

PENINGKATAN KEKUATAN, KEKERASAN DAN KETANGGUHAN BAJA ASSAB 709 M MELALUI PROSES QUENCHING DAN TEMPERING

H. Alian^{1*}, Q. Hadi¹, Z. Abidin¹ dan D. Ramadani¹

¹ Teknik Mesin, Universitas Sriwijaya, Palembang
Corresponding author: helmyalian@ft.unsri.ac.id

ABSTRAK: Pada bagian-bagian mesin seperti *crankshaft*, *connecting rod*, *valve*, roda gigi, dan lain-lainnya mengalami beban yang besar yang akan menimbulkan deformasi plastis yang besar pada material memicu timbulnya retak awal (*initiation crack*). Syarat utama yang harus dipenuhi untuk bahan yang digunakan pada bagian-bagian mesin diatas diharapkan mempunyai kekuatan yang tinggi serta keuletan yang besar karena besarnya beban yang bekerja. Baja paduan rendah yang harganya relatif murah antara lain baja ASSAB 709 M. Untuk mendapatkan kekuatan yang tinggi dan ketangguhan yang besar dapat dilakukan melalui rekayasa butir dan menghasilkan struktur mikro yang merata (*uniform*). Penelitian dilakukan secara komprehensif terhadap kekuatan, kekerasan, ketangguhan serta struktur mikro baja ASSAB 709 M yang diberi perlakuan *quenching* dan *tempering*. Proses *quenching* dan *tempering* dengan memanaskan baja sampai temperatur austenisasi yaitu 825 °C selama 1 jam di celup ke air, kemudian di *tempering* dengan variasi temperatur 400°C, 450°C, dan 500°C dengan waktu tahan masing-masing 1 jam. Sebelum dan sesudah proses *quenching* dan *tempering* dilakukan uji tarik, kekerasan, dampak, dan struktur mikro. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan kekuatan tarik dari 828,258 MPa menjadi 1099,878 Mpa (*tempering* 400°C), kekerasan meningkat dari 63,3 HRC menjadi 76,1 HRC (*tempering* 400°C) dan energi dampak meningkat dari 37,955 Joule menjadi 52,774 Joule (*tempering* 500°C). Perubahan struktur mikro baja ASSAB 709 M terjadi setelah proses perlakuan *quenching* dan *tempering* ini, dari *ferrite* dan *pearlite* menjadi terbentuknya *martensite lath*.

Kata kunci : Kekuatan, kekerasan, ketangguhan, *quenching* dan *tempering*.

ABSTRACT: Engine parts such as the *crankshaft*, *connecting rods*, *valves*, *gears*, etc., are subject to a large load which will cause large plastic deformation of the material that triggers initiation cracks. The main requirements that must be met for the materials used in the parts above the machine are expected to have high strength and great ductility due to the large working load. Low-alloy steels with relatively cheap prices include ASSAB 709 M steel. To obtain high strength and great toughness, it can be done through grain engineering and produces an even (*uniform*) microstructure. A comprehensive study was conducted on the strength, hardness, toughness and microstructure of ASSAB 709 M steel treated with *quenching* and *tempering*. The *quenching* and *tempering* process involves heating the steel to an austenizing temperature of 825 C for 1 hour in water, then *tempering* with a temperature variation of 400oC, 450oC, and 500oC with a holding time of 1 hour each. Before and before the *quenching* and *tempering* process, tensile, hardness, impact, and microstructure tests were carried out. The results showed an increase in tensile strength from 828,258 MPa to 1099,878 Mpa (*tempering* 400oC), hardness increased from 63.3 HRC to 76.1 HRC (*tempering* 400oC) and impact energy increased from 37,955 Joules to 52,774 Joules (*tempering* 500oC). Changes in the microstructure of ASSAB 709 M steel occurred after the *quenching* and *tempering* treatment process, from *ferrite* and *pearlite* to the formation of *martensite lath*.

Keywords : Strength, hardness, toughness, *quenching* and *tempering*.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Komponen-komponen mesin dan alat-alat perkakas banyak menggunakan baja karbon. Untuk mendapatkan sifat mekanis yang baik sesuai aplikasinya, tentunya sangat ditentukan oleh perlakuan terhadap tersebut. Perlakuan panas adalah suatu proses yang bertujuan untuk menghasilkan perubahan sifat yang diinginkan dalam suatu struktur metallurgi.

Pada komponen-komponen mesin seperti, poros, roda gigi, dan sebagainya dapat menggunakan baja ASSAB 709 M namun harus diberi perlakuan agar mendapatkan sifat yang sesuai dengan aplikasinya. Oleh karena itu, selama aplikasinya baja ini harus memiliki keuletan yang tinggi, kekerasan dan ketangguhan yang cukup untuk menahan beban waktu digunakan. Banyak peneliti yang mengembangkan beberapa metode teknik untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan seperti nitridasi (Kovacı 2016, Sengul dan Celik 2011), karburising (Boniardi 2016) dan shot peening (Menig 2012) yang menghasilkan kekuatan meningkat namun memicu turunnya keuletan baja.

Perlakuan panas (*heat treatment*) merupakan suatu proses yang bertujuan untuk menghasilkan perubahan sifat yang diinginkan dalam suatu struktur metalurgi. Sifat logam dan paduannya terutama baja dapat berubah sangat signifikan apabila dilakukan perlakuan panas (Totten, 2017). Proses perlakuan panas juga memiliki manfaat yaitu untuk memproduksi baja martensit yang biasanya membutuhkan proses pendinginan yang terus menerus dan cepat dengan menggunakan media pendinginan berupa air, minyak, dan udara (Callister, 2019). Lebih lanjut Callister menyatakan bahwa faktor-faktor yang mempengaruhi terbentuknya struktur mikro martensit yang mendominasi seluruh penampang benda uji yaitu tergantung pada komposisi paduan, jenis dan sifat media pendingin, serta ukuran dan bentuk dari benda uji. Kekuatan tarik dan kekerasan mata pisau pemanen sawit meningkat signifikan setelah dilakukan perlakuan panas *quenching* namun terjadi kenaikan daktilitas yang besar (Arief, 2012).

Untuk meningkatkan mutu baja telah dilakukan beberapa cara untuk mendapatkan keuletan yang besar dan rasio kekuatan yang relatif rendah yaitu melalui rekayasa butir dan memasukkan fasa lunak ferit ke dalam struktur mikro martensit tanpa temper untuk menghasilkan fasa bainit (Feng dkk. 2017). Dan jales

dari perubahan struktur mikro dapat merubah sifat suatu material. Penelitian Nagarajan (2017) menghasilkan struktur mikro secara signifikan mempengaruhi tingkat pertumbuhan retak fatik dan ambang batas kelelahan (Nagarajan 2017, Nagarajan dan Putatunda, 2014).

Penulis telah melakukan penelitian melalui proses *austempering* baja ASSAB 709 M pada penelitian sateks 2019, melakukan proses *normalizing* di tahun 2020 dan proses *annealing* di tahun 2021, yang hasilnya ketiga penelitian tersebut ketahanan fatik meningkat namun kekuatan tariknya sangat turun. Oleh karena itu, melalui penelitian sateks 2022 ini, kami melakukan penelitian secara komprehensif terhadap perubahan kekuatan, kekerasan, ketangguhan (*toughness*) dan struktur mikropada baja ASSAB 709 M melalui proses *quenching* dan *tempering* dengan memvariasikan temperatur *tempering*.

Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian, sebagai berikut :

- a. Mengetahui pengaruh proses *quenching* dan *tempering* terhadap kekuatan dan kekerasan pada baja karbon medium ASSAB 709 M
- b. Mengetahui pengaruh proses *quenching* dan *tempering* terhadap nilai impaknya pada baja ASSAB 709 M.
- c. Mengetahui pengaruh perubahan struktur mikro akibat proses *quenching* dan *tempering* pada baja ASSAB 709 M.

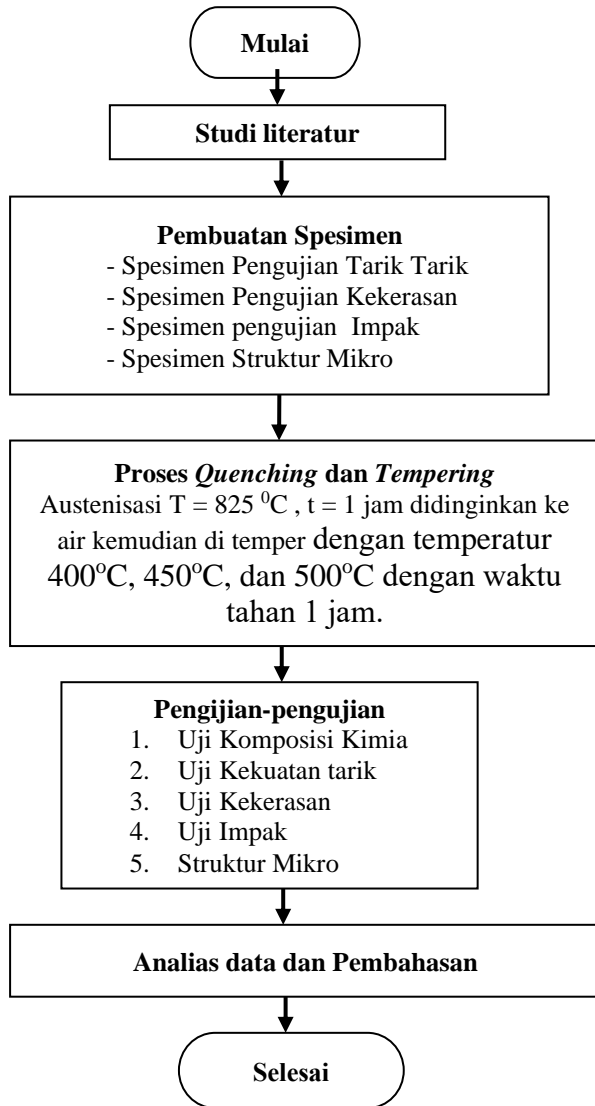
Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini didapatkan manfaat sebagai berikut :

1. Untuk acuan penelitian berikutnya utamanya pada proses *quenching* dan *tempering* pada baja ASSAB 709 M
2. Untuk penelitian yang relevan dapat dijadikan referensi.
3. Merupakan masukan untuk praktisi di bidang proses *quenching* dan *tempering*.

METODE PENELITIAN

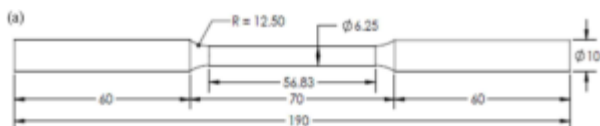
Pelaksanaan penelitian ini dilakukan mengikuti diagram alir penelitian sebagai berikut :



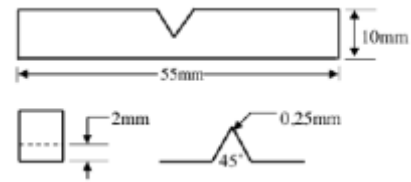
Gambar 1. Diagram alir penelitian

Bahan dan Material dan Ukuran Spesimen

Bahan spesimen menggunakan baja ASSAB 709 M yang mana ukuran spesimen-spesimen pengujian dibuat berdasarkan standar mesin atau peralatan yang digunakan yaitu : uji tarik (ASTM E8), dan uji impak ASTM E23) dengan menggunakan CNC.



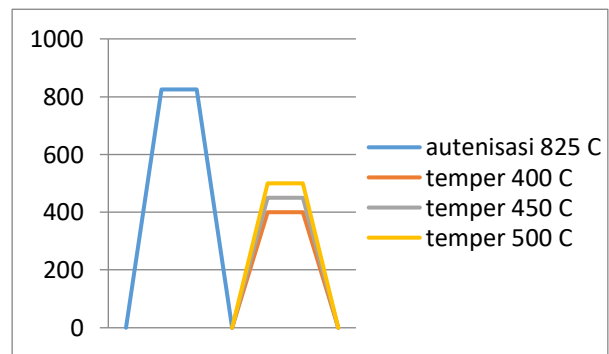
Gambar 2. Spesimen uji tarik ASTM E8 (Badaruddin, M., at al. 2019)



Gambar 3. Spesimen uji impak ASTM E23 (Alian, H., at al. 2019)

Proses Quenching dan Tempering

Proses perlakuan panas *quenching* dan *tempering* secara skematis ditunjukkan pada Gambar 4. berikut ini. Spesimen dipanaskan di dalam furnace sampai suhu *austenisasi* 825 °C ditahan 1 jam kemudian dicelup ke dalam air, kemudian di temper temperatur 400°C, 450°C, dan 500°C dengan waktu tahan 1 jam.



Gambar 4. Representasi skematis dari proses perlakuan panas *quenching* dan *tempering*

Pengujian-pengujian

Pengujian-pengujian yang dilakukan adalah uji komposisi kimia, pengujian tarik statis menggunakan mesin *MTS USA Landmark USA 100 kN*. Pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell* dan pengujian impak dilakukan menggunakan mesin impak *Charpy*. Pengamatan struktur mikro untuk mengungkapkan struktur mikro di etsa dengan 2% larutan nital pada spesimen sebelum dan sesudah *quenching* dan *tempering* pada mikroskop optik : *Measuring Microscope STM6-LM*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini data-data yang didapatkan berdasarkan dari pengujian rata-rata dari tiga spesimen

setiap variable penelitian. Material spesimen adalah baja ASSAB 709 M yang hasil uji komposisi kimia dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia baja ASSAB 709 M.

Unsur	Komposisi (%)	Unsur	Komposisi (%)
C	0,44	W	0,007
Si	0,23	Pb	<0,002
Mn	0,79	Sn	0,0007
P	0,015	Mg	<0,001
Cr	1,06	Zr	0,004
Mo	0,169	Bi	0,004
Al	0,013	Ce	0,007
Cu	0,013	Ta	0,068
Nb	<0,004	Zn	0003
Ti	0,0249	La	0,001
V	<0,0005	Fe	97,00

Temperatur austenisasi pada proses quenching ditentukan menggunakan algoritma *software Bhadeshia* dengan memasukkan persentasi unsur-unsur komposisi kimia diatas dan juga dilihat di diagram fasa Fe₃C.

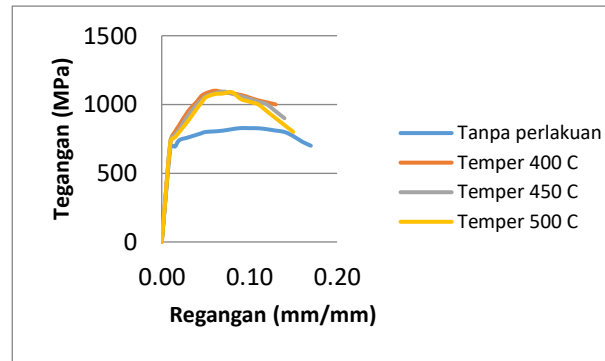
Pengujian Tarik

Tabel 2. Berikut ini menunjukkan hasil uji tarik yang menggunakan mesin Hasil pengujian tarik yang menggunakan mesin MTS USA Landmark 100 kN.

Tabel 2. Hasil uji tarik baja ASSAB 709 M

Material	E(GPa)	σ_y (MPa)	σ_{ult} (MPa)	e (%)
Sebelum Q & T	213,856	693,264	828,258	22,798
Q & T t=400°C	216,650	735,876	1099,878	21,087
Q & T t=450°C	216,414	734,452	1093,467	21,267
Q & T t=500°C	216,311	732,2782	1089,385	21,478

Gambar 5. menunjukkan kurva tegangan-regangan sebelum dan sesudah proses *quenching* dan *tempering* pada baja ASSAB 709 M. Modulus elastisitas (E) baja ditentukan dengan cara memplot kurva elastis linier dengan panjang garis segmen 20% dalam kisaran hubungan tegangan-regangan linier menggunakan metode regresi.



Gambar 5. Kurva tegangan-regangan baja ASSAB 709 M sebelum dan setelah proses *quenching* dan *tempering*.

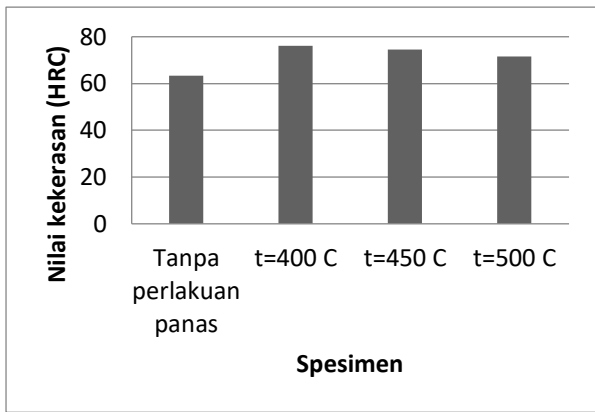
Metode offset 0,2% digunakan untuk menentukan kekuatan luluh (σ_y). Meskipun keuletannya menurun akibat proses *quenching*, kekuatan ultimit (σ_{ult}) dan kekuatan luluh (σ_y) meningkat setelah proses *quenching* dan *tempering*. Hal tersebut juga dapat dilihat pada Gambar 5 menggambarkan kekuatan ultimit pada masing-masing spesimen, dimana semakin rendah temperatur *tempering* nya semakin besar kekuatannya, yang dikarenakan makin cepat pendinginan makin tinggi kekuatannya (Meysami, R. 2016).

Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell*. Mesin uji kekerasan yang digunakan adalah *Rockwell Hardness Tester type RH-3N* buatan Tokyo Testing Machine.MFG.CO. Metode yang digunakan pada uji kekerasan ini adalah metode Rockwell yang indentornya kerucut intan, beban yang digunakan 150 kg.

Tabel 3. HRC spesimen sebelum dan setelah proses *quenching* dan *tempering*

Titik	F (kgf)	HRC Spesimen <i>Quenching</i> dan <i>Tempering</i>			
		Tanpa Perlakuan	<i>Quenching</i> dan <i>Tempering</i>		
			t=400°C	t=450°C	t=500°C
1	150	65,1	78	75	73
2	150	62,9	77	73	71
3	150	64,4	77	74,5	72,5
4	150	61,9	75,5	75	71
5	150	61,5	76	74,5	72
6	150	61	75	74	73,5
7	150	63	76	74	73
8	150	65,5	76	76	70
9	150	62	75	75,5	69
10	150	65	75	73	69
HRC rata-rata		63,3	76,1	74,5	71,5



Gambar 6. Grafik kekerasan baja ASSAB 709 M tanpa dan setelah quenching dan tempering.

Dari hasil uji kekerasan tersebut baja ASSAB 709 M yang tanpa perlakuan panas, kekerasannya adalah 63,25 HRC. Setelah diperlakukan panas quenching kemudian tempering mengalami kenaikan kekerasan yaitu t=400°C : 76,1 HRC, t=450°C : 74,4HRC, t=500°C : 71,4 HRC. Hal tersebut juga dapat dilihat pada kurva yang menggambarkan nilai kekerasan pada masing-masing spesimen, yang mana semakin tinggi temperatur tempering nya semakin turun kekerasannya, ini dikarenakan semakin lama pendinginan semakin turun kekerasannya (Meysami, R. 2016),.

Pengujian Impak

Pengujian impak dilakukan untuk mendapatkan energi yang diserap untuk mematahkan spesimen. Dua material yang mempunyai kekuatan yang sama dengan keuletan yang berbeda akan memerlukan energi perpatahan yang berbeda, yang mana bahan yang lebih ulet akan memerlukan energi perpatahan yang besar dan ketangguhannya lebih baik.

Pengujian impak dilakukan pada spesimen tanpa perlakuan dan setelah proses quenching dan tempering menggunakan mesin impak Charpy. Takikan sebesar V-45° dimana takikan membelakangi dari arah datangnya pendalum. Bentuk dan ukuran spesimen mengikuti ASTM E 23 (Gambar 2). Hasil pengujian impak diolah dengan persamaan berikut ini :

$$E_1 = P (D - D \cos \alpha) \dots\dots(1)$$

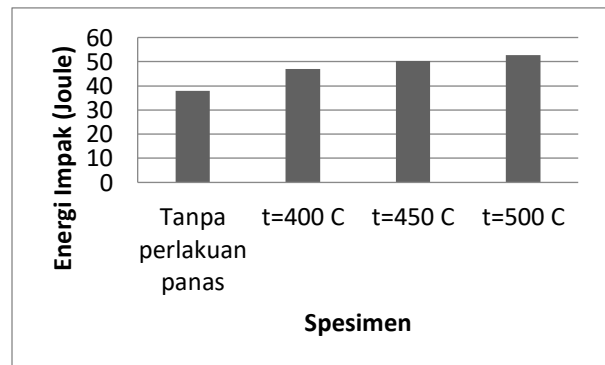
$$E_2 = P (D - D \cos \theta) \dots\dots(2)$$

$$E_{tot} = E1 - E2 \dots\dots(3)$$

Hasil data pengujian impak baja ASSAB 709 M tanpa perlakuan dan setelah proses quenching dan tempering ditabelkan dalam Tabel 4.

Table 4. Hasil pengujian impak

No.	Spesimen	E (Joule)	E rata-rata Rata-rata (Joule)
1.	Tanpa Perlakuan	36,784	37,955
2.	Tanpa Perlakuan	39,072	
3.	Tanpa Perlakuan	38,012	
4.	Q &T; t=400°C	46,102	46,864
5.	Q &T; t=400°C	47,247	
6.	Q &T; t=400°C	47,245	
7.	Q &T; t=450°C	48,554	50,255
8.	Q &T; t=450°C	52,151	
9.	Q &T; t=450°C	49,699	
10.	Q &T; t=500°C	52,151	52,774
11.	Q &T; t=500°C	53,295	
12.	Q &T; t=500°C	52,151	



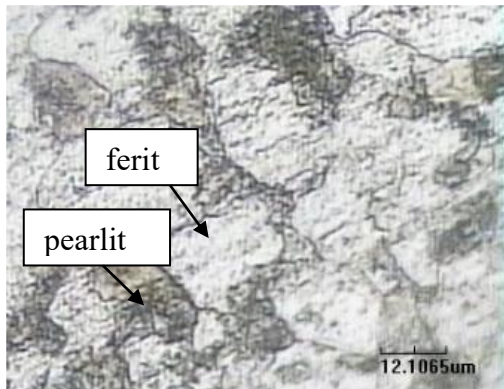
Gambar 7. Grafik energi impak tanpa perlakuan dan setelah quenching dan tempering baja ASSAB 709 M.

Berdasarkan hasil perhitungan data uji impak Tabel 4 dan Gambar 7 diatas terlihat ada perbedaan karakteristik ketangguhan baja ASSAB 709 M tanpa dan setelah quenching dan tempering dengan temperatur yang berbeda, dimana energi impak yang paling rendah adalah spesimen tanpa perlakuan panas 37,955 Joule dan yang terbesar terdapat pada spesimen yang di tempering pada temperatur 500°C yaitu 52,774 Joule. Dari data dan kurva diatas menunjukkan bahwa, semakin tinggi temperatur tempering, maka energi impaknya akan meningkat, dikarenakan semakin tinggi temperatur tempering semakin ulet baja tersebut ((Meysami, R. 2016).

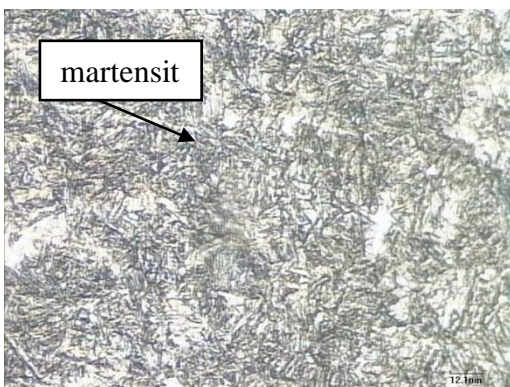
Hasil Pengamatan struktur mikro

Pengamatan struktur mikro ini dilakukan pada permukaan spesimen baja ASSAB 709 M yang tanpa perlakuan dan setelah proses *quenching* dan *tempering*. Etsa yang digunakan untuk baja karbon ini adalah larutan nital 3% (dengan komposisi 3 ml asamnitrat dan 97 ml alkohol). Hasil pengujian struktur mikro dapat dilihat pada Gambar 8 , 9, 10 dan 11.

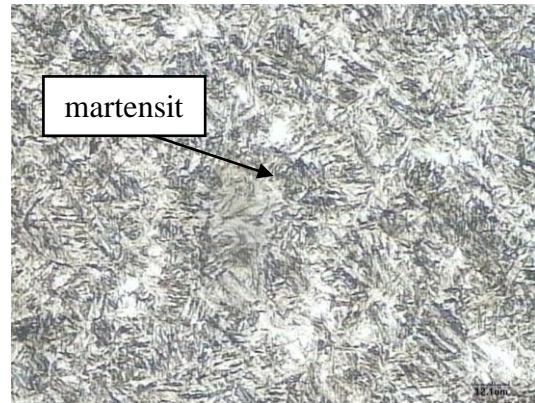
Daerah yang diamati pada pengujian struktur mikro ini adalah permukaan baja ASSAB 709 M sebelum dan sesudah menjalani proses *quenchin* dan *temper*. Larutan yang digunakan untuk melihat struktur mikro baja karbon adalah larutan nital 3% (dengan komposisi 3 ml asam nitrat dan 97 ml alkohol).). Di bawah ini adalah hasil pengujian struktur mikro pada spesimen yang telah di etsa.



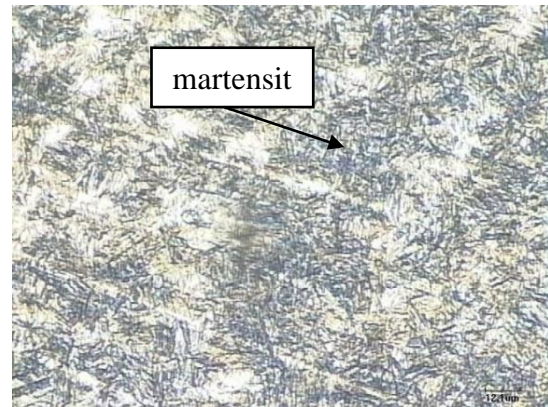
Gambar 8. Struktur mikro baja ASSAB 709 M tanpa perlakuan panas



Gambar 9, Struktur mikro ASSAB 709 M setelah di *quenching* dan *tempering* 400 °C



Gambar 10. Struktur mikro baja ASSAB 709 M setelah di *quenching* dan *tempering* 450 °C.



Gambar 11. Struktur mikro baja ASSAB 709 M setelah di *quenching* dan *tempering* 500 °C.

Struktur mikro baja ASSAB 709 M tanpa perlakuan panas ditunjukkan pada gambar 8 di terlihat ferit dan perlit. Ferit mempunyai sifat lunak dan ulet dan berwarna lebih terang. Pearlit mempunyai sifat lebih keras dibandingkan ferit dan pearlit berwarna lebih gelap. Setelah di *quenching* dan *tempering* akibat pemanasan sampai temperatur austenit 825 °C terjadi perubahan fasa austenit kemudian didinginkan dengan cepat terbentuk fasa martensit. Pada Gambar 9, Gambar 10, dan Gambar 11 sama-sama terbentuk fasa martensit hanya kehalusan butirannya saja yang berbeda, makin besar temperatur *tempering* makin kasar butiran yang terbentuk.

KESIMPULAN

Kekuatan dan kekerasan baja ASSAB 709 M setelah mengalami proses *quenching* dan *tempering* meningkat signifikan, yang mana semakin rendah temperatur *tempering* nya semakin besar kekuatan dan kekerasannya. Selain kekuatan dan kekerasan meningkat akibat proses *quenching* dan *tempering* baja ASSAB 709 M juga

energi impaknya meningkat dimana semakin tinggi temperatur tempering, maka energi impaknya akan meningkat.

Pengaruh proses *quenching* dan *tempering* yang dilakukan pada baja ASSAB 709 M terhadap struktur mikro nya setelah di *quenching* dan *tempering* akibat pemanasan sampai temperatur austenit 825 °C terjadi perubahan fasa austenit kemudian didinginkan dengan cepat terbentuk fasa martensit dan temperatur *tempering* mempengaruhi kehalusan butiran nya, semakin besar temperatur *tempering* semakin kasar butiran yang terbentuk.

DAFTAR PUSTAKA

- Alian, H., Hadi, Q., Vidian, F., Fereza, Y., Putra. E., (2020), Peningkatan Ketangguhan dan Ketahanan Fatik Siklus Rendah (*Low Cycle Fatigue*) Pada Baja ASSAB 709 M Melalui Proses *Normalizing*
- Alian, H., Hadi, Q., Vidian, F., Sugiarto, Alexi, (2019), Peningkatan Sifat Mekanik Pada Baja ASSAB 709 M Melalui Proses *Austempering*.
- ASTM E606, 2004, Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing, West Conshohocken, United States.
- ASTM E8, 2004, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, West Conshohocken, United States.
- Chakrabarty, I., (2017), Heat Treatment of Cast Irons, *Comprehensive Materials Finishing*, 2, pp. 246-287
- Ding, R.D.K. Misra, Z.H. Cai, (2017), Microstructure-mechanical property relationship and austenite stability in medium-Mn TRIP steels: The effect of austenite-reverted transformation and quenching-tempering treatments *Materials Science and Engineering A*, 682, pp. 211-219.
- Feng, J., Frankenbach, T., Wettlaufer, M., (2017), Strengthening 42CrMo4 steel by isothermal transformation below martensite start temperature, *Materials Science & Engineering A*, 683, pp. 110–115.
- Gerstenmeyer, M., F. Zanger, V. Schulze, 2018, Influence of Complementary Machining on fatigue strength of AISI 4140, *CIRP Annals*, 67(1), pp. 583-586.
- Khani Sanij, S.S. Ghasemi Banadkouki, A.R. Mashreghi, M. Moshrefifar, (2012), The effect of single and double quenching and tempering heat treatments on the microstructure and mechanical properties of AISI 4140 steel, *Materials & Design*, 42, pp. 339-346.
- Kim, K. W, C.H. Lee, J.Y. Kang, T.H. Lee, K. M. Cho, K.H. Oh, (2016), Control of retained austenite morphology through double bain C_>Hitic transformation, *Materials Science and Engineering A*, 673, pp. 557-561.
- Kovacı, H., A. F. Yetim, Ö. Baran, A. Çelik, (2016), Fatigue crack growth behavior of DLC coated AISI 4140 steel under constant and variable amplitude loading conditions, *Surface and Coatings Technology*, 304, pp. 316-324.
- Kovacı, H., A. F. Yetim, Ö. Baran, A. Çelik, (2016), Fatigue crack growth analysis of plasma nitrided AISI 4140 low-alloy steel: Part 1-constant amplitude loading, *Materials Science and Engineering A*, 672, pp. 257-264.
- Kovacı, H., A. F. Yetim, Ö. Baran, A. Çelik, (2016), Fatigue crack growth analysis of plasma nitrided AISI 4140 low-alloy steel: Part 2-Variable amplitude loading and load interactions, *Materials Science and Engineering A*, 672, pp. 265-275.
- Lang, K.H., M. Korn, T. Rohm, (2016), Very High Cycle Fatigue Resistance of the Low Alloyed Steel 42CrMo4 in Medium- and High-Strength Quenched and Tempered Condition, *Procedia Structural Integrity*, 2, pp. 1133-1142.
- Li, Z.C., Ding, H., Misra, R.D.K, (2017), Microstructure-mechanical property relationship and austenite stability in medium-Mn TRIP steels: The effect of austenite-reverted transformation and quenching-tempering treatments *Materials Science and Engineering A*, 682, pp. 211-219.
- Meysami, R. Ghasemzadeh, S. H. Seyedein, M. R. Aboutalebi, (2016), An investigation on the microstructure and mechanical properties of direct-quenched and tempered AISI 4140 steel, *Materials & Design*, 31(3), pp. 1570-1575.
- Mordyuk, B.N., G. I. Prokopenko, P. Yu. Volosevich, L. E. Matokhnyuk, A.V. Byalonovich, T.V. Popov, (2016), Improved fatigue behavior of low-carbon steel 20GL by applying ultrasonic impact treatment combined with the electric discharge surface alloying, *Materials Science and Engineering A*, 659, pp. 119-129.
- Nagarajan, S. K. Putatunda, J. Boileau, Fatigue crack growth behavior of austempered DIN 42CRMO4 Steel with dissolved hydrogen, *Metals*, 7(11), 2017, pp. 2-18.
- Purnadi, (2017), Evaluasi sifat fatik siklus rendah baja AISI 4140 yang dianil, *Skripsi, Jurusan Teknik Mesin-Universitas Lampung*.
- Vatavuk, G.E. Totten, J.E. Nucci, L. L. Albano, L.d. Canale, Comparative impact behavior of high-C steel after conventional quenching, tempering, and austempering," *Materials Performance and Characterization*, 5(1), 2016, pp. 227-238.