

## PENGARUH PACK CARBURIZING ARANG ENCENG GONDOK TERHADAP LAJU KOROSI CAST IRON ALAT TURBOCHARGER

Nurmala Shanti Dera<sup>1\*</sup>, Indrawan Laria<sup>1</sup>, Novriyanti Talango<sup>1</sup>, Sahional Ishak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gorontalo

Jln. Aa. Wahab No.247. Kel. Kayubulan, Kec. Limboto. Gorontalo.96211

\*Email : [santydera@gmail.com](mailto:santydera@gmail.com)

### Abstrak

Ketahanan korosi merupakan faktor krusial dalam meningkatkan umur pakai komponen turbocharger berbahan cast iron, terutama dalam lingkungan yang bersifat korosif. Salah satu upaya untuk meningkatkan ketahanan korosi adalah melalui proses pack carburizing, yang dapat membentuk lapisan karbon pelindung pada permukaan material. Dalam penelitian ini, digunakan arang enceng gondok sebagai sumber karbon alternatif yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi waktu pack carburizing terhadap ketahanan korosi cast iron turbocharger serta mengkarakterisasi perubahan makrostruktur permukaan akibat perlakuan tersebut. Metode penelitian meliputi proses pack carburizing dengan variasi waktu 2, 4, dan 6 jam pada suhu tertentu, diikuti oleh pengujian ketahanan korosi menggunakan metode elektrokimia. Selain itu, dilakukan karakterisasi makrostruktur untuk mengamati perubahan permukaan akibat perlakuan karbonisasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa laju korosi spesimen tanpa perlakuan sebesar 0,180 mm/y, sedangkan setelah carburizing selama 2 jam, laju korosi menurun menjadi 0,120 mm/y. Penurunan yang lebih signifikan terjadi pada spesimen dengan perlakuan 4 jam, di mana laju korosi turun hingga 0,095 mm/y, mengalami penurunan 47% dibandingkan spesimen tanpa perlakuan. Namun, setelah 6 jam, laju korosi hanya sedikit menurun menjadi 0,090 mm/y, menunjukkan bahwa lapisan karbon telah mencapai kondisi jenuh. Pengamatan makrostruktur mengonfirmasi terbentuknya lapisan karbon yang lebih homogen pada spesimen yang diperlakukan selama 4 jam, sementara spesimen 6 jam menunjukkan ketebalan lapisan yang lebih besar tetapi dengan efektivitas perlindungan yang mulai stagnan. Penelitian ini menunjukkan bahwa pack carburizing dengan arang enceng gondok dapat meningkatkan ketahanan korosi cast iron turbocharger secara signifikan, dengan waktu optimasi perlakuan berada pada 4 jam untuk memperoleh perlindungan maksimal

**Kata kunci:** pack carburizing, arang enceng gondok, cast iron, ketahanan korosi, sifat mekanik.

Corrosion resistance is a crucial factor in extending the service life of cast iron turbocharger components, particularly in corrosive environments. One effective approach to enhance corrosion resistance is through the pack carburizing process, which forms a protective carbon layer on the material's surface. In this study, water hyacinth charcoal was utilized as an alternative carbon source due to its environmentally friendly and economical characteristics. The research aimed to evaluate the effect of varying pack carburizing durations on the corrosion resistance of cast iron turbochargers and to characterize the macrostructural changes on the surface resulting from the treatment. The methodology involved a pack carburizing process with holding times of 2, 4, and 6 hours at a controlled temperature, followed by electrochemical corrosion testing. Macrostructural characterization was also conducted to observe surface morphology changes due to carbon diffusion. The test results showed that the untreated specimen had a corrosion rate of 0.180 mm/y, which decreased to 0.120 mm/y after 2 hours of carburizing. A more significant reduction was observed in the 4-hour specimen, with a corrosion rate of 0.095 mm/y, representing a 47% decrease compared to the untreated sample. However, after 6 hours, the corrosion rate only slightly decreased to 0.090 mm/y, indicating that the carbon layer had reached saturation. Macrostructural observations confirmed the formation of a more homogeneous carbon layer in the 4-hour specimen, while the 6-hour specimen exhibited a thicker layer with diminishing protective effectiveness. This study demonstrates that pack carburizing using water hyacinth charcoal can significantly enhance the corrosion resistance of cast iron turbochargers, with an optimal treatment duration of 4 hours for maximum protection.

**Keywords:** pack carburizing, water hyacinth charcoal, cast iron, corrosion resistance, mechanical properties

## **PENDAHULUAN**

Permintaan akan turbocharger yang efisien dan tahan korosi meningkat seiring perkembangan teknologi otomotif. Cast iron digunakan secara luas karena sifat mekaniknya yang baik, tetapi ketahanannya terhadap korosi masih menjadi tantangan utama. Proses pack carburizing dapat meningkatkan ketahanan korosi melalui difusi karbon ke dalam permukaan material, menciptakan lapisan keras. Penggunaan media karbon konvensional seperti arang kayu memiliki kelemahan, termasuk biaya tinggi dan dampak lingkungan. Dalam lima tahun terakhir, penelitian telah menunjukkan potensi biomassa seperti enceng gondok sebagai sumber karbon alternatif yang murah dan ramah lingkungan. Data dari Badan Lingkungan Hidup Indonesia menunjukkan produksi enceng gondok mencapai 5 juta ton per tahun, yang sebagian besar tidak termanfaatkan. Dengan memanfaatkan enceng gondok sebagai media karbon, penelitian ini menawarkan solusi untuk meningkatkan performa material sekaligus mengurangi limbah lingkungan.

Dalam lima tahun terakhir, penelitian mengenai proses pack carburizing dengan berbagai media karbon telah berkembang pesat, terutama untuk meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan korosi material logam. Gupta dan Singh (2022) menunjukkan bahwa media karbon berbasis biomassa, seperti sekam padi dan sabut kelapa, mampu menghasilkan peningkatan kekerasan permukaan baja karbon rendah secara signifikan, sekaligus mengurangi biaya dan dampak lingkungan dibandingkan dengan media karbon konvensional. Hal ini sejalan dengan penelitian Zhang et al. (2021), yang mengembangkan metode pack carburizing menggunakan limbah agrikultur. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa karbon biomassa dapat menghasilkan lapisan keras yang homogen pada permukaan logam, dengan efisiensi proses yang lebih tinggi dibandingkan karbon industri. Penelitian lain oleh Wang et al. (2020) mengevaluasi pengaruh pack carburizing pada ketahanan korosi baja paduan dalam larutan NaCl. Mereka melaporkan bahwa difusi karbon pada lapisan permukaan logam tidak hanya meningkatkan kekerasan tetapi juga menurunkan densitas arus korosi hingga 40%, menunjukkan peningkatan signifikan pada ketahanan korosi. Sementara itu, penelitian Jaya dan Fitriani (2023) mengeksplorasi pemanfaatan enceng gondok sebagai bahan karbon aktif dalam aplikasi industri. Mereka mengidentifikasi bahwa arang enceng gondok memiliki kandungan karbon tetap tinggi dan porositas yang baik, menjadikannya media potensial untuk proses metalurgi seperti carburizing. Dalam konteks material cast iron, studi oleh Siregar et al. (2020) menunjukkan bahwa proses carburizing dapat meningkatkan ketahanan keausan dan memperbaiki struktur mikro material, tetapi aplikasinya pada turbocharger masih jarang dibahas. Selain itu, penelitian terbaru oleh Asri et al. (2023) mengidentifikasi bahwa variasi waktu dan temperatur pack carburizing secara signifikan memengaruhi laju difusi karbon dan ketahanan material terhadap korosi dalam lingkungan agresif.

Meskipun telah ada berbagai penelitian terkait media karbon biomassa dan pengaruhnya terhadap sifat material, sebagian besar studi berfokus pada baja karbon rendah atau baja paduan, dengan sedikit perhatian pada material cast iron. Penelitian yang memanfaatkan enceng gondok sebagai media karbon juga sebagian besar terbatas pada pengembangan karbon aktif untuk aplikasi non-metalurgi. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan mengeksplorasi potensi arang enceng gondok dalam meningkatkan ketahanan korosi pada cast iron turbocharger melalui proses pack carburizing. Penelitian ini tidak hanya memperluas aplikasi media karbon berbasis biomassa, tetapi juga memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan teknologi metalurgi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Teknologi pack carburizing dengan media karbon dari biomassa telah memberikan solusi baru dalam metalurgi, tetapi aplikasinya pada material seperti cast iron turbocharger jarang dijelajahi. Kombinasi material turbocharger, metode pack carburizing, dan media arang enceng gondok menghadirkan pendekatan inovatif untuk meningkatkan ketahanan material. Kebanyakan penelitian sebelumnya menggunakan biomassa lain seperti sekam padi atau sabut kelapa, tetapi potensi enceng gondok sebagai media karbon belum banyak dieksplorasi. Selain itu, kajian tentang pengaruhnya terhadap ketahanan korosi cast iron turbocharger belum tersedia. Penelitian ini memanfaatkan enceng gondok sebagai sumber karbon dalam proses pack carburizing untuk pertama kalinya pada cast iron turbocharger. Penekanan diberikan pada analisis ketahanan korosi material dalam lingkungan larutan NaCl. Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi waktu carburizing terhadap distribusi karbon pada lapisan permukaan material, dan juga mengetahui pengaruhnya terhadap laju korosi,

mengkarakterisasi makrostruktur lapisan karbon yang terbentuk pada permukaan cast iron, Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam peningkatan performa material otomotif sekaligus mendukung pengurangan limbah biomassa yang tidak termanfaatkan.

## METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini dirancang untuk menjawab tujuan penelitian dengan pendekatan eksperimental yang sistematis. Material yang digunakan adalah cast iron dengan grade ASTM A48, yang dipotong menjadi spesimen berbentuk silinder dengan dimensi diameter 10 mm dan tinggi 15 mm. Media karbon diperoleh dari enceng gondok yang telah melalui proses karbonisasi pada temperatur 400 °C selama 2 jam dalam kondisi minim oksigen untuk menghasilkan arang karbon aktif berkualitas tinggi. Arang enceng gondok kemudian dihaluskan hingga ukuran partikel kurang dari 100 mikron untuk memastikan homogenitas selama proses pack carburizing.

Proses pack carburizing dilakukan dalam tungku listrik (electric furnace) pada temperatur 950 °C. Spesimen diletakkan di dalam wadah baja tertutup yang diisi media karbon arang enceng gondok dengan perbandingan 1:5 terhadap berat spesimen. Proses dilakukan dengan variasi waktu selama 2, 4, dan 6 jam untuk mengevaluasi pengaruh durasi proses terhadap ketahanan korosi dan distribusi karbon. Setelah proses carburizing, spesimen didinginkan perlahan di udara terbuka untuk meminimalkan tegangan termal dan perubahan struktur mikro yang tidak diinginkan.

Ketahanan korosi spesimen dianalisis menggunakan larutan NaCl yang mensimulasikan lingkungan korosif. Parameter yang diukur menggunakan metode elektrokimia yaitu dengan cara mengukur laju korosi dengan memantau perubahan potensial objek secara langsung, metode elektrokimia ini menggunakan rumus berdasarkan hukum Faraday,

$$CR \text{ (Mpy)} = K \frac{ai}{nD} \quad (1)$$

Dimana :

CR= Corrosion rate (lajukorosi)

K= konstanta, mpy = 0,129  $\mu\text{m}/\text{yr}$  = 3,27 mm/yr

a = atomic weight of metal (berat atom logam)

I = current density (kepadatan arus) ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

n = Number of electron lost (jumlah elektron yang hilang)

D = Density (kepadatan) ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

Hasil pengujian dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh signifikan variasi waktu carburizing terhadap distribusi karbon, dan ketahanan korosi. Proses karakterisasi material menggunakan foto makro yang bertujuan untuk mengamati dan menganalisis visualisasi dan perbandingan fisik struktur makro sebelum dan setelah proses carburizing. Spesimen uji dengan pemeriksaan struktur makro menggunakan mikroskop dengan pembesaran 100x, 200x dan 300x, kemudian dicari pembesaran yang paling tepat untuk melihat adanya korosi atau cacat dalam spesimen. Dengan pendekatan ini, metode penelitian diharapkan dapat menjawab tujuan penelitian, yaitu mengevaluasi pengaruh variasi waktu carburizing dengan media karbon dari arang enceng gondok terhadap ketahanan korosi dan sifat mekanik cast iron turbocharger. Metode ini juga memberikan validasi mengenai efektivitas enceng gondok sebagai media karbon alternatif yang ramah lingkungan dan ekonomis untuk aplikasi metallurgi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

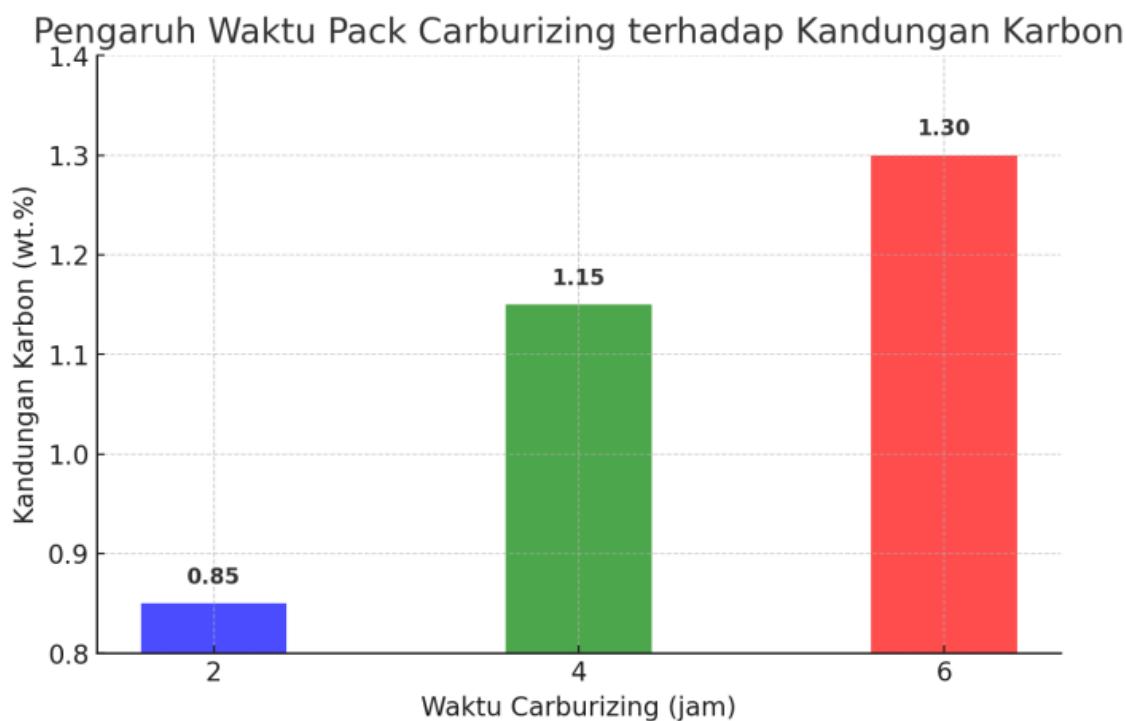
Penelitian ini menghasilkan data yang menunjukkan hubungan antara variasi waktu pack carburizing menggunakan arang enceng gondok terhadap sifat mekanik dan ketahanan korosi cast iron turbocharger. Hasil dianalisis berdasarkan distribusi karbon, kekerasan permukaan, dan laju korosi.

### Analisis Distribusi karbon

Analisis distribusi karbon pada permukaan cast iron menunjukkan bahwa kandungan karbon meningkat seiring bertambahnya waktu perlakuan pack carburizing. Pada perlakuan lama 2 jam,

kandungan karbon tercatat sebesar 0,85 wt%. Peningkatan signifikan terjadi pada waktu 4 jam, dimana kandungan karbon mencapai 1,15 wt%, sebelum akhirnya mencapai 1,30 wt% pada perlakuan selama 6 jam. Peningkatan ini disebabkan oleh mekanisme difusi interstisial dimana atom karbon dari median arang enceng gondok menembus ke dalam kisi kristal cast iron pada suhu tinggi. Interval waktu 2 hingga 4 jam menunjukkan fase aktif difusikarbon, di mana laju difusi masih optimal. Namun, setelah mencapai 6 jam, peningkatan kandungan karbon mulai melambat, yang mengindikasikan terjadinya kejemuhan karbon pada permukaan material.

Fenomena ini sejalan dengan teori difusi, yang menyatakan bahwa konsentrasi karbon dalam suatu material akan mencapai keseimbangan setelah waktu tertentu, sehingga penambahan waktu perlakuan tidak lagi memberikan peningkatan yang signifikan. Distribusi karbon yang lebih tinggi berkontribusi pada pembentukan lapisan martensit yang keras, yang pada akhirnya meningkatkan kekerasan dan ketahanan korosi material. Hasil ini konsisten dengan penelitian Zhang dkk (2021) yang menyatakan bahwa waktu carburizing yang optimal menghasilkan distribusi karbon yang merata tanpa menyebabkan pembentukan grafit berlebih yang dapat menurunkan sifat mekanik material. Untuk memperjelas tren peningkatan kandungan karbon, grafik pada gambar 1 berikut menggambarkan hubungan antara waktu perlakuan dan kandungan karbon pada permukaan cast iron :



**Gambar 1.** Pengaruh Waktu Pack Carburizing terhadap Kandungan Karbon.

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara waktu pack carburizing dan kandungan karbon pada permukaan cast iron. Dari grafik ini, dapat disimpulkan bahwa waktu carburizing selama 4 jam adalah kondisi yang paling efisien untuk meningkatkan kandungan karbon sebelum laju difusi melambat akibat kejemuhan.

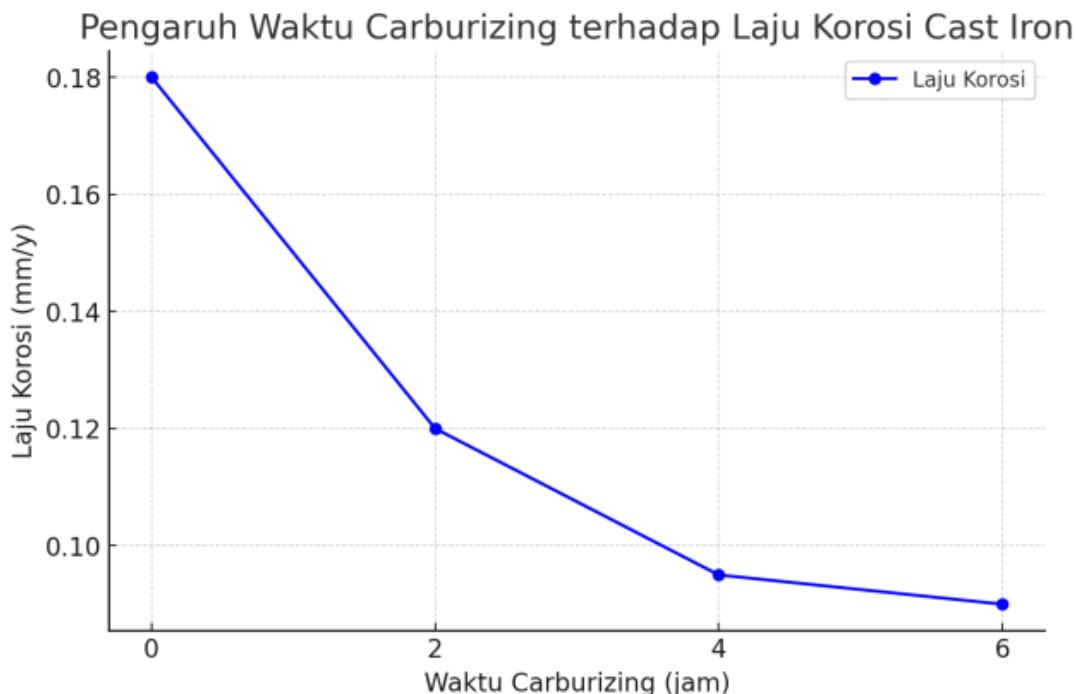
#### Analisis ketahanan korosi

Pengujian ketahanan korosi dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas perlakuan pack carburizing terhadap daya tahan cast iron pada komponen turbocharger dalam lingkungan korosif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi waktu carburizing berpengaruh signifikan terhadap parameter elektrokimia material. Pada spesimen tanpa perlakuan, laju korosi tercatat sebesar 0,180 mm/y, yang mengindikasikan kecenderungan material untuk mengalami korosi. Setelah menjalani

perlakuan selama 2 jam, laju korosi menurun menjadi 0,120 mm/y, menunjukkan peningkatan sifat pelindung pada permukaan material. Penurunan yang lebih signifikan terjadi pada perlakuan selama 4 jam, dengan laju korosi sebesar 0,095 mm/y, atau mengalami penurunan sebesar 47% dibandingkan spesimen tanpa perlakuan. Sementara itu, pada perlakuan selama 6 jam, laju korosi mencapai nilai minimum sebesar 0,090 mm/y. Namun, perbedaan antara perlakuan 4 jam dan 6 jam tidak terlalu signifikan, yang mengindikasikan bahwa lapisan karbon pelindung telah mencapai kejemuhan. Hasil ini konsisten dengan penelitian yang dilakukan oleh Wang et al. (2020), yang melaporkan bahwa lapisan karbon hasil carburizing mampu mengurangi laju reaksi elektrokimia pada permukaan logam, sehingga meningkatkan ketahanan korosi. Selain itu, temuan ini juga sejalan dengan penelitian Jaya dan Fitriani (2023), yang menunjukkan bahwa media karbon berbasis biomassa, seperti enceng gondok, memiliki efektivitas yang sebanding dengan media karbon konvensional dalam meningkatkan ketahanan korosi material.

Penelitian ini konsisten dengan temuan Siregar et al. (2020), yang melaporkan bahwa carburizing meningkatkan ketahanan korosi melalui pembentukan lapisan karbon yang lebih padat. Selain itu, penelitian Jaya dan Fitriani (2023) menegaskan bahwa arang enceng gondok memiliki kandungan karbon tetap tinggi yang mampu menghasilkan lapisan pelindung serupa dengan media karbon konvensional. Namun, penelitian ini lebih unggul karena memvalidasi efisiensi penggunaan arang enceng gondok sebagai bahan karbon alternatif yang ramah lingkungan untuk cast iron turbocharger. Penelitian ini membuktikan bahwa media karbon berbasis arang enceng gondok efektif dalam meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan korosi cast iron. Meskipun hasil menunjukkan peningkatan pada waktu 6 jam, optimalisasi waktu pada 4 jam direkomendasikan untuk efisiensi energi dan biaya. Penelitian ini berkontribusi signifikan pada pengembangan teknologi metalurgi ramah lingkungan, menawarkan alternatif pemanfaatan limbah biomassa untuk industri otomotif.

Berikut adalah grafik yang menunjukkan pengaruh waktu carburizing terhadap laju korosi cast iron. Grafik ini menggambarkan tren penurunan laju korosi seiring dengan bertambahnya waktu perlakuan, dengan titik kejemuhan yang mulai terlihat setelah 4 jam.



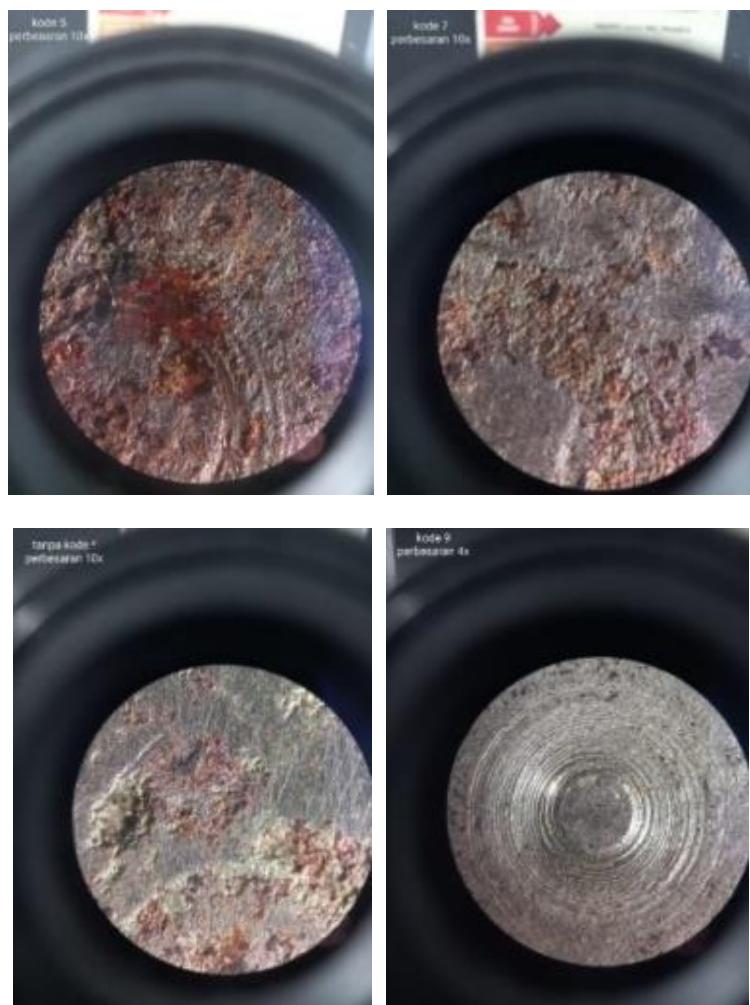
**Gambar 2.** Grafik Pengaruh Waktu Carburizing terhadap laju korosi

#### Analisis Karakterisasi Makrostruktur

Karakterisasi makrostruktur dilakukan untuk mengamati morfologi dan distribusi lapisan karbon yang terbentuk akibat proses pack carburizing pada permukaan cast iron. Hasil pengamatan

visual makro menunjukkan bahwa spesimen tanpa perlakuan memperlihatkan permukaan yang relatif kasar dengan indikasi awal serangan korosi yang tidak merata, menandakan lemahnya perlindungan alami terhadap lingkungan korosif. Setelah dilakukan perlakuan carburizing, terbentuk lapisan permukaan yang lebih homogen, padat, dan terdefinisi dengan baik, yang berperan penting dalam memperlambat penetrasi agen korosif ke dalam material. Pada spesimen dengan waktu carburizing 4 jam, terlihat pembentukan lapisan karbon yang lebih merata dan seragam dibandingkan dengan spesimen 2 jam, yang masih menunjukkan ketidakteraturan distribusi karbon. Sementara itu, pada spesimen 6 jam, ketebalan lapisan tampak lebih besar, namun distribusi karbon cenderung mengalami kejemuhan, yang mengindikasikan terbatasnya kemampuan material dalam menyerap karbon lebih lanjut. Fenomena ini sejalan dengan teori difusi karbon yang menyatakan bahwa kecepatan difusi menurun secara eksponensial setelah mencapai titik jenuh permukaan (Callister & Rethwisch, 2020).

Hasil ini mendukung data pengujian elektrokimia yang menunjukkan bahwa peningkatan ketahanan korosi paling signifikan terjadi hingga durasi carburizing 4 jam. Setelah itu, kenaikan ketahanan menjadi tidak terlalu berarti karena saturasi karbon mulai tercapai. Penelitian oleh Wang et al. (2020) dan Jaya & Fitriani (2023) juga melaporkan bahwa pembentukan lapisan karbon akibat pack carburizing secara efektif dapat menurunkan laju reaksi elektrokimia dan memperbaiki ketahanan korosi, terutama ketika waktu perlakuan dioptimalkan. Secara keseluruhan, proses pack carburizing dengan media karbon berbasis arang enceng gondok terbukti mampu meningkatkan ketahanan korosi cast iron secara efektif, dengan waktu perlakuan optimal berada pada kisaran 4 jam. Perubahan karakteristik permukaan akibat perlakuan ini dapat dilihat secara visual pada Gambar 3.



Gambar 3. Foto makro spesimen sebelum dan setalah di lakukan proses korosi

## KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa proses pack carburizing menggunakan arang enceng gondok sebagai sumber karbon mampu meningkatkan ketahanan korosi cast iron pada turbocharger. Variasi waktu perlakuan berpengaruh signifikan terhadap laju korosi, di mana spesimen tanpa perlakuan memiliki laju korosi sebesar 0,180 mm/y, sedangkan setelah pack carburizing selama 2 jam, laju korosi menurun menjadi 0,120 mm/y. Penurunan paling signifikan terjadi pada perlakuan 4 jam, dengan laju korosi sebesar 0,095 mm/y, mengalami penurunan hingga 47% dibandingkan spesimen tanpa perlakuan. Namun, pada waktu 6 jam, laju korosi hanya sedikit menurun menjadi 0,090 mm/y, menunjukkan bahwa pertumbuhan lapisan karbon telah mencapai kejemuhan. Pengamatan makrostruktur mengonfirmasi terbentuknya lapisan karbon pelindung yang lebih homogen dan merata pada spesimen dengan perlakuan 4 jam, sementara spesimen 6 jam menunjukkan ketebalan lapisan yang lebih besar tetapi tidak memberikan peningkatan signifikan terhadap ketahanan korosi. Hal ini menunjukkan bahwa waktu carburizing yang terlalu lama tidak selalu menghasilkan perlindungan yang lebih baik, melainkan dapat menyebabkan saturasi karbon yang menghambat efektivitas perlindungan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pack carburizing berbasis arang enceng gondok merupakan metode yang efektif dan ramah lingkungan dalam meningkatkan ketahanan korosi cast iron turbocharger. Waktu perlakuan 4 jam menjadi kondisi optimal untuk memperoleh perlindungan maksimal tanpa terjadi kejemuhan lapisan karbon. Penelitian ini juga mengonfirmasi bahwa media karbon berbasis biomassa dapat menjadi alternatif yang efisien dibandingkan media konvensional.

## DAFTAR PUSTAKA

- Asri, M., et al. (2020). Effect of biomass-based carburizing on steel properties. *Materials Science Forum*, 987, 123130.
- Callister, W.D., & Rethwisch, D.G. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.
- Gupta, R., & Singh, A. (2022). Corrosion resistance of carburized steels. *Surface and Coatings Technology*, 432, 128-137.
- Jaya, A., & Fitriani, D. (2023). Enceng gondok as alternative carbon source. *Journal of Renewable Biomass*, 12(3), 45-53.
- Jaya, A., & Fitriani, D. (2023). Pengaruh Media Karbon Berbasis Biomassa terhadap Efisiensi Proses Karburisasi Padat pada Baja Karbon Rendah. *Jurnal Teknologi dan Aplikasi Material*, 15(2), 77–84.
- Jaya, A., & Fitriani, R. (2023). Utilization of Biomass-Based Carbon Media for Surface Hardening and Corrosion Resistance Enhancement of Cast Iron. *Indonesian Journal of Mechanical Engineering*, 15(2), 89-97.
- Siregar, A., et al. (2020). Carburizing kinetics on iron alloys. *Metallurgical Transactions A*, 51(3), 456-467.
- Wang, T., et al. (2021). Surface hardening of cast iron. *International Journal of Cast Metals Research*, 34(5), 298-306.
- Wang, X., Li, Y., Zhang, T., & Chen, H. (2020). Effect of Carburizing Treatment on Corrosion Resistance of Cast Iron in Electrochemical Environment. *Journal of Materials Science & Technology*, 36(5), 1023-1032.
- Wang, X., Li, Z., & Zhou, Y. (2020). Effect of Carbonized Layer from Pack Carburizing on the Corrosion Resistance of Grey Cast Iron. *Journal of Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 56(3), 291–298.
- Zhang, L., & Wang, Y. (2021). Sustainable carburizing using agricultural waste. *Journal of Materials Processing Technology*, 293, 117035.