



Journal Homepage:

<http://www.jurnalmetal.or.id/index.php/jmi>

p-issn: 0126-3463

e-issn: 2548-673X



**PENGARUH TEMPERATUR *TEMPERING*
TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO BESI COR NODULAR**

***THE EFFECT OF TEMPERING TEMPERATURE
ON MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF NODULAR CAST
IRON***

Herry Oktadinata¹ dan Hilal Abdurrahman Misbah¹

¹Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Manufaktur, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi,
Indonesia.

E-mail: herry.oktadinata@yahoo.com, hilalmisbah15@gmail.com

Abstrak

Eksperimen ini bertujuan untuk menginvestigasi perubahan sifat mekanik dan struktur mikro besi cor nodular setelah dilakukan *tempering* pada temperatur 350 °C dan 450 °C dengan waktu penahanan selama satu jam dan dilanjutkan pendinginan udara. Sebelum dilakukan *tempering* terlebih dahulu dilakukan perlakuan panas *hardening* pada temperatur 850 °C dengan waktu penahanan selama satu jam dan *quenching* dengan media oli. Besi cor nodular yang digunakan pada penelitian ini memiliki kandungan 3,45% C, 2,6% Si, 0,635% Mn, 1,58% Ni, 0,275% Cr, dan 0,1% Mg. Kekerasan dan kekuatan tarik besi cor nodular sebelum perlakuan panas (*as-cast*) adalah 41,5 HRC dan 532,88 MPa. Hasil eksperimen menunjukkan besi cor nodular yang mengalami *tempering* pada temperatur 350 °C memiliki kekerasan sebesar 50,5 HRC dan kekuatan tarik sebesar 724,04 MPa. Sedangkan hasil *tempering* pada temperatur 450 °C memiliki kekerasan sebesar 47 HRC dan kekuatan tarik sebesar 722,97 MPa. Dari hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa besi cor nodular yang mengalami *tempering* pada temperatur 350 °C memiliki kekuatan lebih tinggi daripada hasil *tempering* pada temperatur 450 °C. Hal ini dapat disebabkan karena struktur mikro besi cor nodular hasil *tempering* pada temperatur 350 °C memiliki *nodularity* lebih tinggi dan persentase area karbida yang lebih besar dibandingkan hasil *tempering* pada temperatur 450 °C.

Kata kunci : Besi cor nodular, *tempering*, temperatur, sifat mekanik dan struktur mikro.

Abstract

*This experiment investigates changes in the mechanical properties and microstructure of nodular cast iron after tempering at temperatures of 350 °C and 450 °C with a holding time of one hour and continued air cooling. Before the tempering, the hardening process was carried out at a temperature of 850 °C with a holding time of one hour and quenching with oil media. The nodular cast iron used in this study contained 3.45% C, 2.6% Si, 0.635% Mn, 1.58% Ni, 0.275% Cr, and 0.1% Mg. The hardness and tensile strength of nodular cast iron before heat treatment (*as-cast*) were 41.5 HRC and 532.88 MPa. After heat treatment, the results showed that nodular cast iron, tempered at a temperature of 350 °C, had a hardness of 50.5 HRC and tensile strength of 724.04 MPa. In comparison, the results of tempering at a temperature of 450 °C have a hardness of 47 HRC and tensile strength of 722.97 MPa. From the test results, it can be concluded that nodular cast iron, which is tempered at a temperature of 350 °C, has higher strength than nodular cast iron, which is tempered at a temperature of 450 °C. The microstructure of nodular cast iron after tempering at 350 °C has a higher nodularity and a larger percentage of carbide area than at 450 °C.*

Keywords : Nodular cast iron, tempering, temperature, mechanical properties and microstructure.

PENDAHULUAN

Salah satu komponen penting dalam *rolling stand mill* adalah komponen *work roll*. Pada *rolling stand mill*, *work roll* berfungsi untuk memberikan tekanan pada *raw material* atau *rolling stock* sehingga terjadi efek deformasi plastis dan merubah *rolling stock* tersebut menjadi produk akhir. Material yang dapat digunakan dalam pembuatan *work roll* adalah besi cor nodular. Keuntungan dari penggunaan besi cor nodular untuk komponen *work roll* adalah mudah untuk dicor, mempunyai keuletan yang baik dan mudah untuk dilakukan proses pemesinan (Ray, 2015).

Dalam penggunaan besi cor nodular, kekerasan yang tinggi dapat dicapai dengan proses perlakuan panas *hardening*. Namun, seiring dengan meningkatnya kekerasan, proses *hardening* juga akan membuat besi cor nodular tersebut menjadi getas. Oleh karena itu, untuk memperbaiki keuletan dari besi cor nodular dapat diterapkan proses perlakuan panas *tempering* (Burditt, 2010). Besi cor nodular yang mengalami *tempering* dengan waktu yang berbeda menghasilkan sifat mekanik dan struktur mikro yang berbeda pula, semakin lama waktu *tempering* akan mengurangi fasa martensit dan meningkatkan sisa austenit, sehingga kekerasan turun (Kumar et al., 2015).

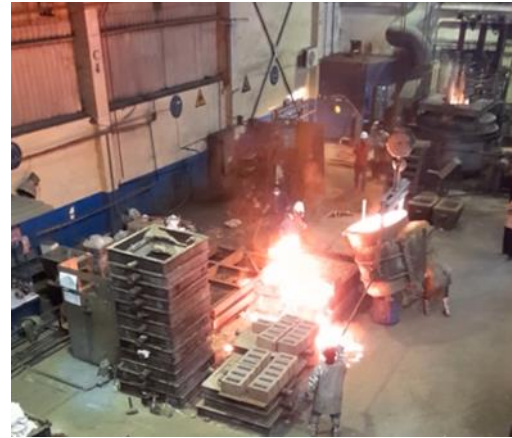
Tujuan penelitian ini adalah untuk membandingkan sifat mekanik dan struktur mikro dari besi cor nodular yang telah mengalami proses *tempering* pada temperatur 350 °C dan 450 °C. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi temperatur *tempering* yang sesuai untuk komponen *work roll* yang menggunakan material besi cor nodular.

METODOLOGI

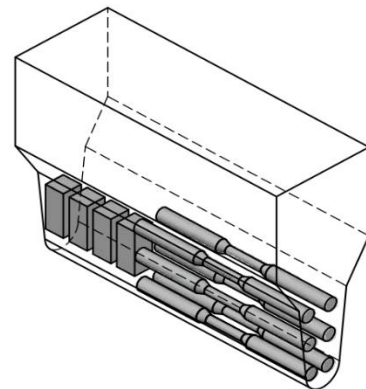
Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah besi cor nodular. Proses peleburan dilakukan dengan menggunakan tungku busur listrik (*electric arc furnace*), kemudian logam cair dituang ke dalam cetakan *Y-block* (Gambar 1). *Y-block* tersebut lalu di potong menjadi beberapa bagian dan bagian-bagian tersebut selanjutnya dibuat menjadi spesimen uji. Gambar 2 menunjukkan posisi masing-masing spesimen uji pada *Y-block*. Setelah dilakukan proses pengecoran, selanjutnya dilakukan proses pengujian komposisi kimia dengan menggunakan *optical emission spectrometry*.

Komposisi kimia besi cor nodular yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 1. Eksperimen pengecoran menggunakan tungku busur listrik



Gambar 2. Posisi spesimen uji di *Y-block*

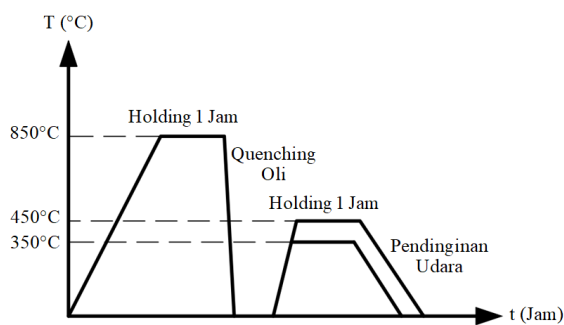
Tabel 1. Data pengujian komposisi kimia

Unsur	Komposisi (% berat)
C	3,45
Si	2,6
Mn	0,635
P	0,0304
S	0,0024
Ni	1,58
Cr	0,275
Mo	0,177
Mg	0,1

Perlakuan Panas

Pada penelitian ini terdapat tiga sampel yaitu sampel *as-cast*, sampel T350 dan T450. Sampel *as-cast* merupakan sampel tanpa perlakuan panas. Sedangkan sampel T350 dan sampel T450 merupakan sampel yang mendapat proses perlakuan panas *hardening* dan *tempering* pada temperatur 350°C dan 450°C. Proses *hardening* dilakukan pada temperatur 850°C, lalu dilakukan penahanan pada temperatur tersebut selama satu jam dan dilanjutkan dengan proses pendinginan cepat atau *quenching* dengan media berupa oli.

Perlakuan panas pada sampel T350 dan T450 merupakan proses lanjutan pada spesimen hasil proses perlakuan panas *hardening*. Pada T350, dilakukan proses *tempering* pada temperatur 350°C lalu dilakukan penahanan pada temperatur tersebut selama satu jam dan dilanjutkan dengan proses pendinginan dengan media udara hingga temperatur ruang. Pada sampel T450, dilakukan proses *tempering* pada temperatur 450°C dengan penahanan pada temperatur tersebut selama satu jam dan dilanjutkan dengan proses pendinginan di udara hingga temperatur ruang.

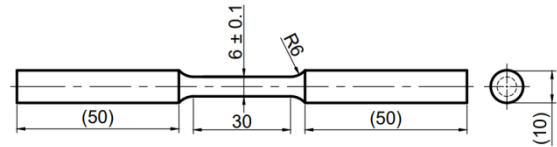


Gambar 3. Grafik Proses Perlakuan Panas *hardening* dan *tempering*

Pengujian Mekanik

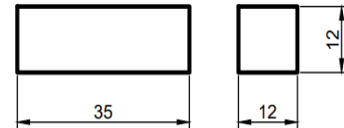
Pengujian mekanik meliputi pengujian kekerasan dan pengujian tarik. Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan elongasi dari setiap sampel. Pada penelitian ini, pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik Hung Ta berkapasitas 10 ton yang telah terkoneksi dengan sistem komputer sehingga hasil dari pengujian tarik dapat langsung terlihat. Pembuatan spesimen uji tarik dan prosedur pengujian dilakukan berdasarkan standar dari ASTM E8 (2013), dimensi spesimen uji tarik (satuan mm) dapat dilihat pada Gambar 4.

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui kekerasan atau ketahanan terhadap deformasi plastis dari tiap-tiap sampel. Pengujian kekerasan yang dilakukan adalah pengujian kekerasan Rockwell dengan skala C atau Rockwell C. Mesin uji kekerasan yang digunakan adalah Krisbow KW0600121.



Gambar 4. Spesimen uji tarik

Indentor yang digunakan adalah kerucut intan dengan pembebanan minor sebesar 10 kgf, pembebanan mayor sebesar 150 kgf dan waktu indentasi selama 10 detik. Tidak ada bentuk spesimen khusus dalam pengujian kekerasan namun spesimen harus mempunyai permukaan yang datar. Indentor yang digunakan berupa kerucut intan yang memiliki ujung dengan radius 0,2 mm dan jarak minimum antara titik indentasi satu dengan yang lain berjarak minimal tiga kali diameter indentor (ASTM E18, 2020). Dimensi spesimen uji kekerasan (satuan mm) yang digunakan adalah seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Dimensi spesimen uji kekerasan

Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dari besi cor nodular dan selanjutnya dilakukan analisis *nodularity* serta persentase area karbida menggunakan *software* Image-J. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik Olympus DP22. Berdasarkan standar ASTM A274 (2019), analisis *nodularity* dilakukan pada perbesaran 100x. Analisis *nodularity* ini dilakukan pada spesimen dengan keadaan tanpa etsa sedangkan pengamatan persentase area karbida dilakukan pada spesimen yang sudah di etsa. Dalam penelitian ini larutan etsa yang digunakan adalah nital 5%.

Sebelum dilakukan pengujian, pada spesimen terlebih dahulu dilakukan preparasi melalui proses pengamplasan dan pemolesan berdasarkan ASTM E3 (2017). Pengamplasan dilakukan pada mesin ampelas dengan kecepatan putar 100 rpm menggunakan ampelas grit 80, 100,

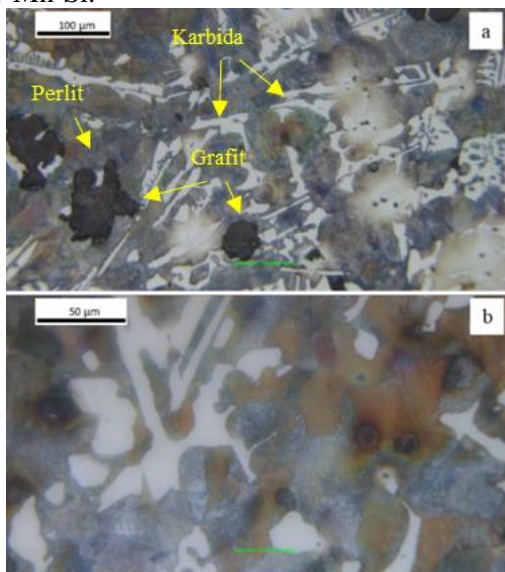
220, 400 dan 800, 1000 dan 2000. Pengamplasan dilakukan dari grid yang paling kasar sampai grid yang paling halus dengan menggunakan pelumas air. Setelah selesai proses pengamplasan, selanjutnya dilakukan proses pemolesan pada spesimen uji tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik. Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui fasa dari besi cor nodular sebelum dan setelah dilakukan proses *tempering*. Selanjutnya dilakukan analisis terhadap fasa yang terbentuk, *nodularity* dan persentase area karbida setiap sampel. Hasil pengamatan struktur mikro dapat dilihat pada Gambar 6 sampai 8.

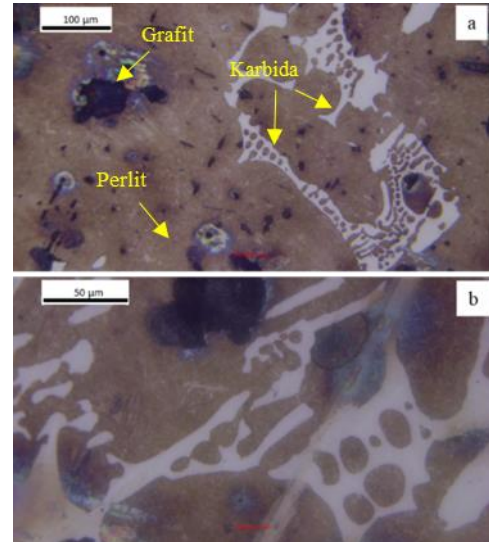
Pada sampel *as-cast*, grafit nodular yang berwarna hitam serta karbida yang berwarna putih berada di antara fasa gabungan antara sementit dan ferit yang membentuk lapisan lapisan atau yang disebut dengan perlit. Gambar 9 menunjukkan hasil pengamatan menggunakan *energy dispersive spectroscopy* (EDS). Terlihat adanya karbon grafit dan karbida kompleks Fe-Cr-Mn-Si.



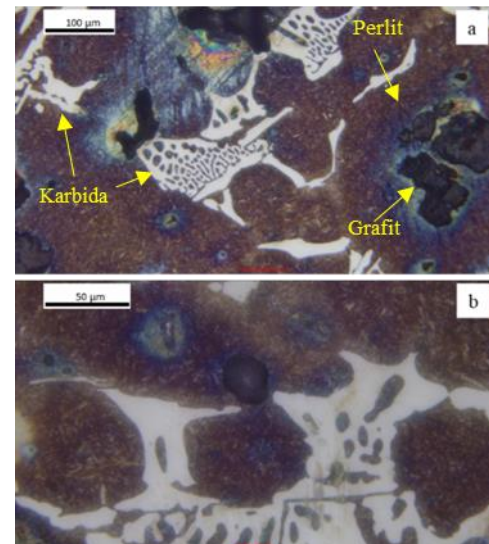
Gambar 6. Struktur mikro sampel *as-cast*: mag.200x (a), 500x (b)

Mullins (1990) menyatakan bahwa perlit umumnya akan hadir pada besi cor nodular

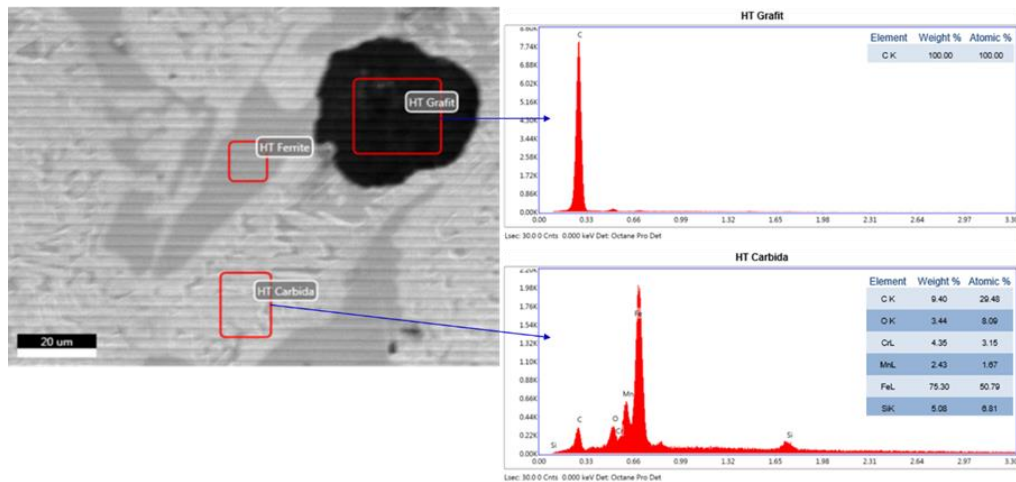
dalam kondisi hasil pengecoran (*as-cast*). Lalu pada kondisi sampel yang telah mengalami proses perlakuan panas *tempering* (sampel T350 dan sampel T450), grafit nodular yang berwarna hitam serta karbida yang berwarna putih berada dalam fasa martensit temper. Martensit temper ini terbentuk akibat dari pemanasan kembali fasa martensit pada temperatur dibawah temperatur austenisasi.



Gambar 7. Struktur mikro sampel T350: mag.200x (a), 500x (b)

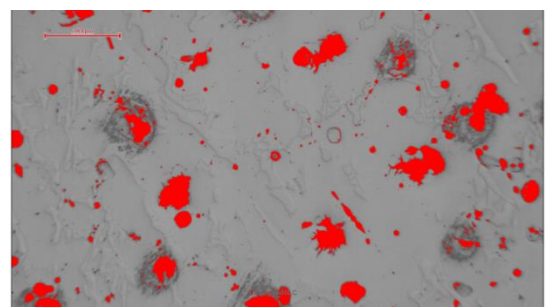


Gambar 8. Struktur mikro sampel T450: mag.200x (a), 500x (b)

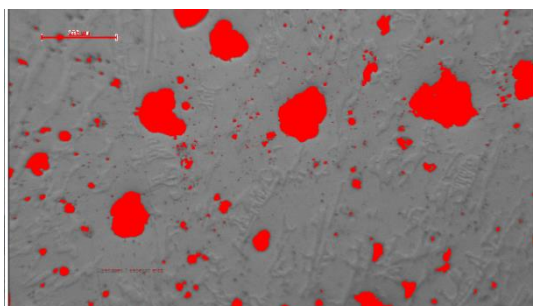


Gambar 9. Hasil pengamatan menggunakan EDS

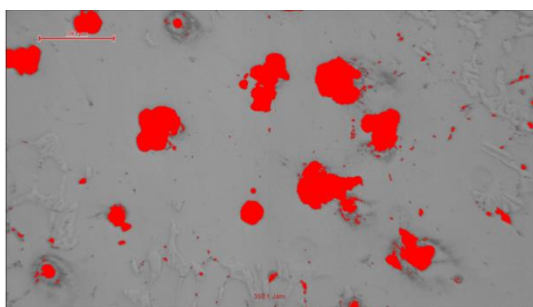
Pada penelitian ini, dilakukan analisis *nodularity* menggunakan *software* Image-J (lihat Gambar 10 sampai 12). Berdasarkan standar ASTM A274 (2019), analisis *nodularity* dilakukan pada perbesaran 100x. Data hasil analisis *nodularity* dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 12. Grafit pada sampel T450



Gambar 10. Grafit pada sampel *as-cast*



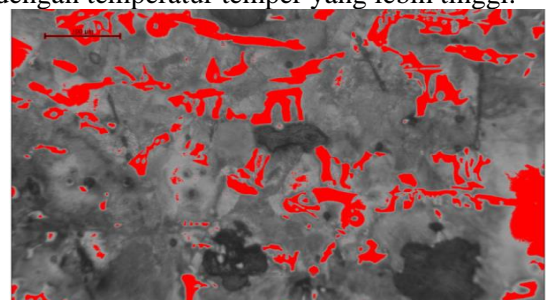
Gambar 11. Grafit pada sampel T350

Analisis persentase area karbida dilakukan menggunakan *software* Image-J, hasilnya diperlihatkan pada Gambar 13 sampai 15. Analisis persentase area karbida dilakukan pada spesimen yang diberi perlakuan etsa menggunakan larutan nital 5%. Hasil analisis persentase area karbida adalah sebagai berikut dapat dilihat pada Tabel 3.

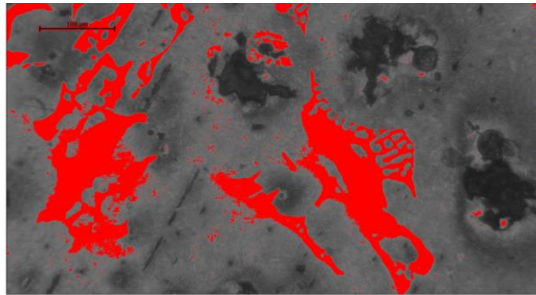
Tabel 2. Persentase *nodularity*

Sampel	<i>Nodularity</i> (%)
<i>As-cast</i>	77,67
<i>Tempering 350</i>	68,25
<i>Tempering 450</i>	66,37

Berdasarkan data di Tabel 2, sampel *as-cast* memiliki nilai *nodularity* yang paling tinggi yaitu sebesar 77,67%, sampel T350 memiliki *nodularity* sebesar 68,25% dan sampel T450 memiliki *nodularity* sebesar 66,37%. Jika dibandingkan, sampel T350 dengan temperatur temper yang lebih rendah memiliki *nodularity* yang lebih tinggi dibandingkan sampel T450 dengan temperatur temper yang lebih tinggi.



Gambar 13. Area karbida sampel *as-cast*



Gambar 14. Area karbida sampel T350

Berdasarkan data di Tabel 3, sampel *as-cast* memiliki persentase area karbida sebesar 12,59%, sampel T350 memiliki persentase area karbida sebesar 17,02% dan sampel T450 memiliki persentase area karbida 15,29%. Jika dibandingkan, sampel T350 dengan proses *tempering* pada temperatur lebih rendah memiliki persentase area karbida lebih tinggi dibandingkan sampel T450 dengan proses *tempering* pada temperatur lebih tinggi. Sampel *as-cast* setelah perlakuan *quenching* kemungkinan telah meningkatkan karbida. Namun proses lanjutan *tempering* mengurangi karbida. Pada temperatur *tempering* lebih tinggi (450 °C) area karbida lebih sedikit dibandingkan temperatur *tempering* rendah (350 °C).

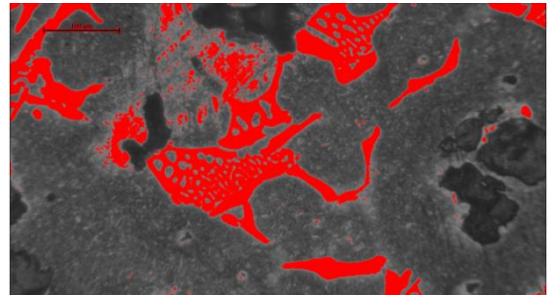
Tabel 3. Persentase area karbida

Sampel	Persentase Area Karbida (%)
<i>As-cast</i>	12,59
T350	17,02
T450	15,29

Hasil Pengujian Mekanik

Pengujian mekanik yang dilakukan adalah pengujian kekerasan dan pengujian tarik. Pengujian dilakukan pada spesimen uji kekerasan dengan jumlah penitikan sebanyak tiga titik pada setiap sampel. Data dan grafik hasil pengujian kekerasan dapat dilihat pada Tabel 4 dan Gambar 16.

Hasil pengujian kekerasan menunjukkan masing-masing sampel memiliki kekerasan yang berbeda. Sampel *as-cast* memiliki kekerasan terendah yaitu 41,5 HRC, sampel T350 memiliki kekerasan 50,5 HRC dan sampel T450 memiliki kekerasan 47 HRC. Berdasarkan hasil pengujian, dapat diketahui bahwa kekerasan tertinggi dihasilkan oleh sampel T350 dengan nilai

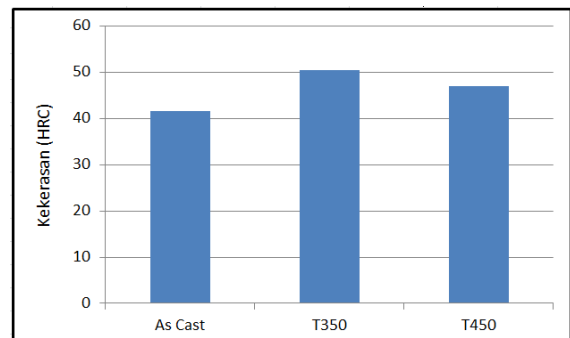


Gambar 15. Area karbida sampel T450

kekerasan di atas kekerasan sampel T450. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian oleh Kumar dkk (2015) dimana sampel dengan temperatur *tempering* yang lebih rendah menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi. Kekerasan yang perlu dimiliki oleh komponen *work roll* yaitu sebesar 49-53 HRC (Ray, 2015), sehingga dapat dikatakan bahwa proses *tempering* besi cor nodular pada temperatur 350 °C dapat diaplikasikan pada komponen *work roll*.

Tabel 4 Data pengujian kekerasan

Sampel	Kekerasan (HRC)
<i>As-cast</i>	41,5
T350	50,5
T450	47



Gambar 16. Grafik nilai rata-rata kekerasan

Perubahan kekerasan ini disebabkan karena adanya perubahan persentase area karbida pada masing-masing sampel. Sampel yang memiliki kekerasan tertinggi yaitu sampel T350 memiliki persentase area karbida paling tinggi. Seiring dengan berkurangnya persentase area karbida, kekerasan pada sampel akan berkurang. Hubungan antara kekerasan dengan persentase area karbida ini disebabkan karena karbida merupakan senyawa yang dibentuk oleh unsur karbon dan unsur lain seperti kromium

yang merupakan unsur yang berpengaruh untuk meningkatkan kekerasan (Totten, 2006).

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik (*tensile strength*), *yield strength*, dan elongasi dari besi cor nodular sebelum dan setelah dilakukan proses perlakuan panas *tempering* pada dua temperatur yang berbeda yaitu pada temperatur 350 °C dan 450 °C. Data dan grafik hasil pengujian tarik dapat dilihat pada Tabel 5 sampai 7 dan Gambar 17 sampai 19.

Tabel 5 Data pengujian tarik sampel *as-cast*

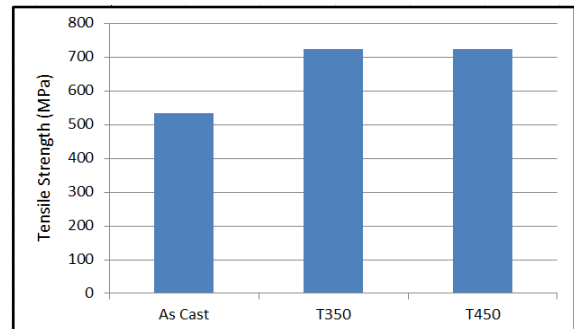
No. Spesimen	<i>Tensile Strength</i> (MPa)	<i>Yield Strength</i> (MPa)	Elongasi (%)
1	550,39	191,60	14,09
2	451,09	196,08	9,42
3	597,18	377,06	25,62
Rata-Rata	532,88	254,91	16,37

Tabel 6. Data pengujian tarik sampel T350

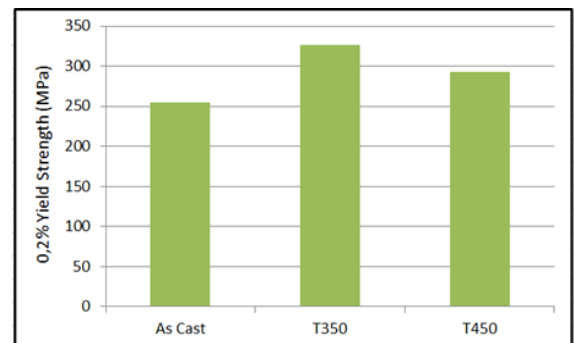
No. Spesimen	<i>Tensile Strength</i> (MPa)	<i>Yield Strength</i> (MPa)	Elongasi (%)
1	777,85	329,39	13,12
2	661,73	312,80	12,66
3	732,54	337,60	14,03
Rata-Rata	724,04	326,59	13,27

Tabel 7. Data pengujian tarik sampel T450

No. Spesimen	<i>Tensile Strength</i> (MPa)	<i>Yield Strength</i> (MPa)	Elongasi (%)
1	682,44	295,23	10,43
2	746,18	256,82	12,52
3	740,29	326,39	12,93
Rata-Rata	722,97	292,81	11,96

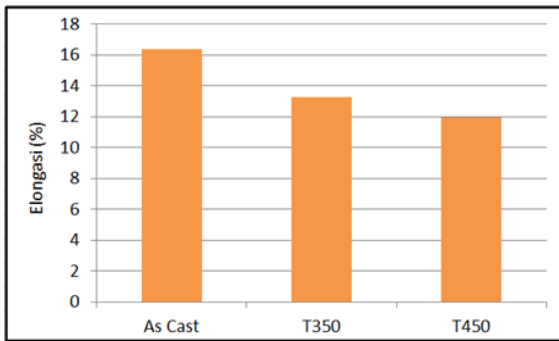


Gambar 17. Grafik perbandingan *tensile strength*



Gambar 18. Grafik perbandingan *yield strength*

Berdasarkan hasil pengujian, terlihat bahwa *tensile strength*, *yield strength* dan elongasi pada tiap sampel memiliki nilai yang berbeda. Sampel *as-cast* memiliki nilai *tensile strength* sebesar 532,88 MPa, *yield strength* sebesar 254,91 MPa dan elongasi sebesar 16,37%. Sampel T350 memiliki *tensile strength* 724,04 MPa, *yield strength* sebesar 326,59 MPa dan elongasi sebesar 13,27%. Sampel T450 memiliki *tensile strength* sebesar 722,97 MPa, *yield strength* sebesar 292,81 MPa, dan elongasi sebesar 11,96%. Hasil pengujian tersebut sejalan dengan standar ASTM A536 (2004) dimana besi cor nodular yang telah diaplikasikan proses *hardening* dan *tempering* memiliki *tensile strength* dan *yield strength* yang lebih tinggi dari pada besi cor nodular *as-cast* namun dengan elongasi yang lebih rendah.



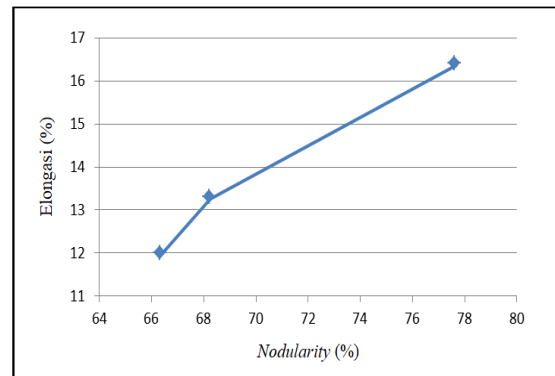
Gambar 19. Grafik perbandingan elongasi

Berdasarkan hasil pengujian juga diketahui bahwa sampel T350 memiliki *tensile strength* dan *yield strength* yang lebih tinggi daripada sampel T450. Hal ini tampaknya sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Rashidi & Torbati (2000) dimana sampel dengan temperatur *tempering* yang lebih rendah menghasilkan nilai *tensile strength* dan *yield strength* yang lebih tinggi.

Seperti perbedaan pada nilai kekerasan, perbedaan pada nilai *tensile strength* dan *yield strength* pada masing-masing sampel ini disebabkan oleh perbedaan persentase area karbida pada masing-masing sampel. Karena pada besi cor nodular, unsur pembentuk senyawa karbida seperti kromium merupakan unsur paduan yang dapat meningkatkan kekuatan (ASM vol.1, 1990). Dapat dilihat dari sampel T350 yang memiliki persentase area karbida yang paling tinggi juga memiliki *tensile strength* dan *yield strength* yang paling tinggi.

Dilihat dari elongasinya, sampel *as-cast* memiliki elongasi yang paling tinggi jika dibandingkan dengan sampel T350 dan sampel T450. Sampel T350 memiliki elongasi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan sampel T450. Kelihatannya sampel T350 lebih ulet dengan tetap mempertahankan kekuatannya karena *nodularity* dan persentase karbida yang lebih tinggi dibandingkan T450. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Kumar dkk (2015) dimana sampel dengan temperatur *tempering* yang lebih rendah menghasilkan elongasi yang lebih tinggi. Hal ini juga sejalan dengan ASM Specialty Handbook of Cast Iron (2017) yang mengutip hasil penelitian yang dilakukan oleh Vishnevsky & Wallace, dimana sampel hasil perlakuan panas *quenched tempered* yang memiliki nilai *tensile strength* dan *yield strength* yang lebih tinggi juga memiliki elongasi yang lebih tinggi. Perbedaan elongasi ini disebabkan oleh perbedaan

nodularity pada masing-masing sampel. Bentuk grafit yang nodular ini dapat menurunkan konsentrasi tegangan sehingga akan sangat berpengaruh terhadap keuletan dari besi cor nodular (Campbell, 2008). Pada suatu kondisi fasa yang serupa, peningkatan *nodularity* dapat meningkatkan nilai *tensile strength*, *yield strength* dan elongasi (Al-Ghonamy et al, 2012), seperti hubungan yang ditunjukkan oleh sampel T350 dan sampel T450.



Gambar 20. Grafik hubungan antara *nodularity* dengan elongasi

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil eksperimen yang diperoleh tentang pengaruh temperatur *tempering* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro besi cor nodular, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Besi cor nodular yang mengalami proses *tempering* pada temperatur 350°C menghasilkan sifat mekanik yang lebih tinggi dibandingkan dengan besi cor nodular yang mengalami proses *tempering* pada temperatur 450°C. *Tempering* pada temperatur 350°C menghasilkan kekerasan sebesar 50,5 HRC, *tensile strength* sebesar 724,04 MPa, *yield strength* sebesar 326,59 MPa dan elongasi sebesar 13,27%.
2. Besi cor nodular yang mengalami proses *tempering* pada temperatur 350°C menghasilkan *nodularity* dan persentase luas area karbida yang lebih tinggi dibandingkan dengan besi cor nodular yang mengalami proses *tempering* pada temperatur 450°C. *Tempering* pada temperatur 350°C menghasilkan *nodularity* sebesar 68,25% dan persentase luas area karbida sebesar 17,02%. Sampel T350 dengan *nodularity* lebih tinggi dibandingkan sampel T450 menghasilkan elongasi yang lebih tinggi juga.
3. Persentase luas area karbida berpengaruh terhadap kekerasan, *tensile strength* dan *yield*

strength. Sampel yang memiliki persentase luas area karbida tertinggi juga memiliki kekerasan, *tensile strength* dan *yield strength* yang lebih tinggi.

4. Temperatur 350°C merupakan temperatur *tempering* yang dapat diaplikasikan untuk komponen *work roll* berbahan besi cor nodular yang sama.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kemendikbud Dikti atas pendanaan pada penelitian ini melalui program *Matching Fund* tahun 2021.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Ghonamy, A. I., Ramadan, M., Fathy, N., Hafez, K. M. & El-Wakil, A. A. (2012). Effect of Graphite Nodularity on Mechanical Properties of Ductile Iron for *Waterworks Fittings and Accessories*. *International Journal of Civil & Environmental Engineering*. 10 (3), 4-5.
- ASM. (1990). *Properties and selection: Iron steel and high performance alloys* (vol. 1). Kinsman: ASM International
- ASM. (2017). *Specialty Handbook of Cast Iron*. Kinsman: ASM International
- ASM. (1999). *Standard test method for analysis of cast iron using optical emission spectrometry* (E 1999). West Conshohocken: ASTM International
- ASM. (2004). *Standard specification for ductile iron castings* (A 536). West Conshohocken: ASTM International
- ASM. (2017). *Standard guide for preparation of metallographic specimens* (E 3). West Conshohocken: ASTM International
- ASTM. (2013). *Standard test method for tension testing of metallic materials* (E 8). West Conshohocken: ASTM International
- ASTM. (2019). *Standard test method for evaluating the microstructure of graphite in iron casting* (A 247). West Conshohocken: ASTM International
- ASTM. (2020). *Standard test methods for Rockwell hardness of metallic materials* (E 18). West Conshohocken: ASTM International
- Burditt, Michael F. (1993). *Ductile iron handbook*. Des Plaines: American Foundrymen's Society. Inc.
- Campbell, F. C. (2008). *Elements of metallurgy and engineering alloys*. Materials Park, Ohio: ASM International.
- Kumar, R., Behera, R. K., & Sen, S. (2015) Effect of tempering temperature and time on strength and hardness of ductile cast iron. *Journal of Materials Science and Engineering*. 75 (1), 1-9.
- Mullins, D. James. (1990). *Ductile iron data for engineers*, Canada: Rio Tinto Iron & Titanium Inc.
- Rashidi, A. M. & Torbati M. M. (2000). Effect of tempering conditions on the mechanical properties of ductile cast iron with dual matrix structure (DMS). *Journal of Material*, 45 (2000), 203-207.
- Ray, S. (2015). *Principles and application of metal rolling*. Delhi : University of Cambridge.
- Totten, G. E. (2006). *Steel heat treatment: Metallurgy and technologies*. New York: Taylor & Francis Group.