



PENGARUH PROSES TEMPERING GANDA TERHADAP SIFAT MEKANIK MATERIAL BAJA COR PADUAN Ni-Cr-Mo

Beny Bandanadjaja^{*}, Dewi Idamayanti

^a Politeknik Manufaktur Negeri Bandung
 Jl Kanayakan No. 21 – Dago, Bandung, Indonesia – 40135
 E-mail: benybj@yahoo.com

Masuk Tanggal : 02-02-2017, revisi tanggal : 10-04-2017, diterima untuk diterbitkan tanggal 28-04-2017

Intisari

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui perbaikan sifat mekanik material baja cor paduan Cr-Ni-Mo yang telah mengalami proses tempering ganda. Ketangguhan tinggi diperlukan agar dalam aplikasinya baja mampu meredam atau menahan beban impak atau kejut dengan baik. Sifat mekanik baja cor pada kondisi *as-cast* cukup getas dengan elongasi cukup rendah. Untuk dapat meningkatkan ketangguhannya maka baja cor dapat diberikan perlakuan tambahan yaitu proses tempering setelah normalising. Namun proses tempering yang diberikan dapat pula memunculkan presipitat karbida yang bersifat getas. Oleh karenanya, tempering kedua diperlukan dengan demikian fasa getas yang terjadi dapat dihilangkan serta elongasi baja dapat semakin meningkat. Proses perlakuan panas yang diterapkan adalah proses normalising yang dilanjutkan tempering ganda dengan variasi temperatur tempering, untuk mengetahui kombinasi kekuatan dengan elongasi baja yang terbaik. Pada kondisi *as-cast* material baja memiliki sifat yang sangat getas yaitu elongasi 4% dan harga impak 15 J/cm². Proses perlakuan panas yang menghasilkan ketangguhan terbaik dengan kombinasi kekuatan tarik dan elongasi yang tertinggi adalah proses normalising diikuti oleh tempering I dilanjutkan dengan tempering II pada temperatur 650 °C. Sifat mekanik yang dapat dicapai yaitu kekuatan tarik sebesar 68,3 MPa, kekuatan luluh sebesar 52,5 MPa dan elongasi sebesar 20%. Ketangguhan baja cor meningkat setelah tempering ganda menjadi 142 J/cm².

Kata Kunci: Ketangguhan, normalising, baja paduan Ni-Cr-Mo, tempering ganda, baja cor paduan

Abstract

This research is conducted in order to find the improvement of steel casting mechanical property, that has been treated on double tempering processes. The required of steel casting in applications are resisted to impact loading or shock without fracture. Properties of steel in the as-cast condition is quite brittle, the elongation is quite low. In order to improve the toughness, the cast steel can be given additional tempering treatment after normalizing processes. The tempering process will reduce hardness and improve the elongation so that the toughness of the steel material can be increased. The second tempering is required to eliminate the brittle phase that occurs and the elongation of the steel material can be increased. The process of heat treatment which has been applied is normalizing followed with a double tempering with various temperatures. The result showed that the heat treatment processes on Ni, Cr and Mo alloy steel material can increase its elongation without decreasing in tensile strength significantly. In the as-cast condition the steel is very brittle i.e. 4% elongation and impact value of 15 J/cm². The heat treatment process which produces high toughness with the best combination of tensile strength and elongation is the process of normalizing followed by first and the second tempering at 650 °C. Mechanical properties result with tensile strength of 68.3 MPa, yield strength of 52.5 MPa and elongation of 20 %. Material toughness is increased after double tempering around 142 J/cm².

Keywords: Toughness, double tempering, normalizing of Ni-Cr-Mo Steel Alloy, alloyed steel casting

1. PENDAHULUAN

Ketangguhan logam merupakan kemampuan logam untuk menyerap energi dan berdeformasi plastis tanpa mengalami patah. Sifat ketangguhan secara teoritis merupakan

kombinasi antara kekuatan tarik dan elongasi, yang dapat diwakili oleh integral atau luas area dari kurva tegangan-regangan. Luas area tersebut merupakan representasi dari energi deformasi per unit volume sebelum terjadinya

patah. Secara matematis diberikan melalui persamaan (1) sebagai berikut^[1]:

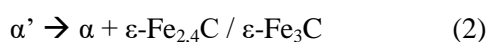
$$\frac{\text{energy}}{\text{volume}} = \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon \quad (1)$$

Dengan: ϵ adalah regangan, ϵ_f adalah regangan saat patah dan σ adalah tegangan.

Baja yang memiliki kekuatan tinggi dengan elongasi yang tinggi tentu akan memiliki ketangguhan yang cukup baik. Baja cor dalam kondisi *as-cast* memiliki sifat getas. Hal ini karena baja cor *as-cast* memiliki struktur *widmanstatten*. Struktur *widmanstatten* merupakan struktur yang terbentuk pada baja selama proses pendinginan. Struktur ini berbentuk kasar dan tajam sehingga mengakibatkan baja menjadi getas^[2].

Z. Hu^[3] menyatakan baja cor mengalami segregasi makro dan terjadi pembentukan karbida karena tidak larut dalam austenit, yang mengakibatkan baja menjadi getas. Untuk mengatasi hal tersebut maka baja cor sebaiknya diberikan proses perlakuan panas berupa normalising. Proses normalising akan memberikan struktur yang lebih halus sehingga elongasi meningkat. Normalising pada baja paduan Ni-Cr-Mo dapat menghasilkan fasa perlit, martensit dan kadang bainit^[4]. Kombinasi fasa tersebut akan menghasilkan kekuatan yang cukup tinggi, untuk dapat memperoleh ketangguhan yang lebih tinggi maka dilanjutkan dengan proses tempering setelah normalising, yang akan berakibat pada penurunan kekuatan namun elongasi meningkat.

Thomson^[5] menyatakan pada baja paduan Ni-Cr-Mo sesuai standar AISI 4340, saat diberikan proses tempering setelah normalising dapat mengalami pembentukan presipitasi fasa karbida besi transisi. Pembentukan fasa karbida besi tersebut berasal dari keluarnya karbon dari martensit yang sebelumnya terlarut secara supersaturasi dalam fasa martensit. Proses tempering menghasilkan transformasi fasa, yang menghasilkan karbida, seperti diilustrasikan dalam reaksi (2) berikut^[6]:



Dengan α' adalah martensit, α adalah ferit, $\epsilon\text{-Fe}_{2,4}\text{C}$ dan $\epsilon\text{-Fe}_3\text{C}$ adalah karbida. Pembentukan karbida $\epsilon\text{-Fe}_{2,4}\text{C}$ atau karbida $\epsilon\text{-Fe}_3\text{C}$ tergantung tinggi/rendahnya temperatur temperingnya^[6]. Saha^[7] menyatakan berdifusinya karbon keluar dari fasa martensit inilah yang menurunkan kekuatan dan

kekerasan martensit. Dengan demikian ketangguhan material dapat meningkat.

Penambahan paduan Ni-Cr-Mo pada baja akan menurunkan temperatur. Ms. Stevens and Haynes^[8] menyatakan persamaan yang menunjukkan awal pembentukan martensit (*martensite start*) sebagai berikut:

$$M_s = 561 - 474C - 33Mn - 17Ni - 17Cr - 21Mo \quad (3)$$

Dalam persamaan (3) di atas dapat dilihat bahwa penambahan unsur Ni, Cr dan Mo akan menurunkan Ms. Dengan penurunan Ms maka ada potensi untuk terbentuknya austenit sisa pada struktur mikro baja cor paduan Ni-Cr-Mo. Austenit sisa inilah yang kemudian akan bertransformasi menjadi martensit akibat adanya pengaruh proses tempering awal^[9].

Proses tempering setelah normalising dapat dilakukan dalam beberapa tahap, untuk mengembalikan keuletan. Dalam penelitian ini dilakukan proses tempering ganda setelah normalising. Tujuannya adalah untuk meningkatkan keuletan baja tanpa menurunkan kekuatannya secara signifikan. Dengan demikian dapat diperoleh kombinasi kekuatan dan elongasi baja yang cukup tinggi, sehingga menghasilkan baja dengan ketangguhan yang lebih tinggi dibandingkan dengan proses normalising saja.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

Langkah penelitian dilakukan dengan membuat baja cor paduan Ni-Cr-Mo standar komposisi AISI 4340^[10]. Hasil pengecoran diuji dengan menggunakan OES (*optical emission spectroscopy*) sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil uji komposisi baja cor paduan Ni-Cr-Mo sesuai standar komposisi AISI 4340

No	Unsur	Standar	Pemeriksaan
		AISI 4340 ^[10] [%]	OES [%]
1	C	0,37-0,44	0,38
2	Si	0,20-0,35	0,21
3	Mn	0,70-0,90	0,70
4	P	≤ 0,02	0,02
5	S	≤ 0,015	0,01
6	Cr	0,70-0,95	0,82
7	Ni	1,65-2,0	1,85
8	Mo	0,30-0,40	0,32

Hasil pengujian menunjukkan komposisi baja cor sesuai standar AISI 4340. Paduan Ni, Cr dan Mo di dalamnya bertujuan

meningkatkan sifat mekanik baja AISI 4340 yang termasuk kelompok baja kekuatan tinggi.

Baja cor NiCrMo dibuat dalam bentuk Y block standar ASTM E8, seperti ditunjukkan dalam Gambar 1. Y block dipotong dalam bentuk kotak, silinder untuk uji tarik dan berupa sampel uji impak. Jumlahnya sesuai dengan variasi yang diperlukan.



Gambar 1. Y block dari baja cor

Tabel 2. Penomoran sampel baja cor NiCrMo

No. Baja cor NiCrMo	Perlakuan Panas (T = °C)
1	As-Cast
2	Normalising
3	Normalising - Tempering 650
4	Normalising - Tempering 650 - Tempering 250
5	Normalising - Tempering 650 - Tempering 450
6	Normalising - Tempering 650 - Tempering 650

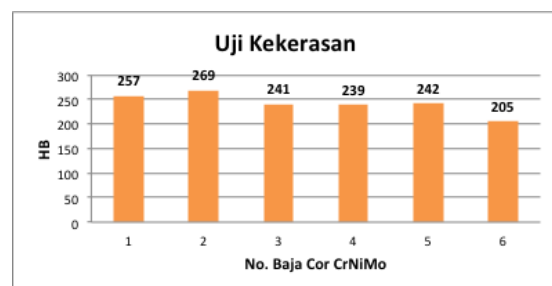
Selanjutnya untuk proses perlakuan panas dilakukan proses normalising pada temperatur 890 °C, ditahan 2 jam, pendinginan udara bebas dan dilanjutkan dengan tempering pertama pada temperatur 650 °C, ditahan 2 jam, pendinginan udara bebas. Parameter yang divariasikan pada temperatur tempering kedua, yaitu 250, 450 dan 650 °C. Penomoran baja cor NiCrMo ditunjukkan pada Tabel 2.

Baja cor NiCrMo kemudian diuji tarik sesuai standar ASTM E 8M, uji kekerasan metode Rockwell C standar ASTM E18, dikonversi kedalam HB dengan standar ASTM E140, struktur mikro dan impak standar ASTM E23. Hasilnya dianalisis dan diperoleh simpulannya.

3. HASIL DAN DISKUSI

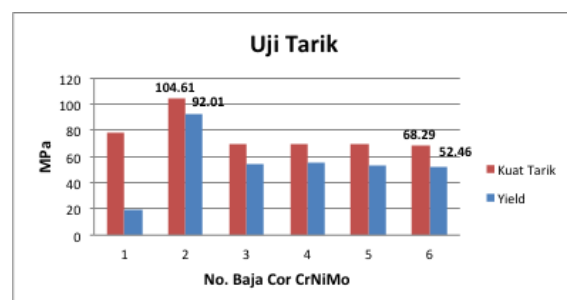
Hasil uji kekerasan ditunjukkan pada grafik Gambar 2. Kekerasan hasil *as-cast* sebesar 257 HB. Setelah normalising terjadi peningkatan kekerasan menjadi 269 HB. Baja cor NiCrMo

nomor 3 adalah baja cor yang mengalami proses normalising dan tempering 650 °C, kekerasan mengalami penurunan menjadi 241 HB. Baja cor NiCrMo dengan nomor 4, 5 dan 6 merupakan hasil proses normalising - tempering 650 °C dan tempering kedua bervariasi nilainya. Hasilnya menunjukkan kekerasan pada tempering kedua dengan temperatur 250 °C dan 450 °C nilainya tidak signifikan berubah dibandingkan baja cor NiCrMo no. 3. Baja cor NiCrMo no. 6 dengan temperatur tempering kedua sebesar 650 °C memiliki kekerasan yang lebih rendah menjadi 205 HB. Perubahan nilai kekerasan menunjukkan adanya perubahan sifat kekuatan tarik dan juga struktur mikronya.

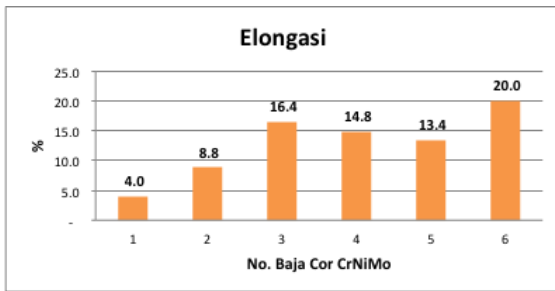


Gambar 2. Hasil uji kekerasan pada baja cor setelah perlakuan panas sesuai Tabel 2

Selanjutnya akan dilihat korelasi perubahan kekerasan dengan hasil uji tarik dan struktur mikro berikut ini. Gambar 3 menunjukkan hasil uji tarik baja cor NiCrMo. Dapat dilihat bahwa baja cor NiCrMo no. 1 *as-cast* dan baja cor NiCrMo no. 2 hasil normalising menunjukkan terjadi peningkatan kekuatan tarik dan kekuatan luluhnya. Jika dilihat elongasi yang terjadi pada Gambar 4, maka peningkatan kekuatan justru diikuti dengan peningkatan elongasi dari 4% menjadi 8,8 %. Peningkatan kekuatan diiringi dengan peningkatan elongasi terjadi karena proses normalising yang memberikan efek menghilangkan struktur *widmanstatten* yang kasar dan menghasilkan butir struktur yang lebih halus [11].

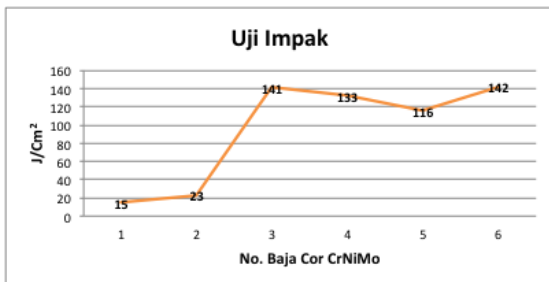


Gambar 3. Hasil uji tarik baja cor CrNiMo setelah proses perlakuan panas sesuai Tabel 2



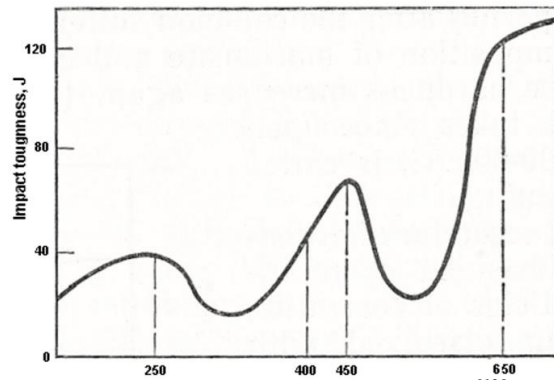
Gambar 4. Nilai elongasi pada baja cor hasil proses perlakuan panas sesuai Tabel 2

Proses tempering pada baja cor NiCrMo no. 3 (normalising dan tempering pada $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$) nampak menghasilkan penurunan kekuatan baja dari 104 MPa menjadi 69 MPa atau 66 % dari nilai awalnya. Namun elongasi yang terjadi meningkat 186% dari 8,8% menjadi 16,4 %. Penurunan kekuatan tarik yang diikuti kenaikan elongasi tinggi menghasilkan baja yang tangguh. Pada Gambar 5 terlihat bahwa baja cor NiCrMo no. 3 memiliki harga impak yang signifikan meningkat dibandingkan baja cor NiCrMo no. 2 (normalising).



Gambar 5. Hasil uji impak pada baja cor setelah proses perlakuan panas sesuai Tabel 2

Tempering kedua yang diberikan pada baja cor NiCrMo no. 4 (normalising dan tempering pada $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$), no. 5 (normalising dan tempering pada $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$) dan no. 6 (normalising dan tempering pada $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$) menunjukkan hasil kekuatan tarik yang relatif tetap dengan nilai berkisar di 69 MPa. Baja cor NiCrMo no. 4 dan no. 5 keduanya menunjukkan penurunan harga impak. Penurunan harga impak tersebut terkait dengan terjadinya fenomena *temper embrittlement*. Baja paduan Cr-Ni dapat mengalami fenomena *temper embrittlement* [12], dimana peristiwa terjadinya presipitasi karbida pada batas butir. Untuk mengatasi hal tersebut, baja paduan Cr dan Ni diikuti dengan penambahan unsur molibdenum yang akan sangat membantu mengurangi fenomena tersebut. *Temper embrittlement* dapat terjadi pada rentang temperatur 250-400 $^{\circ}\text{C}$ dan 450-650 $^{\circ}\text{C}$ seperti ditunjukkan pada Gambar 6 [12].



Gambar 6. Temperatur *temper embrittlement* [12]

Hasil yang cukup baik diperoleh pada baja cor NiCrMo no. 6 dengan tempering kedua di temperatur 650 $^{\circ}\text{C}$. Kekuatan tarik relatif sama dengan baja cor NiCrMo no. 3, 4 dan 5 sebesar 68 MPa. Namun elongasinya masih meningkat sampai 20 %. Hasil uji impaknya juga menunjukkan peningkatan harga impak.

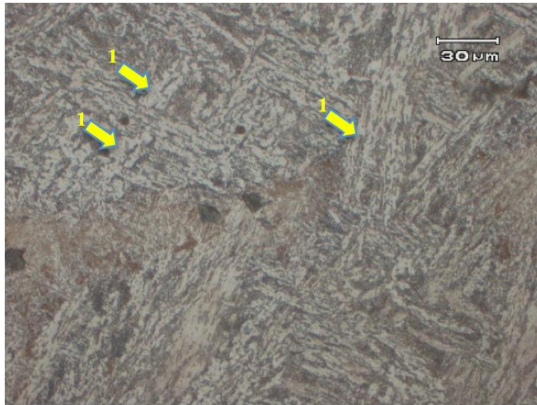
Tabel 3. Ketangguhan material baja cor setelah perlakuan panas (luas area di bawah kurva uji tarik)

No baja cor NiCrMo	Nilai Ketangguhan (J/m ³)
1	22.723.920,78
2	82.044.512,04
3	99.758.785,27
4	89.856.722,48
5	80.750.405,69
6	118.851.962,72

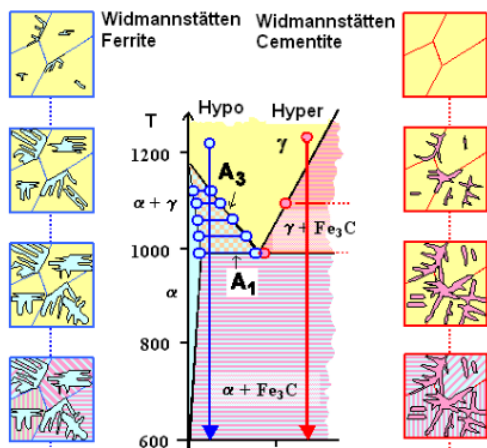
Perhitungan ketangguhan baja dari hasil uji tarik mengacu pada persamaan (1) bahwa ketangguhan merupakan integral atau luas area di bawah kurva uji tarik. Ketangguhan merupakan energi deformasi per unit volume sebelum terjadinya patah, dengan demikian satuannya adalah Joule/m³. Tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan luas area di bawah kurva uji tarik. Dari hasil perhitungan terlihat bahwa baja cor NiCrMo no. 6 memiliki nilai yang paling tinggi yaitu sebesar $118 \times 10^6\text{ J/m}^3$. Nilai tersebut tercapai karena baja cor NiCrMo no. 6 memiliki nilai elongasi yang cukup tinggi. Walaupun kuat tariknya lebih rendah dari baja cor NiCrMo lain namun dari hasil perhitungan luas area di bawah kurva masih tetap paling besar. Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa elongasi berperan penting dalam peningkatan ketangguhan baja.

Gambar 7 menunjukkan struktur mikro *as-cast* baja cor paduan Ni-Cr-Mo. Struktur *widmanstatten* ferit nampak berwarna terang, tumbuh dari batas butir *prior austenite*. Struktur ini kasar dan getas, terbukti dari hasil

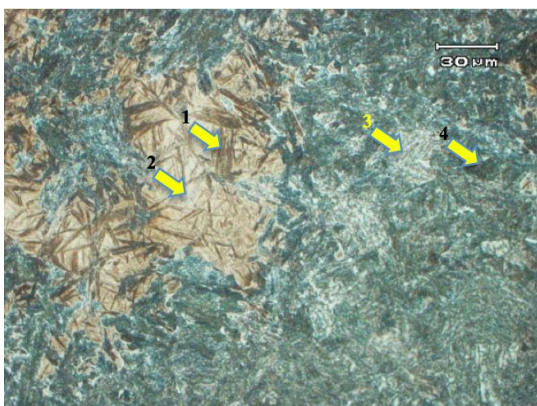
uji tarik sifat elongasinya juga rendah sebesar 4% (Gambar 8)^[8]. Gambar 9 menunjukkan struktur mikro baja cor no. 2 hasil normalising dengan struktur yang terbentuk martensit dan austenit sisa bercampur dengan bainit dan perlit. Kekerasan, kekuatan dan elongasi baja meningkat, menunjukkan bahwa struktur getas *widmanstatten* ferit sudah hilang dan butir struktur lebih halus.



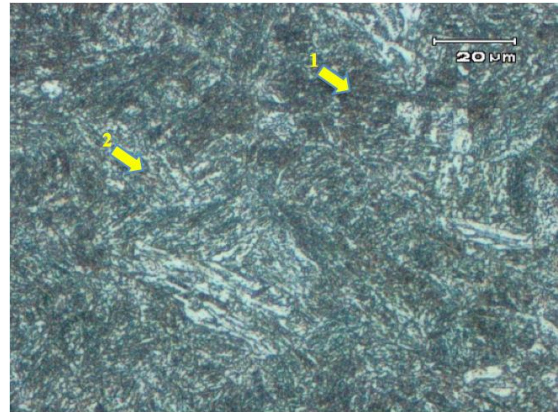
Gambar 7. Foto struktur mikro baja *as-cast* (no. 1), struktur yang terbentuk *widmanstatten* ferit. Etsa Nital 5%



Gambar 8. Pembentukan *widmanstatten* ferit^[8]

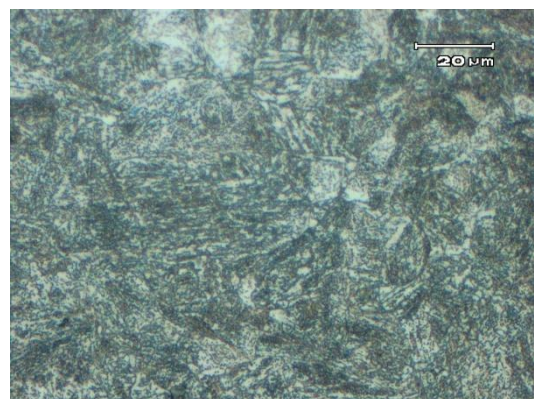


Gambar 9. Struktur mikro baja cor no. 2, struktur yang terbentuk martensit, austenit sisa, bainit dan perlit. Etsa Nital 5%

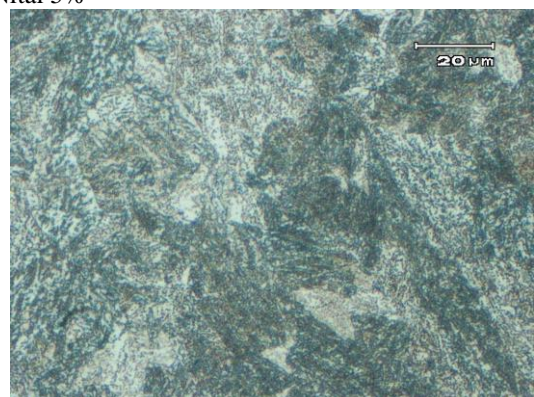


Gambar 10. Struktur mikro baja cor no. 6, struktur yang terbentuk martensit temper dan bainit. Etsa Nital 5%

Gambar 10 menunjukkan struktur mikro baja cor NiCrMo no. 3 hasil proses normalising yang diikuti dengan tempering pada temperatur 650 °C. Struktur martensit yang nampak pada baja cor NiCrMo no. 2 hasil normalising sudah tidak nampak lagi. Struktur yang terjadi adalah martensit temper dan bainit (Gambar 10). Hilangnya martensit menghasilkan peningkatan elongasi serta harga impact secara signifikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 dan 5.



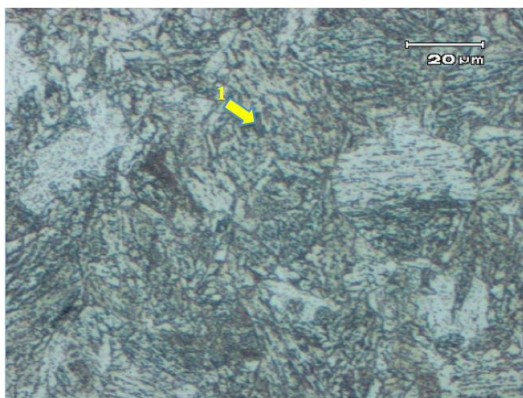
Gambar 11. Struktur mikro baja cor no. 4, struktur yang terbentuk martensit temper dan bainit. Etsa Nital 5%



Gambar 12. Struktur mikro baja cor no. 5, struktur yang terbentuk martensit temper dan bainit. Etsa Nital 5%

Gambar 11 dan 12 menunjukkan struktur mikro baja cor NiCrMo no. 4 dan no. 5 dengan tempering kedua pada temperatur 250 dan 450 °C. Struktur yang terbentuk secara sekilas tidak banyak berbeda dengan struktur mikro baja cor NiCrMo no. 3 (Gambar 10). Namun dari hasil uji tarik dan impak menunjukkan penurunan elongasi dan harga impaknya, ini mengindikasikan adanya pembentukan presipitat karbida di batas butir yang mengakibatkan baja menjadi getas^[12].

Gambar 13 menunjukkan struktur mikro baja cor NiCrMo no. 6 yang telah mengalami proses normalising, tempering I dan tempering II pada temperatur 650 °C. Struktur yang terbentuk nampak berbeda dibandingkan baja cor NiCrMo no. 3, 4 dan 5 yaitu struktur lebih nampak didominasi oleh bainit. Hasil uji tarik menghasilkan elongasi tertinggi sebesar 20 %. Hal ini menunjukkan bahwa struktur getas seperti martensit dan karbida jumlahnya minim atau tidak ada. Baja cor NiCrMo no. 6 ini memberikan kombinasi kekuatan dan elongasi yang terbaik dibandingkan dengan baja cor NiCrMo yang mendapatkan perlakuan panas lainnya.



Gambar 13. Struktur mikro baja cor no. 6, struktur yang terbentuk bainit. Etsa Nital 5%

4. KESIMPULAN

Baja cor NiCrMo dengan proses perlakuan panas normalising dilanjutkan dengan tempering I dan tempering II pada 650 °C menghasilkan kombinasi kekuatan dan elongasi terbaik. Kekuatan tarik yang dihasilkan sebesar 68,3 MPa, kekuatan luluh sebesar 52,5 MPa dan elongasi 20%. Harga impak yang dicapai sebesar 142 J/Cm². Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa proses tempering ganda setelah normalising terbukti dapat meningkatkan ketangguhan baja paduan Ni-Cr-Modari kondisi *as-cast* sebesar 15 J/cm²

menjadi 142 J/cm² atau secara signifikan meningkat sebesar $142/15 \times 100 \% = 946 \%$.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kepada Jurusan Teknik Pengecoran Logam, Politeknik Manufaktur Negeri Bandung yang telah menyediakan fasilitas peralatan dan bahan untuk mendukung terlaksananya kegiatan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] "Toughness", *En.wikipedia.org*[Online]. Available:<https://en.wikipedia.org/wiki/Toughness>, diakses 25 Januari 2017.
- [2] "Widmanstätten Structures", *Tf.unikel.de*, 2017. [Online]. Available: http://www.tf.unikel.de/matwis/amat/iss/kap_8/illustr/s8_4_2.html, diakses 25 Januari 2017.
- [3] Z. Hu and Y. Yang, "Effects of Normalizing and Tempering Temperature on Mechanical Properties and Microstructure of Low Alloy Wear Resistant Steel Casting," *Advanced Materials Research.*, vol. 602-604, pp. 294-299, 2012.
- [4] "Tempering (metallurgy)", *En.wikipedia.org*. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tempering_\(metallurgy\)#Normalized_steel](https://en.wikipedia.org/wiki/Tempering_(metallurgy)#Normalized_steel), diakses 25 Januari 2017.
- [5] S. Thompson, "Structural characteristics of transition-iron-carbide precipitates formed during the first stage of tempering in 4340 steel", *Materials Characterization*, vol. 106, pp. 452-462, 2015.
- [6] D. Porter, K. Easterling and M. Sherif, *Phase transformations in metals and alloys*, 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.
- [7] D. Saha, E. Biro, A. Gerlich and Y. Zhou, "Effects of tempering mode on the structural changes of martensite", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 673, pp. 467-475, 2016.
- [8] R. Smallman and R. Bishop, *Modern physical metallurgy and materials*

- engineering, 1st ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 1999.
- [9] L. Samuels and L. Samuels, Light microscopy of carbon steels, 1st ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 1999.
- [10] ASM Handbook, Volume 1, 1st ed. Materials Park: A S M International, 1990.
- [11] K. Thelning, Steel and its heat treatment, 1st ed. London: Bofors Handbook, 1984.
- [12] “Temper Embrittlement,” Totalmateria.com, 2017. [Online]. Available:<http://www.totalmateria.com/articles/Art102.htm> , diakses 25 Januari 2017.

