

Perlakuan Panas Bertingkat sebagai Upaya Meningkatkan Kekuatan Mekanik Baja Karbon Rendah

M. Fajar Sidiq^{1*}, Galuh R.W², Royan H³, Okky Hendra H⁴, Saufik Luthfianto⁵ 

^{1,2,3} Prodi Teknik Mesin, Universitas Pancasakti, Tegal, Jawa Tengah, Indonesia

⁴ Prodi Teknik Sipil, Universitas Pancasakti, Tegal, Jawa Tengah, Indonesia

⁵ Prodi Teknik Industri, Universitas Pancasakti, Tegal, Jawa Tengah, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received September 21, 2021

Revised September 29, 2021

Accepted March 14, 2022

Available online April 25, 2022

Kata Kunci:

Treatment bertingkat, arang, sifat fisik.

Keywords:

Stratified treatment, charcoal, physical properties.



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2022 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

ABSTRAK

Penggunaan suhu pemanasan yang tidak sesuai juga tidak akan meningkatkan kekerasannya secara signifikan apalagi jika menggunakan bahan baku dengan kualitas yang rendah dari faktor kekerasan yang dimilikinya. Oleh karena itu, untuk meningkatkan ketahanan logam dalam keausan dan meningkatkan kekerasannya adalah dengan proses perlakuan panas. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas bertingkat sebagai upaya meningkatkan kekuatan mekanik baja karbon rendah. Instrumen yang digunakan dalam pengujian ini antara lain, mesin gerinda potong, tang penjepit, sarung tangan, wadah media pendingin, tungku *heat treatment*, *torch flame hardenin*. Dari hasil penelitian ini didapatkan baja karbon rendah mengalami peningkatan kekerasan dan ketahanan geseknya selama karburising dan hardening, akan tetapi mengalami penurunan dan kenaikan laju korosi meningkat setelah mengalami proses tempering.

ABSTRACT

The use of inappropriate heating temperatures will also not increase the hardness significantly, especially if using raw materials with low quality from the hardness factor it has. Therefore, to increase the resistance of metals in wear and tear and increase their hardness is a heat treatment process. The purpose of this study was to determine the effect of stratified heat treatment as an effort to increase the mechanical strength of low carbon steel. The instruments used in this test include cutting grinding machines, clamping pliers, gloves, cooling media containers, heat treatment furnaces, Torch Flame Hardenin. From the results of this study, it was found that low carbon steel experienced an increase in its hardness and frictional resistance during carburising and hardening, but decreased and increased corrosion rate after undergoing the tempering process.

1. PENDAHULUAN

Dalam kehidupan manusia, logam merupakan bahan yang paling banyak digunakan. Dari beragam logam yang ada, baja menjadi salah satu material yang sering digunakan baik sebagai alat bantu maupun alat untuk hunian (Perdana, 2017). Jenis baja sendiri beraneka ragam tergantung dari beberapa hal penyusunnya, salah satu factor yang menjadi acuan adalah persentase kadar karbon yang ada didalamnya. Dari situ, baja karbon dapat dibagi berdasarkan banyaknya kandungan karbon menjadi tiga jenis, baja karbon tinggi, baja karbon sedang, dan baja karbon rendah. Salah satu pemanfaatan logam dalam kehidupan manusia dapat dilihat peralatan rumah tangga. Pembuatan pisau potong secara tradisional dilakukan melalui industri rumahan pandai besi (Trihutomo, 2015). Saat membuat perkakas yang dipesan konsumen, home industri pandai besi menggunakan peralatan sederhana. Pengetahuan yang digunakan dalam pembuatan peralatan didasarkan pada pengetahuan yang diturunkan dari generasi ke generasi. Proses pembuatannya menggunakan metode pengerasan dan untuk mendinginkan benda kerja yang selalu menggunakan air sebagai media pendingin. Hasil dari proses tersebut menyebabkan logam menjadi keras akan tetapi getas. Penggunaan suhu pemanasan yang tidak sesuai juga tidak akan meningkatkan kekerasannya secara signifikan apalagi jika menggunakan bahan baku dengan kualitas yang rendah dari factor kekerasan yang dimilikinya (Paristiawan, Ridlo, Prasetyo, & Chandra, 2021). Karena kandungan karbonnya yang rendah, maka susah untuk dapat dikeraskan secara langsung. Untuk itu, perlu adanya masukan karbon dari luar untuk meningkatkan kemampuan pengerasannya melalui heat treatment. Sehingga diperlukan proses yang tepat dalam pengolahan logam tersebut supaya didapatkan peningkatan kekerasan dan ketahanan ausnya dalam penggunaannya. Oleh karena itu, penting bagi peneliti memberikan informasi penelitian yang dapat digunakan oleh industri rumahan yang memproduksi peralatan rumah

*Corresponding author.

E-mail addresses: fajarsidiq@upstegal.ac.id (M. Fajar Sidiq)

tangga, terutama pisau untuk dapat meningkatkan kualitas hasil produksinya. Metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan ketahanan logam dalam keausan dan meningkatkan kekerasannya adalah dengan proses perlakuan panas. (Kumar et al., 2015; Rile, 2019).

Proses heat treatment dilakukan untuk mendapatkan logam dengan sifat mekanik yang kita inginkan (Mirzaei, Saghafian, Beitollahi, Swierczek, & Tiberto, 2019; Motagi & Bhosle, 2012). Tingkat kekerasan, keuletan, kemampuan permesianan dari logam dapat disesuaikan dengan proses heat treatment, selain itu tegangan sisa akibat proses pembentukan yang dapat meningkatkan laju korosi juga dapat dihilangkan sehingga laju korosi dari logam dapat dikurangi (Hafeez, Inam, & Farooq, 2020; Sahnesarayi, Sarpoolaky, & Rastegari, 2019; Sidiq, Willis, & Shidik, 2020). Proses ini juga dapat digunakan untuk memodifikasi beberapa properti yang dimiliki oleh logam dengan tujuan tertentu, seperti: meningkatkan kinerja pemrosesan, meningkatkan keuletan, dan memulihkan elastisitas setelah pengerjaan dingin ataupun pengerjaan hasil pengelasan (Anwar et al., 2019; Priambodo & Widyanto, 2015; Rahmadianto, Purnowidodo, & Soenoko, 2014; Shuaib-Babata & Adewuyi, 2016). Logam yang mudah untuk diberi perlakuan panas adalah baja, dan sifat fisik serta mekanik logam dapat diubah sesuai kebutuhan (Priambodo & Widyanto, 2015; Senthilkumar & Ajiboye, 2018).

Proses perlakuan panas yang digunakan dapat disesuaikan dengan hasil akhir dari logam yang dibutuhkan. Dalam perkembangannya proses perlakuan panas sendiri mengalami berbagai perkembangan (Rile, 2019). Melihat dari jenis logam yang digunakan, baja st 41 merupakan contoh dari baja yang memiliki kadar karbon dalam kisaran 0,2% dan termasuk dalam jenis baja karbon rendah (Han et al., 2017). Oleh karena itu maka diperlukan perlakuan kusus terlebih dahulu untuk dapat meningkatkan kekerasannya salah satunya dengan penambahan karbon. Jenis treatment yang dilakukan adalah pack carburizing dengan menggunakan arang batok kelapa (Le, Nguyen, & Bui, 2018; Shi, C., Qu & Provis, 2019). Setelah karbonnya meningkat maka dapat dilakukan proses perlakuan panas selanjutnya. Melihat penggunaannya untuk pisau rumah tangga maka diperlukan kekerasan dan ketahanan aus pada bagian yang tajam dari pisau. Oleh karena itu, proses perlakuan panas yang cocok untuk dapat dilakukan selanjutnya adalah flame hardening karena hanya mengeraskan bagian tertentu saja. Setelah dikeraskan maka bisa dilanjutkan dengan proses tempering untuk menurunkan kegetasannya.

Pengerasan yang dilakukan pada permukaan logam dapat dilakukan dengan memberikan unsur-unsur tertentu (seperti karbon, kalsium karbonat, nitrogen, dll.) dalam proses perlakuan panasnya. Sebagai contoh Proses karburasi, dimana proses ini merupakan proses penambahan unsur karbon (C) pada logam. Penambahan karbon ini hanya terjadi pada permukaan bahan dimana karbon yang akan ditambahkan diperoleh dari bahan yang mengandung karbon, sehingga dapat meningkatkan kekerasan logam tersebut. Pemanasan yang dilakukan kemudian ditahan untuk beberapa saat sebagai upaya untuk meratakan temperature pada specimen sehingga perubahan yang terjadi merata (Budiarto & Turnip, 2018). Setelah dipanaskan dalam ruangan yang mengandung karbon, proses selanjutnya adalah proses pendinginan. Proses pendinginan yang cepat pada carburizing bertujuan untuk mendapatkan permukaan yang lebih keras (Budianto, Agus Choiron, & B. Darmadi, 2016; Luthfianto, Suprayogi, & Samyono, 2017). Hal ini terjadi akibat adanya perubahan struktur mikro pada permukaan baja karburasi. Struktur mikro yang diinginkan dalam proses karburasi adalah struktur martensit yang mempunyai sifat keras, paling keras tetapi getas (Kartikasari, Susiana, & Ocktavian, 2021).

Dibandingkan dengan metode cair dan gas, karburasi padat merupakan metode karburasi yang paling sederhana karena dapat dilakukan dengan peralatan yang sederhana. Pada metode ini bagian-bagiannya ditempatkan di dalam kotak yang berisi media karburasi, kemudian dimasukan dalam oven pemanas pada temperatur austenit (842-953 ° C) dilihat pada diagram fasa (Callister, 2007), pada suhu tersebut arang sebagai media karburasi akan terbakar dan melepaskan CO₂ dan gas CO. Semakin tinggi kandungan karbon dalam arang, semakin baik penetrasi karbon ke permukaan baja, semakin banyak kesempatan martensit yang terbentuk (Herbirowo et al., 2020).

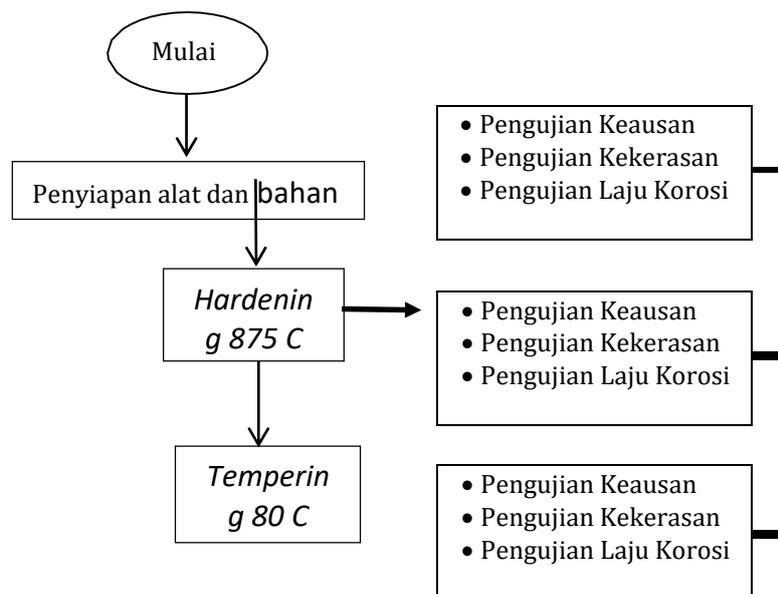
Flame hardening dikategorikan sebagai pengerasan pada bagian tertentu, yaitu pemanasan pada permukaan logam yang cepat untuk kemudian di lanjutkan dengan mendinginkan pada media pendingin dengan kecepatan pendinginan yang tinggi. Ketebalan lapisan hasil pengerasan permukaan tergantung dari beberapa hal, salah satunya adalah temperature pemanasan dan lamanya pemanasan. Pada pengujian ini, pemanasan dilakukan dengan nyala oxy-aceteline yang akan memanasi bagian permukaan dari logam dan dapat digunakan untuk memanasi hanya pada bagian tertentu saja. Pemilihan flame hardening sendiri dikarenakan specimen yang digunakan adalah pisau, sehingga hanya dibutuhkan bagian yang tajam untuk dikeraskan, sedangkan bagian yang lain dapat dibiarkan apa adanya. Selain dapat menghemat biaya, juga dapat menghasilkan pisau yang kuat, keras, tahan aus tapi juga tidak mudah patah.

Proses tempering dilakukan setelah logam mengalami pengerasan akibat proses perlakuan panas. Proses ini dilakukan dengan cara memanaskan kembali logam baja pada suhu tertentu (100 OC sampai dengan 600 OC). Tujuan dari pelaksanaan tempering adalah untuk menurunkan kegetasan yang ada pada

logam, sehingga logam menjadi lebih ulet dan dapat meningkatkan kemampuan permesinannya (Han et al., 2017). Sejalan dengan penelitian (Saefuloh, Haryadi, Zahrawani, & Adjiantoro, 2018) yang menunjukkan bahwa proses perlakuan panas terhadap baja dimaksudkan agar diperoleh struktur yang diinginkan supaya cocok dengan penggunaan yang direncanakan. Penelitian oleh (Priyotomo, A, Stawa, & Rokhmanto, 2021) menunjukkan bahwa terjadi perubahan yang signifikan pada sifat tarik dan kekerasan paduan pemanasan logam. Secara umum, penurunan nilai kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan kekerasan yang disertai kenaikan ketangguhan dan elongasi seiring dengan kenaikan temperature. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas bertingkat sebagai upaya meningkatkan kekuatan mekanik baja karbon rendah. Dengan proses perlakuan panas yang dilakukan, maka diharapkan dapat meningkatkan kekerasan, ketahanan aus, dan ketahanan korosi dari logam yang pada awalnya adalah logam yang lemah.

2. METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode bertingkat yang bertujuan untuk mencari pengaruh variabel tertentu terhadap variabel yang lain dalam proses heat treatment yang berbeda (Han et al., 2017; Huang et al., n.d.; Senthilkumar & Ajiboye, 2018). Dalam penelitian kali ini proses awal yang dilakukan adalah pack carburizing. Proses ini dilakukan karena logam yang digunakan adalah baja karbon rendah, st 41, sehingga perlu dilakukan penambahan karbon untuk memperkerasnya. Pack carburizing digunakan dengan menggunakan penambahan karbon dari arang batok kelapa dengan suhu 875 °C dan di dinginkan dengan air garam. Proses selanjutnya adalah dilakukan flame hardening dengan suhu yang sama dan pendinginan dengan air garam. Alasan pemilihan flame hardening dikarenakan kebutuhan yang diinginkan untuk pembuatan pisau sehingga hanya pengerasan pada bagian luarnya saja sedangkan bagian dalamnya tetap ulet. Setelah dikeraskan dengan flame hardening segera dilanjut dengan proses tempering untuk menurunkan kegetasannya. Untuk lebih mudahnya, langkah- langkah kerja penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Instrumen yang digunakan dalam pengujian ini antara lain, mesin gerinda potong, tang penjepit, sarung tangan, wadah media pendingin, tungku *heat treatment*, *torch flame hardening*. Sedangkan bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah, baja ST-41, arang batok kelapa, dan air garam.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Setelah semua specimen mengalami proses perlakuan panas yang telah ditentukan, kemudian diuji untuk melihat pengaruh dari berbagai proses tersebut terhadap kekuatan dari material dan ketahanan korosinya. Pengujian kekerasan dilakukan untuk melihat pengaruh dari perlakuan panas terhadap peningkatan kekerasan dari permukaan logam. Hasil dari pengujian kekerasan terangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kekerasan

No	Specimen		Nilai kekerasan rata-rata (VHN)
	Variasi	Niai kekerasan (VHN)	
1	Raw Material	124	120
		118	
		118	
2	Carburising	170,25	169
		167,70	
		170,25	
3	Carburising dan Flasmehardening	274,26	269
		269,06	
		264,01	
4	Carburising Flame hardening,dan Tempering	143,06	144
		147,11	
		143,06	

Dari **Tabel 1** terlihat bahwa ada peningkatan nilai kekerasan akibat proses perlakuan panas yang dilakukan. Peningkatan pengerasan ini akibat dari carbon yang diberikan mengalami perubahan menjadi martensit yang keras selama proses perlakuan panas (Fadare et al., 2011). Nilai kekerasan rata-rata tertinggi dihasilkan oleh proses perlakuan carburizing dan flame hardening yang dapat meningkatkan kekerasan dari logam menjadi 269 VHN dari nilai kekerasan logam tanpa perlakuan yang hanya mempunyai nilai kekerasan sebesar 120 VHN. Pengujian keausan dilakukan untuk melihat ketahanan logam terhadap gesekan, sehingga diharapkan aplikasi dari penelitian ini untuk bahan pisau bisa mendapatkan pisau yang ketajamannya terjaga tidak mudah tumpul. Data hasil pengujian laju keausan terdapat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Hasil Pengujian Keausan

Variasi	Titik Uji	Laju keausan (Ws;mm/kg.m)	Rata - rata Laju Keausan (mm ³ /kg.m)
Raw Material	1	0,00266	0,00158
	2	0,00073	
	3	0,00136	
Carbursing	1	0,00035	0,00038
	2	0,00026	
	3	0,00053	
Carbursing dan Flame hardening	1	0,00012	0,0001
	2	0,00008	
	3	0,0001	
Carbursing Flame hardening dan Tempering	1	0,0004	0,00034
	2	0,00034	
	3	0,00028	

Grafik hasil pengujian laju keausan pada **Tabel 2** terlihat bahwa dengan perlakuan panas yang dilakukan dapat menahan laju keausan dari logam. Permukaan dari logam menjadi lebih tahan aus karena terlindungi oleh adanya martensit yang terbentuk akibat proses perlakuan panas. Dengan proses perlakuan panas, laju keausan dari logam baja rendah tersebut menjadi semakin berkurang. Laju keausan terendah dihasilkan oleh proses carburizing dan flame hardening dengan nilai 0,0001 mm³/kg.m. Jauh semakin dari laju keausan raw material tanpa perlakuan panas yang mencapai 0,00158 mm³/kg.m.

Laju korosi dari logam sangat perlu diperhatikan, mengingat setiap logam pasti akan terkorosi tergantung seberapa cepat logam tersebut akan terkorosi. Adanya perlakuan panas pada specimen uji ternyata meningkatkan kecepatan laju korosi yang terjadi. Proses quenching yang dilakukan akan

menyebabkan terjadinya tegangan sisa pada logam sehingga meningkatkan proses laju korosinya. Tabel 3 merupakan hasil pengujian laju korosi.

Tabel 3. Data Pengujian Korosi

No	Spesimen	Berat Awal (gr)	Berat Akhir (gr)	Keahlian Berat (gr)	Luas Korosi (mm ²)	Laju Korosi (MPY)	Rata - Rata Laju Korosi (MPY)
1	Raw Material	24,18	23,58	0,6	1271,42	0,207	0,174
		24,3	23,85	0,45	1268,9	0,155	
		24,31	23,85	0,46	1265,75	0,159	
2	Carburising	24,57	24,2	0,37	1280,23	0,127	0,129
		24,66	24,31	0,35	1259,45	0,122	
		24,25	24,85	0,4	1279,6	0,137	
3	Carburising Flasme Hardening	24,88	24,53	0,35	128,9	0,121	0,156
		24,81	24,15	0,36	1279,6	0,226	
		24,57	24,22	0,35	1271,42	0,121	
4	Carburising Flasme Hardening, Tempering	24,46	24,09	0,37	1255,68	0,129	0,212
		24,36	24,06	0,3	1251,27	0,105	
		24,48	24,31	0,17	1275,82	0,401	

Akibat proses perlakuan panas, laju korosi mengalami peningkatan bahkan melewati laju korosi yang dialami oleh raw material tanpa proses perlakuan panas dengan nilai laju korosi 0,129 mpy. Laju korosi tertinggi dialami oleh proses perlakuan panas carburizing, flame hardening dan tempering dengan nilai 0,212 mpy.

Pembahasan

Pengujian Kekerasan

Dari hasil pengujian kekerasan terlihat bahwa terjadi peningkatan kekerasan akibat dari proses pengerasan pada perlakuan panas yang dilakukan. Pada proses karburising berhasil meningkatkan kadar karbon yang ada sehingga memperbanyak struktur martensit yang terbentuk, sehingga kekerasan pada permukaan specimen menjadi meningkat hal ini sejalan dengan penelitian (Saparin, 2016) yang menggunakan cangkang buah karet sebagai alternatif carburizer. Kekerasan baja menggunakan media air lebih tinggi dibandingkan dengan media lain (Sari, 2017). Kekerasan ini semakin tinggi dengan proses flame hardening yang dilakukan. Pada proses hardening ini karbon tidak bisa mendapatkan lebih banyak waktu untuk bereaksi dengan oksigen (untuk laju pendinginan yang cepat), sehingga karbon terperangkap di dalam specimen dan membentuk martensit. Kekerasan benda kerja hasil proses *hardening* tergantung pada temperatur pemanasan, lama waktu pemanasan, laju pendinginan, komposisi kimia, kondisi permukaan, ukuran dan berat benda kerja (Trihutomo, 2015). Pada proses tempering terjadi penurunan kekerasan dikarenakan perlambatan pendinginan yang dilakukan sehingga specimen uji menjadi lebih ulet (Rahman, Karim, & Simanto, 2016).

Pengujian Keausan

Pada uji keausan terlihat bahwa dengan adanya martensit pada permukaan specimen menjadikan specimen tersebut mempunyai ketahanan aus yang lebih tinggi dibandingkan dengan raw material. Pada umumnya logam yang lebih keras akan lebih tahan gesekan daripada yang lebih lunak, hal ini disebabkan meningkatnya kekuatan ikatan interatomik pada logam yang lebih keras, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap adhesi sehingga menghasilkan karakteristik gesekan yang lebih rendah. Pengerasan permukaan logam dengan proses perlakuan panas juga terbukti menurunkan tingkat gesekan dan keausan, hal ini disebabkan oleh perubahan mikrostruktur sebagai akibat dari transformasi fasa, peningkatan energi permukaan dan tegangan sisa internal. Perlakuan panas yang mendinginkan logam dengan cepat sebagian besar menghasilkan transformasi martensit (Lebudi, Phiri, Leso, & Oladijo, 2020). Sedangkan pada proses tempering, dikarenakan proses pendinginan yang lambat menyebabkan karbon

yang terbentuk kembali terlepas dan tidak terbentuk martensit, sehingga kekerasan dan keausannya menurun. Dengan demikian, semakin tinggi nilai kekerasan permukaan, maka semakin tinggi pula nilai ketahanan aus pada spesimen tersebut (Permana & Rumendi, 2014).

Pengujian Korosi

Dengan memberikan perlakuan panas berulang pada suhu austenit maka laju korosi akan membesar. Karena proses pemanasan pendinginan yang berulang dari suhu tepat di bawah suhu kritis yang lebih rendah, menyebabkan ukuran butir baja paduan menjadi lebih sempurna. Pendinginan berulang akan menghasilkan produksi butiran baru, material berbutir kasar digantikan oleh struktur rekristalisasi berbutir halus. Laju korosi dari sampel yang diquenching berulang kali meningkat, yang berarti bahwa laju korosi meningkat dengan bertambahnya ukuran butir. Pendinginan berulang untuk memurnikan butiran membuat area anoda lebih besar dari struktur berbutir kasar, sehingga mengaktifkan korosi (Seikh, 2013).

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian terhadap specimen, didapatkan beberapa hal yang mendasari untuk penggunaan material pisau. Dari uji kekerasan yang dilakukan, proses yang menghasilkan nilai uji kekerasan tertinggi berturut diperoleh dari proses carburizing dan flame hardening, proses carburizing dan proses carburizing, flame hardening dan tempering. Selain keras, proses carburizing dan flame hardening juga menyebabkan specimen menjadi lebih tahan aus, lebih rendah dari proses carburizing, flame hardening dan tempering dan proses carburizing. Akan tetapi, proses perlakuan panas bertingkat ini menyebabkan laju korosi juga semakin naik bahkan lebih tinggi dari raw materialnya. Laju korosi terendah didapatkan oleh proses carburizing, lebih rendah dari proses carburizing dan flame hardening dan laju korosi tertinggi didapatkan oleh proses dari proses carburizing, flame hardening dan tempering.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Anwar, M. S., Yulianto, E. J., Chandra, S. A., Hakim, R. N., Hastuty, S., & Mabruri, E. (2019). Pengaruh Perlakuan Panas terhadap Struktur Mikro, Kekerasan dan Ketahanan Oksidasi Suhu Tinggi pada Baja Tahan Karat Martensitik 13Cr3Mo3Ni-Cor. *Teknik*, 40(1), 11. <https://doi.org/10.14710/teknik.v40i1.23058>.
- Budianto, E., Agus Choiron, M., & B. Darmadi, D. (2016). Hardening Baja AISI 1045 Menggunakan Gel Aloe Vera Sebagai Media Pendingin. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 7(2), 55–64. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2016.07.02.3>.
- Budiarto, B., & Turnip, K. (2018). Analisis Pengaruh Holding Time terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro pada Proses Induction Tempering Batang Piston Baja SCM 420 H. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 9(3), 235–239. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2018.09.03.11>.
- Callister, W. D. (2007). *Materials Science*. John Wiley & Sons, Inc.
- Hafeez, M. A., Inam, A., & Farooq, A. (2020). Mechanical and Corrosion Properties of Medium Carbon Low Alloy Steel After Cyclic Quenching and Tempering Heat- Treatments. *Materials Research Express*, 7(1). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6581>.
- Han, G., Xie, Z. J., Li, Z. Y., Lei, B., Shang, J., C., & Misra, R. D. K. (2017). Evolution of Crystal Structure of Cu Precipitates in A Low Carbon Steel. *Materials and Design*, 135, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.08.054>.
- Herbirowo, S., Puspasari, V., Primatama, M. I., Hendrik, H., Astawa, I. N. G. P., Adjiantoro, B., & Pramono, A. W. (2020). Pengaruh Perlakuan Panas Karburisasi Austemper pada Baja Laterit Paduan Cr-Mo terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro. *Jurnal Teknologi Bahan Dan Barang Teknik*, 10(1), 19. <https://doi.org/10.37209/jtbbt.v10i1.165>.
- Huang, Y., Zhao, C., Li, N., Zhang, H., Yu, J., & Li, J. (n.d.). Microstructure Evolution of DD6 During Different Heat Treatment Conditions. *Materials Research Express*, 7(1). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab56a1>.
- Kartikasari, R., Susiana, A., & Ocktavian, D. (2021). Peningkatan Kekerasan dan Ketahanan Korosi Paduan Fe-2,9Al-0,4C dengan Proses Karburisasi Padat. *Dinamika Teknik Mesin*, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.29303/dtm.v11i1.352>.
- Kumar, V., Joshi, P., Dhakad, S., Shekhar, H., Singh, S., & Kumar, S. (2015). Analysis of the Effect of Sensitization on Austenitic Stainless Steel 304L Welded by GTAW Process. *Journal of Technology Innovations and Research (IJTIR)*, 14, 1 – 121.
- Le, H., Nguyen, C.-S., & Bui, A.-H. (2018). Experimental Processing of Ultra-Low Carbon Steel Using Vacuum Treatment. *Acta Metallurgica Slovaca*, 24(1), 4–12.

- <https://doi.org/10.12776/ams.v24i1.1070>.
- Lebudi, C. L., Phiri, R. R., Leso, T., & Oladijo, O. P. (2020). Effect of Heat Treatment Hardening on the Dry Sliding Wear Behaviour of Mild Steel. *MRS Advances*, 5(23-24), 1195-1202. <https://doi.org/10.1557/adv.2020.72>.
- Luthfianto, S., Suprayogi, Z. A., & Samyono, D. (2017). Pengaruh Variasi Media Quenching terhadap Sifat Mekanis Rantai Elevator Fruit Kelapa Sawit. *JST: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 6(1), 1-9. <https://doi.org/10.23887/jst-undiksha.v6i1.9396>.
- Mirzaei, S., Saghafian, H., Beitollahi, A., Swierczek, J., & Tiberto, P. (2019). Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Soft Magnetic Properties of the Amorphous Fe-B-P-Cu Alloy. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, 16(2), 1-9. <https://doi.org/10.22068/ijmse.16.2.1>.
- Motagi, B. S., & Bhosle, R. V. (2012). Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Medium Carbon Steel. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2(1), 7-13.
- Paristiawan, P. A., Ridlo, F. M., Prasetyo, M. A., & Chandra, S. A. (2021). Pengaruh Variasi Media Pendingin dan Variasi Holding Time pada Proses Perlakuan Panas terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro pada Baja Mangan Fe-10.5Mn-1.3Mo-2.5Ni. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 12(3), 573 - 580. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2021.012.03.7>.
- Perdana, D. (2017). Pengaruh Variasi Temperatur pada Proses Perlakuan Panas Baja Aisi 304 terhadap Laju Korosi. *Teknika: Engineering and Sains Journal*, 1(1), 67-72. <https://doi.org/10.51804/tesj.v1i1.70.67-72>.
- Permana, T. S. G., & Rumendi, U. (2014). Analisa Uji Keausan Material St 37 Hasil Carburizing dan Hardening dengan Menggunakan Mesin Uji Keausan Horizontal. *STEMAN*, 1-5.
- Priambodo, T. A., & Widyanto, B. (2015). Perubahan Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Akibat Pemanasan di atas Temperatur Kerja pada Material Sudu Turbin Nickel Based Superalloys Srr 99. *Jurnal Teknologi Bahan Dan Barang Teknik*, 5(1), 39. <https://doi.org/10.37209/jtbbt.v5i1.57>.
- Priyotomo, G., A. I. N. G. P., Stawa, & Rokhmanto, F. (2021). Efek Perlakuan Panas terhadap Sifat Mekanik Logam Stainless Steel Seri J4. *TEKNIK*, 42(2), 117-122. <https://doi.org/10.14710/teknik.v42i2.36461>.
- Rahmadianto, F., Purnowidodo, A., & Soenoko, R. (2014). Upaya Peningkatan Sifat Mekanik Baja Mild Steel Melalui Perbaikan Kualitas dengan Heat Treatment Annealing dan Holding Time pada Heat Treatment dengan Taguchi Method. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 5(1), 9-16.
- Rahman, S. M. M., Karim, K. E., & Simanto, H. S. (2016). Effect of Heat Treatment on Low Carbon Steel : An Experimental Investigation. *Applied Mechanics and Materials*, 860, 7-12. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.860.7>.
- Rile, G. (2019). Advanced Heat Treatment Equipment Technology and Product Development of Metal Materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 1213(5). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1213/5/052117>.
- Saefuloh, I., Haryadi, Zahrawani, A., & Adjiantoro, B. (2018). Pengaruh Proses Quenching dan Tempering terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja Karbon Rendah dengan Paduan Laterit. *Flywheel: Jurnal Teknik Mesin Untirta*, 4(1), 56-64. Retrieved from <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jwl>.
- Sahnesarayi, M. K., Sarpoolaky, H., & Rastegari, S. (2019). Influence of Multiple Coating and Heat Treatment Cycles on The Performance of A Nano- TiO₂ Coating in The Protection of 316L Stainless Steel Against Corrosion Under UV Illumination and Dark Conditions. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, 16(2), 33-42. <https://doi.org/10.22068/ijmse.16.2.33>.
- Saparin. (2016). Pemanfaatan Cangkang Buah Karet Sebagai Alternatif Carburizer pada Proses Pack Carburizing Baja Karbon Rendah ST.37. *Machine; Jurnal Teknik Mesin*, 2(2), 17-22.
- Sari, N. H. (2017). Perlakuan Panas Pada Baja Karbon: Efek Media Pendinginan terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro. *Jurnal Teknik Mesin*, 6(4), 263-267. <https://doi.org/10.22441/jtm.v6i4.2091>.
- Seikh, A. H. (2013). Influence of Heat Treatment on The Corrosion of Microalloyed Steel in Sodium Chloride Solution. *Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.1155/2013/587514>.
- Senthilkumar, T., & Ajiboye, T. K. (2018). Effect of Heat Treatment Parameters on Mechanical Properties of D Sedium Carbon Steel. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 22(4), 909-918. <https://doi.org/10.2478/mme.2018-0071>.
- Shi, C., Qu, B., & Provis, J. L. (2019). Recent Progress in Low-Carbon Binders. *White Rose Research*, 122, 227-250. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.009>.
- Shuaib-Babata, Y., & Adewuyi, R. A. (2016). Effects of Thermal Treatment Processes (TTP) on the Tensile Properties of 0.165% Carbon Steel. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, 1(1), 15-19. <https://doi.org/10.46792/fuoyejet.v1i1.10>.

- ESidiq, M. F., Willis, G. R., & Shidik, M. A. (2020). The Effect of Coffee Powder as A Carburizing Agent and Preventing Corrosion The Effect of Coffee Powder as A Carburizing Agent and Preventing Corrosion. *Annual Conference on Computer Science and Engineering Technology (AC2SET)*, 1-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1088/1/012084>.
- Trihutomo, P. (2015). Analisa Kekerasan pada Pisau Berbahan Baja Karbon Menengah Hasil Proses Hardening dengan Media Pendingin yang Berbeda. *Jurnal Teknik Mesin*, 23(1), 29-34. Retrieved from <http://journal.um.ac.id/index.php/teknik-mesin/article/view/5358/2053>.