The 6th Conference on Innovation and Application of Science and Technology (CIASTECH)

Website Ciastech 2023 : https://ciastech.net
Open Confrence Systems : https://ocs.ciastech.net
Proceeding homepage : https://publishing-widyagama.ac.id/ejournal-v2/index.php/ciastech/issue/view/236

P-ISSN : 2622-1276
E-ISSN: 2622-1284

PENGARUH KATALIS $CaCO_3$ PADA PROSES *PACK CARBURIZING* TERHADAP KEKERASAN BAJA KARBON, *A REVIEW*

Achmadi[1*], Teguh Dwi Widodo[2], Yudy Surya Irawan[3]

[1] *Program Studi S2 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya*
[2,3] *Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya*

INFORMASI ARTIKEL

Data Artikel :

Naskah masuk, 13 November 2023
Direvisi, 22 November 2023
Diterima, 4 Desember 2023

Email Korespondensi :
achmadibbec99@gmail.com

ABSTRAK

Pesatnya perkembangan teknologi membuat permintaan produk yang berkualitas tinggi dengan bernilai ekonomis meningkat, salah satunya adalah komponen otomotif yang sering mengalami gesekan sehingga diperlukaan permukaan yang sangat keras untuk menahan laju keausan. Komponen otomotif yang sering mengalami gesekan adalah roda gigi, biasanya roda gigi terbuat dari baja karbon rendah yang sifat mudah dibentuk, tetapi nilai kekerasannya rendah, sehingga nilai kekerasannya harus ditingkatkan. Salah satu metode untuk meningkatkan kekerasan baja karbon rendah adalah karburisasi (*Carburizing)* dengan cara meningkatkan kandungan karbon pada permukaan material sehingga terbentuk permukaan material yang keras. Cara kerjanya yaitu dengan cara benda kerja dan arang sebagai sumber karbon aktif dimasukkan kedalam kotak, kemudian dipanaskan sampai pada suhu austenisasinya, pada suhu austenisasinya ini akan keluar gas CO_2 dan CO, yang akan terurai dan atom karbon akan berdifusi pada permukaan baja. Aktivator atau katalis untuk meningkatkan kecepatan reaksi, dengan tingginya reaksi yang terjadi maka karbon yang berdifusi semakin banyak dan kekerasan semakin meningkat. Katalis yang mudah didapatkan adalah katalis heterogen kalsium karbonat ($CaCO_3$) dari cangkang kerang, yang mana cangkang kerang mengandung kalsium karbonat sekitar 96% $CaCO_3$. Ketika mengalami perlakuan panas $CaCO_{3(s)}$ bereaksi menjadi $CaO_{(s)}$ + $CO2_{(g)}$ dari reakisi tersebut akan meningkatkan CO_2.

Kata Kunci: *Pack Carburizing, Katalis $CaCO_3$, Baja Karbon Rendah*

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi, tentu permintaan terhadap produk industri semakin beragam sesuai dengan fungsi dan kegunaan dari produk tersebut [1]. Tentu produk-produk dengan kualitas yang tinggi dan mempunyai nilai ekonomis yang mampu bersaing dipasaran.

Terutama industri otomotif yang telah mengalami pertumbuhan pesat selama beberapa dekade terakhir. Inovasi teknologi, desain yang semakin canggih, dan permintaan yang terus meningkat telah mendorong industri ini menjadi salah satu sektor ekonomi terbesar di dunia [1]. Namun, di tengah beragamnya pilihan kendaraan dan merek yang tersedia, penting bagi konsumen untuk memilih produk yang tidak hanya memiliki kualitas yang baik, tetapi juga bernilai ekonomis. Memilih komponen otomotif yang berkualitas dapat menghemat biaya dalam jangka panjang, karena produk yang lebih baik cenderung lebih tahan lama, memerlukan lebih sedikit perawatan, dan memiliki kinerja yang lebih baik, hal itu tentu tidak lepas dari pemilihan material dalam pembuatan komponen tersebut, terutama komponen yang mengalami gesekan seperti roda gigi yang memerlukan ketahanan aus dan kekerasan yang tinggi pada permukaannya [2].

Dalam meningkatkan ketahanan aus dan kekerasan permukaan pada sebuah komponen atau material ada beberapa Cara, salah satunya yaitu dengan cara memberikan proses Perlakuan panas *(heat treatment)*[3]. Dalam memberikan proses *heat treatment* tentu harus memperhatikan dari kandungan karbon dari material yang hendak diberikan perlakuan panas [4]. Pada jenis baja karbon dibawah 0,3% tentu tidak bisa diberikan proses *thermal treatmen* (*hardeninng*) karena hardenabilinya tidak mencukupi syarat, yang mana secara komposisi kimia, baja karbon yang dapat diberikan *thermal treatment* langsung yaitu jenis minimal baja karbon sedang, yakni karbonnya diatas 0,3% [4]. Sedangkan untuk baja carbon dibawah 0,3% dapat diberikan perlakuan *Chimical traetment,* salah satunya adalah *Carburizing,* dengan cara memperbanyak kandungan karbon pada permukaan material, sehingga terbentuk carbida yang keras [5]. Secara teoritis, semakin banyak kandungan karbon pada meterial, maka semakin keras material tersebut [6].

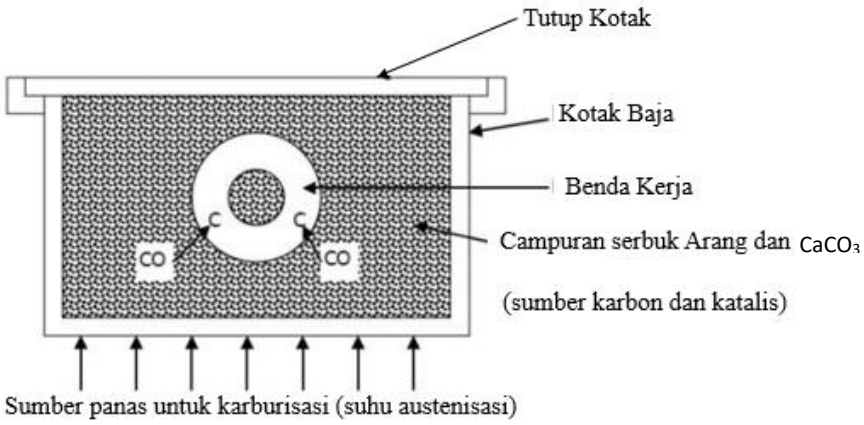
Pada proses *carburizng*, ada tiga metode yang dapat dilakukan, yaitu dengan metode *gas carburizing*, *pack carburizing* dan *liquid carburizing* [7]. Dari tiga metode tersebut tentu media dan cara yang digunakan berbeda, misalnya metode *pack carburizing* yang mana benda kerja dimasukkan dalam kotak yang dikelilingi oleh arang, yang mana arang tersebut digunakan sebagai sumber karbon [3], dalam metode ini untuk mempercepat reaksi yang terjadi membutuhkan katalis sebagai aktivator sehingga proses difusi lebih cepat, dan waku yang dibutuhkan lebih rendah [8]. Cara kerja katalis dalam proses *pack carburizing* yaitu berperan dalam meningkatkan penetrasi karbon ke dalam permukaan logam [9], sehingga meningkatkan Kadar karbon di permukaan dan membentuk lapisan yang keras [10]. Katalisator juga membantu dalam distribusi karbon yang merata di sekitar permukaan baja yang akan dikarburisasi, hal ini penting untuk mendapatkan hasil yang seragam dan konsisten pada seluruh permukaan logam [11]. Mengurangi suhu yang diperlukan, dengan menggunakan katalisator[8], ini dapat mengurangi biaya energi dan memungkinkan pemrosesan pada suhu yang lebih rendah, mengurangi risiko deformasi atau distorsi pada suhu yang tinggi [12].

Katalis yang banyak digunakan adalah katalis heterogen, yang mana jenis katalis ini lebih ramah lingkungan dan dapat didaur ulang, serta mudah didapatkan di alam sekitar, salah satunya adalah kalsium karbonat ($CaCO_3$) dari cangkang kerang [13]. Cangkang kerang mengandung $CaCO_3$ yang tinggi sekitar 96%. Sehingga bisa digunakan sebagai katalis dalam proses *pack carburizing* [14]. Dalam literatur review ini kami akan mengulas beberapa jurnal yang telah ada tentang pengaruh katalis $CaCO_3$ pada proses *pack carburizing* terhadap kekerasan dan struktur mikro baja karbon rendah yang mengalami proses *pack carburizing*.

2. *PACK CARBURIZING*

Penambahan karbon, yang disebut *carburizing* (karburasi), melibatkan pemanasan pada suhu tinggi, khususnya pada temperatur austenit, dalam lingkungan yang mengandung atom karbon yang aktif [6], dengan demikian, atom karbon aktif tersebut akan mengalami difusi ke dalam permukaan baja dan mencapai kedalaman yang telah ditentukan[15]. Setelah proses difusi selesai, langkah selanjutnya adalah melakukan pendinginan cepat, yang dikenal sebagai *quenching*, untuk

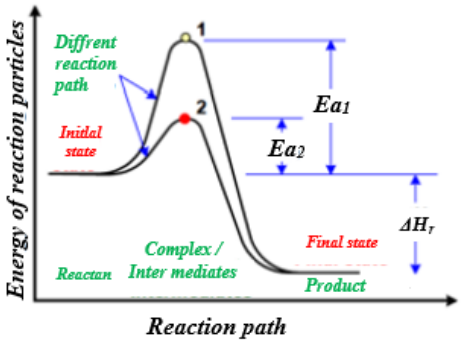
menghasilkan permukaan yang lebih keras, sementara bagian tengahnya tetap mempertahankan kekuatan dan ketangguhan [16]. Difusi adalah pergerakan alami atom atau molekul di dalam suatu materi yang cenderung menuju pencapaian komposisi yang seragam [3]. Metode pengkarbonan dengan media padat, yang dikenal sebagai *Pack Carburizing*, dianggap sebagai pendekatan yang sangat praktis[17]. Pada metode ini, objek kerja ditempatkan dalam kotak tahan panas, yang kemudian diisi dengan arang yang melingkupi objek kerja [18]. Selain itu, kalsium karbonat, barium karbonat, atau sodium karbonat dapat digunakan sebagai katalisator [19]. Kotak ini kemudian rapat ditutup untuk mencegah keluarnya karbon. Kemudian, proses pemanasan dilakukan hingga mencapai suhu di atas suhu kritis, dengan durasi pemanasan yang disesuaikan dengan ketebalan yang diinginkan untuk mencapai tingkat kekerasan yang diinginkan [19]. Dalam proses ini, komponen diletakkan dalam suatu wadah yang berisi media karburasi. Ketika komponen dipanaskan pada suhu austenit dalam kotak ini, media tersebut menghasilkan gas CO_2 dan CO, yang kemudian berinteraksi dengan permukaan baja [20]. Pembentukan karbon monoksida dapat ditingkatkan dengan penggunaan pendorong atau katalis, seperti barium karbonat ($BaCO_3$), kalsium karbonat ($CaCO_3$), kalium karbonat (K_2CO_3), dan natrium karbonat (Na_2CO_3) [21]. Setiap jenis arang memiliki kandungan karbon yang berbeda-beda. Semakin tinggi kandungan karbon dalam arang, maka kemampuan penetrasi karbon ke permukaan baja juga akan meningkat, sekema proses *pack carburizing* seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Sekema proses *pack carburizing* [23]

2.1 Katalis Heteogen Kalsium Karbonat ($CACO_3$)

Katalisator adalah suatu zat atau substansi yang dapat meningkatkan kecepatan reaksi kimia tanpa ikut terkonsumsi dalam reaksi tersebut, meskipun tetap berpartisipasi dalam reaksi. Katalis memengaruhi laju reaksi tanpa mengalami perubahan kimia pada akhir reaksi [8]. Proses yang dilakukan oleh katalis ini dikenal sebagai katalisis. Katalis mempercepat reaksi dengan mengurangi ambang energi aktivasi reaksi. Energi aktivasi reaksi adalah jumlah energi minimum yang diperlukan untuk memungkinkan terjadinya reaksi, seperti pada Gambar 2.



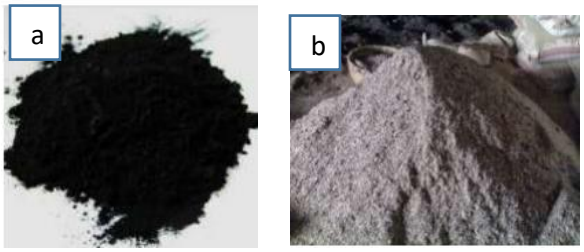
Gambar 2. Pengaruh katalis terhadap waktu reaksi [8]

keterangan gambar :

Ea1 = tanpa adanya kataslis pada energi aktivasi reaksi
Ea2 = adanya tambahan katalis pada energi aktivasi reaksi
ΔHr = Panas reaksi
=Hreaktan – Hproduk reaksi

Katalis heterogen adalah jenis katalis yang memiliki fase yang berbeda dari fase reaktan dan produk. Secara umum, katalis heterogen berwujud padatan yang terdapat dalam cairan atau padatan dalam fase gas [8]. Penerapan sistem katalis heterogen sangat umum dalam industri, karena sistem ini memberikan beberapa keunggulan yang signifikan. Katalis heterogen dapat dengan mudah dipulihkan setelah reaksi selesai melalui proses pemisahan yang sederhana. Selain itu, keuntungan lainnya adalah bahwa katalis heterogen dapat digunakan pada suhu tinggi, yang memungkinkannya untuk beroperasi dalam berbagai kondisi [22]. Katalis ini juga digunakan secara luas karena tidak memerlukan tahapan pemisahan produk yang rumit dari katalis. Cara kerja katalis heterogen dalam meningkatkan kecepatan reaksi adalah dengan proses adsorpsi gas pada permukaan padat [13]. Dalam katalisis gas-padat, reaktan atau reaktan-rektan diserap pada permukaan katalis. Spesies yang teradsorpsi ini berkumpul di sisi permukaan yang reaktif. Salah satu sumber katalis heterogen yang umum dan mudah ditemukan, terutama di daerah pesisir, adalah kulit kerang. cangkang kerang mengandung $CaCO_3$ (kalsium karbonat) sekitar 94%, $MgCO_3$ (magnesium karbonat) sebanyak 1%, $Ca_3(PO4)_2$ (kalsium fosfat) sebanyak 1% dan bahan organik sebanyak 4% [22].

Dalam proses *pack carburizing*, katalis dicampur dengan arang sebagai sumber karbon aktif di dalam kotak yang ditempatkan di dalam *furnace* untuk dipanaskan. Selama proses difusi atom karbon, katalis berperan dalam reaksi yang mengurangi energi aktivasi yang dibutuhkan, yang pada akhirnya mempercepat proses difusi karbon ke dalam permukaan material pada fasa austenit.



Gambar 3 a. serbuk arang sebagai sumber karbon b. serbuk katalis $CaCO_3$ [23]

Gambar 4 a)**.** Spesimen benda kerja. B). *Furnace carburizing* [23]

Cara kerja katalis pada proses *pack carburizing* yaitu sebagai berikut:

a. Meningkatkan kecepatan reaksi: Katalisator bertindak sebagai agen katalis yang meningkatkan kecepatan reaksi antara karbon yang ada pada bahan *pack carburizing* dan permukaan logam. Ini membantu mempercepat proses penyerapan karbon ke permukaan baja [24].
b. Meningkatkan penetrasi karbon: Katalisator juga berperan dalam meningkatkan penetrasi karbon ke dalam permukaan logam. Proses *pack carburizing* membutuhkan karbon untuk meresap ke dalam struktur kristal permukaan baja sehingga meningkatkan kadar karbon di permukaan dan membentuk lapisan yang keras [21].
c. Mengurangi suhu yang diperlukan: Dengan menggunakan katalisator, suhu yang dibutuhkan untuk proses *pack carburizing* dapat dikurangi. Ini dapat mengurangi biaya energi dan memungkinkan pemrosesan pada suhu yang lebih rendah, mengurangi risiko deformasi atau distorsi pada suhu yang tinggi [20].

$CaCO_3$ ketika dipanaskan atau dipirolisis di atas 700ºC akan berubah menjadi CaO, reaksi yang terjadi pada $CaCO_3$ ketika di panaskan di atas suhu 700ºC yaitu: $CaCO_{3(s)} \rightarrow CaO_{(s)} + CO2_{(g)}$ [2]. Kandungan yang terdapat pada cangkang kerang lorjuk sebagai mana tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Kandungan pada cangkang kerang setelah mengalami perlakuan panas [22].

Komposisi	**Jumlah (%)**
Calcium oxide (CaO)	98,23%
Strontium Oxide (SrO)	0,85%
Iron Oxide (Fe_2O_3)	0,34%
Sulfur Trioxide (SO_3)	0,45%
Copper Oxide (CuO)	0,07%
Manganese Oxide (MnO)	0,05%

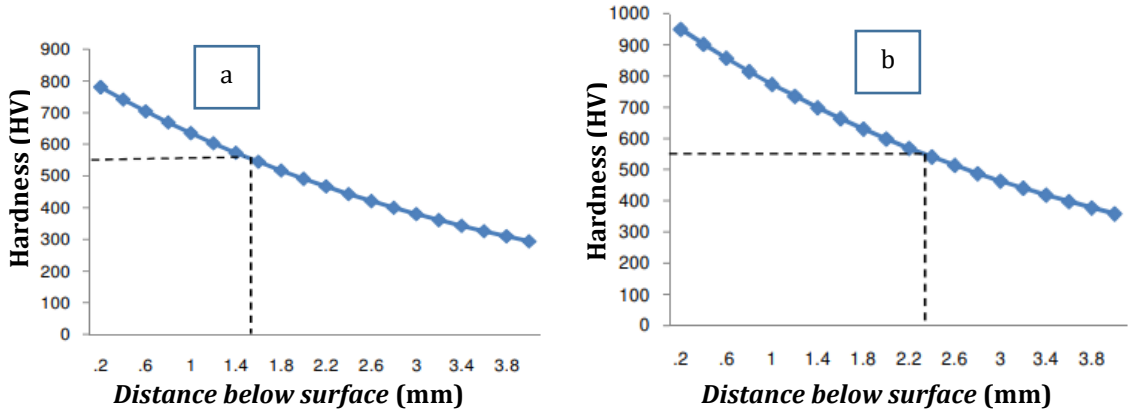
3. PENGARUH $CACO_3$ TERHADAP KEKERASAN

Katalis $CaCO_3$ dalam proses *pack carburizing* berperan sebagai aktivator yang mana pada suhu tinggi $CaCO_3$ bereaksi menjadi $CaO_{(s)}$+$CO_{2(G)}$ [2]. Sedangkan dalam proses *pack carburizing* pada suhu austenit akan mengeluarkan gas karbon dioksida (CO_2) dan gas karbon manoksida (CO) yang dihasilkan sumber karbon dan oksigen yang terperangkap [13]. Dengan adanya tambahan katalis akan menurunkan energi aktivasi dengan semakin banyaknya CO_2 yang terbentuk. Pada suhu austenit CO akan terurai pada permukaan baja [2]. Yang mana karbon yang berdifusi berupa atom karbon. Dengan penambahan energizer, proses menjadi lebih mudah berlangsung, bahkan jika terdapat sedikit udara yang terperangkap. Energizer ini menyediakan CO_2 yang berfungsi untuk memulai dan mengaktifkan reaksi [14]. Dengan adanya katalis maka reaksi semakin cepat yang akan mengurangi suhu yang dibutuhkan pada proses *pack carburizing,* dan memungkinkan pemprosesan pada suhu

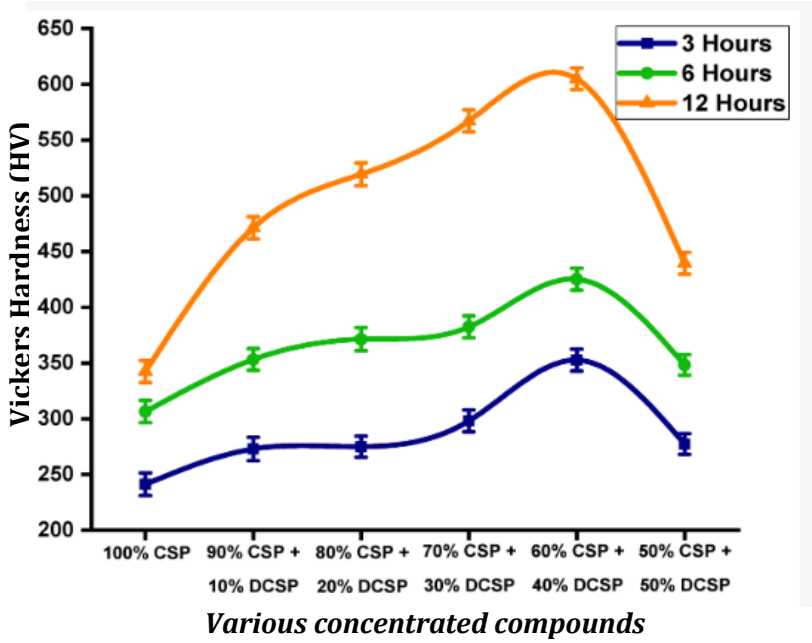
yang lebih rendah [15], sehingga mengurangi resiko terjadinya distorsi atau deformasi pada suhu tinggi, dengan reaksi yang cepat akan meningkatkan difusi karbon, serta meningkatkan penetrasi karbon, sehigga memperkaya karbon pada permukaan baja. Kandungan karbon dari hasil *Pack carburizing* dengan penambahan katalis jauh lebih tinggi dari pada tidak menggunakan katalis.

Semakin banyak karbon yang berdifusi maka semakin tinggi nilai kekerasan permukaan material [25], dengan tingginya karbon yang berdifusi maka semakin mudah untuk membentuk karbida pada permukan material sehingga menghasilkan permukaan yang sangat kerasa [26]. Seperti yang dilakukan oleh beberapa peneliti, misalnya yang dilakukan oleh Ihom. Penelitian yang dilakukan dengan menggunakan katalis $CaCO_3$ ada baja karbon rendah dengan kandungan karbon 0,13%, hasil dari proses *pack carburizing* yang tidak menggunakan katalis ditunjukkan pada Gambar 5a. Sedangkan yang menggunakan katalis ditujukkan pada Gambar 5b [27]. Pada gambar 5a dan 5b menunjukkan tinggi kekerasan dan kedalaman distribusi kekerasan pada permukaan material dengan penambahan katalis dan tanpa penambahan katalis [27]. Pada Gambar 6 menunjukkan nilai kekerasan permukaan dari variasi penambahan katalis [28], dari gambar tersebut kekerasan yang didapatkan pada permukaan lebih tinggi yang menggunkan katalis[11]. Kekerasan yang didapatkan menunjukan bahwa katalis $CaCO_3$ sangat berpengaruh dalam meningkatnya kekerasan hasil karburisasi [28], yang mana katalis $CaCO_3$ berperan sebagai aktivator yang mudah terurai untuk menghasilkan $CO_{2(g)}$, sehingga menghasilkan difusi karbon yang lebih banyak[10]. Semakin banyaknya karbon yang berdifusi maka semakin tinggi nilai kekerasan yang dihasilkan [17]. Terlihat jelas dari gambar 5, dan 6 perbedaan nilai kekerasan yang didapatkan, yang mana proses *pack carburizing* menggunakan katalis, hasil kekerasannya lebih tinggi [28]. Hal itu mengindikasikan bahwa banyak karbon yang berdifusi pada permukaan akibat proses *carburizing* menggunakan katalis [24].

Gambar 6 menunjukan terjadi penurunan nilai kekerasan pada penambahan 50% katalis [29], penambahan katalis menurut Suherman dalam bukunya menyebutkan bahwa penambahan katalis maksimal 40% [7], hal itu bersamaan dengan semakin banyaknya penambahan penggunaan katalis dan mempunya sifat mudah untuk terurai dari katalis jenis kalsium karbonat, maka jumlah gas CO_2 yang dihasilkan dari reaksi dekomposisi akan terjadi peningkatan [30], di sisi lain, peningkatan penambhan penggunaan katalis yang tidak sebanding dengan sumber karboon akan mengurangi kapasitas karbon dalam media *carburizing* yang tersedia untuk bereaksi [30]. Dengan begitu, peningkatan jumlah gas CO_2 yang dihasilkan dari reaksi dekomposisi tidak sebanding dengan ketersediaan karbon (C) dalam media *carburizing* untuk difusikan ke dalam permukaan baja, hal itu menyebabkan gas CO_2 hanya berinteraksi tanpa terjadi penangkapan atom-atom karbon untuk melarutkannya ke dalam permukaan baja, yang akhirnya mengakibatkan penggunaan katalis kalsium karbonat dalam jumlah persentase yang berlebihan menyebabkan penurunan nilai kekerasan [31].



Gambar 5. a). Hasil kekerasan tanpa katalis. b). Hasil kekerasan dengan katalis 40% [27]



Gambar 6. Hasil kekerasan dari proses *pack carburizing* variasi penambahan katalis CaCO3 [29]

4. KESIMPULAN

Menarik kesimpulan dari pembahasan bahwa katalis heterogen $CaCO_3$ yang yang berasal dari cangkang kerang bisa dijadikan sebagai katalis pada proses *pack carburizing*, yang berperan sebagai aktivator sehingga reaksi yang terjadi semakin cepat dan menyebabkan difusi karbon pada permukaan baja semakin tinggi, dengan tingginya karbon yang berdifusi membuat permukaan lebih keras, sehingga lebih menghemat terhadap biaya yang diperlukan. Tetapi untuk mendapatkan hasil yang optimal perlu penelitian lebih lanjut untuk mengetahui pengaruh persentase antara sumber karbon dan sumber katalis $CaCO_3$, pengaruh *holding time*, dan temperatur pada saat proses *pack carburizing*. Selain dari mudahnya untuk mendapat jenis kataslis ini terdapat kelemahan, yaitu katalis $CaCO_3$ membutuhkan suhu tinggi untuk terurai, dan terlalu banyak penambahan katalis akan mengakibatkan peneurunan kekerasan yang dihasilkan, hal itu yang perlu diperhatikan oleh peneliti selanjutnya.

5. UCAPAN TERIMKAISH

Saya ucapkan terimakasih kepada Universitas Widyagama yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk berpartisipasi dalam *The 6th Conference on Innovation and Application of Science and Technology (CIASTECH 2023)*.

6. REFERENSI

[1] R. M. Pikahulan, "Konsep Alih Teknologi Dalam Penanaman Modal Di Indonesia Bidang Industri Otomotif," *Cakrawala Huk.*, vol. 13, no. 2, pp. 72–88, 2018, [Online]. Available: https://ejournal.up45.ac.id/index.php/cakrawala-hukum/article/view/385/342

[2] K. S. Hassan, "Comparative of wear resistance of low carbon steel pack carburizing using different media," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 1, p. 71, 2015, doi: 10.14419/ijet.v4i1.3866.

[3] W. D. Callister Jr and D. G. Rethwisch, *Characteristics, Application, and Processing of Polymers*. 2018.

[4] Fox-Rabinovich, George E. Totten. - Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies (2007, Taylor & Francis) - libgen.li.pdf."
[5] L. Joska, J. Fojt, M. Hradilova, F. Hnilica, and L. Cvrcek, "Corrosion behaviour of TiN and ZrN in the environment containing fluoride ions," *Biomed. Mater.*, vol. 5, no. 5, 2010, doi: 10.1088/1748-6041/5/5/054108.
[6] G. Parrish, *Carburizing:Microstructures and Properties*. 1999. [Online]. Available: http://link.springer.com/10.1007/BF02646170
[7] Ir. Wahid Suherman "Ilmu Logam II - buku ajar Institute Teknologi Sepuluh November, 1998."
[8] I. Mon, Yerimadesi, and Hardeli, "Kimia Fisika (Kinetika Kimia)." p. 32, 2012. [Online]. Available: http://repository.unp.ac.id/26756/1/2012-Buku kinetika kimia %28Yerimadesi%2C dkk%29 1.pdf
[9] O. Adedipe *et al.*, "Explicit microstructural and electrochemical study of value-added carburized mild steel with coconut shell ash and CaCO3 nanoparticles derived from periwinkle shell," *Chem. Data Collect.*, vol. 45, no. March, p. 101028, 2023, doi: 10.1016/j.cdc.2023.101028.
[10] N. Thammachot, P. Nachaisit, W. Homjabok, C. Peeratatsuwan, and A. Mayai, "The Effects of Energizer, Carburizing Temperature and Time on the Mechanical Properties of Hardened Big Knives in a Pack Carburizing process," *KKU Eng. J.*, vol. 43, no. December, pp. 172–177, 2016, doi: 10.14456/kkuenj.2016.33.
[11] O. Akanji, O. Fatoba, and A. Aasa, "The Influence of Particle Size and Soaking Time on Surface Hardness of Carburized AISI 1018 Steel," *Br. J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 37–44, 2015, doi: 10.9734/bjast/2015/13552.
[12] M. Zhao *et al.*, "An efficient salt-thermo-carburizing method to prepare titanium carbide coating," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 465, no. March, p. 129546, 2023, doi: 10.1016/j.surfcoat.2023.129546.
[13] A. Karim, I. Azmy, S. Q. Khoiriah, and C. Bintoro, "Microstructure and Mechanical Properties of Pack Carburized AISI 1020 Steel Using Na2CO3 and CaCO3 Catalysts," *J. Renew. Energy Mech.*, vol. 5, no. 02, pp. 52–59, 2022, doi: 10.25299/rem.2022.vol5(02).9965.
[14] O. Adedipe *et al.*, "Unveiling high-performance carburized mild steel using coconut shell ash and CaCO3 nanoparticles derived from periwinkle shell," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 126, no. 9–10, pp. 4711–4721, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-11399-w.
[15] E. K. Arthur and S. T. Azeko, "Surface hardening of ferrous materials with cassava (Manihot spp.) waste: A review," *Sci. African*, vol. 9, p. e00483, 2020, doi: 10.1016/j.sciaf.2020.e00483.
[16] S. A. Afolalu, E. H. Asonaminasom, S. O. Ongbali, A. A. Abioye, M. O. Udo, and E. Y. Salawu, "Dataset on experimental investigation of optimum carburizing temperature and holding time of bi- nano additives treatment of AISI 5130 steel," *Data Br.*, vol. 19, pp. 2279–2283, 2018, doi: 10.1016/j.dib.2018.07.025.
[17] G. Wang, X. Sang, Y. Zhang, M. H. Zhao, G. T. Xu, and Z. Peng, "Carburization-induced microstructure evolution and hardening mechanism of 18CrNiMo7-6 steel," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 25, pp. 1649–1661, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.06.050.
[18] Bahtiar, M. Iqbal, and D. Arisandi, "Analisis Kekerasan Dan Struktur Mikro Pada Baja Komersil Yang Mendapatkan Proses Pack Carburizing Dengan Arang Cangkang Kelapa Sawit," *J. Mek.*, vol. 8, no. 1, pp. 686–696, 2017.
[19] O. Adedipe *et al.*, "Explicit microstructural and electrochemical study of value-added carburized mild steel with coconut shell ash and CaCO 3 nanoparticles derived from periwinkle shell," *Chem. Data Collect.*, vol. 45, no. March, p. 101028, 2023, doi: 10.1016/j.cdc.2023.101028.
[20] S. Dampang, E. Purwanti, F. Destyorini, S. B. Kurniawan, S. R. S. Abdullah, and M. F. Imron, "Analysis of Optimum Temperature and Calcination Time in the Production of CaO Using Seashells Waste as CaCO3 Source," *J. Ecol. Eng.*, vol. 22, no. 5, pp. 221–228, 2021, doi:

10.12911/22998993/135316.
[21] H. Hafni, S. Hadi, and E. Edison, "The Influence of Calcium Carbonate Composition and Activated Carbon in Pack Carburizing Low Carbon Steel Process in the Review of Hardness and Micro Structure," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 97, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1755-1315/97/1/012037.
[22] T. J. Irwanto and A. Irmawan, "Pengaruh Pemanfaatan Limbah Kulit Kerang Bambu Sebagai Pengganti Sebagian Semen Terhadap Kuat Tekan Beton dengan Penggunaan Agregat Kasar Madura," *Ge-STRAM J. Perenc. dan Rekayasa Sipil*, vol. 4, no. 1, pp. 21–26, 2021, doi: 10.25139/jprs.v4i1.3360.
[23] S. Darmo, R. Soenoko, E. Siswanto, and T. D. Widodo, "Study on mechanical properties of pack carburizing SS400 steel with energizer pomacea canalikulata lamarck shell powder," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 14–23, 2018, doi: 10.30574/gjeta.2022.11.2.0087.
[24] A. González-Angeles, J. López-Cuevas, and N. Pitalúa-Díaz, "Comparison of CaCO3 from natural sources and artificial carbonates as activators of solid-phase carburizing of low-carbon steel," *Met. Sci. Heat Treat.*, vol. 55, no. 7–8, pp. 355–357, 2013, doi: 10.1007/s11041-013-9634-4.
[25] T. Guo, X. Cao, H. Shao, Q. Zhao, and Z. Liang, "Effect of Fe on the oxidation, sulfidation and carburization behaviors of alloys in CO2 containing SO2," *Corros. Sci.*, vol. 222, no. August, p. 111438, 2023, doi: 10.1016/j.corsci.2023.111438.
[26] N. Xiao, W. Hui, Y. Zhang, X. Zhao, Y. Chen, and H. Dong, "High cycle fatigue behavior of a low carbon alloy steel: The influence of vacuum carburizing treatment," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 109, no. September 2019, p. 104215, 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.104215.
[27] P. A. Ihom, "Case hardening of mild steel using cowbone as Energiser," *African J. Eng. Res.*, vol. 1, no. October, pp. 97–101, 2013.
[28] N. Shell, W. Powders, and C. Duration, "Effective Case Depth and Wear Resistance of Pack Carburized," 2022.
[29] Ramli, C. C. Wu, and A. Shaaban, "Mechanical properties of pack carburized scm 420 steel processed using natural shell powders and extended carburization time," *Crystals*, vol. 11, no. 9, 2021, doi: 10.3390/cryst11091136.
[30] T. Dwi Susanto, N. Rekto Prabowo, and B. Darmawan, "Intuisi Teknik dan Seni Efektifitas Katalis Proses Pack Carburizing Terhadap Kekerasan Permukaan dan Struktur Mikro Baja ST 42 The Effectiveness of Pack Carburizing Catalyst Against Surface Hardness and Microstructure of ST 42," vol. 12, no. 2, pp. 29–39, 2020.
[31] R. Umunakwe, O. C. Okoye, C. I. Madueke, and D. O. Komolafe, "Effects of Carburization with Palm Kernel Shell/Coconut Shell Mixture on the Tensile Properties and Case Hardness of Low Carbon Steel," *FUOYE J. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 1, 2017, doi: 10.46792/fuoyejet.v2i1.83.