



Analisis Komparatif Metode *Carburizing* terhadap Profil Difusi Karbon dan Distribusi Kekerasan Baja Karbon Rendah AISI 1018

Reinaldo Evan Audrey ^{1,*}, Bernardus Crisanto Putra Mbulu ¹, Febi Rahmadiano ², Gerald Adityo Pohan ²

¹ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Katolik Widya Karya, Malang, Jawa Timur, Indonesia

² Program Studi Teknik Mesin S1, Institut Teknologi Nasional, Malang, Jawa Timur, Indonesia

Kata kunci

AISI 1018
gas carburizing
pack carburizing
difusi karbon
kekerasan permukaan

ABSTRAK

Baja karbon rendah AISI 1018 banyak diaplikasikan pada komponen alat dan mesin pertanian (alsintan) karena memiliki keuletan yang baik, mudah dimanufaktur, dan biaya produksi yang relatif rendah. Namun, rendahnya kandungan karbon menyebabkan material ini memiliki kekerasan permukaan yang terbatas sehingga rentan mengalami keausan abrasif. Penelitian ini bertujuan membandingkan efektivitas metode *pack carburizing* dan *gas carburizing* terhadap karakteristik difusi karbon, evolusi mikrostruktur, dan distribusi kekerasan. Penelitian dilakukan menggunakan metode eksperimen komparatif dengan variasi temperatur 750 °C, 825 °C, dan 900 °C serta waktu penahanan 60 menit. Karakterisasi dilakukan melalui pengujian *Micro-Hardness Vickers* hingga kedalaman 2.700 µm dan analisis *Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (SEM-EDS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur mempercepat difusi karbon sehingga meningkatkan kadar karbon, pembentukan fasa martensit, dan kekerasan permukaan pada kedua metode *carburizing*. Pada temperatur 900 °C, *gas carburizing* menghasilkan kekerasan permukaan tertinggi sebesar 866 HV dengan kadar karbon mencapai 1,34%, sedangkan *pack carburizing* menghasilkan kekerasan 797 HV dengan kadar karbon 1,19%. Selain menghasilkan lapisan martensit yang lebih homogen, *gas carburizing* juga menunjukkan kedalaman difusi karbon yang lebih besar dibandingkan dengan *pack carburizing*. Hal ini mengindikasikan bahwa pengendalian atmosfer pada *gas carburizing* mampu meningkatkan efektivitas proses pengerasan permukaan baja AISI 1018 sebagai komponen alsintan.

* Corresponding author:

Reinaldo Evan Audrey (email: reinaldoevan@widyakarya.ac.id)

Diterima: 30 Juni 2026

Disetujui: 21 Juli 2026

Dipublikasikan: 12 September 2026

1 Pendahuluan

Perkembangan mekanisasi pada sektor pertanian dan peternakan yang semakin pesat menuntut ketersediaan alat dan mesin pertanian (alsintan) dengan performa yang andal serta biaya produksi yang tetap kompetitif guna mendukung keberlanjutan sistem produksi pangan secara global [1]. Dalam operasionalnya, berbagai komponen utama alsintan seperti mata bajak (*plowshare*), pisau pencacah hijauan (*chopper blades*), dan cincin cetakan pelet (*pellet die*) bekerja secara berkelanjutan pada lingkungan yang memiliki tingkat kekerasan relatif tinggi. Komponen-komponen tersebut beroperasi pada lingkungan yang mengalami kombinasi pembebanan berupa gesekan abrasif akibat kontak dengan tanah dan partikel silika, beban impak yang berulang selama proses kerja, serta paparan media korosif dari lingkungan pertanian. Kombinasi ketiga mekanisme degradasi tersebut menuntut material memiliki kekerasan permukaan yang tinggi untuk meningkatkan ketahanan terhadap keausan, namun tetap mempertahankan keuletan dan ketangguhan pada bagian inti agar mampu menahan pembebanan dinamis tanpa mengalami kegagalan dini. Meskipun baja karbon rendah AISI 1018 memiliki sifat fabrikasi yang baik, rendahnya kandungan karbon menyebabkan material ini memerlukan perlakuan pengerasan permukaan (*case hardening*), seperti *carburizing*, untuk meningkatkan performa

permukaan tanpa mengurangi sifat mekanik pada inti material [2]. Selanjutnya, kombinasi pembebanan tersebut mengakibatkan terjadinya keausan abrasif dan deformasi plastis pada lapisan permukaan, yang secara bertahap menurunkan dimensi, kualitas permukaan, serta kinerja komponen selama pengoperasian. Pada kondisi pembebanan siklik yang berlangsung secara terus-menerus, kerusakan tersebut juga dapat memicu terbentuknya *micro-pitting* sebagai bentuk degradasi permukaan sekunder akibat inisiasi dan propagasi retak mikro pada daerah yang mengalami konsentrasi tegangan [3]. Akumulasi berbagai mekanisme kerusakan tersebut berkontribusi terhadap penurunan umur pakai komponen serta meningkatnya kebutuhan perawatan dan penggantian komponen di lingkungan pertanian. Akibatnya, frekuensi perawatan maupun penggantian komponen meningkat sehingga berdampak pada efisiensi operasional dan biaya pemeliharaan yang lebih tinggi di lapangan [4].

Dalam upaya memenuhi kebutuhan manufaktur alsintan yang ekonomis, khususnya pada sektor Industri Kecil dan Menengah (IKM) serta bengkel produksi alat pertanian lokal, baja karbon rendah AISI 1018 masih menjadi salah satu material yang paling banyak digunakan. Material ini dipilih karena memiliki kombinasi sifat yang menguntungkan, antara lain biaya produksi yang relatif rendah, keuletan (*ductility*) yang baik untuk menahan beban kejut, serta kemudahan dalam proses permesinan (*machinability*) dan pengelasan (*weldability*) [5]. Meskipun demikian, kandungan karbon yang relatif rendah, yaitu sekitar $\pm 0,18$ wt.%, menyebabkan baja AISI 1018 memiliki kekerasan dasar yang terbatas, berkisar antara 126 - 131 HB atau setara dengan 133 - 138 HV [6]. Karakteristik tersebut menjadikan material ini kurang mampu menahan mekanisme keausan abrasif ketika digunakan secara langsung (*raw material*). Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan rekayasa permukaan (*surface engineering*) yang mampu meningkatkan ketahanan aus pada lapisan permukaan tanpa mengurangi ketangguhan bagian inti material [7].

Salah satu metode yang banyak diterapkan untuk meningkatkan sifat permukaan baja karbon rendah adalah proses *carburizing*, yang termasuk ke dalam kelompok perlakuan termokimia pengerasan permukaan (*case hardening*). Metode ini bekerja melalui mekanisme difusi atom karbon ke dalam kisi kristal baja sehingga terbentuk lapisan permukaan yang memiliki kekerasan lebih tinggi, sementara bagian inti tetap mempertahankan sifat keuletannya [8]. Dalam praktik industri, dua metode *carburizing* yang paling umum digunakan adalah *pack carburizing* dan *gas carburizing*. Metode *pack carburizing* dikenal memiliki biaya operasional yang relatif rendah serta fleksibilitas yang tinggi karena dapat memanfaatkan berbagai jenis biomassa organik sebagai sumber karbon aktif [9]. Sementara itu, *gas carburizing* menawarkan kemampuan pengendalian proses yang lebih baik melalui pengaturan potensial karbon dan atmosfer perlakuan panas sehingga menghasilkan kedalaman difusi yang lebih seragam. Meskipun metode *pack carburizing* dan *gas carburizing* telah banyak diterapkan dalam proses pengerasan permukaan baja karbon rendah, sebagian besar penelitian terdahulu umumnya hanya berfokus pada satu metode *carburizing*, satu jenis media karbon, atau satu parameter proses tertentu, sehingga perbandingan langsung mengenai efektivitas kedua metode tersebut masih terbatas. Selain itu, kajian yang mengintegrasikan pengaruh media *carburizing* berbasis biomassa dengan atmosfer gas terkontrol terhadap karakteristik difusi karbon dan distribusi kekerasan pada baja AISI 1018, masih belum banyak dilaporkan. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada analisis komparatif antara *pack carburizing* berbasis limbah ampas kopi dan *gas carburizing* dengan variasi temperatur 750 °C, 825 °C, dan 900 °C untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap profil distribusi karbon, evolusi mikrostruktur, serta distribusi kekerasan sebagai dasar dalam menentukan metode karburisasi yang paling efektif bagi aplikasi alsintan [10].

Selain jenis media *carburizing*, temperatur proses merupakan parameter yang sangat menentukan keberhasilan difusi karbon serta transformasi mikrostruktur yang terjadi selama perlakuan termokimia [8], [9]. Peningkatan temperatur akan memengaruhi koefisien difusi karbon sekaligus meningkatkan kelarutan karbon dalam matriks besi. Pada temperatur 750 °C, material masih berada pada daerah interkritikal ($\alpha + \gamma$), sehingga fasa ferit dan austenit hadir secara bersamaan. Keberadaan fasa ferit membatasi kelarutan karbon, sehingga laju difusi karbon ke dalam material relatif rendah [8], [10]. Ketika temperatur ditingkatkan menjadi 825 °C dan 900 °C, baja AISI 1018 memasuki daerah austenitisasi penuh (γ) berdasarkan diagram fasa Fe-C, karena temperatur tersebut berada di atas temperatur kritis atas (A_3) baja karbon rendah berkisar pada rentang temperatur 800–850°C. Pada kondisi ini, struktur mikro ferit secara bertahap bertransformasi menjadi austenit sehingga kemampuan material dalam melarutkan karbon meningkat secara signifikan dibandingkan daerah interkritikal ($\alpha + \gamma$) pada 750 °C yang masih berada di antara temperatur kritis A_1 dan A_3 [11]. Akibatnya, laju difusi karbon menjadi lebih tinggi dan pembentukan lapisan karburisasi berlangsung lebih efektif, meskipun peningkatan

temperatur yang berlebihan tetap berpotensi mendorong pertumbuhan butir austenit yang dapat memengaruhi ketangguhan material setelah proses pendinginan [12].

2 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium dengan pendekatan komparatif atau perbandingan untuk mengevaluasi pengaruh metode *pack carburizing* dan *gas carburizing* terhadap karakteristik permukaan baja karbon rendah AISI 1018. Variasi temperatur perlakuan sebesar 750 °C, 825 °C, dan 900 °C diterapkan sebagai parameter utama untuk mengkaji perbedaan perilaku difusi karbon yang terjadi pada masing-masing metode *carburizing*. Fokus penelitian diarahkan pada hubungan antara media penyuplai karbon dan temperatur proses terhadap perubahan mikrostruktur, distribusi unsur karbon, serta peningkatan sifat mekanik material. Melalui pendekatan tersebut, efektivitas kedua metode *carburizing* dapat dianalisis secara komprehensif sehingga diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme pengerasan permukaan baja AISI 1018 dan potensi penerapannya pada komponen alat dan mesin pertanian yang membutuhkan kombinasi sifat kekerasan permukaan tinggi dan ketangguhan inti yang baik.

2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama kurun waktu tiga minggu di beberapa lokasi. Rincian lokasi untuk setiap tahap penelitian, mulai dari preparasi bahan hingga pengujian, disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tempat pelaksanaan penelitian

No.	Proses Penelitian	Tempat
1.	Preparasi bahan atau material	Universitas Katolik Widya Karya Malang
2.	Proses <i>gas carburizing</i>	Institut Teknologi Nasional Malang
3.	Proses <i>pack carburizing</i>	Universitas Katolik Widya Karya Malang
4.	Pengujian kekerasan (<i>Micro-hardness Vickers</i>)	Politeknik Negeri Malang
5.	Pengujian SEM-EDS	Politeknik ATMI Surakarta

2.2 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian disusun sebagai kerangka sistematis yang berfungsi untuk mengarahkan seluruh kegiatan penelitian ini agar berjalan secara terstruktur, terukur, dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Berikut adalah tahapan penelitian yang dilakukan:

- Kajian literatur

Kajian literatur dilakukan melalui penelusuran dan telaah kritis terhadap berbagai sumber ilmiah yang relevan, meliputi buku referensi, artikel prosiding, standar teknis, serta publikasi jurnal nasional maupun internasional yang berkaitan dengan topik penelitian. Kegiatan ini bertujuan untuk membangun landasan teoritis yang kuat serta mengidentifikasi perkembangan penelitian terkini yang berhubungan dengan proses *carburizing*, karakterisasi material, dan peningkatan sifat mekanik baja karbon rendah. Analisis terhadap literatur yang tersedia juga digunakan untuk mengidentifikasi kesenjangan penelitian (*research gap*), menentukan variabel yang berpengaruh, serta menyusun kerangka konseptual yang mendukung pelaksanaan penelitian.

- Identifikasi Kesenjangan Penelitian

Identifikasi *research gap* dilakukan melalui proses analisis dan evaluasi terhadap hasil-hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan perlakuan termokimia karburisasi pada baja karbon rendah. Tahapan ini bertujuan untuk menemukan aspek-aspek yang masih belum dikaji secara mendalam, memiliki keterbatasan data, atau menunjukkan hasil yang belum konsisten sehingga memerlukan investigasi lebih lanjut. Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, diketahui bahwa sebagian besar penelitian berfokus pada pengaruh parameter proses *carburizing* secara terpisah, sedangkan studi komparatif yang membandingkan efektivitas metode *pack carburizing* dan *gas carburizing* pada berbagai variasi temperatur masih relatif terbatas, khususnya pada aplikasi material baja AISI 1018 untuk komponen alat dan mesin pertanian.

- Penentuan Kesenjangan Penelitian

Penentuan *research gap* dalam penelitian ini dilakukan dengan mensintesis dan membandingkan temuan-temuan dari berbagai penelitian terdahulu yang membahas proses *carburizing* pada baja karbon

rendah. Hasil kajian menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian masih berfokus pada evaluasi satu metode karburisasi tertentu atau pengaruh temperatur proses secara independen, sehingga informasi mengenai perbandingan langsung antara metode *pack carburizing* dan *gas carburizing* pada kondisi temperatur yang berbeda masih belum banyak tersedia.

- Preparasi bahan atau material

Preparasi material dilakukan sebagai tahap awal untuk memperoleh spesimen dengan kondisi yang seragam sehingga hasil pengujian dapat merepresentasikan pengaruh parameter penelitian secara objektif. Tahap ini diawali dengan pembentukan spesimen melalui pemotongan material baja AISI 1018 sesuai dengan dimensi dan standar yang dipersyaratkan untuk setiap pengujian. Sebanyak enam spesimen disiapkan untuk masing-masing metode *carburizing* sehingga totalnya menjadi 12 spesimen. Pembagian spesimen berdasarkan jenis pengujian disajikan pada Tabel 2. Setelah proses pemotongan, permukaan spesimen dipersiapkan melalui pengamplasan bertahap menggunakan kertas amplas silikon karbida (*SiC paper*), mulai dari grit 400, 600, 800, 1000, 1500, hingga 2000. Pengamplasan bertingkat tersebut bertujuan menghilangkan cacat permukaan dan goresan akibat proses pemotongan serta menghasilkan tingkat kekasaran permukaan yang relatif seragam pada seluruh spesimen.

Tabel 2. Pembagian total 12 spesimen penelitian yang digunakan

Pengujian Material	Metode					
	<i>Pack Carburizing</i>			<i>Gas Carburizing</i>		
	750 °C	825 °C	900 °C	750 °C	825 °C	900 °C
Distribusi kekerasan	1	1	1	1	1	1
SEM-EDS	1	1	1	1	1	1
Total	12 Spesimen					

- Proses *gas carburizing*

Proses *gas carburizing* dilakukan menggunakan tungku *Fluidized Bed Furnace* (FBF) yang mampu menghasilkan distribusi temperatur homogen serta meningkatkan efisiensi perpindahan panas selama perlakuan termokimia. Proses ini dilaksanakan pada variasi temperatur 750 °C, 825 °C, dan 900 °C untuk mengkaji pengaruh temperatur terhadap karakteristik difusi karbon pada permukaan baja AISI 1018. Tahap awal dilakukan dengan menyalurkan gas oksigen (O₂) untuk meningkatkan temperatur tungku dari ±27 °C menjadi 500 °C. Selanjutnya, atmosfer *carburizing* di dalam *Fluidized Bed Furnace* dikondisikan dengan gas metana (CH₄) sebagai sumber karbon aktif, sedangkan gas nitrogen (N₂) berperan sebagai gas inert yang tidak bereaksi secara langsung selama proses *carburizing*. Gas N₂ berfungsi menjaga kestabilan atmosfer di dalam tungku, mengurangi kemungkinan oksidasi permukaan spesimen, serta mempertahankan kondisi termal yang seragam selama perlakuan panas. Gas CH₄ dioperasikan pada tekanan 0,2 bar selama waktu penahanan (*holding time*) 60 menit untuk menyediakan potensial karbon yang stabil. Dengan demikian, proses difusi karbon berlangsung secara konsisten pada setiap variasi temperatur dan menghasilkan lapisan karburisasi yang lebih homogen pada permukaan baja AISI 1018. Penggunaan *Fluidized Bed Furnace* memungkinkan interaksi yang lebih merata antara spesimen dan media gas aktif sehingga mendukung terbentuknya lapisan *carburizing* yang seragam. Tahap terakhir adalah *direct quenching* menggunakan oli SAE 10W-40 pada temperatur ruang (±27 °C) sebagai media pendingin. Seluruh spesimen didinginkan secara langsung setelah proses *carburizing* selama 5 menit untuk memperoleh kondisi pendinginan yang seragam pada setiap variasi perlakuan.

- Proses *pack carburizing*

Proses *pack carburizing* dilakukan menggunakan limbah ampas kopi sebagai sumber karbon. Sebelum digunakan, ampas kopi dikeringkan menggunakan oven selama ±1 jam untuk mengurangi kadar air dan meningkatkan efektivitas pelepasan karbon selama proses *carburizing*. Selanjutnya, spesimen baja AISI 1018 ditempatkan bersama media *carburizing* di dalam wadah tertutup dan dipanaskan menggunakan tungku perlakuan panas pada variasi temperatur 750 °C, 825 °C, dan 900 °C dengan waktu penahanan (*holding time*) selama 60 menit. Variasi temperatur tersebut diterapkan untuk mengevaluasi pengaruh energi termal terhadap laju difusi karbon dan pembentukan lapisan pengerasan pada permukaan material. Setelah proses *carburizing* selesai, spesimen didinginkan secara cepat melalui

proses *quenching* menggunakan oli SAE 10W-40 untuk mengunci karbon yang telah berdifusi ke dalam matriks baja serta mendorong terbentuknya mikrostruktur yang lebih keras.

- Proses pengujian material

Karakterisasi material setelah proses *carburizing* dilakukan melalui dua tahapan pengujian, yaitu pengujian kekerasan mikro serta karakterisasi mikrostruktur dan komposisi unsur. Pengujian *Micro-Hardness Vickers* dilakukan berdasarkan standar ASTM E384 untuk menggambarkan profil pengerasan dan efektivitas difusi karbon akibat variasi metode serta temperatur *carburizing*. Pengujian menggunakan beban 500 gf (HV0.5) dengan waktu penahanan (*dwell time*) selama 15 detik. Titik indentasi dibuat dari permukaan menuju bagian inti material dengan interval 300 μm . Nilai kekerasan pada setiap titik digunakan untuk menyusun profil distribusi kekerasan dan mengevaluasi kedalaman lapisan hasil *carburizing* pada masing-masing spesimen. Selanjutnya, karakterisasi mikrostruktur dan komposisi unsur dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (SEM-EDS). Citra mikrostruktur dianalisis menggunakan perangkat lunak ImageJ untuk mengidentifikasi perubahan morfologi permukaan, mengukur ketebalan lapisan hasil *carburizing*, serta mendukung interpretasi karakteristik mikrostruktur yang terbentuk. Analisis EDS dilakukan dalam mode *line scanning* pada penampang lapisan hasil *carburizing* dengan interval pengukuran setiap 50 μm dari permukaan menuju bagian inti material untuk mengevaluasi tren distribusi unsur karbon sepanjang proses difusi. Data distribusi karbon yang diperoleh digunakan sebagai indikator semikuantitatif terhadap mekanisme difusi karbon dan selanjutnya dikorelasikan dengan hasil pengujian *Micro-Hardness Vickers* serta perubahan mikrostruktur. Hasil kedua pengujian tersebut kemudian dikorelasikan untuk menganalisis hubungan antara distribusi karbon, perubahan mikrostruktur, dan peningkatan kekerasan permukaan pada baja AISI 1018.

2.3 Variabel Penelitian

Penelitian ini disusun dengan mempertimbangkan tiga jenis variabel utama, yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol, guna memastikan bahwa proses eksperimen berlangsung secara sistematis dan menghasilkan data yang valid (Tabel 3). Variabel bebas berperan sebagai faktor yang sengaja divariasikan selama penelitian, sedangkan variabel terikat merupakan parameter yang diukur sebagai respons terhadap perlakuan tersebut. Sementara itu, variabel kontrol dipertahankan tetap pada setiap kondisi pengujian untuk meminimalkan pengaruh faktor eksternal yang dapat menyebabkan bias terhadap hasil penelitian.

Tabel 3. Variabel penelitian setiap metode *carburizing*

Metode	Variabel Bebas	Variabel Kontrol	Variabel Terikat
<i>Gas Carburizing</i>	Temperatur (750 °C, 825 °C, dan 900 °C)	Tekanan gas CH ₄ (0,2 bar); tungku <i>fluidized bed furnace</i> ; material AISI 1018; <i>quenching</i> (oli SAE 10W-40)	Distribusi kekerasan; perubahan struktur mikro; dan distribusi unsur karbon
<i>Pack Carburizing</i>	Temperatur (750 °C, 825 °C, dan 900 °C)	Media karbon (ampas kopi); tungku induksi; material AISI 1018; <i>quenching</i> (oli SAE 10W-40)	Distribusi kekerasan; perubahan struktur mikro; dan distribusi unsur karbon

2.4 Bahan dan Alat

- Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon rendah AISI 1018 dengan kandungan karbon $\pm 0,18$ wt.% sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4. Material ini dipilih karena merupakan salah satu jenis baja yang banyak digunakan dalam pembuatan komponen alat dan mesin pertanian (alsintan) akibat kombinasi sifatnya yang ekonomis, mudah diproses, serta memiliki keuletan yang baik. Berdasarkan data sifat mekanik pada Tabel 5, baja AISI 1018 memiliki tingkat kekerasan awal yang relatif rendah sehingga masih rentan terhadap mekanisme keausan abrasif yang umum terjadi pada lingkungan kerja pertanian. Namun demikian, karakteristik tersebut menjadikan baja AISI 1018 sangat sesuai untuk diaplikasikan pada penelitian perlakuan termokimia, karena peningkatan kekerasan

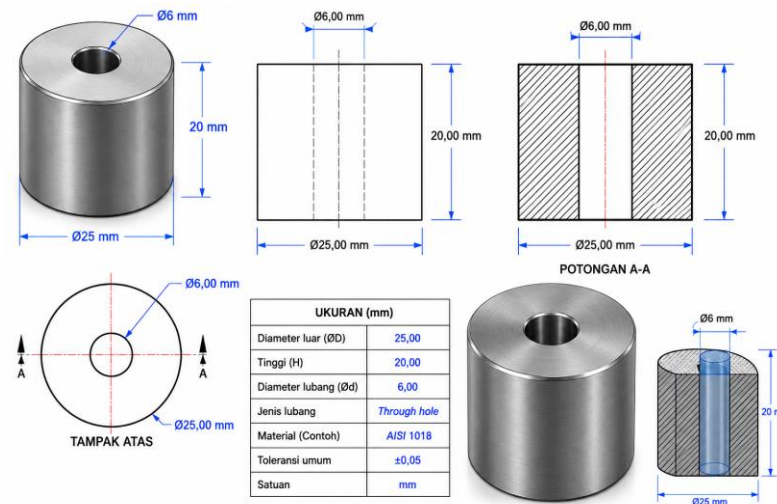
permukaan yang dihasilkan dapat diamati secara lebih signifikan tanpa menghilangkan ketangguhan pada bagian inti material.

Tabel 4. Unsur kimia baja karbon rendah AISI 1018 oleh Mill Certificate

Berat [%]	C	Fe	Mn	P	S
Berat [%]	± 0,18	99,26	0,60–0,90	≤ 0,040	≤ 0,050

Tabel 5. *Material properties* baja karbon rendah AISI 1018 oleh Mill Certificate

Kerapatan [g/cm ³]	Kekerasan [HV]	Kekuatan tarik maksimum [MPa]	Kemampuan pemesinan [%]
7,87	131	440	70



Gambar 1. Dimensi material setelah pemotongan menjadi spesimen penelitian

Material awal berupa *round bar* baja karbon rendah AISI 1018 dipotong menggunakan mesin bubut hingga diperoleh dimensi akhir berupa silinder dengan diameter luar 25 mm dan tinggi 20 mm serta dilengkapi lubang tembus (*through hole*) berdiameter 6 mm yang terletak tepat pada sumbu pusat spesimen. Proses pemotongan diawali dengan menyiapkan batang silinder (*round bar*) berdiameter 25 mm, kemudian memotongnya sepanjang 20 mm (± 2 mm) untuk memberikan *allowance* proses *facing*. Selanjutnya, kedua permukaan ujung spesimen diratakan (*facing*) menggunakan mesin bubut hingga mencapai tinggi akhir 20 mm dan menghasilkan kerataan permukaan yang baik. Setelah dimensi luar sesuai dengan rancangan pada gambar, dilakukan proses pengeboran (*drilling*) pada pusat spesimen menggunakan mata bor berdiameter 6 mm sehingga terbentuk lubang tembus. Dimensi akhir spesimen terdiri atas diameter luar 25 mm, tinggi 20 mm, dan diameter lubang 6 mm, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Spesimen tersebut selanjutnya digunakan dalam proses *carburizing* dan pengujian material.

- Alat

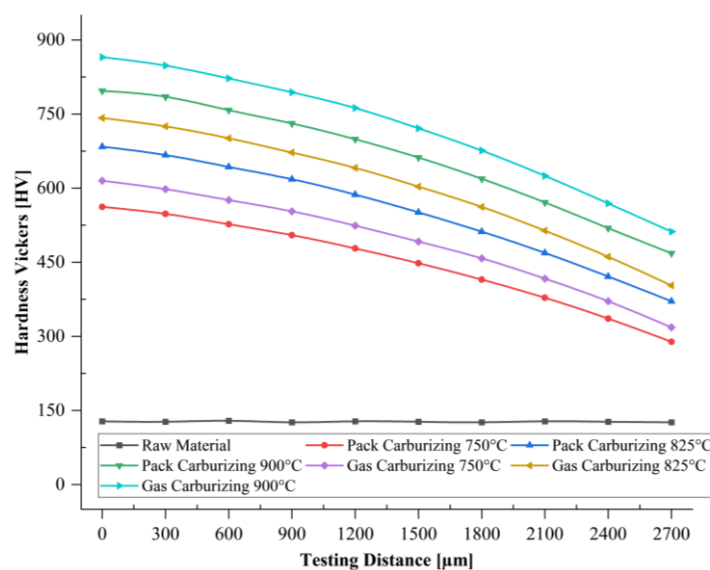
Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- | | |
|--|--|
| a) SiC <i>paper</i> atau amplas | f) Media karbon ampas kopi robusta |
| b) <i>Fluidized bed furnace</i> | g) Alat uji metalografi SEM-EDS |
| c) Gas CH ₄ , N ₂ , dan O ₂ | h) Tungku induksi |
| d) Larutan ETSA | i) Aluminium foil |
| e) Alat uji kekerasan <i>Micro-Vickers</i> | j) Media <i>quenching</i> Oli SAE 10W-40 |

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Distribusi Kekerasan

Gambar 2 yang memiliki grafik berwarna hitam menunjukkan bahwa *raw material* memiliki kekerasan paling rendah dan relatif stabil pada seluruh jarak pengujian, yaitu sekitar 127–131 HV. Nilai ini jauh di bawah seluruh spesimen yang telah mengalami *carburizing*, baik dengan metode *pack* maupun *gas carburizing*. Pada kondisi permukaan, *pack carburizing* pada temperatur 750 °C menunjukkan kenaikan nilai kekerasan menjadi 562 HV, sedangkan *gas carburizing* pada temperatur 750 °C mencapai sekitar 615 HV. Kenaikan yang lebih tinggi terlihat pada temperatur 825 °C, yaitu sekitar 684 HV untuk *pack carburizing* dan 742 HV untuk *gas carburizing*. Pada temperatur 900 °C, kekerasan permukaan semakin meningkat hingga sekitar 797 HV pada *pack carburizing* dan 866 HV pada *gas carburizing*. Hasil ini menunjukkan bahwa proses *thermochemical treatment* mampu meningkatkan kekerasan permukaan material secara signifikan dibandingkan dengan material awal [7]. Namun, nilai kekerasan cenderung menurun secara bertahap seiring bertambahnya jarak pengukuran dari permukaan hingga mencapai kedalaman 2.700 μm . Kondisi tersebut menunjukkan bahwa lapisan permukaan memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan bagian inti material akibat masuknya atom karbon selama proses difusi [9].



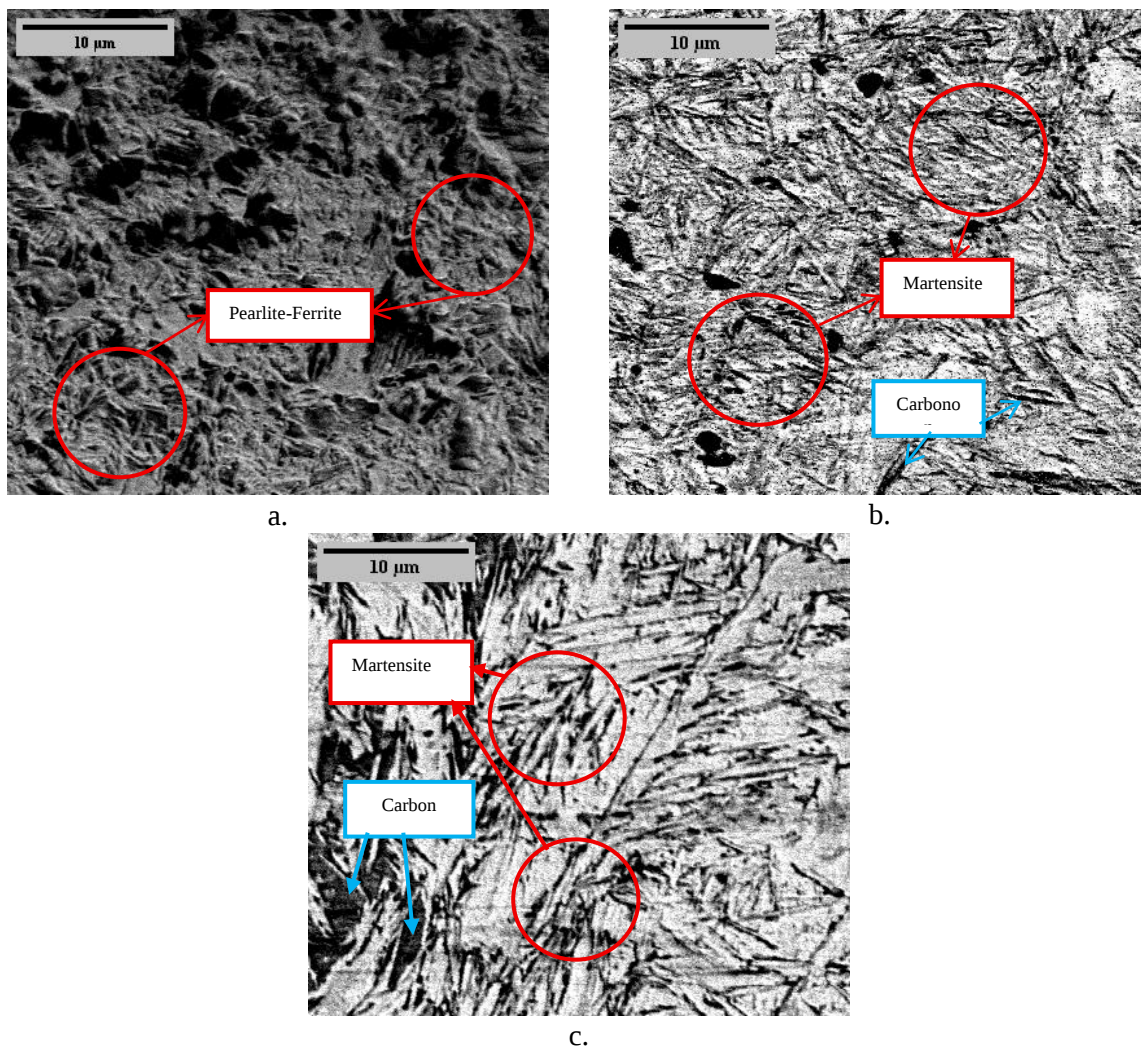
Gambar 2. Profil distribusi kekerasan terhadap kedalaman pengujian pada baja AISI 1018 tiap perbedaan temperatur

Berdasarkan data pada Gambar 2, metode *gas carburizing* menunjukkan kecenderungan menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan *pack carburizing* pada setiap variasi temperatur dan sepanjang kedalaman pengujian. Pada temperatur 750 °C, selisih kekerasan permukaan antara *gas carburizing* dan *pack carburizing* sekitar 40–50 HV, dan selisih ini tetap terlihat hingga mendekati inti. Pada temperatur 825 °C, profil kekerasan *gas carburizing* kembali berada di atas *pack carburizing* dengan kenaikan sekitar 45–55 HV di permukaan. Pada temperatur 900 °C, jarak antar kurva masih konsisten; *gas carburizing* mencapai sekitar 860 HV, sedangkan *pack carburizing* berada pada kisaran 800 HV. Perbedaan ini menunjukkan bahwa *gas carburizing* memiliki kemampuan pengendalian potensial karbon yang lebih baik daripada *pack carburizing*. Dari sisi distribusi, kurva *gas carburizing* juga cenderung mempertahankan kekerasan tinggi lebih lama pada kedalaman yang sama. Hal tersebut terlihat pada kedalaman 2.700 μm , yaitu *gas carburizing* pada temperatur 900 °C masih sekitar 500 HV, sedangkan *pack carburizing* hanya sekitar 465 HV. Secara umum, profil distribusi kekerasan pada spesimen *gas carburizing* cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan *pack carburizing* pada seluruh kedalaman pengukuran hingga 2.700 μm . Hal ini mengindikasikan terbentuknya lapisan pengerasan dengan distribusi kekerasan yang lebih merata [11].

Secara teoritis, kenaikan kekerasan setelah *carburizing* terjadi karena atom karbon berdifusi dari permukaan menuju lapisan sub-surface dan menaikkan kadar karbon pada baja. Peningkatan kadar karbon menyebabkan atom karbon berdifusi dan menempati posisi interstisial pada kisi kristal besi, sehingga menimbulkan distorsi kisi yang meningkatkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi. Setelah proses *quenching*, fasa austenit yang telah diperkaya karbon bertransformasi menjadi martensit, yaitu fasa metastabil

dengan struktur body-centered tetragonal (BCT) yang memiliki kekerasan tinggi. Kombinasi distorsi kisi akibat atom karbon interstisial dan pembentukan martensit tersebut berkontribusi secara signifikan terhadap peningkatan kekerasan permukaan baja hasil proses *carburizing*. Akibatnya, permukaan material menjadi lebih keras dibandingkan inti yang kandungan karbonnya masih mendekati kondisi awal. Temperatur proses yang lebih tinggi seperti 900 °C memberikan energi aktivasi difusi yang lebih besar, sehingga karbon masuk lebih cepat dan lebih dalam [12]. Hal ini menjelaskan mengapa kurva 900 °C berada paling tinggi dan memiliki penurunan kekerasan yang lebih lambat terhadap kedalaman. *Gas carburizing* cenderung lebih unggul karena atmosfernya lebih homogen dan potensi karbon dapat dikontrol lebih stabil dibandingkan media padat pada *pack carburizing* [8], [13]. Dengan demikian, hubungan sebab-akibat pada grafik ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur dan semakin baik kontrol atmosfer proses *carburizing*, semakin besar peningkatan kekerasan permukaan.

3.2 Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDS)

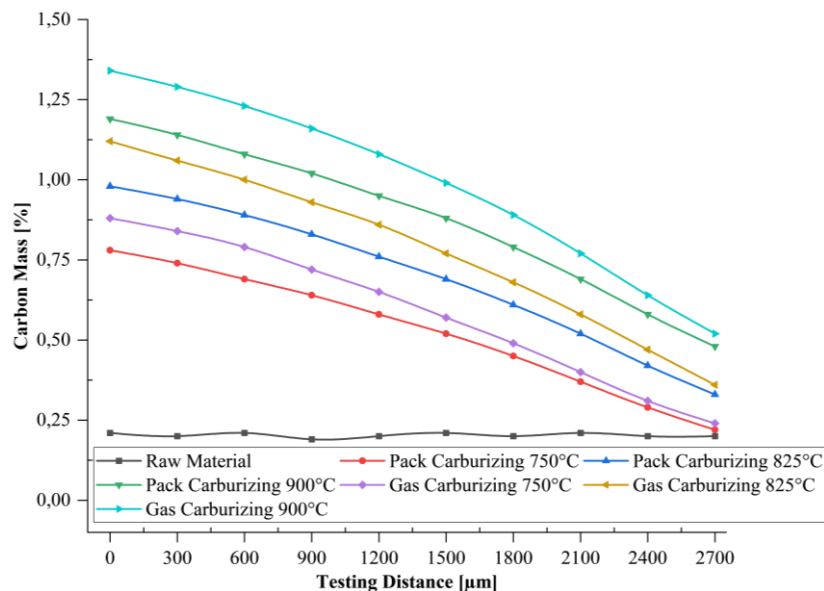


Gambar 3. Hasil pengamatan SEM: a) *raw material* (tanpa perlakuan); b) spesimen *pack carburizing* (900 °C); c) spesimen *gas carburizing* (900 °C).

Berdasarkan hasil pengamatan SEM pada Gambar 3, terlihat perubahan mikrostruktur yang signifikan antara *raw material* dan spesimen yang telah mengalami proses *carburizing*. Pada *raw material* [Gambar 3(a)], mikrostruktur didominasi oleh fasa ferit dan perlit yang merupakan karakteristik umum baja karbon rendah AISI 1018. Selain itu, ditemukan beberapa area yang terindikasi sebagai *vacancy* atau kekosongan atomik pada permukaan pengamatan. Dominasi fasa ferit dengan fraksi perlit yang relatif rendah menunjukkan bahwa material masih berada pada kondisi awal (*as-received*) dengan kandungan karbon $\pm 0,18$ wt.% sehingga belum mengalami perubahan mikrostruktur akibat proses *carburizing*. Setelah dilakukan *pack carburizing* pada temperatur 900 °C [Gambar 3(b)], mikrostruktur mengalami transformasi yang ditandai dengan munculnya fasa martensit serta peningkatan kandungan karbon pada lapisan permukaan. Struktur martensit terlihat berbentuk

jarum (*needle-like structure*) dan mulai mendominasi area pengamatan dibandingkan dengan struktur *ferrite-pearlite*. Pada spesimen *gas carburizing* pada temperatur 900 °C [Gambar 3(c)], morfologi martensit tampak lebih rapat, lebih homogen, dan tersebar lebih luas dibandingkan dengan spesimen *pack carburizing*. Karbon berdifusi melalui mekanisme interstisial dan meningkatkan kadar karbon pada permukaan sehingga, setelah proses *direct quenching*, terbentuk martensit yang lebih dominan.

Perubahan mikrostruktur tersebut terjadi akibat mekanisme difusi karbon yang berlangsung pada temperatur tinggi selama proses *carburizing*. Ketika spesimen dipanaskan hingga mencapai daerah austenit, atom-atom karbon dari media *carburizing* memperoleh energi yang cukup untuk bergerak dan berdifusi ke dalam material. Proses difusi ini umumnya memanfaatkan jalur difusi berupa batas butir (*grain boundary*) dan ruang antar kisi (*interstitial sites*) yang tersedia di dalam struktur kristal baja [8], [11], [13]. Semakin tinggi temperatur proses, semakin tinggi pula mobilitas atom karbon sehingga laju difusi menjadi lebih besar. Atom karbon yang masuk ke dalam material akan mengisi dan menempati posisi interstisial pada kisi kristal baja, sehingga konsentrasi karbon di daerah permukaan meningkat secara signifikan. Peningkatan kandungan karbon tersebut menyebabkan terbentuknya austenit berkadar karbon lebih tinggi yang kemudian bertransformasi menjadi martensit saat pendinginan cepat atau *quenching* [10], [13]. Oleh karena itu, spesimen yang telah mengalami *carburizing* menunjukkan dominasi struktur martensit serta berkurangnya fasa perlit dan ferit dibandingkan *raw material*. Kondisi ini menjelaskan mengapa *gas carburizing* menghasilkan mikrostruktur yang lebih padat dan homogen, karena suplai karbon yang lebih stabil mampu meningkatkan efektivitas difusi oleh unsur karbon secara lebih optimal dibandingkan *pack carburizing*.



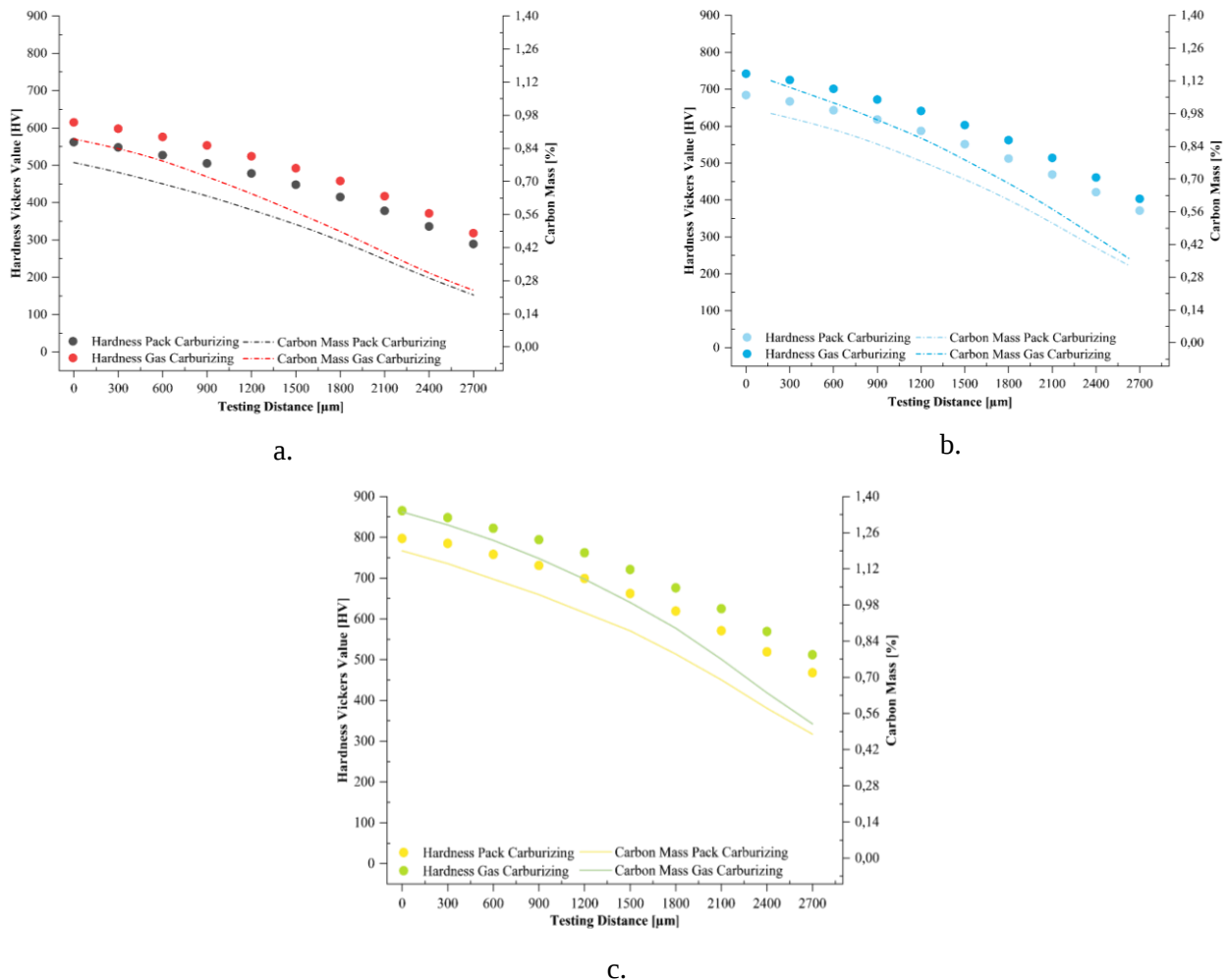
Gambar 4. Profil distribusi unsur karbon yang terdifusi dari tepi hingga inti material pada setiap variasi temperatur.

Gambar 4 menunjukkan bahwa *raw material* memiliki kadar karbon paling rendah dan cenderung stabil di seluruh kedalaman pengujian, yaitu sekitar 0,19–0,21%. Nilai ini menandakan bahwa material awal masih berada pada kondisi baja karbon rendah sebelum mengalami perlakuan *thermochemical treatment*. Setelah dilakukan *carburizing*, seluruh spesimen menunjukkan peningkatan kadar karbon yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan *raw material*. Pada permukaan, metode *pack carburizing* pada temperatur 750 °C menghasilkan kadar karbon sekitar 0,78%, sedangkan *gas carburizing* pada temperatur 750 °C mencapai sekitar 0,88%. Peningkatan yang lebih besar terlihat pada temperatur 825 °C, yaitu sekitar 0,98% untuk *pack carburizing* dan 1,12% untuk *gas carburizing*. Pada temperatur 900 °C, kadar karbon menjadi yang paling tinggi, yakni sekitar 1,19% pada *pack carburizing* dan 1,34% pada *gas carburizing*. Seiring bertambahnya kedalaman pengujian hingga 2.700 μm, seluruh kurva menunjukkan penurunan kadar karbon secara bertahap.

Jika dibandingkan pada temperatur yang sama, *gas carburizing* selalu menghasilkan kadar karbon lebih tinggi daripada *pack carburizing* pada keseluruhan kedalaman jarak pengujian. Pada temperatur 750 °C, selisih kadar karbon terlihat jelas dari permukaan, di mana *gas carburizing* berada di atas *pack carburizing* dengan perbedaan sekitar 0,10%. Pada temperatur 825 °C, pola yang sama tetap terlihat, dan *gas carburizing* mempertahankan konsentrasi karbon yang lebih tinggi hingga kedalaman pada jarak 600–1500 μm. Pada temperatur 900 °C, perbedaan profil kekerasan antara *gas carburizing* dan *pack carburizing* menjadi semakin

jelas, di mana spesimen *gas carburizing* menunjukkan nilai kekerasan tertinggi pada seluruh kedalaman pengujian. Kondisi ini dipengaruhi oleh meningkatnya koefisien difusi karbon seiring kenaikan temperatur, sehingga laju perpindahan atom karbon ke dalam matriks austenit berlangsung lebih cepat. Selain itu, atmosfer gas yang terkontrol mampu mempertahankan potensial karbon dan gradien konsentrasi karbon yang lebih stabil selama proses karburisasi dibandingkan media padat berbasis biomassa, sehingga difusi karbon berlangsung lebih merata dan menghasilkan lapisan pengerasan dengan profil kekerasan yang lebih tinggi [13]. Bahkan pada jarak 2.700 μm , *gas carburizing* 900 °C masih berada di sekitar 0,52%, sedangkan *pack carburizing* 900 °C sekitar 0,47%. Hal ini menunjukkan bahwa *gas carburizing* tidak hanya meningkatkan kadar karbon di permukaan, tetapi juga menghasilkan penetrasi karbon yang lebih dalam [10], [13]. Kurva *gas carburizing* yang lebih tinggi dan lebih panjang mengindikasikan efektivitas difusi karbon yang lebih baik. Dengan demikian, *gas carburizing* dapat dinilai lebih unggul dalam membentuk lapisan karbida dibandingkan *pack carburizing*.

3.3 Korelasi Distribusi Kekerasan dan Distribusi Karbon



Gambar 5. Korelasi antara distribusi kekerasan dengan distribusi karbon yang terdifusi: a. Temperatur 750 °C; b. Temperatur 825 °C; c. Temperatur 900 °C

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara distribusi kekerasan Vickers dan distribusi kadar karbon massa pada spesimen hasil *pack carburizing* dan *gas carburizing* pada temperatur 750 °C, 825 °C, dan 900 °C. Secara umum, seluruh kurva memperlihatkan pola yang sama, yaitu nilai kekerasan dan kadar karbon tertinggi berada pada permukaan material, kemudian menurun secara bertahap seiring bertambahnya jarak pengujian hingga 2.700 μm . Pada Gambar 5a, nilai kekerasan dan kadar karbon hasil *gas carburizing* berada di atas *pack carburizing* pada seluruh titik pengujian. Pola serupa juga terlihat pada Gambar 5b, yaitu peningkatan kadar karbon diikuti oleh peningkatan nilai kekerasan dibandingkan dengan temperatur sebelumnya. Kondisi paling menonjol ditunjukkan pada Gambar 5c karena distribusi karbon dan kekerasan mencapai nilai tertinggi di antara seluruh variasi temperatur. Selain itu, penurunan kedua parameter terhadap kedalaman berlangsung lebih lambat

dibandingkan dengan temperatur 750 °C dan 825 °C. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan temperatur tidak hanya meningkatkan kadar karbon pada permukaan, tetapi juga memperbesar kedalaman difusi karbon ke dalam material. Dengan demikian, distribusi kekerasan memiliki kecenderungan mengikuti distribusi kadar karbon pada setiap kondisi perlakuan.

Jika dibandingkan berdasarkan metodenya, *gas carburizing* menunjukkan performa yang lebih baik dalam meningkatkan kadar karbon sekaligus kekerasan permukaan dibandingkan dengan *pack carburizing*. Hal ini terlihat dari seluruh kurva *gas carburizing* yang selalu berada di atas kurva *pack carburizing* pada setiap variasi temperatur dan kedalaman pengujian. Peningkatan kadar karbon pada spesimen *gas carburizing* diikuti oleh peningkatan nilai kekerasan, sehingga menunjukkan bahwa proses difusi karbon berlangsung lebih efektif. Perbedaan tersebut semakin nyata pada temperatur 900 °C, yaitu *gas carburizing* menghasilkan kadar karbon dan kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan *pack carburizing*. Selain memberikan nilai maksimum yang lebih besar di permukaan, *gas carburizing* juga mampu mempertahankan distribusi karbon dan kekerasan hingga kedalaman yang lebih jauh. Sebaliknya, pada spesimen *pack carburizing*, penurunan kadar karbon dan kekerasan terjadi seiring bertambahnya kedalaman pengujian. Kesamaan pola penurunan antara distribusi karbon dan distribusi kekerasan menunjukkan bahwa kedua parameter tersebut saling berkaitan dan memiliki hubungan yang kuat [12]. Dengan demikian, semakin besar jumlah karbon yang berhasil berdifusi ke dalam lapisan permukaan, semakin tinggi pula kekerasan yang terbentuk. *Gas carburizing* terbukti lebih efektif dalam menghasilkan lapisan pengerasan (*case hardening*) dibandingkan dengan *pack carburizing*.

Hubungan antara distribusi karbon dan distribusi kekerasan dijelaskan melalui mekanisme difusi atom karbon selama proses *thermochemical treatment*. Pada temperatur 750 °C, material masih berada pada daerah interkritikal ($\alpha + \gamma$), sehingga proses austenitisasi belum berlangsung secara sempurna. Keberadaan fasa ferit yang masih dominan membatasi kelarutan dan laju difusi karbon, sehingga jumlah karbon yang dapat berdifusi ke dalam material relatif lebih rendah. Akibatnya, setelah proses *quenching*, fraksi martensit yang terbentuk juga lebih terbatas sehingga peningkatan kekerasan permukaan belum optimal. Sebaliknya, pada temperatur 825 °C dan 900 °C, baja AISI 1018 telah memasuki daerah austenit penuh (γ) berdasarkan diagram fasa Fe–C, sehingga kelarutan karbon dan koefisien difusi meningkat secara signifikan. Kondisi ini memungkinkan atom karbon berdifusi lebih dalam ke dalam matriks austenit dan, setelah proses *quenching*, menghasilkan pembentukan martensit dengan fraksi yang lebih besar. Oleh karena itu, spesimen yang diproses pada temperatur 825 °C dan terutama 900 °C menunjukkan peningkatan distribusi karbon serta profil kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan spesimen yang diproses pada temperatur 750 °C. Atom karbon kemudian berdifusi dari media *carburizing* menuju permukaan material akibat adanya perbedaan konsentrasi karbon antara media dan substrat baja. Semakin tinggi temperatur proses, semakin besar koefisien difusi karbon sehingga atom karbon mampu menembus lapisan material dengan lebih cepat dan lebih dalam. Peningkatan kadar karbon pada lapisan permukaan menyebabkan terbentuknya larutan padat interstisial yang menghambat pergerakan dislokasi, sehingga kekerasan material meningkat secara signifikan. Pada saat pendinginan, daerah yang memiliki kandungan karbon lebih tinggi akan lebih mudah mengalami transformasi menjadi martensit, sehingga menghasilkan lapisan permukaan yang lebih keras dibandingkan bagian inti. *Gas carburizing* menghasilkan korelasi yang lebih baik karena atmosfer karbonnya lebih homogen dan potensi karbon dapat dikendalikan secara lebih stabil, sehingga difusi karbon berlangsung lebih efektif dibandingkan *pack carburizing* [10], [11], [13].

4 Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa *gas carburizing* merupakan metode yang lebih efektif daripada *pack carburizing* dalam meningkatkan karakteristik lapisan pengerasan baja AISI 1018, yang ditunjukkan oleh nilai kekerasan permukaan yang lebih tinggi, kedalaman difusi karbon yang lebih besar, serta pembentukan mikrostruktur yang lebih seragam pada seluruh rentang temperatur perlakuan. Kinerja tersebut dipengaruhi oleh atmosfer karbon yang homogen dan pengendalian potensi karbon yang lebih presisi sehingga mempercepat proses difusi karbon ke dalam matriks fasa austenit. Peningkatan temperatur *carburizing* menunjukkan hubungan yang konsisten dengan meningkatnya kadar karbon pada lapisan permukaan serta profil distribusi kekerasan yang lebih tinggi. Sejalan dengan hasil tersebut, pengamatan menggunakan SEM memperlihatkan indikasi pembentukan martensit yang semakin dominan pada spesimen yang diproses pada temperatur 825 °C dan terutama 900 °C. Korelasi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan temperatur mempercepat difusi karbon ke dalam matriks austenit, sehingga setelah proses *quenching* terbentuk lapisan pengerasan dengan mikrostruktur

yang lebih didominasi oleh martensit dan memiliki kekerasan permukaan yang lebih tinggi. Pengamatan SEM menunjukkan morfologi martensit yang tampak lebih rapat dan lebih seragam pada spesimen *gas carburizing*, terutama pada temperatur 900 °C. Secara keseluruhan, penelitian ini mengonfirmasi bahwa peningkatan konsentrasi karbon berbanding lurus dengan evolusi mikrostruktur dan distribusi kekerasan material. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa *gas carburizing* memiliki potensi yang lebih baik untuk aplikasi pengerasan permukaan baja karbon rendah yang memprioritaskan peningkatan kekerasan, distribusi karbon, dan pembentukan lapisan hasil difusi. Meskipun demikian, validasi lebih lanjut melalui pengujian ketahanan aus diperlukan untuk mengonfirmasi kinerjanya pada aplikasi komponen alat dan mesin pertanian.

5 Referensi

- [1] Wang, Y., Li, D., Nie, C., Gong, P., Yang, J., Hu, Z., Li, B., & M. (2023). Research Progress on the Wear Resistance of Key Components in Agricultural Machinery. *Materials*, 16. <https://doi.org/10.3390/ma16247646>
- [2] Zhang, H., Tang, Z., Gu, X., & Zhang, B. (2025). Understanding the Lubrication and Wear Behavior of Agricultural Components Under Rice Interaction: A Multi-Scale Modeling Study. *Lubricants*. <https://doi.org/10.3390/lubricants13090388>
- [3] Casaroli, A., Boniardi, M., Conrado, E., Gorla, C., Crispino, C., Gerosa, R., & Rivolta, B. (2024). Mechanical and metallurgical characterization of contact fatigue mechanisms in ADI spur gears. *Engineering Failure Analysis*, 165, 108775. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108775>
- [4] Ameen, N. H. (2025). Advances in corrosion and abrasive wear resistance of agricultural machinery. *Journal of Kirkuk University for Agricultural Sciences*, 16(1). <https://doi.org/10.58928/ku25.16128>
- [5] Okiy, S. (2024). Evaluation of Welding Parameters on Tensile Strength and Hardness of AISI 1018 Low Carbon Steel Plate Welded Joints. *Saudi Journal of Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.36348/sjet.2024.v09i12.001>
- [6] Adigun, O., Bodude, M. A., Adigun, A. R., Obadele, B. A., Adebayo, A., Umunakwe, R., Kolawole, F. O., & Borisade, S. G. (2021). Effects of Austempering on the Microstructure, Corrosion and Mechanical Properties of AISI 1018 Steel. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-861196/v1>
- [7] Boumediri, H., Touati, S., Debbah, Y., Selami, S., Chitour, M., Khelifa, M., Kahaleras, M. S., Boumediri, K., Zemmouri, A., Athmani, M., & Fernandes, F. (2024). Effect of carburizing time treatment on microstructure and mechanical properties of low alloy gear steels. *Materials Research Express*, 11. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad5cd6>
- [8] Ambiger, K. D., N., M. B. R., Hiremath, P., C., S. R., Kowshik, S., Naik, N., Jain, P., & Arunkumar, H. (2025). Influence of gas carburization on the microstructure, mechanical properties, and alloying elements behaviour in plain and alloyed low carbon steels. *Materials Research Express*, 12. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/adc9fe>
- [9] Adeoti, M. O., Jamiru, T., Adegbola, T., & Beneke, L. W. (2025). Suitability Assessment of Organic Carbon Additives in the Carburization of Low Carbon Steel (AISI 1020) for Engineering Applications. *Science, Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.54327/set2025/v5.i2.277>
- [10] Guo, J., Deng, X., Wang, H., Zhou, L.-Y., Xu, Y., & Ju, D.-H. (2021). Modeling and Simulation of Vacuum Low Pressure Carburizing Process in Gear Steel. *Coatings*. <https://doi.org/10.3390/coatings11081003>
- [11] Ballem, M., Aldarwish, M., Aljuroushi, A. S., Shaka, A. M., & Abdulbakee, A. M. (2023). Effect of Carburizing Temperature and Post Carburizing Treatments on Microhardness and Microstructural Evolution of Carburized Low-Carbon Steel. *Journal of Pure & Applied Sciences*. <https://doi.org/10.51984/jopas.v22i2.2788>
- [12] Arifandi, R., & Pohan, G. A. (2021). Pengaruh Media Arang Kayu Bakau Mangrove Dan Arang Kayu Asam Pada Proses Perlakuan Carburizing Terhadap Sifat Mekanik Baja Karbon ST-37. *Jurnal Flywheel*, 12(2), 30-37. <https://doi.org/10.36040/flywheel.v12i2.4280>
- [13] Audrey, R. E., Setyarini, P. H., Sugiarto, S., & Sholikin, A. (2025). 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*, 6(2), 220-235. <https://doi.org/10.21776/MECHTA.2025.006.02.6>