

PENGARUH KOMPOSISI CANGKANG KEMIRI - BARIUM KARBONAT PADA BAJA KARBON RENDAH MENGGUNAKAN METODE *PACK CARBURIZING*

Febrian Titok¹, Agung Supriyanto^{2*}, Edi Sarwono², Nugroho Tri Atmoko³

¹Program Studi S1 Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi "Warga" Surakarta, Sukoharjo, Indonesia

²Program Studi D3 Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi "Warga" Surakarta, Sukoharjo, Indonesia

³Jurusan Rekayasa Mesin dan Industri Pertanian, Politeknik Negeri Cilacap, Cilacap, Indonesia

*Email: agungtm@sttw.ac.id

ABSTRAK

Proses *pack carburizing* merupakan metode perlakuan panas pada logam dengan cara memanaskan material hingga mencapai fasa austenit, bertujuan untuk meningkatkan sifat fisik dan mekanisnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi komposisi campuran karbon terhadap kekerasan dan struktur mikro baja. Pemanasan dilakukan menggunakan *furnace* pada suhu 930°C selama 4 jam. Karakterisasi dilakukan melalui *Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX), uji kekerasan *Vickers* sesuai standar ASTM E92, serta uji keausan menggunakan metode *Oghosi*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan *pack carburizing* berhasil meningkatkan kekerasan material hingga 129,72 HV, atau sekitar 30,8% lebih tinggi dibandingkan spesimen tanpa perlakuan. Uji keausan spesifik menunjukkan tren yang berbanding lurus dengan kekerasan, di mana spesimen dengan kekerasan tertinggi memiliki ketahanan aus terbaik. Komposisi karbon sebesar 70% menghasilkan tingkat keausan paling rendah, yaitu 0,58380 mm³/kg·m. Dengan demikian, proses *pack carburizing* terbukti efektif dalam meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus baja mild steel, dengan komposisi karbon 70% memberikan hasil paling optimal.

Kata kunci: baja karbon rendah; *carburizing*; kemiri; kekerasan; SEM-EDX; aus.

ABSTRACT

The pack carburizing process is a heat treatment method applied to metals by heating the material until it reaches the austenite phase to enhance its physical and mechanical properties. This study aims to examine the effect of varying carbon mixture compositions on the hardness and microstructure of steel. The heating process was carried out using a furnace at 930°C for 4 hours. Characterization was conducted through Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX), Vickers hardness testing according to ASTM E92 standards, and wear testing using the Oghosi method. The results show that the pack carburizing treatment successfully increased the material's hardness up to 129.72 HV, approximately 30.8% higher than the untreated specimen. The specific wear test directly correlated with hardness, where specimens with higher hardness demonstrated superior wear resistance. A carbon composition of 70% produced the lowest wear rate, measured at 0.58380 mm³/kg·m. Therefore, the pack carburizing process improved mild steel's hardness and wear resistance, with a 70% carbon composition providing the most optimal results.

Keywords: mild steel; *carburizing*; *candlenut*; hardness; SEM-EDX; wear.

1. PENDAHULUAN

Dalam era industri modern, peningkatan kualitas fisik dan mekanis baja karbon rendah menjadi kebutuhan penting untuk memenuhi tuntutan berbagai aplikasi teknik, seperti komponen otomotif, konstruksi, dan permesinan. Baja karbon rendah memiliki sifat ulet dan mudah dibentuk, namun kekerasan dan ketahanan ausnya relatif rendah. Salah satu

metode yang efektif untuk meningkatkan sifat permukaan baja adalah melalui proses *pack carburizing*, yaitu perlakuan panas yang menambahkan karbon ke permukaan baja sehingga terjadi difusi atom karbon ke dalam material. Proses ini terbukti mampu meningkatkan kekerasan [1], ketahanan aus [2], ketahanan terhadap kelelahan [3], dan ketahanan terhadap retak [4].

Pack carburizing menjadi pilihan populer karena prosesnya relatif sederhana dan tidak memerlukan peralatan khusus seperti metode *carburizing* lainnya. Proses ini melibatkan pemanasan baja hingga mencapai fasa austenit, dimana atom karbon mulai berdifusi ke dalam struktur kristal. Selama pendinginan cepat, terbentuklah martensit yang keras [5], sementara pendinginan lambat dapat menghasilkan perlit [6][7]. Media karbon padat yang digunakan biasanya berupa arang, dikombinasikan dengan energizer seperti barium karbonat ($BaCO_3$), natrium karbonat ($NaCO_3$), atau kalsium karbonat ($CaCO_3$) [8] [8], yang berfungsi mempercepat pelepasan karbon aktif ke permukaan baja.

Proses difusi karbon berlangsung pada suhu antara $850^{\circ}C$ hingga $1000^{\circ}C$ [9][10], dan menghasilkan perubahan signifikan pada struktur mikro baja. Penyerapan karbon menyebabkan terbentuknya larutan padat, presipitasi, dan transformasi fasa yang meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa *pack carburizing* mampu meningkatkan kekerasan hingga 31 HRC dan kekuatan impak sebesar 105% pada baja ST41 [11]. Selain itu, penggunaan sumber karbon alternatif seperti cangkang kemiri menunjukkan potensi besar karena kandungan karbonnya yang tinggi, yaitu 76,31% [12], serta ketersediaannya yang melimpah dan ramah lingkungan.

Meski demikian, terdapat sejumlah variabel yang mempengaruhi hasil akhir dari proses *pack carburizing*, seperti suhu, waktu penahanan (*holding time*) [11], dan komposisi media karbon [12][13]. Penelitian yang ada masih terbatas dalam mengkaji secara sistematis pengaruh komposisi karbon terhadap sifat mekanik baja, khususnya pada baja *mild steel*. Oleh karena itu, diperlukan studi yang lebih mendalam untuk memahami bagaimana variasi komposisi karbon dalam media *carburizing* mempengaruhi kekerasan dan struktur mikro baja secara simultan.

Peningkatan komposisi karbon dalam media *carburizing* akan meningkatkan kekerasan permukaan baja dan ketahanan ausnya. Namun, terdapat kemungkinan bahwa komposisi karbon yang terlalu tinggi dapat menyebabkan struktur mikro yang rapuh atau tidak seragam, sehingga menurunkan performa material. Oleh karena itu, identifikasi komposisi karbon yang optimal menjadi fokus utama dalam penelitian ini, dengan pendekatan eksperimental yang menggabungkan karakterisasi mikrostruktur dan pengujian mekanik.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada penggunaan cangkang kemiri yang diolah menjadi nanopartikel sebagai sumber karbon dalam proses *pack carburizing*. Pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi difusi karbon melalui konversi karbon padat menjadi gas aktif selama pemanasan. Penelitian ini juga menggabungkan analisis kekerasan, struktur mikro menggunakan SEM-EDX, dan pengujian keausan dengan metode *Oghosi*, sehingga memberikan kontribusi ilmiah dan praktis dalam pengembangan teknologi perlakuan panas baja *mild steel* yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis.

2. METODE

2.1. Preparasi Spesimen

Spesimen yang digunakan merupakan baja dengan kandungan karbon rendah. Preparasi dimulai dengan memotong spesimen dengan ukuran 15mm persegi dan dilakukan proses pengamplasan menggunakan tingkat kekasaran 280, 500, 800, 1000, 1500, dan 2000 secara berurutan. Proses pengamplasan dilakukan dengan tujuan agar spesimen rata dan halus sehingga dapat memaksimalkan proses difusi karbon.

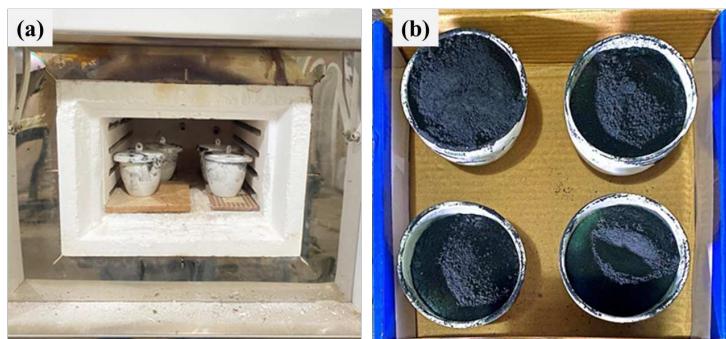
Mild steel, atau dikenal sebagai baja karbon rendah merupakan salah satu jenis baja yang paling banyak digunakan dalam berbagai sektor industri. Baja ini mengandung karbon dalam jumlah kurang dari 0,3% menjadikannya tidak tergolong sebagai baja keras, melainkan sebagai material dengan karakteristik lunak, mudah dibentuk, dan mampu dilas dengan baik [10]. Kandungan karbon yang rendah membuatnya sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan kelenturan dan kemudahan dalam penggerjaan, tetapi tidak untuk kebutuhan kekuatan tinggi atau ketahanan aus yang ekstrem. Komposisi kandungan baja ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi spesimen baja karbon rendah

C	Fe	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	S	Cu	Nb
0.032	99.31	0.422	<0.0100	<0.0100	0.013	<0.0050	0.020	0.012	0.0078

2.2. Proses Pack Carburizing

Karburasi (*carburizing*) dilakukan dengan menggunakan media karbon dari campuran cangkang kemiri dan barium carbonat dengan variasi komposisi 90:10%, 80:20%, 70: 30%, dan 60:40% dengan kode (B90%, B80%, B70%, dan B60%) dari perhitungan 1:1 dengan berat spesimen. Cawan *cruible* digunakan sebagai tempat pelapisan logam baja dengan karbon, yang ditunjukkan pada Gambar 1. Suhu yang digunakan pada tungku *furnace* pada fase austenit yakni 930°C dengan *holding time* selama 4 jam, untuk menghasilkan proses difusi atom dengan maksimal.



Gambar 1. (a) Spesimen dalam tungku; (b) Spesimen dalam cawan *crucible*

2.3. Pengujian SEM-EDX

Untuk mengoptimalkan proses *pack carburizing* menggunakan serbuk karbon dari cangkang kemiri, penting untuk memahami secara mendalam morfologi penampang melintang dan komposisi dari spesimen. Menggunakan alat *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX). SEM memungkinkan visualisasi secara detail struktur, bentuk, dan porositas partikel serbuk, yang krusial untuk memahami interaksi dan difusi karbon. Sementara itu, EDX mengidentifikasi dan mengukur kandungan unsur seperti karbon secara mendeteksi pengotor atau potensi *energizer* alami.

2.4. Pengujian Vickers

Pengujian kekerasan menggunakan *micro hardness vickers* sesuai dengan ASTM E92, bertujuan untuk menguji tingkat kekerasan spesimen baja, mulai dari *non-treatment* dan sesudah dilakukan treatment *pack carburizing*. Beban indentor yang digunakan adalah 9,8N dengan waktu indentasi selama 15 detik. Pengujian data dilakukan sebanyak 5 kali. Nilai kekerasan *Vickers* (HV) dihitung dengan membagi beban yang diterapkan dengan luas permukaan jejak yang dihasilkan. Luas permukaan jejak ini kemudian ditentukan berdasarkan pengukuran mikroskopis panjang diagonal jejak yang terbentuk. Perhitungan nilai HV dapat dilakukan dengan rumus Persamaan 1[14].

$$HV = \frac{(1,864)P}{D^2} \quad (1)$$

Keterangan:

HV : nilai kekerasan Vickers (HV)

P : gaya penekanan (kgf)

D : rata-rata panjang diagonal (mm)

2.5. Pengujian Keausan

Pengujian keausan adalah tahapan krusial untuk mengevaluasi efektivitas proses *pack carburizing* yang memanfaatkan serbuk karbon cangkang kemiri dalam meningkatkan ketahanan aus. Proses pengujian keausan menggunakan metode oghosi dimana benda uji memperoleh gaya gesek dengan beban 6,36 kg dengan jarak tempuh 30 m. Pengujian ini dilakukan pada spesimen sebelum dan sesudah proses *pack carburizing*. Keausan spesifik dihitung dengan Persamaan 2.

$$W_s = \frac{B b_0^3}{8 r P_0 L_0} \quad (2)$$

Keterangan:

W_s : keausan spesifik (mm^2/kg)

B : lebar piringan pengaus (mm)

b_0 : lebar keausan spesimen (mm)

R : jari – jari piringan pengaus (mm)

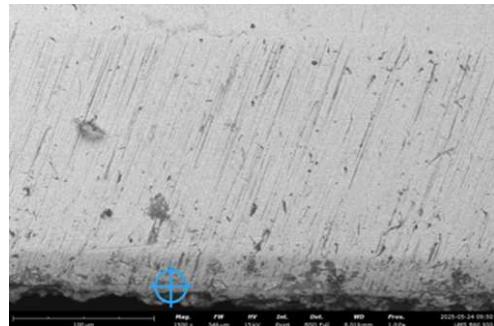
P_0 : gaya tekan pada proses keausan (kg)

L_0 : jarak tempuh pada proses pengausan (m)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

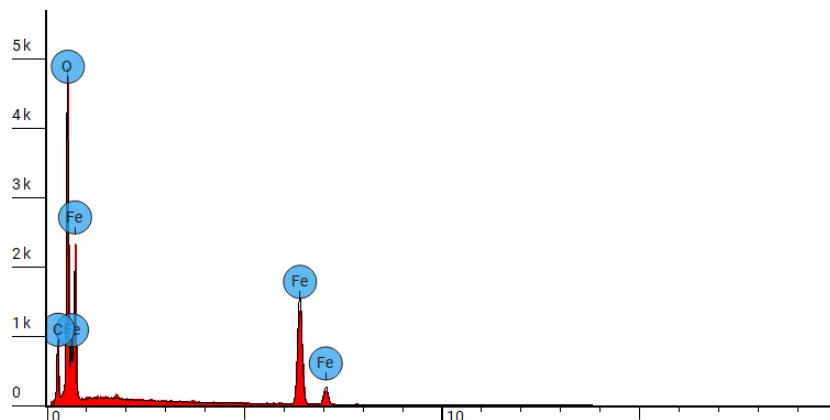
3. 1. Karakterisasi SEM – EDX

Gambar 2 menunjukkan morfologi penampang melintang dari spesimen B70% setelah *pack carburizing*. Lapisan karbon menunjukkan adhesi yang kuat terhadap spesimen baja *mild steel*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 yang memperlihatkan pembentukan struktur lapisan yang jelas terdefinisi pada sampel B70% setelah *pack carburizing*.



Gambar 2. Hasil pengujian SEM penampang melintang pada spesimen B 70%

Gambar 3 menunjukkan hasil EDX penampang melintang pada spesimen B70%. Pada spesimen B70% berhasil terbentuk lapisan C, dan O. Tabel 2 menyajikan hasil komposisi pada penampang melintang spesimen B70%. Spesimen baja tanpa perlakuan memiliki jumlah karbon di angka 0,032% dan Fe 99,31%, sedangkan spesimen yang sudah dilakukan proses *pack carburizing* memiliki komposisi karbon mencapai 22,862% dan Fe di angka 37,033% serta Oxygen 40,105%.



Gambar 3. EDX penampang melintang pada spesimen B 70%

Tabel 2. Hasil EDX penampang melintang spesimen B 70%

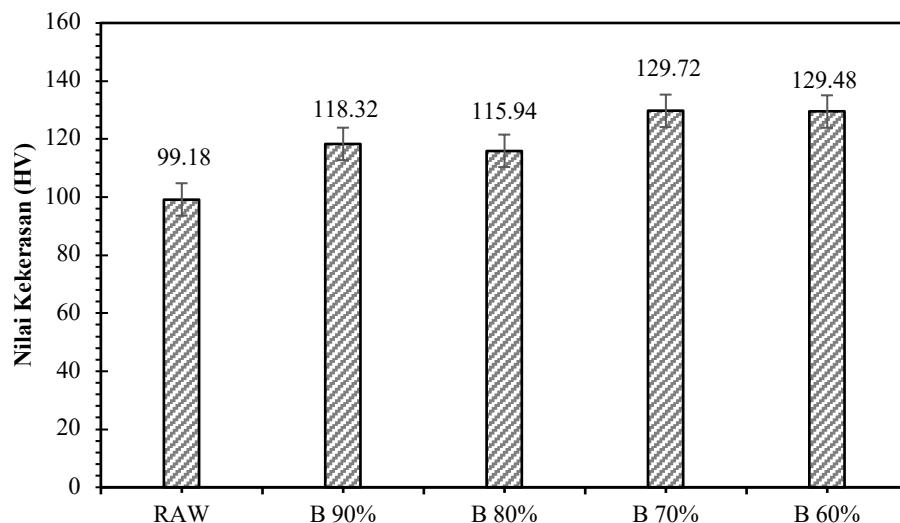
Element	Element name	Atomic conc.	Weight conc.
C	Carbon	22,862	9,200
O	Oxygen	40,105	21,500
Fe	Iron	37,033	69,300

Oxygen terbentuk karena adanya proses pendinginan yang menyebabkan masuk ke dalam spesimen baja serta dekomposisi senyawa ini dapat menghasilkan gas – gas yang mengandung unsur O_2 yang mampu bereaksi dengan karbon [15]. Proses difusi yang terjadi pada karbon cangkang kemiri berhasil masuk kedalam lapisan permukaan spesimen baja dalam pembentukan fasa martensit.

3. 2. Sifat Mekanik

Gambar 4 merupakan hasil dari pengujian kekerasan yang dilakukan pada spesimen sebelum dan sesudah proses *pack carburizing* dengan variasi komposisi karbon cangkang kemiri. Dimana, hasil kekerasan sebelum dilakukan proses *pack carburizing* menghasilkan nilai kekerasan 99,18 HV. Tingkat kekerasan spesimen baja tersebut meningkat setelah

dilakukannya proses *pack carburizing*. Komposisi karbon 90% dimana spesimen baja memiliki rata – rata dengan nilai 118,32 HV. Kekerasan spesimen tertinggi didapat ketika spesimen baja yang dilakukan proses karburasi menggunakan komposisi karbon 70% yang dimana kekerasan mencapai rata – rata 129,72 HV.



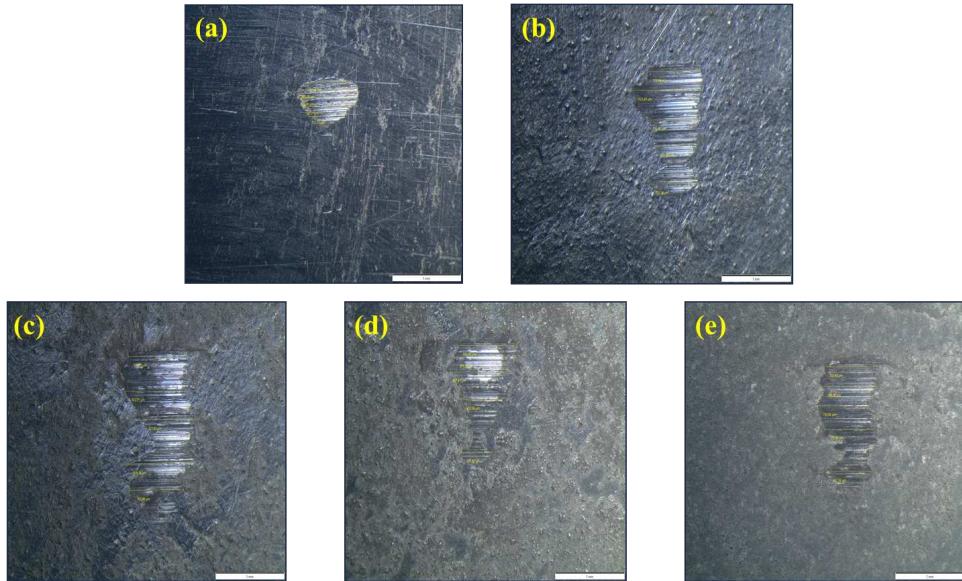
Gambar 4. Kekerasan sebelum dan setelah *pack carburizing* dengan perbandingan cangkang kemiri dan BaCO₃

Struktur material yang dilakukan proses *pack carburizing* menggunakan energizer yang lebih tinggi memperoleh hasil kekerasan yang lebih baik [16]. Kekerasan yang dilakukan dengan komposisi karbon 80% cenderung lebih rendah apabila dibandingkan dengan komposisi yang lainnya. Hal tersebut memungkinkan karena kurangnya maksimal proses difusi atom bila dibandingkan dengan komposisi karbon 70%.

3.3. Ketahanan Aus

Gambar 5 menunjukkan hasil dari pengujian keausan pada spesimen sebelum dan sesudah proses *pack carburizing*. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa spesimen baja yang tidak mengalami perlakuan *pack carburizing* menunjukkan dominasi mekanisme keausan abrasif. Hal ini ditandai dengan permukaan yang kasar dan adanya alur keausan yang lebar, sebagaimana terlihat pada Gambar 5(a). Keausen abrasif terjadi ketika partikel keras atau permukaan kasar bergesekan dengan permukaan yang lebih lunak, menyebabkan pengikisan material secara mekanis melalui proses gesekan [17].

Sebaliknya, spesimen yang telah diberi perlakuan *pack carburizing* menunjukkan pola keausan yang berbeda. Gambar 5(b–e) memperlihatkan jalur keausan yang lebih sempit dan teratur, menandakan peningkatan ketahanan terhadap keausan. Spesimen dengan komposisi karbon 70%, seperti yang ditampilkan pada Gambar 5(d), menunjukkan performa terbaik dalam hal ketahanan aus. Permukaan spesimen ini tampak lebih halus dan tidak menunjukkan adanya serpihan logam, yang mengindikasikan dominasi mekanisme keausan adhesif.



Gambar 5. Hasil goresan keausan sebelum dan setelah *pack carburizing* dengan perbandingan cangkang kemiri dan BaCO₃: (a) RAW, (b) 90%, (c) 80%, (d) 70%, dan (e) 60%

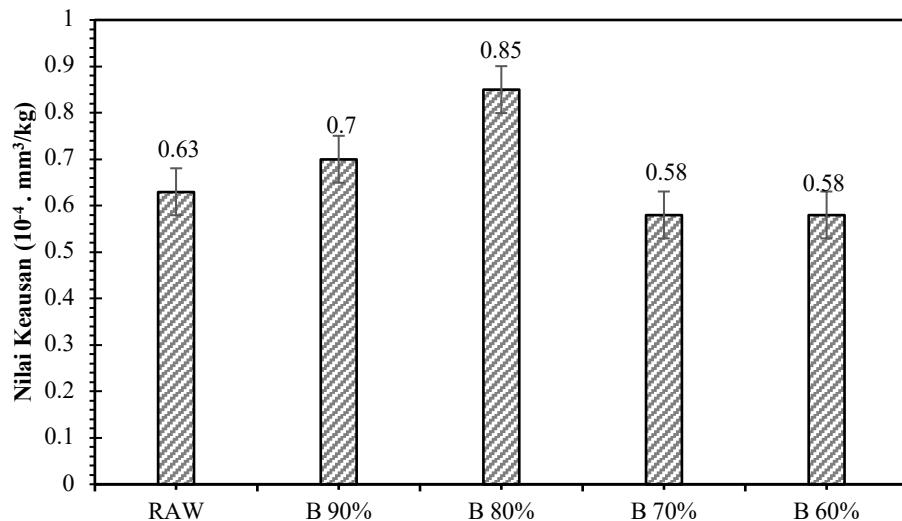
Keausan adhesif terjadi ketika dua permukaan logam saling bersentuhan dan mengalami ikatan mikro akibat panas gesekan, yang kemudian menyebabkan transfer material dari satu permukaan ke permukaan lainnya [17]. Ketidakhadiran serpihan logam pada spesimen yang telah diberi perlakuan menunjukkan bahwa penambahan karbon melalui *pack carburizing* berhasil mengurangi keausan dengan mencegah terjadinya transfer material antar permukaan kontak.

Penambahan karbon dalam proses *pack carburizing* berperan penting dalam membentuk lapisan permukaan yang keras dan homogen, yang mampu menahan deformasi plastis dan mengurangi interaksi langsung antar asperitas permukaan [18]. Studi oleh Raza et al. (2016) [18], menunjukkan bahwa penggunaan karbon nanopartikel dalam media *carburizing* dapat meningkatkan kekerasan hingga 275 HV hanya dalam waktu 3 jam, yang secara signifikan memperbaiki ketahanan aus baja karbon rendah.

Selain itu, penelitian oleh Darmo et al. (2021) [19], juga mengonfirmasi bahwa perlakuan *pack carburizing* yang diikuti dengan pendinginan menggunakan media yang sesuai dapat meningkatkan ketahanan aus secara signifikan. Dalam pengujian keausan adhesif, spesimen yang telah diberi perlakuan menunjukkan penurunan volume keausan dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan.

Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa *pack carburizing* dengan komposisi karbon yang tepat, seperti B70%, mampu mengubah mekanisme keausan dari abrasif menjadi adhesif, yang lebih menguntungkan dalam aplikasi teknik. Hal ini menunjukkan bahwa modifikasi struktur mikro melalui difusi karbon tidak hanya meningkatkan kekerasan, tetapi juga mengoptimalkan ketahanan aus permukaan baja.

Gambar 6 menunjukkan laju keausan spesimen sebelum dan sesudah proses *pack carburizing*. Hasil menunjukkan bahwa spesimen B90% ($0,63 \times 10^{-4}$ mm³/kg) dan B80% ($0,85 \times 10^{-4}$ mm³/kg) memiliki laju keausan yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan.



Gambar 6. Hasil keausan sebelum dan setelah *pack carburizing* dengan perbandingan cangkang kemiri dan BaCO₃

Nilai keausan terkecil diperoleh pada variasi karbon 70% ($0,58 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{kg}$) dan 60% ($0,58 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{kg}$). Hal ini sejalan dengan penelitian peningkatan yang dikaitkan dengan distribusi kekerasan yang lebih baik di seluruh sistem pelapisan [20].

4. KESIMPULAN

Proses *pack carburizing* pada spesimen baja *mild steel* secara signifikan meningkatkan sifat mekanik material. Peningkatan kekerasan terjadi akibat difusi atom karbon ke dalam permukaan baja selama perlakuan panas, yang menghasilkan lapisan permukaan yang lebih keras dan tahan terhadap deformasi. Spesimen dengan komposisi campuran karbon sebesar 70:30% (B70%) menunjukkan performa terbaik, dengan nilai kekerasan mencapai 129,72 HV. Selain itu, spesimen ini juga menunjukkan ketahanan aus yang superior, dengan rata-rata volume keausan sebesar $0,58 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{kg.m}$. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi karbon yang optimal mampu meminimalkan keausan melalui pembentukan struktur mikro yang lebih stabil dan homogen. Secara keseluruhan, penggunaan campuran cangkang kemiri dan barium karbonat sebagai media *carburizing* terbukti efektif dalam meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus baja karbon rendah. Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi perlakuan panas yang lebih efisien dan ramah lingkungan, serta membuka peluang pemanfaatan limbah biomassa sebagai sumber karbon alternatif dalam industri manufaktur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Tri Atmoko, B. Hari Priyambodo, P. Studi Teknik Mesin, S. Tinggi Teknologi Warga Jl Raya Solo-Baki Km, and S. Baru, "Analisa Jenis Fluida Pendingin Proses Quenching pada Besi Cor Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro," *Rotasi*, vol. 23, no. 3, pp. 26–30, 2021.
- [2] B. H. Priyambodo, M. Margono, and K. C. Nugroho, "Pengaruh Laju Pendingin Pada Proses Heat Treatment Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja Karbon S45C," *Quantum Tek.*, vol. 1, no. 2, p. 60, 2021, doi: 10.30595/cerie.v1i2.10848.
- [3] T. M. Loganathan, J. Purbolaksono, J. I. Inayat-Hussain, and N. Wahab, "Effects of

- carburization on expected fatigue life of alloys steel shafts," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 6, pp. 3544–3547, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.02.004.
- [4] B. Selçuk, R. Ipek, and M. B. Karamış, "A study on friction and wear behaviour of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 141, no. 2, pp. 189–196, 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(02)01038-5.
- [5] M. Margono, B. H. Priyambodo, and K. C. Nugroho, "Pengaruh Laju Pendingin Pada Proses Heat Treatment Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja Karbon S45C," *Creat. Res. Eng.*, vol. 1, no. 2, p. 60, 2021, doi: 10.30595/creie.v1i2.10848.
- [6] M. Chamim, M. Margono, F. N. Hidayah, and N. T. Atmoko, "Karakterisasi Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Pada Baja Paduan Rendah Hasil Proses Hardening," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 14, no. 1, pp. 75–82, 2023, doi: 10.21776/jrm.v14i1.1080.
- [7] B. H. Priyambodo, Margono, and R. I. Yaqin, "Improve hardness and microstructure on S45C by annealing and shot peening processes," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2706, no. 1, p. 20044, May 2023, doi: 10.1063/5.0120783.
- [8] K. S. Hassan, "Comparative of wear resistance of low carbon steel pack carburizing using different media," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 1, p. 71, 2015, doi: 10.14419/ijet.v4i1.3866.
- [9] R. A. M. Napitupulu, M. Manurung, C. S. P. Manurung, and S. Peranganangin, "Pengerasan Permukaan Baja Karbon Rendah Melalui Proses Pack Carburizing Dengan Menggunakan Arang Cangkang Kemiri," vol. 4, no. 2, 2023.
- [10] F. O. Aramide, S. A. Ibitoye, I. O. Oladele, and J. O. Borode, "Pack carburization of mild steel, using pulverized bone as carburizer: Optimizing process parameters," *Leonardo Electron. J. Pract. Technol.*, vol. 9, no. 16, pp. 1–12, 2010.
- [11] R. I. Pratama, Z. Mansjur, and H. J. R. Sumarauw, "Pengaruh Variasi Temperatur dan Media Karburasi Pada Proses Pack Carburizing Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Baja Karbon Rendah," vol. 8, no. 1, pp. 31–42, 2025.
- [12] K. Umurani, S. Fathi, and I. Tanjung, "PENGARUH PENAMBAHAN SERBUK ARANG CANGKANG KEMIRI – BARIUM KARBONAT TERHADAP PERMUKAAN PAHAT BUBUT DENGAN MENGGUNAKAN METODE PACK CARBURIZING," *VOCATECH Vocat. Educ. Technol. J.*, vol. 2, no. 2, pp. 114–121, 2021, doi: 10.38038/vocatech.v2i2.61.
- [13] D. Handoko, V. Vivaldi, and S. Sutrisno, "Pengaruh Variasi Jenis Katalisator Dan Holding Time Pada Proses Pack Carburizing Terhadap Perubahan Komposisi Karbon Dan Nilai Kekerasan Baja Karbon Rendah (Low Carbon Steel) St 37," *J. Vokasi*, vol. 16, no. 1, pp. 38–45, 2021, doi: 10.31573/vokasi.v16i1.316.
- [14] G. D. Quinn, R. Gettings, and L. K. Ives, "A STANDARD REFERENCE MATERIAL FOR VICKERS HARDNESS OF CERAMICS AND HARDMETALS," pp. 2–9, 2004.
- [15] A. N. S. Hadi Darmo and S. Widodo, "Pengaruh Proses Pack Carburising Terhadap Kekerasan Baja Karbon Rendah," *Pros. Sains Nas. dan Teknol.*, vol. 1, no. 1, pp. 73–78, 2019, doi: 10.36499/psnst.v1i1.2824.
- [16] M. Muas, S. Rasyid, Y. Mahendra, and ..., "Analisis Sifat Mekanik Baja Karbon Rendah Melalui Proses Pack Carburizing (Single Quenching) Menggunakan Arang Sekam ...," *Semin. Nas. Has.* ..., pp. 34–39, 2021.
- [17] Margono, D. B. Darmadi, F. Gapsari, T. D. Widodo, and M. Kozin, "Enhancing surface properties of Al 6061 alloy using duplex TiNi films via plasma nitriding," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 18, no. 1, p. 100434, 2025, doi: 10.1016/j.rsurfi.2025.100434.
- [18] M. A. Raza, H. Asgar, A. Abdullah, R. Ahmad, A. Inam, and F. A. Ghauri, "Carburising of Low-Carbon Steel Using Carbon Black Nanoparticles," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 11, pp. 4661–4667, 2016, doi: 10.1007/s13369-016-2229-9.
- [19] S. Darmo, S. Sinarep, and R. Soenoko, "A study of the pack carburizing quenching

- treatment with cane molasses cooling medium effect on the wear resistance of low carbon steel,” *Eastern-European J. Enterp. Technol.*, vol. 2, no. 12–110, pp. 32–37, 2021, doi: 10.15587/1729-4061.2021.228627.
- [20] R. D. Torres, P. C. Soares, C. Schmitz, and C. J. M. Siqueira, “Influence of the nitriding and TiAlN/TiN coating thickness on the sliding wear behavior of duplex treated AISI H13 steel,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 205, no. 5, pp. 1381–1385, 2010, doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.07.102.