal karena kombinasi antara kekuatan dan harga yang relatif terjangkau. Namun, dalam konteks aplikasi berat seperti kendaraan niaga atau medan ekstrem, sifat mekanik bawaan dari material ini sering kali tidak mencukupi. Maka dari itu, peningkatan kualitas melalui teknik perlakuan panas menjadi alternatif solusi yang relevan.

Metode perlakuan panas, khususnya *hardening*, telah lama digunakan untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan material. Teknik ini melibatkan pemanasan material hingga suhu *austenisasi*, diikuti dengan pendinginan cepat atau *quenching* yang menghasilkan struktur martensit yang keras. Meski efektif dalam meningkatkan kekerasan, pendekatan *single hardening* berpotensi menurunkan ketangguhan material, yang bisa memperbesar risiko kegagalan akibat beban kejut.

Sebagai solusi, metode *double hardening* diperkenalkan. Metode ini mengombinasikan dua tahap perlakuan panas, dengan tujuan mencapai keseimbangan antara kekuatan dan ketangguhan. Tahap pertama serupa dengan *single hardening*, yaitu pemanasan hingga suhu tinggi dan pendinginan cepat. Sedangkan tahap kedua melibatkan pemanasan ulang pada suhu lebih rendah dan pendinginan lebih lambat, guna mengurangi tegangan internal tanpa kehilangan kekerasan secara signifikan. Meskipun menjanjikan, pemahaman ilmiah tentang efek dari parameter proses *double hardening*—seperti suhu, waktu tahan, dan media pendingin—pada material S48 masih terbatas dan memerlukan eksplorasi lebih lanjut.

Penelitian ini juga menyadari pentingnya memahami mekanisme kegagalan pada *axle shaft* sebagai dasar untuk merancang perlakuan panas yang optimal. Analisis kegagalan, termasuk karakteristik patahan dan lokasi dominan kerusakan, dapat membantu dalam menentukan parameter perlakuan panas yang tepat dan efektif.

Beberapa penelitian terdahulu telah menyelidiki pengaruh perlakuan panas terhadap kekerasan dan mikrostruktur baja, seperti studi oleh Amalia (2018), Sumiyanto (2018), dan Riardy (2019). Meski demikian, aplikasi spesifik *double hardening* pada material S48 belum banyak dibahas, khususnya dalam konteks optimasi parameter proses.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dirancang untuk menjawab tiga pertanyaan utama: (1) bagaimana perubahan mikrostruktur S48 setelah proses *double hardening*, (2) bagaimana pengaruhnya terhadap kekerasan (*hardness HV*), dan (3) bagaimana dampaknya terhadap kekuatan dan keuletan material berdasarkan uji *fatigue* dan *statique*. Untuk menjaga fokus penelitian, ruang lingkup dibatasi pada pengaruh parameter suhu, waktu tahan, dan media pendingin, dengan pengujian dilakukan di laboratorium PT X tanpa mempertimbangkan efisiensi biaya atau dampak lingkungan.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menganalisis secara komprehensif hubungan antara parameter proses *double hardening* dengan peningkatan sifat mekanik material S48, terutama dalam konteks aplikasinya pada komponen *axle shaft*. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dan praktis, baik bagi pengembangan teknologi perlakuan panas maupun peningkatan daya saing industri otomotif nasional.



Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi penting bagi kalangan akademisi dan pelaku industri dalam mengembangkan pendekatan yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berorientasi pada peningkatan performa produk.

TINJAUAN PUSTAKA

1. Axle Shaft

Axle shaft merupakan salah satu komponen vital dalam sistem penggerak kendaraan bermotor, berperan sebagai penghantar torsi dari diferensial menuju roda. Fungsi utamanya adalah menyalurkan daya rotasi dari mesin agar kendaraan dapat bergerak secara efisien. Komponen ini umumnya berbentuk silinder memanjang yang tidak hanya menerima beban torsi, tetapi juga beban lentur (*bending*) serta beban kejut akibat kondisi permukaan jalan yang tidak rata. Oleh karena itu, *axle shaft* harus memiliki ketahanan mekanik tinggi terhadap tekanan berulang agar tidak mengalami *fatigue failure*. Material yang digunakan harus melalui proses *heat treatment* yang ketat agar daya tahan dan umur pakainya optimal.

Jenis *axle shaft* diklasifikasikan berdasarkan konstruksi dan beban yang ditahannya. *Floating axle shaft* hanya mentransmisikan torsi tanpa menanggung beban lentur, sedangkan *semi-floating axle shaft* memikul sebagian beban vertikal dan lateral. Kombinasi kedua jenis ini ditemukan pada *three-quarter floating axle shaft*, sementara *full-floating axle shaft* diperuntukkan bagi kendaraan berat karena seluruh beban ditopang oleh rumah gandar dan *bearing*. Dalam desain *axle shaft*, keseimbangan antara kekuatan struktural dan kemampuan fleksibilitas sangat diperlukan untuk menjamin keamanan dan kenyamanan operasional kendaraan. Karena karakteristik kerja yang ekstrem, pemilihan material dan metode pengerasan permukaan sangat krusial dalam mempertahankan performa optimal sepanjang umur komponen.

2. Material S48

Material S48 merupakan jenis baja karbon menengah dengan kandungan karbon berkisar antara 0,45-0,50%, dikenal karena keseimbangan antara kekuatan, kekerasan, dan ketangguhan yang dimilikinya. Dengan kekuatan tarik sebesar 600-750 MPa dan kekuatan luluh sekitar 400-450 MPa, baja ini sering digunakan untuk komponen yang membutuhkan ketahanan terhadap torsi dan beban kejut, seperti *axle shaft*. Kekerasan S48 pada kondisi tanpa perlakuan panas berada di kisaran 170-210 HB, cukup untuk aplikasi umum, namun masih dapat ditingkatkan melalui proses *heat treatment* guna menghadapi kondisi operasional ekstrem.

Dalam konteks aplikasinya, ketahanan aus (*wear resistance*) dan kemampuan deformasi tanpa patah (*ductility*) menjadi dua aspek penting dari material S48. Oleh karena itu, baja ini sering kali menjalani proses *hardening* maupun *tempering* agar struktur mikronya lebih seragam dan padat, meningkatkan kekuatan serta memperkecil kemungkinan kegagalan material secara mendadak. Komposisi kimianya pun memungkinkan penerapan berbagai jenis perlakuan panas secara efektif. Kelebihan inilah yang menjadikan S48 sebagai pilihan strategis dalam industri otomotif maupun teknik manufaktur berat, khususnya dalam produksi poros penggerak kendaraan yang bekerja dalam beban dinamis tinggi dan frekuensi rotasi yang besar.

3. Perlakuan Panas pada Material

Heat treatment merupakan proses perlakuan termal logam yang bertujuan mengubah sifat fisik dan mekanik material tanpa mengubah komposisi kimianya. Proses ini terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu pemanasan, penahanan (*soaking*), dan pendinginan. Tujuan utamanya meliputi peningkatan kekerasan, kekuatan tarik, ketangguhan, dan kemampuan deformasi sesuai dengan karakteristik aplikasi material tersebut. Beberapa teknik umum dalam *heat treatment* antara lain *annealing*, *normalizing*, *hardening*, *tempering*, dan *surface hardening*.

Annealing dilakukan untuk mengurangi kekerasan dan memperbaiki struktur butir logam agar lebih ulet, sementara *normalizing* bertujuan memperoleh mikrostruktur yang lebih homogen dengan kekuatan dan keuletan seimbang. *Hardening* menciptakan struktur *martensite* melalui proses pendinginan cepat atau *quenching*, namun struktur ini bersifat getas. Oleh karena itu, dilakukan *tempering* untuk menurunkan kegetasan sambil mempertahankan



kekerasan yang diperlukan. Adapun *surface hardening* seperti *induction hardening* digunakan untuk mengeraskan permukaan tanpa mengorbankan keuletan inti.

Efektivitas proses perlakuan panas sangat dipengaruhi oleh parameter suhu, laju pemanasan dan pendinginan, serta waktu penahanan. Dengan kontrol yang tepat, transformasi fasa pada logam dapat dimanipulasi secara optimal untuk mendapatkan struktur mikro yang diinginkan, seperti *ferrite*, *pearlite*, *martensite*, atau *bainite*, sesuai kebutuhan kekuatan dan ketahanan aus dari komponen yang diproses.

4. Struktur Logam

Struktur logam sangat menentukan sifat mekanik dan ketahanan material terhadap beban. Struktur kristal logam umumnya berbentuk *Body-Centered Cubic (BCC)*, *Face-Centered Cubic (FCC)*, atau *Hexagonal Close Packed (HCP)*. Pada kondisi padat, logam tersusun dalam pola geometris yang disebut *kristalit*. Struktur ini dapat berubah tergantung suhu dan perlakuan yang diterima.

Misalnya, struktur *ferrite* bersifat lunak dan magnetis, berubah menjadi *austenite* saat dipanaskan pada suhu tertentu, dan kemudian menjadi *martensite* jika didinginkan cepat. *Pearlite* terbentuk dari campuran *ferrite* dan *cementite*, menghasilkan kekuatan dan keuletan sedang. *Martensite* sendiri memiliki struktur *Body-Centered Tetragonal (BCT)* dan sangat keras, namun getas, sedangkan *bainite* menawarkan kombinasi kekuatan dan ketangguhan yang seimbang.

Perubahan struktur ini dikendalikan melalui parameter perlakuan panas seperti suhu, kecepatan pendinginan, dan waktu tahan. Diagram *Isothermal Transformation (IT)* dan *Continuous Cooling Transformation (CCT)* digunakan untuk memahami hubungan antara kecepatan pendinginan dan jenis struktur mikro yang terbentuk. Pemahaman mendalam terhadap struktur logam memungkinkan rekayasa material yang optimal sesuai kebutuhan aplikasi, terutama pada komponen otomotif dan industri berat.

5. Double Hardening

Double hardening merupakan proses perlakuan panas yang terdiri dari dua siklus *hardening* bertahap. Siklus pertama melibatkan pemanasan material hingga suhu austenisasi tinggi, diikuti oleh *quenching* untuk membentuk struktur *martensite*. Kemudian, material dipanaskan kembali pada suhu austenisasi yang lebih rendah dan didinginkan lagi untuk menghasilkan struktur mikro yang lebih halus dan homogen.

Manfaat utama *double hardening* adalah peningkatan kekerasan, kekuatan tarik, ketangguhan, serta ketahanan aus. Hal ini terjadi karena penghalusan butir, homogenisasi struktur, serta terbentuknya kombinasi *martensite* dan *tempered martensite* yang stabil. Selain itu, siklus kedua berperan dalam mengurangi tegangan sisa yang bisa menyebabkan retakan.

Keberhasilan proses ini sangat tergantung pada parameter suhu, waktu tahan, media pendingin, serta laju pemanasan dan pendinginan. Penelitian sebelumnya menunjukkan peningkatan sifat mekanik secara signifikan pada material baja karbon menengah yang menjalani *double hardening* dibandingkan metode tunggal. Oleh karena itu, metode ini banyak diterapkan pada komponen bertegangan tinggi seperti *axle shaft*, *gear*, dan poros transmisi yang menuntut kombinasi ketahanan dan fleksibilitas optimal.

6. Tinjauan Penelitian Terdahulu

Kajian penelitian terdahulu memberikan landasan ilmiah dan pembandingan dalam pengembangan penelitian. Salah satunya adalah studi oleh Putra et al. (2018) mengenai baja ST 60 yang menunjukkan peningkatan kekuatan puntir dan kekerasan setelah perlakuan *tempering*. Penelitian lain oleh Murtalim et al. (2021) meneliti pengaruh suhu *quenching* terhadap kekuatan tarik dan kekerasan *rear hub spindle*, menemukan bahwa suhu pemanasan 875°C menghasilkan sifat mekanik tertinggi.

Hidayat et al. (2017) mengevaluasi pengaruh suhu pendinginan terhadap kekerasan baja S45C, dengan hasil bahwa pendinginan pada 20°C memberikan kekerasan tertinggi. Sementara itu, Sumiyanto (2018) menganalisis efektivitas *induction hardening* pada poros *axle shaft*



material S-43 dan menemukan korelasi kuat antara parameter input mesin dan kedalaman penetrasi kekerasan.

Penelitian oleh Faisal & Asrul (2022) menunjukkan bahwa pengelasan gesek dengan beban tinggi menghasilkan kekuatan lelah tertinggi meski kekerasan relatif rendah. Terakhir, studi oleh Haris et al. (2023) menyoroti pengaruh waktu *tempering* pada baja VCN 150 terhadap perubahan struktur kristal, kekerasan, dan kekuatan tarik. Semua temuan ini mendukung pentingnya parameter perlakuan panas dalam memodifikasi sifat mekanik material untuk aplikasi struktural berat seperti poros kendaraan dan *axle shaft*.

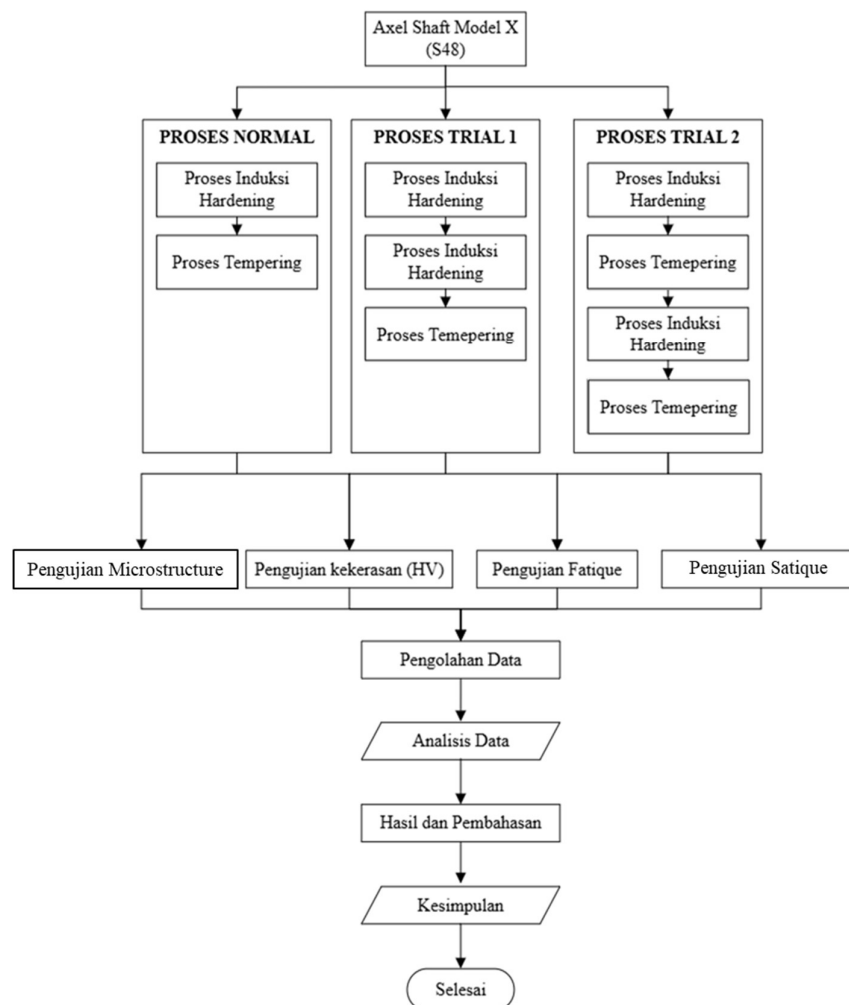
METODE PENELITIAN

1. Desain dan Alur Penelitian

Penelitian ini dirancang untuk mengevaluasi pengaruh *heat treatment* terhadap sifat mekanik baja karbon menengah tipe S48, yang digunakan pada *axle shaft* model X. Terdapat tiga kondisi perlakuan:

- Kondisi Reguler (Normal): satu kali *induction hardening* diikuti *tempering*.
- Trial 1: dua kali *induction hardening* sebelum *tempering*.
- Trial 2: empat kali *induction hardening* tanpa *tempering*.

Gambar 1. Diagram Alir Penelitian



Sumber: Data peneliti langsung



2. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di PT. XXX, perusahaan manufaktur komponen otomotif, dengan fasilitas lengkap termasuk laboratorium metalurgi, *testing center*, dan fasilitas produksi. Agenda waktu pelaksanaan rinci ditampilkan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Timeframe Penelitian

PROGRESS	2025																							
	Februari				Maret				April				Mei				Juni				Juli			
	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4
PENGAJUAN JUDUL																								
PROPOSAL TUGAS AKHIR																								
BAB 1 (PENDAHULUAN)																								
BAB 2																								
BAB 3																								
PENGUJIAN																								
BAB 4																								
BAB 5																								
PENGUJIAN TURNITIN																								
PENYUSUNAN LAPORAN TA (FINAL)																								
PENYUSUNAN PAPER TUGAS AKHIR																								
PUBLIKASI PAPER TUGAS AKHIR																								
SIDANG SKRIPSI																								
REVISI LAPORAN TUGAS AKHIR																								
PENGUMPULAN LAPORAN TA																								

Sumber: Data peneliti langsung

3. Material dan Bahan Pendukung

a. Bahan Utama

Material utama adalah baja karbon menengah tipe S48, dipilih karena kemampuannya dalam menyeimbangkan antara kekuatan dan ketangguhan, serta respons yang baik terhadap *heat treatment*.

b. Bahan Pendukung

- *Aqua quen* (Plastic Quench RP Idemitsu) - media pendingin.
- Larutan etsa (97,5% alkohol + 2,5% HNO₃) - untuk analisa mikrostruktur.
- *Alumina slurry* - pemoles spesimen.
- Amplas berbagai ukuran grit - untuk proses pelapisan halus (*polishing*).

4. Peralatan yang Digunakan

a. Proses Perlakuan Panas

- Mesin *Induction Hardening*
- *Oven tempering*
- Mesin *CNC turning* untuk pembentukan spesimen



b. Alat Uji

- *Metallurgical microscope*
- Mesin uji kekerasan (*Vickers/Rockwell*)
- Mesin uji *fatigue* (torsional cyclic)
- Mesin uji *statique* (torsional static)

5. Variabel Penelitian

a. Variabel Terikat

- Struktur mikro
- Kekerasan (HV)
- Momen puntir (pada pengujian *fatigue* dan *statique*)

b. Variabel Tetap

Tabel 2. Data Variabel Tetap

Parameter	Nilai
Suhu <i>hardening</i>	750 °C - 800 °C
Suhu pendingin <i>quenching</i>	25 °C - 30 °C
<i>Quenching flow</i>	100 - 120 L/min
Waktu <i>induction hardening</i>	60 detik
Suhu <i>tempering</i>	200 °C - 250 °C
Waktu <i>holding tempering</i>	2 jam

Sumber: Data Peneliti langsung

c. Variabel Bebas (Berubah)

Tabel 3. Flowchart Hardening-Tempering

Kondisi	Rangkaian Proses
Kondisi 1 (Normal)	<i>Roughing</i> → <i>Hardening</i> → <i>Tempering</i> → <i>Finishing</i>
Kondisi 2 (2x Hardening)	<i>Roughing</i> → <i>Hardening</i> → <i>Hardening</i> → <i>Tempering</i> → <i>Finishing</i>
Kondisi 3 (2x Hardening + 2x Tempering)	<i>Roughing</i> → <i>Hardening</i> → <i>Tempering</i> → <i>Hardening</i> → <i>Tempering</i> → <i>Finishing</i>

Sumber: Data peneliti langsung

6. Prosedur Eksperimen

a. Pembuatan Spesimen

Bahan dibentuk dengan mesin CNC agar sesuai diameter. Semua spesimen berasal dari baja S48.

b. Proses Perlakuan Panas

- Induksi Hardening: suhu 750-800 °C, pendinginan cepat menggunakan *aqua quench*.
- Tempering: suhu 200-250 °C selama 2 jam, pendinginan alami.



c. Pengujian

- Mikrostruktur: diamati menggunakan mikroskop metalurgi setelah proses etsa.
- Kekerasan: menggunakan metode *Vickers*.
- Fatigue Test: torsi berulang dengan siklus minimal 200.000 cycle.
- Statique Test: momen puntir hingga patah.

7. Pengolahan dan Analisis Data

Data dianalisis melalui tabulasi dan grafik hubungan antar variabel, untuk mencari kondisi optimal perlakuan panas terhadap sifat mekanik baja. Pendekatan ini memungkinkan visualisasi yang kuat terhadap relasi antara siklus perlakuan dan output kekerasan maupun ketahanan material.

8. Rencana Penelitian

a. Rencana Mikrostruktur

Pengamatan pada area permukaan dan bagian dalam untuk ketiga kondisi uji.

b. Rencana Kekerasan

Pengujian kekerasan *Vickers* terhadap seluruh spesimen berdasarkan tiga skenario perlakuan panas.

c. Rencana Fatigue

Tabel 4. Parameter Input Torsion Testing

Parameter	Nilai
Sudut puntir	8° - 9°
Siklus minimal kegagalan	≥ 200.000 cycle
Beban torsi	Disesuaikan eksperimen

Sumber: Data peneliti langsung

d. Rencana *Statique*

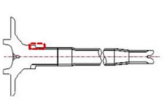
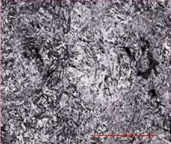
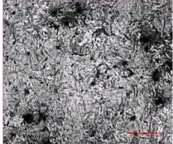
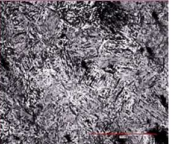
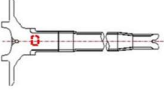
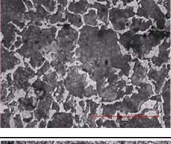
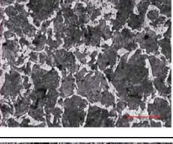
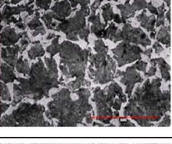
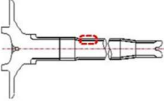
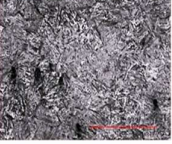
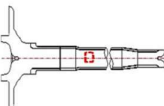
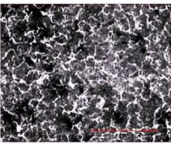
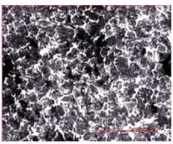
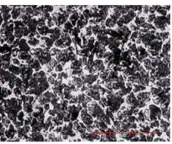
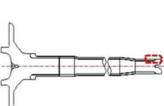
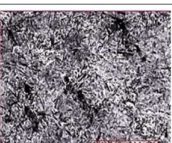
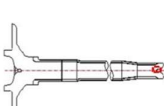
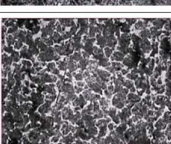
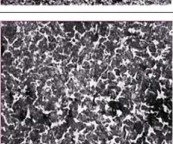
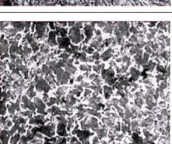
Evaluasi momen patah pada *axle shaft* setelah perlakuan panas, dengan tujuan mengetahui kekuatan maksimum torsional sebelum kegagalan.

Metodologi ini dirancang dengan sistematis untuk menghasilkan data yang komprehensif terkait pengaruh variasi *heat treatment* terhadap karakteristik mekanik baja S48. Dengan kombinasi perlakuan yang terstruktur dan pengujian menyeluruh, penelitian ini diharapkan memberikan sumbangsih praktis bagi pengembangan material otomotif yang unggul dalam ketahanan dan kekerasan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kekuatan dan karakteristik material *axle shaft* berbahan baja S48 dengan pendekatan perlakuan panas yang berbeda, yaitu proses *double hardening*. Tiga konsep proses dijadikan dasar perbandingan, yaitu: Konsep 1 yang merupakan kondisi *normal* atau *reguler*, Konsep 2 yang melibatkan proses *roughing - hardening - hardening - tempering - finishing*, dan Konsep 3 dengan tahapan yang lebih kompleks yaitu *roughing - hardening - tempering - hardening - tempering - finishing*. Ketiga metode ini diharapkan menghasilkan perbedaan signifikan dalam struktur mikro dan sifat mekanis dari spesimen.

Tabel 5. Hasil uji *microstructure*

No	Gambar	Area	Pengujian			Keterangan
			Konsep 1	Konsep 2	Konsep 3	
1		Hardening Area Grinding				Tidak ada perubahan material <i>microstructure</i> pada material yang melalui konsep uji 1,2 dan 3
2		Core Area Grinding				Tidak ada perubahan material <i>microstructure</i> pada material yang melalui konsep uji 1,2 dan 3
3		Hardening Area Shaft				Tidak ada perubahan material <i>microstructure</i> pada material yang melalui konsep uji 1,2 dan 3
4		Core Area Shaft				Tidak ada perubahan material <i>microstructure</i> pada material yang melalui konsep uji 1,2 dan 3
5		Hardening Area Spline				Tidak ada perubahan material <i>microstructure</i> pada material yang melalui konsep uji 1,2 dan 3
6		Core Area Spline				Tidak ada perubahan material <i>microstructure</i> pada material yang melalui konsep uji 1,2 dan 3

Sumber: Data peneliti langsung

Hasil pengamatan mikrostruktur menunjukkan bahwa Konsep 1 masih didominasi oleh struktur *perlite* dan *ferrite*, yang mencerminkan sifat baja yang lebih lunak dan ulet. Sebaliknya, Konsep 2 dan 3 menunjukkan dominasi fasa *martensite* yang lebih padat dan stabil. Terlebih lagi, Konsep 3 memperlihatkan distribusi *martensite* yang lebih merata, yang menandakan keberhasilan proses tempering yang dilakukan dua kali dalam urutan perlakuan panasnya.

Perbedaan utama antar konsep terletak pada susunan perlakuan panas yang berimplikasi pada sifat mekanik akhir seperti kekerasan, ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue*), serta kekuatan statik (*statique*). Evaluasi dilakukan terhadap struktur mikro, distribusi kekerasan, dan daya tahan terhadap beban dinamis maupun statik

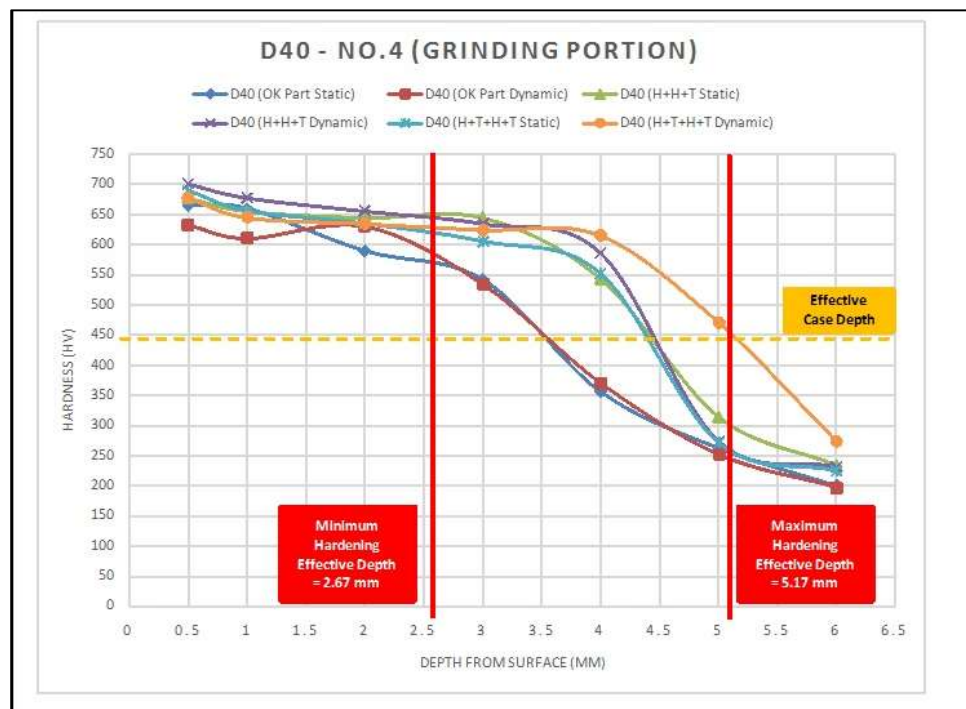
PT. XXX TESTING REPORT HARDNESS DISTRIBUTION											
Note: 1 Axle Shaft D40 OK (Static Torsion Test) 2 Axle Shaft D40 OK (Dynamic Torsion Test) 3 Axle Shaft D40 H+H+T (Static Torsion Test) 4 Axle Shaft D40 H+H+T (Dynamic Torsion Test) 5 Axle Shaft D40 OK H+T+H+T (Static Torsion Test) 6 Axle Shaft D40 H+T+H+T (Dynamic Torsion Test)											
CHECK SHEET HEAT TREATMENT (INDUCTION HARDENING)											
NO	INSPECTION ITEM	INSPECTION METHOD	STANDARD	SAMPLE						JUDGE	REMARK
				1	2	3	4	5	6		
*	Crack 	Ultrasonic Tester	Free from Crack	OK	OK	OK	OK	OK	OK		
		Magnetic Flaw Detector	Free from Crack	OK	OK	OK	OK	OK	OK		
1	NotHardening Area	Macro Test	5 ± 3	-0.5	+0	-1	-1	-1.5	-1.5		
2	Hardening Area		7 ± 4	+0	+0	+0.5	+0	+0.5	+0		
3	Effective Hardness	Vickers Hardness Tester	Min 1.67	2.13	1.95	2.3	2.8	2.4	2.8		(+ 0.17 Allowance Grinding)
4	Depth (HV450Min)		2.67 ~ 5.17	3.6	3.4	4.4	4.7	4.5	5.1		
5			2.50 ~ 5.0	3.4	3.7	4.7	4.85	4.8	5.1		
6			3.50 ~ 5.5	3.9	4.2	4.8	5.2	4.5	5.5		
7	Hardness	Vickers Hardness Tester	HV 600 ~ 800	649.6	646.2	679.9	663.8	666.5	662.1		
8	of		HV 600 ~ 800	656.1	640.7	676.8	686.6	668.3	673.4		
9	Surface		HV 600 ~ 800	656.8	649.1	667	684.9	662.2	676.7		
Over View of Inspection Item :				Date : _____		Shift : _____					
				Model : XXX		Mesin : _____					
				Part Name : SHAFT SUB ASSY, REAR AXLE							
				Part No. : XXX							
				Form No. : FM/QCO/02-M-0607							
CHECKED				INSPECTOR				MATERIAL			
								S 48			

Tabel 4.6 Hasil *distribution Hardness*11

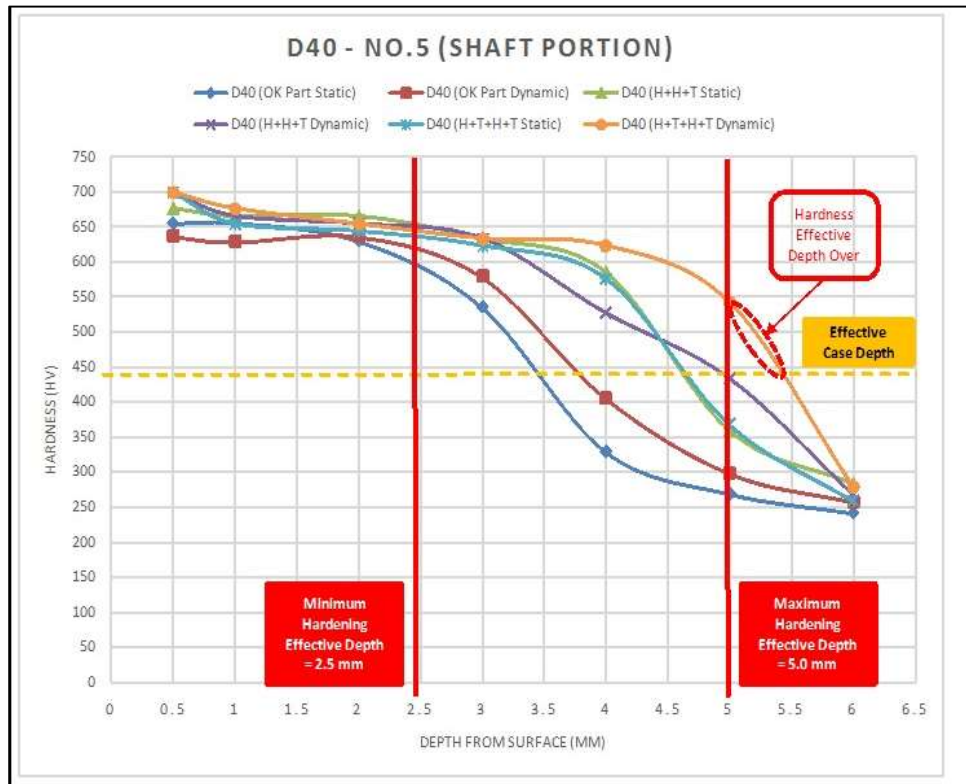
Untuk mempermudah analisis distribusi kekerasan, data telah disajikan dalam bentuk grafik garis berikut:



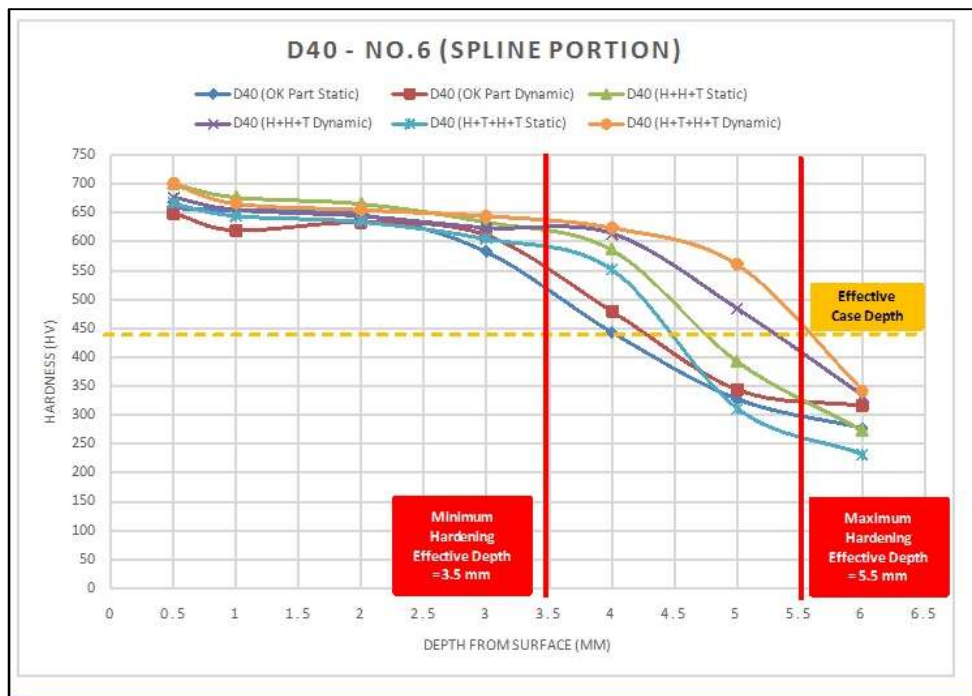
Gambar 4.1 Grafik Hardness area radius grinding (item no.3)



Gambar 4.2 Grafik Hardness area radius grinding (item no.4)



Gambar 4.3 Grafik Hardness area radius grinding (item no.5)



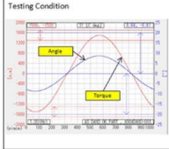
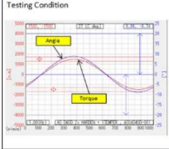
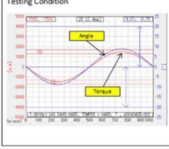
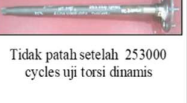
Gambar 4.4 Grafik Hardness area radius grinding (item no.6)

Pada pengujian kekerasan, hasil menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada Konsep 2 dan 3 dibandingkan dengan Konsep 1. Nilai kekerasan dari Konsep 2 masih berada dalam rentang toleransi standar, sedangkan pada Konsep 3 terjadi sedikit kelebihan atau *overhardening*. Namun demikian, pada konsep 2 tidak ditemukan indikasi keretakan (*crack*)



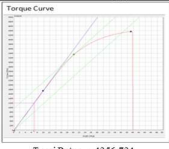
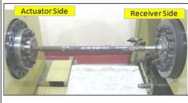
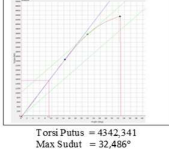
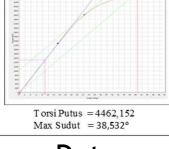
pada spesimen, yang berarti proses *double hardening* tetap dapat diterima dari segi keamanan struktural. Berbeda dengan konsep 3 yang *over standart* menjadi adanya temuan berupa *crack*. Uji distribusi kekerasan juga memperlihatkan pola penurunan kekerasan dari permukaan menuju bagian inti spesimen, yang tergambar lebih jelas dalam grafik tabel 4.4. Hal ini mengindikasikan bahwa proses perlakuan panas telah meresap hingga bagian dalam logam secara merata, terutama pada Konsep 2.

Tabel 7. Hasil Uji Fatigue

Penguian Fatigue							
NO	Pengujian	Standar Siklus Kegagalan (Cycles)	Actual Siklus Kegagalan (Cycles)	Parameter Pengujian	Gambar Sebelum Pengujian	Gambar Setelah Pengujian	Status
1	Konsep 1	200000	253000	 Max Sudut = 8.71° Max Torsi = 1500 Nm Min Sudut = -8.67° Min Torsi = 1500 Nm		 Tidak patah setelah 253000 cycles uji torsi dinamis	Tidak Patah
2	Konsep 2	200000	253000	 Max Sudut = 8.93° Max Torsi = 1500 Nm Min Sudut = -8.65° Min Torsi = 1500 Nm		 Tidak patah setelah 253000 cycles uji torsi dinamis	Tidak Patah
3	Konsep 3	200000	253000	 Max Sudut = 9.11° Max Torsi = 1500 Nm Min Sudut = -8.95° Min Torsi = 1500 Nm		 Tidak patah setelah 253000 cycles uji torsi dinamis	Tidak Patah

Sumber: Data peneliti langsung

Tabel 8. Hasil uji Statique

Penguian Satique							
NO	Pengujian	Standar Patah Area	Actual Patah Area	Curva Torsi & Parameter Pengujian	Gambar Sebelum Pengujian	Gambar Setelah Pengujian	Status
1	Konsep 1	Patah Area Spline	Patah Area Spline	 Torsi Putus = 4356,734 Max Sudut = 39,192°		 Patah pada area spline	OK
2	Konsep 2	Patah Area Spline	Patah Area Spline	 Torsi Putus = 4342,341 Max Sudut = 32,486°		 Patah pada area spline	OK
3	Konsep 3	Patah Area Spline	Patah Area Spline	 Torsi Putus = 4462,152 Max Sudut = 38,532°		 Patah pada area spline	OK

Sumber: Data peneliti langsung



Uji ketahanan lelah (*fatigue*) mengonfirmasi bahwa seluruh spesimen mampu bertahan di atas 253.000 siklus tanpa mengalami kegagalan atau patah. Capaian ini telah melampaui ambang batas minimum 200.000 siklus yang umum digunakan dalam standar industri otomotif. Fakta bahwa tidak ada spesimen yang patah selama uji *fatigue* menjadi indikasi bahwa kekerasan tinggi yang dihasilkan oleh proses *double hardening* tidak berdampak negatif terhadap ketahanan dinamis material.

Dalam uji kekuatan statik (*statique*), seluruh spesimen mengalami patah pada area *spline*, sesuai dengan standar rancangan komponen. Konsep 1 menunjukkan torsi sebesar 4.356,734 Nm dan sudut patah sebesar $39,192^\circ$, menjadikannya sebagai yang paling ulet di antara ketiganya. Sebaliknya, Konsep 2 menghasilkan torsi 4.342,341 Nm dengan sudut patah terkecil yaitu $32,486^\circ$, menandakan bahwa meskipun kekerasannya tinggi, keuletannya relatif menurun. Menariknya, Konsep 3 mencatatkan torsi tertinggi yaitu 4.462,152 Nm dengan sudut patah sebesar $38,532^\circ$, yang menempatkannya sebagai pilihan dengan daya tahan torsi tertinggi namun tetap memiliki keuletan yang mendekati Konsep 1.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menyiratkan bahwa setiap konsep perlakuan panas memiliki keunggulan tersendiri. Konsep 1 cocok digunakan pada aplikasi yang memerlukan keuletan tinggi dan fleksibilitas, seperti pada komponen yang rentan terhadap getaran dan deformasi. Sementara itu, Konsep 2 tampil sebagai alternatif aman dengan kekerasan stabil dan dalam batas toleransi, cocok untuk aplikasi dengan beban tetap dan terukur. Adapun Konsep 3 menunjukkan potensi luar biasa dari sisi kekuatan dan kekerasan, meskipun memerlukan pengawasan lebih lanjut terhadap risiko *overhardening* yang dapat berdampak jangka panjang terhadap keletihan material.

Dengan demikian, penelitian ini membuktikan bahwa modifikasi tahapan dalam perlakuan panas *axle shaft* dapat memberikan peningkatan performa mekanik yang signifikan, namun perlu disesuaikan dengan kebutuhan akhir produk. Strategi kombinasi *hardening* dan *tempering* yang lebih kompleks seperti pada Konsep 3 layak dipertimbangkan dalam industri otomotif atau alat berat, terutama pada komponen yang menuntut daya torsi tinggi dan umur panjang.

KESIMPULAN

Penelitian ini berfokus pada analisis pengaruh *double hardening* terhadap kekuatan material baja S48 yang digunakan pada komponen *axle shaft*. Melalui berbagai pengujian—yakni uji struktur mikro (*microstructure*), kekerasan (*hardness*), ketahanan lelah (*fatigue*), dan kekuatan statik (*statique*)—diperoleh pemahaman komprehensif mengenai efektivitas perlakuan panas ganda terhadap sifat mekanik dan struktur material.

Pada aspek struktur mikro, hasil observasi menunjukkan bahwa tidak terjadi perubahan signifikan baik pada area permukaan yang mengalami pengerasan maupun pada bagian inti (*core*). Proses *double hardening* tidak menyebabkan modifikasi struktur mikro yang berarti, sehingga aman diterapkan tanpa risiko merusak konfigurasi mikro dari material tersebut.

Sementara itu, pengujian kekerasan memperlihatkan bahwa material yang mengalami pengerasan dua kali (konsep 2 dan konsep 3) memiliki kedalaman kekerasan lebih tinggi dibandingkan perlakuan biasa (konsep 1). Namun, hanya konsep 2 yang masih berada dalam rentang toleransi standar, sedangkan konsep 3 melampaui batas yang diperbolehkan. Hal ini menandakan bahwa keberhasilan peningkatan kekerasan tidak hanya bergantung pada metode *hardening*, tetapi juga pada parameter pelaksanaannya. Tidak ditemukan retakan (*crack*) pada semua spesimen, yang menegaskan bahwa prosedur perlakuan panas yang dilakukan masih dalam batas aman.

Pada pengujian ketahanan lelah (*fatigue*), semua konsep menunjukkan daya tahan siklus di atas 200.000, bahkan hingga 253.000 siklus tanpa terjadi patah. Ini berarti perlakuan *double hardening* tidak mengurangi ketahanan lelah material, dan justru konsep 2 memberikan hasil optimal tanpa mengurangi integritas struktural material.



Selanjutnya, uji kekuatan statik (*statique*) menunjukkan bahwa ketiga konsep masih berada dalam ambang kekuatan yang dapat diterima. Konsep 1 menghasilkan torsi sebesar 4356,734 Nm dengan sudut patah 39,192°, sementara konsep 2 dan 3 masing-masing menunjukkan torsi 4342,341 Nm (32,486°) dan 4462,152 Nm (38,532°). Meskipun semua spesimen mengalami patah di area *spline*, hal tersebut masih sesuai dengan standar teknis dari desain *part* yang diuji. Dalam hal ini, konsep 1 menunjukkan karakteristik keuletan yang lebih baik, namun dari segi keseluruhan performa dan kesesuaian terhadap standar, konsep 2 dinilai sebagai yang paling direkomendasikan.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa spesimen dengan perlakuan *double hardening* pada konsep 2 mampu mempertahankan kekerasan, keuletan, dan kekuatan secara seimbang. Perlakuan ini meningkatkan kualitas mekanik material tanpa mengorbankan ketahanan terhadap beban lelah maupun kekuatan torsi.

SARAN

Adapun saran yang dapat diperoleh ialah mencakup pengembangan penelitian dengan uji coba komponen langsung pada kendaraan yang digunakan selama minimal 10.000 km. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan gambaran riil terkait performa dan aspek *safety* dari komponen dalam penggunaan aktual. Selain itu, disarankan agar dilakukan pengujian tarik untuk menilai kemampuan material dalam menghadapi gaya tarik hingga titik patah. Penambahan jumlah spesimen uji dalam eksperimen lanjutan juga direkomendasikan guna memperluas cakupan data yang dapat dianalisis.

DAFTAR PUSTAKA

- Aji, A. T. (2023). *Optimalisasi Ketangguhan Poros As0052 Probolt Dengan Variasi Perlakuan Panas* [SKRIPSI]. Universitas Tidar.
- Amalia, A. N. (2018). *Analisis Pengaruh Perlakuan Panas Hardening dengan Variasi Temperatur Pemanasan, Waktu Tahan, dan Media Pendingin pada Peningkatan Kekerasan Baja Aisi 1045 pada Komponen Axle Shaft*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Chaudhary, S. K., Rajak, A. K., & Ashish, K. (2021). Failure Analysis of Rear Axle Shaft of a Heavy Vehicle. *Materials Today: Proceedings*, 38, 2235-2240. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.312>
- Faisal, M., & Asrul. (2022). Kelelahan Dan Kekerasan Pada Logam Axle shaft Dengan Pengelasan Gesek. *Jurnal Teknik Mesin*, 2.
- Haris, H. F., Budiarto, Widhi, A. R. K., & Sutrisno, Y. N. (2023). Pengaruh Waktu Tempering Terhadap Struktur Kristal, Kekerasan, dan Kuat Tarik Pada Baja VCN 150. *Journal of Mechanical Engineering Manufactures Materials and Energy*, 7(2). <https://doi.org/10.31289/jmemme.v7i2.9472>
- Hidayat, T., & Hartono, P. (2017). *Analisa Pengaruh Suhu pada Media Pendingin terhadap Sifat Mekanis (Kekerasan) Baja S45C pada Proses Hardening*.
- Jefri Suhatta, Hartono, P., & Marlina, E. (2017). Pengaruh Sifat Mekanis Bahan Aisi 1045 yang Mengalami Proses Double Hardening dan Carburizing. *Jurnal Teknik Mesin*.
- Kalpakkian, S., & Schmid, S. R. (2021). *MANUFACTURING (Engineering and Technology)* (Seventh Edition).
- Murtalim, Fathan Mubina Dewadi, Amir, & Wanri Saputra Sigalingging. (2021). Pengaruh Parameter Temperatur Quenching Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Rear Hub Spindles. *Buana Ilmu*, 5(2), 101-118. <https://doi.org/10.36805/bi.v5i2.1507>
- P.C, S. (2019). *A Textbook of Production Technology (Manufacturing Processes) LPSPE*. S. Chand Publishing.



- Permana, T. S. G., & Rumendi, U. (2018). Analisa Uji Keausan Material ST 37 Hasil Carburizing dan Hardening dengan Menggunakan Mesin Uji Keausan Horizontal. *Conference: STEMAN 2014*.
- Politeknik Negeri Bali. (2024). *Perlakuan Panas Logam (Heat Treatment of Metals)*. Pengetahuan Bahan Teknik. <https://api-elearning.pnb.ac.id/upload/post/POST-1731478233-f9ea60bece.pdf>
- Praditya, J. (2018). *Analisis Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan pada Proses Hardening Material 4340 terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Untuk Komponen Axle Shaft*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Putra, R. R., Jokosisworo, S., & Ari Wibawa Budi S. (2018). Analisa Kekuatan Puntir, Kekuatan Tarik dan Kekerasan Baja ST 60 sebagai Bahan Poros Baling-baling Kapal (Propeller Shaft) setelah Proses Tempering. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 6(1), 83-90.
- Riardy, M. (2019). *Karakterisasi Material Axle Shaft Dump Truck Hino Dutro 7,5 Ton*. Univeristas Pasundan.
- Seren, O., Güzey, G., & Kuram, E. (2024). Development and Performance Analysis of Commercial Vehicle Axle Shaft. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 8(2), 232-241. <https://doi.org/10.30939/ijastech..1433048>
- Sudarwi. (2023). *Perbedaan Nilai Kekerasan dan Struktur Mikro pada Proses Double Hardening dengan Media Pendingin Air dan Oli Sae 20 pada Baja Karbon Rendah [SKRIPSI]*. Universitas Medan Area.
- Sumiyanto, S. (2018). Analisis perbandingan Kekerasan Permukaan Poros Axle Shaft Jenis Material S-43 yang Dilakukan dengan Proses Induksi Hardening pada Mesin 12-9 B “Kora Neturen.” *Bina Teknika*, 14(1), 13. <https://doi.org/10.54378/bt.v14i1.263>
- Sutowo, C., & Susilo, B. A. (2013). Pengaruh Proses Hardening pada Baja HQ 7 Aisi 4140 dengan Media Oli dan Air Terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro. *SINTEK*, 7(1).
- Totten G. E. (2006). *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*. CRC Press.
- Universitas Indonesia. (2011). *Pengendalian struktur: Tinjauan literatur*. Universitas Indonesia. <https://lib.ui.ac.id/file?file=digital%2Fold19%2F131652-T+27599-Pengendalian+struktur-Tinjauan+literatur.pdf>
- Wiengmoon, A., Pearce, J. T. H., & Chairuangstri, T. (2011). Relationship between microstructure, hardness and corrosion resistance in 20wt.%Cr, 27wt.%Cr and 36wt.%Cr high chromium cast irons. *Materials Chemistry and Physics*, 125(3), 739-748. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.09.064>
- Zikril, A., Mawardi, M., & Nurdin, N. (2023). Analisa Variasi Temperatur Hardening Terhadap Kekerasan Baja AISI 1045 Dengan Media Quenching Air Mineral. *Jurnal Mesin Sains Terapan*, 7(2), 88. <https://doi.org/10.30811/jmst.v7i2.4483>