

PENINGKATAN KETAHANAN AUS PERMUKAAN BAJA KONSTRUKSI ST-42 MELALUI SUBSTITUSI ENERGIZER CANGKANG KEPITING (CaCO_3) PADA PROSES PACK CARBURIZING DAN PENEMPERAN

Roy R Lekatompessy, Erwin B Pattykaihatu, Nevada J M Nanulaitta, Graciadiana I Huka

¹⁾ Jurusan Teknik Mesin,
Politeknik Negeri Ambon
Ir. M. Putuhena, Wailela –
Rumahtiga, Kota Ambon,
Maluku, INDONESIA - 97234
royrobert@gmail.com

²⁾ Jurusan Teknik Mesin,
Politeknik Negeri Ambon
Ir. M. Putuhena, Wailela –
Rumahtiga, Kota Ambon,
Maluku, INDONESIA - 97234
aer.pattykaihaitu@gmail.com

³⁾ Jurusan Teknik Mesin,
Politeknik Negeri Ambon
Ir. M. Putuhena, Wailela –
Rumahtiga, Kota Ambon,
Maluku, INDONESIA - 97234
nevadario@gmail.com

⁴⁾ Jurusan Teknik Mesin,
Politeknik Negeri Ambon
Ir. M. Putuhena, Wailela –
Rumahtiga, Kota Ambon,
Maluku, INDONESIA - 97234
gracehuka37@gmail.com

ABSTRACT

Low-carbon steel ST-42 is a material widely applied in general mechanical construction, yet it exhibits technical limitations regarding its surface hardness. This study aims to investigate the effect of varying tempering temperatures (200°C, 300°C, 400°C, 500°C, and 600°C) on the hardness value of St-42 steel following a surface hardening process using the pack carburizing method. As an eco-friendly biomaterial innovation, this research substitutes the use of synthetic Barium Carbonate (BaCO_3) with crab shell waste which is rich in Calcium Carbonate (CaCO_3) acting as a catalyst (energizer), combined with walnut shell carbon powder. A quantitative laboratory experiment was conducted utilizing 15 plate test specimens, where mechanical properties were measured using the Rockwell method (HRC). The results demonstrated that crab shells operate highly effectively in accelerating carbon diffusion; the average initial hardness of the steel increased drastically from 112.6 HRC to approximately 138.5 HRC post-carburizing and rapid quenching using SAE 20-50 oil. The tempering stage revealed an inversely proportional empirical correlation between temperature and material hardness. Low-temperature tempering (200°C–300°C) successfully maintained hardness retention at around 135 HRC through epsilon carbide precipitation, whereas high-temperature tempering (500°C–600°C) drastically reduced hardness to 125.325 HRC due to cementite spheroidization and carbide agglomeration. In conclusion, crab shell waste serves as a highly reliable alternative energizer, and tempering temperature parameters can be precisely engineered to achieve an optimal equilibrium between surface wear resistance and material toughness for industrial machinery components.

Keywords: ST-42 Steel, Pack Carburizing, Crab Shell, Tempering, Rockwell Hardness.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di sektor rekayasa mekanik menuntut ketersediaan material yang memiliki spesifikasi teknis tinggi untuk menunjang berbagai kebutuhan konstruksi dan manufaktur. Baja karbon rendah, seperti baja St-42, merupakan salah satu material yang mendapatkan prioritas utama dalam aplikasi industri karena memiliki tingkat mampu mesin (*machinability*) yang baik, mudah dibentuk, dan bernilai ekonomis. Namun demikian, baja St-42 memiliki kadar karbon yang relatif rendah, yaitu berkisar antara 0,04% hingga 0,30%, dengan kekuatan tarik pada rentang 42 - 50 kg/mm². Karakteristik fisik ini mengindikasikan bahwa material tersebut memiliki kelemahan pada sifat mekanis permukaannya, khususnya terkait tingkat kekerasan dan ketahanan aus terhadap gesekan yang dinilai kurang optimal untuk menahan pembebanan dinamis.

Untuk memodifikasi kelemahan sifat mekanis tersebut, penerapan rekayasa material melalui perlakuan panas (*heat treatment*) menjadi suatu keharusan. Salah satu metode perlakuan panas yang krusial untuk diaplikasikan adalah *pack carburizing*, yang bertujuan untuk mendifusikan karbon ke permukaan logam

guna meningkatkan kekerasan permukaan, ketahanan aus, serta karakteristik fatik terhadap pembebanan kejut. Secara konvensional, proses karburasi ini menggunakan Barium Karbonat (BaCO_3) yang dicampur dengan sumber karbon sebagai *energizer* atau bahan penggiat.

Seiring dengan tren penelitian terbaru di bidang rekayasa material (material science) yang mengedepankan prinsip keberlanjutan dan pemanfaatan biomaterial (green technology), penggunaan bahan kimia sintetis mulai dialihkan pada eksplorasi sumber daya alam lokal. Berbagai studi termutakhir menunjukkan bahwa limbah cangkang hewan laut memiliki potensi besar sebagai substitusi material industri. Dalam konteks ini, cangkang kepiting yang memiliki kandungan Kalsium Karbonat (CaCO_3) tinggi mencapai 53,70% hingga 78,40% merupakan inovasi media alternatif yang sangat relevan untuk menggantikan BaCO_3 sebagai *energizer* guna mempercepat proses karburasi.

Lebih lanjut, setelah proses pengarbonan dan pendinginan cepat (*quenching*) menggunakan media oli SAE 20-50, baja akan mengalami peningkatan kekerasan namun cenderung memiliki tegangan sisa yang memicu kegetasan. Oleh karena itu, baja dituntut untuk melalui proses perlakuan panas lanjutan berupa penemperan (*tempering*). Melalui siklus pemanasan dan pendinginan terkontrol pada fase padat ini, struktur mikro material dapat direlaksasi untuk mendapatkan titik keseimbangan terbaik antara nilai kekerasan dan ketangguhan baja. Berdasarkan urgensi modifikasi material dan potensi inovasi sumber daya lokal tersebut, penelitian mengenai parameter suhu penemperan spesifik yang diaplikasikan setelah proses karburasi berbasis biomaterial cangkang kepiting ini sangat penting untuk diinvestigasi secara komprehensif.

Penelitian ini dilaksanakan dengan tujuan objektif untuk menguji dan membuktikan secara empiris besaran pengaruh variasi suhu penemperan yakni pada temperatur 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, dan 600°C terhadap tingkat kekerasan permukaan baja St-42. Evaluasi kekerasan ini dikhususkan pada spesimen baja yang sebelumnya telah melalui proses pengerasan *pack carburizing* menggunakan media alternatif serbuk cangkang kepiting (CaCO_3) yang berfungsi sebagai *energizer* (katalisator) pengganti Barium Karbonat (BaCO_3).

Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu memberikan pemecahan masalah (solusi) akademis maupun praktis, di antaranya: Menyediakan data empiris yang presisi mengenai parameter temperatur penemperan paling optimal untuk menghasilkan kualitas baja St-42 dengan nilai kekerasan permukaan tertinggi dan ketangguhan yang ideal. Membuktikan efektivitas pemanfaatan limbah sumber daya alam lokal (cangkang kepiting) sebagai material inovatif *energizer* ramah lingkungan guna mengurangi ketergantungan industri rekayasa terhadap bahan kimia konvensional (BaCO_3). Menjadi acuan literatur terapan bagi pengembangan teknologi perlakuan panas pada konstruksi permesinan umum yang membutuhkan material logam berbiaya rendah namun memiliki spesifikasi ketahanan mekanis yang unggul.

Penelitian ini berfokus pada peningkatan sifat mekanis baja karbon rendah St-42 melalui metode perlakuan panas terkontrol. Tahap pertama meliputi penyiapan lima belas spesimen uji dan pengukuran kekerasan dasar menggunakan mesin Rockwell HRC. Selanjutnya, dilakukan inovasi proses *pack carburizing* yang memanfaatkan limbah cangkang kepiting sebagai *energizer* pengganti Barium Karbonat konvensional, dikombinasikan bersama serbuk karbon cangkang kenari. Pasca-karburasi, spesimen didinginkan secara cepat menggunakan oli SAE 20-50. Untuk merelaksasi tegangan sisa material, diaplikasikan proses penemperan dengan lima variasi suhu antara 200°C hingga 600°C. Tahap akhir melibatkan evaluasi kekerasan ulang guna mengidentifikasi temperatur spesifik yang menghasilkan keseimbangan mekanis serta ketangguhan baja yang paling optimal.

Baja St-42 merupakan salah satu jenis baja struktural karbon rendah (*low carbon steel*) berdasarkan standardisasi DIN (*Deutsches Institut für Normung*). Baja ini memiliki kekuatan tarik minimum sebesar 42 kg/mm² dan kandungan unsur karbon berkisar antara 0,15% hingga 0,25% (Asmuri et al., 2021). Komposisi mikrostruktur baja St-42 didominasi oleh fasa ferit yang bersifat lunak serta ulet, dan fasa perlit dalam jumlah terbatas (Ramadhan et al., 2022). Kombinasi fasa tersebut memberikan karakteristik ketangguhan dan sifat mampu mesin (*machinability*) yang sangat baik pada material. Namun, kandungan karbon yang rendah ini menyebabkan baja St-42 memiliki nilai kekerasan permukaan dan ketahanan aus yang rendah, sehingga tidak dapat langsung digunakan untuk komponen mesin yang menerima beban gesek tinggi tanpa melalui proses rekayasa permukaan (*surface engineering*).

Karburisasi padat merupakan metode perlakuan panas termokimia yang bertujuan meningkatkan kadar karbon pada permukaan baja karbon rendah dengan cara difusi intersitisial (Callister & Rethwisch, 2018). Proses ini berlangsung dengan memasukkan spesimen baja ke dalam wadah tertutup yang berisi media karburator padat (sumber karbon) dan zat penggiat (*energizer*), kemudian memanaskannya pada suhu austenitisasi antara 850°C hingga 950°C (Sujita et al., 2023).



Gambar. 1. Proses Karburasi

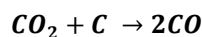
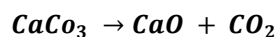
Pada temperatur tinggi tersebut, struktur kristal besi bertransformasi menjadi fasa austenit (γ -Fe) yang memiliki struktur *Face-Centered Cubic* (FCC), di mana ruang antaratom besi melonggar dan memungkinkan atom karbon berdifusi masuk (Callister & Rethwisch, 2018). Interaksi antara oksigen yang terperangkap di dalam wadah dengan media arang menghasilkan gas karbon monoksida (CO). Gas CO ini kemudian mengalami reaksi disosiasi saat bersentuhan dengan permukaan baja panas untuk melepaskan atom karbon aktif (C_{aktif}) yang langsung masuk ke dalam kisi kristal besi, sesuai dengan persamaan reaksi berikut (Ramadhan et al., 2022):



Laju difusi atom karbon ini berbanding lurus dengan temperatur dan durasi penahanan suhu (*holding time*), yang pada akhirnya membentuk lapisan kaya karbon (*case depth*) pada permukaan luar baja (Sujita et al., 2023).

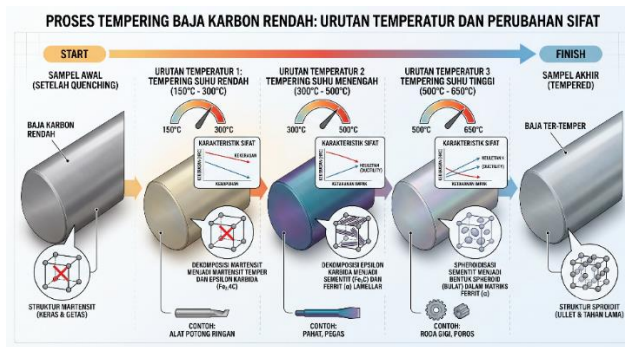
Proses karburisasi konvensional umumnya menggunakan Barium Karbonat ($BaCO_3$) sebagai *energizer* atau katalis untuk mempercepat pembentukan gas CO, namun senyawa barium memicu pencemaran lingkungan dan memiliki sifat toksik yang berbahaya bagi keselamatan kerja (Aksar & Sudarsono, 2025). Sebagai alternatif ekologis, pemanfaatan limbah cangkang hewan laut seperti cangkang kepiting menawarkan kandungan Kalsium Karbonat ($CaCO_3$) yang tinggi, mencapai lebih dari 70% setelah melalui proses kalsinasi (Prabowo & Santoso, 2020).

Zat pengikat berbasis $CaCO_3$ ini bekerja melalui mekanisme dekomposisi termal pada suhu tinggi. Panas di dalam tungku mengurai $CaCO_3$ menjadi kalsium oksida (CaO) dan gas karbon dioksida (CO_2) (Prabowo & Santoso, 2020). Selanjutnya, gas CO_2 hasil penguraian langsung bereaksi dengan karbon (C) dari arang melalui reaksi Boudouard untuk memproduksi gas CO dalam jumlah massal, seperti yang ditunjukkan pada reaksi berikut (Sulistyo & Setiawan, 2022):



Kehadiran pasokan gas CO yang melimpah dari dekomposisi cangkang kepiting ini mempercepat reaksi karburisasi pada permukaan baja St-42. Penelitian metalurgi terkini menunjukkan bahwa performa katalitik $CaCO_3$ dari biomaterial laut mampu menyamai efisiensi $BaCO_3$ komersial dalam meningkatkan kekerasan permukaan baja tanpa menghasilkan residu beracun (Aksar & Sudarsono, 2025; Sulistyo & Setiawan, 2022).

Proses pendinginan cepat (*quenching*) secara langsung setelah karburisasi mengubah fasa austenit luar yang kaya karbon secara paksa menjadi fasa martensit yang memiliki struktur *Body-Centered Tetragonal* (BCT) (Dieter & Bacon, 2019). Fasa martensit ini menghasilkan nilai kekerasan yang sangat tinggi namun memicu sifat rapuh (*brittle*) serta menyisakan tegangan internal (*residual stress*) yang tinggi pada material (Utomo & Raharjo, 2020).



Gambar. 2. Proses Tempering

Oleh karena itu, penerapan proses *tempering* yaitu pemanasan ulang baja di bawah suhu kritis bawah (A_1 sekitar 727°C) yang diikuti pendinginan lambat di udara menjadi tahapan krusial untuk memulihkan keuletan material (Widiyanto et al., 2021).

Variasi suhu *tempering* menentukan sifat mekanik akhir baja St-42 karena suhu memengaruhi tingkat difusi pelepasan karbon dari kisi martensit yang terdistorsi (Dieter & Bacon, 2019). Pengaruh variasi suhu *tempering* terbagi menjadi tiga rentang utama:

1. Tempering Suhu Rendah (150°C – 250°C): Mengurangi tegangan sisa internal dan mempertahankan fasa martensit keras (*tempered martensite*) dengan presipitasi karbida epsilon yang halus, sehingga penurunan nilai kekerasan permukaan terjadi secara minimal (Widiyanto et al., 2021).
2. Tempering Suhu Menengah (350°C – 450°C): Mentransformasi martensit menjadi fasa troosit, di mana partikel sementit mulai mengalami aglomerasi. Tahapan ini menurunkan nilai kekerasan secara signifikan, tetapi memberikan peningkatan drastis pada batas elastisitas dan ketangguhan material (Utomo & Raharjo, 2020).
3. Tempering Suhu Tinggi (500°C – 650°C): Memicu pembentukan fasa sorbit melalui proses pembulatan sementit (*spheroidization*) di dalam matriks ferit. Suhu tinggi ini menghilangkan sebagian besar kekerasan hasil karburisasi, namun menghasilkan keuletan dan ketahanan impact yang maksimal pada komponen (Utomo & Raharjo, 2020; Widiyanto et al., 2021).

Kekerasan merupakan kemampuan suatu material untuk menahan deformasi plastis lokal akibat penetrasi gaya dari luar (Callister & Rethwisch, 2018). Pengukuran kekerasan hasil perlakuan panas karburisasi umumnya menggunakan metode Vickers (HV) atau Rockwell (HRC) untuk mengetahui distribusi kekerasan dari permukaan luar hingga bagian inti material (Sujita et al., 2023). Peningkatan kedalaman difusi karbon yang dibantu oleh *energizer* cangkang kepiting akan menaikkan angka kekerasan secara signifikan pada permukaan, sementara variasi suhu *tempering* akan mendegradasi nilai kekerasan tersebut secara bertahap seiring dengan meningkatnya suhu operasi (Aksar & Sudarsono, 2025; Utomo & Raharjo, 2020).

2. METODOLOGI

Penelitian ini merupakan sebuah studi eksperimental yang bertujuan untuk menganalisis perubahan sifat mekanik, khususnya kekerasan, pada material baja akibat adanya perlakuan panas. Secara keseluruhan, alur eksperimen ini memadukan tiga tahapan utama: pengambilan data dasar material, proses karburisasi yang diikuti dengan pendinginan cepat (*quenching*), serta proses penemperan (*tempering*) dengan berbagai tingkat suhu. Seluruh data yang diperoleh dari tiap tahapan tersebut kemudian dikumpulkan untuk dianalisa perbandingannya.

Berikut adalah rincian desain, langkah-langkah, dan asumsi penelitiannya:

1. Desain dan Variabel Penelitian
 - a. Waktu dan Tempat: Eksperimen dilaksanakan selama 2 minggu pada bulan Agustus 2011, bertempat di Laboratorium Uji Bahan Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ambon.
 - b. Spesimen Penelitian: Material yang digunakan adalah plat baja karbon rendah St-42. Bahan ini dibentuk

menjadi 15 buah spesimen uji dengan dimensi 60 mm x 30 mm x 4 mm.

- c. Variabel Bebas: Proses penemperan dan pengukuran nilai kekerasan baja.
- d. Variabel Terikat: Suhu penemperan yang bervariasi untuk tiap kelompok spesimen.
- e. Variabel Pendukung: Temperatur awal spesimen, waktu penahanan panas (*holding time*), jenis media pendingin, dan temperatur pemanasan.
2. Langkah-Langkah Analisis dan Pengolahan Data :
 - a. Uji Kekerasan Tahap Awal: Sebelum diberi perlakuan panas, spesimen diampelas hingga salah satu sisinya bersih. Nilai kekerasan awal diukur menggunakan Mesin Uji Kekerasan Mitutoyo Type AR-20 dengan metode Rockwell (menggunakan indenter kerucut intan dan beban 150 Pa).
 - b. Proses Karburasi: Benda uji dipanaskan di dalam kotak sementasi dengan waktu penahanan selama 15 menit. Proses ini menggunakan campuran media berupa 1 kg karbon dari cangkang kenari dan 30% katalisator dari cangkang kepiting (CaCO_3).
 - c. Pendinginan (*Quenching*): Setelah waktu penahanan selesai, spesimen langsung dikeluarkan dan didinginkan secara cepat menggunakan media oli SAE 20-50.
 - d. Uji Kekerasan Tahap Kedua: Benda uji yang telah dingin dibersihkan kembali dan diukur nilai kekerasannya untuk melihat efek pasca-karburasi dan *quenching*. Hasilnya dicatat dalam lembar pengamatan.
 - e. Proses Penemperan (*Tempering*): 15 spesimen uji dibagi menjadi 5 kelompok terpisah. Masing-masing kelompok yang berisi 3 spesimen dipanaskan kembali dengan variasi suhu 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, dan 600°C.
 - f. Komputasi dan Evaluasi Data: Setelah penemperan, benda uji dibiarkan mendingin secara perlahan hingga mencapai suhu ruangan. Pengujian kekerasan tahap akhir dilakukan pada spesimen yang sudah bersih, kemudian seluruh data yang tercatat dievaluasi untuk menganalisis bagaimana perbedaan suhu *tempering* memengaruhi angka kekerasan baja.
 - g. Stabilitas Suhu Lingkungan: Suhu ruangan tempat berlangsungnya penelitian diukur sebesar 27°C sebelum pengujian dan diasumsikan stabil agar tidak memengaruhi proses pendinginan lambat di akhir eksperimen.
 - h. Konsistensi Reaksi Material: Komposisi campuran 30% katalisator cangkang kepiting dan karbon cangkang kenari diasumsikan tersebar secara homogen dan memberikan laju serapan karbon yang konsisten pada semua benda uji selama 15 menit penahanan.
 - i. Karakteristik Pendingin: Media pendingin oli SAE 20-50 yang berada di dalam wadah penampung diasumsikan memiliki karakteristik penyerapan panas yang sama untuk setiap spesimen yang dicelupkan.

Seluruh rangkaian metode penelitian ini mulai dari persiapan bahan, proses perlakuan panas (karburasi), pendinginan dengan oli, hingga tahap pemanasan kembali (*tempering*) dirancang secara terstruktur agar data yang diperoleh benar-benar akurat. Setiap perubahan nilai kekerasan pada baja, baik sebelum diberi perlakuan, setelah didinginkan, maupun setelah dipanaskan ulang pada suhu yang berbeda-beda, akan dicatat dan dibandingkan secara saksama. Melalui proses pengumpulan dan perbandingan data yang teliti ini, pada akhirnya peneliti dapat melihat dengan jelas bagaimana pengaruh variasi suhu terhadap tingkat kekerasan baja St-42, sehingga kesimpulan yang tepat dapat ditarik untuk menjawab tujuan penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

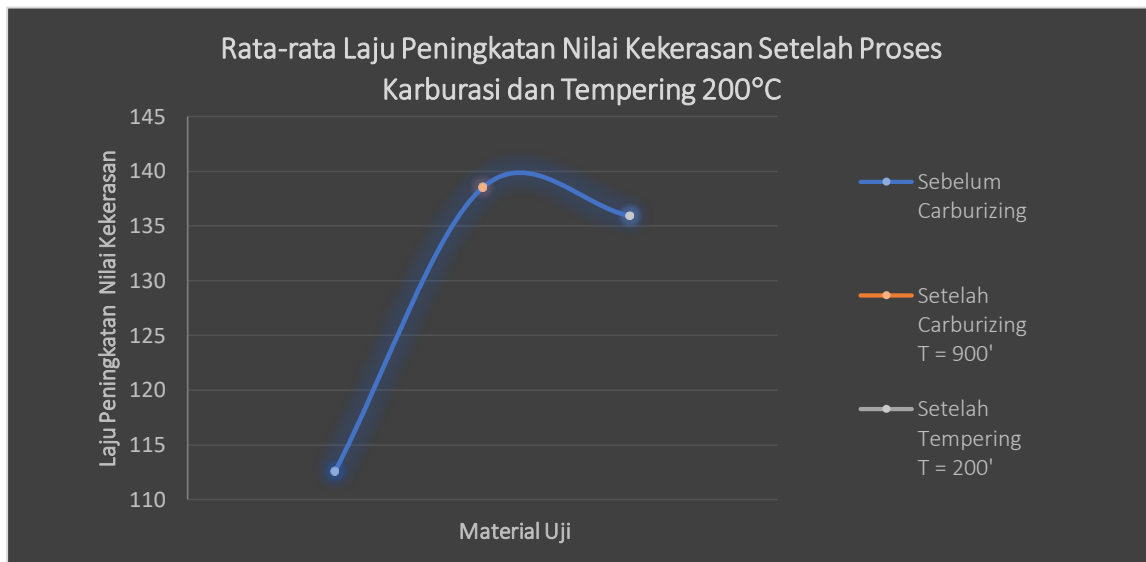
Pengujian mekanis yang dilakukan secara komprehensif terhadap spesimen baja karbon rendah St-42 melalui serangkaian tahapan perlakuan panas dimulai dari kondisi dasar material (*raw material*), dilanjutkan dengan pengerasan permukaan berupa proses *pack carburizing* menggunakan media karbon cangkang kenari dan *energizer* alternatif cangkang kepiting (*direct quenching* oli SAE 20-50), hingga fase penemperan (*tempering*) dengan variasi suhu 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, dan 600°C telah menghasilkan diferensiasi nilai kekerasan permukaan yang sangat signifikan dan konsisten. Data empiris hasil pengujian kekerasan metode Rockwell (HRC) menunjukkan tren yang berbanding terbalik, di mana lonjakan kekerasan puncak yang dicapai pasca-karburasi secara linier mengalami reduksi dan pelunakan struktural seiring dengan semakin meningkatnya temperatur penemperan yang diberikan.

Dinamika perubahan sifat mekanis ini merepresentasikan adanya transformasi fasa mikro-struktural metalurgi secara bertahap, mulai dari pelepasan tegangan sisa dan presipitasi karbida epsilon pada suhu

rendah, hingga terjadinya proses sferoidisasi sementit serta akselerasi aglomerasi karbida pada temperatur tinggi yang secara fundamental mengubah sifat kegetasan material menjadi keuletan dan ketangguhan dinamis yang superior

1. Temper 200°C

Analisis data hasil pengujian menunjukkan bahwa baja karbon rendah St-42 dengan kandungan karbon 0,25 % berat yang memiliki kekerasan awal rata-rata sebesar 112,6 HRC mengalami lonjakan kekerasan permukaan yang sangat signifikan menjadi 138,525 HRC setelah melalui proses pengerasan permukaan berupa *pack carburizing* dan pendinginan cepat (*direct quenching*) menggunakan media oli SAE 20-50.



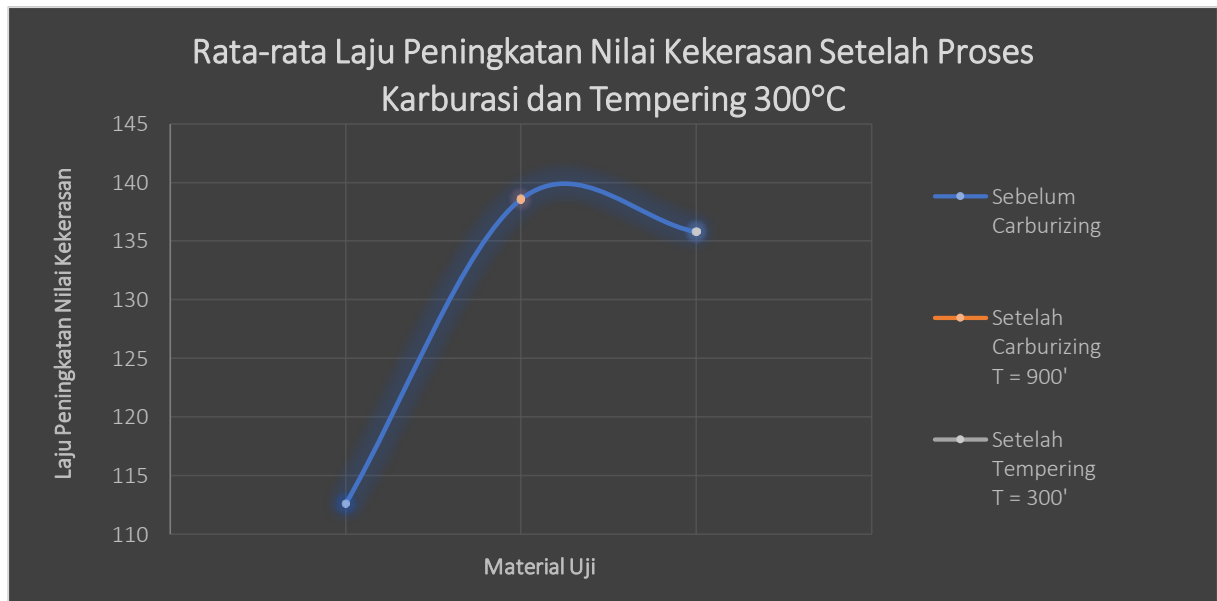
Gambar. 3. Grafik Temper 200°C

Peningkatan kekerasan sebesar 25,925 poin ini membuktikan efisiensi limbah cangkang kepiting dengan kadar kalsium karbonat (CaCO_3) sebesar 53,70–78,40% sebagai *energizer* alternatif ramah lingkungan yang mengkatalisasi dekomposisi karbon padat dari serbuk cangkang kenari menjadi gas CO aktif. Gas karbon ini berhasil berdifusi melewati fasa austenit hingga terkunci menjadi fasa martensit yang keras akibat laju pendinginan kejut. Ketika spesimen diberikan perlakuan panas lanjutan berupa penemperan (*tempering*) pada suhu rendah 200°C dan didinginkan perlahan di udara hingga mencapai suhu ruangan, nilai kekerasan permukaannya mengalami penurunan yang sangat marjinal, yaitu berkurang sebanyak 2,6 poin menjadi 135,925 HRC. Realitas empiris ini sangat selaras dengan teori perlakuan panas yang menegaskan bahwa penemperan pada suhu rendah hingga batas 200°C disebut sebagai penuaan buatan yang tidak akan menghasilkan penurunan kekerasan secara berarti. Pada rentang temperatur ini, energi termal yang diberikan fasa padat sepenuhnya beroperasi pada proses temper tahap pertama, di mana energi tersebut berfokus untuk mengeliminasi tegangan sisa (*internal stress*) serta memicu presipitasi produk transisi kaya karbon yang dikenal sebagai karbida epsilon dari martensit tetragonal. Transformasi mikro-struktural ini berhasil menstabilkan dimensi ukuran baja St-42 untuk jangka waktu lama sekaligus mereduksi kegetasan material tanpa mengorbankan sifat mekanis ketahanan aus esensial pada permukaannya, ini dapat dilihat pada gambar 3 diatas.

2. Temper 300°C

Analisis kuantitatif terhadap spesimen uji baja karbon rendah St-42 menunjukkan signifikansi modifikasi sifat mekanis melalui serangkaian perlakuan panas. Pengukuran awal pada spesimen mengindikasikan nilai kekerasan rata-rata dasar sebesar 112,6 HRC hal ini dapat dilihat pada gambar 4. Penerapan rekayasa permukaan melalui metode *pack carburizing* dengan mengintegrasikan serbuk karbon cangkang kenari dan biomaterial cangkang kepiting yang kaya akan kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai *energizer* terbukti sangat

krusial dalam mengakselerasi proses difusi interstisial atom karbon ke dalam struktur fasa austenit. Pasca-pendinginan cepat (*direct quenching*), nilai kekerasan permukaan spesimen mengalami eskalasi ekstrem menjadi 138,5875 HRC, merepresentasikan keberhasilan pembentukan fasa martensit yang sangat keras namun memiliki tegangan sisa tinggi. Guna mereduksi kegetasan intrinsik tersebut, spesimen diberikan perlakuan penemperan (*tempering*) pada temperatur 300°C yang merupakan ambang batas antara fase temper tahap kedua dan ketiga.

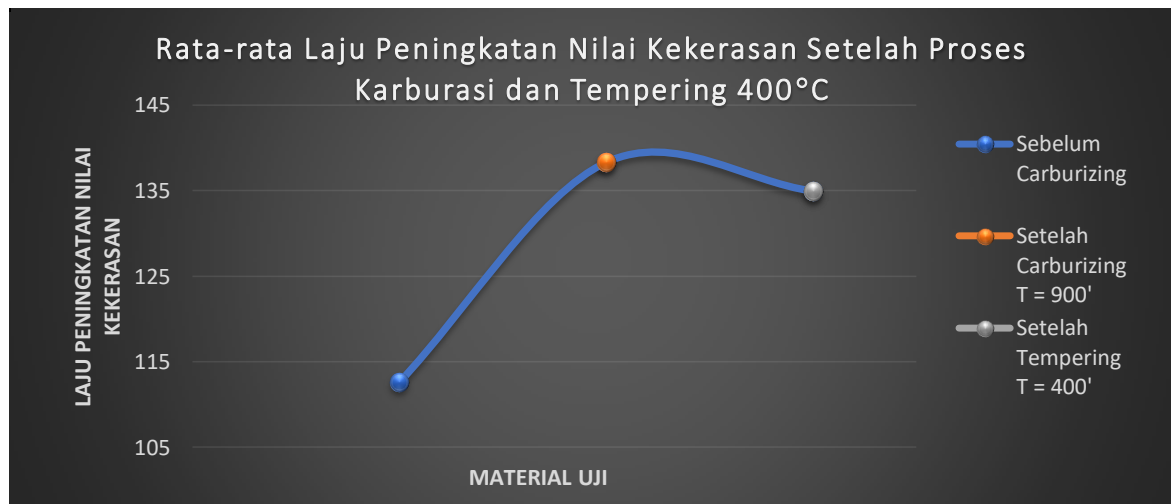


Gambar. 4. Grafik Temper 300°C

Hasil pengujian akhir menunjukkan terjadinya penurunan nilai kekerasan yang relatif moderat sebesar 2,8375 poin menjadi 135,75 HRC. Reduksi kekerasan ini secara metalurgi diakibatkan oleh penguraian struktural austenit sisa menjadi produk serupa bainit, serta inisiasi pembentukan sementit dari presipitasi karbida pada fase sebelumnya. Dekomposisi mikro-struktural tersebut berimplikasi langsung pada pelunakan tegangan sisa dan peningkatan stabilitas dimensi mekanis, sehingga spesimen baja St-42 berhasil mencapai ekuilibrium yang optimal antara tingkat keuletan bahan dan retensi ketahanan aus pada permukaannya untuk aplikasi permesinan.

3. Temper 400°C

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, analisis kuantitatif terhadap spesimen baja karbon rendah St-42 memperlihatkan perubahan sifat mekanis yang terukur akibat perlakuan panas berlanjut. Pengujian awal mencatat kekerasan dasar 112,65 HRC. Melalui proses *pack carburizing* menggunakan serbuk cangkang kenari dan katalisator kalsium karbonat (CaCO_3) dari cangkang kepiting, difusi atom karbon ke fasa austenit berlangsung optimal. Pendinginan cepat (*direct quenching*) memicu transformasi fasa struktural logam menjadi martensit, yang dibuktikan oleh eskalasi kekerasan secara dramatis mencapai 138,35 HRC. Namun, fasa martensit ini rentan retak akibat tegangan sisa yang tinggi. Oleh karena itu, spesimen diberikan perlakuan penemperan (*tempering*) pada temperatur 400°C. Pengujian pasca-penemperan menunjukkan reduksi kekerasan menjadi 134,975 HRC, yang merepresentasikan penurunan struktural sebesar 3,375 poin.

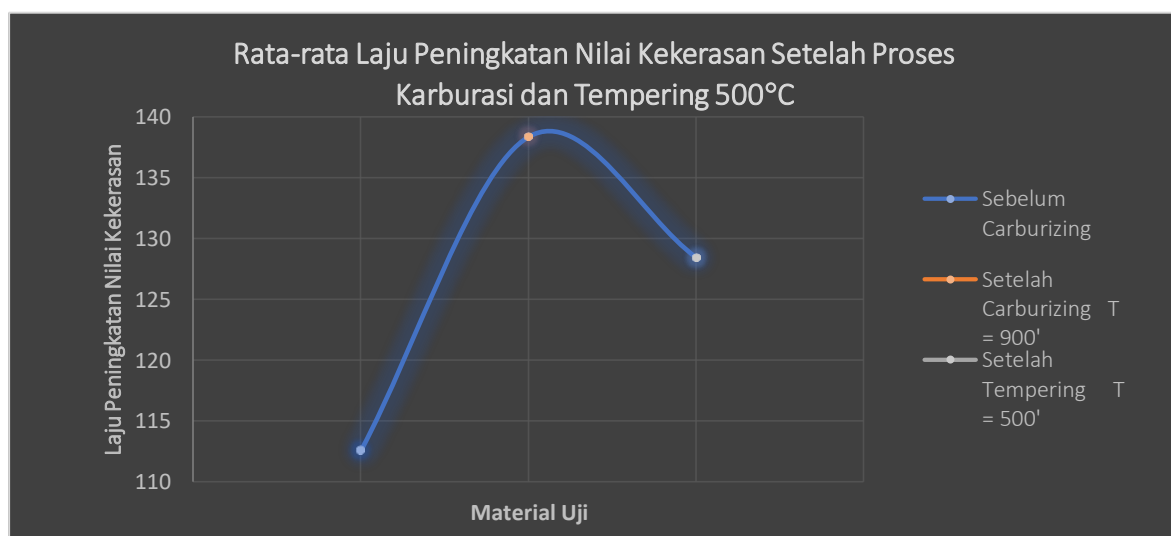


Gambar. 5. Grafik Temper 400°C

Secara metalurgi fisis, penurunan moderat ini mengonfirmasi bahwa material telah melewati batas fasa temper tahap ketiga dan mulai memasuki tahap keempat. Pada temperatur 400°C, reaksi dekomposisi mikrostruktur ditandai oleh pertumbuhan sementit secara masif yang dibarengi dengan inisiasi proses sferoidisasi (pembulatan sementit). Dinamika pelunakan fasa padat inilah yang secara fundamental merelaksasi tegangan sisa dan memodifikasi kegetasan baja St-42 menjadi tingkat keuletan serta ketangguhan fraktur yang lebih superior, menjadikan material ini sangat ideal untuk diaplikasikan pada konstruksi permesinan yang menuntut ketahanan aus tinggi sekaligus reliabilitas terhadap siklus pembebanan kejut industri manufaktur.

4. Temper 500°C

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, analisis kuantitatif terhadap spesimen uji baja karbon rendah St-42 pada suhu 500°C menunjukkan perubahan sifat mekanis yang sangat signifikan akibat perlakuan panas berlanjut. Pengujian tahap awal mencatatkan nilai kekerasan dasar rata-rata sebesar 112,6 HRC. Melalui implementasi rekayasa permukaan *pack carburizing* yang memanfaatkan karbon cangkang kenari dan *energizer* berkadar kalsium karbonat tinggi dari cangkang kepiting, difusi atom karbon ke dalam fasa austenit terjadi secara maksimal. Pengaplikasian pendinginan cepat seketika mentransformasi baja menjadi fasa martensit yang amat keras, dibuktikan dengan lonjakan kekerasan mencapai 138,35 HRC

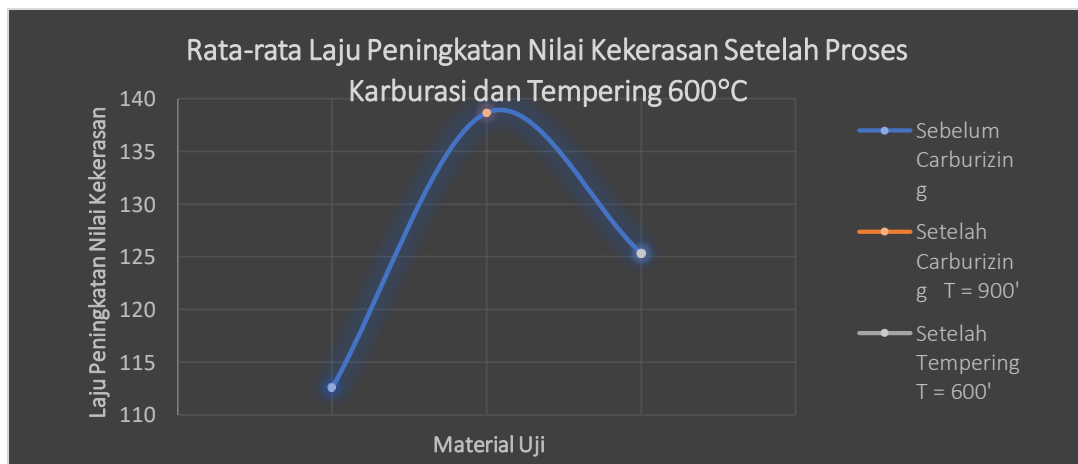


Gambar. 6. Grafik Temper 600°C

Namun, fasa ini sangat getas dan bertegangan sisa tinggi. Untuk mereduksi kerapuhan tersebut, spesimen diberikan perlakuan penemperan pada temperatur 500°C. Hasil pengujian pasca-penemperan membuktikan terjadinya degradasi nilai kekerasan yang drastis sebesar 9,925 poin menjadi 128,425 HRC. Penurunan tajam ini merupakan manifestasi dari transformasi metalurgi tahap keempat. Pada rentang temperatur ini, struktur mikro material mengalami percepatan laju aglomerasi karbida secara masif yang diiringi oleh proses sferoidisasi sementit komprehensif. Dekomposisi mikro-struktural tersebut beroperasi efektif untuk mengeliminasi kekakuan martensit, merelaksasi tegangan sisa, dan memodifikasi baja St-42 guna memperoleh ekuilibrium baru dengan tingkat keuletan, elastisitas, serta ketangguhan fraktur yang jauh lebih superior, menjadikannya sangat ideal dalam menahan pembebanan dinamis pada aplikasi komponen permesinan industri manufaktur modern.

5. Temper 600°C

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, analisis kuantitatif terhadap spesimen uji baja karbon rendah St-42 pada temperatur 600°C memperlihatkan transformasi sifat mekanis yang sangat signifikan akibat perlakuan panas secara berlanjut. Pengujian tahap awal mencatatkan nilai kekerasan dasar rata-rata material sebesar 112,6 HRC. Melalui penerapan rekayasa permukaan *pack carburizing* yang memanfaatkan serbuk karbon cangkang kenari beserta *energizer* kalsium karbonat dari limbah cangkang kepiting, tingkat difusi atom karbon ke dalam struktur fasa austenit berlangsung secara sangat optimal. Pengaplikasian pendinginan cepat seketika mentransformasi fasa padat baja menjadi martensit yang sangat keras, dibuktikan dengan lonjakan kekerasan permukaan mencapai 138,7 HRC.



Gambar. 7. Grafik Temper 600°C

Akan tetapi, fasa martensit ini memiliki tegangan sisa yang memicu kegetasan ekstrem. Guna merelaksasi kerapuhan tersebut, spesimen diberikan perlakuan penemperan pada temperatur maksimum 600°C. Hasil pengujian pasca-penemperan membuktikan terjadinya degradasi nilai kekerasan paling drastis sebesar 13,375 poin menjadi 125,325 HRC. Secara metalurgi fisis, penurunan masif ini merupakan indikator mutlak bahwa material telah mencapai titik puncak fasa temper tahap keempat. Pada rentang temperatur kritis ini, struktur mikro material didominasi oleh laju aglomerasi karbida yang sangat agresif serta terjadinya proses sferoidisasi sementit secara menyeluruh. Dekomposisi mikro-struktural tersebut secara fundamental mengeliminasi kekakuan struktural martensit, sehingga spesimen baja St-42 berhasil memperoleh ekuilibrium mekanis baru dengan tingkat elastisitas, keuletan, dan ketangguhan fraktur maksimal

4. PENUTUP

4.1. Kesimpulan

Berdasarkan seluruh tahapan analisis data eksperimental dan integrasinya dengan tinjauan pustaka metalurgi fisis, berikut adalah kesimpulan mendalam yang dapat ditarik dari penelitian ini:

1. Efektivitas *Energizer* Biomaterial pada Proses Karburasi: Pemanfaatan biomaterial limbah cangkang kepiting yang mengandung kalsium karbonat (CaCO_3) sebesar 53,70-78,40% sebagai *energizer* pengganti Barium Karbonat (BaCO_3) dalam proses *pack carburizing* terbukti sangat efektif. Proses difusi karbon ke dalam fasa austenit yang dilanjutkan dengan pendinginan cepat (*direct quenching*) ini berhasil mentransformasi struktur logam menjadi martensit. Hal ini dibuktikan dengan lonjakan nilai kekerasan rata-rata permukaan baja St-42 dari 112,6 HRC menjadi kisaran puncak 138 HRC.
2. Korelasi Suhu Penemperan terhadap Sifat Mekanis: Terdapat korelasi empiris yang berbanding terbalik secara konsisten antara temperatur penemperan (*tempering*) dengan tingkat kekerasan permukaan material. Semakin tinggi suhu penemperan yang diaplikasikan pada spesimen baja St-42 pasca-karburasi, maka nilai kekerasan permukaannya akan semakin tereduksi, sementara tingkat keuletan dan kekenyalan bahan akan semakin meningkat.
3. Dinamika Transformasi Mikro-struktural Suhu Rendah dan Menengah: Penemperan pada suhu rendah (200°C – 300°C) hanya menghasilkan penurunan kekerasan yang marjinal. Pada rentang suhu ini (proses temper tahap pertama dan kedua), energi termal terfokus untuk merelaksasi tegangan sisa serta memicu presipitasi produk transisi kaya karbon (karbida epsilon) dan penguraian austenit sisa. Memasuki suhu menengah (400°C), pelunakan struktural berlanjut secara moderat sebagai akibat dari pembentukan dan pertumbuhan sementit.
4. Dekomposisi Fasa Martensit pada Suhu Tinggi: Degradasi nilai kekerasan yang paling drastis terekam pada perlakuan penemperan suhu tinggi (500°C – 600°C). Fenomena metalurgi fisis ini mengonfirmasi berlangsungnya proses temper tahap keempat. Pada fase kritis ini, laju aglomerasi (penggumpalan) karbida beroperasi sangat agresif dan dibarengi dengan proses sferoidisasi (pembulatan) sementit secara menyeluruh, yang secara fundamental melunakkan kekakuan fasa martensit.
5. Optimalisasi dan Kompromi Mekanis untuk Aplikasi Industri: Proses penemperan merupakan tahapan krusial untuk melunakkan kegetasan dan kerapuhan material pasca-pengejukan. Untuk kebutuhan komponen industri yang menuntut ketahanan aus permukaan maksimal, penemperan suhu rendah (200°C – 300°C) adalah parameter yang paling direkomendasikan. Sebaliknya, untuk komponen struktural permesinan yang lebih memprioritaskan ketangguhan terhadap fraktur serta kapasitas pembebanan dinamis, penemperan suhu tinggi (500°C – 600°C) memberikan keuletan yang paling superior.

4.2. Saran

Saran adalah mengungkapkan kondisi khusus yang harus dilakukan bila penelitian ini akan dilaksanakan ulang atau merupakan pernyataan yang merupakan pedoman untuk penelitian selanjutnya dari masalah ini. Saran ditulis dalam satu paragraph.

DAFTAR PUSTAKA

- Aksar, P., & Sudarsono, S. (2025). Pengaruh Penambahan Material *Energizer* Berbasis Kalsium Karbonat Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Pada Karburizing Baja Karbon Rendah. *DINAMIKA: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 16(2), 249–255.
- Asmuri, A., Fauzan, M., & Riyadi, T. W. (2021). Karakteristik Mekanik Baja ST 42 Pasca Proses Pack Carburizing dengan Variasi Media Pendingin. *Jurnal Material dan Proses Manufaktur*, 4(1), 45–52.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Wiley.
- Dieter, G. E., & Bacon, D. (2019). *Mechanical Metallurgy* (SI Metric Edition). McGraw-Hill Education.
- Prabowo, Y., & Santoso, A. B. (2020). Analisis Efisiensi Kalsium Karbonat dari Limbah Cangkang Hewan Laut sebagai Katalis pada Proses Karburasi Baja St-37. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 11(3), 321–329.
- Ramadhan, A., Haryadi, H., & Setiawan, B. (2022). Pengaruh Waktu Tahan dan Variasi Suhu pada Pack Carburizing Terhadap Kekerasan Baja Karbon Rendah. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 17(2), 112–118.
- Sujita, S., Nurchayati, N., & Hakim, L. (2023). Difusi Atom Karbon Pada Proses Pack Carburizing Baja Karbon Dengan Media Carburizer Arang Bio-Waste. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Universitas Brawijaya*, 9(1), 15–22.
- Sulistyo, M. E., & Setiawan, D. (2022). Pengaruh Pack Carburizing dengan Media Campuran Arang Cangkang Kemiri dan Serbuk Tulang Terhadap Ketangguhan Impak dan Struktur Mikro Baja ST-42. *Repository Universitas Mataram*.

- Utomo, B. S., & Raharjo, W. P. (2020). Analisa Pengaruh Proses Tempering Pada Baja ST 42 Terhadap Sifat Mekanis dan Tegangan Sisa. *Jurnal Mesin Material Manufaktur dan Energi*, 1(2), 75-81.
- Widiyanto, A., Susilo, S., & Wibowo, H. (2021). Optimasi Proses Tempering Terhadap Sifat Ketangguhan dan Kekerasan Baja Konstruksi ST 42 Pasca Quenching. *Jurnal Rekayasa Material Manufaktur dan Energi*, 4(2), 99-106.