

**PENGARUH PENAMBAHAN NIKEL 4% DAN MAGNESIUM
4% TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKUATAN
TARIK PADA BESI COR NODULAR**



**Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi Strata I
pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik**

Oleh :

IKHSAN MAULANA IRFANSYAH

D200180123

**PROGRAM STUDI
TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA
2023**

HALAMAN PERSETUJUAN

**PENGARUH PENAMBAHAN NIKEL 4% DAN MAGNESIUM 4%
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKUATAN TARIK PADA BESI
COR NODULAR**

PUBLIKASI ILMIAH

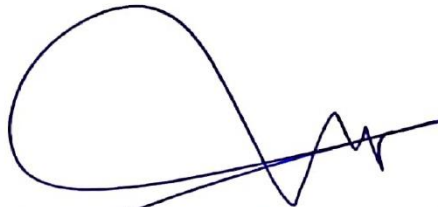
Oleh :

IKHSAN MAULANA IRFANSYAH

D200180123

Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji oleh:

Dosen Pembimbing

A handwritten signature in blue ink, featuring a large, stylized loop followed by a series of smaller, sharp, horizontal strokes.

Ir. Agung Setyo Darmawan, M.T.

NIK. 0403046701

HALAMAN PENGESAHAN

PENGARUH PENAMBAHAN NIKEL 4% DAN MAGNESIUM 4% TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKUATAN TARIK PADA BESI COR NODULAR

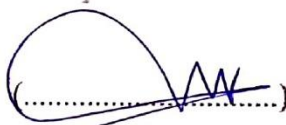
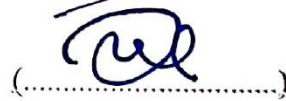
OLEH :

IKHSAN MAULANA IRFANSYAH

D200180123

Telah Di Pertahankan Di Dewan Penguji Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Surakarta
Pada Hari/Tanggal Rabu, 18 Januari 2022
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Dewan Penguji:

1. Ir. Agung Setyo Darmawan, M.T.
(Ketua Dewan Penguji) 
2. Joko Sedyono, S.T., M.Eng., Ph.D.
(Anggota I Dewan Penguji) 
3. H. Bambang Waluyo Febriantoko, S.T., M.T.
(Anggota II Dewan Penguji) 



Dekan,

Rois Fathoni, S.T., M.Sc., Ph.D

NIK. 0603027401

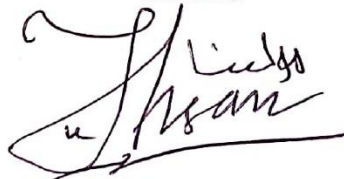
SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam publikasi ilmiah ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila kelak terbukti ada ketidakbenaran dalam pernyataan saya di atas, maka akan saya pertanggungjawabkan sepenuhnya.

Surakarta, 18 Januari 2023

Penulis

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ikhsan Maulana Irfansyah', with a stylized flourish at the end.

IKHSAN MAULANA IRFANSYAH

D200180123

PENGARUH PENAMBAHAN NIKEL 4% DAN MAGNESIUM 4% TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKUATAN TARIK PADA BESI COR NODULAR

Abstrak

Besi cor telah memainkan peran penting dalam perkembangan manusia sehingga menuntut ketersediaan material berkualitas baik. Untuk memperbaiki sifat mekanik material logam diperlukan penambahan unsur paduan pada komposisi material logam. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan nikel dan magnesium terhadap komposisi, struktur mikro, dan kekuatan tarik besi cor nodular. Penelitian ini menggunakan FCD (*Ferro Cast Ductile*) sebagai bahan utama kemudian dilebur di dalam tungku induksi. Proses pembentukan besi cor grafit bulat (nodular) dilakukan dengan sistem ladle terbuka, penambahan nikel 400 gram (4% massa) dan magnesium 400 gram (4% massa) yang diletakkan di dasar ladle berkapasitas 10 kg sesaat sebelum logam cair dituangkan ke dalam cetakan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi paduan dari besi cor nodular memiliki kadar kandungan magnesium melebihi kadar yang disyaratkan AFS (*Atomic Fluorescence Spectrometry*). Meningkatnya persentase kandungan nikel dan magnesium dalam besi cor nodular menghasilkan butiran grafit bulat yang mayoritas lebih besar dan lebih bulat. Sedangkan berdasarkan pengujian tarik, nilai kekuatan tarik, kekuatan luluh dan modulus elastisitas pada besi cor nodular cenderung meningkat dengan bertambahnya persentase nikel dan magnesium.

Kata Kunci : besi cor nodular, nikel, magnesium, struktur mikro, kekuatan tarik

Abstract

Cast iron has played an important role in human development so it demands the availability of good quality materials. To improve the mechanical properties of metal materials, it is necessary to add alloying elements to the composition of metal materials. This study aims to determine the effect of the addition of nickel and magnesium on the composition, microstructure, and hardness of nodular cast iron. This study uses FCD (*Ferro Cast Ductile*) as the main material and then melted in an induction furnace. The process of forming spherical graphite (nodular) cast iron is carried out with an open ladle system, adding 400 grams (4% mass) of nickel and 400 grams (4% mass) of magnesium which are placed at the bottom of the 10 kg capacity ladle just before the molten metal is poured into the mold. The results showed that alloy compositions of cast iron having a magnesium content exceeding AFS (*Atomic Fluorescence Spectrometry*) required levels. The increasing percentage of Ni and Mg content in nodular cast iron resulted in larger spherical graphite grains, more ferrite and less pearlite. Meanwhile, based on tensile testing, the value of tensile strength, yield strength and modulus of elasticity in nodular cast iron tends to increase with increasing percentage of nickel and magnesium.

Keywords : nodular cast iron, nickel, magnesium, microstructure, tensile strength

1. PENDAHULUAN

Besi cor adalah paduan yang terdiri dari besi 95 % berat, karbon 2,1 - 4% berat, dan silikon 1 - 3% berat. Besi cor memiliki berbagai sifat tergantung pada komposisi dan laju pendinginan pada *casting*. Ada berbagai macam aplikasi besi cor terutama di pipa, mesin dan industri otomotif, seperti komponen mesin. Industri otomotif telah menghadapi tantangan untuk meningkatkan dan mencari efisiensi mesin dan masa pakai mesin dengan mengembangkan mutu baru dari besi tuang yang dapat memberikan dan mempertahankan sifat fisik, mekanik, dan tribologi yang lebih baik pada suhu tinggi. Peningkatan suhu akan melunakkan bahan yang dapat meningkatkan gaya gesekan dan tingkat keausan akibat gesekan (Maleque dkk., 2018)

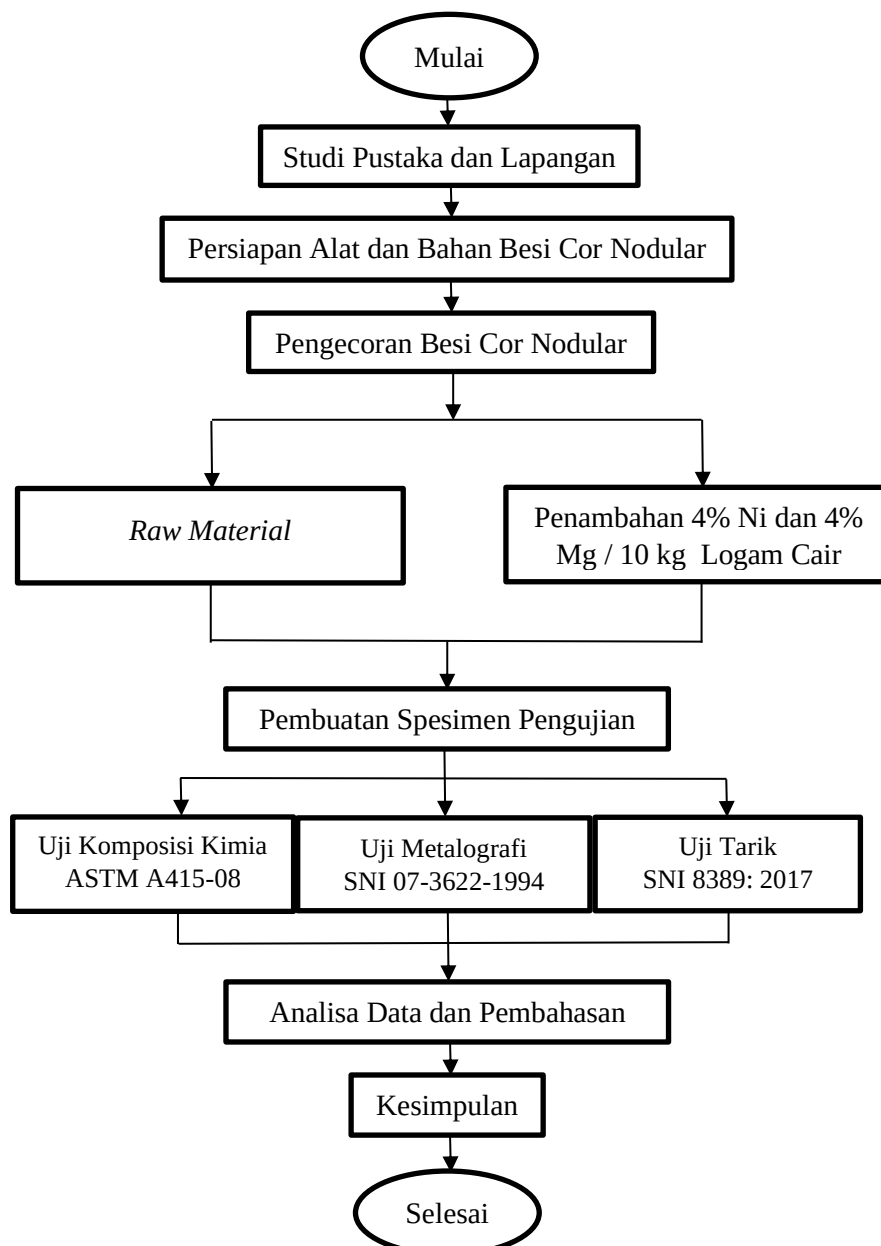
Besi cor nodular mengandung magnesium atau serium, yang bertindak sebagai pembulat grafit selama proses pembekuan. Struktur mikro terdiri atas grafit berbentuk bulat yang dikelilingi oleh ferit dan/atau perlit (Sofyan, 2021). Besi cor nodular dicirikan memiliki kekuatan tarik dan kekuatan lelah yang tinggi. Sifat-sifat besi cor nodular memungkinkan untuk digunakan secara efektif dalam berbagai aplikasi industri, terutama di industri otomotif (Vaško 2020).

Guna memperbaiki sifat mekanisnya besi cor nodular biasa ditambahkan unsur paduan. Salah satu pengembangan proses untuk mendapatkan sifat-sifat mekanik yang lebih baik dari besi cor nodular dapat dilakukan melalui perlakuan pada saat cair (*liquid treatment*), dengan cara mengatur komposisi paduan serta penambahan paduan khusus seperti Cu, Cr, dan Ni (Bandanadjaja, 2012). Nikel merupakan sumber daya strategis yang memiliki kekuatan tinggi dan keliatan yang baik (Zhang dkk, 2020). Besi cor nodular juga bisa divariasikan dengan unsur lainnya, seperti halnya nikel, unsur nikel dapat memperkuat fasa ferit serta berperan untuk mengurangi karbida kotor seperti sebagai pembentukan grafit dengan lebih kurang 50 % dari keefektifan silikon (Sudarmanto, 2016).

Dari uraian permasalahan di atas maka dilakukan penelitian dengan judul **“Pengaruh Penambahan Nikel 4% Dan Magnesium 4% Terhadap Struktur Mikro Dan Kekuatan Tarik Pada Besi Cor Nodular”**.

2. METODE

Penelitian dilakukan dengan melalui beberapa tahapan yang telah direncanakan seperti yang terlihat pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Studi pustaka dan lapangan merupakan langkah-langkah proses penelitian dan tempat pengujian, Tahapan yang dilakukan sebagai berikut :

1. Proses pembuatan besi cor nodular dengan penambahan variasi nikel dan magnesium dilakukan di CV. Baja Tunggal, Kuncen, Ceper, Kabupaten Klaten.
2. Pemotongan spesimen uji metalografi dilakukan di Bengkel Karya Mandiri Sentosa, Klepu, Ceper, Klaten.
3. Pengamplasan dan pemolesan spesimen pengujian metalografi dilakukan di Laboratorium Pengujian Logam Politeknik Manufaktur Ceper, Klaten 57465 Jawa Tengah.
4. Pengetsaan spesimen pengujian metalografi dilakukan di Laboratorium Pengujian Logam Politeknik Manufaktur Ceper, Klaten 57465 Jawa Tengah.
5. Preparasi spesimen uji tarik dilakukan di Bengkel Karya Mandiri Sentosa, Klepu, Ceper, Klaten.
6. Pengujian komposisi kimia, metalografi dan tarik besi cor nodular dilakukan di Laboratorium Pengujian Logam Politeknik Manufaktur Ceper, Klaten 57465 Jawa Tengah.

Pembuatan spesimen pengujian memerlukan persiapan alat dan bahan serta tahapan proses dalam pembuatan spesimen pengujian yang akan digunakan dalam penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui sifat mekanis material seperti kekuatan tarik, modulus elastisitas dan kekuatan luluh dari besi cor nodular. Pada pengujian ini spesimen yang digunakan adalah besi cor nodular *raw material* (gambar 4.2) dan sesudah dilakukan penambahan nikel dan magnesium (gambar 4.3) dengan bentuk silinder sesuai dengan standar SNI 8389: 2017.



Gambar 4.2 Spesimen Sebelum Pengujian Tarik



Gambar 4.3 Spesimen Setelah Pengujian Tarik

Sub bab berikut adalah data pengujian tarik untuk 2 spesimen besi cor nodular dengan masing-masing spesimen uji memiliki panjang 50 mm dan memiliki diameter dalam 13,96 mm pada *raw material* besi cor nodular dan 13,79 mm pada besi cor nodular setelah penambahan 4% Ni dan 4% Mg.

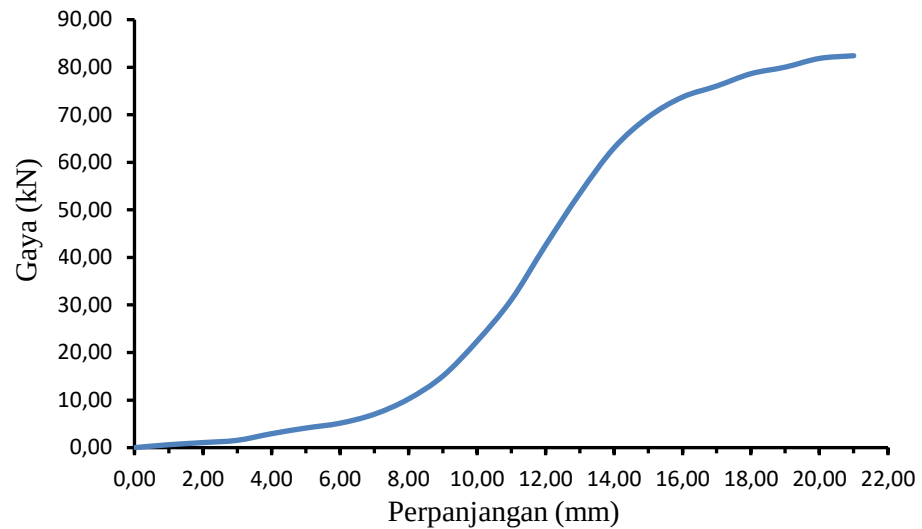
3.1.1 Pembuatan Grafik Tegangan-Regangan Raw Material Besi Cor Nodular

Dari pengujian yang telah dilakukan, didapatkan data hasil pengujian tarik pada spesimen 1 (*raw material*) besi cor nodular sebelum dilakukan penambahan seperti yang diperlihatkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Gaya (F) dan Perpanjangan (ΔL) *Raw Material* Besi Cor Nodular

No	Gaya, F (kN)	Perpanjangan, ΔL (mm)
1	0	0
2	0,61	1
3	1,06	2
4	1,54	3
5	2,93	4
6	4,12	5
7	5,14	6
8	7,02	7
9	10,22	8
10	15,02	9
11	22,36	10
12	31,06	11
13	42,51	12
14	53,43	13
15	63,02	14
16	69,5	15
17	73,71	16
18	76,04	17
19	78,64	18
20	80,02	19
21	81,85	20
22	82,42	21

Dari data hasil pengujian tarik tabel 4.2 kemudian dibuat gambar 4.4 yaitu grafik hubungan antara gaya terhadap perpanjangan, yang kemudian akan diubah menjadi hubungan antara tegangan dan regangan



Gambar 4.4 Grafik Gaya Terhadap Perpanjangan Spesimen Raw
Material Besi Cor Nodular

Gaya dan perpajangan pada tabel 4.2 kemudian diubah menjadi tegangan dan regangan seperti yang terlihat pada tabel 4.3. Tegangan adalah beban dibagi luas penampang bahan dan regangan adalah pertambahan panjang dibagi panjang awal. Tegangan dilambangkan σ dengan satuan N/mm^2 dan regangan dilambangkan ϵ .

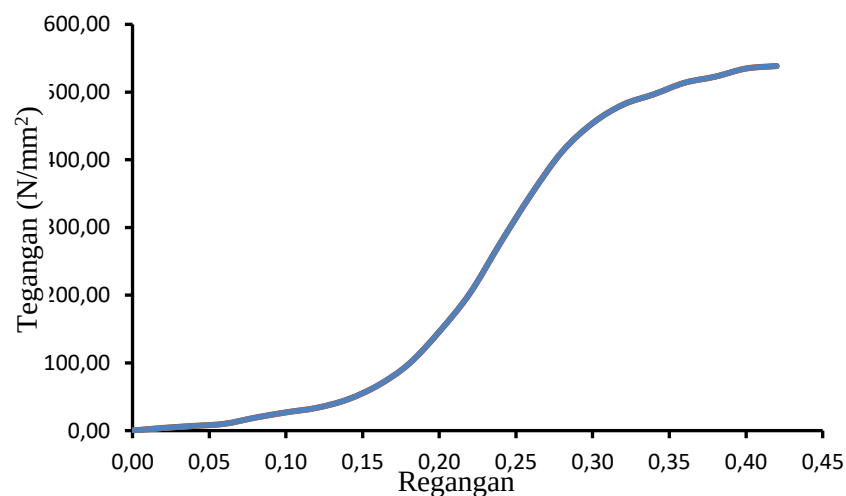
Tabel 4.3 Tegangan dan Regangan Raw Material Besi Cor Nodular

No	Tegangan, σ (N/mm^2)	Regangan, ϵ
1	0	0
2	3,99	0,02
3	6,93	0,04
4	10,06	0,06
5	19,14	0,08
6	26,92	0,10
7	33,58	0,12
8	45,86	0,14
9	66,77	0,16
10	98,13	0,18
11	146,09	0,20
12	202,93	0,22

Tabel 4.3 Lanjutan Tegangan dan Regangan *Raw Material* Besi Cor Nodular

No	Tegangan, σ (N/mm ²)	Regangan, ε
13	277,73	0,24
14	349,08	0,26
15	411,73	0,28
16	454,07	0,30
17	481,58	0,32
18	496,80	0,34
19	513,79	0,36
20	522,80	0,38
21	534,76	0,40
22	538,48	0,42

Tegangan dan regangan ditunjukkan pada tabel 4.3. Kemudian dibuat grafik hubungan antara tegangan dan regangan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik Tegangan-Regangan *Raw Material* Besi Cor Nodular

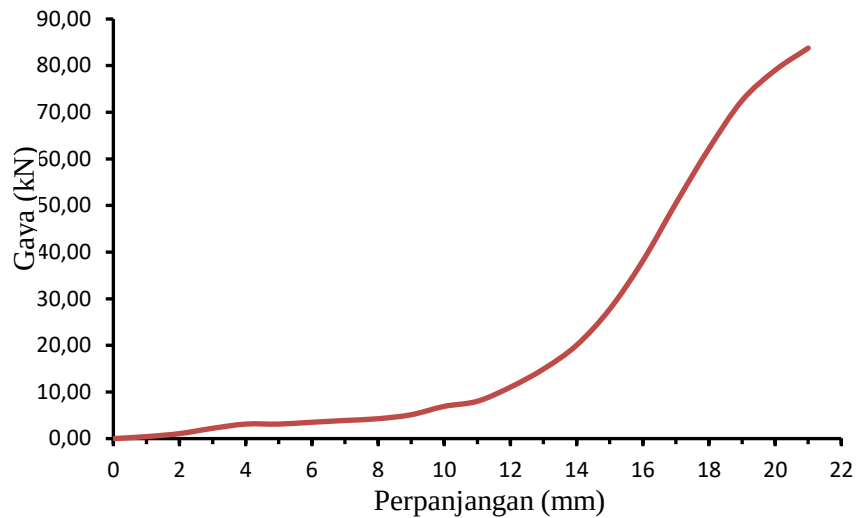
3.1.2 Pembuatan Grafik Tegangan-Regangan Besi Cor Nodular Setelah Penambahan 4% Ni dan 4% Mg.

Dari pengujian yang telah dilakukan, didapatkan data hasil pengujian tarik pada spesimen 2 besi cor nodular setelah dilakukan penambahan 4% Ni dan 4% Mg seperti yang diperlihatkan pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Gaya (F) dan Perpanjangan (ΔL) Besi Cor Nodular Setelah Penambahan 4% Ni dan 4% Mg

No	Gaya, F (kN)	Perpanjangan, ΔL (mm)
1	0	0
2	0,43	1
3	1,07	2
4	2,21	3
5	3,12	4
6	3,12	5
7	3,51	6
8	3,89	7
9	4,27	8
10	5,12	9
11	6,92	10
12	8,01	11
13	11,04	12
14	14,92	13
15	20,03	14
16	27,76	15
17	38,11	16
18	50,45	17
19	62,21	18
20	72,52	19
21	79,01	20
22	83,76	21

Dari data hasil pengujian tarik tabel 4.4 kemudian dibuat gambar 4.6 yaitu grafik hubungan antara gaya terhadap perpanjangan, yang kemudian akan diubah menjadi hubungan antara tegangan dan regangan.



Gambar 4.6 Grafik Gaya Terhadap Perpanjangan Besi Cor Nodular Setelah Penambahan 4% Ni dan 4% Mg

Gaya dan perpajangan pada tabel 4.4 kemudian diubah menjadi tegangan dan regangan seperti yang terlihat pada tabel 4.5. Tegangan adalah beban dibagi luas penampang bahan dan regangan adalah pertambahan panjang dibagi panjang awal. Tegangan dilambangkan σ dengan satuan N/mm^2 dan regangan dilambangkan ϵ .

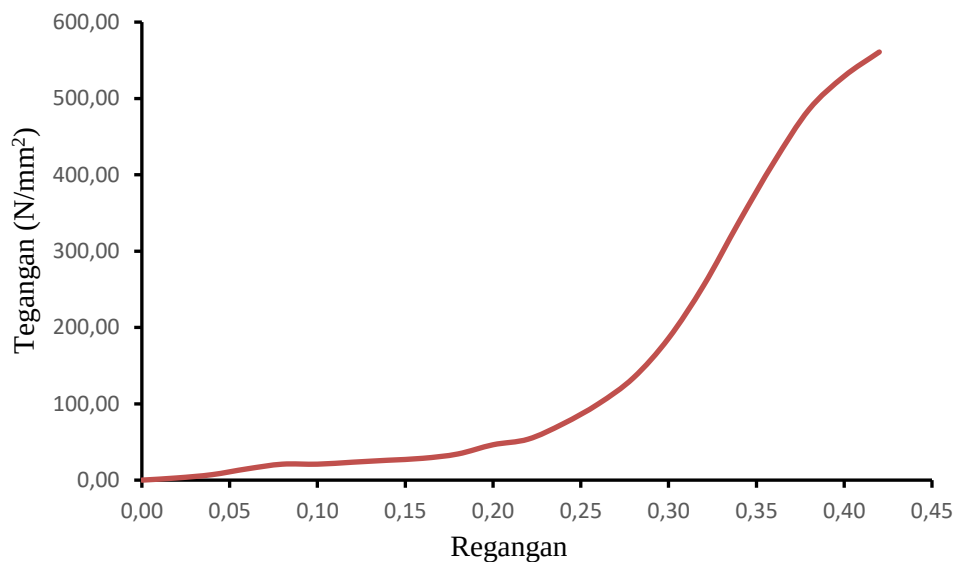
Tabel 4.5 Tegangan dan Regangan Besi Cor Nodular Setelah Penambahan 4% Ni dan 4% Mg

No	Tegangan, σ (N/mm^2)	Regangan, ϵ
1	0	0
2	2,88	0,02
3	7,16	0,04
4	14,80	0,06
5	20,89	0,08
6	20,89	0,10
7	23,50	0,12
8	26,05	0,14
9	28,59	0,16
10	34,28	0,18
11	46,33	0,20
12	53,63	0,22

Tabel 4.5 Lanjutan Tegangan dan Regangan Besi Cor Nodular Setelah Penambahan 4% Ni dan 4% Mg

No	Tegangan, σ (N/mm ²)	Regangan, ε
13	73,92	0,24
14	99,90	0,26
15	134,11	0,28
16	185,87	0,30
17	255,16	0,32
18	337,79	0,34
19	416,52	0,36
20	485,55	0,38
21	529,01	0,40
22	560,81	0,42

Tegangan dan regangan ditunjukkan pada tabel 4.5. Kemudian dibuat grafik hubungan antara tegangan dan regangan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik Tegangan-Regangan Besi Cor Nodular Setelah Penambahan 4% Ni dan 4% Mg

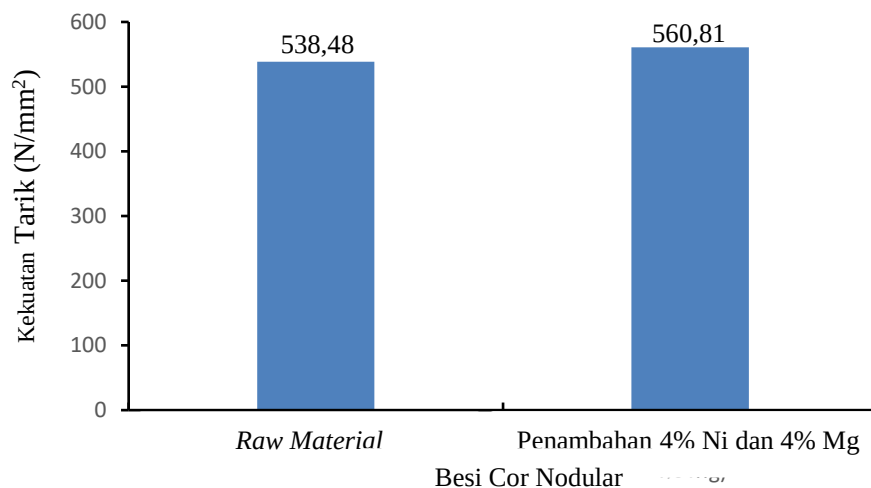
3.2 Penentuan Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik (*Tensile Strength, Ultimate tensile Strenght*) adalah tegangan maksimum yang bisa ditahan oleh suatu bahan ketika mengalami pembebanan. Kekuatan tarik dapat dicari dari titik tertinggi dari diagram tegangan regangan. Kekuatan tarik besi cor nodular *raw material* dan setelah dilakukan penambahan 4% Ni dan 4% Mg dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Kekuatan Tarik Seluruh Spesimen

No	Nama	Luas Penampang, A (mm ²)	Kekuatan Tarik, σ_u (N/mm ²)
1	Spesimen 1	153,06	538,48
2	Spesimen 2	149,355	560,81

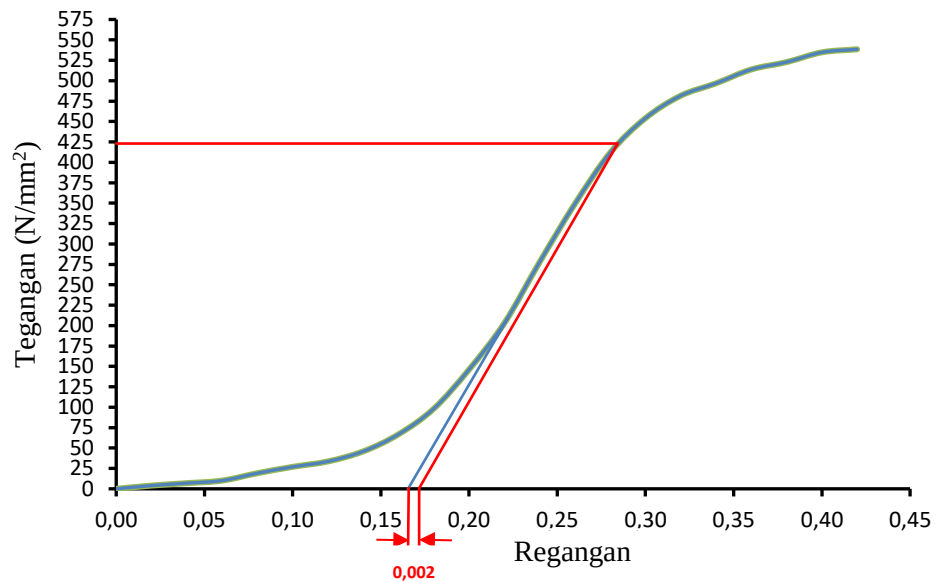
Dari tabel 4.6 dapat dibuat diagram histogram perbedaan kekuatan tarik spesimen besi cor nodular *raw material* dan setelah dilakukan penambahan 4% Ni dan 4% Mg yang dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Histogram Kekuatan Tarik Besi Cor Nodular

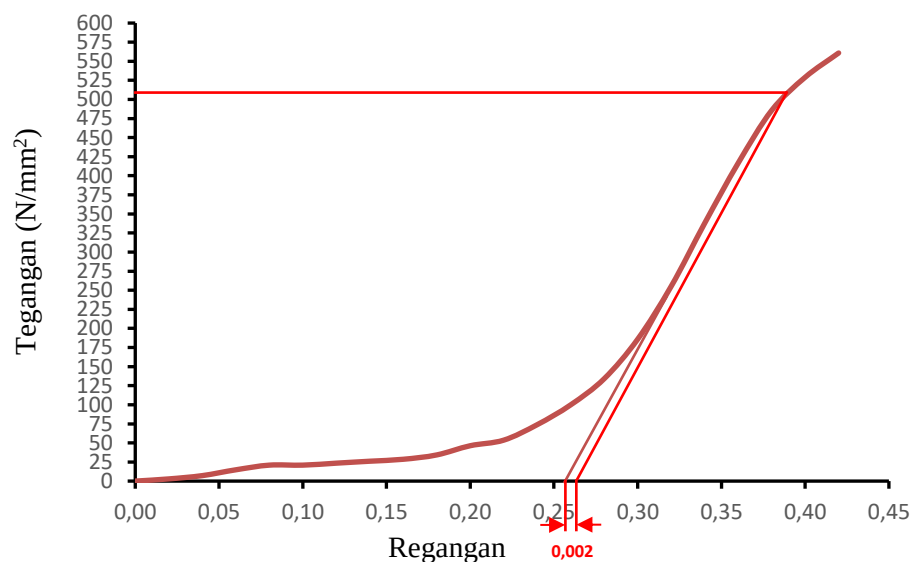
3.3 Penentuan Kekuatan Luluh

Kekuatan luluh (*Yield Strength*) merupakan titik yang menunjukkan perubahan dari deformasi elastis ke deformasi plastis. Dari gambar 4.5 dapat digunakan untuk menentukan kekuatan luluh pada *raw material* dengan metode offset sebesar 0,2 % atau 0,002 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.9.



Gambar 4.9 Penentuan Kekuatan Luluh *Raw Material* Besi Cor Nodular dengan Metode Offset 0,2% atau 0,002

Dari gambar 4.9 Nilai kekuatan luluh dapat diketahui sebesar 423,5 N/mm^2 . Dengan cara yang sama, dari gambar 4.7 dapat digunakan untuk menentukan kekuatan luluh pada besi cor nodular setelah penambahan 4% Ni dan 4% Mg dengan metode offset sebesar 0,2 % atau 0,002 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.10.



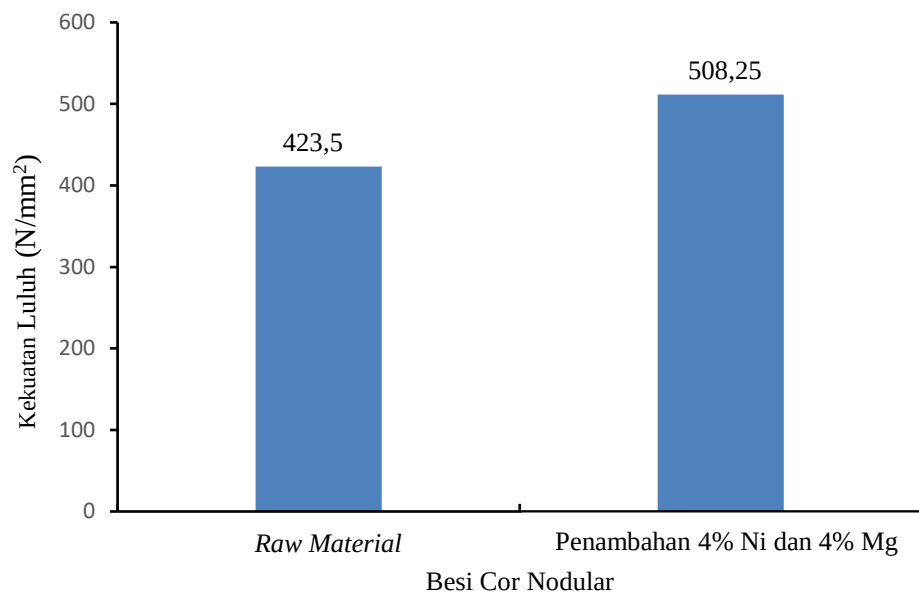
Gambar 4.10 Penentuan Kekuatan Luluh Besi Cor Nodular Setelah Penambahan 4% Ni dan 4% Mg dengan Metode Offset 0,2% atau 0,002

Dari gambar 4.10 Nilai kekuatan luluh dapat diketahui sebesar 508,25 N/mm². Selanjutnya, nilai kekuatan luluh untuk seluruh spesimen dapat dilihat pada tabel 4.7.

Tabel 4.7 Kekuatan Luluh Seluruh Spesimen

No	Nama	Kekuatan Luluh, σ_y (N/mm ²)
1	Spesimen 1	423,5
2	Spesimen 2	508,25

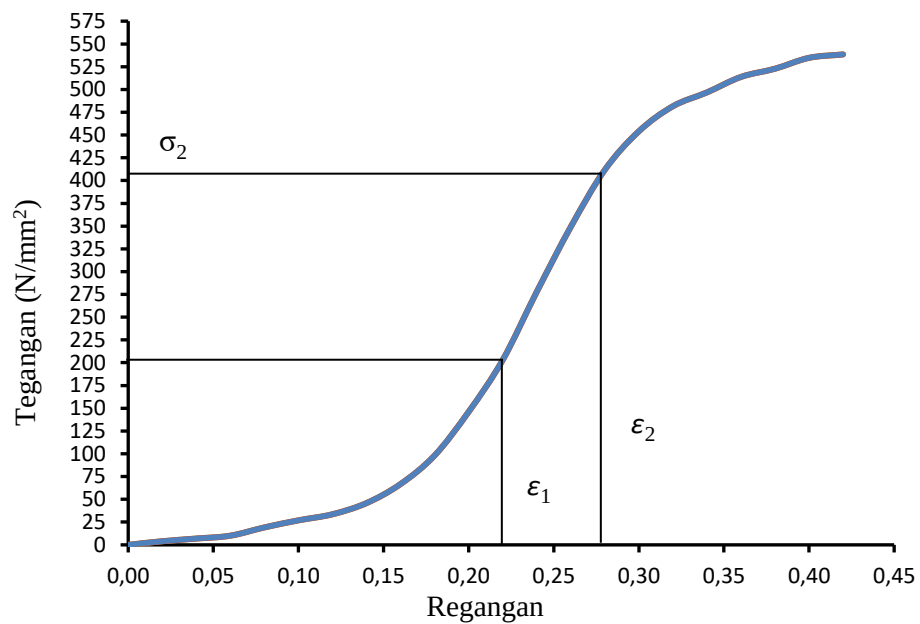
Dari tabel 4.7, dapat dibuat histogram perbedaan kekuatan luluh besi cor nodular yang dapat dilihat pada gambar 4.11.



Gambar 4.11 Histogram Kekuatan Luluh Besi Cor Nodular

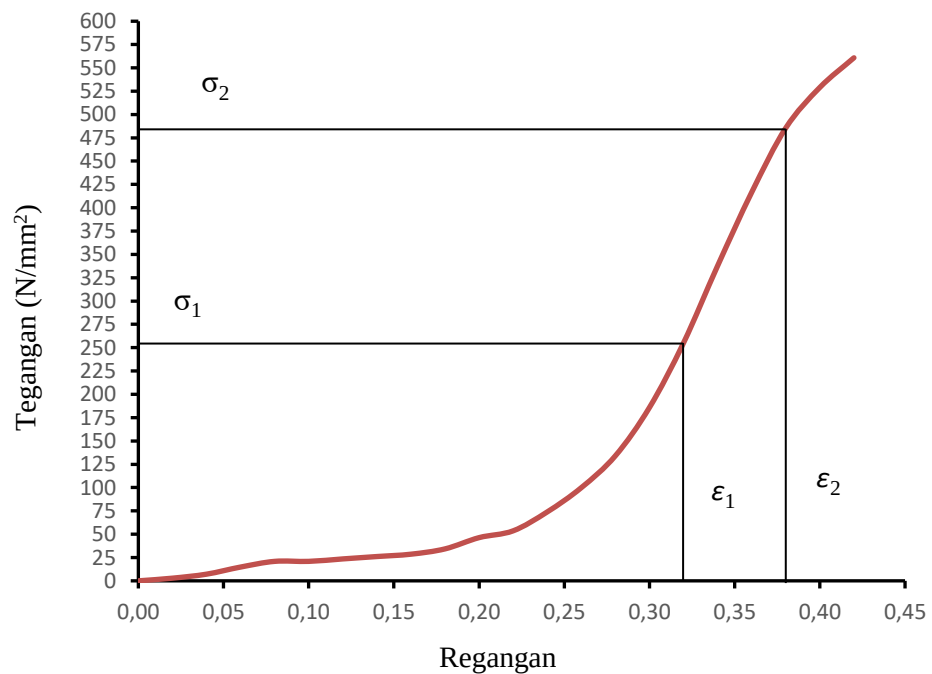
3.4 Penentuan Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas adalah ukuran ketahanan bahan terhadap deformasi elastis. Dari gambar 4.5 dapat digunakan untuk menentukan modulus elastisitas *raw material*, seperti yang terlihat pada gambar 4.12.



Gambar 4.12 Penentuan Modulus Elastisitas *Raw Material* Besi Cor Nodular

Dengan cara yang sama, dari gambar 4.7 dapat digunakan untuk menentukan modulus elastisitas pada besi cor nodular setelah penambahan 4% Ni dan 4% Mg, seperti yang terlihat pada gambar 4.13.

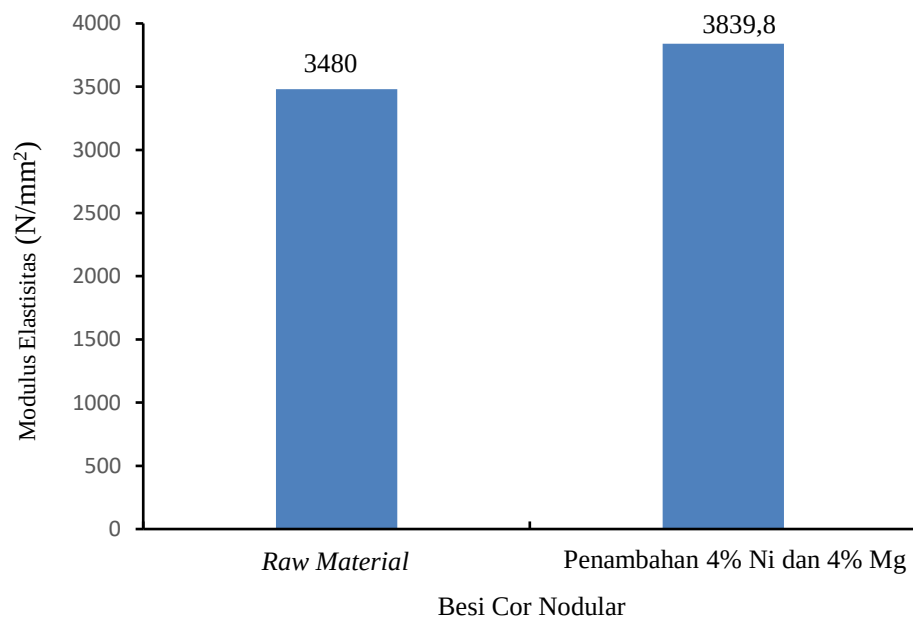


Gambar 4.13 Penentuan Modulus Elastisitas Besi Cor Nodular Setelah Penambahan 4% Ni dan 4% Mg

Tabel 4.8 Penentuan Nilai Modulus Elastisitas

No	Nama	Modulus Elastisitas (N/mm ²)
1	Spesimen 1	3480
2	Spesimen 2	3839,8

Dari tabel 4.8, dapat dibuat histogram perbedaan nilai modulus elastisitas yang dapat dilihat pada gambar 4.14.



Gambar 4.14 Histogram Perbedaan Modulus Elastisitas Besi Cor Nodular

3.5 Pembahasan Pengujian Tarik

Penambahan kandungan nikel (Ni) dan magnesium (Mg) pada besi cor nodular dapat mempengaruhi nilai kekuatan tarik (meningkat 4,1%), kekuatan luluh (meningkat 20,01%) dan modulus elastisitas (meningkat 10,3%), di mana nilainya cenderung meningkat. Hal ini disebabkan karena pada pengujian struktur mikro spesimen 2 (setelah penambahan 4% Ni dan 4% Mg) mengalami perubahan ukuran grafit yang mayoritas lebih besar dan lebih bulat dengan

bertambahnya persentase Ni dan Mg, di mana grafit memiliki kekuatan yang rendah dibandingkan ferit dan perlit akan tetapi grafit yang lebih bulat memiliki konsentrasi tegangan yang lebih rendah, sehingga nilai kekuatan tarik, kekuatan luluh dan modulus elastisitas pada spesimen 2 lebih besar dibanding spesimen 1 (*raw material*).

4. PENUTUP

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, analisis data dan pembahasan tentang pengaruh penambahan nikel 4% dan magnesium 4% terhadap struktur mikro dan kekuatan tarik pada besi cor nodular maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

Komposisi kimia pada *raw material* mengandung unsur nikel (Ni) sebesar 0,091% dan magnesium (Mg) sebesar 0,026%, sedangkan hasil penambahan nikel dan magnesium menunjukkan perubahan kadar kandungan nikel sebesar 0,642% dan magnesium sebesar 0,133%. Penambahan nikel dan magnesium mempengaruhi hasil foto struktur mikro. Dengan bertambahnya nikel dan magnesium menghasilkan ukuran grafit bulat yang terbentuk menjadi lebih besar dan lebih bulat. Penambahan nikel dan magnesium dapat mempengaruhi nilai kekuatan tarik. Setelah penambahan nikel 4% dan magnesium 4% nilai kekuatan tarik, kekuatan luluh dan modulus elastisitas pada besi cor nodular cenderung meningkat.

4.1 Saran

Setelah melakukan penelitian ini, terdapat beberapa saran yang dapat digunakan untuk mengembangkan penelitian ini, antara lain :

Perlu dilakukan pengujian *Destructive Test* (DT) lainnya seperti uji keausan, *bending test*, dan lain sebagainya untuk mengetahui sifat mekanik yang lain dari bahan ini. Untuk dikembangkan lebih lanjut bisa dilakukan proses perlakuan panas pada penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Bandanadjaja, B. (2012). *The Influence of Silicon (Si) Alloying to Homogenize the Bainitic Structure Formation on Bainitic Nodular Cast Iron*. In *Proceeding of Annual South East Asian International Seminar* (p. 127) <https://www.researchgate.net/publication/326169696>
- Budiyanto, E., & Handono, S. D. (2020). *Pengujian Material*. Lampung: Laduny Alifatama.
- Boulifa, M., I. (2021). *Study of the influence of alloying elements on the mechanical characteristics and wear behavior of a ductile cast iron*. Dept. Mechanical Engineering, University of El Oued, Algeria. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.56.06>.
- Callister, W. D. J., & Rethwisch, D. G. (2009). *Materials Science and Engineering An Introduction*. 8th Edition. United States of America: John Wiley & Sons.
- Chen, X., Zhao, L., Zhang, W., Mohrbacher, H., Wang, W., Guo, A., & Zhai, Q. (2019). *Effects of niobium alloying on microstructure, toughness and wear resistance of austempered ductile iron*. *Materials Science and Engineering: A*, 760, 186-194. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.05.100>.
- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems*, USA: John Wiley & Sons.
- Hsu, C., Chen, M., & Hu, C. (2006). *Microstructure and mechanical properties of 4% cobalt and nickel alloyed ductile irons*. *Materials Science and Engineering*, 444, 339-346. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.09.027>.
- Konca, E., Tur, K., & Koc, E. (2017) *Effects of Alloying Elements (Mo, Ni, and Cu) on the Austemperability of GGG-60 Ductile Cast Iron*. Department of Metallurgical and Materials Engineering, Atılım University, Turkey. <https://doi.org/10.3390/met7080320>.
- Kumar, P. (2013). *Basic Mechanical Engineering (Vel Tech)*. New Delhi: Pearson Education India.
- Maleque, A., Shah, S. & Razali, N., N. (2018). *Wear Behavior of Aluminium Modified Cast Iron in Comparison With Conventional Gray Cast Iron*. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10460-6>.

- Rundman, K., B. & Iacoviello, F. (2016). *Cast Irons. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09803-9>.
- Sari, N. H. (2018). *Material Teknik*. Yogyakarta: Budi Utama.
- Sarippudin, M. (2021). *Mengenal Logam Sebagai Bahan Teknik*. Yogyakarta: Budi Utama.
- Sofyan, B. T. (2021). *Pengantar Material Teknik*. Bogor: Universitas Pertahanan Republik Indonesia Press.
- Sudarmanto, S. (2016). *Pengaruh Penambahan Nikel terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan pada Besi Tuang Nodular 50*. *Angkasa: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, 8(2), 41-46.
- Sudjana, H. (2008). *Teknik Pengecoran Logam*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Surdia, S., & Saito, S. (1999). *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Vaško, A. (2020). *Comparison of mechanical and fatigue properties of SiMo and SiCu types of nodular cast iron*. *Materials Today: Proceedings*, 32, 168-173. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.184>.
- Weiβ, P., Riebisch, M., & Polaczek, A., B. (2018). *Mechanical Properties and Impact Toughness of Nickel and Aluminum Alloyed High Silicon Ductile Iron*. *Materials Science Forum*, 925, 304-310. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.925.304>.
- Zhang, Y., Cui, K., Wang, J., Wang, X., Qie, J., Xu, Q., & Qi, Y. (2020). *Effects Of Direct Reduction Process On The Microstructure And Reduction Characteristics Of Carbon-bearing Nickel Laterite Ore Pellets*. *Powder Technology*, 376, 496–506. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.059>.