

Studi Sifat Mekanis Baja Karbon Rendah Akibat Perbedaan Holding Time dalam Proses Pack Carburizing Berbantuan Katalis Cangkang Kerang

Edison Effendy²⁾ Marselino Matahelumual²⁾
^{1,2,)}Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ambon
edisoneffendy@gmail.com, matahelumualm@gmail.com

ABSTRACT

This research aims to evaluate the surface hardness improvement of S-35C steel through the pack carburizing process using an eco-friendly catalyst alternative. The use of conventional, toxic Barium Carbonate (BaCO₃) is replaced with a bio-energizer derived from marine shell waste, which is rich in natural Calcium Carbonate (CaCO₃). The research method utilized was experimental, where steel specimens were completely buried in a media mixture of 60% nani wood charcoal and 40% shell powder. The heating process was conducted at a target temperature of 900°C with holding time variations of 15, 30, and 45 minutes, followed by rapid quenching in SAE 20-50 oil. Hardness testing was performed using a Rockwell (HRC) scale machine. The results indicate that the use of the seashell biocatalyst effectively increased the surface hardness value of the steel. There is a directly proportional relationship between the holding time duration and the hardness improvement. The most optimal hardness value was achieved at a holding time of 45 minutes, showing a net increase of +20.38 units (21.60%) from an initial average of 94.33 units to 114.71 units. A physical deceleration phenomenon in the carbon diffusion rate was also observed as the holding time increased, which strongly aligns with Fick's Second Law of Diffusion.

Keyword : pack carburizing, shell waste, hardness, holding time

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi peningkatan kekerasan permukaan baja S-35C melalui proses *pack carburizing* menggunakan alternatif katalisator yang ramah lingkungan. Penggunaan Barium Karbonat (BaCO₃) konvensional yang beracun digantikan dengan *bio-energizer* dari limbah cangkang kerang laut yang kaya akan Kalsium Karbonat (CaCO₃) alami. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental, di mana spesimen baja ditanam sepenuhnya dalam media campuran 60% arang kayu nani dan 40% serbuk cangkang kerang. Proses pemanasan dilakukan pada suhu 900°C dengan variasi waktu penahanan (*holding time*) selama 15, 30, dan 45 menit, yang dilanjutkan dengan pendinginan cepat (*quenching*) menggunakan media oli SAE 20-50. Pengujian kekerasan dieksekusi menggunakan mesin berskala Rockwell (HRC). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan biokatalis cangkang kerang secara efektif meningkatkan nilai kekerasan permukaan baja. Terdapat hubungan yang berbanding lurus antara durasi *holding time* dengan peningkatan kekerasan. Nilai kekerasan paling optimal dicapai pada waktu penahanan 45 menit, dengan peningkatan sebesar +20,38 unit (21,60%) dari rata-rata awal 94,33 unit menjadi 114,71 unit. Fenomena deselerasi fisis terhadap laju difusi karbon juga teramati seiring bertambahnya waktu penahanan, yang mana hal ini sejalan dengan prinsip Hukum Difusi Fick Kedua.

Kata kunci: Baja S-35C; pack carburizing; cangkang kerang; waktu penahanan; kekerasan.

PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu pengetahuan, teknologi, dan rekayasa material pada dekade ketiga abad ke-21 telah mendorong transformasi yang sangat masif dalam sektor industri manufaktur global maupun nasional. Infrastruktur permesinan, komponen otomotif, perkakas mekanik presisi, hingga alat-alat pertanian tradisional yang menyokong ketahanan pangan, secara fundamental menuntut penggunaan material logam yang memiliki spesifikasi mekanis unggul, durabilitas operasional yang tinggi, serta tingkat efisiensi biaya produksi yang rasional.¹ Di antara berbagai jenis material yang digunakan dalam rekayasa mekanik kontemporer, paduan baja karbon tetap menduduki hierarki tertinggi dan menjadi primadona utama. Hal ini dikarenakan baja karbon menawarkan ketersediaan deposit bijih besi yang melimpah di alam, biaya ekstraksi dan pemrosesan yang relatif ekonomis, serta kemudahan yang luar biasa dalam proses pemesinan (*machinability*), pengelasan (*weldability*), dan pembentukan (*formability*).¹ Secara khusus, dalam piramida klasifikasi material baja, baja karbon rendah hingga menengah menempati posisi yang sangat strategis dalam rantai pasok material industri, mulai dari pabrikasi skala besar hingga sektor perbengkelan skala Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM). Salah satu varian yang sangat esensial dan diakui secara luas dalam standar rekayasa adalah baja S-35C (ekuivalen dengan standar AISI 1034, AISI 1035, atau C35E).⁵ Baja S-35C merupakan paduan besi-karbon (*ferro-carbon alloy*) struktural non-paduan yang dirancang dengan persentase kandungan karbon spesifik berkisar antara 0,32% hingga 0,38% berdasarkan standar spesifikasi metalurgi global.⁵

Upaya untuk meningkatkan kekerasan baja S-35C melalui metode perlakuan panas termal konvensional seperti pemanasan langsung hingga fase austenit yang diikuti dengan pendinginan kejut (*direct quenching*) menghadapi kendala metalurgis yang fundamental. Rendahnya konsentrasi karbon terlarut dalam matriks struktur kristal membatasi kemampuan baja ini untuk bertransformasi secara masif menjadi fasa martensit (*martensite*) bertetragonal pemusatan badan (BCT) yang memiliki kekerasan ekstrem.

Berangkat dari konstelasi tersebut, metode karburasi padat (*pack carburizing*) tetap mempertahankan relevansinya secara absolut dan menjadi pilihan yang paling pragmatis, terutama untuk manufaktur skala industri kecil hingga menengah serta sektor perbengkelan lokakarya di daerah-daerah.¹ Keunggulan komparatif dari *pack carburizing* terletak pada kesederhanaan operasionalnya, biaya investasi peralatan yang sangat minim, fleksibilitas tinggi dalam menangani benda kerja yang kompleks, serta tidak diperlukannya instalasi generator atmosfer gas protektif.

Secara mekanis, proses *pack carburizing* dieksekusi dengan mengemas spesimen baja (seperti plat baja S-35C) di dalam sebuah wadah sementasi atau kotak baja paduan tahan panas yang tertutup rapat (kedap udara). Spesimen tersebut dikelilingi dan ditimbun sepenuhnya oleh campuran media karburasi yang terdiri dari material karbon padat (seperti serbuk arang kayu nani, arang tempurung kelapa, atau arang tulang) dan senyawa kimia katalisator (*energizer*).¹ Wadah yang telah disegel kemudian dipanaskan di dalam tungku (dapur pemanas / furnace) secara isothermal hingga mencapai rentang temperatur austenitisasi baja, yang umumnya direkomendasikan berada pada interval 850°C hingga 950°C.

Meskipun prinsip dasar kimia kinetik dalam *pack carburizing* terbukti sangat efektif secara teori, dalam realitas praktisnya, reaksi reduksi gasifikasi karbon primer (pembentukan CO) berjalan dengan laju eksponensial yang terlampau lambat jika hanya bergantung pada pirolisis karbon padat murni tanpa intervensi. Keterlambatan evolusi karbon monoksida ini menyebabkan durasi perlakuan termal menjadi sangat lama, membuang energi pemanasan dalam jumlah besar, dan secara drastis menurunkan produktivitas. Untuk memecahkan hambatan batas kinetik energi aktivasi ini, industri secara konvensional mencampurkan bahan kimia agen pengaktif atau katalisator (*energizer*) ke dalam media karburasi.¹

Fungsi fundamental dari *energizer* adalah untuk mendestabilisasi energi aktivasi reaksi, mempercepat evolusi formasi gas karbon dioksida (CO₂) lokal, yang selanjutnya secara langsung mendongkrak kuantitas produksi gas agen pereduksi karbon monoksida (CO) di sekitar spesimen.⁶ Secara historis selama puluhan dekade, senyawa anorganik Barium Karbonat (BaCO₃) terkadang bersama Natrium Karbonat (Na₂CO₃) dengan proporsi pencampuran

antara 10% hingga 30% dari total fraksi berat media, merupakan reagen kimia standar industri metalurgi yang paling luas didokumentasikan dan dipraktikkan sebagai katalisator dalam karburasi padat baja.¹

Namun demikian, penelusuran pustaka dan analisis kontemporer terhadap praktik manufaktur global dari periode penelitian tahun 2021 hingga 2026 mengungkapkan fakta bahwa kebergantungan pada Barium Karbonat menghadirkan problematika laten terkait ekologi, keselamatan kesehatan kerja (K3), dan efisiensi keekonomian yang teramat serius. Menanggapi secara kritis krusialnya imperatif eksistensial untuk menggantikan Barium Karbonat yang beracun, mahal, dan merusak lingkungan dengan senyawa alternatif yang jauh lebih ramah lingkungan, terbarukan (*renewable*), tidak beracun, mudah didapatkan secara melimpah, namun secara termodinamika tetap mendemonstrasikan profil kinetika reaktivitas difusi yang setara atau bahkan superior, paradigma penelitian ilmu material dari rentang periode tahun 2021 hingga 2026 mulai menyoroti dan bergeser pada implementasi rekayasa bio-energizers.³

Berbagai limbah organik hayati cangkang *mollusca* laut komersial dari kelompok *bivalvia* yang dalam nomenklatur lokal Indonesia dikenal sebagai cangkang kerang secara saintifik menampakkan prospek dan potensi strategis evolusioner yang luar biasa tangguh untuk difungsikan sebagai sumber penyedia Kalsium Karbonat alami (CaCO_3). Senyawa ini berpotensi menggantikan peran fungsional total dari Barium Karbonat (BaCO_3) di dalam dapur reaktor termal pengarbonan.¹

Keberhasilan komprehensif dari prosedur modifikasi morfologi mikrostruktur lapisan baja permukaan yang optimal melalui serangkaian instrumen teknik *pack carburizing* yang berbantuan katalisator katalis biogenik aditif organik kerang ini, terbukti tidak hanya bersandar secara eksklusif pada rekayasa komposisi racikan variabel takaran takaran presisi dari persentase proporsi serbuk homogen matriks campuran bahan penyedia pendonor massa atom unsur karbon saja. Di dalam ekosistem kendali variabel lingkungan reaksi fasa gas dan padat yang dinamis ini, fungsi kalibrasi penetapan pengawasan penentuan rentang waktu durasi proses penahanan fasa temperatur pemanasan, atau yang di dalam literatur diksi rekayasa vokabuler sains teknik metalurgi sering direferensikan dalam definisi leksikografis parameter konseptual terminologis sebagai intervensi variabel "*holding time*" atau masa waktu perendaman termal (siklus "*soaking time*") spesimen pelat material baja yang mengendap pada kondisi konstan titik rentang puncak skala batas saturasi temperatur fasa ekuilibrium peleburan austenitisasinya, jelas secara tidak terbantahkan mutlak dipandang memainkan andil porsi kedudukan kontribusi yang bersifat vital, sentral, dan memiliki pengaruh efek deterministik yang mutlak untuk mensukseskan pencapaian target resolusi ketepatan tebal selaput pelapisan karbon baja akhir yang difabrikasi.¹

TINJAUAN PUSTAKA

Mekanisme Karburasi Padat dan Kinetika Difusi Karbon

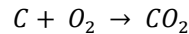
Karburasi padat merupakan metode perlakuan termokimia di mana material baja dipanaskan dalam lingkungan yang kaya akan atom karbon aktif.¹ Tujuan utama dari proses ini adalah menciptakan lapisan kulit (*case*) yang keras dan tahan aus, sementara bagian inti (*core*) tetap ulet untuk menahan beban kejut atau pembebanan tiba-tiba.¹ Proses ini sangat efektif diaplikasikan pada komponen seperti roda gigi, poros engkol, dan alat-alat pertanian yang membutuhkan kombinasi ketahanan permukaan dan ketangguhan struktur.⁴

Kimiawi Reaksi dalam Media Karburasi

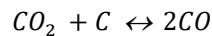
Mekanisme transfer karbon dalam proses karburasi padat melibatkan serangkaian reaksi kimia fasa gas di dalam kotak sementasi yang tertutup rapat.¹⁰ Oksigen yang terperangkap di dalam kotak akan bereaksi dengan arang

(sebagai sumber karbon utama) untuk membentuk gas karbon dioksida (CO_2), yang kemudian bereaksi kembali dengan kelebihan karbon melalui reaksi Boudouard untuk menghasilkan karbon monoksida (CO)⁴:

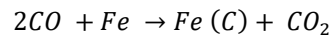
Pembentukan karbon dioksida :



Reaksi Boudouard :



Gas CO yang terbentuk merupakan agen pembawa karbon yang aktif. Pada permukaan baja, gas CO akan terurai menjadi atom karbon bebas yang siap berdifusi ke dalam logam, sesuai dengan persamaan¹:



Proses ini berlangsung secara kontinyu selama suhu pemanasan dipertahankan pada daerah austenit. Kehadiran katalisator atau energizer seperti kalsium karbonat ($CaCO_3$) dari cangkang kerang sangat penting karena ia terurai pada suhu tinggi untuk menyediakan suplai gas CO_2 tambahan, yang mempercepat pembentukan gas CO dan meningkatkan tekanan parsial karbon di permukaan logam.¹

Prinsip Keilmuan Hukum Fick pada Difusi Karbon

Difusi atom karbon ke dalam kisi besi merupakan fenomena perpindahan massa yang dikendalikan oleh energi termal dan gradien konsentrasi.¹⁰ Secara ilmiah, proses ini mengikuti Hukum Fick Kedua untuk kondisi difusi tidak tunak (*non steady state*), di mana konsentrasi karbon di bawah permukaan berubah seiring dengan bertambahnya waktu penahanan.¹² Persamaan matematisnya adalah sebagai berikut:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \dots\dots\dots 1$$

Di mana:

- C_x adalah konsentrasi karbon pada kedalaman x dari permukaan.
- C_s adalah konsentrasi karbon di permukaan (potensi karbon media).
- C_0 adalah konsentrasi karbon awal dalam baja.
- D adalah koefisien difusi karbon dalam austenit (m^2/s).
- t adalah waktu penahanan (*holding time*).
- erf* adalah fungsi galat matematika.

Koefisien difusi (D) sangat sensitif terhadap temperatur, mengikuti hubungan Arrhenius. Oleh karena itu, peningkatan temperatur pemanasan dari $900^\circ C$ ke $950^\circ C$ akan meningkatkan laju difusi secara signifikan, memungkinkan atom karbon meresap lebih dalam ke dalam struktur baja dalam waktu yang sama.¹⁰ Batasan teknis yang perlu diperhatikan dalam hal ini adalah menghindari suhu yang terlalu tinggi yang dapat menyebabkan pertumbuhan butir kristal yang kasar, yang justru akan menurunkan sifat mekanis baja secara keseluruhan.¹¹

Peran Waktu Penahanan (*Holding Time*)

Waktu penahanan adalah parameter krusial yang menentukan sejauh mana atom karbon dapat berpenetrasi ke dalam struktur logam.¹⁰ Secara umum, semakin lama waktu penahanan, semakin dalam zona difusi karbon yang terbentuk, yang secara langsung meningkatkan ketebalan lapisan keras.²⁴ Namun, terdapat batas optimal di mana penahanan

yang terlalu lama dapat menyebabkan dekarburisasi di permukaan jika atmosfer dalam kotak tidak lagi jenuh dengan karbon, atau menyebabkan kegetasan yang berlebihan pada material.¹³

Tabel 1. Holding Time per Material

Material Baja	Waktu Penahanan (Menit/Jam)	Suhu (°C)	Hasil Kekerasan / Kedalaman
S-35C	15, 30, 45 Menit	900	Kenaikan kekerasan bertahap
ST 42	3, 6, 9 Jam	900	Tertinggi pada 9 jam (37,89 HRC)
AISI 1020	40, 50 Menit	900	Kedalaman naik dari 0,38 ke 0,46 μm
ST 37	2 Jam	950	Kekerasan permukaan 947 HV
S45C	30, 60 Menit	1000	Kekerasan 693 VHN pada 60 menit

Berdasarkan data dari penelitian pada baja AISI 1020 (2025), setiap kenaikan waktu tahan dari 40 menit ke 50 menit secara konsisten meningkatkan ketebalan lapisan difusi sebesar 20-30% pada berbagai rentang suhu.²⁵ Fenomena ini terjadi karena waktu yang lebih lama memberikan kesempatan bagi mekanisme difusi interstisial untuk menjangkau lapisan kisi yang lebih dalam sebelum sistem dibekukan melalui proses *quenching*.²⁵

Sinergi Katalisator dan Temperatur

Efektivitas katalisator cangkang kerang sangat bergantung pada suhu operasional. Penelitian pada cangkang kerang mutiara menunjukkan bahwa pada suhu 910°C dan 930°C, penambahan 20% serbuk cangkang cenderung menghasilkan kenaikan kekerasan yang stagnan. Namun, pada suhu 950°C, kenaikan angka kekerasan menjadi sangat signifikan, mencapai nilai maksimum 262,47 Kg/mm² dengan waktu penahanan 150 menit.²⁸ Hal ini mengindikasikan bahwa terdapat suhu ambang kinetik di mana katalisator kalsium karbonat terurai secara masif untuk menghasilkan atmosfer karburasi yang sangat reaktif.⁴

Studi komparatif terbaru (2025) antara berbagai jenis energizer karbonat mengungkapkan bahwa kalsium karbonat (CaCO₃) memiliki dampak yang lebih besar dalam pembentukan struktur mikro martensit dibandingkan Natrium Karbonat (Na₂CO₃) atau Barium Karbonat (BaCO₃) pada suhu 900°C selama 2 jam.²⁹ Cangkang kerang sebagai sumber CaCO₃ menghasilkan lapisan karburasi setebal 410 μm dengan kekerasan puncak mencapai 760 HV.²⁹

METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan bertempat di Laboratorium Uji Bahan Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ambon dengan fokus pada pengujian material baja S-35C. Prosedur diawali dengan persiapan 15 benda uji yang dibagi ke dalam tiga kelompok waktu penahanan, yaitu 15 menit, 30 menit, dan 45 menit, di mana setiap sampel

diampelas hingga bersih untuk pengambilan data kekerasan awal. Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan mesin Mitutoyo tipe AR-20 berskala Rockwell (HRC) dengan beban 150 Pa dan indenter kerucut intan. Sebelum proses karburising, benda uji dililit kawat baja untuk memudahkan mobilisasi, sementara media karburising disiapkan dengan mencampur 60% karbon dari arang kayu nani dan 40% bubuk cangkang kerang (CaCO_3) di dalam kotak sementasi secara merata.

Proses *pack carburizing* dimulai dengan menanam benda uji sepenuhnya ke dalam campuran media karbon di dalam kotak sementasi untuk memastikan difusi unsur karbon yang merata pada seluruh permukaan baja. Kotak kemudian dimasukkan ke dalam oven pemanas yang diatur dari temperatur awal 27°C hingga mencapai suhu target 900°C dengan variasi waktu penahanan yang telah ditentukan. Setelah pemanasan selesai, benda uji segera dikeluarkan menggunakan tang jepit serta gancu untuk dilakukan proses pendinginan cepat (*quenching*) ke dalam media oli SAE 20-50. Tahap akhir penelitian meliputi pembersihan sisa oli dan pengamplasan ulang pada salah satu sisi benda uji agar nilai kekerasan akhir setelah proses karburising dapat diukur kembali menggunakan mesin uji kekerasan yang sama, yang kemudian hasilnya diolah melalui tahap analisa data dan penarikan kesimpulan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian eksperimental yang menjadi inti dari observasi ini mengandalkan konfigurasi spesimen dengan rasio media statis campuran reaktif, yaitu 60% serbuk Arang Kayu Nani dan 40% serbuk Cangkang Kerang.⁴ Pengujian difokuskan pada manipulasi tiga variabel bebas waktu penahanan (*holding time*): 15 menit, 30 menit, dan 45 menit. Seluruh hasil pengukuran tingkat kekerasan dilakukan dengan menerapkan beban statis konstan sebesar 150 Pa pada titik penekanan, dan diobservasi di bawah kondisi suhu ruangan standar ekuilibrium (27°C) pasca perlakuan panas dan perlakuan pendinginan cepat (*quenching*).⁴

Dataset mentah yang dihimpun mencakup total 120 titik sampel, di mana masing-masing durasi waktu penahanan diwakili oleh 40 titik sampel yang dibagi secara merata ke dalam dua grup pengujian (A1 dan A2). Agregasi ekstensif serta interpretasi dari metrik kekerasan spesimen uji disajikan secara mendalam pada bagian berikut.

Profil Kekerasan Awal

Sebelum material uji mengalami modifikasi fasa struktur mikro secara termokimia, nilai kekerasan awal dari keseluruhan 120 sampel secara konsisten berpusat pada rentang yang sangat sempit.

Rata-rata Baseline untuk kelompok pengujian 15 Menit: 94,58 unit kekerasan.

Rata-rata Baseline untuk kelompok pengujian 30 Menit: 94,99 unit kekerasan.

Rata-rata Baseline untuk kelompok pengujian 45 Menit: 94,32 unit kekerasan.

Keseragaman absolut pada nilai kekerasan awal (dengan rata-rata agregat dari ketiga kelompok berada di angka 94,63 unit) memberikan konfirmasi dan validasi empiris bahwa seluruh spesimen uji difabrikasi dari kelompok paduan baja karbon (*batch material*) yang identik dari segi komposisi kimiawinya. Keseragaman ini menetapkan landasan empiris yang tidak terbantahkan bahwa setiap deviasi, fluktuasi, dan peningkatan kekerasan pasca-karburasi murni dipicu oleh intervensi kausal dari variasi waktu penahanan, tanpa adanya distorsi yang berasal dari heterogenitas material dasar.⁴

Evaluasi Kinetik Waktu Penahanan 15 Menit

Penahanan spesimen baja selama 15 menit pada temperatur austenitisasi merepresentasikan sebuah tahapan fase transien embrionik dari kinetika difusi karbon. Berdasarkan ekstraksi data empiris⁴:

- Jumlah Total Kekerasan Sesudah Proses: 4058,50 unit.
- Rata-rata Kekerasan Sesudah Proses: 101,46 unit.
- Peningkatan Netto (Delta Kekerasan): +6,87 unit (merepresentasikan peningkatan komparatif sekitar 7,26%

dari rata-rata baseline awal).

Pada rentang durasi waktu yang sangat singkat ini, aktivasi energi termal di dalam furnase baru saja menembus dan melampaui ambang batas termodinamika yang dibutuhkan untuk memulai reaksi dekomposisi kalsium karbonat (CaCO_3) secara menyeluruh dan simultan.³ Proses dekomposisi kinetik ini mengirimkan fluks atom karbon monoatomik yang mulai menembus dan menduduki beberapa lapisan sel satuan (unit cell) kristalografi terluar dari kisi baja austenit (FCC). Namun, dikarenakan jendela waktu yang sangat restriktif, migrasi molekular karbon belum mampu berpenetrasi cukup dalam menuju lapisan sub-permukaan spesimen.

Fenomena ini menghasilkan profil konsentrasi karbon sekunder yang dangkal, membentuk lapisan keras fungsional (effective case depth / ECD) yang tergolong sangat tipis.¹⁵ Akibat fenomena ketipisan lapisan ini, pada saat indentor mesin uji kekerasan dihempaskan ke permukaan spesimen, gaya penetrasi mekanis yang terpusat dengan mudah merobek lapisan pelindung tipis tersebut dan terus menembus ke dalam wilayah substrat material inti (core) yang masih melestarikan sifat kekerasan awal yang lebih lunak. Kondisi percampuran struktural ini tercermin pada pembacaan instrumen yang hanya menghasilkan angka peningkatan kekerasan komposit agregat yang moderat (berkisar pada peningkatan 7,26%). Meskipun demikian, capaian peningkatan yang dapat terdeteksi hanya dalam tempo 15 menit mengonfirmasi betapa reaktifnya kombinasi biokatalis cangkang kerang ketika dikawinkan dengan arang kayu nani.⁴

Evaluasi Waktu Penahanan 30 Menit

Penambahan durasi penahanan material di dalam atmosfer jenuh karbon menjadi 30 menit mengindikasikan transisi fase difusi yang jauh lebih matang dan agresif dalam peningkatan properti kekerasan mekanis⁴:

- Jumlah Total Kekerasan Sesudah Proses: 4360,75 unit.
- Rata-rata Kekerasan Sesudah Proses: 109,02 unit.
- Peningkatan Netto (Delta Kekerasan): +14,03 unit (merepresentasikan peningkatan eksponensial sekitar 14,77% dari rata-rata baseline awal).

Jika kita membandingkan laju interval peningkatan kekerasan dari titik waktu 15 menit menuju titik waktu 30 menit, terdapat pertambahan kekerasan absolut sebesar +7,16 unit tambahan. Pada ekuilibrium waktu setengah jam ini, lingkungan kimia reaktif internal di dalam wadah karburasi telah mencapai dan berada pada fase puncak laju reaktivitasnya (steady-state reaction environment). Senyawa kalsium oksida (CaO) hasil reduksi termal kalsinasi cangkang kerang mulai secara efektif bertindak dalam menjaga stabilitas keseimbangan pH ambien basa dan kontinuitas fluks gas aktif.³

Secara simultan, konsentrasi gas pembawa karbon monoksida (CO) yang jenuh di permukaan logam memberikan tekanan difusi osmotik parsial yang luar biasa, mendorong pergerakan atom karbon lebih dalam ke arah inti spesimen.¹¹ Pergerakan difusi interstisial ini tidak terjadi melalui lintasan lurus, melainkan melalui mekanisme lompatan interstisial kuantum (interstitial jumps) dari satu posisi oktahedral yang padat menuju posisi oktahedral kosong yang berdekatan di dalam jaring kristal besi.³ Penumpukan volume karbon yang padat dan masif pada rentang kedalaman sub-permukaan menengah ini secara revolusioner meningkatkan karakteristik hardenability (mampu keras) material, yang akan tereksekusi sepenuhnya pada saat proses quenching.¹⁰ Lapisan pelindung karbon kini telah cukup tebal untuk menahan laju penetrasi deformasi plastis dari mata indentor uji kekerasan.

Evaluasi Kinetik Waktu Penahanan 45 Menit

Eskalasi parameter waktu perlakuan panas secara maksimal hingga menyentuh batas 45 menit menghasilkan dan merekam metrik kekerasan struktural yang menempati posisi puncak tertinggi di dalam seluruh deretan rangkaian dataset yang dianalisis⁴:

- Jumlah Total Kekerasan Sesudah Proses: 4588,25 unit.
- Rata-rata Kekerasan Sesudah Proses: 114,71 unit.

- Peningkatan Netto (Delta Kekerasan): +20,38 unit (merekpresentasikan peningkatan komprehensif sekitar 21,60% dari batas rata-rata baseline awal).

Peningkatan sekuensial dari periode 30 menit menuju periode 45 menit menghasilkan sumbangsih tambahan kekerasan absolut sebesar +5,69 unit. Analisis derivatif secara terperinci terhadap laju kenaikan per menit (rate of hardening index) menyingkapkan fenomena deselerasi fisis yang dapat terkuantifikasi secara definitif. Laju rasio kenaikan kekerasan pada fase awal dari menit ke-15 menuju menit ke-30 tercatat pada angka konstan ~0,477 unit/menit. Namun secara paradoksal, laju kecepatan kenaikan dari menit ke-30 menuju menit ke-45 menukik perlahan menjadi hanya ~0,379 unit/menit.

Fenomena perlambatan pergerakan marjinal yang teregistrasi secara konsisten ini memberikan konfirmasi nyata terhadap bekerjanya premis teoretikal Hukum Difusi Fick Kedua (Fick's Second Law of Diffusion). Seiring dengan berjalannya waktu dan bertambah dalamnya penetrasi karbon, jarak antara permukaan jenuh dan area yang belum terpenetrasi menjadi semakin jauh. Kondisi ini secara inheren meratakan kelandaian dari kurva gradien konsentrasi antara antarmuka permukaan benda dan zona inti spesimen.⁷ Konsekuensi dari pelandaian gradien ini adalah tergerusnya driving force perpindahan massa atom. Atom karbon yang baru saja memasuki antarmuka permukaan kini harus bersusah payah berdesakan dan melewati rintangan "kemacetan" kepadatan atomik yang secara spasial telah diokupasi oleh barisan atom-atom karbon generasi pendahulu yang telah terlebih dahulu mengisi ruang-ruang interstisial.³ Inilah esensi mekanis mengapa pertambahan waktu absolut tidak senantiasa linear dengan laju penetrasi difusi absolut.

Representasi Struktur Data Komparatif dan Skematis

Tabel 2 merangkum parameter statistik dan dinamika perubahan metrik kekerasan baja pada masing-masing variabel holding time. Representasi tabular ini mengekspos fenomena pelambatan difusi seiring dengan waktu yang bertambah secara gamblang.⁴

Tabel 2. Agregasi Statistik Kekerasan Karburasi (Komposisi 60% Arang Kayu Nani : 40% Cangkang Kerang)

Parameter Mekanis / Durasi Waktu Penahanan	Fase Transien (15 Menit)	Fase Akselerasi (30 Menit)	Fase Saturasi Dini (45 Menit)
Total Sampel Diuji Per Parameter (n)	40 Spesimen	40 Spesimen	40 Spesimen
Rata-Rata Kekerasan Awal (Baseline)	94,59 Unit	94,99 Unit	94,33 Unit
Rata-Rata Kekerasan Pasca-Karburasi	101,46 Unit	109,02 Unit	114,71 Unit
Peningkatan Absolut Agregat (Δ)	+6,87 Unit	+14,03 Unit	+20,38 Unit
Persentase Peningkatan Terhadap Baseline (%)	7,26%	14,77%	21,60%
Margin Laju Kenaikan (Unit / 15 menit)	+6,87 Unit	+7,16 Unit	+5,69 Unit

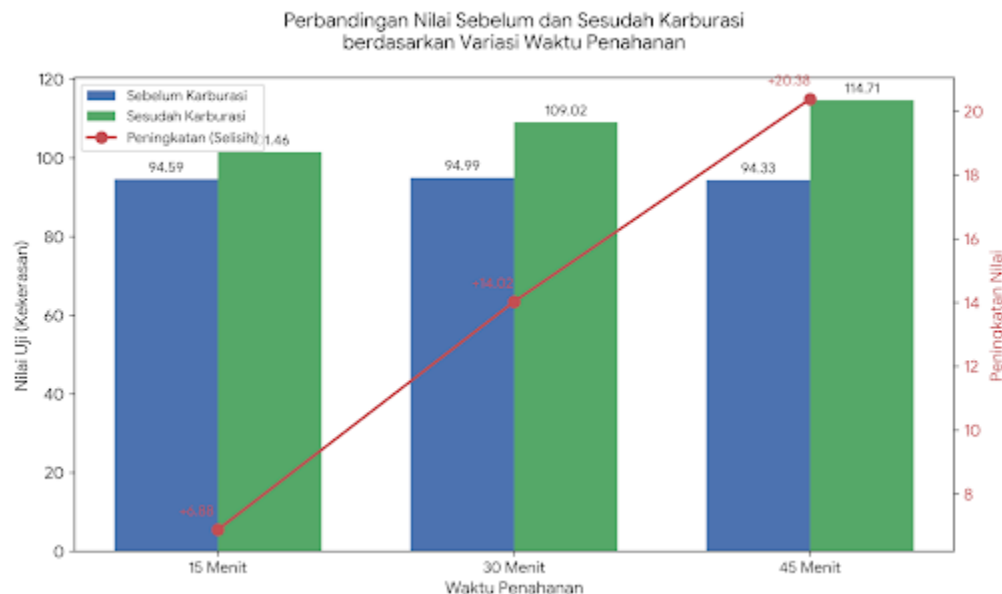
Dari hasil penelitian tersebut, saya telah mengekstrak nilai rata-rata hasil pengujian pada ketiga variasi waktu penahanan:

- 15 Menit: Sebelum (94.59) → Sesudah (101.46) | Naik +6.88
- 30 Menit: Sebelum (94.99) → Sesudah (109.02) | Naik +14.03
- 45 Menit: Sebelum (94.33) → Sesudah (114.71) | Naik +20.38

(Grafik visual lengkapnya dapat Anda lihat pada gambar di atas. Saya menggunakan diagram batang untuk membandingkan nilai Sebelum/Sesudah dan garis merah muda untuk menunjukkan lonjakan peningkatannya).

Berdasarkan grafik gabungan yang terbentuk, berikut adalah analisa dari pola peningkatannya:

1. Stabilitas Nilai Awal (Material Dasar): Nilai "Sebelum Proses Karburasi" untuk ketiga variasi waktu berada di angka yang konstan, yakni di rentang 94.33 hingga 94.99. Hal ini menunjukkan bahwa sampel material awal yang Anda gunakan sangat homogen (memiliki karakteristik kekerasan/sifat mekanik dasar yang sama rata) sebelum diberikan perlakuan panas.
2. Pola Kenaikan yang Proporsional (Positif): Nilai "Sesudah Proses Karburasi" membentuk pola *tren naik yang signifikan dan nyaris linear*. Semakin lama waktu penahanan (*holding time*), semakin tinggi pula nilai akhir yang didapatkan.
3. Laju Difusi Karbon: Garis merah pada grafik menunjukkan besaran *selisih/peningkatan*. Kenaikan berjenjang dari +6.88 (15 menit), melompat menjadi +14.03 (30 menit), dan memuncak di +20.38 (45 menit) memperlihatkan bahwa proses difusi karbon ke dalam permukaan material berjalan dengan sangat baik.
4. Kesimpulan Utama:
Pola peningkatan pada grafik ini membuktikan bahwa waktu penahanan (*holding time*) berbanding lurus dengan peningkatan nilai akhir. Waktu 45 menit memberikan hasil paling optimal di antara ketiganya karena durasi tersebut memberikan kesempatan waktu paling lama bagi atom karbon (dari media arang kayu Nani dan cangkang kerang) untuk berpenetrasi dan berikatan dengan struktur permukaan material pengujian, sehingga membuat material menjadi lebih keras atau kuat secara signifikan. hal ini dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Laju Peningkatan Nilai Kekerasan per Waktu Penahanan.

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan eksperimen dan hasil pengujian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Proses *pack carburizing* menggunakan campuran media padat berupa 60% arang kayu nani sebagai sumber karbon dan 40% serbuk cangkang kerang (CaCO_3) sebagai biokatalisator terbukti sangat reaktif dan efektif dalam meningkatkan nilai kekerasan permukaan baja S-35C.
2. Terdapat hubungan yang berbanding lurus dan proporsional antara durasi waktu penahanan (*holding time*) dengan peningkatan nilai kekerasan akhir material baja; semakin lama waktu penahanan, semakin tinggi pula peningkatan kekerasannya.
3. Waktu penahanan 45 menit memberikan hasil paling optimal dan menduduki metrik kekerasan puncak, menghasilkan peningkatan netto (*delta*) sebesar +20,38unit (naik 21,60%) dari rata-rata kekerasan awal 94,33unit menjadi 114,71 unit. Hal ini terjadi karena durasi tersebut memberikan waktu terlama bagi atom karbon untuk berpenetrasi ke dalam struktur permukaan material.
4. Proses difusi karbon mengalami fenomena deselerasi fisis seiring bertambahnya waktu penahanan, di mana laju kenaikan kekerasan menurun dari ~0,477 unit/menit (pada interval 15-30 menit) menjadi ~0,379 unit/menit (pada interval 30-45 menit). Perlambatan ini sesuai dengan Hukum Difusi Fick Kedua yang disebabkan oleh semakin melandainya kurva gradien konsentrasi dan kepadatan rintangan atomik karbon generasi pendahulu pada ruang interstisial material.

Saran

Untuk pengembangan dan penyempurnaan pada penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan pengujian dengan memperpanjang variasi waktu penahanan melebihi 45 menit guna mengetahui batas saturasi absolut di mana material mulai mengalami dekarburisasi atau kegetasan permukaan seperti yang diprediksi dalam teori. Selain itu, peneliti selanjutnya juga dapat mengeksplorasi variasi parameter temperatur austenitisasi, seperti menaikkan suhu hingga 950°C, karena secara literatur suhu tersebut dapat mengurai katalisator kalsium karbonat secara lebih masif untuk mempercepat difusi. Analisis struktur mikro juga disarankan untuk memvalidasi kedalaman lapisan difusi karbon (*case depth*) secara visual, bukan hanya mengandalkan uji kekerasan.

Referensi

- Achmadi, A., Widodo, T. D., & Irawan, Y. S. (2024). *Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Lorjuk dan Kulit Kacang Tanah Sebagai Media Carburizer pada Proses Pack Carburizing Terhadap Baja Karbon Rendah AISI 1020*. (Tesis Magister, Universitas Brawijaya).
- Firmansyah, B. W., & Drastiawati, N. S. (2024). Pengaruh Jenis Dan Komposisi Katalisator Pada Pack Carburizing Terhadap Nilai Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja SS400. *Jurnal Teknik Mesin UNESA*, 12(1).
- Hakim, L., Ramli, & Sugiyarto. (2024). Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Kijing (Pilsbryconcha Exilis) Sebagai Katalisator Pada Proses Carburizing. *Jurnal Inovasi Teknologi Terapan (JITT)*, 02(2).
- Handoko, D., Vivaldi, V., & Sutrisno. (2025). Pengaruh Holding Time Pada Sifat Mekanik Proses Pack Carburizing Baja Karbon Rendah. *ResearchGate Publications* (dipublikasikan November 2025).

- Handoko, D., Vivaldi, V., & Sutrisno. (2022).** Pengaruh Variasi Jenis Katalisator dan Holding Time pada Proses Pack Carburizing terhadap Perubahan Komposisi Karbon dan Nilai Kekerasan Baja Karbon Rendah (Low Carbon Steel) St 37. *Jurnal Publikasi Ilmiah Vokasi (JPV)*, 16(1), 38-45.
- Isworo, H., & Sumantri, D. (2021).** Pengaruh Holding Time dan Media Pendingin Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Baja ST41 Pada Proses Carburizing Arang Tempurung Kelapa (dengan Katalis Cangkang Telur/Kerang). *Elemen: Jurnal Teknik Mesin*, 7(2), 157-166.
- Pratiwi, S., Junaidi, A. K., Weriono, & Rambe, I. A. (2024).** Analisa Sifat Mekanik Proses Pack Carburizing AISI 4340 dengan Temperatur Kristalisasi 725°C Menggunakan Karbon Tandan Kelapa dan Katalis Abu Kerang. *Momentum: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 20(2), 187-194.
- Sari, N. H., & Darmo, S. (2022).** Microstructure and Mechanical Properties of Pack Carburized AISI 1020 Steel Using Na₂CO₃ and CaCO₃ Catalyst (Shell Based). *Journal of Renewable Energy & Mechanics (REM)*, 5(1), 455-463.
- Satria, A. (2023).** *Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Dara (Anadara Granosa) Sebagai Alternatif Katalisator pada Proses Carburizing Baja St 42.* (Laporan Proyek Akhir, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung).
- Utami, L. P., & Istana, B. (2021).** Analisis Pengaruh Variasi Komposisi Katalis Kerang Ale-Ale pada Proses Pack Carburizing Baja Karbon Rendah terhadap Nilai Kekerasan dan Struktur Mikro. *Jurnal Surya Teknika*, 8(1).