

PENGAMATAN METALOGRAFI BAJA JIS S20C TERKAIT FENOMENA PERUBAHAN MIKROSTRUKTUR HASIL *LOW PRESSURE GAS CARBURIZING* (LPGC)

Reinaldo Evan Audrey¹, Putu Hadi Setyarini¹, Sugiarto¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya
Jl. Mayjend. Haryono no 167, Malang, 65145, Indonesia Telp. (0341) 554291
Email: maxko.aldo@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini berfokus pada pengamatan perubahan mikrostruktur dan peningkatan nilai kekerasan pada baja JIS S20C, yang merupakan material industri dengan biaya yang ekonomis namun memiliki keterbatasan dalam sifat mekanisnya. Proses *Low Pressure Gas Carburizing* (LPGC) diaplikasikan pada baja tersebut dengan tujuan untuk meningkatkan sifat-sifat material, yang mana proses tersebut dilakukan pada suhu 950°C dengan durasi penahanan selama 60 menit. Pengamatan yang dilakukan menunjukkan perubahan signifikan pada mikrostruktur baja dari yang sebelumnya didominasi oleh fasa perlit-ferrit menjadi martensit. Transformasi ini berkontribusi pada peningkatan kekerasan material yang cukup signifikan, dari nilai awal 249,4 HV menjadi 730,8 HV. Peningkatan kekerasan tersebut dihasilkan oleh terbentuknya lapisan martensit yang padat dan seragam, akibat dari difusi karbon ke dalam permukaan baja selama proses karburisasi. Selain itu, metode LPGC juga terbukti efektif dalam mengontrol difusi karbon yang lebih merata, mengurangi risiko distorsi geometris, serta meningkatkan ketahanan baja terhadap korosi. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa LPGC merupakan metode yang efisien dan efektif untuk memodifikasi sifat mekanik baja karbon rendah, sehingga menjadikannya lebih sesuai untuk berbagai aplikasi industri yang menuntut material dengan kekerasan dan durabilitas yang tinggi.

Kata kunci: *carburizing; transformasi; mikrostruktur; kekerasan; low pressure gas carburizing (LPGC)*

Pendahuluan

Low Pressure Gas Carburizing (LPGC) merupakan salah satu metode pengembangan dari *gas carburizing* konvensional, dengan tujuan untuk memberi perlakuan khusus terhadap suatu material (logam) tanpa meningkatkan peluang terjadinya kegagalan saat pemrosesan. Sesuai dengan literatur yang ada, prinsip *gas carburizing* adalah difusi unsur karbon ke dalam permukaan baja untuk membentuk lapisan keras yang dapat meningkatkan ketahanan aus, ketahanan korosi, dan *fatigue strength*. LPGC sendiri, telah menjadi metode yang semakin penting dalam industri manufaktur untuk meningkatkan sifat mekanik dari *low carbon steel* (Tsuyoshi Sugimoto & Dong-Ying Ju, 2019). Salah satu contohnya adalah baja JIS S20C, yang memiliki kekurangan pada sifat mekanik maupun sifat fisik yang menyebabkan material tersebut memiliki peluang terjadinya kegagalan produk (Kombayev *et al.*, 2022). Sehingga, penerapan LPGC pada baja JIS S20C menjadi sangat efisien karena keunggulannya dalam mengontrol kedalaman penetrasi dan difusi karbon yang lebih seragam atau merata (homogen) dibandingkan dengan metode *carburizing* konvensional. Sehingga dapat meningkatkan *material properties* dari *low carbon steel* pada penerapan di industri manufaktur, otomotif, dan konstruksi (Liduino *et al.*, 2021).

Pada penelitian terkait yang dilakukan oleh (Wang *et al.*, 2020), menginvestigasi dampak *low pressure carburizing* (LPC) pada baja karbon rendah dan menemukan bahwa proses ini mampu meningkatkan kekerasan permukaan hingga 50% dibandingkan dengan baja tanpa perlakuan. Studi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kekerasan permukaan tersebut disebabkan oleh terbentuknya lapisan martensitik yang padat dan seragam akibat penambahan unsur karbon, yang secara signifikan memperbaiki sifat mekanik baja. Hal tersebut dikarenakan bahwa LPC dapat menghasilkan butiran austenitik yang lebih halus, yang kemudian berubah menjadi martensit saat proses pendinginan. Sehingga ketentuan penting yang harus dilakukan ialah kontrol suhu selama proses LPC untuk memastikan distribusi karbon yang optimal dan hasil mikrostruktur yang diinginkan (Arumparithy *et al.*, 2022). Hal lain yang didapatkan pada penelitian (Izowski *et al.*, 2023) adalah proses LPC memiliki keunggulan dalam menurunkan peluang terjadinya distorsi geometrik atau perubahan dimensi pada spesimen baja karbon rendah dan grafik kekerasan yang sesuai dengan teori yang ada. Penelitian ini membandingkan LPC dengan metode simulasi

dan menunjukkan bahwa keduanya mampu untuk saling memvalidasi bahwa spesimen mengalami peningkatan dalam segi *material properties*.

Penelitian lain oleh (Heuer, 2021) mendapatkan hasil distribusi kekerasan yang lebih merata di seluruh permukaan baja karbon rendah. Penelitian ini menggunakan teknik analisis mikroskopis canggih berupa *micro-vickers* untuk mengukur variasi kekerasan dan menemukan bahwa LPGC menghasilkan profil kekerasan yang lebih konsisten dibandingkan dengan metode lainnya. Sehingga dari perubahan distribusi kekerasan yang merata dapat dikatakan bahwa perubahan mikrostruktur yang dialami akan merata atau homogen. Proses LPC dan high pressure gas quenching juga dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi baja karbon rendah. Hal tersebut terjadi akibat proses gas carburizing bertekanan rendah menghasilkan lapisan karbida yang dapat bertindak sebagai penghalang terhadap penetrasi korosi.

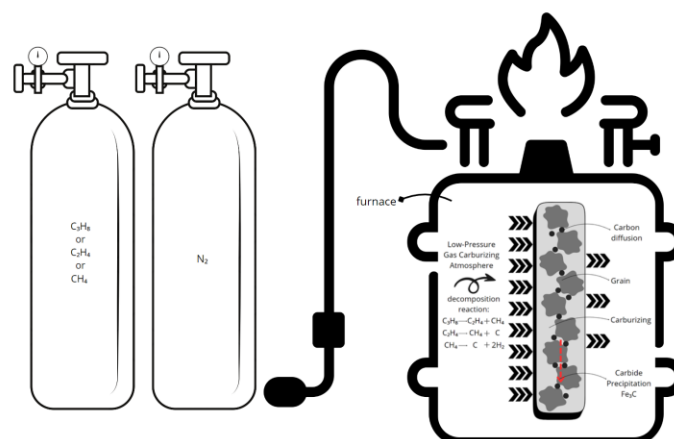
Pada penelitian yang dilakukan oleh (Gordon *et al.*, 2023) menunjukkan bahwa pemilihan *heat treatment* yang baik dapat menghasilkan mikrostruktur martensitik yang lebih halus dan konsisten pada baja karbon rendah dibandingkan dengan proses *carburizing* konvensional. Hal ini mendukung temuan dari (Prunel and Strauder, 2004) yang mencatat bahwa mikrostruktur martensitik yang dihasilkan oleh LPC memiliki kekerasan permukaan yang lebih tinggi dan daya tahan terhadap keausan yang lebih baik. Selain itu, penelitian oleh (Wang *et al.*, 2020) mengungkapkan bahwa penerapan LPC pada baja karbon rendah dapat memperbaiki sifat mekanik tanpa menyebabkan deformasi berlebih pada material, yang sering menjadi masalah pada metode gas carburizing high pressure.

Berdasarkan beberapa penelitian terkait, penelitian ini bertujuan untuk mengamati perubahan mikrostruktur yang terjadi pada baja JIS S20C yang tergolong pada baja karbon rendah hasil proses LPGC. Adapun manfaat yang akan didapat adalah; pemahaman lebih dalam mengenai efek LPGC terhadap perubahan mikrostruktur dan sifat mekanik berupa nilai kekerasan baja karbon rendah sebagai media penunjang praktik industri berkelanjutan. Ruang lingkup pembahasan akan dijelaskan secara kritis mengenai hubungan antara perubahan mikrostruktur dan nilai distribusi kekerasan yang di uji menggunakan mikroskop optik dan alat uji kekerasan *micro-vickers*.

Teori Terkait

Low pressure gas carburizing (LPGC)

Low Pressure Gas Carburizing (LPGC) adalah proses termokimia bahan yang di mana karbon didifusikan ke dalam permukaan baja pada tekanan rendah untuk meningkatkan kekerasan, perubahan mikrostruktur secara homogen, dan mengurangi peluang terjadinya oksidasi intergranular. Proses ini material dipanaskan hingga suhu sekitar 900 - 1050°C atau yang biasa disebut dengan suhu austenitik (Korecka *et al.*, 2019). Dalam proses tersebut, gas hidrokarbon seperti metana (CH₄) diuraikan untuk menghasilkan atom karbon yang akan berdifusi secara interstisi ke dalam permukaan baja (Wang *et al.*, 2020). Sedangkan gas nitrogen (N₂) merupakan gas inert yang berfungsi untuk menstabilkan gas atmosfer di dalam tungku dan tidak bereaksi secara langsung dengan material. Selama proses pendinginan, karbon yang terlarut membentuk struktur martensit yang keras, dan dapat meningkatkan sifat mekanik baja.



Gambar 1. Skematik kompleks LPGC

Gambar 1. menunjukkan skematik proses *low pressure gas carburizing* (LPGC). Proses tersebut dilakukan menggunakan dua campuran gas, yaitu gas hidrokarbon yang berperan sebagai sumber karbon dan gas nitrogen (N₂) sebagai gas inert atau gas penstabil saja (tidak berpengaruh langsung terhadap proses difusi karbon terhadap material). Sedangkan di dalam *furnace*, terlihat bahwa atmosfer *carburizing* bertekanan rendah mengandung

campuran gas yang digunakan untuk memperkaya karbon pada permukaan baja. Gas-gas seperti propana (C_3H_8), etana (C_2H_4), dan metana (CH_4) mengalami reaksi dekomposisi yang menghasilkan karbon dan hidrogen. Reaksi yang terjadi meliputi C_3H_8 yang terpecah menjadi C_2H_4 dan CH_4 , C_2H_4 yang terpecah menjadi CH_4 dan karbon, serta CH_4 yang terpecah menjadi karbon dan hidrogen. Atom karbon yang dihasilkan dari reaksi dekomposisi ini kemudian berdifusi ke dalam permukaan baja, yang ditunjukkan dengan panah mengarah masuk ke dalam baja. Sesuai reaksi kimia berikut:



Setelah didapatkan C_2H_4 dan CH_4 , selanjutnya senyawa tersebut akan terdekomposisi kembali menjadi unsur karbon dan hidrogen. Unsur karbon akan masuk berdifusi ke dalam permukaan material akibat adanya reaksi adsorpsi atau adanya gaya tarik antara unsur logam (Fe) dengan unsur karbon.



Dalam proses *carburizing*, karbon yang berdifusi ke dalam baja membentuk lapisan kaya karbon di permukaan baja. Reaksi ini meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus baja tersebut. Sebaliknya, reaksi *decarburizing* juga dapat terjadi, di mana karbon di permukaan baja bereaksi dengan gas lain untuk membentuk gas metana (CH_4) dan karbon monoksida (CO). Reaksi-reaksi yang terjadi meliputi karbon yang bereaksi dengan hidrogen membentuk metana dan karbon yang bereaksi dengan air membentuk hidrogen dan karbon monoksida. Karbon yang berdifusi ke dalam baja dapat bereaksi dengan besi (Fe) untuk membentuk presipitasi karbida (Fe_3C), yang meningkatkan kekerasan permukaan baja.

Material dan Metode Pelaksanaan

Penelitian ini menggunakan material baja JIS S20C yang tergolong menjadi baja karbon rendah. Dengan beberapa permasalahan, mencakup sifat mekanik yang kurang baik untuk penerapan material yang kompleks (struktural mesin) pada industri manufaktur. Hal tersebut terjadi akibat dari nilai kadar karbon yang rendah sehingga mempengaruhi nilai kekerasan permukaan material tersebut.

Tabel 1. Komposisi kimia baja JIS S20C

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Ni (%)	Cr (%)	Cu (%)
0,18-0,23	0,15-0,35	0,3-0,6	$\leq 0,03$	$\leq 0,035$	$\leq 0,2$	$\leq 0,2$	$\leq 0,3$

Bentuk awal spesimen merupakan *sheet plate* dengan ukuran 200 x 50 x 5 mm (p x l x t). Pembentukan ukuran spesimen dilakukan dengan cara, memotong menggunakan mesin *wire cutting* menjadi 3 spesimen dengan ukuran masing - masing 20 x 15 x 5 mm (p x l x t). Adapun 3 spesimen tersebut ialah spesimen blanko atau biasa disebut tanpa perlakuan; spesimen untuk pengujian distribusi kekerasan yang dimana, merupakan pengujian destruktif; dan spesimen terakhir digunakan dalam pengujian mikroskop optik.

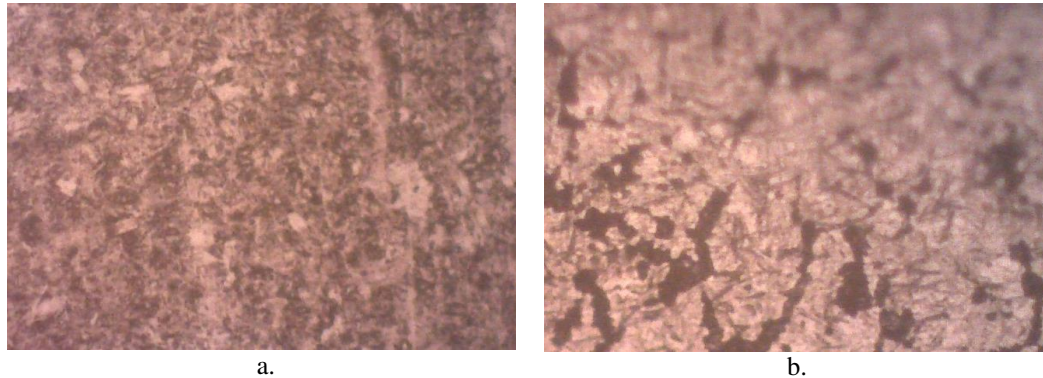
Perlakuan LPGC dilakukan pada *fluidized bed furnace* yang bertujuan agar dapat mempermudah mengontrol parameter yang diinginkan. Hal itu juga dapat mempengaruhi kondisi atmosfer didalam tungku agar lebih terkendali dan dapat memastikan proses LPGC berjalan secara konsisten. Parameter yang digunakan ialah temperatur 950°C dengan holding time 60 menit dan menggunakan metode direct quenching pada media oli. Spesimen yang diperlakukan LPGC akan ditempatkan didalam tungku dengan cara memberikan lubang pada spesimen sebagai tempat masuknya kabel seling, lalu digantungkan pada bagian atas tungku pada suhu $\pm 450^\circ C$. Hal tersebut bermaksud untuk memberikan kondisi preheating pada spesimen sehingga dapat mengurangi resiko adanya oksidasi intergranular. Selanjutnya suhu dapat ditingkatkan sesuai parameter yang diinginkan dan proses LPGC dapat berjalan.

Selanjutnya, spesimen diuji dengan menggunakan mikroskop metalografi Nikon 59520 untuk mempelajari perubahan mikrostruktur yang terjadi dan untuk mengetahui ukuran penambahan lapisan yang terbentuk di permukaan material. Adapun parameter pengujian yang dilakukan menggunakan *magnificent* atau perbesaran 200x . Untuk menguatkan hasil perubahan mikrostruktur, dilakukan uji kekerasan menggunakan metode *micro-hardness vickers* dengan alat Mitutoyo HM 200. Pengujian dilakukan dengan mengambil 7 titik yang dimulai dari bagian tepi hingga ke inti material dan jarak masing-masing titik yaitu 350 μm . Dari data yang didapatkan, akan dianalisis untuk mengevaluasi spesimen baja karbon rendah JIS S20C sebelum dan sesudah perlakuan LPGC.

Hasil dan Pembahasan

Mikrostruktur

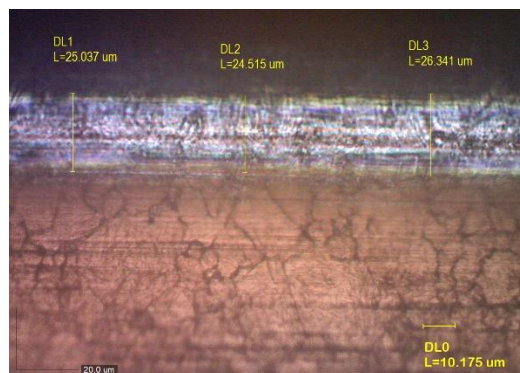
Dapat dilihat pada Gambar 2. bahwa adanya perubahan bentuk mikrostruktur yang terjadi antara material tanpa perlakuan dan material setelah perlakuan. Pada gambar (2a) menunjukkan bentuk mikrostruktur yang sebagian besar terdiri dari ferrit dan sebagian kecil berupa perlit. Hal itu menandakan bahwa, struktur mikro perlit dan ferrit memiliki nilai kekerasan yang rendah sehingga berpengaruh pada sifat mekanis material yang kurang baik. Sedangkan gambar (2b), menunjukkan bentuk mikrostruktur yang dominan berupa martensit. Martensit sendiri memiliki nilai kekerasan yang paling mutlak atau dapat dikatakan yang tertinggi dibandingkan nilai kekerasan mikrostruktur lainnya. Pembentukan martensit menunjukkan bahwa pemilihan temperatur dan *holding time* sangat berpengaruh, sehingga proses difusi yang terjadi dapat dikatakan sangat efektif.



Gambar 2. Mikrostruktur dengan perbesaran 200x (a) tanpa perlakuan dan (b) setelah perlakuan

Terjadinya perubahan dari mikrostruktur perlit-ferrit menjadi martensit setelah proses LPGC sesuai dengan beberapa penelitian terkait dan kajian teori yang ada. Salah satu penelitian yang telah dilakukan oleh (Tapar *et al.*, 2021; Arumparithy *et al.*, 2022), menunjukkan hasil berupa adanya perubahan mikrostruktur yang serupa akibat proses LPGC. Perubahan dapat terjadi akibat dari energi termal yang dapat mengaktifkan proses dekomposisi hidrokarbon menjadi atom karbon (C), yang selanjutnya akan terdifusi masuk secara interstisi ke permukaan atom logam (Fe). Selain itu dengan terlihatnya mikrostruktur berupa martensit juga menunjukkan tingginya kandungan karbon yang dicapai saat proses berjalan. Tidak hanya pada penelitian terkait, kajian teori yang didapatkan pada buku ASM Metals Handbook Vol.4 tentang *heat treatment* menjelaskan semakin tinggi suhu yang digunakan, maka perubahan yang terjadi pada mikrostruktur juga akan semakin terlihat jelas.

Transformasi mikrostruktur menegaskan bahwa kandungan karbon dari gas hidrokarbon dapat dikatakan sangat mencukupi untuk mengubah struktur perlit-ferrite baja menjadi martensit pada proses LPGC yang menggunakan suhu tinggi di angka 950°C dan *holding time* selama 60 menit. Secara ilmiah, penelitian ini memperkenalkan pendekatan berkelanjutan dan inovatif dalam proses memodifikasi permukaan baja, memanfaatkan kontrol tekanan yang rendah. Hal tersebut dilakukan untuk meningkatkan peluang terjadinya perubahan mikrostruktur secara lebih merata (homogen) sesuai dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 2. Untuk lebih menguatkan hasil mikrostruktur yang ada, selanjutnya akan dilakukan analisis pada uji kekerasan menggunakan metode *micro-hardness vickers*. Selain sebagai kondimen penguat data hasil, uji kekerasan yang dilakukan akan memvalidasi perbandingan hasil spesimen sebelum dan sesudah perlakuan.

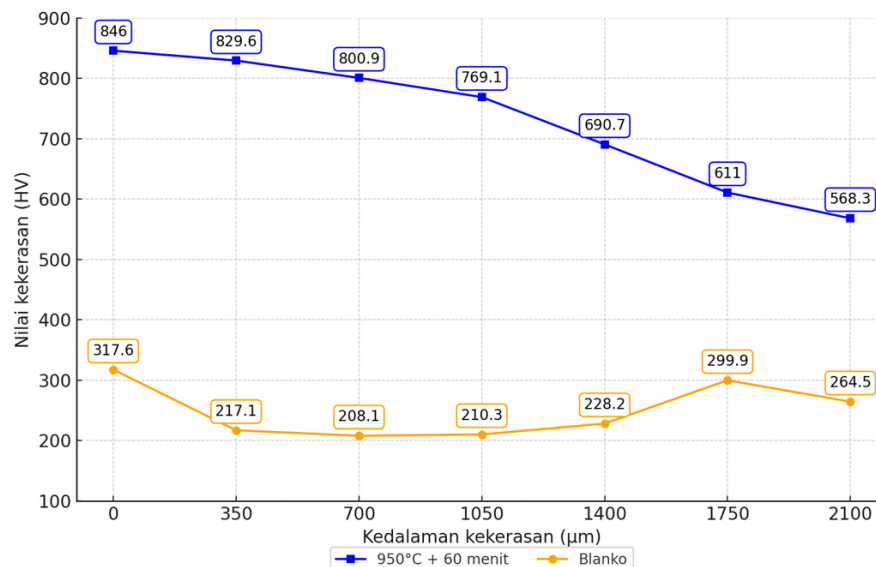


Gambar 3. Ketebalan lapisan yang terbentuk setelah LPGC

Selanjutnya, hasil pengamatan ketebalan lapisan setelah proses *low pressure gas carburizing* pada temperatur 950°C dengan *holding time* selama 60 menit yang ditampilkan pada Gambar 3. terdapat tiga pengukuran ketebalan lapisan yang diberi label DL1; DL2; dan DL3. Hasil pengukuran menunjukkan nilai DL1 sebesar $25,037\ \mu\text{m}$, DL2 sebesar $24,515\ \mu\text{m}$, dan DL3 sebesar $26,341\ \mu\text{m}$. Ketebalan ini menunjukkan variasi yang relatif kecil antar pengukuran, yang mengindikasikan adanya keseragaman dalam proses *carburizing*. Namun, perbedaan kecil dalam nilai ketebalan ini bisa disebabkan oleh faktor-faktor lain, seperti variasi pada kondisi material. Sedangkan untuk mendapatkan nilai rata-rata ketebalan lapisan, dapat menjumlahkan semua nilai ketebalan yang diukur dan membaginya dengan jumlah pengukuran yang ada. Rata-rata ketebalan lapisan yang didapatkan sekitar $25,298\ \mu\text{m}$. Rata-rata ini menunjukkan bahwa proses LPGC menghasilkan lapisan dengan ketebalan yang cukup konsisten, yang dapat dianggap sebagai indikator efektivitas proses pada parameter yang digunakan.

Distribusi kekerasan

Gambar 3. merupakan hasil nilai distribusi kekerasan dari spesimen tanpa perlakuan dan spesimen setelah perlakuan LPGC dengan parameter suhu 950°C ; *holding time* selama 60 menit. Terlihat bahwa adanya perubahan signifikan yang terjadi diantara 2 spesimen tersebut dengan nilai rata-rata untuk spesimen tanpa perlakuan sekitar $249,4\ \text{HV}$ dan $730,8\ \text{HV}$ untuk spesimen yang telah diberi perlakuan. Hal tersebut menunjukkan nilai kekerasan dipengaruhi oleh jumlah karbon saat proses LPGC sesuai dengan hasil mikrostruktur pada Gambar 2. Semakin banyak nilai unsur karbon yang terdifusi masuk ke dalam permukaan logam, maka nilai kekerasan juga akan semakin meningkat.



Gambar 4. Grafik distribusi kekerasan material tanpa perlakuan (*blanko*) dan setelah perlakuan

Selaras dengan penelitian oleh (Gordon *et al.*, 2023), pada Gambar 4. spesimen yang telah diberi perlakuan dengan temperatur 950°C ; *holding time* 60 menit menunjukkan nilai tertinggi $846\ \text{HV}$ pada permukaan ($0\ \mu\text{m}$) dan menurun seiring bertambahnya kedalaman hingga menuju inti material ($2100\ \mu\text{m}$) dengan nilai terendah $568,3\ \text{HV}$. Penurunan tersebut terjadi, akibat dari kemampuan difusi atom karbon yang terbatas sesuai dengan batas maksimal sekitar $\pm 1,5\ \text{mm}$ penjelasan dari ASM Metals Handbook Vol. 4 Heat Treatment. Nilai kekerasan yang terlihat dapat memvalidasi perubahan mikrostruktur yang terjadi pada Gambar 2. Dengan mikrostruktur awal baja karbon rendah JIS S20C berupa perlit-ferrit menunjukkan kekerasan yang rendah dan konstan akibat dari tidak adanya karbon yang berdifusi masuk. Sedangkan baja yang telah diberi perlakuan menunjukkan mikrostruktur berupa martensit yang memiliki kekerasan tinggi terutama pada bagian permukaan. Hal itu sesuai dengan tujuan LPGC atau proses *carburizing* lainnya, yaitu memodifikasi bagian permukaan logam menggunakan metode *heat treatment* atau yang biasa disebut (*thermochemical treatment*).

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa penerapan proses *Low Pressure Gas Carburizing* (LPGC) pada baja JIS S20C memberikan peningkatan yang signifikan terhadap sifat mekanik material, khususnya dalam hal kekerasan dan ketahanan terhadap korosi. Transformasi mikrostruktur yang terjadi dari perlit-ferrit menjadi martensit telah dibuktikan melalui pengamatan metalografi, di mana lapisan martensit yang terbentuk memberikan kekerasan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan struktur mikro sebelumnya. Dapat dikatakan bahwa material

yang memiliki ekonomis rendah seperti *low carbon steel* dapat bersaing dengan material dengan ekonomis yang tinggi, salah satunya *high or medium carbon steel*. Proses LPGC juga telah terbukti mampu mengontrol distribusi karbon dengan lebih baik, sehingga menghasilkan lapisan permukaan yang homogen dan minim distorsi, yang pada akhirnya meningkatkan kualitas dan performa material tersebut dalam aplikasi industri.

Secara keseluruhan, penelitian ini menggarisbawahi pentingnya metode LPGC dalam meningkatkan kualitas baja karbon rendah, khususnya untuk penggunaan di sektor manufaktur yang memerlukan material dengan durabilitas yang tinggi. Hasil yang diperoleh tidak hanya menunjukkan efisiensi dalam meningkatkan kekerasan dan durabilitas, tetapi juga menunjukkan potensi metode ini sebagai solusi yang lebih ekonomis dan efektif dibandingkan dengan teknik karburisasi konvensional. Penelitian ini membuka peluang lebih lanjut untuk eksplorasi aplikasi LPGC pada material lain dan pengembangan proses yang lebih optimal untuk kebutuhan industri masa depan.

Daftar Pustaka

- Arai, T., et al., (1991), "ASM Metals Handbook", ASM International, Inc., Vol. 4., pp. 961–962.
- Arumparithy, G. L., Adalarasan, R., Santhanakumar, M., Balaji, N. and Asres, Y., (2022), "Investigation in Gas Carburizing of AISI 4140, EN36, and 16MnCr5 Steels Using the Grey Incidence-Based Taguchi (GIBT) Method" *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022.
- Gordon, R. E., Kalu, E. E., Adetunji, A. R., Campbell, D. and Kalu, P. N., (2023) "The Effect of the Environment on the Case Hardening Characteristics of AISI 1018 Steel during Cassava Leaf Pack Cyaniding' Alloys, Vol. 3(1) pp. 1–14.
- Heuer, V., (2021), "Advances in Low Pressure Carburizing and High Pressure Gas Quenching" 31st ASM Heat Treating Society Conference and Exposition, Heat Treat 2021 - Extended Abstracts, Vol. 1 pp. 4–8.
- Iżowski, B., Wojtyczka, A. and Motyka, M., (2023), "Numerical Simulation of Low-Pressure Carburizing and Gas Quenching for Pyrowear 53 Steel" *Metals*, Vol. 13(2).
- Kombayev, K., Muzdybayev, M., Muzdybayeva, A., Myrzabekova, D., Wieleba, W., and Leśniewski, T., (2022), "Functional Surface Layer Strengthening and Wear Resistance Increasing of a Low Carbon Steel by Electrolytic-Plasma Processing" *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 68(9) pp. 542–551.
- Liduino, V., Galvão, M., Brasil, S. and Sérvulo, E., (2021), "SRB-mediated corrosion of marine submerged AISI 1020 steel under impressed current cathodic protection" *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, Vol. 202.
- Prunel, G. and Stauder, B., (2004) "Advantages of low pressure carburizing in the heat treatment", *Cailiao Rechuli Xuebao/Transactions of Materials and Heat Treatment*, Vol. 25(5) pp. 364–369.
- Tapar, O. B., Steinbacher, M., Gibmeier, J. and Epp, J., (2021) "Investigation of the Effects of Low-Pressure Carburizing Process Parameters on Microstructural Evolution by Means of In Situ Synchrotron X-Ray Diffraction" *Advanced Engineering Materials*, Vol. 23(11) pp. 417–431.
- Tsuyoshi, S. and Dong-Ying, J., (2019), "Heat Treatment Simulation for Low Pressure Hyper Carburizing Process" *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, Vol. 9(1) pp. 33–39.
- Wang, H., Zhai, Y., Zhou, L., Liu, B. and Hao, G., (2020), "Study on the Process of Vacuum Low Pressure Carburizing and High Pressure Gas Quenching for Carburizing Steels" *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1624(4) pp. 0–8.
- Wołowiec-Korecka, E., Korecki, M., Sut, M., Brewka, A., and Kula, P., (2019), "Calculation of the mixture flow in a low-pressure carburizing process" *Metals*, Vol. 9(4) pp. 1–8.
- Yin, L., Wang, T., Ma, X., Fu, Z., Hao, G., Li, L., and Wang, L., (2019), "Pre-coated Fe-Ni film to promote low-pressure carburizing of 14Cr14Co13Mo4 steel" *Coatings*, Vol. 9(5).