

PENGARUH TEMPERATUR AUSTENISASI DAN VARIASI *HOLDING TIME* PADA PROSES *PACK CARBURIZING* TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO BAJA ST 60

Mohammad Dae Bintang Mahendra

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: mohammaddae.21032@mhs.unesa.ac.id

Hanna Zakiyya

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: hannazakiyya@unesa.ac.id

Abstrak

Roda gigi adalah elemen mesin penggerak yang berfungsi untuk transmisi daya dan gaya putar antar komponen mesin, selama beroperasi roda gigi akan menerima pembebanan secara konstan. Proses perlakuan permukaan dapat meningkatkan kekerasan logam roda gigi hingga 50 HRC. Penelitian ini menggunakan baja ST 60 dengan perlakuan *pack carburizing* untuk mendapatkan peningkatan kombinasi kekerasan dan ketangguhan, parameter yang digunakan berfokus pada kontrol temperatur austenisasi dan waktu penahanan untuk memperoleh sifat mekanis yang dibutuhkan. Variabel temperatur menggunakan 850°C, 900°C, 950°C dengan variabel waktu penahanan selama 1 jam, 2 jam, 3 jam. Setelah proses karburasi, maka dilanjutkan dengan proses *quenching* , dan *tempering* . Hasil spesimen akan diuji melalui uji kekerasan, uji impact, dan analisa struktur mikro untuk mengetahui sifat dan karakteristik baja ST 60 setelah proses perlakuan panas. Hasil penelitian menunjukkan spesimen dengan kekerasan tertinggi terdapat pada variasi *quenching* dengan nilai 68,2 HRC, sementara kekerasan terendah terdapat pada variasi austenisasi dengan nilai kekerasan tertinggi 38,7 HRC. Variasi *tempering* menunjukkan hasil kekerasan yang hampir optimal untuk roda gigi pada temperatur variasi 850°C, 900°C, dan 950°C. Spesimen uji impact adalah baja ST 60 yang telah melalui perlakuan lanjutan *tempering* dengan nilai harga impact tertinggi 0,172 J/mm². Hasil pengamatan struktur mikro dari baja ST 60 menunjukkan karakterisasi pertumbuhan mikro fasa martensit secara dominan akibat media penggunaan air garam untuk proses *quenching* , selain itu terdapat pembentukan fasa ferit dan fasa perlit. Dapat disimpulkan temperatur austenisasi dan waktu penahanan dengan *pack carburizing* pada baja ST 60 dapat meningkatkan sifat mekanis dan struktur mikro.

Kata Kunci: *Pack Carburizing* , Baja ST 60, Austenisasi, Struktur Mikro, *Holding Time* .

Abstract

Gears are drive components that transmit power and torque between machine parts; during operation, gears are subjected to constant loads. Surface treatment can increase the hardness of gear metal up to 50 HRC. This study uses ST 60 steel with pack carburizing treatment to achieve an improved combination of hardness and toughness; the parameters used focus on controlling the austenitizing temperature and holding time to obtain the required mechanical properties. Temperature variables were set at 850°C, 900°C, and 950°C, with holding times of 1 hour, 2 hours, and 3 hours. Following the carburization process, the specimens underwent quenching and tempering. The specimens were tested via hardness testing, impact testing, and microstructural analysis to determine the properties and characteristics of ST 60 steel after the heat treatment process. The results showed that the specimen with the highest hardness was found in the quenching variation with a value of 68.2 HRC, while the lowest hardness was found in the austenitizing variation with a maximum hardness value of 38.7 HRC. The tempering variations yielded near-optimal hardness results for the gears at temperatures of 850°C, 900°C, and 950°C. The impact test specimens were made of ST 60 steel that had undergone tempering treatment, with a maximum impact value of 0.172 J/mm². Microstructural observations of ST 60 steel reveal that the growth of the martensite phase is predominantly characterized by the use of a saltwater media for the quenching process, additionally, ferrite and pearlite phases were formed. It can be concluded that the austenitizing temperature and holding time with pack carburizing in ST 60 steel can improve mechanical properties and microstructure.

Keywords: Pack Carburizing, ST 60 Steel, Austenitization, Microstructure, Holding Time.

PENDAHULUAN

Mesin industri dan alat berat seperti pompa, generator, dan turbin memiliki prinsip kerja dengan sistem transmisi mekanis yang berfungsi untuk mentransfer daya dari penggerak utama menuju komponen mesin yang akan digerakkan dengan kecepatan dan torsi yang telah diatur. Salah satu komponen utama dari sistem transmisi adalah roda gigi, komponen mesin tersebut merupakan penggerak

utama dalam permesinan yang berfungsi memberikan transmisi dan gaya putar antar komponen mesin untuk dapat beroperasi, sistem transmisi sering diterapkan pada mesin-mesin manufaktur dan otomotif. Penggunaan bahan untuk roda gigi didasarkan pada kebutuhan untuk dapat menahan pembebanan dan keausan, salah satu logam yang sering digunakan adalah baja karbon. Baja karbon sering digunakan dalam pembuatan komponen mesin karena memiliki ketahanan terhadap tekanan dan gesekan

sehingga sesuai untuk komponen mesin seperti poros, rel kereta api, dan roda gigi. Salah satu baja karbon adalah baja karbon ST 60, yang merupakan logam dengan karbon menengah dan memiliki nilai tegangan yang mencapai 600 N/mm^2 dan kekerasan *raw material* sebesar 18,8 HRC. Untuk dapat membuat baja ST 60 diterapkan sebagai roda gigi maka dibutuhkan proses perlakuan panas yang tepat untuk dapat mencapai nilai kekerasan yang memenuhi standar roda gigi. Selain itu komponen roda gigi membutuhkan sifat menahan pembebanan tidak konstan atau tegangan *shock load* agar tidak terjadi kerusakan sistem transmisi (Irawan, 2016), proses perlakuan panas *pack carburizing* dapat digunakan untuk baja ST 60 memenuhi sifat mekanis roda gigi.

Metode *pack carburizing* merupakan proses perlakuan panas dengan menambahkan unsur karbon padat seperti arang dengan campuran katalisator seperti BaCO_3 atau CaCO_3 pada baja karbon. Perlakuan tersebut akan mengakibatkan proses difusi karbon saat pemanasan dan meningkatkan kandungan karbon pada logam, sehingga dapat menghasilkan sifat mekanis berupa permukaan yang keras dengan bagian inti yang ulet atau tangguh. Penambahan unsur karbon akan membuat pembentukan fasa austenit semakin meningkat pada baja ST 60. Proses karburasi membutuhkan temperatur tinggi hingga baja karbon dapat menyentuh pemanasan kritis dan karbon akan diabsorpsi kedalam baja untuk menghasilkan lapisan dengan karbida tertinggi (Putra, 2021).

Faktor temperatur kritis dalam pemanasan seperti austenisasi dapat mempengaruhi proses peningkatan *case depth* baja ST 60 dan akan membentuk lapisan karbon tambahan pada baja karbon. Proses austenisasi berfungsi untuk membentuk struktur fasa austenit yang homogen dan dapat melarutkan lebih banyak karbon sehingga dapat terjadi proses difusi karbon ke permukaan logam. Waktu penahanan selama proses karburasi dapat menyeragamkan temperatur dan kelarutan karbida pada seluruh bagian baja karbon sehingga transformasi fasa austenit dapat terjadi secara merata. Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh (Pramuko, dkk., 2023). Tentang pengaruh waktu tahan pada *pack carburizing* dengan menggunakan waktu penahanan 15, 30, 45, 60 menit, membuktikan parameter waktu penahanan selama proses *pack carburizing* berlangsung dapat mempengaruhi peningkatan sifat kekerasan, sehingga semakin lama waktu tahan yang digunakan maka semakin tinggi kekerasan baja karbon.

Hasil dari proses pemanasan akan menghasilkan fasa austenit dalam jumlah besar, dibutuhkan laju pendinginan cepat seperti air untuk membentuk fasa martensit yang dapat menghasilkan sifat kekerasan, fasa martensit dapat terbentuk dengan perlakuan *quenching* yang menggunakan media air garam yang dikarenakan laju pendinginan yang cepat (Laksono, dkk., 2021). Semakin cepat laju pendinginan maka semakin keras struktur baja dan begitu juga sebaliknya. Selain itu proses pemanasan ulang atau *tempering* diperlukan baja ST 60 untuk mengurangi sisa tegangan akibat proses pendinginan cepat / *quenching* sehingga menghasilkan energi serapan yang cukup baik dan membentuk *tempered martensite* atau fasa ferit.

Berdasarkan analisa diatas, baja ST 60 memiliki kekurangan dalam aspek kekerasan dan ketangguhan untuk diaplikasikan dalam roda gigi. Sehingga penelitian ini akan berfokus untuk meningkatkan sifat mekanis tersebut dari proses perlakuan panas *pack carburizing*, dengan variabel yang digunakan adalah variasi temperatur austenisasi yang dikombinasikan dengan waktu tahan saat pemanasan permukaan terhadap sifat mekanis yang terbentuk dengan karakterisasi mikro struktur untuk ST 60.

METODE

Jenis penelitian yang diterapkan adalah penelitian kuantitatif dengan teknik eksperimental yang berfungsi dalam menentukan hipotesis terukur dan jelas. Adapaun jenis variabel penelitian terbagi sebagai berikut :

Tempat dan Waktu Penelitian

- Tempat Penelitian
Tempat penelitian berada pada laboratorium terpadu teknik Universitas Negeri Surabaya dan laboratorium pengujian bahan Politeknik Negeri Malang.
- Waktu Penelitian
Rentang waktu yang diberikan untuk melaksanakan kegiatan penelitian hingga selesai yang dimulai saat pengajuan judul tugas akhir pada bulan febuari 2025 hingga januari 2026.

Variabel Penelitian

- Variabel Bebas
Variabel bebas mencakup temperatur dengan variasi temperatur 850°C , 900°C , dan 950°C dengan variasi waktu tahan 1 jam, 2 jam, 3 jam.
- Variabel Terikat
Variabel terikat penelitian adalah nilai kekerasan, nilai ketangguhan, dan struktur mikro dari perlakuan spesimen baja ST 60.
- Variabel Kontrol
Variabel kontrol penelitian meliputi arang tempurung kelapa dengan ukuran butir karbon mesh 120 ($125 \mu\text{m}$), barium karbonat (BaCO_3), media air dan garam dapur (NaCl).

Bahan, Alat, dan Instrumen Penelitian

Penelitian menerapkan teknik eksperimental pada proses pemanasan ST 60 dengan metode *pack carburizing*:

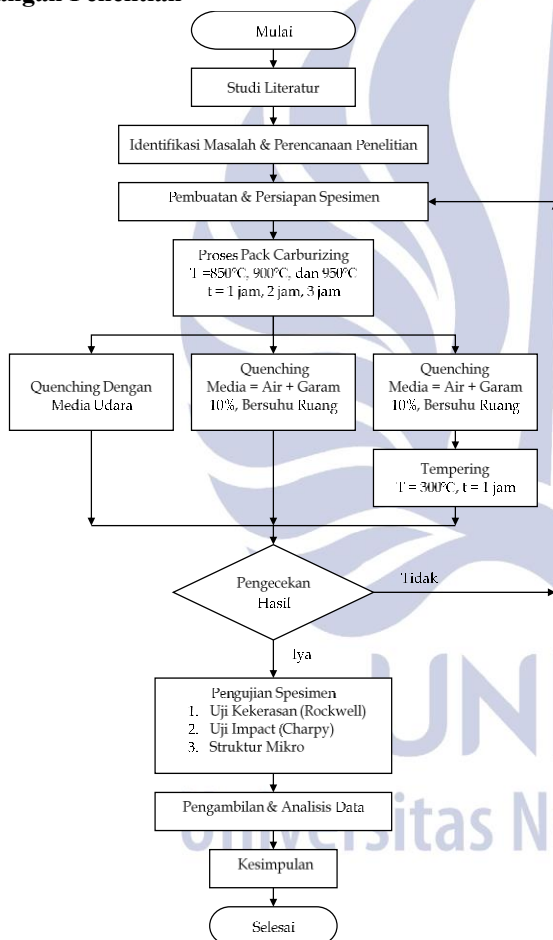
- Bahan
 1. Baja ST 60

Baja ST 60								
Unsur	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu
Komposisi %	0,44	0,63	0,22	0,014	0,004	0,02	0,33	0,02

- 2. Arang Tempurung Kelapa, sebagai media karbon padat untuk proses *perlakuan pack carburizing*.
- 3. Barium Karbonat (BaCO_3), sebagai media katalisator yang digunakan untuk difusi karbon.
- 4. Air dan Garam Dapur (NaCl), sebagai media pendinginan untuk proses *quenching*.
- Alat
 1. *Nabertherm Furnance*, sebagai media pemanasan yang dapat mencapai temperatur 1300°C .

2. Kotak Karburasi, sebagai wadah baja ST 60 dan karbon padat untuk proses *pack carburizing* .
 3. Penjepit Clamp
 4. Alat Ukur, berupa jangka sorong dan penggaris.
 5. Saringan Ukuran 120 Mesh (125 μm), sebagai media ayakan untuk pembuatan karbon padat dengan ukuran 120 mesh.
 6. Kertas Gosok, digunakan untuk menghaluskan permukaan baja ST 60 dengan penggunaan grit 240, grit 400, dan grit 600
 7. Peralatan Safety
- Instrumen
1. *Future Tech: Hardness Tester Rockwell*
 2. Mesin Uji Impact Charpy
 3. Mikroskop Optik Olympus pembesaran 1500x

Rancangan Penelitian



Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan setelah semua bahan dan peralatan terkumpul. Berikut adalah tahapan dari penelitian untuk spesimen ST 60 :

1. Preparasi Spesimen
Baja ST 60 akan dibentuk sesuai dengan standar dari uji kekerasan dan uji impact.
2. Proses Perlakuan *Pack Carburizing*
Spesimen akan dicampur dengan serbuk karbon tempurung kelapa dengan ukuran 120 Mesh dan

katalisator BaCO_3 . Baja ST 60 dipanaskan dalam hingga mencapai temperatur 850°C, 900°C, dan 950°C, dengan waktu tahan 1 jam, 2 jam, dan 3 jam.

3. Proses Perlakuan Lanjutan

Setelah mencapai temperatur austenisasi dengan rentang waktu yang telah ditentukan, maka baja ST 60 akan dibagi dengan proses austenisasi (pendinginan media udara), *quenching* (pendinginan media air garam), *tempering* (pemansan ulang).

3. Pengujian Spesimen

Pengujian kekerasan menerapkan skala Rockwell C yang sesuai ASTM E-18 pada semua spesimen, uji impact menerapkan impact charpy yang sesuai ASTM E-23 dengan spesimen yang telah melalui proses lanjutan *tempering* yang digunakan, karakterisasi struktur mikro dilakukan dengan uji metalografi yang menggunakan mikroskop optik.

4. Analisis Data

Analisis menggunakan gambar grafik hubungan antara temperatur dan *holding time* dengan sifat dari uji kekerasan dan impact, sementara karakterisasi struktur mikro akan dilakukan perhitungan kuantitatif dengan metode *point count* untuk dapat mengetahui presentase fasa dan fasa yang terbentuk.

Teknik Analisis Data

Analisis dilakukan setelah data pengujian terkumpul dengan menggunakan metode statistik deskriptif, untuk mendeskripsikan data yang dikumpulkan. Hasil data uji kekerasan, uji impact, struktur mikro baja ST 60 akan dikumpulkan dan data tersebut dibentuk dan disajikan sebagai tabel data dengan grafik tiap spesimen dan dibuat kesimpulannya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Tabel 1. Nilai Kekerasan Austenisasi

Temperatur Austenisasi	Spesimen	Holding Time	HRC 1	HRC 2	HRC 3	Standar Deviasi	Nilai Rata-Rata
850°C	ST 60	1 jam	28,8	27,1	28,3	0,88	28
	ST 60	2 jam	30,4	32,8	35,1	2,35	32,8
	ST 60	3 jam	32,8	39,2	38,8	3,59	36,9
900°C	ST 60	1 jam	29,8	30,4	30,5	0,38	30,2
	ST 60	2 jam	37,4	37,2	37,8	0,31	37,5
	ST 60	3 jam	36,8	38,3	37,8	0,77	37,6
950°C	ST 60	1 jam	38,9	32,4	35,8	3,25	35,7
	ST 60	2 jam	37,7	38	39,6	1,02	38,4
	ST 60	3 jam	33,9	44,4	37,7	5,32	38,7

Tabel 2. Nilai Kekerasan *Quenching*

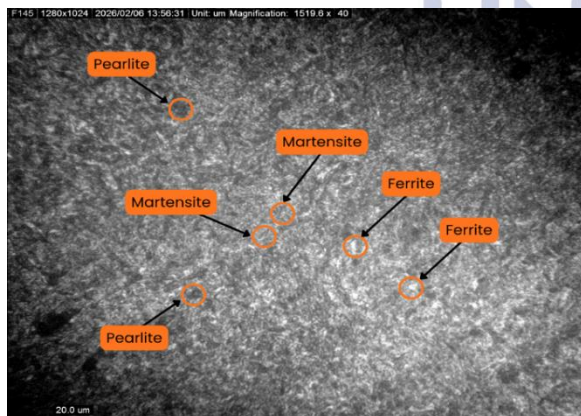
Temperatur Austenisasi	Spesimen	Holding Time	HRC 1	HRC 2	HRC 3	Standar Deviasi	Nilai Rata-Rata
850°C	ST 60	1 jam	53,5	57	63,5	5,03	58
	ST 60	2 jam	55,5	60,9	66	4,96	60,9
	ST 60	3 jam	61,7	63,8	61,9	1,16	62,5
900°C	ST 60	1 jam	61,1	59,1	62,7	1,8	61
	ST 60	2 jam	63,5	64,4	65	0,76	64,3
	ST 60	3 jam	66,1	68,7	67,2	1,31	67,3
950°C	ST 60	1 jam	63,1	66,7	65,5	1,83	65,1
	ST 60	2 jam	66,2	67,6	67,9	0,91	67,2
	ST 60	3 jam	66,5	72,2	66	3,45	68,2

Tabel 3. Nilai Kekerasan *Tempering*

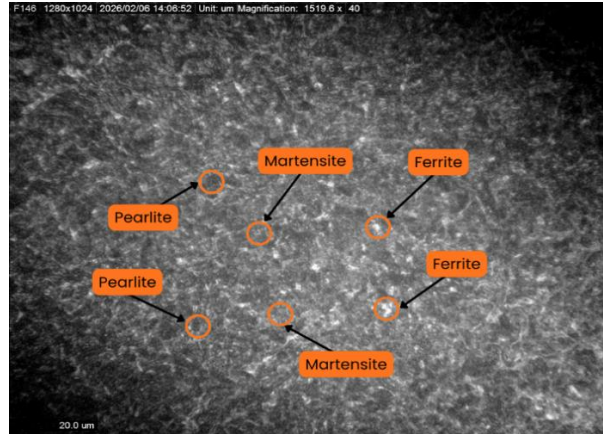
Suhu	Baja	Holding Time	HRC 1	HRC 2	HRC 3	HRC 4	HRC 5	HRC 6	HRC 7	Standar Deviasi	Nilai Rata-Rata
850°C	ST 60	1 jam	40	40,4	43,1	33,3	42,8	37,5	33,4	4,07	40,2
	ST 60	2 jam	47,1	54,3	50	40,9	49	50,3	49,2	4,07	49,1
	ST 60	3 jam	48	54	56,2	49,3	51,2	51,9	54,3	2,91	52,1
900°C	ST 60	1 jam	49,2	50,7	51	48,7	50,1	50,3	48,7	0,86	50,1
	ST 60	2 jam	51,3	52,3	51,6	48,7	48,8	51	51,4	1,41	51,3
	ST 60	3 jam	53,5	55,3	50,1	50,2	50,4	55,5	52,7	2,36	53,1
950°C	ST 60	1 jam	52,8	50,8	55,4	51,4	51,1	51,4	55	1,9	52,7
	ST 60	2 jam	54,1	52,8	57,1	51,4	51	52,3	50,1	2,34	52,7
	ST 60	3 jam	55,1	55,7	55,6	51,3	50,8	53,6	51,6	2,14	52,9

Tabel 4. Hasil Uji Impact

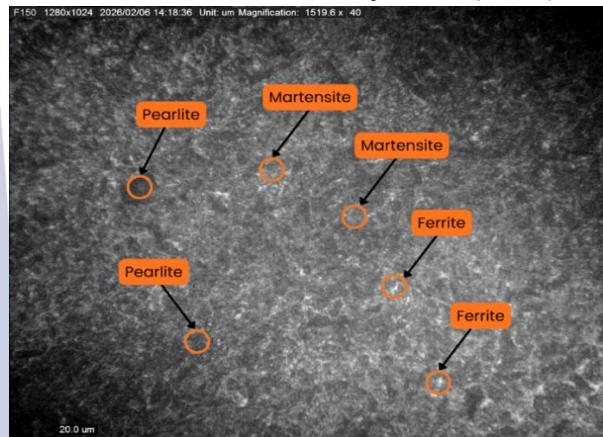
Temperatur Austenisasi	Spesimen	Holding Time	Sudut Awal	Sudut Akhir	Joule	Harga Impact
850°C	ST 60	1 jam	120,3	107,5	10,29	0,129
	ST 60	2 jam	120	106,1	11,24	0,141
	ST 60	3 jam	120,8	103,9	13,72	0,172
900°C	ST 60	1 jam	119,7	112,5	5,69	0,071
	ST 60	2 jam	120	114,7	4,15	0,052
	ST 60	3 jam	119,7	115,1	3,6	0,045
950°C	ST 60	1 jam	120,2	114,2	4,7	0,059
	ST 60	2 jam	120,3	115,2	3,98	0,05
	ST 60	3 jam	119,6	114,5	4	0,05



Gambar 1. Hasil Struktur Mikro Baja ST 60 (850°C)

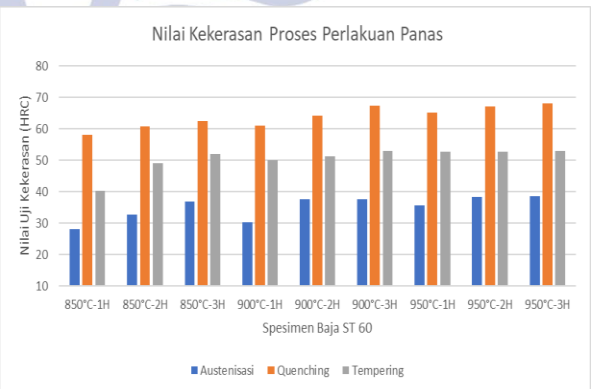


Gambar 2. Struktur Mikro Baja ST 60 (900°C)



Gambar 2. Hasil Struktur Mikro Baja ST 60 (950°C)

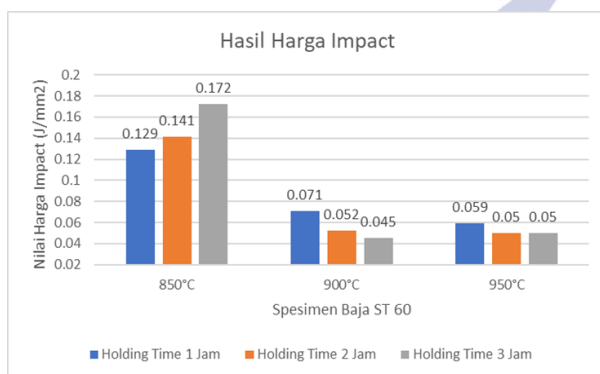
Pembahasan



Gambar 4. Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan

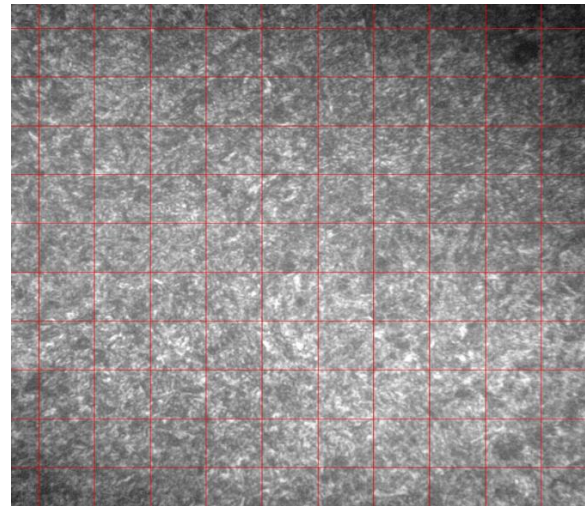
Diketahui dari perbandingan nilai kekerasan tiap variasi perlakuan memiliki nilai peningkatan dan penurunan kekerasan yang berbeda, hasil pengujian tersebut juga menunjukkan proses perlakuan panas lanjutan pasca proses *pack carburizing* dapat berdampak pada sifat mekanik tiap spesimen, didapatkan variasi austenisasi memiliki nilai rata-rata terendah sedangkan variasi *quenching* memiliki rata-rata yang tertinggi tiap spesimen. Variasi austenisasi yang didinginkan dengan media udara menghasilkan bentuk fasa perlit dan fasa ferit yang dominan yang mengakibatkan kekerasan pada fasa

perlit jauh lebih rendah karena penggunaan laju pendinginan yang lambat (Purboputro, P. I, dkk., 2022). Sementara media air garam untuk proses *quenching* dapat menghasilkan struktur mikro fasa martensit dalam jumlah banyak, laju pendinginan yang cepat dan butiran karbon yang halus dapat menghasilkan karbon baja dengan kekerasan cukup tinggi. Variasi spesimen *tempering* merupakan hasil dari spesimen *quenching* yang telah dilakukan pemanasan ulang, terlihat adanya penurunan nilai kekerasan, pemanasan ulang atau diperlukan untuk menurunkan sifat kekerasan akibat proses *quenching* dan meningkatkan sifat ketangguhan baja, proses tempering mempengaruhi penurunan kekerasan baja karbon dan menghasilkan kekerasan yang optimal untuk roda gigi.



Gambar 5. Grafik Nilai Uji Impact

Grafik tersebut adalah hasil nilai harga impact spesimen baja ST 60 yang telah melalui proses perlakuan panas *pack carburizing* dan *tempering* . Proses *tempering* diperlukan untuk menurunkan sifat kekerasan akibat proses *quenching* dan meningkatkan sifat *toughness* baja karbon ST 60. Harga impact tertinggi terdapat di spesimen dengan variasi 850°C dan waktu tahan 3 jam pada nilai sebesar 0,172 J/mm², penurunan pada spesimen ini cukup signifikan daripada harga impact pada spesimen dengan temperatur 900°C dan 950°C, penurunan nilai harga impact disebabkan oleh nilai kekerasan (*hardness*) yang cukup tinggi akibat penggunaan temperatur *tempering* yang rendah dan menghasilkan nilai ketangguhan (*toughness*) yang rendah. Penelitian terdahulu oleh (Arifin, 2021). Yang menggunakan temperatur tempering 225°C, 425°C dan 625°C membuktikan temperatur yang tinggi dapat membuat baja karbon menjadi lunak sehingga nilai ketangguhan dapat meningkat. Selain itu *tempering* dapat membentuk struktur fasa martensit temper / fasa ferit yang bersifat lunak dan lebih dominan dibandingkan dengan fasa perlit.



Gambar 6. Metode *Point Count* Struktur Mikro

Pengamatan menunjukkan perubahan pada variasi temperatur spesimen baja ST 60 setelah *pack carburizing* . Baja karbon ST 60 dengan dilakukan *quenching* air menghasilkan struktur mikro fasa martensit dalam jumlah besar yang meningkatkan kekerasan spesimen baja karbon secara signifikan, hasil data perhitungan metode *point count* menunjukkan temperatur 850°C memiliki kekerasan 40,2 HRC dengan presentase fasa ferit persebaran sebesar 12%, spesimen dengan temperatur 900°C memiliki kekerasan 50,1 HRC dan presentase fasa ferit dengan persebaran sebesar 8%, sementara temperatur 950°C memiliki kekerasan sebesar 52,7 HRC dengan persebaran presentase fasa ferit cukup rendah sebesar 6,5%. Secara keseluruhan dari hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan temperatur austenisasi dan waktu tahan memberikan dampak sifat mekanis pada baja karbon. Perlakuan *pack carburizing* dan *tempering* menghasilkan nilai yang tidak selaras antara kekerasan dengan ketangguhan pada baja karbon ST 60 yang diakibatkan rendahnya temperatur *tempering* . Fasa ferit dapat digunakan sebagai parameter untuk menentukan kekerasan logam, semakin sedikit jumlah fasa ferit maka sifat lunak pada logam akan semakin berkurang, sehingga berdampak pada sifat ketangguhan / keuletan yang berakibat energi serapan baja ST 60 tidak sesuai untuk diterapkan dalam roda gigi.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian tentang proses perlakuan panas *pack carburizing* dengan variasi temperatur austenisasi dan *holding time* menghasilkan analisa berupa kesimpulan berikut:

1. Penelitian dari pengujian kekerasan, spesimen dengan nilai kekerasan tertinggi terdapat pada spesimen *quenching* dengan nilai kekerasan 68,2 HRC, sedangkan nilai terendah terdapat pada variasi

autenisasi dengan nilai kekerasan 28 HRC. Hasil data uji kekerasan tersebut menunjukkan bahwa variasi proses perlakuan lanjutan yang telah dilakukan dapat meningkatkan nilai kekerasan *raw material* baja ST 60, selain itu variabel temperatur memiliki peran lebih besar dalam peningkatan kekerasan daripada variabel waktu penahanan (*holding time*). Spesimen *tempering* untuk uji kekerasan dan uji impact menunjukkan hasil kurang selaras antara nilai kekerasan dan nilai energi serapan impact pada baja ST 60, hampir sebagian variasi *tempering* telah memenuhi kekerasan untuk roda gigi tetapi pada hasil uji impact terdapat kekurangan dalam serapan energi.

2. Pengamatan metalografi menunjukkan temperatur dan *holding time* dapat mempengaruhi pembentukan fasa spesimen. variasi temperatur 850°C memiliki presentase fasa ferit lebih banyak daripada variasi temperatur 900°C dan temperatur 950°C. Perbedaan presentase fasa tersebut dapat mempengaruhi sifat-sifat mekanik baja ST 60.

Saran

Pada hasil data penelitian dan pembahasan yang dilakukan terdapat hasil saran yang bermanfaat untuk penelitian:

1. Temperatur *tempering* tinggi dapat memberikan sifat lunak pada baja karbon sehingga menghasilkan nilai serapan energi yang cukup baik untuk uji impact.
2. Penggunaan kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai media katalisator untuk *pack carburizing* memiliki efisiensi katalisator lebih baik daripada barium karbonat (BaCO_3) selain itu kalsium karbonat lebih aman untuk manusia dan tidak berdampak buruk pada lingkungan sekitar.

DAFTAR PUSTAKA.

- ARIFIN, M. M. (2021). Skripsi Optimasi Proses Tempering Terhadap Sifat Fisis Dan Ketangguhan Baja Pegas JIS SUP 9.
- Davis, J. R. (Ed.). (2005). *Gear Materials, Properties, and Manufacture*. ASM international. (handbook)
- Farhan, F., Bukhari, B., Hamdani, H., Yusuf, I., & Zuhaimi, Z. (2021). Pengaruh Temperatur Pemanasan (Austenisasi) Perlakuan Panas Quenching Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Baja St 60. *Jurnal Mesin Sains Terapan*, 5(1), 1-7.
- Ganjar Pramudi, S. P. (2024). *Revolusi Material: Eksplorasi Besi dan Baja*. Mega Press Nusantara.
- Ghaitsanabil, D., & Purboputro, I. P. I. (2021). *Analisa Sifat Fisis dan Mekanis Baja ST 60 yang Dicarburizing Dilanjutkan Tempering Dengan Variasi Waktu Penahan 30, 60, 120 dan 180 Menit* (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).
- Irawan, A. P. (2016). *Perancangan Sistem Transmisi Roda Gigi*. PT Kanisius.
- Laksono, P. C., & Purboputro, I. P. I. (2021). *Analisa Pengaruh Proses Quenching Media Air Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro pada Baja ST60 Setelah Mengalami Pack Carburizing dengan Arang Sekam Padi Variasi Mesh 80, 100, 120 dan 140* (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).
- Muas, M., Syaharuddin, R., Muhammad, I., Andi, R. F., & Fahmi, S. (2022). *Studi Pengaruh Media Quenching Air Garam Terhadap Peningkatan Ketangguhan Baja ST 37 Dengan Pack Carburizing*.
- Mulyaningsih, N., & Rumah, P. P. *Buku Ajar Metalurgi Fisik*. Penerbit Pustaka Rumah C1nta.
- Pramono, H. S., & Asmara, A. (2020). *Dasar Rekayasa Sistem Mekanik*. UNY Press.
- Press, U. G. M. (2020). *Pengelasan Paduan Aluminium*. Ugm Press.
- Purboputro, P. I. (2025). *Analisis Sifat Mekanis Baja ST60 Setelah Mengalami Pack Carburizing Karbon Variasi Temperatur 700°, 800°, 850°, 900°*. *Creative Research in Engineering (CERIE)*, 5(1), 17-23.
- Putra, I. M. (Ed.). (2021). *Pengaruh Proses Pack Carburizing Arang Tulang Kerbau Terhadap Sifat Mekanik Baja Karbon (Vol. 1)*. Zahira Media Publisher.
- Putro Wicaksono, N., & Purboputro, I. P. I. (2021). *Analisa Proses Carburizing Dengan Variasi Waktu Tahan 15, 30, 45, Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Baja Karbon ST 60* (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).
- Radzevich, S. P. (2016). *Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture*. CRC press.
- Rahayu, T. F., & Fatimah, S. (2021). *Pengaruh Variasi Konsentrasi Karbon Tempurung Kelapa Terhadap Karakteristik Tinta Spidol Whiteboard Ramah Lingkungan*. *Jurnal Kartika Kimia*, 4(2), 77-82.
- Singh, R. (2020). *Applied Welding Engineering Processes, Codes, and Standards*. Butterworth-Heinemann.
- Suprpto, W. (2023). *Baja dan Aplikasinya*. Universitas Brawijaya Press.
- Totten, G. E. (2006). *Steel Heat Treatment Handbook-2 volume set*. CRC press.
- Totten, G. E., Funatani, K., & Xie, L. (Eds.). (2004). *Handbook of Metallurgical Process Design*. CRC press.
- Tsamroh, D. I., Putra, A. D., & Maulana, J. (2024). *Analisis Struktur Mikro pada Baja St 60 Hasil Perlakuan Hardening dengan Menggunakan Variasi Media Pendingin*. *Ring Mechanical Engineering*, 4(2), 83-89.
- Yendri, O. (2024). *Sifat dan Bentuk Baja*. *Struktur Baja*, 40.