

ANALISA SIFAT MEKANIK PROSES PACK CARBURIZING AISI 4340 DENGAN TEMPERATUR KRISTALISASI 725°C MENGGUNAKAN KARBON TANDAN KELAPA

Sheliona Pratiwi^{1,2*}, Abdul Khair Junaidi³, Weriono⁴ dan Ibrahim Ahmad Rambe⁵

¹ Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru

Jl. Dirgantara No.4, Kel, Sidomulyo Tim., Kec. Marpoyan Damai, Kota Pekanbaru, Riau 28125.

² Ilmu Lingkungan, Universitas Riau

Jl. Kampus Bina Widya Km 12,5 Simpang Baru Kota Pekanbaru, Riau 28293.

^{3,4,5} Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru

Jl. Dirgantara No.4, Kel, Sidomulyo Tim., Kec. Marpoyan Damai, Kota Pekanbaru, Riau 28125.

*Email: sheliona.pratiwi@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini menganalisis sifat mekanik baja AISI 4340 setelah proses pack carburizing menggunakan karbon dari tandan kelapa pada temperatur kristalisasi 725°C. Metode carburizing yang digunakan dengan menggunakan pack yang terbuat dari stainless steel yang ditutup rapat. Pada pack terdapat carbon tandan kelapa, spesimen uji dan katalis abu kerang sebanyak 10% sebagai katalis. Tujuan utama adalah mengetahui perubahan kekerasan permukaan, kekuatan impact, kekuatan tarik dan struktur mikro setelah karburisasi, serta pengaruh serbuk tandan kelapa sebagai media karbon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebelum carburizing, baja AISI 4340 memiliki kekerasan permukaan 78.9 HRC, kekuatan impact 129.56 Joule, kekuatan tarik 948.8 Mpa dan struktur mikro terdiri dari perlite dan ferrite. Setelah carburizing dengan media karbon tandan kelapa dan katalis abu cangkang kerang 10%, kekerasan permukaan meningkat menjadi 94.5 HRC, kekuatan impact menjadi 175.2 Joule, kekuatan tarik menjadi 1,012.9 Mpa, patahan tetap berbentuk cup and cone menunjukkan sifat mekanik ulet dan struktur mikro terbentuk perlite, ferrite serta banit. Kesimpulannya, penggunaan serbuk karbon tandan kelapa dalam proses pack carburizing meningkatkan sifat mekanik baja AISI 4340.

Kata kunci: pack carburizing, AISI 4340, karbon tandan kelapa, temperatur

1. PENDAHULUAN

Industri modern sangat bergantung pada material logam untuk berbagai aplikasi, mulai dari konstruksi mesin (Purnama et al., 2016), otomotif, penerbangan, hingga elektronika (Sudarmono et al., 2023). Dalam era globalisasi dan persaingan ketat, terus munculnya tuntutan untuk pengembangan material logam yang lebih unggul baik dari segi kekuatan, ketahanan terhadap korosi, keuletan, maupun sifat-sifat lainnya (Setiawan et al., 2021). Seiring dengan itu, pemahaman mendalam tentang struktur mikro dan sifat mekanik material logam menjadi semakin penting (Suseno et al., 2019).

Baja adalah logam yang paling banyak digunakan dalam bidang teknik, seperti dalam bentuk lembaran, pelat, pipa batang, profil, dan sebagainya (Mahardika & Hidayat, 2021). Baja adalah paduan besi, karbon, dan beberapa unsur lainnya, dengan karbon yang paling penting karena memiliki kemampuan untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan logam. Baja paduan rendah, baja paduan sedang, dan baja paduan tinggi adalah jenis baja yang berbeda (Napitupulu et al., 2023).

Baja karbon AISI 4340 adalah salah satu jenis baja paduan menengah yang memiliki kekuatan dan kekerasan yang baik serta ketahanan yang tinggi terhadap aus dan tekanan. Karena sifat-sifatnya yang unggul, baja ini sering digunakan dalam aplikasi mesin, termasuk roda gigi, poros, dan komponen mesin lainnya, di mana kekuatan dan ketahanan terhadap keausan menjadi hal utama (Arifin, 2016; Masoli et al., 2021).

Salah satu metode yang umum digunakan untuk meningkatkan kekerasan permukaan baja adalah melalui proses *pack carburizing* (karburisasi/pengarbonan). Karburisasi adalah proses perlakuan panas di mana karbon ditransfer ke permukaan baja untuk meningkatkan kadar karbon pada lapisan permukaan baja sehingga menghasilkan baja dengan permukaan keras. Proses ini dilakukan dengan memanaskan spesimen pada suhu austenitnya dalam ruang yang mengandung serbuk karbon (Bethony, 2017). Proses ini biasanya diikuti dengan perlakuan pendinginan cepat, juga

dikenal sebagai *quenching*, untuk meningkatkan kekerasan permukaan, yang membuatnya lebih tahan aus ((Ismail et al., 2022; Mujiyono & Sumowidagdo, 2008).

Proses *pack carburizing* dalam aplikasi baja karbon telah dilakukan dengan berbagai material seperti sekam padi dan tempurung kelapa (Helanianto & Rahmadi, 2023; Nurharyanto et al., 2019), limbah cangkang kerang kepah (Yuhardin et al., 2024), batok biji pala (Waas, 2020), kayu leban (Mazuli & Haripriadi, 2020), kayu belian dan kayu akasia (Anhar, 2019), kayu bakau (Kadriadi et al., 2021), dan sebagainya.

Namun, meskipun karburisasi telah digunakan secara luas dalam industri, masih ada beberapa aspek yang perlu diteliti lebih lanjut, terutama dalam konteks aplikasinya pada baja karbon AISI 4340. Penelitian penggunaan Barium Karbonat (BaCO_3) dan Kalsium Karbonat (CaCO_3) sebagai katalisator pada proses *pack carburizing* telah dilakukan oleh (Masoli et al., 2021), didapat nilai kekerasan rata-rata tertinggi pada spesimen menggunakan penambahan katalis BaCO_3 dan media *quenching* air sebesar 663.7 HV. Nilai kekuatan impak menurun pada spesimen *raw material* dengan nilai 0.60 J/mm² menggunakan katalis CaCO_3 dan media *quenching* oli.

Menurut (Azmy et al., 2022) baja AISI 4340 yang dikarburisasi pak memiliki struktur mikro yang menarik yang ditandai oleh adanya fase ferrite dan karbida (Fe_3C) yang tinggi. Transformasi struktur mikro dari baja AISI 4340 yang dikarburisasi pak mempengaruhi peningkatan nilai kekerasan tinggi (325,4 HV) dan tahan aus yang tinggi dibandingkan dengan baja dasar AISI 4340. Dengan demikian, baja AISI 4340 yang dikarburisasi pak memiliki kemampuan yang tangguh untuk mencapai umur pakai yang panjang selama aplikasi mekanik dan teknik.

Penggunaan arang yang berasal dari biomassa diteliti oleh (Sujita, 2016) dengan menggunakan tongkol jagung dan kerang mutiara sebagai media *carburizer*. Proses *Pack Carburizing* yang dilakukan dengan persentase 5, 10, 20 dan 25 (% berat). Selanjutnya spesimen mengalami perlakuan panas di temperatur 910°C, 930°C, dan 950°C dengan penahanan waktu 90 dan 150 menit. Hasil pengujian mendapatkan kekerasan permukaan terbaik pada persentase 20% serbuk cangkang dengan nilai 262.47 HV.

Tanaman kelapa (*Cocos nucifera*. L) tumbuh subur di daerah Tropis. Indonesia menempati urutan pertama sebagai negara produsen kelapa dunia dengan rata-rata produksi 17,05 juta ton kelapa atau berkontribusi 27,15%. Pada tahun 2021, Riau menjadi provinsi dengan produksi kelapa terbesar di Indonesia. Enam kabupaten menghasilkan kelapa paling banyak, dengan Kabupaten Indragiri Hilir menyumbang 77,31% dari produksi total. Kabupaten penghasil kelapa lainnya adalah Kabupaten Pelalawan (10,48%), Kabupaten Kepulauan Meranti (8,58%), Kabupaten Bengkalis (1,23%), Kabupaten Rokan Hilir (1,04%), dan Kabupaten Siak (0,43%). Sisanya sebesar 0,93% merupakan kontribusi dari kabupaten lainnya (Zikria, 2023). Produksi kelapa yang lebih tinggi pasti berdampak pada jumlah limbah yang belum termanfaatkan yaitu tandan kelapa (Muhajir et al., 2021). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa sifat mekanik proses *pack carburizing* aisi 4340 dengan temperatur kristalisasi 725°C menggunakan karbon tandan kelapa, mengingat sumber bahan baku dari tandan kelapa yang cukup melimpah khususnya di daerah tropis ini.

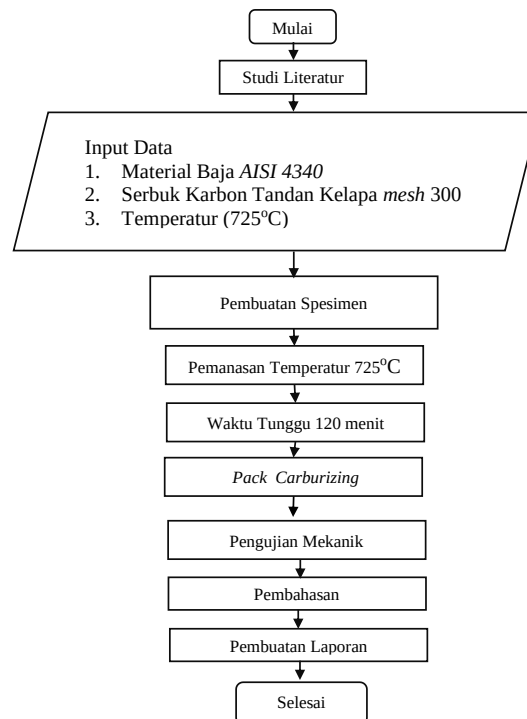
2. METODOLOGI

2.1. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang akan digunakan pada penelitian karburisasi material AISI 4340 ini adalah sebagai berikut : wadah *pack carburizing*, *furnace*, alat uji kekerasan *Rockwell C*, tang jepit, ayakan mesh 300, alu, mortar (penumbuk) dan kikir. Bahan yang digunakan meliputi baja AISI 4340, karbon (tandan kelapa) dan katalis (abu cangkang kerang).

2.2. Diagram Alir

Metode penelitian ini dimulai dengan identifikasi masalah yang dilanjutkan dengan studi literatur untuk memahami teori dan penelitian terkait. Selanjutnya, peneliti merumuskan hipotesis dan memilih metode penelitian yang sesuai. Data dikumpulkan melalui teknik tertentu, kemudian dianalisis untuk menjawab pertanyaan penelitian serta menguji hipotesis. Hasil analisis diinterpretasikan untuk menarik kesimpulan dan memberikan saran. Akhirnya, penelitian didokumentasikan dalam laporan atau dipublikasikan untuk menyebarkan hasilnya kepada pihak terkait.



Gambar 1. Flowchart Penelitian

Proses pembuatan spesimen dan media karburisasi dimulai dengan pembuatan spesimen pengujian tarik yang mengikuti pedoman standar uji tarik ASTM E8, dengan satu spesimen dipotong dan dibubut agar sesuai kriteria uji tarik. Untuk pengujian impact, spesimen dibuat berdasarkan standar uji Charpy dengan gerinda tangan untuk pemotongan dan alat kikir untuk pembentukan takikan. Dimensi spesimen disesuaikan dengan standar ASTM E32 tipe V, yaitu 54x10x10 mm, yang dibentuk menggunakan mesin milling dan takikan dibuat dengan alat kikir. Spesimen untuk pengujian kekerasan dibuat dengan dimensi diameter 19 mm dan tebal 20 mm. Sementara itu, spesimen untuk pengamatan struktur mikro juga memiliki dimensi yang sama, yaitu diameter 19 mm dan tebal 20 mm. Media karbonisasi dibuat dengan tandan kelapa yang telah dikeringkan, kemudian dikarbonisasi dalam furnace pada suhu 400°C selama 2 jam. Setelah itu, bahan tersebut dihaluskan menggunakan mortar dan alu, lalu diayak hingga ukuran 300 mesh.

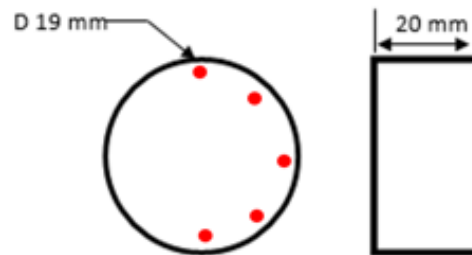
Pada proses pemanasan dan pack carburizing, kotak sementasi dibuat dari lembaran plat baja yang dipotong dan dilas sehingga membentuk persegi sesuai jumlah spesimen yang akan dikarburisasi. Kotak ini dirancang agar tahan terhadap suhu 725°C dan rapat untuk mencegah kebocoran. Media karbon dicampur dengan katalis, yaitu serbuk kerang, sebanyak 10% dari berat total. Setelah pencampuran serbuk karbon tandan kelapa sebesar 135 gram dengan katalis 15 gram, campuran diaduk hingga homogen. Baja AISI 4340 dimasukkan ke dalam kotak bersama media karbon, kemudian kotak tersebut ditutup rapat dan dipanaskan pada suhu 725°C selama 120 menit. Setelah pemanasan, spesimen didinginkan pada suhu ruang hingga mencapai temperatur normal.

Setelah karburisasi dan quenching, pengujian sifat mekanik dilakukan, meliputi pengujian kekerasan permukaan dengan metode Rockwell C, pengujian tarik dengan standar ASTM E8, serta pengujian impact menggunakan metode Charpy ASTM E32. Pengujian kekerasan permukaan dilakukan pada lima titik spesimen menggunakan metode Rockwell C, dan hasilnya dibandingkan dengan nilai kekerasan bahan sebelum karburisasi. Pengujian impact dilakukan dengan menaikkan pendulum hingga sudut 120°, menempatkan spesimen pada anvil mesin uji, serta mengamati sudut patahan dan menghitung nilai impact. Pengujian tarik mengikuti standar ASTM E8, menghasilkan kurva gaya versus pertambahan panjang yang dikonversi menjadi kurva tegangan versus regangan untuk dibandingkan dengan bahan sebelum karburisasi. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop triokular pada permukaan spesimen, baik sebelum maupun sesudah proses karburisasi karbon tandan kelapa.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Uji Kekerasan *Rockwell C*

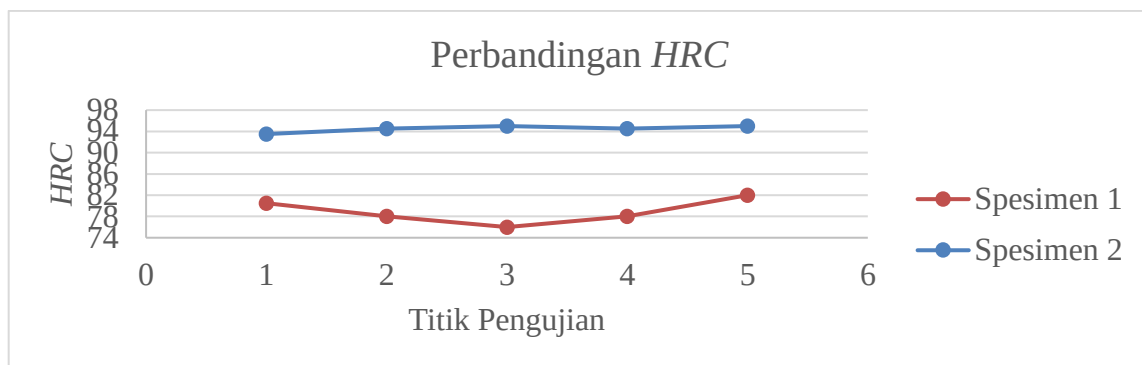
Adapun hasil uji kekerasan pada AISI 4340 menggunakan metode *Rockwell C* dengan masing-masing spesimen dilakukan 5 titik pengamatan.



Gambar 2. Titik Pengamatan

Tabel 1. Nilai Kekerasan Spesimen 1 dan Spesimen 2

Spesimen	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Rata-rata
Spesimen 1	80.5	78	76	78	82	78.9
Spesimen 2	93.5	94.5	95	94.5	95	94.5



Gambar 3. Grafik Perbandingan HRC Spesimen 1 dan 2

Berdasarkan grafik pada gambar 3. menunjukkan proses *pack carburizing* dengan menggunakan media serbuk karbon tandan kelapa dan katalis serbuk cangkang kerang 10% menghasilkan peningkatan nilai kekerasan permukaan rata rata 15.6 HRC.

3.2. Pengujian Impact *Charpy*

Adapun hasil pengujian impact *charpy* pada spesimen 1 baja AISI 4340 tanpa perlakuan dan spesimen 2 baja AISI 4340 yang sudah dilakukan *pack carburizing* dengan menggunakan media serbuk tandan kelapa dengan katalis serbuk cangkang kerang sebanyak 10% adalah sebagai berikut:

Keterangan mesin uji *impact* adalah sebagai berikut :

Masa Pendulum : 20 kg
 Panjang lengan : 80cm (0.8m)
 Sudut Alpha : 120°

Maka dari data keterangan mesin uji *impact* diatas didapat harga energi *impact* yang diberikan dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut:

Mencari perubahan ketinggian (h) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$h = L \times (1 - \cos \theta)$$

$$\theta_{rad} = 120^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ} = \frac{2\pi}{3}$$

$$h = 0.8m \times (1 - \cos \frac{2\pi}{3}) = 1.2m$$

Menghitung energi potensial gravitasi (PE) dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$PE = m \times g \times h$$

Dimana :

m = 20 kg (masa pendulum)

g = 9.81m/s² (percepatan gravitasi)

h = 1.2m (ketinggian pendulum awal)

$$PE = 20kg \times 9.81m/s^2 \times 1.2m = 235.44 \text{ Joule}$$

Berdasarkan energi impact 235.44 Joule yang diberikan pendulum maka didapat hasil sudut beta ditampilkan pada tabel 2. dibawah ini:

Tabel 2. Data Hasil Uji Impact

Spesimen	Sudut Alpha	Sudut Beta	Patahan
Serbuk Karbon Tandan Kelapa	120	52	Cup and cone
Normal	120	71	Cup and cone

3.2.1. Spesimen 1

Spesimen 1 adalah spesimen tidak dilakukan *pack carburizing* dengan media serbuk karbon tandan kelapa dan katalis serbuk cangkang kerang dengan persentase 10% katalis. Hasil pengujian *impact* didapat sudut beta 72° dan jenis patahan *cup and cone*. Dari hasil sudut beta dapat dicari harga *impact* dari spesimen 2 dengan persamaan dibawah ini:

Mencari perubahan ketinggian (h2) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$h2 = L \times (1 - \cos \theta)$$

$$\theta_{rad} = 72^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ} = 1.239 \text{ radian}$$

$$h2 = 0.8m \times (1 - \cos(1.239 \text{ radian})) = 0.5388m$$

Menghitung perubahan energi potensial gravitasi (ΔPE) dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$\Delta PE = m \times g \times (h1 - h2)$$

Dimana :

m = 20 kg (masa pendulum)

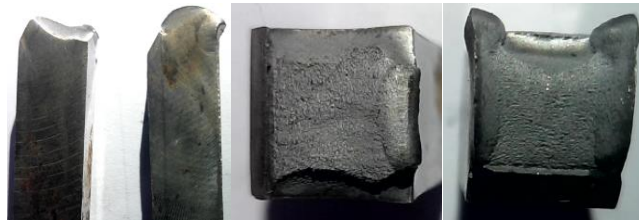
g = 9.81m/s² (percepatan gravitasi)

h1 = 1.2m (ketinggian pendulum awal)

h2 = 0.5388m (ketinggian pendulum akhir)

$$PE = 20kg \times 9.81m/s^2 \times (1.2m - 0.5388m) = 129.56 \text{ Joule}$$

Patahan yang terjadi pada spesimen 1 dapat dilihat pada gambar 4. dibawah ini yang menunjukkan patahan jenis *cup and cone*.



Gambar 4. Patahan Spesimen 1

Pada gambar 4. patahan spesimen uji 1 menunjukkan bentuk patahan *cup and cone*, bentuk patahan yang sering terlihat pada material logam yang mengalami patah ulet (*ductile fracture*). Patahan ini terjadi ketika material mengalami deformasi plastik sebelum patah. Penampilan fisik patahan ini ditandai dengan patahan berbentuk cekung (mirip cangkir) disatu sisi dan *cone* di sisi lainnya yang berbentuk kerucut. Jenis patahan "*cup and cone*" menunjukkan karakteristik patahan yang ulet, di mana material mampu mengalami deformasi signifikan sebelum akhirnya patah. Hal ini menunjukkan bahwa material tersebut memiliki ketangguhan yang tinggi dan mampu menyerap energi dalam jumlah besar sebelum mengalami kegagalan.

3.2.2. Spesimen 2

Spesimen 2 adalah spesimen yang telah dilakukan *pack carburizing* dengan media serbuk karbon tandan kelapa dan katalis serbuk cangkang kerang dengan persentase 10% katalis. Hasil pengujian *impact* didapat sudut beta 52° dan jenis patahan *cup and cone*. Dari hasil sudut beta dapat dicari harga *impact* dari spesimen 2 dengan persamaan dibawah ini:

Mencari perubahan ketinggian (h_2) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$h_2 = L \times (1 - \cos \theta)$$

$$\theta_{rad} = 52^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ} = 0.907 \text{ radian}$$

$$h_2 = 0.8m \times (1 - \cos(0.97\text{radian})) = 0.3074m$$

Menghitung perubahan energi potensial gravitasi (ΔPE) dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$\Delta PE = m \times g \times (h_1 - h_2)$$

Dimana :

$m = 20 \text{ kg}$ (masa pendulum)

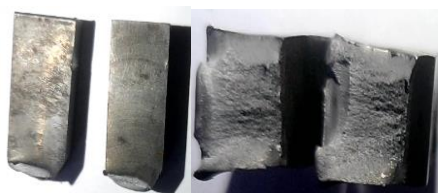
$g = 9.81 \text{ m/s}^2$ (percepatan gravitasi)

$h_1 = 1.2 \text{ m}$ (ketinggian pendulum awal)

$h_2 = 0.3074 \text{ m}$ (ketinggian pendulum akhir)

$$PE = 20 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times (1.2 \text{ m} - 0.3074 \text{ m}) = 175.2 \text{ Joule}$$

Patahan yang terjadi pada spesimen 1 dapat dilihat pada gambar 5. dibawah ini yang menunjukkan patahan jenis *cup and cone*.



Gambar 5. Patahan Spesimen 2

Pada gambar 5. patahan spesimen uji 2 menunjukkan bentuk patahan *cup and cone* sama seperti spesimen 1.

Tabel 3. Data Hasil Uji impact

Spesimen	Sudut Alpha	Sudut Beta	h1 [m]	h2 [m]	Patahan	Harga impact (joule)
Normal	120	71	1.2	0.5388	Cup and cone	129.56
Serbuk Karbon Tandan Kelapa	120	52	1.2	0.307	Cup and cone	175.2

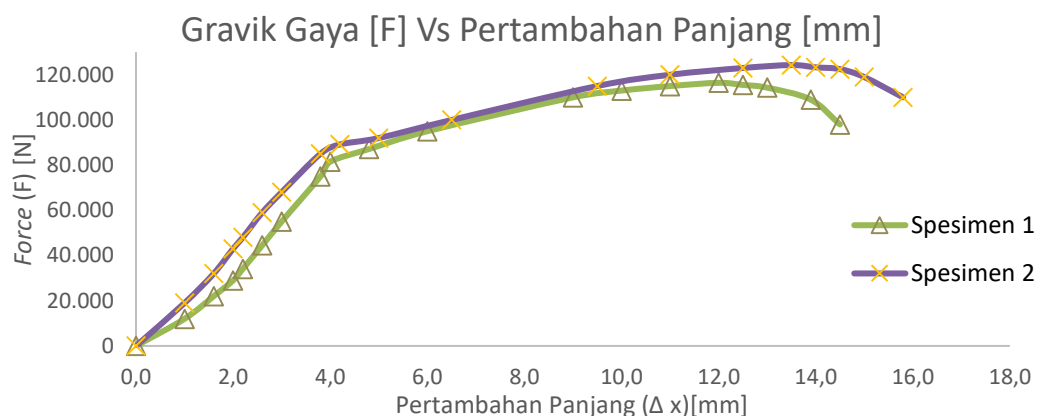
Berdasarkan tabel 3. data hasil uji *impact* dapat dilihat peningkatan harga *impact* dari spesimen baja AISI 4340 setelah dilakukan proses *pack carburizing* dengan media karbon tandan kelapa dengan katalis serbuk cangkang kerang 10%. Hal ini dibuktikan nilai harga *impact* spesimen 2 > spesimen 1 (175.2joule>129.56joule).

3.3. Pengujian Tarik

Adapun hasil pengujian tarik menggunakan standar ASTM E8 pada spesimen 1 baja AISI 4340 tanpa perlakuan *pack carburizing* dan spesimen 2 baja AISI 4340 yang sudah dilakukan *pack carburizing* dengan menggunakan media karbon tandan kelapa dengan katalis serbuk cangkang kerang sebanyak 10% tanpa perlakuan ditampilkan pada tabel 4.

Tabel 4. Data Hasil Uji Tarik

No	Kekerasan Rata-rata [HRC]	Impact [Joule]	Stress		Strain	
			Yield [MPa]	Ultimate [MPa]	Yield [%]	Ultimate [%]
1	78.9	129.56	664.3	948.8	2.74	8.22
2	94.5	175.2	726.4	1012.9	2.88	9.25

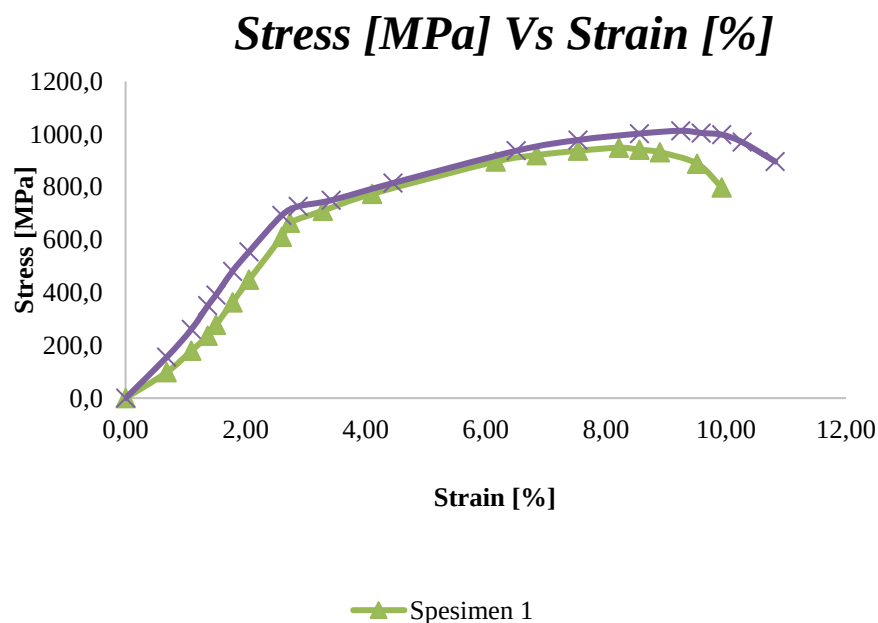


Gambar 6. Grafik Force Vs Pertambahan Panjang

Grafik gaya (F) terhadap pertambahan panjang (Δx) menunjukkan hubungan linier pada awal pengujian, di mana gaya meningkat seiring bertambahnya panjang hingga mencapai puncak maksimal sekitar 120.000 N. Spesimen 1 dan Spesimen 2 menunjukkan pola respons mekanik yang hampir serupa, dengan perbedaan kecil pada segmen puncak dan penurunan gaya. Spesimen 1 sedikit lebih cepat mencapai puncak gaya maksimum dibandingkan Spesimen 2, yang terlihat dari pergeseran kurva di bagian akhir grafik. Setelah mencapai puncak, gaya pada kedua spesimen menurun, menunjukkan terjadinya deformasi plastis hingga patah. Performa mekanik kedua spesimen dapat dianggap konsisten, dengan perbedaan yang kemungkinan disebabkan oleh variasi

mikrostruktur atau ketidaksesuaian kecil dalam proses pengujian. Hal ini mengindikasikan bahwa material memiliki sifat tarik yang seragam, dengan kapasitas deformasi elastis dan plastis yang baik.

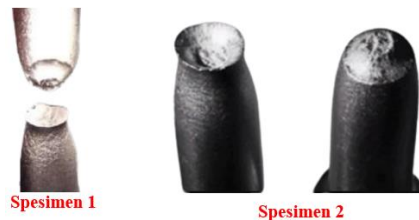
Berdasarkan Gambar 6, grafik force vs pertambahan panjang menunjukkan beban maksimum yang diterima oleh Spesimen 1 sebesar 116.433,214 N dan Spesimen 2 sebesar 124.300,033 N. Pada saat yield point, Spesimen 1 menerima gaya sebesar 81.521,021 N, sedangkan Spesimen 2 menerima gaya sebesar 89.144,104 N. Pertambahan panjang maksimum yang terjadi pada Spesimen 1 adalah 14,5 mm, sementara pada Spesimen 2 mencapai 15,8 mm. Selanjutnya, kurva force vs pertambahan panjang tersebut dikonversi menjadi kurva stress vs strain. Dimensi spesimen diketahui memiliki diameter (D) 12,5 mm dan panjang awal (L_0) 146 mm. Beban maksimum (FU) pada Spesimen 1 adalah 116.433 N dan pada Spesimen 2 adalah 124.300 N, dengan pertambahan panjang (ΔL) masing-masing sebesar 12 mm untuk Spesimen 1 dan 13,5 mm untuk Spesimen 2. Luas permukaan penampang spesimen dihitung menggunakan persamaan $A = \pi \times D^2 / 4$, menghasilkan luas sebesar 122,72 mm². Setelah luas permukaan diketahui, tegangan maksimum (σ) pada setiap spesimen dihitung menggunakan persamaan $\sigma = F / A$. Tegangan maksimum pada Spesimen 1 (σ_1) adalah 948,8 MPa, sedangkan pada Spesimen 2 (σ_2) adalah 1012,9 MPa. Regangan (ϵ) dihitung dengan persamaan $\epsilon = \Delta L / L_0 \times 100\%$, menghasilkan regangan sebesar 8,22% untuk Spesimen 1 dan 9,25% untuk Spesimen 2. Analisis ini menunjukkan bahwa Spesimen 2 memiliki nilai tegangan dan regangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan Spesimen 1.



Gambar 7. Grafik Stress Vs Strain

Berdasarkan gambar 7. grafik *stress vs strain* yang terjadi pada spesimen 1 dan spesimen 2 *yield point* spesimen 1 berada pada (664.3MPa) dan spesimen 2 (726.4MPa) sedangkan *ultimate stress* yang terjadi pada spesimen 1 (948.8MPa) dan pada spesimen 2 (1012.9MPa). hal ini membuktikan proses *pack carburizing* yang dilakukan pada spesimen 2 material AISI 4340 dengan karbon serat kelapa dan katalis cangkang kerrang 10% dapat meningkatkan nilai kekuatan tarik dari bahan. Grafik pada gambar 7 menunjukkan hubungan antara tegangan (stress) dan regangan (strain) pada dua spesimen. Spesimen 1 dan Spesimen 2 menunjukkan pola kurva yang mirip, dengan perbedaan kecil pada nilai puncak tegangan dan distribusi strain. Tegangan maksimum untuk Spesimen 2 lebih tinggi dibandingkan dengan Spesimen 1, mencapai sekitar 1012,9 MPa, sedangkan Spesimen 1 mencapai 948,8 MPa. Regangan maksimum yang dicapai oleh Spesimen 2 juga lebih tinggi, yaitu 9,25%, dibandingkan dengan Spesimen 1 yang hanya 8,22%.

Pada fase awal, grafik menunjukkan kenaikan linier yang mengindikasikan deformasi elastis. Setelah mencapai yield point, kedua spesimen menunjukkan kurva non-linear yang mencerminkan deformasi plastis hingga mencapai tegangan maksimum. Setelah itu, kurva mengalami penurunan yang menunjukkan penurunan kapasitas material hingga terjadi patahan. Berdasarkan grafik ini, Spesimen 2 memiliki kapasitas deformasi plastis yang lebih baik, sedangkan Spesimen 1 menunjukkan performa mekanik yang sedikit lebih rendah. Data ini mengonfirmasi hasil analisis sebelumnya terkait perbedaan nilai stress dan strain antara kedua spesimen.

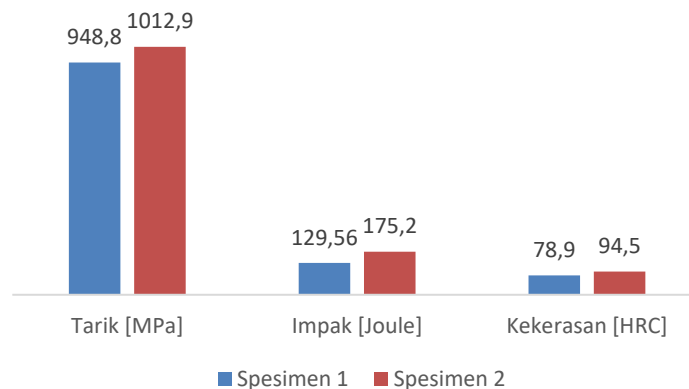


Gambar 8. Patahan Hasil Uji Tarik

Pada gambar 8. patahan hasil uji tarik dapat dilihat berbentuk *cup and cone* yang permukaannya berserabut menandakan kedua spesimen tersebut memiliki sifat yang ulet terhadap pembebanan yang diberikan.

Tabel 4. Data Hasil Pengujian

No	Kekerasan Rata-rata [HRC]	Impact [Joule]	Stress		Strain	
			Yield [MPa]	Ultimate [MPa]	Yield [%]	Ultimate [%]
1	78.9	129.56	664.3	948.8	2.74	8.22
2	94.5	175.2	726.4	1012.9	2.88	9.25

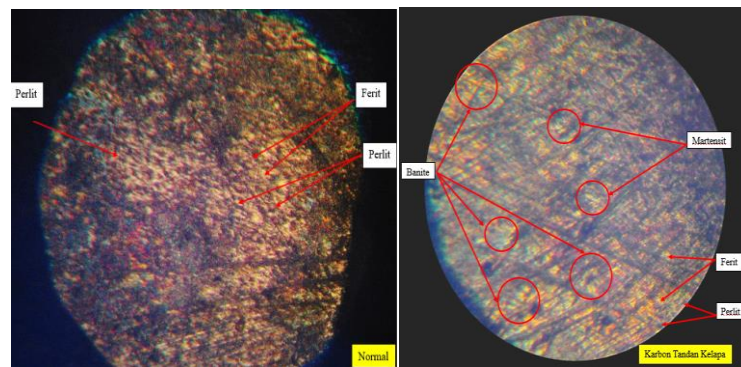


Gambar 9. Data Hasil Pengujian

Pada gambar 9. data hasil pengujian spesimen 1 (sebelum *pack carburizing*) dan spesimen 2 (sesudah *pack carburizing*) pada pengujian tarik nilai tegangan stress kedua spesimen memiliki selisih 64.1 MPa, dengan nilai kekuatan tarik terbesar pada spesimen 2 (1,012.9 MPa) atau spesimen setelah *pack carburizing*. Setelah proses *pack carburizing* kekuatan impak mengalami peningkatan sebesar 45.64 Joule. Spesimen 2 memiliki kekuatan impak sebesar 175.2 Joule. Setelah proses *pack carburizing* dengan menggunakan media karbon tandan kelapa dan katalis cangkang kerang kekerasan permukaan mengalami peningkatan 15.6 HRC dari nilai kekerasan awal.

3.4. Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop triokular dan menggunakan pembesaran 100 kali dapat dilihat pada gambar 10. Dibawah ini:



Gambar 10. Struktur Mikro Spesimen Normal dan Setelah Pack Carburizing

AISI 4340 adalah baja paduan rendah yang mengandung nikel, kromium, dan molibdenum. Baja ini dikenal dengan kekuatan tinggi, kekerasan yang baik, serta ketahanan terhadap keausan dan dampak. Struktur mikro dari AISI 4340 bervariasi. Dalam kondisi tanpa perlakuan, baja AISI 4340 akan mengandung ferrite, yaitu fase yang bersifat lunak dan ulet, dengan kandungan karbon sangat rendah. AISI 4340 juga akan mengandung pearlite, yaitu campuran ferrite dan cementite (Fe_3C). Pearlite terbentuk selama pendinginan baja setelah pemanasan di atas suhu eutektik, seperti dalam proses pengerolan panas (*hot rolling*). Pearlite lebih keras dibandingkan ferrite dan memberikan kekuatan tambahan pada baja.

Setelah dilakukan *pack carburizing*, baja AISI 4340 akan memiliki perubahan signifikan pada struktur mikro, terutama pada lapisan permukaan. *Pack carburizing* adalah proses perlakuan panas di mana permukaan baja diperkaya dengan karbon pada suhu tinggi. Setelah *pack carburizing*, permukaan yang mengalami peningkatan kandungan karbon akan membentuk ferrite dan pearlite selama pendinginan lambat. Pearlite terdiri dari lapisan-lapisan ferrite dan cementite (Fe_3C). Meskipun lebih keras daripada ferrite murni, pearlite jauh lebih lunak daripada martensite. Jika pendinginan dilakukan pada laju yang sedang (lebih cepat dari pendinginan tungku tapi lebih lambat dari quenching), beberapa bainite mungkin terbentuk. Bainite memiliki kekerasan menengah dan ketangguhan lebih tinggi daripada pearlite.

4. KESIMPULAN

Sifat mekanik baja AISI 4340 tanpa perlakuan *pack carburizing* memiliki kekerasan permukaan rata-rata 78.9 HRC, kekuatan *impact* 129.56 Joule, kekuatan tarik (*ultimate tensile strength*) 948.8 MPa, patahan akibat pengujian *impact* maupun tarik berbentuk *cup and cone* yang menandakan baja AISI 4340 memiliki sifat mekanik ulet dan struktur mikro terdiri dari pearlite dan ferrite. Baja AISI 4340 setelah dilakukan *pack carburizing* menggunakan media karbon tandan kelapa ukuran butir *mesh* 300 dengan komposisi tambahan katalis abu cangkang kerang 10% memiliki kekerasan permukaan rata-rata 94.5 HRC, kekuatan *impact* 175.2 Joule, kekuatan tarik (*ultimate tensile strength*) 1,012.9 MPa, patahan akibat pengujian *impact* maupun tarik berbentuk *cup and cone* yang menandakan baja AISI 4340 setelah proses *pack carburizing* memiliki sifat mekanik ulet dan struktur mikro yang terbentuk pearlite, ferrite serta bainite yang membuat kekerasan permukaan meningkat. Pengaruh serbuk karbon tandan kelapa pada proses *pack carburizing* meningkatkan nilai sifat mekanik dari bahan AISI 4340 hal ini di buktikan dengan peningkatan nilai kekerasan permukaan 1.04%, peningkatan kekuatan *impact* 0.57% dan peningkatan kekuatan tarik 0.52%.

DAFTAR PUSTAKA

Anhar, M. (2019). Proses Karburasi Pada Baja Karbon Rendah Dengan Menggunakan Karbon Arang Kayu Belian Dan Arang Kayu Akasia. *Inovtek Polbeng*, 9(2), 190. <https://doi.org/10.35314/Ip.V9i2.1001>

- Arifin, E. (2016). Pengaruh Waktu Dan Suhu Pada Karburisasi Padat Terhadap Kekerasan Roda Gigi Baja St37 Dengan Media Arang Batok Kelapa Dan Barium Karbonat. *Jurnal Teknik*, 5(2). <https://doi.org/10.31000/Jt.V5i2.342>
- Azmy, I., Masruri, D., Rahardianto, R., Studi Teknik Mesin, P., Negeri Bandung, P., Studi Proses Manufaktur, P., & Studi Teknik Perancangan Dan Konstruksi Mesin, P. (2022). *Pengaruh Proses Pack Carburizing Baja AISI 4340 Terhadap Peningkatan Kekerasan Dan Ketahanan Aus*. 5(2), 102–107. <https://doi.org/10.30596/Rmme.V5i2.11017>
- Bethony, F. R. (2017). Efek Persentase Barium Karbonat Dengan Arang Tempurung Kelapa Terhadap Kekerasan Baja Karbon AISI 2015. *Journal Dynamic Saint*, 2(2), 372–379. <https://doi.org/10.47178/Dynamicsaint.V2i2.107>
- Helanianto, H., & Rahmadi, H. (2023). Proses Karburisasi Padat Pada Baja Karbon Rendah Dengan Temperatur 900 C, 1000 C, Dan 1100 C. *Injection: Indonesian Journal Of Vocational Mechanical Engineering*, 3(1), 33–39. <https://doi.org/10.58466/Injection.V3i1.989>
- Ismail, N. R., Fadhilah, A. R., Hermawan, D., & Wicaksono, L. H. (2022). Analisa Waktu Pendinginan Terhadap Temperatur Dan Kekerasan Baja St 37. *Prosida Widya saintek*, 01(01), 25–30.
- Kadriadi, Fajrul, R., & Wirakusuma, K. W. (2021). Pengaruh Media Carburizing Antara Arang Tempurung Kelapa Dan Arang Kayu Bakau Terhadap Nilai Kekerasan Baja Karbon Rendah. *Jurnal bina wakya*, 16(2), 6403–6412.
- Mahardika, S., & Hidayat, M. T. (2021). Pengaruh Media Arang Kayu Jati Pada Proses Pack Carburizing Terhadap Komposisi Kimia Dan Kekerasan Baja Karbon Rendah. *Otopro*, 16(2), 44. <https://doi.org/10.26740/Otopro.V16n2.P44-49>
- Masoli, I. M., Supriyadi, S., & Ma'mun, H. (2021). Pengaruh Quenching Terhadap Kekerasan Dan Ketangguhan Baja AISI 4340 Pada Proses Pack Carburizing Dengan Katalis Barium Karbonat (Baco3) Dan Kalsium Karbonat (Caco3). *Device*, 11(1), 45–51. <https://doi.org/10.32699/Device.V11i1.1798>
- Mazuli, S., & Haripriadi, B. D. (2020). Analisa Pengaruh Arang Kayu Bakau, Arang Tempurung Kelapa Dan Arang Kayu Leban Pada Proses Pack Carburizing Terhadap Kekerasan Baja Karbon St 37. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur Dan Energi*, 3(2), 128–137. <https://doi.org/10.30596/Rmme.V3i2.5275>
- Muhajir, A., Machdar, I., & Mariana, M. (2021). Produksi Karbon Aktif Arang Tempurung Kelapa Menggunakan Kombinasi Metode Aktivasi Secara Kimia Dan Steam Tekanan Rendah. *Jurnal Litbang Industri*, 11(2), 110. <https://doi.org/10.24960/Jli.V11i2.7104.110-116>
- Mujiyono, & Sumowidagdo, A. L. (2008). *Meningkatkan Efektivitas Karburisasi Padat Pada Baja Karbon Rendah Dengan Optimasi Ukuran Serbuk Arang Tempurung Kelapa*.
- Napitupulu, R. A., Manurung, M., Manurung, C. S. P., & Peranginangin, S. E. (2023). Pengerasan Permukaan Baja Karbon Rendah Melalui Proses Pack Carburizing Dengan Menggunakan Arang Cangkang Kemiri. *Sprocket Journal Of Mechanical Engineering*, 4(2), 126–131. <https://doi.org/10.36655/Sprocket.V4i2.919>
- Nurharyanto, A., Halim, D. A., & Surojo, E. (2019). Perbandingan Nilai Kekerasan Baja Karbon Rendah Pada Proses Pack Carburizing Dengan Media Arang Sekam Padi Dan Arang Tempurung Kelapa. *Teknika: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 15(1), 39. <https://doi.org/10.36055/Tjst.V15i1.6009>
- Purnama, D., Wardana, G. A., & Adicandra, N. S. (2016). Analisa Kekuatan Mekanik Pada Material AISI 4340 Terhadap Welding Repair Dengan Metode SMAW. *Jurnal Poli-Teknologi*, 14(3). <https://doi.org/10.32722/Pt.V14i3.766>
- Setiawan, B. F., Helanianto, H., & Rahmadi, H. (2021). Penggunaan Karbon Arang Kayu Belian Dan Arang Kayu Akasia Pada Proses Karburisasi Padat Baja Karbon Rendah. *Injection: Indonesian Journal Of Vocational Mechanical Engineering*, 1(1), 10–21. <https://doi.org/10.58466/Injection.V1i1.74>
- Sudarmono, Kurnia, H., Dwi Wahyuni, A., Adistyani, N., & Arwan Sulaeman, A. (2023). Penggunaan Material Logam Di Berbagai Industri Manufaktur Indonesia: Sistematis Kajian Literatur. *Jurnal Industry Xplore*, 8(1), 1–9.

- Sujita, S. (2016). Proses Pack Carburizing Dengan Media Carburizer Alternatif Serbuk Arang Tongkol Jagung Dan Serbuk Cangkang Kerang Mutiara. *Mechanical*, 7(2). <https://doi.org/10.23960/Mech.V7.I2.201606>
- Suseno, I., Pramono, C., & Salahudin, X. (2019). Analisis Pengaruh Waktu Penahanan Pada Proses Pack Carburizing Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja Karbon Rendah Menggunakan Media Arang Tempurung Kelapa. *Journal Of Mechanical Engineering*, 3(2). <https://doi.org/10.31002/Jom.V3i2.3374>
- Vadiyar, M. M., Bhise, S. C., Kolekar, S. S., Chang, J.-Y., Ghule, K. S., & Ghule, A. V. (2016). *Electronic Supplementary Information (Esi) Low Cost Flexible 3-D Aligned And Cross-Linked Efficient Znfe 2 O 4 Nano-Flakes Electrode On Stainless Steel Mesh For Asymmetric Supercapacitor*.
- Waas, K.-. (2020). Pengaruh Holding Time (Waktu Tahan) Dan Variasi Media Quenching (Pendinginan) Terhadap Nilai Kekerasan Baja Karbon Rendah St 42 Pada Proses Pengkarbonan Padat Menggunakan Arang Batok Biji Pala (*Myristica Fagrans*). *Jurnal Simetrik*, 10(1), 269–278. <https://doi.org/10.31959/Js.V10i1.361>
- Yuhardin, Ramli, & Sugiyarto. (2024). Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Kepah (Polymesoda Erosa) Sebagai Katalisator Pada Proses Carburizing. *Jurnalinovasiteknologiterapan*, 02(02).
- Zikria, R. (2023). *Buku Outlook Komoditas Perkebunan Kelapa* (A. A. Susanti & R. Kencanaputra, Eds.). Pusat Data Dan Sistem Informasi Pertanian Sekretariat Jenderal Kementerian Pertanian.