

## Optimalisasi Kekerasan Baja ST-42 Melalui Karburasi Ramah Lingkungan Berbasis Biokarbonat Cangkang Kepiting dan Modulasi Suhu Tempering

Semuel M .J. S Tuny<sup>1)</sup>, H.S. Latumaerissa<sup>2)</sup> Meiti Leatemia<sup>3)</sup>

Nevada JM Nanulaitta<sup>4)\*</sup>, Graciadiana I Huka<sup>5)</sup>

<sup>1,2,3,4,5)</sup>Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ambon

[semuelsimson14@gmail.com](mailto:semuelsimson14@gmail.com), [hslatumaerissa@gmail.com](mailto:hslatumaerissa@gmail.com), [meitileatemia510@gmail.com](mailto:meitileatemia510@gmail.com)

[rio\\_nevada@yahoo.co.id](mailto:rio_nevada@yahoo.co.id), [graciahuka71@gmail.com](mailto:graciahuka71@gmail.com)

### ABSTRACT

ST-42 low-carbon steel inherently possesses limitations in its surface mechanical properties, particularly regarding hardness and wear resistance. This study aims to enhance the material's functionality through pack carburizing and tempering heat treatments, utilizing the innovation of crab shell waste which is rich in Calcium Carbonate (CaCO<sub>3</sub>) as a biogenic catalyst to replace the toxic synthetic Barium Carbonate (BaCO<sub>3</sub>). The carburizing process utilized a mixture of walnut shell charcoal and 30% crab shell powder, followed by rapid quenching in SAE 20-50 oil, and subsequent tempering at varying temperatures from 200°C to 600°C.

Hardness was evaluated using the Rockwell (HRC) method. The results demonstrated that the integration of the crab shell catalyst accelerated the Boudouard reaction via massive CO<sub>2</sub> emissions, significantly increasing the surface hardness by 22.80% to an average of 138.34, compared to a mere 10.49% increase achieved without a catalyst. During the tempering phase, heating within the 200°C – 400°C range resulted in a marginal hardness decrease due to the formation of fine carbide particles that maintained wear resistance while relaxing residual stresses.

Conversely, extreme heating at temperatures between 500°C – 600°C caused a drastic hardness reduction down to 125.325, driven by the dissolution of the rigid martensite structure into a ductile ferrite phase, accompanied by carbon spheroidization. In conclusion, crab shells are highly effective as an eco-friendly energizer that drastically boosts carbon diffusion, while modulating the tempering temperature provides precise control over the material's hardness-to-ductility balance.

*Key Words : St-42 low-carbon steel, pack carburizing, crab shell, tempering, Rockwell (HRC) method*

### ABSTRAK

Baja karbon rendah ST-42 secara inheren memiliki keterbatasan pada sifat mekanis permukaannya, khususnya pada aspek kekerasan dan ketahanan aus. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan fungsionalitas material tersebut melalui proses perlakuan panas karburasi padat (*pack carburizing*) dan *tempering*, dengan memanfaatkan inovasi limbah cangkang kepiting yang kaya akan Kalsium Karbonat (CaCO<sub>3</sub>) sebagai katalisator biogenik untuk menggantikan Barium Karbonat (BaCO<sub>3</sub>) yang beracun. Proses karburasi dilakukan menggunakan campuran arang kenari dan 30% serbuk cangkang kepiting, disusul dengan pendinginan kejut (*quenching*) menggunakan media oli SAE 20-50, serta pemanasan ulang (*tempering*) pada variasi suhu 200°C hingga 600°C.

Pengujian kekerasan diukur menggunakan metode Rockwell (HRC). Hasil penelitian membuktikan bahwa integrasi katalis cangkang kepiting mengakselerasi reaksi Boudouard melalui pelepasan gas CO<sub>2</sub> yang masif, sehingga mampu meningkatkan kekerasan permukaan secara signifikan sebesar 22,80% menjadi rata-rata 138,34, jauh melampaui proses tanpa katalis yang hanya meningkat 10,49%. Pada tahap *tempering*, pemanasan pada rentang 200°C – 400°C menunjukkan penurunan kekerasan yang marginal akibat pembentukan partikel karbida halus yang mampu mempertahankan ketahanan aus sambil merelaksasi regangan sisa.

Sebaliknya, pemanasan ekstrem pada suhu 500°C – 600°C memicu penurunan kekerasan secara drastis hingga 125,325 akibat peleburan struktur kaku martensit menjadi fasa ferit yang ulet, disertai fenomena sferoidisasi karbon. Kesimpulannya, cangkang kepiting terbukti sangat efektif sebagai *energizer* ramah lingkungan yang mendorong difusi karbon, sementara modulasi suhu *tempering* memberikan kontrol yang presisi terhadap keseimbangan sifat kekerasan dan keuletan material.

**Kata Kunci:** Baja St-42, Karburasi Padat, Katalis Biogenik, Cangkang Kepiting, *Tempering*, Kekerasan Rockwell

## PENDAHULUAN

Perkembangan peradaban manusia yang bergerak secara dinamis telah memicu transformasi besar dalam sektor teknologi dan industri manufaktur. Seiring dengan kemajuan tersebut, kebutuhan akan material yang memiliki performa tinggi, daya tahan yang unggul, serta efisiensi biaya menjadi prioritas utama bagi para praktisi metalurgi dan insinyur mesin. Logam, dalam berbagai variannya, telah menjadi pondasi utama dalam menunjang kebutuhan infrastruktur dan teknologi modern, di mana hampir seluruh instrumen pendukung kehidupan manusia melibatkan unsur logam di dalamnya. Dalam konteks ini, baja karbon tetap memegang posisi strategis sebagai material pilihan utama karena ketersediaannya yang melimpah, kemudahan dalam proses pembentukan, serta nilai ekonomis yang kompetitif dibandingkan dengan logam paduan lainnya.

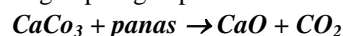
Baja St-42, yang merupakan bagian dari kategori baja karbon rendah dengan kandungan karbon berkisar antara 0,04% hingga 0,30%, sering kali menjadi tulang punggung dalam konstruksi umum, rangka kendaraan, serta berbagai komponen mesin. Meskipun memiliki keunggulan dalam aspek permesinan (*machinability*) dan keuletan, baja ini secara inheren memiliki keterbatasan signifikan pada sifat mekanis permukaannya, terutama dalam hal kekerasan dan ketahanan aus. Kebutuhan industri modern menuntut komponen yang tidak hanya kuat secara struktural, tetapi juga mampu bertahan menghadapi gesekan ekstrem dan pembebanan tiba-tiba, yang sering kali melampaui kemampuan alami baja karbon rendah tanpa perlakuan khusus.

Pentingnya melakukan penelitian mendalam mengenai modifikasi sifat mekanis baja St-42 didorong oleh tuntutan untuk meningkatkan fungsionalitas material tersebut dalam aplikasi yang lebih ekstrem. Sifat mekanis logam, seperti kekerasan, kekuatan tarik, keuletan, dan ketahanan lelah, merupakan parameter kritis yang menentukan masa pakai suatu komponen teknis. Namun, pada baja St-42, kekerasan permukaan yang rendah sering kali menyebabkan kegagalan prematur akibat keausan atau deformasi plastis pada bagian yang bersentuhan langsung dengan beban kerja.<sup>1</sup> Oleh karena itu, upaya untuk memperbaiki sifat fisik dan mekanis melalui proses perlakuan panas (*heat treatment*) menjadi sebuah keniscayaan ilmiah dan praktis.

Salah satu teknik yang paling efektif dan telah lama digunakan dalam industri metalurgi adalah proses karburasi (*carburizing*). Proses karburasi padat merupakan fenomena difusi termal di mana atom karbon bergerak dari media donor ke dalam kisi-kisi kristal besi saat material dipanaskan pada temperatur austenit (Adi Shaifudin, et al. 2018). Penggunaan arang kayu nani sebagai sumber karbon utama didasarkan pada kepadatan energinya dan kemampuannya untuk melepaskan gas karbon monoksida secara stabil selama proses pemanasan dalam furnace. Namun, laju penetrasi karbon murni sering kali berlangsung lambat, sehingga diperlukan katalisator atau energizer untuk mempercepat reaksi kimia di antarmuka gas-logam.

Secara tradisional, industri menggunakan Barium Karbonat ( $BaCO_3$ ) sebagai katalisator atau energizer dalam proses karburasi padat. Meskipun sangat efektif, penggunaan  $BaCO_3$  mulai mendapatkan perhatian kritis dari sudut pandang lingkungan dan kesehatan karena sifat toksisitasnya dan potensi pencemaran limbah industri yang dihasilkannya (Ihom Paul Aondona, et al. 2018). Di era industri hijau yang menekankan pada keberlanjutan, pencarian terhadap media alternatif yang lebih ramah lingkungan menjadi sangat mendesak (Ihom Paul Aondona, et al. 2018). Cangkang kepiting muncul sebagai kandidat potensial karena memiliki kandungan Kalsium Karbonat ( $CaCO_3$ ) yang sangat tinggi, berkisar antara 53,70% hingga 78,40%, yang secara kimiawi dapat berfungsi sebagai pengganti energizer industri.

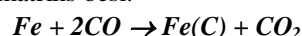
Peran energizer seperti  $BaCO_3$  atau  $CaCO_3$  dalam proses karburasi padat adalah melalui penyediaan pasokan gas karbon dioksida ( $CO_2$ ) yang akan bereaksi dengan arang panas untuk membentuk karbon monoksida (CO) dalam volume yang besar (Bagas Wildan Firmansyah, et al. 2024). Reaksi ini, yang dikenal sebagai reaksi Boudouard, merupakan kunci dari keberhasilan proses pengayaan karbon (Bagas Wildan Firmansyah, et al. 2024). Dekomposisi Kalsium Karbonat dari cangkang kepiting dapat dirumuskan sebagai berikut :



Gas  $CO_2$  yang dilepaskan kemudian bereaksi dengan atom karbon dari arang kayu nani :



Gas CO yang kaya akan menyentuh permukaan baja St-42 yang telah berada pada fase austenit, di mana atom karbon akan terurai dan berdifusi ke dalam matriks besi:



Sinergi antara arang kayu nani dan serbuk cangkang kepiting menciptakan lingkungan kimia yang sangat reaktif. Cangkang kepiting, selain mengandung  $CaCO_3$  sebagai komponen utama, juga memiliki struktur pori mikroskopis dan kandungan mineral jejak yang dapat bertindak sebagai akselerator difusi tambahan (Athanasius

Bayuseno). Hal ini menjadikan limbah organik tersebut bukan hanya sebagai pengganti yang ramah lingkungan, tetapi juga sebagai solusi teknis yang berpotensi meningkatkan efisiensi proses karburasi dibandingkan dengan penggunaan katalisator anorganik murni.

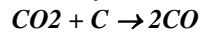
Kedalaman lapisan keras (*case depth*) yang terbentuk sangat dipengaruhi oleh temperatur pemanasan dan waktu penahanan (*holding time*) (Adi Shaifudin, et all. 2018). Pada temperatur tinggi sekitar 950°C, atom besi berada dalam struktur kristal FCC (*Face-Centered Cubic*) atau austenit, yang memiliki ruang antar-atom yang lebih besar dibandingkan struktur BCC (*Body-Centered Cubic*) pada suhu rendah (Achmad Syarief. 2006). Ruang ini memungkinkan atom karbon untuk melakukan penetrasi lebih dalam ke dalam struktur material (Adi Shaifudin, et all. 2018).

Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan media organik seperti arang tempurung kelapa atau kayu jati pada suhu 950°C dapat menghasilkan nilai kekerasan hingga 815,39 HV, jauh melampaui kondisi awal baja (Adi Shaifudin, et all. 2018). Dalam konteks baja ST-42, penggunaan arang kayu nani yang dikombinasikan dengan variasi komposisi cangkang kepiting diharapkan mampu memberikan profil kekerasan yang kompetitif untuk aplikasi teknis yang berat.

## TINJAUAN PUSTAKA

### Konsep Keilmuan Difusi Interstisial dan Rekristalisasi.

Prinsip utama dalam pemecahan masalah kekerasan baja ST-42 didasarkan pada teori difusi interstisial atom karbon ke dalam struktur kristal besi. Secara keilmuan, penambahan karbon dilakukan pada fase austenit karena struktur kristal FCC (*Face-Centered Cubic*) memiliki ruang antar atom yang lebih besar dibandingkan struktur BCC (*Body-Centered Cubic*), sehingga memungkinkan atom karbon berpenetrasi lebih dalam (Adi Shaifudin, et all. 2018). Sintesis lapisan keras ini melibatkan reaksi Boudouard sebagai mekanisme utama pembentukan gas CO yang stabil (Bagas Wildan Firmansyah. 2024):



### Metalurgi dan Karakteristik Material

Baja St-42 memiliki batasan intrinsik berupa kadar karbon yang rendah (0,07% - 0,25%), sehingga secara alami tidak dapat membentuk martensit melalui pendinginan cepat tanpa adanya proses karburasi awal (Arya Hoga Khadafi, et all. 2023). Sesuai norma DIN 17-100, baja ini dirancang untuk kekuatan tarik minimal 45 -50 kg/mm<sup>2</sup> namun memiliki ketahanan aus yang rendah. Batasan teknis dalam penelitian ini mencakup penggunaan suhu karburasi antara 825°C hingga 925°C untuk menghindari pertumbuhan butir yang berlebihan yang dapat menurunkan ketangguhan inti material.

### Norma Pengujian dan Validasi Kekerasan

Hasil penelitian diukur menggunakan norma pengujian kekerasan Rockwell (HRC) sesuai standar DIN 51225 dan ISO/R 146. Prinsip pengukurannya didasarkan pada kedalaman penetrasi indenter kerucut intan 120° dengan beban utama 150 kg. Nilai kekerasan dihitung melalui rumus normatif:

$$HRC = 100 - \frac{t}{0,002} \dots\dots\dots 1$$

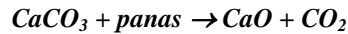
di mana *t* adalah kedalaman pembenaman menetap dalam milimeter. Penggunaan standar ini sangat krusial agar data hasil sintesis dapat dibandingkan secara valid dengan parameter industri global.

### Transformasi Fasa pada Proses Tempering

Proses karburasi padat merupakan fenomena difusi termal di mana atom karbon bergerak dari media donor ke dalam kisi-kisi kristal besi saat material dipanaskan pada temperatur austenit. Penggunaan arang kayu nani sebagai sumber karbon utama didasarkan pada kepadatan energinya dan kemampuannya untuk melepaskan gas karbon monoksida secara stabil selama proses pemanasan dalam furnace. Namun, laju penetrasi karbon murni sering kali berlangsung lambat, sehingga diperlukan katalisator atau energizer untuk mempercepat reaksi kimia di antarmuka gas-logam.

## Mekanisme Energizer

Peran energizer seperti BaCO<sub>3</sub> atau CaCO<sub>3</sub> dalam proses karburasi padat adalah melalui penyediaan pasokan gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang akan bereaksi dengan arang panas untuk membentuk karbon monoksida (CO) dalam volume yang besar. Reaksi ini merupakan kunci dari keberhasilan proses pengayaan karbon. Dekomposisi Kalsium Karbonat dari cangkang kepiting dirumuskan sebagai berikut (Bagas Wildan Firmansyah, 2024):



Sinergi antara arang kayu nani dan serbuk cangkang kepiting menciptakan lingkungan kimia yang sangat reaktif. Cangkang kepiting, selain mengandung CaCO<sub>3</sub> sebagai komponen utama (53,70%-78,40%), juga memiliki mineral jejak yang bertindak sebagai akselerator difusi tambahan. Hal ini menjadikan limbah organik tersebut bukan hanya sebagai pengganti yang ramah lingkungan, tetapi juga sebagai solusi teknis yang meningkatkan efisiensi proses karburasi dibandingkan dengan penggunaan katalisator anorganik murni (Graciadiana I Huka, et al. 2025).

## Optimalisasi Kedalaman Karburasi

Kedalaman lapisan keras (*case depth*) yang terbentuk sangat dipengaruhi oleh temperatur pemanasan dan waktu penahanan (*holding time*). Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan media organik pada suhu 951°C dapat menghasilkan nilai kekerasan yang jauh melampaui kondisi awal baja (Adi Shaifudin, et al. 2018). Dalam konteks baja St-42, penggunaan arang kayu nani yang dikombinasikan dengan variasi komposisi cangkang kepiting diharapkan mampu memberikan profil kekerasan yang kompetitif untuk aplikasi teknis yang berat (Graciadiana I Huka, et al. 2025).

## Proses Tempering pada Baja

Setelah proses karburasi selesai, material harus segera didinginkan dengan cepat (*quenching*) untuk mencegah atom karbon yang telah berdifusi keluar kembali dari struktur mikro baja. *Quenching* mengubah fase austenit menjadi fase martensit, sebuah struktur kristal BCT (*Body-Centered Tetragonal*) yang sangat keras. Media pendingin yang dipilih adalah oli SAE 20-50, yang memiliki laju pendinginan lebih lambat dibandingkan air namun lebih stabil untuk meminimalisir risiko distorsi atau keretakan.

Tempering adalah proses pemanasan kembali di bawah suhu kritis A<sub>1</sub>, disusul dengan pendinginan perlahan. Tujuan utama proses ini adalah menghilangkan tegangan dalam, meningkatkan keuletan, dan menyesuaikan kekerasan sesuai kebutuhan aplikasi (Febro Maidefri. 2013).

**Tabel 1: Analisis Sintesis Sifat Mekanis Berdasarkan Variasi Termal Tempering**

Rentang Suhu (°C)	Fenomena Mikrostruktural	Hasil Mekanis
200 - 300	Penguraian austenit sisa; pembentukan karbida epsilon	Kekerasan tetap tinggi, ketangguhan mulai naik (Johana C.C. Sekeroney, et al. 2023)
300 - 400	Pertumbuhan sementit; pembentukan troostit	Keseimbangan kekuatan dan keuletan (Ihsan Saputra, et al. 2020)
400 - 600	Sferoidisasi sementit; pembentukan sorbite	Kekerasan turun signifikan, keuletan maksimum (A. P. Putra, et al. 2020)

Integrasi cangkang kepiting sebagai energizer merupakan respons terhadap pergeseran global menuju industri hijau. Sektor manufaktur saat ini menghadapi tekanan regulasi seperti PPWR yang mendorong pengurangan bahan kimia industri berbahaya seperti Barium Karbonat dan peningkatan pemanfaatan limbah. Cangkang kepiting mengandung biokarbonat yang sangat efektif untuk meningkatkan difusi karbon pada baja (Graciadiana I Huka, et

all. 2025). Pemanfaatan sumber daya lokal ini menurunkan biaya produksi dan memberikan solusi terhadap permasalahan limbah organik (Ihom Paul Aondona, et al. 2018).

## METODOLOGI

1. Persiapan Sampel dan Media Termokimia Bahan baku utama yang digunakan adalah pelat baja karbon rendah klasifikasi ST-42. Material mentah ini dipotong dan dibentuk menjadi 15 buah spesimen uji perlakuan panas, di mana setiap spesimen memiliki dimensi panjang 60 mm, lebar 30 mm, dan ketebalan 4 mm. Sebagai media pendonor karbon (karburator), penelitian ini menyiapkan serbuk arang dari cangkang kenari yang dicampur dengan katalisator biogenik berupa cangkang kepiting ( $\text{CaCO}_3$ ). Rasio pencampuran yang digunakan adalah 30% katalisator cangkang kepiting untuk setiap 1 kg karbon arang kenari.
2. Pengujian Kekerasan Awal (*Baseline*) Sebelum diberikan perlakuan panas apa pun, seluruh benda uji diampelas hingga permukaannya bersih untuk mendapatkan nilai kekerasan dasar (*baseline*). Pengukuran ini dilakukan pada suhu ruangan awal ( $27^\circ\text{C}$ ) menggunakan mesin penguji kekerasan *Mitutoyo Type AR-20*. Pengujian menggunakan metode Rockwell (dengan satuan HRC) yang mengaplikasikan beban sebesar 150 kgf menggunakan indenter berbentuk kerucut intan (diamond penetrator). Untuk memastikan akurasi dan homogenitas, pengujian kekerasan dilakukan secara berulang pada berbagai titik spesimen.
3. Tahap Karburasi Padat (Pack Carburizing) dan Pendinginan Kejut (Quenching) Ke-15 spesimen baja dimasukkan ke dalam kotak sementasi baja yang telah diisi dengan campuran media arang kenari dan katalisator cangkang kepiting, lalu ditutup rapat. Kotak tersebut kemudian dimasukkan ke dalam oven pemanas (*Barmsteel Thermoline Type F-6000*). Dalam proses ini, waktu penahanan panas (*holding time*) yang diterapkan adalah selama 15 menit. Segera setelah waktu penahanan selesai, spesimen dikeluarkan dari tungku dan langsung didinginkan secara kejut (*quenching*) dengan cara dicelupkan ke dalam wadah berisi media fluida pendingin berupa Oli SAE 20-50. Setelah proses pendinginan ini, spesimen dibersihkan kembali dan diuji kekerasannya untuk mencatat tingkat kekerasan pasca-karburasi.
4. Tahap Modulasi Termal melalui Tempering Spesimen yang telah mengeras kemudian dipisahkan menjadi 5 kelompok uji, di mana setiap kelompok terdiri dari 3 buah spesimen. Masing-masing kelompok ini diberikan perlakuan pemanasan ulang (*tempering*) dengan suhu yang diisolasi secara spesifik, yakni pada suhu  $200^\circ\text{C}$ ,  $300^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$ ,  $500^\circ\text{C}$ , dan  $600^\circ\text{C}$ . Berbeda dengan perlakuan karburasi yang didinginkan secara mendadak, setelah waktu penahanan tempering selesai, spesimen-spesimen tersebut didinginkan secara perlahan-lahan di udara terbuka hingga kembali mencapai suhu ruangan.
5. Pengumpulan Data Akhir Pada tahap final, setelah semua spesimen tempering mencapai suhu ruang dan permukaannya kembali dibersihkan, pengujian kekerasan tahap akhir dilakukan kembali menggunakan mesin dan indenter intan Rockwell yang sama. Hasil dari pengujian final ini kemudian dicatat secara tertib pada lembar pengamatan untuk selanjutnya dikomparasi dan dianalisis tingkat penurunannya (*softening effect*) akibat variasi suhu penemperan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Bertentangan dengan persepsi intuitif, transfer karbon ke dalam baja selama karburasi padat tidak terjadi melalui kontak fisik (*solid-state diffusion*) langsung antara serbuk arang dan permukaan baja. Sebaliknya, mekanisme aktualnya difasilitasi oleh reaktan fasa gas yang terbentuk di dalam kotak karburasi (*carburizing box*) (Shultoni. Et al. 2021). Proses ini dikatalisasi oleh oksigen ambien yang terperangkap dalam tumpukan media. Pada awal pemanasan, karbon padat dari arang kenari teroksidasi:



Gas  $CO_2$  ini kemudian bereaksi kembali dengan persediaan arang kenari pijar yang berlimpah dalam sebuah mekanisme fundamental yang dikenal sebagai Reaksi Boudouard (*Boudouard equilibrium*):



Menurut prinsip termodinamika Le Chatelier, karena reaksi Boudouard bersifat endotermik, peningkatan suhu secara artifisial ke wilayah austenitisasi karburasi (seperti  $900^\circ\text{C}$  -  $950^\circ\text{C}$ ) akan menggeser ekuilibrium reaksi secara

dominan ke arah kanan, mereduksi CO<sub>2</sub> dan memicu evolusi volume gas karbon monoksida (CO) yang masif dan sangat reaktif (Shultoni. Et all. 2021).

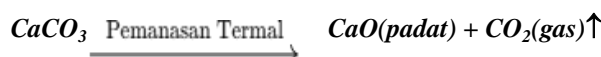
Fluks gas CO inilah yang secara langsung bertanggung jawab atas rekayasa permukaan baja. Saat molekul CO membentur dan teradsorpsi secara fisikokimia (*chemisorption*) pada antarmuka gas-austenit dari baja ST-42, mereka terdisosiasi. Reaksi perengkahan permukaan ini mendepositkan atom karbon elementer (*nascent carbon*) aktif yang secara langsung bermigrasi ke dalam kisi FCC baja, sementara atom oksigen bereaksi dengan molekul CO lain untuk membentuk CO<sub>2</sub>, mengulangi siklus reaksi Boudouard (Shultoni. Et all. 2021).



Namun, reaktivitas dari oksigen residu terbatas, dan laju murni reaksi Boudouard berbasis arang murni sering kali tidak cukup agresif untuk membangun potensial karbon (carbon potential) yang optimal di atmosfer tungku (Shultoni. Et all. 2021). Kecepatan adsorpsi permukaan dapat terhambat, menghasilkan lapisan karburasi (*case depth*) yang dangkal dan transisi kekerasan yang landai (Nanse. H. Pattiasina, et all. 2011). Untuk mengakselerasi kinetika gas inilah industri menggunakan katalisator, atau *energizer*.

Penggunaan 30% cangkang kepiting sebagai *energizer* pendamping 70% arang kenari merepresentasikan inovasi strategis dalam metalurgi berkelanjutan. Secara tradisional, industri bergantung pada garam anorganik seperti Barium Karbonat (BaCO<sub>3</sub>) dan Natrium Karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) untuk mempercepat reaksi karburasi (Sujita Sujita & Rudy Sutanto. 2025). Namun, paparan dekomposisi barium termal menimbulkan ancaman toksisitas logam berat yang signifikan pada rantai pasokan dan limbah akhir (K. Mohammed Umar. 2025). Cangkang biota laut purba, termasuk kepiting, kerang, dan limbah cangkang telur unggas, hampir secara eksklusif (hingga 97%) tersusun dari biomassa Kalsium Karbonat (CaCO<sub>3</sub>) (Sergei Strl'makh, et all. 2022).

Peran utama CaCO<sub>3</sub> cangkang kepiting teraktivasi pada rentang suhu tinggi melalui dekomposisi termal atau kalsinasi. Studi termogravimetri (TGA) komparatif antara Kalsium Karbonat biogenik dan kalsium karbonat laboratorium standar (*synthetic grade*) menunjukkan dinamika stabilitas termal yang unik. Sementara kalsium karbonat sintesis terdekomposisi tajam pada sekitar 749°C, biomineral seperti cangkang telur dan kepiting mendemonstrasikan pergeseran puncak dekomposisi yang sedikit tertunda hingga 771°C (Yoga Pengestu Lila Maulana, et all. 2025). Keterlambatan dan pelebaran kurva kalsinasi ini (akibat keberadaan jejak mineral minor seperti fosfat, mangan, dan matriks sisa protein kitin) justru memberikan keuntungan kinetik, yakni pasokan pelepas gas CO<sub>2</sub> yang lebih persisten dan bertahan lama selama fase penahanan panas (*holding time*) (Yoga Pengestu Lila Maulana, et all. 2025). Persamaan reaksi aktivasi energizer adalah:



Ledakan pelepasan CO<sub>2</sub> internal secara masif dari partikel cangkang kepiting ini mendisrupsi atmosfer lokal di dalam kotak karburasi. Konsentrasi CO<sub>2</sub> sekunder yang melimpah ini memaksa laju reaksi Boudouard maju (CO<sub>2</sub> + C → 2CO) untuk berakselerasi dalam skala eksponensial. Hal ini mendongkrak "tekanan parsial" gas Karbon Monoksida (*P<sub>CO</sub>*) secara drastis, sehingga fluks massa difusi atom karbon ke dalam antarmuka baja meningkat tajam melampaui hambatan laju intrinsiknya (Oluwaseyi Adedipe, et all. 2023). Selain itu, kalsium oksida (*CaO*) berpori yang tersisa bertindak sebagai adsorben penangkap terak mikroskopis, mencegah penyumbatan jalur difusi permukaan baja (Yoga Pengestu Lila Maulana, et all. 2025).

*Efisiensi absolut* dari katalis cangkang kepiting tidak sebatas pada postulat teoretis. Data pengujian komparatif dari 120 observasi eksperimental memvalidasi secara meyakinkan dampak rekayasa kinetika reaksi pada profil mekanis. Pengujian ini secara ketat membandingkan capaian kekerasan material menggunakan media donor arang tunggal tanpa intervensi (arang saja) melawan proses termokimia biner yang dikatalisasi oleh serbuk biomineral CaCO<sub>3</sub> (kulit kepiting).

**Tabel 2: Komparasi Analitis Kinerja Katalis Cangkang Kepiting terhadap Arang Konvensional**

Variabel Perlakuan	Jumlah Sampel	Rata-rata Kekerasan	Rata-rata Kekerasan	Peningkatan Kekerasan	Persentase Efektivitas	Rentang Nilai
--------------------	---------------	---------------------	---------------------	-----------------------	------------------------	---------------

Pack Carburizing	(n)	Awal	Akhir	Rata-rata ( $\Delta$ )	Relatif (%)	Puncak
Arang Saja (Tanpa Katalis)	30	112,65	124,47	+ 11,82 poin	$\sim$ 10,49 %	121,00 – 127,50
Arang + Katalis (Cangkang)	30	112,65	138,34	+ 25,69 poin	$\sim$ 22,80 %	136,50 – 140,00

Interpretasi statistik dari Tabel 2 mengungkapkan disparitas kemanjuran yang krusial. Transformasi termokimia tanpa bantuan katalis hanya mampu mendorong penetrasi karbon marginal, terefleksi pada peningkatan kekerasan komposit (permukaan dan inti) sebesar 10,49% (berhenti di rata-rata 124,47). Keterbatasan ini menegaskan bahwa laju generatif gas CO hanya bergantung pada reaksi oksidasi oksigen residu yang cepat habis. Sebaliknya, integrasi katalis kalsium karbonat menstimulasi kelebihan reaktan karbon, mempertebal lapisan kasing *hiper-eutektoid* (*hyper-eutectoid case layer*) dan mengakselerasi kekerasan puncak hingga melonjak ke angka rata-rata 138,34. Lonjakan persentase efektivitas yang mencapai lebih dari dua kali lipat (22,80% berbanding 10,49%) secara empiris mengukuhkan bahwa limbah cangkang krustasea memiliki otoritas reaktivitas metalurgi yang setara atau melebihi agen kimia Barium komersial, membuka koridor menuju standarisasi proses industrial yang bebas racun (Oluwaseyi Adedipe, et al. 2023). Evaluasi konsistensi sebaran (*dispersion consistency*) juga membuktikan bahwa deviasi pada sampel dengan katalis sangat sempit (tertinggi 140, terendah 136,5), mengindikasikan pemerataan distribusi gas termokimia (*uniform gas distribution*) yang luar biasa di dalam medium.

Ketika material yang tersaturasi karbon tinggi ditarik dari tungku dan langsung di-*quench*, laju ekstraksi termal melampaui laju pendinginan kritis (*critical cooling rate*) termodinamika besi (Bowen Liu, et al. 2019). Penurunan temperatur yang terjadi dalam hitungan fraksi detik merampas energi kinetik atomik yang dibutuhkan oleh unsur karbon untuk berdifusi keluar dari kisi interstisialnya (Qingliqng Li, et al. 2025). Akibatnya, kisi *Face-Centered Cubic* (FCC) Austenit tidak memiliki jeda temporal untuk mengkonversi diri secara polimorfik kembali menjadi kisi ferit (BCC) dan sementit ekuilibrium ( $Fe_3C$ ) seperti pada pendinginan lambat di udara terbuka (*annealing/normalizing*).

**Tabel 3: Dinamika Degradasi Kekerasan Termal Pasca-Karburasi Melalui Variasi Suhu Tempering**

Spesimen	Suhu Tempering (°C)	Evaluasi Sampel (n)	Rata-Rata As-Quenched (Kekerasan Pasca Karburasi)	Rata-Rata Pasca-Tempering Akhir	Delta Kekerasan ( $\Delta$ )	Analisis Tren Deviasi Penurunan
Benda I	200°C	20	138,425	136,775	- 1,650	Minor, resistensi stabil
Benda II	300°C	20	138,112	135,525	- 2,587	Marginal, awal pelunakan

<b>Benda III</b>	400°C	20	138,350	134,975	- 3,375	Menengah, transisi struktur
<b>Benda IV</b>	500°C	20	138,350	128,425	- 9,925	Signifikan, keruntuhan BCT
<b>Benda V</b>	600°C	20	138,700	125,325	- 13,375	Ekstrem, mendekati raw material

Alih-alih terjadi presipitasi termodinamika normal, matriks atomik baja memaksakan suatu pergeseran kompromi mekanik asimetris seketika (*diffusionless martensitic shear transformation*). Karbon yang terperangkap (*trapped supersaturated carbon atoms*) memaksa rusuk-rusuk dari sel satuan kristal untuk mengembang dan memanjang secara sepihak ke satu sumbu (sumbu c), menghasilkan pembentukan fasa metastabil baru yang terdistorsi secara parah, yakni Martensit dengan struktur Body-Centered Tetragonal (BCT) (Qingliqng Li, et all. 2025).

Di dalam mikroskop elektron transmisi (TEM), struktur BCT martensit karburasi memanifestasikan morfologinya sebagai plat-plat jarum (*lath or plate martensite*) bersilangan yang saling bertabrakan, menciptakan kepadatan dislokasi (*dislocation density*) yang fenomenal tinggi serta regangan kisi internal makroskopis yang brutal (Qingliqng Li, et all. 2025). Regangan mekanik ekstrem di tingkat atom ini memblokir secara efektif pergerakan setiap pergeseran bidang dislokasi tambahan jika baja dibebani gaya dari luar (Zhenyang Zhang, et all. 2024). Fenomena "keterkuncian dislokasi" (*dislocation pinning/locking*) komprehensif inilah yang menjadi penjelas mikroskopis mengapa pembacaan penetrasi indentasi (kekerasan) pada baja ST-42 yang semulanya bernilai 112,6 meroket secara seragam menjadi ~138,4.

Terlepas dari ketahanan ausnya (*wear resistance*) yang impresif, dominasi struktur BCT martensit "as-quenched" membawa kerugian agresi laten berupa kerapuhan ekstrim layaknya keramik kaca (*glass-like brittleness*) dan kerentanan terhadap inisiasi retak tegangan sisa (*residual stress cracking*).<sup>26</sup> Untuk memulihkan ketangguhan dampak (*impact toughness*), keuletan (*ductility*), serta mengembalikan stabilitas proporsi dimensi komponen struktural tanpa mengorbankan total utilitas pengerasan permukaan, fasa metastabil martensit harus didekomposisi dengan sengaja melalui aktivasi termal sub-kritis lanjutan: Tempering (Leo Van Gunawan, et all. 2024).

Penelitian ini mengeksplorasi secara terperinci respons dekomposisi struktur mikro baja terhadap injeksi termal tempering secara berjenjang dari 200°C hingga puncaknya pada 600°C. Modulasi *termal* ini diklasifikasikan ke dalam lima subset spesimen (Benda I hingga Benda V). Analisis statistik yang disajikan dalam Tabel 3 menyoroti dinamika pelemahan atau pelunakan struktural (*softening behavior*) untuk memetakan kinetika metalurginya

#### 1. Fasa Stabilisasi Tegangan Mikro dan Presipitasi Karbida Transisi (Tempering 200°C - 300°C)

Injeksi termal rendah pada spektrum 200°C menghasilkan peluruhan kekerasan yang sangat minor secara observasional (rata-rata penurunan dari ~138,4 menjadi ~136,7). Pada interval energi kinetik yang sangat dibatasi ini (memodelkan tahap tempering klasikal tingkat pertama), atom-atom substitusional Fe pada matriks belum memiliki cukup mobilitas termal untuk memfasilitasi rekristalisasi masif (Qingliqng Li, et all. 2025). Energi difusi utamanya dimonopoli oleh atom karbon interstisial berukuran kecil yang sangat lincah bergerak (Pawel Kochmański, et all. 2024). Sebagian kecil dari atom karbon yang jenuh (*supersaturated*) dalam matriks tetragonal berdesakan mulai melepaskan diri (*segregation*), memungkinkan struktur BCT untuk merelaksasi sebagian kecil dari parameter distorsi sumbu "c" nya menjadi martensit karbon rendah (*low-carbon tempered martensite*) yang sedikit lebih fleksibel untuk menyerap energi kejut lentur.

Fenomena yang jauh lebih krusial pada tahap ini adalah karbon interstisial yang tersekskresi tersebut tidak bertransformasi menjadi sementit ekuilibrium ( $Fe_3C$ ), melainkan berpresipitasi menjadi partikel karbida sub-mikroskopis transisional, yang secara metalurgis diidentifikasi sebagai epsilon karbida ( $\epsilon$ -carbide,  $Fe_{24}C$ ) bersusunan Heksagonal (*Close-Packed*) atau eta karbida ( $\eta$ -carbide) (Qingliqng Li, et al. 2025). Pembentukan jaring halus nanopartikel karbida metastabil ini mempertahankan ikatan yang koheren (*coherent lattice interface*) dengan matrik martensit di sekelilingnya. Ikatan matriks koheren ini sangat esensial karena ia menginduksi medan regangan (*strain field*) lokal tambahan yang secara efektif menghambat gelinciran pergerakan dislokasi (*dislocation slip motion*) apabila terjadi pembebanan benturan kontak. Fenomena metalurgis yang disebut mekanisme penguatan presipitasi (*precipitation hardening mechanism*) ini mengkompensasi kerugian kekerasan akibat hilangnya tegangan makro awal (Qingliqng Li, et al. 2025). Kondisi ekuilibrium penahanan dislokasi (*pinning effect*) inilah yang menyebabkan nilai uji indentor hanya terkikis sebanyak 1,6 poin.

Ketika penemperan dinaikkan ke ambang tempering tingkat dua ( $300^{\circ}C$ ), percepatan eksudasi atom karbon meningkat moderat dan nilai kekerasan perlahan meluncur menuju rata-rata  $\sim 135,5$ . Di fase termal transisi ini, fraksi austenit sisa (*retained austenite*) yang merupakan sisa fasa tak bertransformasi pada proses quenching, yang semulanya melingkupi tepian lath martensitik sebagai film lunak pengikat, pada akhirnya terurai melalui dekomposisi isothermal membentuk susunan kompleks dari fasa Bainit Bawah (*lower bainite*) yang kuat dan padat (Qingliqng Li, et al. 2025). Transformasi mikrostruktural simultan ini menopang tingkat kekuatan tarik dan meningkatkan daya tahan penjalaran retak (*fatigue crack propagation resistance*) komponen baja secara komprehensif tanpa menjatuhkan angka ukur kekerasan secara radikal (Peter Jurči, et al. 2023).

## 2. Transisi Sementit Ortorombik dan Nukleasi Sferoidisasi (Tempering $400^{\circ}C$ )

Menembus dinding energi termal  $400^{\circ}C$ , representasi statistik degradasi uji indentasi mencapai pergeseran yang lebih kasatmata di angka penurunan 3,3 poin (berlabuh pada rata-rata  $\sim 134,9$ ). Memasuki fase tempering level tiga ini, ambang batas termodinamika kestabilan fasa menengah telah terlewati secara mutlak (Marcel Freitas de Souza, et al. 2022). Karbida koheren metastabil tipe epsilon yang selama ini mensubstitusi efek kekerasan secara artifisial, terputus ikatan antar-muka latisinya (*loss of coherency*) dan larut seutuhnya.

Atom-atom karbon berdifusi jarak jauh melintasi ruang batas butir, berikatan dengan besi atomik untuk nukleasi fasa endapan final yang stabil, yakni kristal Sementit Ortorombik ( $Fe_3C$ ). Eksodus masif dan tuntas dari pengotor atom interstitial ini secara final mengeliminasi seluruh tetragonalitas BCT martensit *as-quenched* yang tersisa; struktur dasar matriks berevolusi kembali pada formasi kubus pusat ruangnya yang damai secara regangan (BCC *Ferrite matrix*). Kekerasan permukaan pada tahap  $400^{\circ}C$  masih dinilai substansial karena pertumbuhan sementit yang terbentuk di batas butir baru berada pada skala nukleasi awal. Sementit ini berbentuk butiran lamelar patah dan cakram *sferoid elips* sub-mikroskopis yang beraglomerasi lekat (*fine globular cementite network*) di lautan matriks feritik, menghasilkan efek difraksi dan penyebaran dislokasi (*dispersion strengthening*) sekunder (Peter Jurči, et al. 2023).

Karena regangan matriks BCT hilang namun hambatan butiran karbida tersebar padat, keseimbangan daktilitas tegangan tarik optimum mulai menonjol (Himra Manro Sinaga & Dr. Ir. Victor Malau, DEA. 2016). Pada kondisi tertentu dengan resep paduan baja kelas tinggi (berkandungan Kromium, Molibdenum, dan Vanadium berlimpah di atas 2%), parameter suhu  $400^{\circ}C$  -  $500^{\circ}C$  justru akan menyulut formasi karbida paduan (*alloy carbides*) keras skala nano (seperti  $Mo_2C$  atau VC), yang akan berpresipitasi menyundul kurva kekerasan menjadi melonjak tinggi untuk kedua kalinya dalam fenomena "Pengerasan Sekunder" (*Secondary Hardening Phenomenon*) (Marcel Freitas de Souza, et al. 2022). Namun demikian, klasifikasi ST-42 yang merupakan arketipe baja karbon ringan murni praktis absen dari fraksi unsur logam pembentuk karbida keras spesifik. Dengan ketiadaan presipitat aloi pengganti, grafik observasi pengujian mekanik menaati hukum penyusutan normal, terus melandai sesuai tren agregasi partikel karbon.

## 3. Dinamika Pematangan Ostwald dan Aglomerasi Fasa Kasar (Tempering $500^{\circ}C$ - $600^{\circ}C$ )

Anomali peluruhan tajam paling eksponensial dalam matriks data Benda IV dan Benda V terdeteksi saat pemanasan menginfiltrasi domain suhu temper sangat tinggi di rentang  $500^{\circ}C$  hingga  $600^{\circ}C$ , mencatatkan kejatuhan uji kekerasan konstan masing-masing 9,9 dan 13,3 poin (mendarat di dasar lembah 128,4 dan 125,3 unit). Kejatuhan drastis dan pelandaian asimtotik (*steep softening curve*) kurva regresi ini

didorong secara simultan oleh minimisasi luas energi permukaan berbasis termodinamika yang dikarakterisasi sebagai kinetika Pematangan Ostwald (*Ostwald Ripening mechanism*) dan proses rekonfigurasi rekristalisasi ferit (Qingliqng Li, et all. 2025).

Pada suhu pijar di atas 500°C, mobilitas interstisial molekul C dan difusivitas subsitusional ikatan logam besi mencapai tahap hiperaktif secara metalurgi (Arif Rizki Gunawan, et all. 2019). Ratusan ribu sementit Fe<sub>3</sub>C mungil dan halus yang tadinya menyebar merata bagai kabut penahan dislokasi akan terekstraksi dan terurai satu demi satu karena instabilitas energi permukaan luasnya (*high surface energy curvature dissolution*). Atom-atom karbon sisa uraian tersebut berenang melalui media padat batas butir, hanya untuk menempel menggemukkan kristal sementit bola makroskopis lain di sekitarnya yang memiliki radius partikel lebih masif (Qingliqng Li, et all. 2025).

Konsekuensi logisnya, matriks berubah dari ribuan penghalang jalan dislokasi kecil menjadi segelintir penghalang bulat berukuran bongkahan batu besar yang berjarak berjauhan (*coarsened spheroidal carbide aggregates*). Jalan bebas hambatan panjang antar karbida besar ini memanjakan matriks dislokasi kristal (*mean free path expansion*) untuk bergeser tanpa halangan saat baja ditusuk jarum indenter kekerasan, yang mana hal ini sangat menjatuhkan parameter angka uji secara numerik (Zhenyang Zhang, et all. 2024).

4. Hubungan Media Karburasi terhadap Lonjakan Kekerasan Awal Pada tahap awal sebelum perlakuan panas, seluruh sampel baja ST-42 pengujian memiliki stabilitas nilai kekerasan dasar rata-rata di angka 112,65. Modifikasi media karburasi memiliki dampak peningkatan kekuatan mekanis yang sangat kontras:
  - a) Tanpa Katalis (Hanya Arang): Proses difusi karbon ke dalam baja berjalan lambat, sehingga peningkatan kekerasan yang didapat pasca-pendinginan kejut (*quenching*) hanya naik sebesar kurang lebih 10,5% menjadi nilai rata-rata 124,47.
  - b) Dengan Katalis (Arang + Cangkang Kepiting): Penambahan material biogenik bertindak sebagai pemercepat (*energizer*) reaksi. Efektivitas peningkatan kekerasan melonjak signifikan lebih dari dua kali lipat, yakni sekitar 22,8% mencapai nilai rata-rata 138,34. Hal ini memvalidasi bahwa katalis menstimulasi fluks difusi karbon yang jauh lebih padat ke dalam permukaan baja, menciptakan struktur martensit yang sangat keras dan tangguh.
5. Hubungan Suhu Tempering terhadap Kurva Pelunakan (*Softening*) Setelah baja mencapai kekerasan puncaknya pasca-karburasi (di kisaran angka 138), variasi pengujian suhu tempering menunjukkan hubungan yang berbanding terbalik secara non-linear dengan tingkat kekerasan. Semakin tinggi injeksi suhu tempering yang diberikan, nilai kekerasan permukaan akan semakin melandai turun. Analisis tren penurunan fasa ini terbagi secara jelas ke dalam dua zona:
  - a) Fase Penurunan Marginal (Suhu Rendah - Menengah: 200°C hingga 400°C) Pada interval suhu ini, nilai kekerasan ditahan agar tidak merosot tajam. Dari titik 138,425, pemanasan suhu 200°C hanya menurunkannya sedikit ke angka rata-rata 136,775. Pada suhu 300°C kekerasan turun perlahan di 135,525, dan berlanjut ke 134,975 pada suhu 400°C. Secara mekanis, energi termal di tahap ini difokuskan untuk merelaksasi regangan atau tegangan sisa di dalam material agar tidak rapuh (getas), namun kekerasan tetap ditopang oleh pembentukan partikel karbida halus yang tersebar di area matriks baja.
  - b) Fase Penurunan Drastis (Suhu Tinggi: 500°C hingga 600°C) Ketika suhu tempering didorong secara ekstrem melewati 400°C, grafik kekerasan melandai turun dengan tingkat kemiringan yang curam. Rata-rata kekerasan anjlok drastis menyentuh angka 128,425 pada pemanasan 500°C, dan mencapai titik terendahnya yang mendekati nilai material mentah, yakni 125,325 pada perlakuan 600°C. Pada derajat panas ini, struktur martensit yang kaku telah meleleh dan bertransformasi kembali menjadi fasa ferit yang ulet. Selain itu, sebaran karbon mengalami penggumpalan (*sferoidisasi*) menjadi butiran makroskopis, sehingga ruang bebas hambatan membesar dan kekerasan material lenyap berganti dengan ketangguhan kelenturan yang tinggi.

Secara garis besar, hubungan mekanis dari berbagai variasi ini membuktikan bahwa batas ketahanan aus material dikendalikan secara mutlak oleh volume difusi dari katalis biologis saat karburasi. Sementara itu, tingkat keuletan impaknya dapat diprogram secara presisi dengan memainkan skala jenjang derajat dari sub-suhu tempering.

## PENUTUP

## Kesimpulan

1. Keunggulan Katalis Biogenik: Limbah cangkang kepiting ( $\text{CaCO}_3$ ) terbukti menjadi katalisator ramah lingkungan yang jauh lebih unggul dibandingkan proses tanpa katalis. Penggunaan campuran arang kenari dan cangkang kepiting mampu melonjatkan efektivitas kekerasan baja St-42 hingga 22,80% (mencapai rata-rata 138,34), berbanding terbalik dengan proses tanpa katalis yang hanya meningkat sebesar 10,49% (rata-rata 124,47).
2. Akselerasi Reaksi Kimia: Ledakan pelepasan gas  $\text{CO}_2$  secara masif dari dekomposisi termal cangkang kepiting secara efektif mempercepat reaksi Boudouard. Hal ini mendongkrak difusi atom karbon ke dalam antarmuka baja, menciptakan struktur martensit yang sangat keras.
3. Pengendalian Sifat Mekanis via *Tempering*: Tingkat keuletan dan kekerasan baja dapat diprogram secara presisi dengan memodulasi suhu *tempering*.
4. Fase Stabilisasi ( $200^\circ\text{C}$  -  $400^\circ\text{C}$ ): Pemanasan pada rentang suhu ini hanya memberikan penurunan kekerasan yang sangat marginal, karena energi termal difokuskan untuk merelaksasi regangan sisa sambil tetap mempertahankan kekerasan melalui pembentukan partikel karbida yang halus.
5. Fase Pelunakan Ekstrem ( $500^\circ\text{C}$  -  $600^\circ\text{C}$ ): Injeksi suhu tinggi memicu penurunan kekerasan secara drastis hingga mendekati nilai material mentah, karena struktur kaku martensit melebur dan bertransformasi kembali menjadi fasa ferit yang ulet.

## Saran

1. Transisi Menuju Manufaktur Hijau: Sektor industri logam dan manufaktur sangat disarankan untuk mulai beralih menggunakan biokarbonat dari limbah organik seperti cangkang kepiting sebagai *energizer*. Hal ini penting untuk menggantikan penggunaan bahan kimia beracun seperti Barium Karbonat ( $\text{BaCO}_3$ ), sejalan dengan tekanan regulasi global menuju industri yang bebas racun dan berkelanjutan.
2. Optimalisasi Suhu *Tempering* Sesuai Aplikasi Untuk memproduksi komponen mekanis yang menuntut ketahanan aus yang tinggi namun tidak getas, disarankan untuk mengaplikasikan suhu *tempering* pada rentang rendah hingga menengah ( $200^\circ\text{C}$  -  $400^\circ\text{C}$ ).
  - Sebaliknya, apabila komponen tersebut dirancang untuk menerima beban kejutan dan membutuhkan tingkat kelenturan (keuletan) yang maksimal, suhu pemanasan ulang (*tempering*) harus diatur secara presisi pada rentang yang lebih tinggi ( $500^\circ\text{C}$  -  $600^\circ\text{C}$ ).

## Referensi

- A. P. Putra, et al. 2020. Analisa Pengaruh Proses Tempering Pada Baja ST 42 Terhadap Sifat Mekanis - Portal Jurnal Institut Teknologi Nasional Malang, Jurnal JMMME. Vol 1 No. 1
- Achmad Syarif. 2006. Uji Kekerasan Baja Konstruksi St-42 Pada Proses Heat Treatment – Neliti. Jurnal Info Teknik Vol. 7 No. 1
- Adi Shaifudin, et al. 2018. Optimalisasi difusi karbon dengan metode pack carburizing pada baja ST 42 – Jurnal Mesin Nusantara. Vol. 1 No. 1 : 27-34
- Arif Rizki Gunawan, et al. 2019. Pengaruh Variasi Temperatur Pemanas Dan Media Pendingin Terhadap Tingkat Kekerasan Baja St 42. Jurnal Unmuh Jember.
- Arya Hoga Khadaffi, et al. 2023. Analisa Perubahan Nilai Kekerasan Baja ST42 Pada Proses Pack Carburizing Melalui Penambahan Arang Cangkang Sawit dan Katalisat - Jurnal Untan. Vol. 4 No.2 : 70-75
- Athanasius BAYUSENO | Professor | Diponegoro University, Semarang | UNDIP | Department of Mechanical Engineering Research profile - ResearchGate
- Bagas Wildan Firmansyah. 2024. Pengaruh Jenis Dan Komposisi katalisator Pada Pack Carburizing Terhadap Nilai Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja SS400 107 - Online Electronic Journal Portal Universitas Negeri Surabaya – Unesa. JTM. Vol 13 No. 01 : 107-116
- Bowen Liu, et al. 2019. Effect of Tempering Conditions on Secondary Hardening of Carbides and Retained Austenite in Spray-Formed M42 High-Speed Steel - PMC, Journals Materials. Vol. 12 Issue. 22

- Febro Maidefri. 2013. Pengaruh Temperatur Tempering Terhadap Kekerasan Pada Baja Karbon Sedang S45c – Jurnal Penelitian.
- Graciadiana I Huka, et all. 2025. Pengaruh Variasi Persentase Cangkang Kerang (Caco3) Dan ..., Journal Mechanical Engineering. Vol. 3 No. 1
- Himra Manro Sinaga & Dr. Ir. Victor Malau, DEA. 2016. Pengaruh suhu tempering terhadap sifat mekanis (kekerasan, kekuatan, modulus elastisitas) dan sifat fisis (struktur mikro dan sem) baja hq 709 - etd ugm, skripsi. 2016
- Ihom Paul Aondona, et all. 2018. The Performance Analysis Of Organic Energizers With Respect To Industrial Energizers In Pack-Carburization Of Mild Steel For ImP - AB Journals. Vol. 1 Issue 1 : 14-27
- Ihsan Saputra, et all. 2020. Pengaruh Temperatur Tempering Terhadap Pembentukan Struktur Mikro Dan Kekerasan Baja Skd 11 Untuk Tool Steel - Jurnal Politeknik Negeri Batam. Jurnal Teknologi dan Riset Terapan. Vol.2 No.1
- Johana C.C. Sekeroney, et all. 2023. Pengaruh Temperature Tempering Terhadap Kekerasan Pada Baja Karbon Sedang Hasil Pengelasan FCAW (Flux-Cored Arc Welding, JME. Vol.01 No.03
- K. Mohammed Umar. 2025. Investigation of Organic Based Pack Carburizing for Mild Steel Surface Hardening – ijerd. International Journal of Engineering Research and Development. Vol. 21 Issue. 11
- Leo Van Gunawan, et all. 2024. Analisis Pengaruh Variasi Suhu Tempering Pada Sifat Mekanik Baja ASTM A36 Setelah Pengelasan SMAW Menggunakan Elektroda E 7016 | Infotekmesin, Vol. 15 No.1
- Marcel Freitas de Souza, et all. 2022. Fracture surfaces of tempered sample at a 300 °C, b 400 °C, c 500 °C, d 600 °C, and e 650 °C ... - ResearchGate. [The International Journal of Advanced Manufacturing Technology](#) 120(1)
- Nanse. H. Pattiasina, et all. 2011. Analisa Keragaman Nilai Kekerasan Baja St-42 melalui Proses Karburasi Menggunakan Komposisi BaCO3 dan Carbon dengan Variasi Waktu Penahanan – Neliti. Jurnal Arika. Vol. 5 No.2
- Oluwaseyi Adedipe, et all. 2023. Sustainable carburization of low carbon steel using organic additives: A review. [Sustainable Materials and Technologies](#) 38(4)
- Pawel Kochmański, et all. 2024. Influence of Chemical Composition on Structure and Mechanical Properties of Vacuum-Carburized Low-Alloy Steels – PMC. Journal Material. Vol. 17 Issue 2.
- Peter Jurči, et all. 2023. Cryogenic Treatment of Martensitic Steels: Microstructural Fundamentals and Implications for Mechanical, Wear and Corrosion Performance - [Materials Science and Technology](#). DOI:10.20944/preprints202312.0
- Qingliqng Li, et all. 2025. Low-Temperature Tempering to Tailor Microstructure, Mechanical and Contact Fatigue Performance in the Carburized Layer of an Alloy Steel for Heavy-Duty Gears - MDPI, Journal Metals. Vol.15 Issue. 9
- Sergei Strl'makh, et all. 2022. Axial compressive strength of snail shell powder concrete. – ResearchGate. Applied Sciences. Vol.12 Issue 15
- Shultoni. Et all. 2021. Pengaruh Media Arang Kayu Jati Pada Proses Pack Carburizing Terhadap Komposisi Kimia Dan Kekerasan Baja Karbon Rendah - Unesa Journal, Otopro. Vol. 16 No.2
- Sujita Sujita & Rudy Sutanto. 2025. The effect of carbonate energizer on pack carburizing ASTM A36 steel - Global Journal of Engineering and Technology Advances. Vol. 23 Issue 02 : 222-227
- Yoga Pengestu Lila Maulana, et all. 2025. Pengaruh Rasio Campuran Arang Media Carburizing serta Penggunaan Katalisator Alami Terhadap Kekerasan Permukaan Baja SCM445 - Online Electronic Journal Portal Universitas Negeri Surabaya – Unesa. JTM. Vol 14 No.02
- Zhenyang Zhang, et all. 2024. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of High-Temperature Carburized 18Cr2Ni4WA Steel - MDPI, Journals materials. Vol.17 Issue 9