

Analisis Pengerasan Permukaan Baja Karbon Rendah ST 37 Menggunakan Metode *Pack Carburizing* dengan Variasi Waktu Penahanan

Yoshrizal Hary Yulianto ^{*1}

¹Teknik Mesin, Universitas Cahaya Surya Kota Kediri, Indonesia

Email: ^{*1}yoshrizalhy@ucs.ac.id

Abstrak—Baja karbon rendah ST37 sering digunakan dalam komponen teknik karena memiliki keuletan tinggi dan kemudahan dalam proses fabrikasi, meskipun kekerasan serta ketahanan ausnya tergolong rendah akibat kadar karbon yang kurang dari 0,3%C. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana variasi *holding time* pada proses *pack carburizing* mempengaruhi perubahan komposisi karbon, tingkat kekerasan, keausan, serta struktur mikro baja karbon rendah ST37. Proses pengendapan karbon dilakukan pada suhu 900°C dengan menggunakan campuran arang tempurung kelapa dan barium karbonat (BaCO_3) dengan variasi lama waktu tahan selama 3 jam, 4 jam, dan 5 jam. Pengujian yang dilakukan mencakup analisis komposisi kimia, pengukuran kekerasan Vickers, pengujian keausan, dan struktur mikro. Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa kadar karbon meningkat dari 0,2080% C pada bahan mentah menjadi 0,8404%C, 0,8442%C, dan 0,8745%C untuk waktu tahan masing-masing 3 jam, 4 jam, dan 5 jam. Kekerasan material awal meningkat dari 161,8 kg/mm² menjadi 176,22 kg/mm², 199,27 kg/mm², dan 238,01 kg/mm². Kekerasan tertinggi dicapai selama 5 jam, menunjukkan bahwa waktu difusi karbon yang lebih lama meningkatkan penetrasi karbon pada permukaan specimen. Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa struktur ferit perlit awal telah berubah menuju lapisan permukaan yang lebih padat yang mengandung banyak karbon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *holding time* merupakan parameter penting dalam meningkatkan sifat mekanik baja karbon rendah melalui proses *pack carburizing*.

Kata Kunci—*Pack Carburizing*, Baja Karbon Rendah, Keausan, Kekerasan, Struktur Mikro

I. PENDAHULUAN

BAJA rendah karbon seperti ST37 banyak dimanfaatkan dalam dunia teknik karena memiliki keunggulan berupa daya tahan yang baik, proses fabrikasi yang mudah, serta harga yang terjangkau. Namun, kandungan karbonnya yang rendah (kurang dari 0.3%) menyebabkan tingkat kekerasan dan ketahanan aus yang rendah. Hal ini membatasi kinerjanya pada komponen yang mengalami beban berulang dan gesekan, seperti bantalan, poros, dan roda gigi [1], [2]. Oleh karena itu, untuk meningkatkan sifat permukaan material tanpa menurunkan ketangguhan inti baja, diperlukan penerapan teknik *surface engineering*.

Salah satu metode pengerasan permukaan yang dinilai efektif adalah proses *pack carburizing*, yaitu proses difusi termokimia pada temperatur tinggi yang bertujuan memperkaya kandungan karbon pada permukaan baja. Pada proses ini, specimen baja ditempatkan di dalam media karbon padat, seperti arang, yang dicampur dengan bahan aktivator berupa barium karbonat (BaCO_3), kalsium karbonat (CaCO_3), atau natrium karbonat (Na_2CO_3). Pada temperatur tinggi, umumnya berkisar antara 850–950°C, media karbon bereaksi dengan oksigen menghasilkan gas karbon monoksida (CO). Gas tersebut kemudian terurai pada permukaan logam menjadi atom karbon (C) dan karbon dioksida (CO_2), sehingga membentuk lapisan permukaan yang mengalami pengerasan [3], [4].

Kajian eksperimental terkini menjelaskan bahwa mekanisme *carburizing* berlangsung melalui siklus pembentukan dan penguraian karbon yang berkesinambungan, dengan bantuan aktivator yang berperan mempercepat reaksi perpindahan karbon. Menurut [5], karbon monoksida yang dihasilkan dari media pembentuk karbida padat akan terdekomposisi pada permukaan baja sehingga menghasilkan atom karbon aktif yang berdifusi ke dalam material. Sementara itu, gas CO_2 yang terbentuk kembali bereaksi dengan sumber karbon untuk menghasilkan CO baru, sehingga proses karburasi dapat berlangsung secara kontinyu. Reaksi berkala ini berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi difusi karbon ke dalam baja.

Efektivitas proses *carburizing* dipengaruhi oleh berbagai parameter, seperti temperatur proses, komposisi sumber karbon, ukuran partikel media, serta *holding time*. Di antara parameter tersebut, *holding time* memiliki pengaruh signifikan terhadap tingkat kekerasan permukaan dan kedalaman difusi karbon. Semakin lama waktu penahanan, semakin besar peluang atom karbon untuk berdifusi lebih dalam ke dalam matriks baja, sehingga menghasilkan *case depth* yang lebih tebal dan peningkatan kekerasan permukaan [6], [7]. Hasil penelitian eksperimental menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi karbon serta terbentuknya struktur mikro yang lebih keras, seperti martensit dan perlit halus, berkontribusi terhadap kenaikan nilai kekerasan material [8].

Berbagai penelitian terkini juga menunjukkan bahwa

proses *carburizing* mampu meningkatkan sifat mekanik material secara signifikan. Penelitian oleh [5] melaporkan bahwa proses *carburizing* menggunakan sumber karbon berbasis biomassa mampu meningkatkan kekerasan hingga mencapai 231.46 HV. Selain itu, ketahanan aus material mengalami peningkatan yang ditunjukkan oleh penurunan nilai keausan spesifik. Penelitian lain oleh [9] menunjukkan bahwa proses *carburizing* dapat meningkatkan kekerasan dan ketahanan korosi pada baja AISI 1020, sedangkan [10] mengungkapkan bahwa ukuran partikel karbon memengaruhi distribusi kekerasan pada baja hasil karburisasi.

Lebih lanjut, berbagai penelitian internasional melaporkan bahwa proses *carburizing* mampu meningkatkan kekerasan permukaan baja hingga berkisar antara 300–800 HV, bergantung pada parameter proses dan kondisi pendinginan yang digunakan [11], [3]. Peningkatan kekerasan permukaan serta berkurangnya deformasi plastis pada lapisan luar material berhubungan langsung dengan meningkatnya ketahanan aus baja [12].

Studi sebelumnya menunjukkan bahwa *pack carburizing* menggunakan mekanisme difusi karbon untuk meningkatkan kekerasan permukaan dan ketahanan aus baja karbon rendah. Namun, sebagian besar penelitian berkonsentrasi pada dampak dari temperatur proses, media karbon, dan metode pendinginan. Penelitian mengenai variasi waktu *heat treatment* pada baja ST37 menggunakan media arang tempurung kelapa dengan aktivator (BaCO_3) pada kondisi temperatur yang sama masih relatif terbatas.

II. METODOLOGI

Penelitian ini menguji baja karbon rendah berbentuk bundar dengan diameter 35 mm, tebal 10 mm, jumlah specimen yang disiapkan total 32 specimen. Sebelum proses *heat treatment*, sampel dibersihkan dari kotoran, minyak, dan oksida dengan diamplas permukaannya kemudian dipoles dengan autosol. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa difusi karbon berlangsung dengan baik. Sebelum menjalani proses *carburizing*, komposisi kimia specimen tersebut terlebih dahulu diuji. Untuk tujuan ini, digunakan *spectrometer*. Hal ini dilakukan untuk memastikan apakah kandungan karbon dalam bahan tersebut memenuhi batas kandungan karbon yang diperbolehkan untuk proses *carburizing*, yaitu kurang dari 0,3% karbon (C). Hal ini juga dilakukan untuk menentukan persentase unsur paduan lain yang terkandung dalam bahan tersebut [13], [14], [15]. Dalam proses *carburizing* ini, specimen ditempatkan dalam wadah atau kotak yang berisi bubuk arang yang dicampur dengan barium karbonat dengan perbandingan 2 kg arang tempurung kelapa terhadap 200 gram barium karbonat [16], [17] dan ditutup rapat dengan penutup yang diperkuat dengan tanah liat agar udara tidak masuk ke dalam kotak selama proses berlangsung [1]. Penggunaan tanah liat sebagai penutup mencegah masuknya oksigen di atmosfer ke dalam wadah dan untuk menghindari kebocoran gas kaya karbon yang

dihasilkan selama proses *carburizing*. Menutup wadah *carburizing* dengan tanah liat berperan mencegah kehilangan karbon dan kontaminasi udara selama proses *carburizing* [18]. Setelah specimen disiapkan, campuran bahan yang sudah tercampur beserta specimen dimasukkan ke dalam wadah dan dipanaskan ke dalam furnace dengan suhu 900°C [3], [19] dengan waktu tahan yang bervariasi, yaitu 3 jam [20], 4 jam [21], dan 5 jam. Setelah proses *carburizing*, specimen didinginkan secara perlahan di udara hingga mencapai suhu kamar. Pendinginan secara perlahan bertujuan meminimalkan *thermal shock* dan mengurangi *residual stresses* selama perlakuan panas. Studi-studi sebelumnya melaporkan bahwa pendinginan setelah perlakuan panas dalam wadah memengaruhi perkembangan mikrostruktur dan berkontribusi pada pembentukan struktur ferit-perlit, sehingga berpengaruh pada kekerasan dan keausan. Pendinginan bertahap pada suhu kamar untuk menjaga stabilitas mikrostruktur dan memastikan konsistensi sifat material [6], [17], [22], [23], [24], [25].



Gambar 1: Baja Karbon Rendah ST 37



Gambar 2: Arang Tempurung Kelapa



Gambar 3: Barium Carbonate (BaCO_3)

A. Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam percobaan ini adalah:

- 1) Gergaji mesin, digunakan untuk memotong specimen yang akan di heat treatment.



Gambar 4: Gergaji Mesin

- 2) *Furnace*, untuk menghasilkan struktur mikro yang seragam, specimen dipanaskan dalam tungku hingga suhu 900°C selama 3 jam, 4 jam dan 5 jam.



Gambar 5: *Furnace*

- 3) Mikroskop, gambar 6 digunakan untuk melihat bekas injakan penetrator Vickers, maka mikroskop di atur dengan pembesaran $100\times$ (1 strip = 32 mm).
- 4) Alat Uji Kekerasan *Vickers*, gambar 7 digunakan untuk menguji kekerasan, pengujian kekerasan dilakukan dengan metode Vickers.
- 5) Mesin Uji Keausan Universal, mesin uji keausan (*Ogoshi High Speed Universal Wear Testing Machine type OAT-U*) gambar 8 untuk mengukur tingkat keausan suatu material melalui metode gesek. Prinsip dasar pengujian Ogoshi adalah terjadinya kontak gesek antara piringan pemutar (*revolving disc*) yang keras dengan specimen yang permukaannya rata. Piringan pemutar ditekan pada benda uji dengan beban tertentu. Piringan kemudian diputar dengan kecepatan linier tertentu dalam jarak tempuh yang



Gambar 6: Mikroskop



Gambar 7: *Vickers*

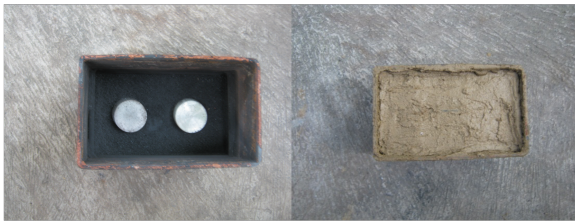
sudah diatur. Akibat gesekan tersebut, pada permukaan benda uji akan terbentuk sebuah cekungan atau bekas aus yang berbentuk seperti busur lingkaran.



Gambar 8: *Universal Wear Testing Machine*

B. Metallography Test

Analisis struktur mikro ini bertujuan untuk menentukan struktur mikro baja karbon rendah, khususnya untuk membandingkan struktur mikro bahan orisinal dengan



Gambar 9: Spesimen dalam serbuk karbon

struktur mikro bahan yang telah melalui proses *carburizing*.

Persiapan sampel untuk uji struktur mikro meliputi pemotongan spesimen uji. Untuk menghaluskan permukaan dan menghilangkan sisa-sisa pemesinan sebelumnya, digunakan amplas guna memastikan hasil pengamatan yang baik saat diamati di bawah mikroskop.

Langkah selanjutnya setelah pengamplasan hingga halus adalah pemolesan menggunakan autosol. Tujuannya adalah untuk menghasilkan permukaan yang mengkilap, sehingga memastikan pantulan cahaya yang baik saat pengamatan di bawah mikroskop. Dalam penelitian ini, digunakan perbesaran sebesar 100x.

C. Vickers Hardness Test

Sebelum melakukan uji kekerasan, spesimen disiapkan dengan menghaluskan permukaannya menggunakan amplas. Selanjutnya, spesimen dipoles, hal ini dilakukan untuk menghilangkan goresan atau debu yang timbul akibat proses pengamplasan dengan menggunakan autosol dan kain lembut. Beban sebesar 294 N, atau 30 kg, diterapkan dalam uji ini. Rumus berikut dapat digunakan untuk menghitung VHN:

$$Hv = \frac{1,854 \cdot P}{d^2} \quad (\text{kg/mm}^2) \quad (1)$$

dimana: P = beban yang menekan N (kg), d = diagonal penetrator (mm), $\alpha = \text{sudut } 136^\circ$ untuk piramida intan (*Vickers*)

D. Wear Test

Uji keausan menggunakan mesin *Ogoshi High Speed Wear Testing Machine* (Type OA-U). Untuk mengetahui tingkat keausan yang terjadi pada spesimen, beban dan kecepatan yang sama diterapkan pada beberapa spesimen selama pengujian. Perhitungan keausan dilakukan menggunakan rumus berikut:

$$Ws = \frac{B \times Bo^3}{8 \times r \times Po \times Lo} \quad (\text{mm}^2/\text{kg}) \quad (2)$$

dimana: Ws = harga keausan spesifik (mm²/kg) B = lebar piringan pengaus (mm) Bo = lebar keausan pada benda uji (mm) r = jari – jari piringan pengaus (mm) Lo = jarak tempuh pada proses pengausan (m) Po = gaya tekan pada proses keausan berlangsung (kg)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Optical Emission Spectroscopy

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan *spectrometer*, yang secara otomatis menampilkan hasil pengukuran komposisi kimia dari sampel untuk masing – masing pengujian waktu tahan 3 jam, 4 jam dan 5 jam. Berdasarkan hasil uji komposisi kimia, menunjukkan

Tabel I: Hasil Uji Komposisi Kimia Raw Material

Variabel	Substance	Persen (%)
Raw Material	Carbon(C)	0.2080
3 jam	Carbon(C)	0.8404
4 jam	Carbon(C)	0.8442
5 jam	Carbon(C)	0.8745

bahwa specimen tersebut tergolong baja karbon rendah dengan kandungan unsur karbon sebesar 0.20% C. Hal ini memenuhi kriteria proses carburizing (<0.3% berat C). Setelah carburizing, kandungan karbon meningkat menjadi 0.8404% berat C untuk waktu tahan 3 jam, 0.8442% berat C untuk waktu tahan 4 jam, dan 0.8745% berat C untuk waktu tahan 5 jam.

B. Wear Test

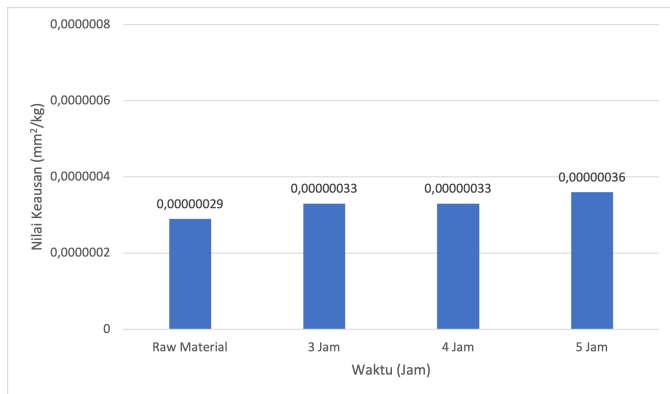
Berdasarkan hasil uji keausan dengan beban (P₀) sebesar 3.16 kg, jarak tempuh (L₀) 100 m, lebar cakram keausan (B) 3 mm, dan jari-jari cakram keausan (r) 30 mm. Tiga spesimen digunakan untuk setiap uji keausan pada raw material, waktu tahan 3 jam, 4 jam dan 5 jam.

Tabel II: Hasil Uji Keausan

Variabel	Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3	Nilai keausan rata – rata
Raw Material	3.7x10 ⁻⁷	2.0x10 ⁻⁷	2.0x10 ⁻⁷	2.9x10 ⁻⁷ (kg/mm ²)
3 Jam	3.6x10 ⁻⁷	3.5x10 ⁻⁷	3.0x10 ⁻⁷	3.3x10 ⁻⁷ (kg/mm ²)
4 jam	3.9x10 ⁻⁷	2.5x10 ⁻⁷	3.7x10 ⁻⁷	3.3x10 ⁻⁷ (kg/mm ²)
5 jam	3.3x10 ⁻⁷	3.2x10 ⁻⁷	4.3x10 ⁻⁷	3.6x10 ⁻⁷ (kg/mm ²)

Berdasarkan data hasil uji keausan didapat perbedaan antara *raw material* dan yang mengalami proses *carburizing*, dimana spesimen mengalami proses carburizing sedikit peningkatan keausan dengan bertambahnya waktu tahan (cenderung konstan). Hal ini disebabkan oleh karena permukaan yang mengalami pengerasan *carburizing*, sementara piring pengaus masuk lebih dalam sehingga angka keausan cenderung konstan.

Berdasarkan data hasil uji keausan didapat nilai keausan *raw material* 2.9x10⁻⁷ mm²/kg, sementara spesimen hasil pack carburizing menunjukkan nilai keausan 3.3x10⁻⁷ mm²/kg, 3.3x10⁻⁷ mm²/kg, dan 10⁻⁷ mm²/kg selama 3 jam, 4 jam, dan 5 jam. Nilai keausan meningkat seiring waktu tahan, seperti yang ditunjukkan pada grafik. Fenomena ini disebabkan oleh lapisan permukaan hasil difusi karbon yang memiliki kekerasan yang tidak seragam di seluruh area kontak.



Gambar 10: Hubungan Perbandingan Nilai Keausan Waktu Tahan *Carburizing* dengan Variasi Waktu Tahan

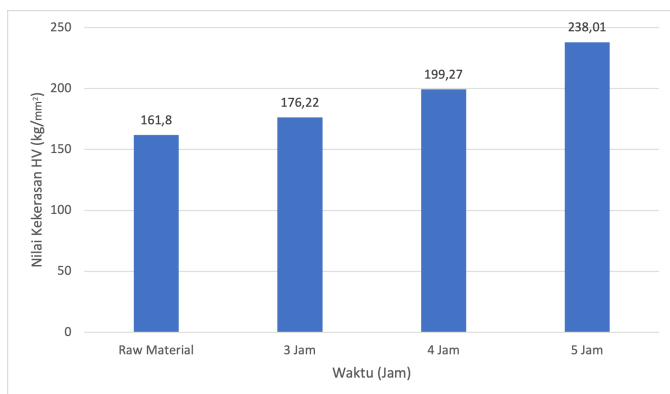
C. Pengujian Kekerasan

Adapun hasil pengujian kekerasan disajikan pada tabel III

Tabel III: Hasil Uji Kekerasan

Variabel	Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3	Nilai keausan rata – rata
Raw Material	157,78	171,19	154,5	161,8 (kg/mm ²)
3 Jam	198	165,33	165,33	176,22 (kg/mm ²)
4 jam	117,35	222,48	198	199,27 (kg/mm ²)
5 jam	274,66	241,39	198	238,01 (kg/mm ²)

Setelah mengalami proses *carburizing*, kekerasan di bagian permukaan spesimen mengalami peningkatan dari kekerasan awal. Hal ini disebabkan karena telah terjadi penggabungan atom-atom karbon dari media karburisasi ke dalam spesimen. Semakin ke dalam harga kekerasan semakin berkurang, bahkan pada bagian inti, harga kekerasan lebih rendah dari bagian tepi. Hal ini terjadi akibat dari spesimen berada pada temperatur 900°C dengan variasi waktu tahan 3 jam, 4 jam dan 5 jam.



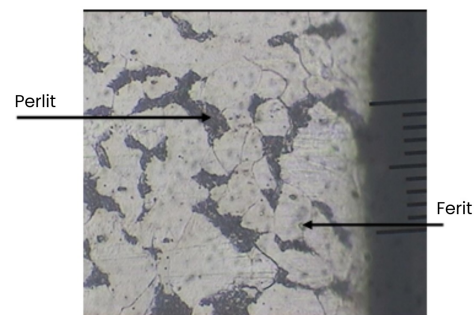
Gambar 11: Hubungan Perbandingan Nilai Kekerasan *Carburizing* dengan Variasi Waktu Tahan

Nilai kekerasan meningkat seiring dengan durasi waktu tahan pack carburizing, seperti yang ditunjukkan pada

grafik 2. Kekerasan raw material meningkat dari 161,8 kg/mm² menjadi 176,22 kg/mm² selama waktu tahan 3 jam, kemudian menjadi 199,27 kg/mm² selama waktu tahan 4 jam, dan akhirnya mencapai nilai maksimum 238,01 kg/mm² selama waktu tahan 5 jam. Peningkatan tersebut menunjukkan waktu tahan berperan terhadap difusi karbon ke dalam permukaan baja ST37. Dengan pemanasan yang lebih lama, konsentrasi karbon pada lapisan permukaan meningkat, yang meningkatkan ketahanan material terhadap penetrasi indenter Vickers.

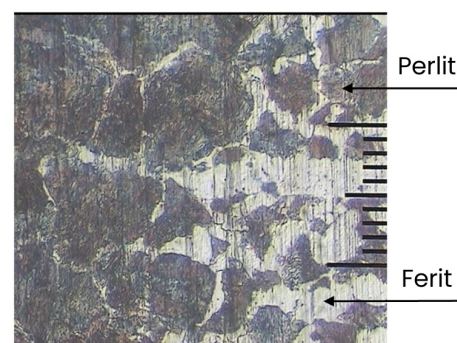
D. Pengujian Struktur Mikro

Hasil pengujian struktur mikro dengan perbesaran 100 kali dimana setiap stripnya (10 mikron) disajikan pada gambar 12.



Gambar 12: Struktur Mikro *Raw Material*

Pada raw material dapat dilihat bahwa struktur mikro-nya berupa ferit dan perlit yang merupakan struktur awal dari baja karbon butiran-butiran ferit dan perlitnya berbentuk penampang besar sesuai dengan kondisi awalnya. Ferit merupakan larutan padat karbon dalam besi α (alpha iron) dengan kadar karbon yang sangat rendah sehingga memiliki sifat lunak, ulet, dan mudah mengalami deformasi plastis. Sebaliknya, perlit merupakan campuran antara ferit dan sementit (Fe_3C) yang memiliki sifat lebih keras dibandingkan ferit.



Gambar 13: Struktur Mikro Waktu Tahan 3 jam

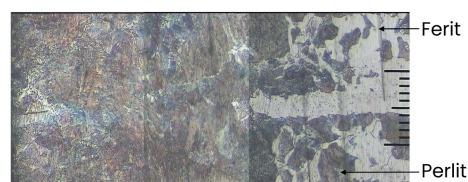
Hasil pengamatan struktur mikro pada spesimen dengan waktu tahan 3 jam menunjukkan bahwa fasa ferit dan perlit masih mendominasi struktur mikro. Namun,

karena proses difusi karbon, lapisan permukaan mulai berubah. Struktur perlit tampak mengalami peningkatan dibandingkan material awal yang didominasi fasa ferit. Ini menunjukkan bahwa selama proses pemanasan pada 900°C , atom karbon dari media karburasi mulai berdifusi ke permukaan baja. Selama waktu tahan 3 jam, lapisan permukaan specimen menjadi lebih keras.



Gambar 14: Struktur Mikro Waktu Tahan 4 jam

Hasil pengamatan struktur mikro pada specimen dengan waktu tahan 4 jam menunjukkan perubahan struktur mikro yang lebih besar dibandingkan specimen dengan waktu tahan 3 jam. Fasa perlit terlihat lebih dominan dan distribusinya mulai lebih banyak di permukaan specimen. Hal ini menunjukkan bahwa difusi karbon yang berlangsung lebih lama meningkatkan konsentrasi karbon pada permukaan. Kandungan karbon yang lebih tinggi mengubah struktur mikro, yang membuat jarak antar perlit lebih rapat dibandingkan dengan material awal. Struktur mikro yang lebih rapat meningkatkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi, sehingga nilai kekerasan material meningkat.



Gambar 15: Struktur Mikro Waktu Tahan 5 jam

Dibandingkan dengan variasi waktu tahan sebelumnya, perubahan pada struktur mikro lebih jelas terlihat pada specimen dengan waktu tahan 5 jam. Struktur mikro menunjukkan lapisan yang lebih padat dan kaya karbon dengan dominasi daerah perlit yang meningkat. Selama waktu tahan yang lebih lama, atom karbon dapat berdifusi lebih dalam ke dalam struktur kristal baja, meningkatkan ketebalan lapisan hasil karburasi. Permukaan specimen ini lebih keras dibandingkan specimen lainnya karena struktur mikro yang lebih padat.

Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro pada tabel IV nilai struktur mikro $0.325\ \mu\text{m}$, $0.35\ \mu\text{m}$, dan $0.55\ \mu\text{m}$ diperoleh untuk waktu tahan 3 jam, 4 jam, dan 5 jam, masing-masing, menunjukkan bahwa ukuran lapisan hasil difusi karbon meningkat seiring bertambahnya waktu tahan proses *pack carburizing*. Semakin besar

Tabel IV: Hasil Uji Struktur Mikro

Variabel	Hasil Uji (μm)
3 jam	0.325
4 jam	0.35
5 jam	0.55

ukuran lapisan tersebut, semakin banyak atom karbon yang berdifusi ke permukaan baja. Waktu tahan yang lebih lama memungkinkan proses perpindahan karbon berlangsung lebih lama, yang menghasilkan lapisan difusi yang lebih tebal. Hasil pengujian komposisi kimia dan kekerasan menunjukkan bahwa nilai kekerasan material meningkat setelah kandungan karbon pada permukaan specimen meningkat. Fenomena ini sejalan dengan temuan ini.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, metode *pack carburizing* yang diterapkan pada specimen baja karbon rendah memberikan pengaruh terhadap peningkatan sifat permukaan baja karbon rendah ST37. Variasi waktu tahan berpengaruh terhadap difusi karbon ke dalam permukaan material yang ditunjukkan oleh peningkatan kandungan karbon dari 0.2080% C pada material awal menjadi 0.8404% C, 0.8442% C, dan 0.8745% C pada waktu tahan berturut-turut 3 jam, 4 jam, dan 5 jam. Kenaikan nilai kekerasan permukaan akibat peningkatan kandungan karbon sebesar $161,8\ \text{kg/mm}^2$ menjadi $176.22\ \text{kg/mm}^2$, $199.27\ \text{kg/mm}^2$, dan mencapai nilai tertinggi $238.01\ \text{kg/mm}^2$ pada waktu tahan 5 jam, hasil ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu tahan, semakin besar difusi karbon yang terjadi sehingga meningkatkan kekerasan permukaan material. Pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa struktur awal berupa ferit perlit mengalami perubahan menjadi struktur yang lebih padat dan kaya karbon pada permukaan material. Perubahan struktur mikro tersebut berkontribusi terhadap peningkatan sifat mekanik material.

Penelitian ini memiliki keterbatasan karena hanya menggunakan satu temperatur *carburizing* (900°C) dan variasi waktu tahan 3–5 jam, serta belum mempertimbangkan pengaruh media pendinginan dan distribusi kekerasan pada kedalaman lapisan karburasi. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji pengaruh variasi temperatur, media pendinginan, dan jenis aktivator terhadap kedalaman difusi karbon, distribusi kekerasan, serta ketahanan aus material.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Yousef, A. M. Bastaweey, I. M. Maafa, and A. Abutaleb, "Improved Surface Properties of Low-Carbon Steel by Chromizing-Titanizing Coating Using Pack Cementation Process," *Metals*, vol. 14, no. 12, p. 1456, 2024.
- [2] P. Hiremath *et al.*, "Elevating carbon diffusion: deciphering the interplay of alloy composition and carburizing treatment in low carbon steels," *Cogent Engineering*, vol. 11, no. 1, p. 2345847, 2024.

- [3] X. Zhang *et al.*, "High-Temperature Carburization of Gear Steels: Grain Size Regulation, Microstructural Evolution, and Surface Performance Enhancement," *Coatings*, vol. 16, no. 3, p. 386, 2026.
- [4] N. Thammachot *et al.*, "Influence of Surface Layer Hardness on Diffusion Coefficient in Pack Carburizing of AISI 1020 Low-Carbon Steel Using Corn Cob Charcoal as Carburizing Energizer," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 34, no. 23, pp. 27680–27695, 2025.
- [5] D. B. Pradana, A. Supriyanto, and A. Faishal, "Pengaruh Variasi Komposisi Campuran Carbon Arang Cangkang Kemiri Dan Natrium Karbonat Terhadap Kekeraan Dan Keausan Pada Mild Steel Dengan Proses Pack Carburizing," *Teknika*, vol. 10, no. 2, pp. 28–35, 2025.
- [6] A. Wiangkham *et al.*, "Optimizing Parameters of the Pack Carburizing Process with Natural Energizers to Improve the Impact and Hardness Properties of Low-Carbon Steel Using NSGA-II-Based Artificial Intelligence," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 33, no. 24, pp. 13954–13966, 2024.
- [7] K. D. Ambiger *et al.*, "Influence of gas carburization on the microstructure, mechanical properties, and alloying elements behaviour in plain and alloyed low carbon steels," *Materials Research Express*, vol. 12, no. 4, p. 046507, 2025.
- [8] M. Syukron *et al.*, "The Effect of Temperature and Holding Time for Pack Carburizing of S45C Carbon Steel on Hardness, Wear Resistance and Microstructure," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1486, no. 1, p. 012028, 2025.
- [9] R. E. Audrey, P. H. Setyarini, S. Sugianto, and A. Sholikin, "Experimental Study Of Mechanical Properties And Corrosion Rate Of Low Carbon Steel AISI 1020 Resulting From Low Pressure Gas Carburizing," *International Journal of Mechanical Engineering Technologies and Applications*, vol. 6, no. 2, pp. 220–235, 2025.
- [10] Ngafwan *et al.*, "The Influence of Carbon Particle Size in The Carburizing Process of ST-40 Steel to The Surface Hardness," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1858, no. 1, p. 012026, 2021.
- [11] C. J. Scheuer, R. P. Cardoso, and S. F. Brunatto, "History, evolution, and current state of carburizing treatment on martensitic stainless steels," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 141, no. 1, pp. 141–170, 2025.
- [12] S. Kvon, Y. Skvortsov, A. Issagulov, and V. Kulikov, "Enhancement of Carbon Alloy Steel Hardness and Wear Resistance by Vibration and Modification," *Metallography, Microstructure, and Analysis*, vol. 14, no. 6, pp. 1243–1260, 2025.
- [13] M. O. Adeoti, T. Jamiru, T. A. Adegbola, and L. W. Beneke, "Suitability Assessment of Organic Carbon Additives in the Carburization of Low Carbon Steel (AISI 1020) for Engineering Applications," *Science, Engineering and Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 44–52, 2025.
- [14] S. M. Jafarpour *et al.*, "Effects of Plasma-Chemical Composition on AISI 316L Surface Modification by Active Screen Nitrocarburizing Using Gaseous and Solid Carbon Precursors," *Metals*, vol. 11, no. 9, p. 1411, 2021.
- [15] O. B. Tapar, J. Epp, M. Steinbacher, and J. Gibmeier, "In-Situ Synchrotron X-ray Diffraction Investigation of Microstructural Evolutions During Low-Pressure Carburizing," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 52, no. 4, pp. 1427–1442, 2021.
- [16] M. J. Madu *et al.*, "The influence of carburization parameters on the mechanical behavior of mild steel: a review," *Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 72, no. 1, p. 193, 2025.
- [17] M. Sebayang, "ST37 Steel Carburization with Coconut Charcoal," *Journal of Technomaterials Physics*, 2021.
- [18] S. R. Elmi Hosseini and Z. Li, "Pack Carburizing: Properties, Microstructure and Modeling," in *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys*, Taylor & Francis Group, 2016.
- [19] I. P. Aondona and A. Offiong, "The Effect of Holding Time on the Hardness of Case Hardened Mild Steel," *International Journal of Engineering and Applied Sciences*.
- [20] S. Effendi *et al.*, "Effects of Carburizing Processes on Nodular Cast Iron with Variations in Temperature, Time and Cooling System," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1500, no. 1, p. 012087, 2020.
- [21] O. S. Sutresman *et al.*, "Increased hardness value due to the diffusion of low-temperature carburizing process," *EPI International Journal of Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 18–23, 2024.
- [22] E. Santoso *et al.*, "Hardness and Microstructural Characterization of Pack Carburizing AISI 1020 Low-Carbon Steel by Temperature and Holding Time Variations," *Advanced Sustainable Science, Engineering and Technology*, vol. 6, no. 1, p. 02401023, 2024.
- [23] M. M. B. Isa, H. A. Aswihli, and A. M. Sharf, "THE EFFECT OF PACK CARBURIZING ON HARDNESS AND FATIGUE STRENGTH OF LOW CARBON STEEL," , vol. 33, no. 2, pp. 1–19, 2020.
- [24] S. Dewangan *et al.*, "Preliminary investigation into temperature-hardness relationship in low-carbon steel after pack carburizing," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2835, no. 1, p. 020002, 2024.
- [25] M. Y. Kolawole, E. A. Awoyemi, and O. M. Abiona, "Potentials of date-seed/snail shells as a carburizer for enhanced mechanical properties of mild-steel," *Sumy State University*, 2021.

BIOGRAFI PENULIS

Yoshrizal Hary Yulianto adalah Dosen Teknik Mesin dengan fokus penelitian pada material teknik, perlakuan panas, *reverse engineering*, dan proses manufaktur. Minat risetnya meliputi karakterisasi material, analisis struktur mikro, pengujian sifat mekanik, surface engineering, serta penerapan teknologi manufaktur untuk pengembangan produk dan kebutuhan industri.