

## Pengaruh Proses *Normalising* dan *Tempering* Ganda Terhadap Peningkatan Nilai *Modulus of Toughness* Baja AISI 4340

Beny Bandanadjaja<sup>\*</sup>, Dewi Idamayanti

Jurusan Teknik Pengecoran Logam, Politeknik Manufaktur Bandung,  
Jl. Kanayakan 21 Dago Bandung, Indonesia 40135

### Abstrak

Baja AISI 4340 merupakan baja paduan Nikel, Chrom dan Molibden. Baja ini memiliki sifat kemampuan untuk dilaku-panas (*heat-treatable*) yang baik. Penelitian ini ditujukan untuk meningkatkan ketangguhan baja AISI 4340 melalui proses perlakuan panas. Metode percobaan dilakukan dengan memberikan variasi proses perlakuan panas pada baja AISI 4340. Proses perlakuan panas yang diberikan yaitu *normalising* pada temperatur 900 °C, *tempering* tahap pertama pada temperatur 650 °C dan *tempering* tahap kedua dengan variasi 650 °C dan 705 °C. Pengaruh pemberian tambahan proses *tempering* setelah *normalising* dan temperatur *tempering*-nya dianalisis untuk diketahui sejauh mana dapat meningkatkan ketangguhan baja ini. Hasilnya menunjukkan bahwa pemberian tambahan proses *tempering* dua kali pada 650 °C setelah *normalising* pada temperatur 900 °C dapat meningkatkan *elongasi* baja AISI 4340. Ketangguhan sebagai salah satu sifat mekanik yang akan ditingkatkan merupakan nilai kombinasi kekuatan tarik, kuat luluh dan *elongasi*, dalam nilai *modulus of toughness*. Hasil perhitungan *modulus of toughness* yang terbaik diperoleh dari proses perlakuan panas *normalising*, kemudian *tempering* tahap I pada temperatur 650 °C dan *tempering* tahap II pada temperatur 650 °C, yaitu sebesar 1.206 kgf.mm/mm<sup>3</sup>, meningkat 450 % dibandingkan dengan kondisi *as-cast* tanpa proses perlakuan panas sebesar 267 kgf.mm/mm<sup>3</sup>.

**Kata kunci:** baja AISI 4340; perlakuan panas; *normalising*; *tempering* dua tahap; ketangguhan

### Abstract

[Title: *The Influence of the Second Stage Tempering Temperature on the Toughness Properties of AISI 4340 Steel*] AISI 4340 is a steel that is alloyed with Nickel, Chrom and Molybden. This steel has excellent heat-treating properties. This study aimed to improve the toughness of AISI 4340 steel through a heat-treatment process. The experimental method is carried out by giving variations of the heat treatment process on AISI 4340 steel. The heat treatment process that has been given is *normalizing* at 900 °C, the first stage *tempering* 650°C, and the second stage *tempering* with the variation of 650 °C and 705 °C. The effect of an additional *tempering* process after *normalizing* and *tempering* temperature was analyzed to determine its role in improving this steel's toughness. The results show that the additional double *tempering* process at 650 °C after 900 °C *normalizing* can increase AISI 4340 steel *elongation*. *Stell toughness* is one of the mechanical properties to be improved. It is a combination of tensile strength, yield strength, and *elongation*, which can be presented in *modulus of toughness*. The best *modulus of toughness* results is obtained from the heat treatment process: *normalizing*, then *tempering* stage I at 650 °C and *tempering* stage II at 650 °C, which is 1,206 kgf.mm/mm<sup>3</sup>. Increase more than 450 % com.

**Keywords:** AISI 4340 steel; heat treatment; *normalizing*; two stage *tempering*; toughness

### 1. Pendahuluan

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk memperbaiki sifat mekanik baja AISI 4340. Beberapa

pengembangan yang telah dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanis baja AISI 4340 diantaranya adalah dengan metode *normalising* yang dilanjutkan dengan *tempering*. Hu dkk (2013) menyatakan baja cor mengalami segregasi makro dan terjadi pembentukan karbida karena tidak larut dalam austenit, yang mengakibatkan baja menjadi getas. Untuk mengatasi hal

<sup>\*</sup>) Penulis Korespondensi.

E-mail: benybj@polman-bandung.ac.id

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 AISI 4340 dapat menghasilkan fasa Perlit, Bainit dan kadang Martensit. Kombinasi fasa tersebut akan menghasilkan kekuatan yang cukup tinggi. Untuk dapat memperoleh ketangguhan yang lebih tinggi maka dapat dilanjutkan dengan proses tempering setelah *normalising*, yang akan berakibat pada penurunan kekuatan namun elongasi meningkat.

Tempering pada baja yang memiliki struktur mikro martensitik sangat penting untuk menekan terjadinya patah getas dan memastikan terbentuknya kombinasi sifat kekuatan dan keuletan sesuai dengan yang diinginkan (Hu *dkk.*, 2013). Selama tempering, kekuatan baja martensitik menurun karena terjadi pelepasan atom karbon dari fasa martensit yang memiliki karbon terlarut jenuh (*carbon supersaturated martensite*) (Saha *dkk.*, 2016; Speich *dkk.*, 1972). Proses *tempering* martensit melibatkan serangkaian proses. Pada tahap pertama proses *tempering* yang terjadi pada kisaran suhu 80-200 °C, proses segregasi dan redistribusi atom karbon mengambil tempat pada cacat kisi seperti dislokasi, batas *lath*, dan batas butir austenite sebelumnya (*prior austenite grain boundary*). Selain itu, karbida epsilon transisional ( $\epsilon\text{-Fe}_{2,4}\text{C}$ ) juga terbentuk dalam tahap temper pertama ini (Jung *dkk.*, 2009; Olson *dkk.*, 1992). Lapisan film *interlath* pada austenit sisa terurai menjadi Ferit ( $\alpha$ ) dan sementit ( $\theta\text{-Fe}_3\text{C}$ ) pada *tempering* tahap kedua (200–300 °C). Pada *tempering* tahap ketiga, karbon terpisah dan karbida transisi berubah menjadi karbida yang stabil seperti sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), yang terjadi pada suhu yang lebih tinggi, dalam kisaran 250–350 °C (Olson *dkk.*, 1992). Pada suhu di atas 350 °C, sementit menjadi bulat dan cenderung lebih kasar (Olson *dkk.*, 1992). Ada banyak faktor yang mempengaruhi proses *tempering*, seperti: suhu temper, waktu *tempering*, laju pemanasan, dan komposisi kimia baja (Gomes *dkk.*, 2010; Krauss, 1990; Revilla *dkk.*, 2014).

Pada baja paduan austenit sisa diubah menjadi martensit pada proses pendinginan dari suhu temper sekitar 500 °C. Oleh karena itu baja tersebut harus temper ulang, yang dapat meningkatkan ketangguhan material. Jika kekerasan yang diperlukan telah tercapai setelah perlakuan pengerasan pertama, temper kedua harus dilakukan pada suhu yang lebih rendah agar kekerasan baja tidak banyak berkurang (Thelning, 2013).

Pada penelitian Bandanadjaja dan Achyarsyah (2017), serta Bandanadjaja dan Idamayanti (2017)

menunjukkan hasil perlakuan panas pada baja paduan NiCrMo dengan *tempering* ganda mengalami peningkatan elongasi sampai 20 % tanpa mengalami penurunan kekuatan tarik yang signifikan. Dibandingkan dengan satu kali *tempering* 650 °C ( $\epsilon$  16,4 %). Hasil tersebut diperoleh dari proses *tempering* yang dilakukan pada temperatur tahap I 650 °C dan II 650 °C. Temperatur *tempering* tahap II ternyata menunjukkan pengaruh yang berbeda, pada temperatur tahap II 250 °C dan 450 °C, hasilnya justru menunjukkan penurunan elongasi dibanding satu kali *tempering* 650 °C. Reduksi elongasi terjadi tersebut dapat dijelaskan oleh adanya presipitasi karbida selama dekomposisi martensit, yang terletak terutama di batas butir austenit sebelumnya (Madyanov, 1973). Anwar *dkk.* (2019) menyebutkan dalam penelitiannya bahwa proses *tempering* ganda pada baja tahan karat martensitik 13Cr3Mo3Ni tidak menyebabkan penurunan kekerasan. Namun dalam penelitiannya belum menyebutkan perihal sifat ketangguhannya.

Penelitian ini merupakan penelitian lanjutan, dimana pada studi sebelumnya (Bandanadjaja & Idamayanti, 2017) belum memeriksa pengaruh temperatur *tempering* kedua yang diberikan diatas temperatur *tempering* pertama. Dalam penelitian ini dilakukan eksperimen lanjutan untuk mendapatkan informasi tentang pengaruh pemberian *tempering* tahap kedua yang lebih tinggi dibanding tahap pertamanya.

## 2. Bahan dan Metode

### 2.1 Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah Baja paduan Cr-Ni-Mo yang setara dengan standar AISI 4340. Baja AISI 4340 dicor dalam bentuk sampel Y *block* sesuai dengan standar ASTM E8, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Y *block* kemudian dipotong dalam bentuk sampel kotak berukuran 15x15x12 mm, untuk pengujian kekerasan dan metalografi. Selain itu dibuat sampel berbentuk silinder berukuran dia. 30 mm x 200 mm, untuk pengujian tarik.

Material baja hasil cor AISI 4340 diperiksa komposisinya menggunakan *Optical Emission Spectroscopy* (ARL 3460). Hasilnya seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Komposisi Kimia Baja AISI 4340

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo
0,361	0,63	0,22	0.013	0,02	1,85	0,89	0,3



**Gambar 1.** Y Block dan Sampel Uji Tarik Baja AISI 4340

Baja AISI 4340 hasil cor termasuk baja paduan Nikel, Chrom dan Molibdenum. Penambahan unsur paduan tersebut dapat meningkatkan mampu perlakuan panas material (ASM International Handbook Committee, 2001). Ni, Cr dan Mo akan meningkatkan kemampuan pengerasan material (*hardenability*), ketangguhan (*impact toughness*) dan ketahanan fatik (*fatigue resistance*) pada baja (ASM International Handbook Committee, 2001). Dari komposisi kimia dapat dilakukan perhitungan temperatur  $Ac_1$  dan  $Ac_3$  dengan menggunakan rumus Andrews (Krauss, 1990), seperti terlihat pada Persamaan 1 dan 2.

$$Ac_1 = 723 - 10,7 Mn - 16,9 Ni + 29,1 Si + 16,9 Cr + 290 As + 6,38 W \quad (1)$$

$$Ac_3 = 910 - 203 C^{1/2} - 15,2 Ni + 44,7 Si + 104 V + 31,5 Mo + 13,1 W \quad (2)$$

Dari persamaan (1) dan (2) diperoleh  $Ac_1 = 706$  °C dan  $Ac_3 = 779$  °C.  $Ac_1$  merupakan batas tertinggi yang bisa diterapkan untuk temperatur *tempering*. Sementara  $Ac_3$  merupakan batas referensi untuk penetapan temperatur austenisasi. Proses *normalising* dilakukan pada temperatur diatas  $Ac_3$ . Proses *tempering* dilakukan di bawah temperatur  $Ac_1$ .

## 2.2 Variasi Proses Perlakuan Panas

Baja AISI 4340 diberikan proses perlakuan panas, dengan variasi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Variasi Sampel Baja AISI 4340

No	Nama Sampel	Kondisi Proses
1	AC	As Cast
2	N	<i>Normalising</i> 900
3	NT	<i>Normalising</i> 900 <i>Tempering</i> 650
4	NTT650	<i>Normalising</i> 900 <i>Tempering</i> 650 <i>Tempering</i> 650
5	NTT705	<i>Normalising</i> 900 <i>Tempering</i> 650 <i>Tempering</i> 705

Sampel AC adalah baja AISI 4340 dalam kondisi As-Cast atau hasil cor, belum diberikan proses perlakuan panas apapun. Sampel N adalah sampel AC yang diberikan proses *Normalising* dengan pemanasan 900 °C kemudian ditahan 2 jam dan diberikan pendinginan udara bebas. Sampel NT adalah sampel AC yang sudah diberikan proses *normalising* 900 °C dilanjutkan dengan proses *tempering* pada temperatur 650 °C ditahan selama 2 jam dan didinginkan udara bebas. Sampel NTT650 adalah sampel AC yang sudah mengalami proses *normalising* 900 °C, *tempering* 650 °C dilanjutkan dengan *tempering* tahap kedua pada temperatur 650 °C ditahan selama 2 jam dan didinginkan udara bebas. Sampel NTT705 adalah sampel AC yang sudah mengalami proses *normalising* 900 °C, *tempering* 650 °C dilanjutkan dengan *tempering* tahap kedua pada temperatur 705 °C ditahan selama 2 jam dan didinginkan udara bebas.

## 2.3 Pengujian

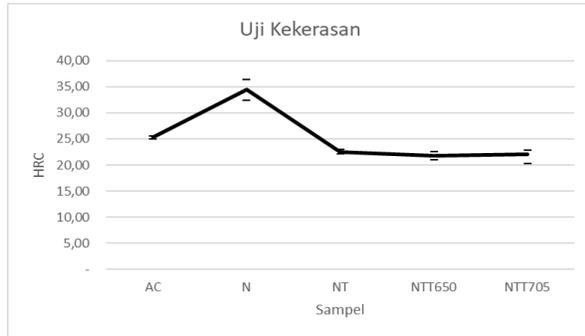
Setiap variasi perlakuan panas sampel diuji sifat mekanik dan struktur mikronya. Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode Rockwell C standar ASTM E18, menggunakan mesin uji Rockwel Future Tech type

LR-1e. Pengujian Tarik dilakukan sesuai standar ASTM E 8M, menggunakan mesin uji tarik *Universal Testing Machine* Hung Ta HT-8501. Pemeriksaan struktur mikro menggunakan mikroskop optik. Bahan etsa menggunakan Nital 5%.

**3. Hasil dan Pembahasan**

Hasil pengujian mekanik dan struktur mikro disampaikan sebagai berikut:

**3.1 Hasil Uji Kekerasan dan Struktur Mikro**



**Gambar 2.** Hasil Uji Kekerasan Rockwell

Dari grafik pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa kekerasan tertinggi sebesar rata-rata 34,48 HRC dimiliki oleh sampel N, hasil proses *normalising*. Peningkatan nilai kekerasan pada hasil *normalising* terjadi karena proses *normalising* dapat menghaluskan butir (Krauss, 1990). Hasil cor atau as-cast (AC) menghasilkan struktur Ferit widmanstaten yang kasar dan tajam, sehingga material menjadi getas (Gambar 3). Paduan Ni akan menggeser kurva daerah Perlit pada diagram transformasi perlakuan panas TTT (*Time Temperature Transformation*) ke arah kanan dan paduan Mo akan menggeser kurva transformasi Bainit kearah kiri (Bandanadjaja, 2004) sehingga dengan



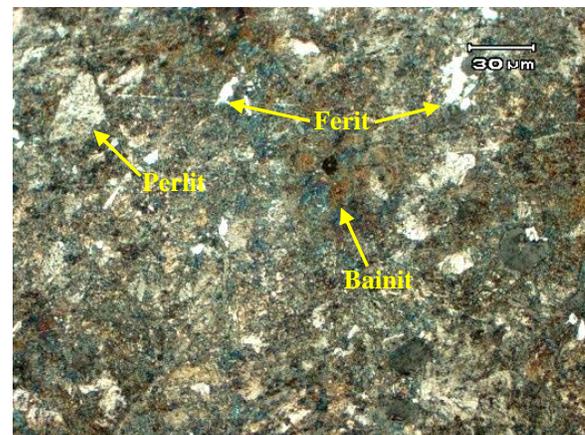
**Gambar 3.** Struktur Mikro AISI 4340 As Cast (AC)

pendinginan lambat yang terjadi dalam cetakan pasir atau udara bebas dapat terbentuk fasa Bainit yang memiliki kekerasan cukup tinggi. Dapat dilihat pada Gambar 3. Struktur mikro yang terbentuk adalah Bainit dengan ditambah struktur Ferit Widmanstaten yang berbentuk kasar dan tajam.

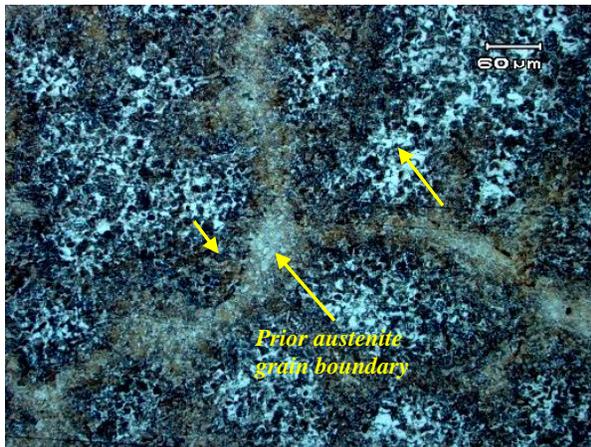
Proses perlakuan panas *normalising* menghasilkan butir dan struktur yang lebih halus. Hal ini yang meningkatkan kekerasan baja AISI 4340 setelah *normalising*. Gambar 4 menunjukkan struktur mikro hasil *normalising*. Struktur mikro yang terbentuk adalah Ferit (berwarna putih), Perlit dan Bainit. Nampak struktur mikro nya lebih rapat dan halus dibandingkan struktur mikro as-cast pada Gambar 3. Dengan struktur mikro yang lebih halus dan rapat maka kekerasan dan keuletan material meningkat.

Dari grafik pada Gambar 2 juga dapat dilihat bahwa setelah material diberi proses *tempering* pertama maka terjadi penurunan kekerasan. Hal ini terjadi karena struktur Bainit yang sebelumnya memiliki kekerasan tinggi menjadi tertemper. Kemudian memunculkan fasa Ferit yang terklaster pada bagian tengah butir bekas austenit (*prior austenite grain*). Gambar 5. menunjukkan struktur mikro yang terbentuk dari hasil proses *tempering* 650 °C.

Setelah material diberikan *tempering* kedua pada temperatur 650 °C dan 705 °C tidak terjadi penurunan kekerasan. Hasil ini sesuai dengan penelitian Anwar, M.S (Anwar dkk., 2019) yang meneliti pengaruh proses *tempering* ganda pada baja tahan karat martensitik 13Cr3Mo3Ni, dimana kekerasan baja tersebut relatif stabil setelah mengalami temper kedua, yaitu dari 316 VHN menjadi 304 VHN. Kekerasan yang relatif sama ini mengindikasikan bahwa kekuatan material relatif stabil.



**Gambar 4.** Struktur Mikro AISI 4340 Hasil *Normalising* (N)



**Gambar 5.** Struktur Mikro AISI 4340 Hasil *Normalising* dan *Tempering* 650 °C (NT)



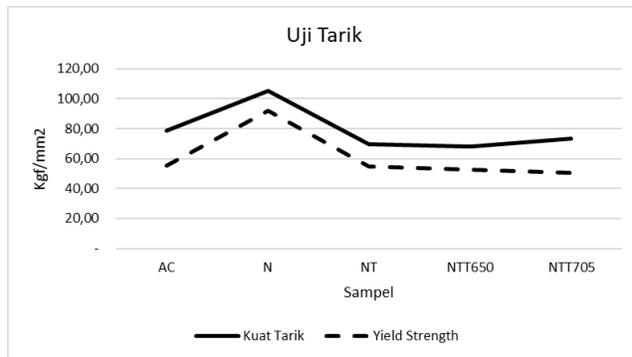
**Gambar 6.** Struktur Mikro AISI 4340 Hasil *Normalising*, *Tempering* 650 °C dan *Tempering* 650 °C (NTT650)

Pengamatan struktur mikro pada pemanasan *tempering* kedua sebesar 650 °C dapat dilihat pada Gambar 6. Struktur Ferit yang jelas berwarna putih tidak lagi nampak berkelompok (klaster) dalam butir. Proses temper tahap kedua memberikan kesempatan pada karbon untuk lebih menyebar, sehingga klaster ferit menghilang. Pada sampel NT (Gambar 5) dimungkinkan pembentukan martensit di batas butir austenite yang berasal dari austenit yang tersisa di batas butir tersebut (Madyanov, 1973). Struktur sampel NTT650 terlihat lebih merata yang terdiri dari Bainit yang tertemper, dan ada Bainit yang belum tertemper (berwarna coklat).

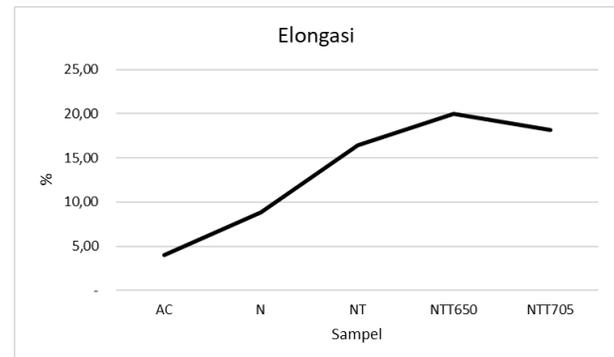
### 3.2 Hasil Uji Tarik

Sifat mekanik yang dapat menunjukkan kekuatan dan keuletan dapat diperoleh dengan pengujian tarik. Berikut analisis hasil yang diperoleh dari pengujian tarik.

Gambar 7. Menunjukkan hasil uji tarik dari nilai kuat tarik ( $\sigma_u$ ) dan kuat luluh ( $\sigma_y$ ). Trend grafik sejalan dengan hasil uji kekerasan. Material AISI 4340 hasil *normalising* mengalami peningkatan kekuatan (sejalan dengan meningkatnya kekerasan). Kemudian setelah diberi proses *tempering* maka kekuatannya menurun. Kemudian setelah diberikan *tempering* kedua pada temperatur 650 °C dan 705 °C kekuatan relatif sama. Untuk menilai ketangguhan material maka sifat elongasi material perlu dianalisis hasilnya. Karena ketangguhan merupakan kombinasi sifat kekuatan dan elongasi material. Nilai ketangguhan setara dengan luas area dibawah kurva uji tarik (Dieter *dkk.*, 1986). Gambar 8. menunjukkan grafik nilai elongasi material AISI 4340.



**Gambar 7.** Kuat Tarik dan *Yield Strength* AISI 4340



**Gambar 8.** Elongasi AISI 4340

Hasilnya menunjukkan peningkatan yang berlanjut. Khususnya untuk sampel NT, NTT650 dan NTT705, bila dilihat nilai kekerasan dan kekuatannya relatif tetap, namun keuletannya atau elongasinya naik. Pezzato (Pezzato *dkk.*, 2020) menyatakan bahwa proses *tempering* kedua mengubah karbida mikro di batas butir austenit yang tadinya berupa *lenticular* atau tajam menjadi membulat, sehingga menghilangkan daerah konsentrasi tegangan diujung karbida mikro tersebut. Secara umum material baja memiliki sifat yang berlawanan untuk kekuatan dan elongasi (Dieter *dkk.*, 1986). Semakin tinggi kekuatan diiringi dengan semakin menurunnya keuletan dan sebaliknya. Dalam hal ini hasil yang diperoleh pada material AISI 4340 yang diberikan proses *tempering* ganda memberikan hasil yang meningkat untuk nilai elongasinya. Hal ini dapat dijelaskan dengan analisis struktur mikro yang terbentuk, sebagaimana penjelasan berikut:

Hasil *normalising* (N) memunculkan struktur mikro yang lebih halus sehingga dapat meningkatkan kekerasan (34,48 HRC) dan kekuatan ( $\sigma$ :105,13 kgf/mm<sup>2</sup>). Pada struktur mikro *normalising* (N) dimungkinkan terjadinya pembentukan struktur Bainit dan atau Martensit, karena baja AISI 4340 memiliki paduan Ni, Cr, Mo (Bandanadjaja, 2004). Kedua struktur tersebut memiliki kekuatan dan kekerasan yang relatif tinggi. Elongasi dapat juga meningkat karena sebelumnya struktur hasil cor kasar dan cenderung menjadi getas. Kombinasi peningkatan kekuatan dan elongasi dari baja AISI 4340 menghasilkan sifat ketangguhan baja menjadi lebih baik dibandingkan hasil cor. Oleh karenanya baja hasil cor sebaiknya selalu diberikan proses *normalising* untuk dapat menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik.

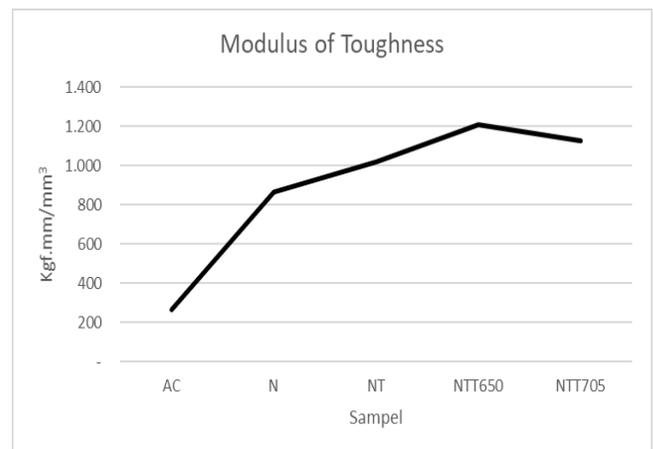


**Gambar 9.** Struktur Mikro AISI 4340 Hasil *Normalising*, *Tempering* 650 °C dan *Tempering* 705 °C

Hasil proses *tempering* setelah *normalising*, dapat diperoleh dari sampel NT menunjukkan terjadinya penurunan kekuatan ( $\sigma$ : 69,64 kgf/mm<sup>2</sup>) diikuti dengan kenaikan elongasi 16,4%. Fenomena ini sesuai dengan dasar teoritis bahwa material baja akan mengalami kenaikan elongasi bila kekuatannya diturunkan (Dieter *dkk.*, 1986). Penurunan kekuatan dan kekerasan serta meningkatnya elongasi dipengaruhi dengan keberadaan Ferit berbentuk klaster (Gambar 5.).

Pada sampel yang diberi proses *tempering* kedua yaitu NTT650 dan NTT 705, hasilnya menunjukkan kekuatan ( $\sigma$ : 68,29 kgf/mm<sup>2</sup>) dan kekerasan (21,74 HRC) yang setara dengan hasil NT namun elongasinya meningkat (20 %). Hal ini dapat dijelaskan dari struktur mikro yang terbentuk. Struktur mikro sampel NT (Gambar 5) menunjukkan adanya kluster Ferit ditengah butir bekas austenit (*prior austenit grain*) dan dimungkinkan adanya struktur martensit pada bekas batas butir austenit (Thelning, 2013). Kedua struktur tersebut tidak nampak lagi pada struktur NTT650. Struktur NTT650 memiliki pola yang lebih merata dan homogen. Hal inilah yang meningkatkan elongasi material AISI 4340 hasil proses NTT650. Pada proses NTT750, terjadi penurunan elongasi. Hal ini dapat dijelaskan dengan struktur mikro yang terbentuk, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.

*Tempering* kedua pada temperatur 705 °C memunculkan model struktur Bainit tertemper dengan sementit berbentuk bulat dan cenderung kasar (Olson *dkk.*, 1992). Struktur berwarna putih adalah Ferit. Struktur Ferit nampak membesar dan Bainit tertemper yang cenderung kasar inilah yang berperan dalam menurunkan elongasi material AISI 4340.



**Gambar 10.** Modulus of Toughness AISI 4340

Aspek lain yang dapat dinilai dari hasil yang diperoleh adalah nilai ketangguhan material. Ketangguhan merupakan kombinasi sifat kuat tarik, kuat luluh (*yield strength*) dan elongasi. Nilai ketangguhan dari hasil uji tarik dapat dihitung dengan rumus *modulus of toughness* seperti terlihat pada Persamaan 3 (Davis, 2004).

$$U_T = \frac{S_0 + S_u}{2} ef \quad (3)$$

$S_0$  adalah kekuatan yield,  $S_u$  adalah kekuatan maksimum dan  $ef$  adalah elongasi. Hasil perhitungan merupakan penyederhanaan dari integrasi luas area dibawah kurva uji tarik yang menunjukkan ketangguhan material.

Gambar 10 menunjukkan grafik hasil perhitungan persamaan (3) untuk nilai *modulus of toughness* material AISI 4340 untuk semua proses yang dilakukan dalam penelitian ini. Hasilnya menunjukkan bahwa baja AISI 4340, sampel NTT650, memiliki nilai *modulus of toughness* yang tertinggi (1.208 kgf.mm/mm<sup>3</sup>). Proses *tempering* kedua pada temperatur 705 °C menghasilkan nilai ketangguhan yang menurun, hal ini terkait dengan menurunnya elongasi material hasil proses NTT705.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan data dan analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa proses yang dapat menghasilkan nilai ketangguhan terbaik adalah sampel NTT650 dengan proses: *Normalising* 900 °C, *tempering* I 650 °C dan *tempering* II °C. Peningkatan temperatur *tempering* II berakibat pada menurunnya nilai ketangguhannya. Dengan demikian dapat direkomendasikan untuk hasil dengan ketangguhan terbaik bagi material AISI 4340 dalam batasan parameter yang ada dalam penelitian ini adalah proses NTT650.

#### Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Politeknik Manufaktur Bandung dan DRPM Kemenristekdikti yang telah memberikan bantuan dana untuk kegiatan penelitian ini. Juga kepada sdr Cahyana Suherlan atas kerjasamanya untuk dapat membantu proses eksperimen dan pengujian hasilnya.

#### Daftar Pustaka

Anwar, M. S., Yulianto, E. J., Chandra, S. A., Hakim, R. N., Hastuty, S., & Maburri, E., (2019). Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan dan Ketahanan Oksidasi Suhu Tinggi Pada Baja Tahan Karat Martensitik 13Cr3Mo3Ni-Cor. *TEKNIK*, Volume 40(1), pp. 11

- Davis, J. R., Mills, K. M., & Lampman, S. R. (1990). *Metals handbook. Vol. 1. Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys*. ASM International, Materials Park, Ohio 44073, USA. 1063.
- Bandanadjaja, B., (2004). *Pengembangan Material Baititik As-Cast Ductile Iron Dengan Pengendalian Laju Pendinginan Dan Komposisi Nikel Molibden*. Tesis Magister. Institut Teknologi Bandung
- Bandanadjaja, B., & Achyarsyah, M., (2017). Perancangan Material Coran Baja Link Track Untuk Bucket Wheel Excavator Batubara (Material Design of Link Track Steel Casting for Coal Bucket Wheel Excavator). *Creative Research Journal*, Volume 1(1), pp. 47–63
- Bandanadjaja, B., & Idamayanti, D., (2017). Pengaruh Proses Tempering Ganda Terhadap Sifat Mekanik Material Baja Cor Paduan Ni-Cr-Mo [The Influence of Double Tempering on Mechanical Properties of Ni-Cr-Mo Cast Steel Alloy]. *Metalurgi*, Volume 32(1), pp. 29–36
- Davis, J. R., (2004). *Tensile testing*. ASM International. Ohio, USA
- Dieter, & Bacon, D., (1986). *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill book company, The United States of America
- Gomes, C., Kaiser, A.-L., Bas, J.-P., Aissaoui, A., & Piette, M., (2010). Predicting the mechanical properties of a quenched and tempered steel thanks to a “tempering parameter.” *Revue de Métallurgie-International Journal of Metallurgy*, Volume 107(7–8), pp. 293–302
- Hu, Z. J., & Yang, Y. T., (2013). Effects of normalizing and tempering temperature on mechanical properties and microstructure of low alloy wear resistant steel casting. In *Advanced Materials Research* (Vol. 602, pp. 294–299). Trans Tech Publ
- Jung, M., Lee, S.-J., & Lee, Y.-K., (2009). Microstructural and dilatational changes during tempering and tempering kinetics in martensitic medium-carbon steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 40(3), pp. 551–559
- Krauss, G., (1990). *Steels: heat treatment and processing principles*. ASM International, pp. 497
- Madyanov, S. A., (1973). Effect of double tempering on the properties of steels. *Metal Science and Heat Treatment*, Volume 15(7), pp. 615–617
- Olson, G. B., & Owen, W. S. (1992). *Martensite*, ASM International. Materials Park, OH.
- Pezzato, L., Gennari, C., Chukin, D., Toldo, M., Sella, F., Toniolo, M., Zambon, A., Brunelli, K., & Dabalà, M., (2020). Study of the Effect of Multiple Tempering on the Impact Toughness of

- Forged S690 Structural Steel. *Metals*, Volume 10(4), pp. 507
- Revilla, C., López, B., & Rodriguez-Ibabe, J. M., (2014). Carbide size refinement by controlling the heating rate during induction tempering in a low alloy steel. *Materials & Design (1980-2015)*, Volume 62, pp. 296–304
- Saha, D. C., Biro, E., Gerlich, A. P., & Zhou, Y., (2016). Effects of tempering mode on the structural changes of martensite. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 673, pp. 467–475
- Speich, G. R., & Leslie, W. C., (1972). Tempering of steel. *Metallurgical Transactions*, Volume 3(5), pp. 1043–1054
- Thelning, K.-E., (2013). *Steel and its heat treatment*. Butterworth-heinemann