



Analisis Pengaruh Variasi Temperatur Proses *Pack Carburizing* Terhadap Laju Korosi Material Baja Karbon ASTM A36

Ade Wahyu Yusariarta Putra Parmita¹, Bobby Chandra Priyandoko¹, Hizkia Alpha Dewanto¹, Rifqi Aulia Tanjung¹, Satrio Alam Bramantyo¹, Rizki Febriyanto¹

¹ Program Studi Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan. Koresponding Email: adewahyu27@lecturer.itk.ac.id

Abstrak

Baja ASTM A36 tergolong ke dalam baja struktural, penggunaannya banyak dalam dunia industri misal konstruksi jembatan, struktur bangunan, roda gigi, dan konstruksi kapal. Baja ASTM A36 memiliki beberapa kekurangan yaitu kapasitas kedalaman pengerasannya yang rendah, ketahanan korosi yang buruk, dan sifat mekanik seperti kekerasan yang relatif rendah. Oleh karena itu, untuk menanggulangi permasalahan baja ASTM A36 maka dilakukan proses pengerasan permukaan menggunakan metode *pack carburizing* dengan menggunakan variasi temperatur 850, 900, dan 950°C dan waktu tahan selama 2 jam menggunakan karbon aktif konvensional dan *energizer* dari cangkang telur. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian struktur mikro, dan pengujian laju korosi (polarisasi linier). Hasil yang diperoleh yaitu proses *pack carburizing* berpengaruh terhadap laju korosi dari baja ASTM A36 dengan ditunjukkan oleh penurunan laju korosi yang terjadi, sementara variasi temperatur pada proses *pack carburizing* terhadap laju korosi dari baja ASTM A36 tidak berpengaruh secara signifikan. Variasi temperatur optimal dalam proses *pack carburizing* terhadap laju korosi baja ASTM A36 diperoleh pada spesimen C1 dengan variasi temperatur karburisasi sebesar 850°C dan terjadi penurunan laju korosi sebesar 48,6% dari spesimen N (tanpa perlakuan).

Kata Kunci: ASTM A36, Korosi, *Pack Carburizing*, Temperatur.

Abstract

ASTM A36 steel is classified into structural steel, widely used in the construction industry, for example bridge construction, building structures, gears, and ship construction. This type of low carbon steel material has several disadvantages including its low hardening depth, poor corrosion resistance, and mechanical properties such as relatively low hardness. Therefore, it is necessary to do hardening process to steel surface using temperature variations of 850, 900, and 950°C and holding time for 2 hours using conventional activated carbon and *energizer* from egg shells on corrosion rates. The tests carried out include microstructure testing, and rate corrosion testing (linear polarization). The results obtained were that the *pack carburizing* hardening process had an effect on the corrosion rate of ASTM A36 steel which was indicated by the decrease in the corrosion rate, while the temperature variations in the corrosion rate hardening process of ASTM A36 steel did not have a significant effect. The optimal temperature variation in the *pack carburizing* process against the corrosion rate of ASTM A36 steel was obtained in the C1 specimen with a carburization temperature variation of 850 °C and a decrease in the corrosion rate of 48.6% of the N specimen (without treatment).

Keywords: ASTM A36, Corrosion, *Pack Carburizing*, Temperature.

1. Pendahuluan

Baja merupakan salah satu bahan yang memiliki variasi sifat dan karakter yang beragam. Perkembangan ilmu pengetahuan mendorong industri baja untuk melakukan berbagai variasi terhadap proses pembuatan maupun pengolahannya agar dapat menghasilkan suatu inovasi baru yang memiliki kriteria yang tepat. Baja ASTM A36 tergolong kedalam baja struktural, penggunaannya banyak dalam dunia industri seperti konstruksi jembatan, struktur bangunan, roda gigi, dan konstruksi kapal. Namun ASTM A36 memiliki beberapa kekurangan diantaranya ketahanan korosi yang buruk (Command; 1971)

Korosi sangat merugikan bagi dunia industri, diantaranya yaitu turunnya mutu produk, tingginya biaya perbaikan dan perawatan, serta proses harus terhenti saat perbaikan dilakukan. Salah satu cara untuk meningkatkan ketahanan korosi suatu baja yaitu dengan meningkatkan kadar karbon. Pengaruh kandungan C (karbon) pada suatu fasa telah menyebabkan perilaku korosi yang berbeda dimana kandungan martensit yang lebih tinggi memiliki ketahanan korosi terbaik daripada fasa lainnya. Dengan adanya fasa martensit dengan fraksi volume seimbang dari fasa tersebut tidak hanya akan menghasilkan peningkatan ketahanan korosi, tetapi juga sifat kekerasan pada baja karbon (Handoko *et al.*; 2018). Salah satu metode untuk meningkatkan kadar karbon suatu baja yaitu dengan proses karburisasi.

Proses karburisasi adalah proses perlakuan panas dengan melarutkan karbon pada lapisan permukaan baja saat temperatur austenite. Proses karburisasi diikuti dengan pendinginan untuk membentuk struktur mikro martensit (Oluwafemi *et al.*; 2015). Proses karburisasi meningkatkan sifat-sifat termasuk kekerasan permukaan, ketahanan aus, dan ketahanan korosi material (O'DONNELL; 2010). Salah satu metode karburisasi yang sering digunakan yaitu *pack carburizing*. *Pack Carburizing* membutuhkan sumber karbon serta *energizer* yang berfungsi untuk mempercepat proses difusi karbon ke dalam baja sehingga membentuk lebih banyak struktur martensit dalam prosesnya (Darmo *et al.*; 2018).

Selain karbon aktif dan *energizer*, komponen penting yang berpengaruh dalam proses karburisasi adalah temperatur karburisasi. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Satria dkk., dengan menggunakan variasi temperatur 750, 850, dan 950°C menunjukkan peningkatan ketahanan korosi, dimana diperoleh hasil yaitu semakin tinggi temperatur karburisasi akan meningkatkan kerapatan atom serta unsur karbon yang melapisi permukaan baja dengan diiringi ketahanan korosi yang semakin meningkat, dalam penelitiannya menunjukkan temperatur karburisasi optimal pada temperatur 950°C (Satria *et al.*; 2019).

Namun penelitian sebelumnya belum memanfaatkan cangkang telur sebagai *energizer*. Sehingga pada penelitian ini dilakukan proses karburisasi menggunakan karbon aktif sebagai sumber karbonnya dan cangkang telur sebagai sumber *energizernya* dengan variasi temperatur 850, 900, dan 950°C yang diberikan waktu tahan selama 2 jam. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi temperatur pada proses *pack carburizing* dengan menggunakan karbon aktif dan cangkang telur terhadap ketahanan korosi material ASTM A36 dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan yang belum pernah diteliti oleh peneliti sebelumnya.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Alat dan Bahan

Pada penelitian ini menggunakan material baja karbon ASTM A36 dengan ukuran 25mm x 25mm x 3mm untuk pengujian polarisasi linier dan 25mm x 10mm x 8mm untuk pengujian metalografi. Sumber karbon menggunakan karbon aktif penjernih air yang dibeli di Balikpapan, dan limbah cangkang telur dari pedagang sekitar Balikpapan sebagai *energizer*. Pengujian polarisasi menggunakan alat AUTOLAB seri PGSTAT101 dan metalografi menggunakan mikroskop optik ZEISS seri PRIMOTECH.

2.2 Preparasi Bahan Campuran Pengkarburisasi

Pada tahap ini terdapat 3 proses, yaitu:

1. Preparasi Karbon Aktif: Karbon aktif berbentuk granul dihaluskan dan diayak dengan ayakan *mesh* 100 untuk mendapatkan serbuk karbon aktif.
2. Preparasi *Energizer*: Serbuk *energizer* didapatkan melalui proses cangkang telur dibersihkan dan direndam dalam akuades selama 8 (delapan) jam, kemudian dipanaskan dengan temperatur 150°C selama 12 (dua belas) jam, dan dihaluskan lalu diayak dengan ayakan *mesh* 100.
3. Pencampuran Karbon dan *Energizer*: Serbuk karbon aktif dan *energizer* dicampurkan dengan perbandingan 70% karbon aktif dan 30% *energizer*

2.3 Proses Pack Carburizing

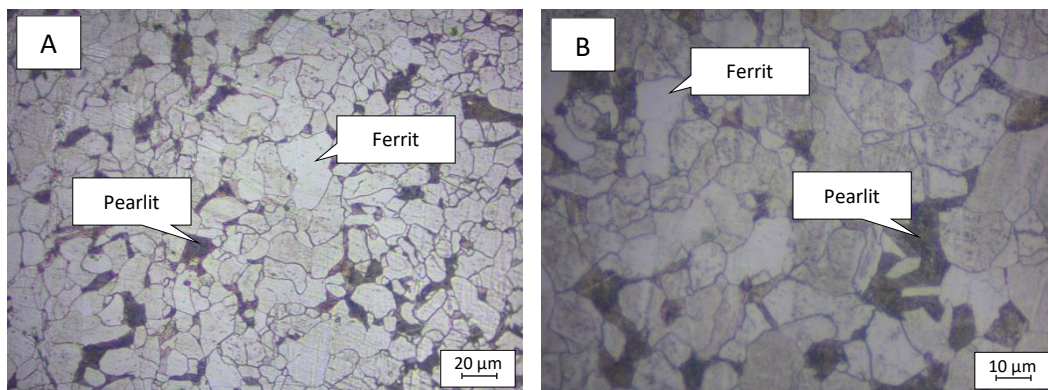
Pada penelitian ini dilakukan proses *pack carburizing* dengan rincian sebagai berikut: Specimen C1 dilakukan karburisasi (850°C, 2 jam) dan *Quenching* (Air), specimen C2 (900°C, 2 jam) dan *Quenching* (Air), serta specimen C3 (950°C, 2 jam) dan *Quenching* (Air). Proses pemanasan dilakukan di *muffle furnace*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro telah dilakukan pada semua variasi sampel, yaitu spesimen tanpa perlakuan (N), serta spesimen C1, C2, C3 untuk ketiga variasi temperatur.

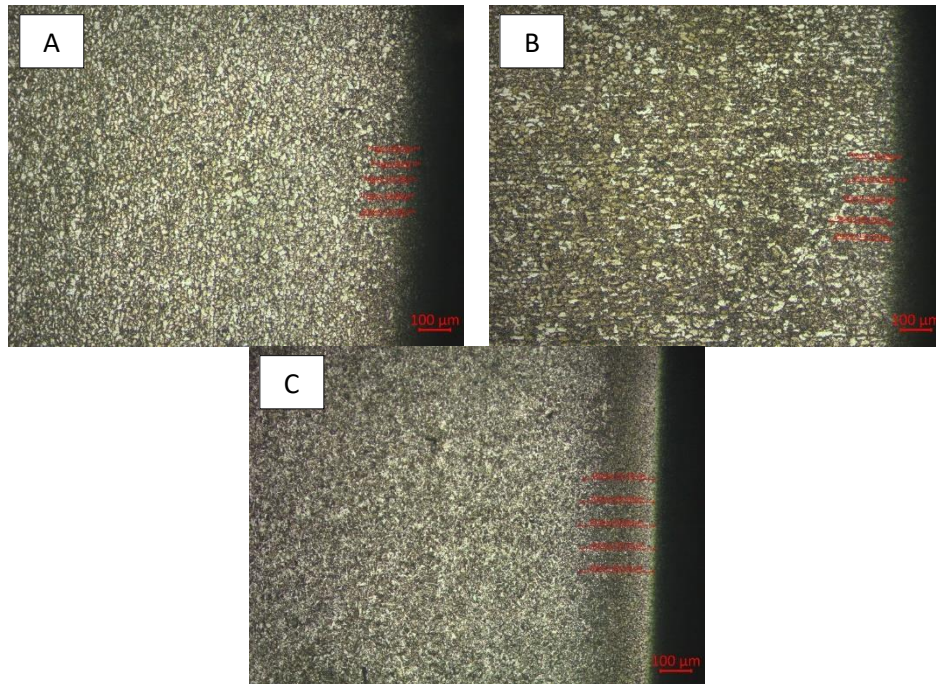
3.1.1 Pengujian Struktur Mikro Spesimen N



Gambar 1: Struktur Mikro Permukaan Spesimen N (raw material) dengan Perbesaran (A) 50 kali (B) 100 kali

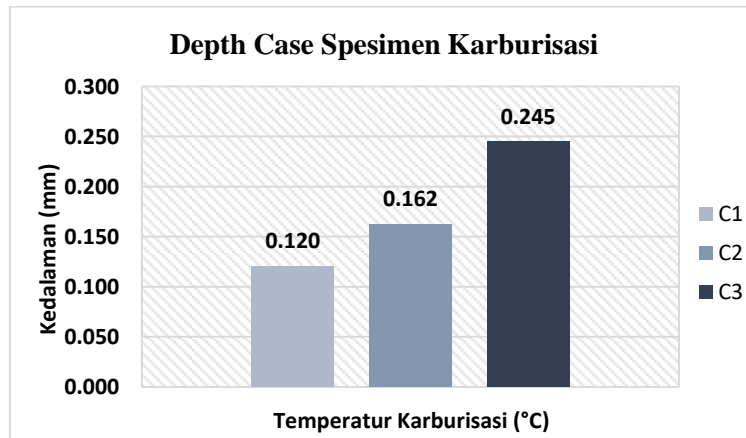
Gambar 1 menunjukkan bahwa spesimen N (*raw material*) memiliki struktur mikro yang terbentuk yaitu ferrit dan pearlit, struktur ferrit ditunjukkan oleh daerah yang berwarna terang atau putih sedangkan pearlit ditunjukkan oleh daerah berwarna gelap dengan motif *lamellar*. Hasil pengujian struktur mikro ini memperlihatkan bahwa baja ASTM A36 tergolong kedalam kelas baja karbon rendah sesuai dengan pernyataan Totten (2006) yang menyebutkan bahwa struktur baja yang mengandung 0,008-0,8%C memiliki struktur utama ferrit dan pearlit (ferrit + sementit). Pearlit mewakili campuran dua fasa, yang biasanya memiliki struktur *lamellar* (Totten; 2006). Fasa ferrit membuat sifat ulet pada baja (de la Concepción *et al.*; 2015).

3.1.2 Pengujian Struktur Mikro Spesimen Karburisasi



Gambar 2: *Depth Case* Hasil Karburisasi Spesimen (A) C1, (B) C2, dan (C) C3 dengan Perbesaran 10 kali

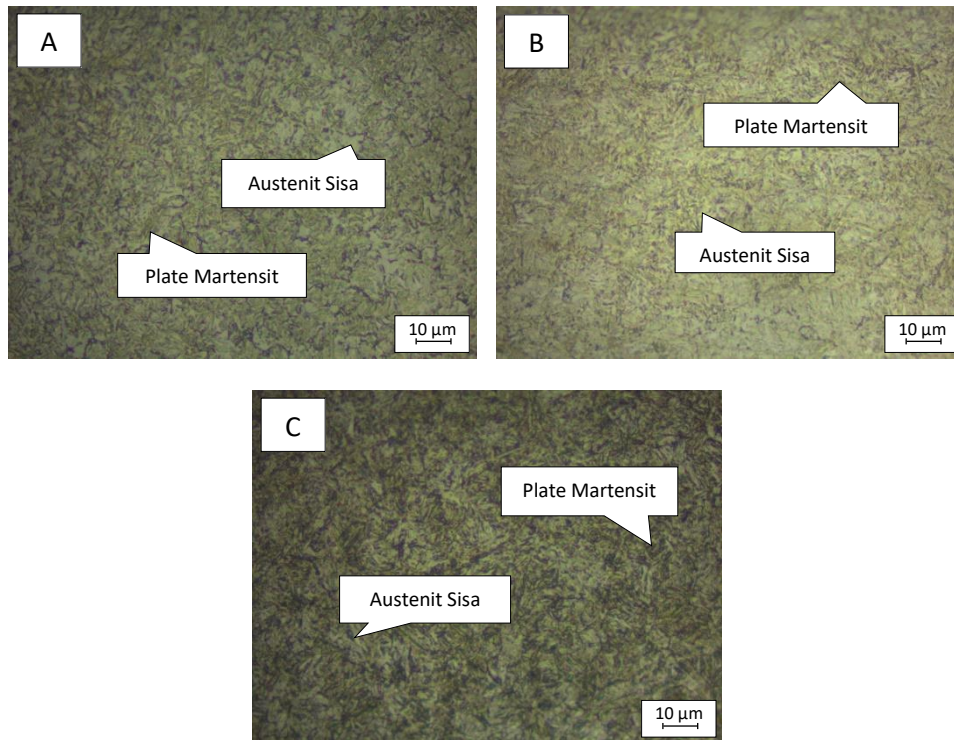
Depth case pada gambar 2 menggambarkan bagian kanan merupakan permukaan spesimen dan semakin kearah kiri menjauhi permukaan merupakan bagian inti spesimen. Ukuran ketebalan lapisan yang terbentuk setelah proses *pack carburizing* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3: Grafik *Depth Case* Spesimen Karburisasi

Ukuran *depth case* menunjukkan bahwa pengerasan permukaan dengan difusi karbon hasil proses karburisasi telah terjadi pada spesimen. Ukuran dari lapisan *depth case* yang terjadi pada masing-masing spesimen berbeda sesuai dengan yang ditunjukkan pada Gambar 3. Setelah melalui proses karburisasi, spesimen C1 diperoleh kedalaman yang terendah dibandingkan dengan kedua spesimen lainnya. Proses difusi atom karbon dimulai dari permukaan sampel kemudian atom-atom karbon akan berdifusi semakin masuk ke dalam permukaan dan menyebabkan terjadi kenaikan kadar karbon yang lebih tinggi di permukaan dibandingkan dengan bagian yang lebih dalam dari spesimen (Alfirano *et al.*; 2020). Hal ini sesuai dengan pernyataan Avner (1974) dalam bukunya yang menunjukkan bahwa peningkatan temperatur akan berbanding lurus dengan peningkatan kedalaman karburisasi pada spesimen (Avner; 1974). Difusi karbon kedalam spesimen dipengaruhi oleh temperatur pemanasan karburisasi, sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Alfirano (2020) dimana pada temperatur yang lebih tinggi akan menghasilkan *depth case* yang lebih dalam akibat partikel atom C

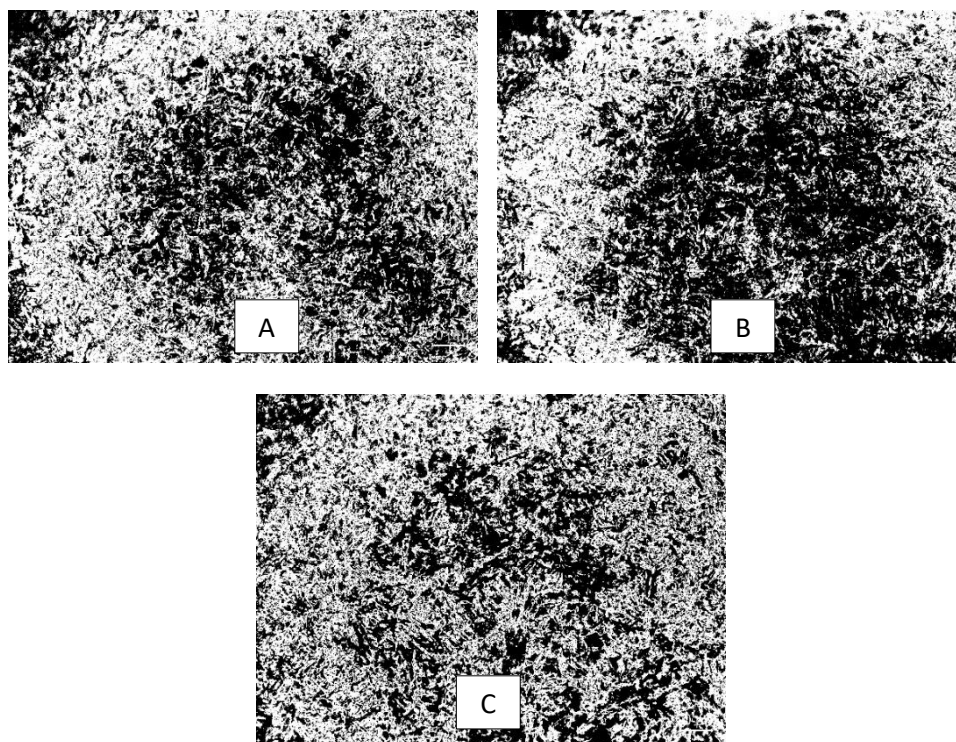
yang bergerak lebih cepat untuk berdifusi pada temperatur yang lebih tinggi sehingga difusi karbon akan lebih cepat (Alfirano *et al.*; 2020).



Gambar 4: Struktur Mikro Sisi Permukaan (A) Spesimen C1, (B) Spesimen C2, dan (C) Spesimen C3 dengan Perbesaran 100 kali

Dapat dilihat pada gambar 4 bahwa spesimen C1, C2, dan C3 memiliki struktur mikro yang didominasi oleh fasa plate martensit serta austenit sisa, fasa plate martensit ditunjukkan oleh daerah berwarna gelap dengan bentuk jarum-jarum yang tidak terlalu runcing, sedangkan bagian berwarna terang merupakan austenit sisa. Perubahan fasa yang terjadi setelah proses pack carburizing karena temperatur pemanasan karburisasi yang tinggi membuat atom Fe memiliki energi untuk bergetar, getaran antara atom induk menyebabkan terjadinya peregangan (kesenjangan antara atom). Munculnya jarak antara atom Fe digunakan oleh atom C untuk berdifusi. Difusi yang terjadi secara interstitial karena ukuran jari-jari atom C lebih kecil daripada jari-jari atom Fe (Hantoro dan Tiwan; 2005).

Pada saat pemanasan pada temperatur 850, 900, dan 950°C mencapai temperatur austenisasi yang dilakukan pada spesimen menyebabkan perubahan struktur kristal dari BCC (Body Center Cubic) menjadi FCC (Face Center Cubic), dimana perubahan ini telah membuat material mengalami pemanasan melewati garis A3 pada diagram fasa Fe₃C membuat maksimum nilai kelarutan karbon menjadi berubah dari 0,02% karbon menjadi 2,14% karbon, membuat karbon akan semakin banyak berdifusi kedalam material dan setelahnya mengalami pendinginan cepat (quenching) menghasilkan struktur kristal BCT (Body Centered Tetragonal) dengan fasa martensit (Callister dan Rethwisch; 2014).

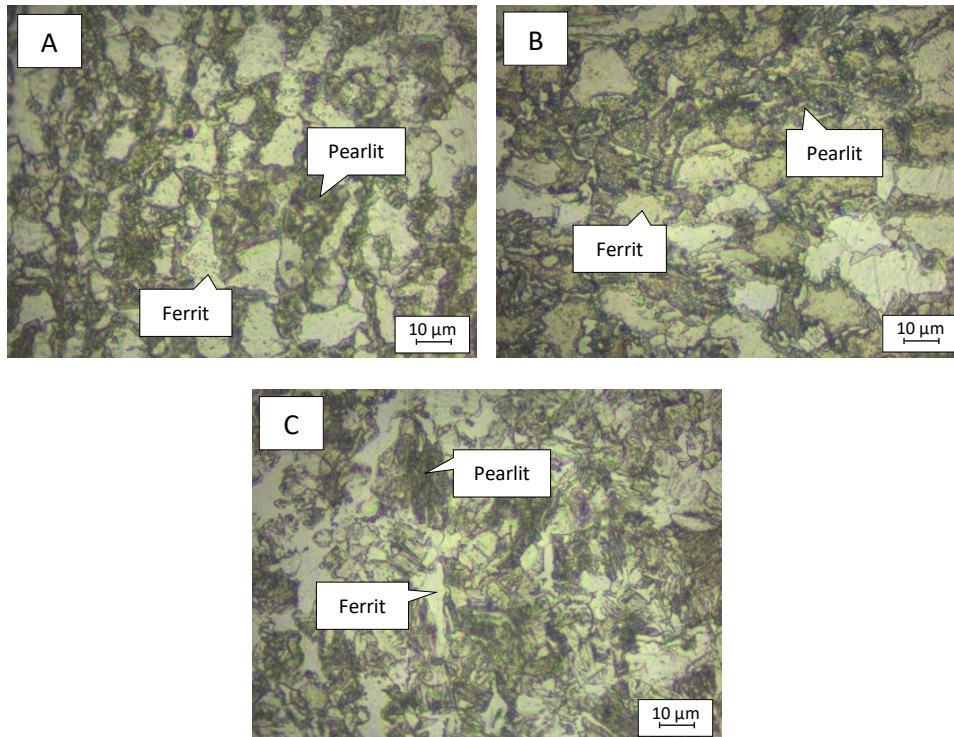


Gambar 5: Pengolahan Gambar Menggunakan *Software ImageJ* Pada Permukaan (A) Spesimen C1, (B) Spesimen C2, dan (C) Spesimen C3

Tabel 1: Hasil Data %Area Fasa Martensit dan Austenit Sisa Spesimen Hasil Karburisasi

Spesimen	%Area Martensit	%Area Austenit Sisa
C1	50,267	49,733
C2	43,460	56,540
C3	49,876	50,124

Gambar 5 dan Tabel 1 menunjukkan hasil pengolahan gambar struktur mikro menggunakan *software ImageJ* yang bertujuan untuk mengetahui %Area dari fasa yang terbentuk pada struktur mikro permukaan spesimen hasil karburisasi (C1, C2, dan C3). Daerah hitam didefinisikan sebagai persebaran fasa austenite sisa, sedangkan daerah putih didefinisikan sebagai persebaran dari fasa martensit. Dari hasil olah gambar menggunakan *software ImageJ* menunjukkan hasil yang berbeda-beda dari setiap spesimen, dimana %Area martensit terbesar terdapat pada spesimen C1 dengan %Area austenit sisa yang terendah, sedangkan spesimen C2 memiliki %Area martensit yang terendah namun %Area austenit sisa yang tertinggi. Jumlah martensit yang terbentuk bergantung pada jumlah austenit yang ditransformasikan yang selanjutnya akan bergantung pada temperatur dimana spesimen baja dipanaskan dan waktu penahanan pada suhu tersebut (Rajan *et al.*; 2011). Tampilan struktur mikro yang terbentuk dalam ketiga variasi temperatur pemanasan karburisasi pada Gambar 4 menunjukkan perbedaan dominasi fasa pada setiap permukaan spesimen, pada spesimen C1 dan C3 memiliki dominasi fasa berwarna gelap martensit sedangkan austenit sisa yang tidak mendominasi. Berbeda dengan spesimen C2, selain didominasi oleh daerah berwarna gelap atau martensit juga didominasi oleh austenit sisa yang banyak dan tersebar disetiap sisi.

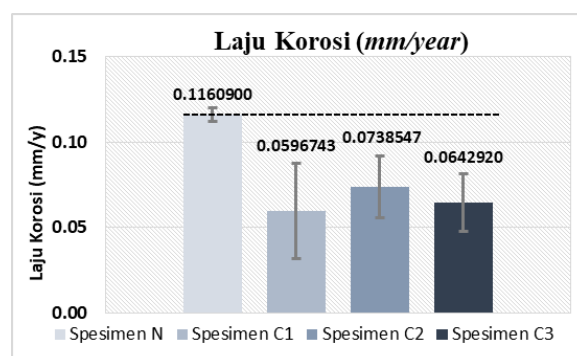


Gambar 6: Struktur Mikro Sisi Tengah Perpotongan (A) Spesimen C1, (B) Spesimen C2, dan (C) Spesimen C3 dengan Perbesaran 100 kali

Gambar 6 menunjukkan hasil pengamatan struktur mikro pada bagian sisi tengah perpotongan (*Cross-section*). Pada ketiga spesimen hasil karburisasi di bagian tengah atau dalam menghasilkan fasa ferrit dan pearlit yang sama antara ketiganya, fasa ferrit ditunjukkan oleh bagian yang berwarna terang sedangkan pearlit ditunjukkan dengan wilayah bagian lebih gelap. Fasa yang terbentuk tidak berbeda dengan material tanpa perlakuan (Spesimen N), hal ini karena karburisasi hanya terjadi pada bagian permukaan spesimen saja dan difusi karbon tidak terjadi hingga bagian inti spesimen. Sehingga bagian permukaan dan inti spesimen memiliki perbedaan fasa yang terbentuk. Pendinginan cepat (*quenching*) yang terjadi pada bagian dalam spesimen tidak secepat pada bagian dalam/inti. Laju pendinginan menurun seiring dengan jarak dari permukaan yang berinteraksi langsung dengan air, dengan laju pendinginan yang semakin berkurang, lebih banyak waktu untuk difusi karbon dan pembentukan pearlit pada bagian inti (Callister; 2014).

3.2. Pengujian Laju Korosi (*Polarisasi Linier*)

Pengujian laju korosi dengan metode polarisasi linier dilakukan pada keempat spesimen, yaitu N (tanpa perlakuan), C1 (karburisasi 850°C), C2 (karburisasi 900°C), dan C3 (karburisasi 950°C). Pengujian dilakukan dengan menggunakan media perendaman sampel air laut Kota Balikpapan. Hasil pengujian laju korosi ditunjukkan pada Gambar 7.

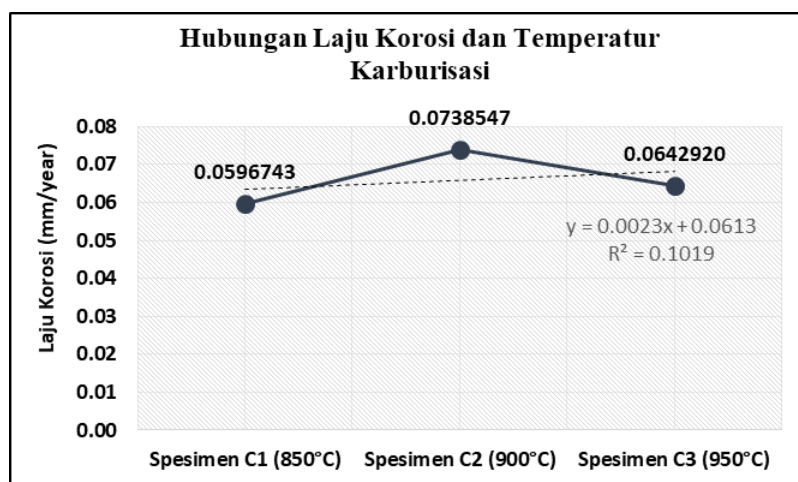


Gambar 7: Grafik Perbandingan Laju Korosi Spesimen

Gambar 7 memperlihatkan bahwa laju korosi dari setiap spesimen setelah proses karburisasi (C1, C2, dan C3) mengalami penurunan dibandingkan dengan laju korosi spesimen N (tanpa perlakuan). Dimana spesimen N yang merupakan spesimen tanpa perlakuan memperoleh laju korosi sebesar $0,1160900 \text{ mm/year}$, kemudian turun laju korosinya setelah proses karburisasi spesimen pada setiap variasi temperatur karburisasi dibandingkan dengan tanpa dilakukan proses karburisasi.

Laju korosi berhubungan langsung dengan fasa struktur mikro yang terbentuk pada suatu material (Handoko *et al.*; 2018). Pada spesimen N, memperoleh nilai laju korosi yang lebih tinggi dikarenakan struktur mikro yang terbentuk terdiri atas fasa ferrit dan pearlit dengan dominasi utama yaitu fasa ferrit. Fasa ferrit dan pearlit memiliki sifat korosi elektrokimia yang tinggi, terutama pada fasa ferrit karena memiliki kandungan unsur karbon (C) yang terendah dibandingkan dengan fasa lainnya dengan kelarutan karbon hanya sebesar $0,025\%C$ namun memiliki kandungan unsur besi (Fe) yang lebih tinggi dibandingkan dengan fasa lainnya. Kandungan unsur Fe yang tinggi ini akan bertindak sebagai anoda sedangkan jumlah unsur C yang lebih tinggi pada fasa pearlit akan bertindak sebagai katoda pada material (Hao *et al.*; 2016). Proses ini akan menimbulkan terjadinya korosi galvanis akibat perbedaan nilai potensial elektroda dari masing-masing unsur, dimana Fe memiliki nilai sebesar $-0,44 \text{ V}$ (Smallman dan Ngan; 2007) sedangkan C dengan potensial sel sebesar $0,22 \text{ V}$. Pada spesimen C1, C2, dan C3 memiliki fasa dengan dominasi martensit dan austenit sisa pada pendinginan cepat, hal ini yang menyebabkan laju korosi dari spesimen mengalami penurunan dibandingkan dengan spesimen N (tanpa perlakuan). Fasa martensit memiliki struktur kristal *Body Center Cubic* (BCC) yang bertransformasi menjadi *Body Centered Tetragonal* (BCT) memiliki kandungan unsur karbon (C) yang tinggi dibandingkan dengan fasa lainnya. Sama halnya seperti pada penjelasan sebelumnya mengenai jumlah unsur besi (Fe) yang semakin sedikit dibandingkan dengan unsur karbon (C) akan menghasilkan laju korosi yang semakin rendah atau ketahanan korosi yang meningkat. Fasa martensit didefinisikan sebagai katoda pada spesimen (Handoko *et al.*; 2018).

Dominasi fasa martensit akan memberikan keuntungan dalam hal ketahanan korosi, karena dapat menurunkan laju korosi dibandingkan dengan fasa ferrit dan pearlit. Sehingga pada spesimen hasil karburisasi mengalami penurunan laju korosi, namun pada spesimen C2 mengalami peningkatan dibandingkan dengan spesimen C1, hal ini dapat dikarenakan jumlah austenit sisa yang lebih banyak dibandingkan dengan spesimen C1 dan C3 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Pada penelitian yang dilakukan oleh Handoko (2017) dinyatakan bahwa serangan korosi pada fasa austenit sisa terjadi lebih dahulu dibandingkan dengan martensit, hal ini karena butir-butir martensit memiliki kadar karbon yang lebih tinggi. Selain itu juga dapat disebabkan oleh pengaruh ukuran, bentuk, dan fraksi volume yang kecil dari fasa austenit sisa yang menyebabkan lebih banyak kontak batas-batas antara antarmuka batas butir dan pelat martensit yang menyebabkan korosi batas butir yang lebih tinggi (Handoko *et al.*; 2017).



Gambar 8: Grafik Hubungan Laju Korosi dan Temperatur Karburisasi

Gambar 8 menunjukkan bahwa laju korosi menurun akibat proses karburisasi, namun temperatur pemanasan karburisasi tidak begitu mempengaruhi laju korosi. Hal ini dikarenakan garis regresi linier yang ditunjukkan cenderung lurus dengan gradien 0,0023. Sehingga, meningkatkan temperatur pemanasan pada proses karburisasi tidak membuat spesimen memperoleh nilai laju korosi yang semakin baik, namun karburisasi padat (*pack carburizing*) dapat menurunkan laju korosi dari material. Laju korosi yang rendah akan baik untuk penggunaan material ASTM A36.

4. Kesimpulan

Proses *pack carburizing* berpengaruh terhadap laju korosi dari baja ASTM A36 ditunjukkan oleh penurunan laju korosi yang terjadi, Variasi temperatur pada proses *pack carburizing* terhadap laju korosi dari baja ASTM A36 tidak berpengaruh secara signifikan, dan Variasi temperatur optimal dalam proses *pack carburizing* terhadap laju korosi baja ASTM A36 diperoleh pada spesimen C1 dengan variasi temperatur karburisasi sebesar 850°C dan terjadi penurunan laju korosi sebesar 48,6% dari spesimen N (tanpa perlakuan).

References

- Alfirano, Putri, R.K., dan Milandia, A. 2020. Energizer BaCO₃ terhadap Nilai Kekerasan dan Case Depth pada Proses Pack Carburizing Baja Karbon Rendah. *J. Metal. dan Mater. Indones.* 3:1, 31–37.
- Asrofi, M., Agus Vian Hidayatulloh, M., dan Jatisukamto, G. 2020. The effect of temperature and volume fraction of mahoni (*Swietenia mahogani*) wood charcoal on SS400 steel using pack carburizing method: Study of hardness and microstructure characteristics. *AIMS Mater. Sci.* 7:3, 354–363.
- Avner, S. 1974. *Introduction to Physical Metallurgy*, 2nd ed. McGraw-Hill International Book Company. Tokyo.
- Callister, W.D. 2014. *Materials Science and Engineering An Introduction 9th Edition*. Jhon Wiley & Sons, inc. United State Of America.
- Command, N.S.S. 1971. *Ship Metallic Material Comparison and Use Guide*. Department of The Navy Washington. Washington D.C.
- Darmo, S., Soenoko, R., Siswanto, E., dan Widodo, T.D. 2018. Study pack carburizing for subsoil plow chisel with alternative carburizer media corn cob charcoal–pictada maxima shell powder. *Int. J. Mech. Eng. Technol.* 9:6, 443–449.
- de la Concepción, V.L., Lorusso, H.N., dan Svoboda, H.G. 2015. Effect of Carbon Content on Microstructure and Mechanical Properties of Dual Phase Steels. *Procedia Mater. Sci.* 8:December, 1047–1056.
- Handoko, W., Pahlevani, F., dan Sahajwalla, V. 2018. Enhancing corrosion resistance and hardness properties of carbon steel through modification of microstructure. *Materials (Basel)*. 11:12.
- Handoko, W., Pahlevani, F., dan Sahajwalla, V. 2017. Corrosion Behaviour of Dual-Phase High Carbon Steel—Microstructure Influence. *J. Manuf. Mater. Process.* 1:2, 21.
- Hantoro, S., dan Tiwan, T. 2005. Diffusion Bonding Material Tungsten-Baja dengan Interlayer Ag-4% Cu. *Teknoin* 10:1, 41–52.
- Hao, X., Dong, J., Etim, I.I.N., Wei, J., dan Ke, W. 2016. Sustained effect of remaining cementite on the corrosion behavior of ferrite-pearlite steel under the simulated bottom plate environment of cargo oil tank. *Corros. Sci.* 110, 296–304.
- Krauss, G. 2005. *Steels: Processing, Structure, and Performance*, ASM International. ASM international. Ohio.
- O'DONNELL, L.J. 2010. *TRIBOLOGY OF 316L AUSTENITIC STAINLESS STEEL CARBURIZED AT LOW TEMPERATURE*. MS thesis Submitt. to Dep. Mater. Sci. Eng.

- Oluwafemi, O.M., Oke, S.R., Otunniyi, I.O., dan Aramide, F.O. 2015. Effect of carburizing temperature and time on mechanical properties of AISI/SAE 1020 steel using carbonized palm kernel shell Leonardo Electron. J. Pract. Technol. 14:27, 41–56.
- Rajan, T.V., Sharma, C.P., dan Sharma, A. 2011. Heat Treatment : Principles and Techniques, Second Edi. ed, Journal of Chemical Information and Modeling. PHI Learning Private Limited. New Delhi.
- Satria, D., Setiawan, I., Rosyadi, I., Listijorini, E., Haryadi, H., Lusiani, R., dan Ariesmunandar, A. 2019. Pengaruh Waktu Tahan Proses Pack Carburizing Baja AISI 3115 dengan Menggunakan Calcium Carbonat dan Batubara Sub Bituminous dan Mendapatkan Perlakuan Panas Quenching Media Pendingin Air Rotasi 21:2, 88.
- Smallman, R., dan Ngan, A.H.. 2007. Physical Metallurgy and Advanced Materials, Seventh Ed. ed. Elsevier Ltd. Burlington.
- Totten, G.E. 2006. Steel Heat Treatment Handbook : Metallurgy and Technologies, Second. ed. Taylor & Francis Group, LLC. Portland.