

PENGARUH METODE INOKULASI TERHADAP KOMPOSISI DAN KEKERASAN BESI COR KELABU

Muhammad Zaky Al Jufry¹, Arif Syamsudin^{1*}
¹Politeknik Manufaktur Ceper, Indonesia

*Corresponding author: arif@polmanceper.ac.id

Diterima: 4 Agustus 2023

Direvisi: 18 Agustus 2023

Disetujui: 19 Agustus 2023

Terbit online: 19 Agustus 2023

ABSTRAK

Pengecoran besi cor kelabu membutuhkan proses inokulasi untuk lebih banyak membentuk grafit pada benda cor. Grafit yang terbentuk akan berpengaruh pada sifat mekanik benda cor baik kekuatan tarik, kekerasan, dan lainnya. Proses inokulasi dapat dilakukan di tanur peleburan atau di ladle penampung cairan logam. Cara penambahan inokulan ke dalam cairan juga dapat dilakukan dengan beberapa metode. Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh metode inokulasi pada proses pengecoran besi cor kelabu terhadap komposisi kimia dan kekerasan benda cor. Metode inokulasi dilakukan dengan tiga cara yakni inokulan dibungkus, dicurah, dan campuran sebagian dibungkus serta sebagian dicurah. Pengamatan hasil pada benda cor meliputi komposisi kimia yang terjadi dan kekerasan yang diperoleh. Pengecoran besi cor kelabu FC 250 dilakukan penuangan ke cetakan pada suhu 1434 °C dengan menggunakan cetakan *green sand*. Hasil uji komposisi menunjukkan kadar karbon besi cor pada inokulasi dengan inokulan dibungkus sebesar 2,40 % atau 0,01% lebih rendah dibandingkan dengan yang dicurah dan campuran antara curah dan bungkus. Kekerasan Brinell pada besi cor dengan metode inokulan dibungkus sebesar 2,32 % atau 0,05 lebih rendah dibandingkan dengan metode inokulasi dengan dicurah dan campuran antara curah serta bungkus. Kekerasan Brinell benda cor yang dibuat dengan cara inokulan dibungkus, dicurah, dan campuran antara bungkus dan curah berturut-turut sebesar 217, 229, dan 223 HB. Hal ini menunjukkan bahwa karbon yang berubah menjadi grafit dan silikon yang membantu proses penggrafitan akan mendorong penurunan kekerasan benda cor.

Kata kunci: inokulasi, bungkus, curah, besi cor kelabu, kekerasan Brinell, komposisi kimia

ABSTRACT

Gray iron casting requires an inoculation process to form more graphite in the product. The graphite formed will affect the mechanical properties of casting such as tensile strength, hardness, and others. The inoculation process can be carried out in a smelting furnace or in a handling ladle. How to add inoculant to the liquid can also be done by several methods. The purpose of this study was to study the effect of the inoculation method in the casting process of gray iron casting on the chemical composition and hardness of the product. The inoculation method was carried out in three ways, namely the inoculant was packaged, bulk, and the mixture was partially packaged and partially bulk. Observation of results on product includes the chemical composition and the hardness. Ferro casting (FC) 250 gray cast iron was poured into the mold at 1434 °C using a green sand mold. The results of the composition test showed that the carbon content of cast iron in inoculation with packaged inoculants was 2.40% or 0.01% lower than that of bulk and a mixture of bulk and packaged. The Brinell hardness of cast iron using the packaged inoculant method was 2.32% or 0.05 lower than that of the inoculation method using bulk and a mixture of bulk and packing. The Brinell hardness of casts made by inoculant packing, bulk, and a mixture of packing and bulk was 217, 229, and 223 HB, respectively. This shows that carbon which turns into graphite and silicon which assists the graphing process will lead to a decrease in the hardness of the casting.

Keywords: inoculation, packing, bulk, gray cast iron, Brinell hardness, chemical composition

1. PENDAHULUAN

Besi cor memiliki berbagai jenis dengan salah satu pembedanya adalah bentuk grafitnya. Di antara bentuk grafit yang ada antara lain lamelar[1], nodular[2], dan vermikular (*compacted graphite*)[3]–[5]. Perubahan bentuk grafit dipengaruhi oleh banyak faktor misalnya unsur silikon, tembaga[6], molibdenum, dan lain-lain. Besi cor kelabu merupakan salah satu jenis besi cor dengan grafit lamelar dan memiliki berbagai kelebihan dan banyak dipakai di berbagai bidang. Besi cor kelabu memiliki daya redam terhadap getaran yang lebih tinggi dari pada logam lain sehingga banyak dipakai di industri permesinan sebagai rangka dan landasan mesin[7]. Besi cor kelabu mudah dilakukan proses pemesinan sehingga menjadi pilihan dalam pembuatan bagian alat yang memerlukan banyak proses pemesinan. Besi cor kelabu juga lebih mudah diproduksi dalam industri pengecoran logam dibandingkan dengan baja sehingga harga lebih murah. Pembuatan benda-benda rumit juga lebih dikerjakan menggunakan bahan besi cor kelabu dibandingkan dengan baja.

Inokulasi merupakan salah satu proses yang dilakukan dalam pembuatan besi cor kelabu melalui proses pengecoran logam. Inokulasi berfungsi untuk mendorong terbentuknya struktur mikro yang homogen dengan tanpa sementit sebagai matrik, membentuk grafit, mencegah under cooling[8][9]. Grafit yang terbentuk akan mempengaruhi karakteristik fisik dan mekanik besi cor kelabu. Inokulasi pada besi cor kelabu juga berfungsi untuk meningkatkan karakteristik mekanik tertentu dengan memasukkan unsur yang diperlukan. Penambahan unsur tersebut akan meningkatkan karakteristik misalnya ketahanan aus, kekerasan, ketahanan leleh / fatik dan lain-lain[8].

Bahan-bahan yang digunakan dalam inokulasi besi cor kelabu dapat bervariasi sesuai kebutuhan. Bahan inokulasi terutama adalah bahan yang mengandung silikon karena sangat berfungsi dalam pembentukan grafit besi cor kelabu. Bahan dengan unsur dominan silikon juga terkadang terdapat unsur lain seperti barium dengan tujuan untuk meningkatkan karakteristik yang diinginkan. Unsur lain yang dapat disertakan dalam inokulan adalah mangan, aluminium, strontium, kalsium dan zirkon [10] sesuai dengan kebutuhan inokulasi serta sifat yang diinginkan. Penambahan unsur silikon menurunkan kekerasan besi cor kelabu[11].

Metode memasukkan inokulan ke dalam logam cair secara prinsip tidaklah diatur dengan aturan tertentu dan harus sesuai aturan tersebut. Pada prinsipnya, inokulan dimasukkan ke logam cair dan bereaksi dengannya. Pemasukan inokulan dapat dilakukan di ladle penahan sebelum dituang ke cetakan ataupun di cetakan[9]. Cara memasukkan inokulan ke logam cair dapat memanfaatkan gaya gravitasi, disuntikkan dengan udara, atau disuntikkan melalui pipa berlubang [10]. Metode inokulasi dengan membiarkan inokulan secara curah dimasukkan ke dalam logam cair atau dibungkus terlebih dahulu kemudian dimasukkan ke logam cair merupakan hal yang belum dilakukan penelitian. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh cara atau metode memasukkan inokulan ke logam cair terhadap komposisi kimia dan kekerasan besi cor kelabu.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan rangkaian proses pengecoran besi cor kelabu dengan variasi cara / metode memasukkan inokulan ke logam cair. Komposisi target yang akan dicapai adalah besi cor kelabu tipe FC 250 dengan komposisi standar menurut JIS 5501 seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Bahan inokulan menggunakan bahan dengan komposisi seperti ditunjukkan pada Tabel 2 dengan komposisi utama adalah silikon. Inokulan dimasukkan ke dalam ladle penampung dengan tidak cara / metode yakni dibungkus terlebih dahulu dengan kertas (Gambar 1), dicurahkan langsung, dan gabungan antara dibungkus dan dicurahkan/ ditabur. Maksud gabungan disini adalah sebagian dibungkus dan sebagian ditabur dengan jumlah total inokulan sama dengan dua variasi lainnya.

Pengecoran besi cor kelabu menggunakan tanur induksi dengan cetakan *green sand*. Cairan dituang ke ladle penampung pada suhu 1510 °C dan dari ladle penampung dituang ke cetakan pada suhu 1434 °C. Cairan logam dituang dalam bentuk produk tertentu dan pengambilan sampel pengujian diambil dengan memotong sebagian dari produk tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Tabel 1. Komposisi kimia besi cor kelabu tipe FC 250 sesuai JIS 5501

Grade JIS 5501	KOMPOSISI KIMIA (%)				
	C	Si	Mn	P	S
FC 250	3.10 – 3.40	1.80 – 2.00	0.9 – 0.95	0.25	0.15

Tabel 2. Komposisi kimia inokulan

Material Inokulan	Kandungan				
	Si (%)	Ca (%)	Al (%)	Ba (%)	Sr (%)
	max 78	max 0,1	max 0,5	-	max 1,0

Pengujian terhadap material mencakup pengujian komposisi kimia dan kekerasan benda cor. Komposisi kimia diuji dengan menggunakan cetakan logam untuk membuat pembekuan cepat yang diistilahkan dengan *chill test*. *Chill test* berupa cetakan logam untuk membentuk benda dengan diameter sekitar 30 mm dan tinggi sekitar 40 mm. *Chill test* diuji dengan menggunakan spektrometer dengan metode *Optical Emission Spectroscopy* (OES). Pengujian kekerasan menggunakan alat uji kekerasan Brinell dengan proses persiapan dan pelaksanaan pengujian mengikuti standar umum dalam pengujian kekerasan logam.



Gambar 1. Inokulan yang sudah dibungkus



Gambar 2. Lokasi pengambilan spesimen dari benda cor

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Komposisi Besi Cor Kelabu

Komposisi kimia suatu logam sangat menentukan dalam modifikasi karakteristik fisik dan mekaniknya. Komposisi kimia hasil pengecoran besi cor kelabu dengan variasi metode inokulasi ditunjukkan pada Tabel 1. Komposisi yang diperoleh dari semua jenis variasi inokulasi masih masuk dalam batas komposisi FC 250. Kandungan karbon pada metode inokulasi dengan dibungkus lebih rendah dibandingkan dengan kandungan karbon pada metode inokulasi curah dan campuran antara bungkus dan curah. Perbedaan kandungan komposisi karbon hanya kecil yakni 0,01 % dimana pada inokulasi dibungkus sebesar 3,40 % dan inokulasi curah dan campuran sebesar 3,41 %. Perbedaan kandungan ini kemungkinan juga mempengaruhi karakteristik besi cor kelabu yang dihasilkan.

Tabel 3. Komposisi kimia besi cor kelabu hasil pengecoran dengan variasi cara inokulasi

Komposisi kimia	Standar	Dibungkus	Dicurah	Dibungkus dan Dicurah
Karbon (C)	3,1% – 3,8%	3,40%	3,41%	3,41%
Silikon (Si)	1,6% - 2,6 %	2,32%	2,37%	2,37%
Mangan (Mn)	0,4% - 1,0%	0,64%	0,65%	0,65%
Sulfur (S)	Max 0,20%	0,008%	0,007%	0,007%
Pospor (P)	Max 0,10%	0,02%	0,02%	0,02%
Krom (Cr)	Max 0,15%	0,15%	0,15%	0,15%

Kandungan silikon standar yang ditentukan adalah 1,6 – 2,6 % dan semua besi cor hasil pengecoran dengan variasi metode inokulasi memenuhi standar tersebut. Kandungan silikon pada besi cor dengan metode inokulasi curah dan gabungan curah serta dibungkus sebesar 2,37 %. Kandungan silikon pada besi cor kelabu dengan metode inokulasi dibungkus sebesar 2,32 %. Nilai ini terlihat lebih rendah 0,05 % dibandingkan dengan kandungan silikon pada besi cor kelabu menggunakan cara inokulasi curah dan campuran antara curah dan dibungkus.

Kandungan mangan, sulfur, pospor dan krom semua memenuhi standar yang telah ditentukan. Standar kandungan mangan, sulfur, pospor, dan krom berturut-turut sebesar sebesar 0,4 – 1,0 %, maks 0,20 %, maks 0,10 %, maks 0,15 %. Kandungan mangan besi cor kelabu dengan metode inokulasi dibungkus sebesar 0,64 %, sedangkan pada besi cor kelabu dengan metode inokulasi curah dan campuran antara curah dan bungkus sebesar 0,65 %. Kandungan mangan pada besi cor kelabu dengan metode curah dan campuran sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan metode dibungkus yakni sebesar 0,01 %. Kandungan sulfur pada besi cor kelabu dengan metode inokulasi dibungkus sebesar 0,08 %, sedangkan jika menggunakan metode inokulasi curah dan campuran antara curah dan dibungkus sebesar 0,07 %. Kandungan ini masih jauh di bawah batas maksimal yakni 0,2 %. Kandungan pospor pada besi cor kelabu dengan tiga metode inokulasi memiliki nilai sama yakni 0,02 %. Nilai ini juga masih di bawah batas maksimal yang diperbolehkan yakni sebesar 0,10 %. Komposisi krom memiliki nilai yang sama sebesar 0,15 % pada besi cor kelabu dengan tiga variasi metode inokulasi yang dilakukan. Nilai ini juga masih memenuhi standar karena nilai maksimal yang diperbolehkan adalah 0,15 %.

Kandungan karbon pada besi cor kelabu dengan metode inokulasi dibungkus lebih tinggi 0,01 % dibandingkan pada besi cor kelabu dengan metode inokulasi curah dan campuran antara bungkus dan curah. Hal ini dimungkinkan karena inokulan yang dibungkus terlarut dalam cairan logam secara lebih bersamaan pada daerah yang sama. Hal ini berbeda dengan inokulan yang curah dimana dia akan menyebar ke segala arah ketika terkena cairan logam. Efek inokulan yang mencair secara bersamaan di satu tempat mungkin lebih optimal dalam membentuk grafit sehingga grafit yang terbentuk lebih banyak. Grafit merupakan karbon bebas yang tidak berikatan dengan unsur besi atau lainnya membentuk senyawa. Banyaknya grafit yang terbentuk akan mengurangi kandungan karbon yang terdeteksi ketika diuji komposisi. Karbon yang terdeteksi

dalam uji komposisi besi cor kelabu adalah karbon yang berikatan dengan unsur besi atau lainnya. Sedangkan karbon bebas / grafit tidak terdeteksi dalam pengujian komposisi dengan spektrometer.

Silikon pada besi cor kelabu dalam proses inoculasi berfungsi untuk mendorong terjadinya grafit[9]. Grafit berubah bentuk dengan mekanisme tertentu misalnya adanya pengaruh penambahan unsur pengubah bentuk grafit[5], selain itu ukuran grafit juga mempengaruhi karakteristik besi cor[12]. Bagian dalam grafit berubah blok-blok yang bertumpuk-tumpuk antara satu dan lainnya[13]. Perbedaan bentuk grafit mengubah karakteristik sifat besi cor kelabu[14]–[16]. Perbedaan grafit yang terbentuk dipengaruhi oleh banyak faktor diantaranya jenis inoculan[17], cara inoculasi, waktu inoculasi, dan lainnya. Silikon akan menghalangi unsur besi berikatan dengan karbon sehingga karbon dapat menjadi karbon bebas / grafit. Proses inoculasi dengan metode dibungkus menghasilkan silikon lebih sedikit terdeteksi oleh alat ukur. Semakin banyak silikon yang berupaya menghalangi terjadi besi karbida (Fe_3C), silikon yang bereaksi dengan oksigen juga lebih banyak sehingga membentuk terak silikon oksida. Banyaknya silikon yang menjadi terak ini akan mengurangi kadar silikon yang ada dalam besi cor kelabu.

Unsur mangan, pospor, sulfur, dan krom secara teoritis tidak terpengaruh dengan proses inoculasi dengan tidak metode dalam penelitian ini. Hal ini karena bahan inoculan tidak mengandung ketiga unsur tersebut. Pada prinsipnya, pospor dan sulfur adalah unsur yang diminimalisir dalam besi cor kelabu karena pengaruh yang kurang baik terhadap sifat mekanik besi cor kelabu.

3.2 Kekerasan Besi Cor Kelabu

Sifat mekanik besi cor dipengaruhi oleh banyak faktor misalnya inoculasi[18], laju pembekuan[19], komposisi unsur penyusun, dan lainnya.. Kekerasan besi cor kelabu hasil pengecoran dengan menggunakan tiga variasi metode inoculasi ditunjukkan pada Tabel 2. Kekerasan besi cor kelabu dengan metode inoculasi dibungkus sebesar 217 HB. Kekerasan ini paling rendah dibandingkan dengan kekerasan besi cor kelabu yang dibuat dengan metode inoculasi curah (229 HB) dan campuran antara dibungkus dan curah (223 HB). Standar nilai kekerasan besi cor kelabu FC 250 sesuai JIS 5501 adalah 180 – 240 HB. Berdasarkan standar ini, kekerasan pada ketiga besi cor kelabu yang diperoleh dengan tiga variasi metode inoculasi masih memenuhi syarat sebagai FC 250.

Tabel 4. Kekerasan besi cor kelabu hasil pengecoran dengan variasi cara inoculasi

Cara Inoculasi	Kekerasan (HBN)
Dibungkus	217
Dicurah	229
Dibungkus dan Dicurah	223

Kekerasan besi cor kelabu dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kandungan karbon, jumlah grafit, kandungan krom, kandungan mangan, dan kecepatan pembekuan. Peningkatan kandungan karbon justru menurunkan kekerasan besi cor kelabu. Kandungan karbon pada besi cor kelabu dengan tiga variasi cara inoculasi boleh dikatakan hampir sama karena hanya selisih 0,01 %. Perbedaan sangat kecil ini mungkin tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap kekerasan besi cor kelabu. Kandungan grafit mempengaruhi kekerasan besi cor kelabu. Peningkatan jumlah grafit menurunkan kekerasan besi cor kelabu. Hal ini disebabkan grafit memiliki sifat yang lunak sehingga menurunkan kekerasan besi cor kelabu. Grafit terbentuk akibat karbon yang tidak berikatan dengan besi sehingga membentuk karbon bebas dengan bentuk lamelar pada besi cor kelabu[9].

Kekerasan pada besi cor dengan metode inoculasi dicurah lebih tinggi dibandingkan yang lain. Ikatan besi karbida yang makin banyak, akan meningkatkan kekerasan besi cor karena besi karbida bersifat keras dibandingkan fasa ferit atau perlit. Kandungan silikon pada besi cor kelabu dengan metode inoculasi dibungkus lebih sedikit dibandingkan dengan kandungan silikon pada besi cor kelabu dengan metode inoculasi curah dan campuran antara bungkus dan curah.

Kandungan silikon yang lebih sedikit kemungkinan berkurang karena proses pembentukan grafit yang lebih banyak. Pembentukan grafit yang lebih banyak menyebabkan kekerasan besi cor kelabu lebih rendah dibandingkan yang lain. Namun sebagai pembanding, inoculasi ada yang tidak mempengaruhi kekerasan besi cor kelabu[20].

4. KESIMPULAN

Cara memasukkan inoculan saat proses inoculasi dapat mempengaruhi hasil pengecoran besi cor kelabu. Inoculan yang dibungkus saat dimasukkan ke logam cair menghasilkan komposisi kimia besi cor kelabu dengan kandungan karbon dan silikon lebih rendah dibandingkan dengan metode ditabur serta campuran antara tabur dan bungkus. Kekerasan besi cor kelabu lebih rendah pada metode inoculasi dengan dibungkus daari pada ditabur atau gabungan antara tabur dan bungkus. Silikon lebih berfungsi mendorong terbentuknya grafit dan menurunkan jumlah karbon yang membentuk karbida besi. Penambahan grafit menurunkan kekerasan besi cor kelabu karena grafit bersifat lunak.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Diószegi, P. Svidró, L. Elmquist, and I. Dugic, “Defect formation mechanisms in lamellar graphite iron related to the casting geometry,” *Int. J. Cast Met. Res.*, vol. 29, no. 5, pp. 279–285, 2016, doi: 10.1080/13640461.2016.1211579.
- [2] J. . Olawale and K. . Oliwasegun, “Austempered Ductile Iron (ADI): A Review,” *Mater. Perform. Charact.*, vol. 5, no. 1, pp. 289–311, 2016, doi: 10.1520/MPC20160053.
- [3] D. mei Xu, G. quan Wang, X. Chen, Y. xiang Li, Y. Liu, and H. wei Zhang, “Effects of alloy elements on ductility and thermal conductivity of compacted graphite iron,” *China Foundry*, vol. 15, no. 3, pp. 189–195, 2018, doi: 10.1007/s41230-018-8055-9.
- [4] R. E. Boeri, M. G. Lopez, N. E. Tenaglia, and J. M. Massone, “Solidification , Macrostructure and Shrinkage Formation of Ductile and Compacted Irons,” *Int. J. meta*, vol. 14, pp. 1172–1182, 2020.
- [5] U. Tewary *et al.*, “The origin of graphite morphology in cast iron,” *Acta Mater.*, vol. 226, no. March, pp. 2022–2023, 2022, doi: 10.1016/j.actamat.2022.117660.
- [6] M. M. Hejazi, M. Divandari, and E. Taghaddos, “Effect of copper insert on the microstructure of gray iron produced via lost foam casting,” *Mater. Des.*, vol. 30, no. 4, pp. 1085–1092, 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.06.032.
- [7] I. M. W. Ekaputra, A. A. I. Litaay, and B. Setyahandana, “Pengaruh Komposisi 2.9% dan 3.8% Si terhadap Kekuatan Lelah Besi Cor Kelabu,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 10, no. 3, pp. 227–234, 2019, doi: 10.21776/ub.jrm.2019.010.03.3.
- [8] E. E. T. ELSawy, M. R. EL-Hebeary, and I. S. E. El Mahallawi, “Effect of manganese, silicon and chromium additions on microstructure and wear characteristics of grey cast iron for sugar industries applications,” *Wear*, vol. 390–391, no. July, pp. 113–124, 2017, doi: 10.1016/j.wear.2017.07.007.
- [9] S. C. Borse and Y. E. Mangulkar, “Review on Grey Cast Iron Inoculation,” *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 30–36, 2014.
- [10] J. N. Harvey, G. A. Noble, and J. N. Harvey, “Inoculation of Cast Irons – An Overview Inoculation of Cast Irons – An Overview,” in *55th Indian Foundry Congress 2007*, 2007, pp. 343–360.
- [11] Y. Umardani and T. R. Nurferdian, “Pengaruh Penambahan Kandungan Silikon pada Besi Cor Kelabu dengan Metode Fluiditas Strip Mold terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro,” *Rotasi*, vol. 11, pp. 5–12, 2009.
- [12] C. Chuang, D. Singh, P. Kenesei, J. Almer, J. Hryn, and R. Huff, “3D quantitative analysis

- of graphite morphology in high strength cast iron by high-energy X-ray tomography,” *Scr. Mater.*, vol. 106, no. September, pp. 5–8, 2015, doi: 10.1016/j.scriptamat.2015.03.017.
- [13] K. Theuwissen, J. Lacaze, and L. Laffont, “Structure of graphite precipitates in cast iron,” *Carbon N. Y.*, vol. 96, no. January, pp. 1120–1128, 2016, doi: 10.1016/j.carbon.2015.10.066.
- [14] G. Bertolino and J. E. Perez-Ipiña, “Geometrical effects on lamellar grey cast iron fracture toughness,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 179, no. 2006, pp. 202–206, 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.082.
- [15] Y. Liu *et al.*, “Effect of graphite morphology on the tensile strength and thermal conductivity of cast iron,” *Mater. Charact.*, vol. 144, no. October, pp. 155–165, 2018, doi: 10.1016/j.matchar.2018.07.001.
- [16] Z. J. Ma *et al.*, “The effect of vermicularity on the thermal conductivity of vermicular graphite cast iron,” *Mater. Des.*, vol. 93, no. March, pp. 418–422, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.12.169.
- [17] W. Xue and Y. Li, “Pretreatments of gray cast iron with different inoculants,” *J. Alloys Compd.*, vol. 689, pp. 408–415, 2016, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.07.052.
- [18] F. Alabbasian, S. Mohammad, A. Boutorabi, and S. Kheirandish, “Effect of inoculation and casting modulus on the microstructure and mechanical properties of ductile Ni-resist cast iron,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 651, pp. 467–473, 2016, doi: 10.1016/j.msea.2015.09.024.
- [19] M. M. J. Behnam, P. Davami, N. Varahram, M. M. M. Jabbari Behnam, P. Davami, and N. Varahram, “Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of gray cast iron,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 2, pp. 583–588, 2010, doi: 10.1016/j.msea.2010.09.087.
- [20] F. Wilberfors and I. L. Svensson, “The effect of nitrogen and inoculation on the tensile properties and microstructure of cast iron with lamellar graphite,” *Key Eng. Mater.*, vol. 457, pp. 114–119, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.457.114.