

Pengaruh Variasi Temperatur *Tempering* Terhadap Kekerasan Dan Mikrostruktur Material AISI 4140 Pada Komponen Turbin Gas

Roland Prildy Parera¹, Kristiana Pasau², Atus Buku³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Mesin Universitas Kristen Indonesia Paulus
Jl. Perintis Kemerdekaan Km 13 Daya Makassar, 90243
Email korespondensi: roland27dec@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu *tempering* terhadap kekerasan dan mikrostruktur baja paduan AISI 4140, yang banyak digunakan dalam pembuatan komponen turbin gas. Penelitian dilakukan dengan perlakuan panas pada tujuh spesimen silinder baja AISI 4140, yang diaustenitisasi pada suhu 850 °C diikuti dengan proses *quenching* menggunakan oli SAE 40 dan *tempering* pada tiga suhu yang berbeda: 250 °C, 350 °C, dan 450 °C. Satu spesimen dibiarkan tanpa perlakuan panas sebagai pembanding. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada suhu *tempering* 250 °C karena dominasi struktur martensit, mencapai 92,98 RHN. Seiring dengan peningkatan suhu *tempering*, martensit mulai terurai menjadi struktur ferit, perlit, dan bainit, yang menyebabkan penurunan kekerasan secara bertahap. Pada suhu 350 °C, struktur mikro yang seimbang dengan presipitasi karbida memberikan kekerasan yang cukup (89,79 RHN) serta meningkatkan ketangguhan. Pada suhu 450 °C, struktur menjadi lebih homogen dengan dominasi ferit dan perlit, menghasilkan kekerasan 87,89 RHN. Berdasarkan pengamatan mikrostruktur menggunakan SEM dan hasil uji kekerasan, dapat disimpulkan bahwa temperatur *tempering* 350 °C memberikan kombinasi terbaik antara kekerasan dan kestabilan mikrostruktur untuk aplikasi turbin gas skala kecil.

Kata Kunci: AISI 4140, *Tempering*, Kekerasan, Mikrostruktur, SEM, Perlakuan Panas

1. PENDAHULUAN

Dalam era industri modern, kebutuhan akan material dengan performa tinggi semakin meningkat, terutama pada sektor pembangkit energi seperti turbin gas. Komponen-komponen turbin gas beroperasi dalam kondisi ekstrem seperti suhu dan tekanan tinggi serta beban kerja berulang dalam jangka panjang, sehingga memerlukan material yang memiliki kekuatan mekanik tinggi, ketahanan aus, dan stabilitas termal yang unggul untuk menjamin keandalan dan umur pakai yang panjang. Pengembangan turbin gas beroutput tinggi, seperti yang dilakukan oleh IHI Power Systems, menekankan pentingnya material dan komponen yang mampu bertahan terhadap tekanan termal dan beban mekanik tanpa peningkatan ukuran mesin, yang menunjukkan bahwa performa material menjadi faktor kunci dalam keberhasilan desain turbin modern (Kohama dkk., 2024).

Baja paduan AISI 4140 merupakan salah satu material yang banyak digunakan dalam aplikasi teknik berat, termasuk komponen turbin gas, karena sifat mekaniknya yang unggul seperti kekuatan tarik tinggi, keuletan, serta kemampuan untuk diperkeras melalui proses perlakuan panas. Kandungan unsur paduan seperti kromium dan molibdenum dalam AISI 4140 memberikan kombinasi sifat mekanik yang baik, menjadikannya pilihan utama dalam pembuatan

poros, roda gigi, dan komponen mesin lainnya (Purnomo dkk., 2023).

Salah satu proses perlakuan panas yang berperan penting dalam menentukan sifat akhir AISI 4140 adalah *tempering*. *Tempering* dilakukan setelah proses *quenching* untuk mengurangi tegangan sisa, meningkatkan keuletan, dan menyesuaikan tingkat kekerasan material sesuai kebutuhan aplikasi. Variasi temperatur dalam proses *tempering* sangat memengaruhi perubahan sifat mekanik dan struktur mikro baja. Suhu *tempering* yang terlalu rendah menyebabkan struktur martensit tetap dominan dan keras namun getas, sedangkan suhu terlalu tinggi menyebabkan pelunakan signifikan hingga terbentuk fasa ferit dan perlit, yang menurunkan kekerasan material secara drastis (Çoban, 2025).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa temperatur *tempering* berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur baja AISI 4140. Pada temperatur *tempering* yang tinggi, martensit akan mengalami transformasi menuju struktur seperti ferrit dan bainit, yang cenderung lebih lunak namun lebih ulet. Sebaliknya, pada temperatur yang rendah, kekerasan tetap tinggi tetapi sifat keuletan menurun. Oleh karena itu, pemilihan temperatur *tempering* harus mempertimbangkan keseimbangan antara kekerasan dan keuletan, agar

sesuai dengan tuntutan kerja dari komponen turbin gas (Mahardika, 2021).

Temperatur yang dipilih dalam penelitian ini adalah 250 °C, 350 °C, dan 450 °C, yang mewakili rentang suhu *tempering* rendah hingga sedang. Pemilihan suhu tersebut bertujuan untuk mengeksplorasi rentang yang kurang umum digunakan dalam penelitian sebelumnya, sehingga dapat memperluas wawasan ilmiah terhadap pengaruh suhu *tempering* terhadap baja AISI 4140.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi suhu *tempering* 250 °C, 350 °C, dan 450 °C terhadap kekerasan dan struktur mikro baja AISI 4140. Rentang suhu tersebut dipilih untuk merepresentasikan kisaran suhu rendah hingga sedang yang sering dijumpai dalam aplikasi teknik, dengan harapan menghasilkan kombinasi sifat mekanik terbaik untuk komponen turbin gas skala kecil.

2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Material AISI 4140

AISI 4140 merupakan baja paduan rendah berkadar karbon sedang (0,38–0,43 %) dengan kandungan utama kromium, molibdenum, mangan, dan silikon yang memberikan kombinasi kekuatan tarik tinggi, keuletan, dan ketahanan aus yang baik (Prasetya, 2021). Baja ini responsif terhadap perlakuan panas seperti *quenching* dan *tempering*, yang memungkinkan pengaturan sifat mekanik sesuai kebutuhan (Çoban, 2025).



Gambar 1. Material AISI 4140

B. Proses *Quenching*

Quenching adalah proses pendinginan cepat dari suhu austenitisasi untuk mengubah struktur austenit menjadi martensit yang keras. Media pendingin yang digunakan mempengaruhi laju pendinginan dan struktur akhir. Oli SAE 40 digunakan dalam penelitian ini karena mampu menghasilkan pendinginan merata dengan risiko deformasi rendah.



Gambar 2. Proses *Quenching*

C. Proses *Tempering*

Tempering dilakukan setelah *quenching* untuk mengurangi kerapuhan martensit dan meningkatkan keuletan (Ababil & Burmawi, 2022). Suhu rendah mempertahankan kekerasan tinggi tetapi getas, sedangkan suhu tinggi menurunkan kekerasan namun meningkatkan ketangguhan (Mahardika, 2021).

D. Transformasi Fasa

Baja AISI 4140 dapat memiliki beberapa fasa utama:

- Martensit: struktur jarum gelap, sangat keras tetapi getas.
- Ferit: struktur terang, lunak, dan ulet.
- Perlit: pola lamelar ferit–sementit, sifat mekanik menengah.
- Bainit: struktur halus, kombinasi kekerasan dan keuletan baik.



Gambar 3. Mikrostruktur AISI 4140

E. Uji Kekerasan *Rockwell*

Dalam penelitian oleh Weriono dkk. (2020), metode *Rockwell* digunakan untuk menguji kekerasan material AISI 4140 setelah perlakuan panas. Metode ini efektif memberikan hasil yang akurat dan konsisten terhadap perubahan sifat mekanik akibat perlakuan panas, serta umum digunakan di berbagai laboratorium teknik material.

F. Pengamatan Mikrostruktur dengan SEM

Pengamatan mikrostruktur dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang mampu menghasilkan citra resolusi tinggi untuk mengidentifikasi fasa seperti martensit, ferit, perlit, dan bainit. Preparasi sampel meliputi pemotongan, pengamplasan, pemolesan, dan etsa dengan larutan nital 2 % untuk memperjelas batas butir. Hasil pengamatan ini digunakan untuk mengkorelasikan perubahan mikrostruktur dengan nilai kekerasan setelah perlakuan panas.

G. Aplikasi AISI 4140 pada Komponen Turbin Gas

Baja AISI 4140 banyak digunakan pada komponen turbin gas skala kecil seperti *rotor sleeve*, *shaft sleeve*, *bearing collar*, *spacer ring*, *end washer*, *nozzle guide vane insert*, *impeller spacer*, dan *cover disk*. Sifat mekanik yang unggul termasuk kekuatan tarik tinggi, ketahanan aus, dan kemampuan mempertahankan stabilitas pada suhu tinggi.

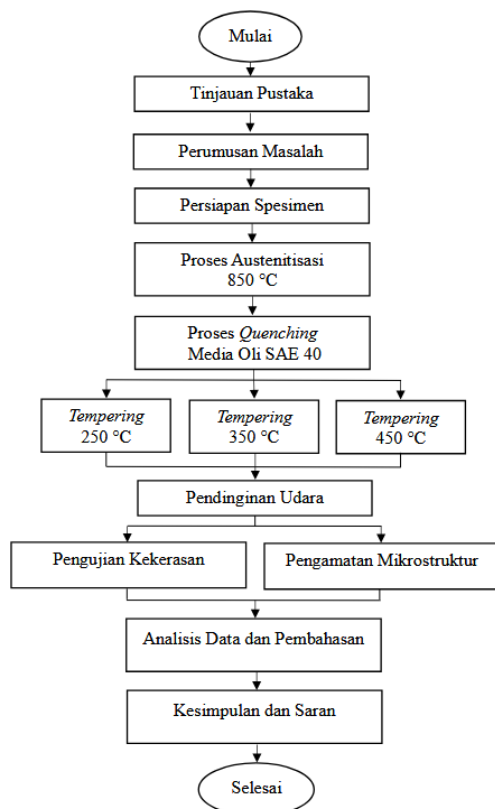
menjadikannya ideal untuk aplikasi dengan beban siklik dan temperatur ekstrem.

Perlakuan panas seperti *quenching* dan *tempering* diperlukan untuk menyesuaikan keseimbangan antara kekerasan dan keuletan. Suhu *tempering* yang tepat dapat meningkatkan umur pakai dan keandalan komponen, sehingga mendukung kinerja turbin gas secara keseluruhan.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada 13 sampai 16 Juni 2025 di Laboratorium Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang (PNUP). Kegiatan penelitian mencakup persiapan spesimen, proses perlakuan panas, pengujian kekerasan, serta pengamatan struktur mikro menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Seluruh tahapan dilakukan sesuai prosedur laboratorium untuk memastikan hasil yang valid.

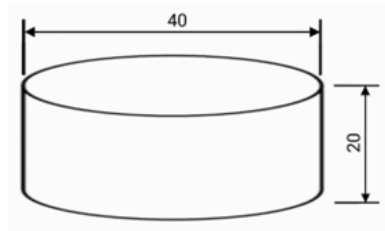
Tahapan penelitian disusun secara sistematis mulai dari persiapan spesimen hingga analisis hasil, yang digambarkan dalam diagram alir pada Gambar 4 untuk memudahkan pemahaman proses secara keseluruhan.



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian (*Flow chart*)

Material yang digunakan adalah AISI 4140 berbentuk silinder berdiameter 40 mm dan tinggi 20 mm. Penelitian ini menggunakan total 7 spesimen, terdiri dari 1 spesimen tanpa perlakuan panas sebagai pembanding, dan 6 spesimen lainnya diberi perlakuan *tempering* pada suhu berbeda. Spesimen dipanaskan

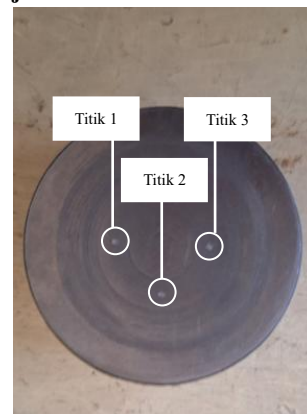
hingga 850 °C selama 30 menit (austenitisasi), kemudian didinginkan cepat menggunakan oli SAE 40 (*quenching*). Selanjutnya dilakukan proses *tempering* pada suhu 250 °C, 350 °C, dan 450 °C selama 30 menit, lalu didinginkan di udara. Uji kekerasan dilakukan dengan metode *Rockwell* skala D (RHN) sesuai ASTM E18 pada tiga titik uji tiap spesimen. Pengamatan mikrostruktur dilakukan dengan SEM setelah tahap preparasi berupa pemotongan, pengamplasan, pemolesan, dan etsa menggunakan larutan nital 2 %.



Gambar 5. Dimensi Spesimen

4. HASIL

A. Hasil Uji Kekerasan

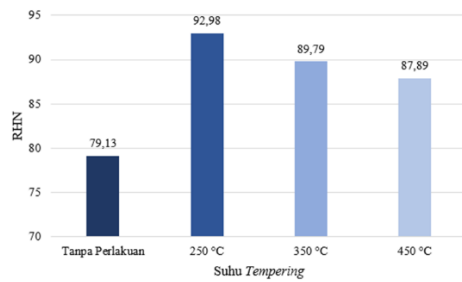


Gambar 6. Titik Uji Kekerasan

Pada permukaan spesimen uji kekerasan terlihat tiga bekas titik indentasi yang dihasilkan dari proses pengujian. Bekas ini menunjukkan posisi *penetrator* saat pengambilan data, yang kemudian digunakan untuk menghitung nilai rata-rata kekerasan.

Tabel 1. Hasil Uji Kekerasan *Rockwell*

Spesimen	Nilai Kekerasan (RHN)			Rata-rata	
	1	2	3		
T0-C	77,3	81,6	78,5	79,13	79,13
T250-A	91,4	93,3	92,0	92,23	92,98
T250-B	93,2	94,2	93,8	93,73	
T350-A	88,6	90,1	89,4	89,36	89,79
T350-B	91,0	89,5	90,2	90,23	
T450-A	87,4	89,2	86,7	87,76	87,89
T450-B	88,6	87,6	87,9	88,03	



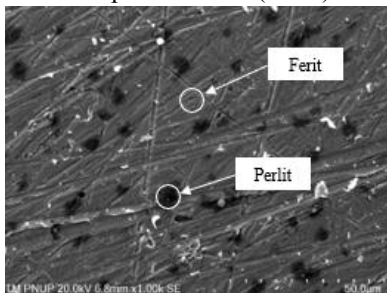
Gambar 7 Grafik Kekerasan vs Suhu Tempering

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan *Rockwell* skala D, terlihat adanya tren penurunan nilai kekerasan seiring meningkatnya suhu *tempering*. Spesimen tanpa perlakuan panas (T0-C) memiliki nilai terendah sebesar 79,13 RHN, sedangkan spesimen dengan *quenching* dan *tempering* pada suhu 250 °C (T250-A dan T250-B) menunjukkan nilai tertinggi, yaitu 92,98 RHN. Pada suhu ini, martensit hasil *quenching* belum mengalami pelunakan signifikan sehingga kekerasan tetap tinggi.

Seiring kenaikan suhu *tempering* ke 350 °C dan 450 °C, nilai kekerasan menurun masing-masing menjadi 89,79 RHN dan 87,89 RHN akibat presipitasi karbida halus serta transformasi sebagian martensit menjadi ferit dan perlit yang lebih lunak. Hasil ini sejalan dengan teori dan temuan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa suhu *tempering* rendah mempertahankan dominasi martensit, sedangkan suhu lebih tinggi mendorong pembentukan fasa bainit, ferit, dan perlit sehingga menurunkan kekerasan.

B. Hasil Pengamatan Mikrostruktur

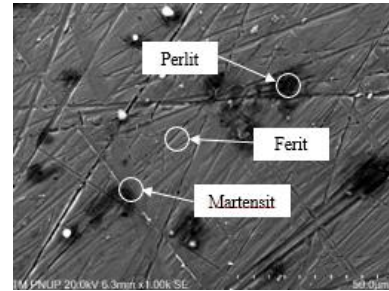
1) Spesimen Tanpa Perlakuan (T0-C)



Gambar 8. Mikrostruktur T0-C Pembesaran 1000×

Struktur mikro didominasi oleh ferit dan perlit, yang menunjukkan tekstur terang dan pola lamelar pada citra SEM. Tidak terdapat martensit karena spesimen tidak mengalami proses *quenching*. Kombinasi ini menghasilkan kekerasan rendah (79,13 RHN), yang mencerminkan kondisi lunak dan mudah ditempa. Temuan ini sejalan dengan Sari dan Prasetyo (2024) yang memaparkan bahwa baja AISI 4140 tanpa perlakuan panas memperlihatkan dominasi ferit dan perlit, menghasilkan kekerasan yang rendah namun keuletan tinggi.

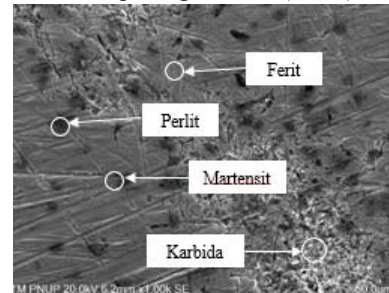
2) Spesimen Tempering 250 °C (T250)



Gambar 9. Mikrostruktur T250 Pembesaran 1000×

Setelah proses *quenching* dan *tempering* pada suhu 250 °C, struktur mikro didominasi oleh martensit yang tampak sebagai garis-garis gelap halus. Masih terlihat sisa perlit dan ferit. Dominasi martensit menjelaskan tingginya kekerasan pada spesimen ini (92,98 RHN). Dalam penelitian Çoban (2025) memaparkan bahwa suhu *tempering* yang rendah seperti 250 °C belum cukup untuk menyebabkan transformasi martensit menjadi fasa lunak, sehingga struktur martensit tetap dominan dan kekerasan material relatif tinggi.

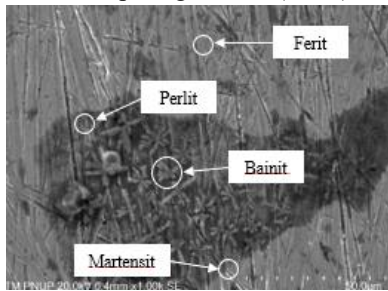
3) Spesimen Tempering 350 °C (T350)



Gambar 10. Mikrostruktur T350 Pembesaran 1000×

Pada suhu *tempering* 350 °C, struktur martensit yang sebelumnya terbentuk akibat proses *quenching* mulai mengalami pelunakan dan terurai menjadi perlit dan ferit. Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan adanya transformasi fasa menuju bentuk yang lebih stabil, dengan kemunculan presipitasi karbida halus dan butiran yang mulai membulat. Proses ini merupakan tahap awal dari rekristalisasi dan *stress relief*, yang menurunkan kekerasan menjadi sekitar 89,79 RHN. Hal ini sejalan dengan temuan Mahardika (2021) yang memaparkan bahwa pada kisaran suhu 300–400 °C, struktur mikro baja AISI 4140 menunjukkan penurunan kekerasan dan peningkatan keuletan akibat pembentukan butiran sementit yang lebih halus dan membesar, serta peralihan fasa dari martensit menuju ferit dan perlit.

4) Spesimen Tempering 450 °C (T450)



Gambar 11. Mikrostruktur T450 Pembesaran 1000×

Pada spesimen yang *ditempering* pada suhu 450 °C, struktur mikro menunjukkan ferit dan perlit yang lebih dominan dan homogen, dengan sedikit sisa martensit serta keberadaan struktur bainit berbentuk seperti cabang atau bunga. Hal ini menandakan bahwa sebagian martensit telah berubah menjadi fasa yang lebih stabil dan lunak. Nilai kekerasan turun ke 87,89 RHN, namun struktur ini cenderung lebih tangguh dan tahan terhadap beban siklik. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Çoban (2025) yang menunjukkan bahwa pada suhu *tempering* tinggi (>400 °C), martensit terurai secara menyeluruh dan struktur mikro berkembang menjadi kombinasi ferit, perlit, dan bainit halus yang cocok untuk meningkatkan keuletan dan ketahanan terhadap beban dinamis.

C. Temperatur *Tempering* Terbaik untuk Turbin Gas Skala Kecil

Temperatur *tempering* terbaik untuk komponen turbin gas skala kecil ditentukan berdasarkan hasil uji kekerasan dan pengamatan mikrostruktur baja AISI 4140. Suhu 250 °C menghasilkan kekerasan tertinggi (92,98 RHN) dengan dominasi martensit padat, namun sifatnya getas. Suhu 450 °C menghasilkan kekerasan terendah (87,89 RHN) dengan dominasi ferit dan perlit yang ulet namun kurang tahan aus. Suhu 350 °C memberikan keseimbangan optimal (89,79 RHN) dengan struktur mikro campuran martensit terurai, perlit, dan ferit yang stabil, sehingga dinilai paling sesuai untuk aplikasi turbin gas skala kecil yang memerlukan kekuatan, keuletan, dan ketahanan aus yang seimbang.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan dan pengamatan mikrostruktur baja AISI 4140 pada berbagai suhu *tempering*, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi suhu *tempering* memengaruhi kekerasan baja AISI 4140. Nilai tertinggi (92,98 RHN) diperoleh pada 250 °C, lalu menurun pada 350 °C (89,79 RHN) dan 450 °C (87,89 RHN) akibat perubahan martensit menjadi ferit dan perlit.

2. Mikrostruktur pada 250 °C didominasi martensit, pada 350 °C terdiri dari martensit terurai, ferit, dan perlit dengan presipitasi karbida, sedangkan pada 450 °C didominasi ferit, perlit, dan sedikit bainit.
3. Suhu *tempering* 350 °C dinilai paling optimal untuk komponen turbin gas skala kecil karena menghasilkan kekerasan tinggi, struktur mikro stabil, serta keseimbangan kekuatan dan ketangguhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ababil, A., & Burmawi, B. (2022). Analisa pengaruh panas (*tempering*) terhadap sifat mekanik dan struktur mikro baja AISI 4140. *Jurnal Fakultas Teknologi Industri Universitas Bung Hatta*, 20(2).
- Çoban, O. (2025). Heat treatment of AISI 1040 and AISI 4140 steels: Microstructure-mechanical property relationships for normalization, spheroidization and quenching-tempering. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34(2), 345–360.
- Kohama, T., Asai, H., & Sato, W. (2024). Development of gas turbine to boost output by 25% without changing engine size. *Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems*, 15(3), 1–8.
- Mahardika, S. (2021). Analisa rekayasa sifat mekanik baja AISI 4140 dengan variasi suhu *tempering* untuk meningkatkan keuletan dan kekerasan material. *Jurnal Mekanika: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, 6(1).
- Novianto, D. R., & Drastiawati, N. S. (2024). Pengaruh variasi temperatur *quenching* dan media pendingin oli terhadap kekerasan dan struktur mikro poros engkol baja AISI 4140. *Jurnal Teknik Mesin Universitas Negeri Surabaya*, 12(1), 33–40.
- Prasetya, R. B. (2021). Karakteristik kekuatan material AISI 4140 dengan variasi diameter. *Jurnal Teknik Mesin*, 6(1), 45–52.
- Purnomo, P., Muhammad, B., Sugiyanto, S., Zulhanif, Z., & Nafrizal, N. (2023). Pengaruh proses *austempering* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro baja AISI 4140. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 12(2).
- Sari, A., & Prasetyo, B. (2024). Analisa kedalaman pengerasan dan struktur mikro pada baja AISI 4140 dengan proses karburizing. *Jurnal*

- Mesin Material Manufaktur dan Energi, 13(2), 45–52.
- Weriono, W., Rinaldi, R., & Sepfitrah, S. (2020). Evaluasi pengujian kekerasan material AISI 4140 menggunakan *full factorial design of experiment*. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 3(1), 23–28.