

Peningkatan ketangguhan dan ketahanan fatik siklus rendah pada baja ASSAB 709 M melalui proses *annealing*

Improved toughness and low cycle fatigue resistance in ASSAB 709 M steel through the annealing process

Helmy Alian^{1,*}, Nukman², M. Badaruddin³, Agung Mataram⁴, Qomarul Hadi⁵

^{1,2,4,5}Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya, Palembang – Indonesia
³Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung, Bandar Lampung - Indonesia
*Email: helmyalian@ft.unsri.ac.id

Abstrak

Baja yang diaplikasi pada komponen-komponen mesin karena mengalami kondisi kerja yang berat dan adanya beban siklik yang lama harus memiliki kekuatan tinggi dan daktilitas yang tinggi. Penelitian ini, baja ASSAB 709 M diberi perlakuan panas *annealing* untuk memperbaiki sifat mekanik, perilaku fatik siklus rendah dan ketangguhan baja tersebut. Proses *annealing* dengan memanaskan spesimen di dalam furnace sampai temperatur austenisasi 825 °C, dengan waktu tahan 30 menit kemudian didinginkan perlahan sampai temperatur kamar. Sebelum dan sesudah proses *annealing*, dilakukan uji tarik, uji fatik siklus rendah (low cycle fatigue) dengan memvariasikan amplitudo 0,0035 - 0,0110, dampak, struktur mikro menggunakan optical microscopy (OM) dan permukaan fraktur dari spesimen dianalisis dengan menggunakan scanning electron microscopy (SEM). Struktur mikro baja ASSAB 709 M mengalami perubahan setelah *annealing*, dari banyaknya martensite lath menjadi terbentuknya pearlite and ferrite.. Perubahan mikrostruktur tersebut menyebabkan perubahan perilaku pada amplitudo regangan rendah dan tinggi akibat proses *annealing*. Peningkatan tegangan tekan dan peningkatan ketahanan kelelahan siklus rendah (low cycle fatigue) dari baja yang di *annealing* tergantung pada amplitudo regangan yang diterapkan.

Kata kunci: *annealing*, fatik, dampak, ketangguhan.

Abstract

Steel that is applied to machine components due to severe working conditions and prolonged cyclic loading must have high strength and high ductility. In this research, ASSAB 709 M steel was treated with heat *annealing* to improve the mechanical properties, low cycle fatigue behavior and toughness of the steel. *Annealing* process by heating the specimen in the furnace to an austenizing temperature of 825 C, with a holding time of 30 minutes and then slowly cooled to room temperature. Before and after the *annealing* process, a tensile test was carried out, a low cycle fatigue test with varying amplitude 0.0035 - 0.0110, impact, microstructure using optical microscopy (OM) and fracture surfaces of the specimens were analyzed using scanning electrons. microscopy (SEM). The microstructure of ASSAB 709 M steel underwent a change after *annealing*, from the abundance of martensite lath to the formation of pearlite and ferrite. These microstructural changes caused behavioral changes at low and high strain amplitudes due to the *annealing* process. The increase in compressive stress and the increase in low cycle fatigue resistance of the annealed steel depend on the amplitude of the applied strain.

Keywords : *annealing*, fatigue, impact, toughness.

1. PENDAHULUAN

Baja ASSAB 709 M mengandung karbon 0,4 wt.% dan tergolong baja komersil paduan rendah yang banyak diaplikasikan pada komponen mesin yang mengalami regangan besar seperti, batang penghubung, roda gigi, spindel, pinion, poros pompa, dan ring gear. Oleh karena itu, selama aplikasinya baja ini harus memiliki keuletan yang tinggi, serta ketangguhan (*toughness*), dan tahan terhadap fatik siklus rendah (*low cycle fatigue*) yang cukup. Produksi manufaktur baja ASSAB 709 M secara konvensional menggunakan metode quenching dan tempering (*Q&T*) yang umumnya menghasilkan fasa martensit temper (Sanij 2012, Meysami. 2016, Chang 2012).

Terbatasnya ketersediaan bahan baku, tingginya biaya produksi dan operasi dalam memenuhi kebutuhan tersebut, menjadi alasan utama para peneliti untuk mengembangkan beberapa metode teknis untuk meningkatkan umur kelelahan bahan melalui *nitriding* (Kovaci 2016, Sengul dan Celik 2011), *carburizing* (Boniardi 2016) dan *shot peening* (Menig 2012). Namun penerapan metode tersebut dapat memicu turunya daktilitas baja.

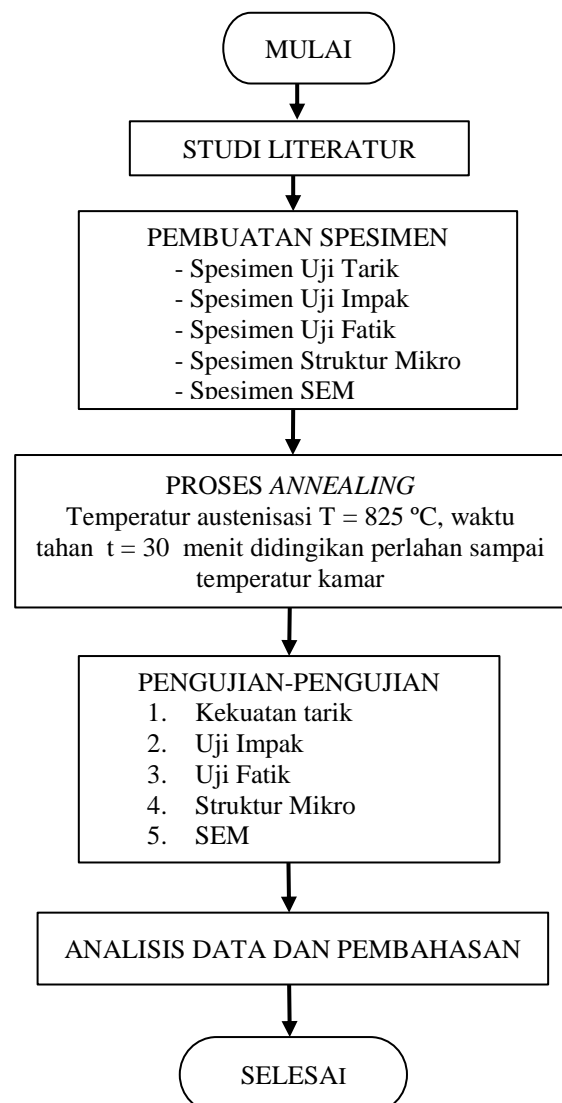
Ada beberapa cara untuk memperoleh kekuatan tinggi baja ASSAB 709 M dengan keuletan yang besar dan rasio kekuatan yang relatif rendah yaitu melalui rekayasa butir dan memasukkan fasa lunak ferit ke dalam struktur mikro martensit tanpa temper untuk menghasilkan fasa bainit (Feng et al 2017). Proses austempering telah dilakukan (Chakrabarty, 2017) namun masih belum meningkatkan ketahanan fatik yang berarti. Perubahan mikrostruktur secara signifikan mempengaruhi tingkat pertumbuhan retak fatik dan ambang batas kelelahan (Nagarajan 2017, Nagarajan dan Putatunda, 2014). Dalam beberapa tahun terakhir, beberapa peneliti lebih berminat untuk mengembangkan proses austempering baja AISI 4140 sebagai pengganti proses perlakuan panas : austenitizing, quenching dan tempering.

Penelitian yang telah dilakukan melalui proses *austempering* baja ASSAB 709 M (Helmy et al 2019) dan proses *normalizing* (Helmy et al 2020) yang hasilnya kekuatan tariknya masih memadai namun ketahanan fatik nya masih rendah. Belum banyak informasi yang tersedia tentang ketangguhan dan ketahanan terhadap fatik siklus rendah baja ASSAB 709 M yang dihasilkan dari hasil proses *annealing*. Oleh karena itu, akan dilakukan penelitian secara komprehensif terhadap ketangguhan (*toughness*) dan ketahanan terhadap fatik siklus rendah (*low cycle fatigue*) baja ASSAB 709 M dengan merubah struktur mikro melalui

proses *annealing*. Adapun tujuan penelitian adalah mengetahui pengaruh proses *annealing* yang dilakukan pada baja ASSAB 709 M terhadap ketangguhan dan ketahanan fatik siklus rendah; kekuatan tariknya dan mengetahui perubahan struktur mikro serta permukaan patahan akibat proses *annealing*.

2. METODOLOGI PENELITIAN

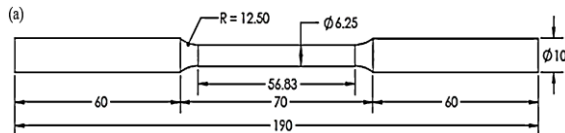
Penelitian ini dilakukan mengikuti diagram alir seperti pada Gambar 1 :



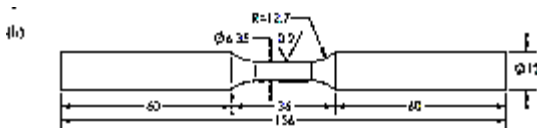
Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.1. Material dan Pembuatan Spesimen

Material yang digunakan untuk spesimen adalah baja ASSAB 709 M. Spesimen-spesimen uji dibuat mengikuti standar mesin/peralatan yang akan digunakan dengan menggunakan mesin *Computer Numerical Control (CNC)*. Pengujian tarik dan fatik siklus rendah menggunakan mesin *MTS Lanmark USA* dimana standar spesimen untuk uji tarik (*ASTM E8*) dan uji fatik siklus rendah (*ASTM E 606*) seperti Gambar 2 dan Gambar 3.

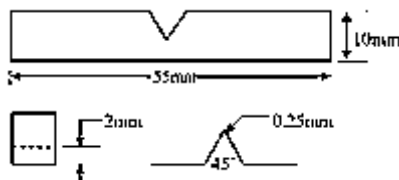


Gambar 2. Spesimen uji tarik ASTM E8



Gambar 3. Spesimen fatik siklus rendah (*low cycle fatigue*) ASTM E606

Pengujian impact menggunakan mesin impact Charpy yang spesimen nya mengikuti standar *ASTM E23* seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Spesimen uji impact ASTM E23

2.2 Proses Annealing

Spesimen baja ASSAB 709 M dipanaskan sampai temperatur austenisasi 825 °C dengan waktu tahan 30 menit di dalam *furnace*, kemudian didinginkan perlahan sampai temperature kamar.

2.3. Pengujian-pengujian

Uji komposisi kimia dilakukan untuk mendapatkan temperatur austenisasi menggunakan algoritma software Bhadeshia dan juga akan dilihat diagram fasa kesetimbangan Fe₃-C. Pengujian tarik dan uji fatik siklus rendah (*low cycle fatigue*) menggunakan mesin *MTS Landmark 100 kN USA*. Pengujian impact pada spesimen sebelum dan sesudah *annealing* menggunakan mesin impact Charpy.

Observasi struktur mikro dilakukan pada spesimen sebelum dan sesudah proses *annealing* di etsa dengan 2% larutan nital untuk mengungkapkan pengamatan struktur mikro di bawah mikroskop optik : *Measuring Microscop STM6-LM*. Pengamatan an fraktografi untuk melihat fraktur pada patahan uji *low cycle fatigue* menggunakan *Scanning Electron Microscopy (SEM)*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi kimia baja ASSAB 709 M ditunjukkan pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Komposisi kimia baja ASSAB 709 M

Unsur	Komposisi (%)	Unsur	Komposisi (%)
C	0,442	W	0,0077
Si	0,293	Pb	<0,002
Mn	0,739	Sn	0,00079
P	0,0135	Mg	<0,001
S	0,0042	As	0,003
Cr	1,06	Zr	0,0042
Mo	0,169	Bi	0,0044
Ni	0,0506	Ca	0,00058
Al	0,0153	Ce	0,0071
Co	0,0086	Te	0,0026
Cu	0,0133	Ta	0,0686
Nb	<0,004	Zn	00034
Ti	0,0249	La	0,0018
V	<0,0005	Fe	97

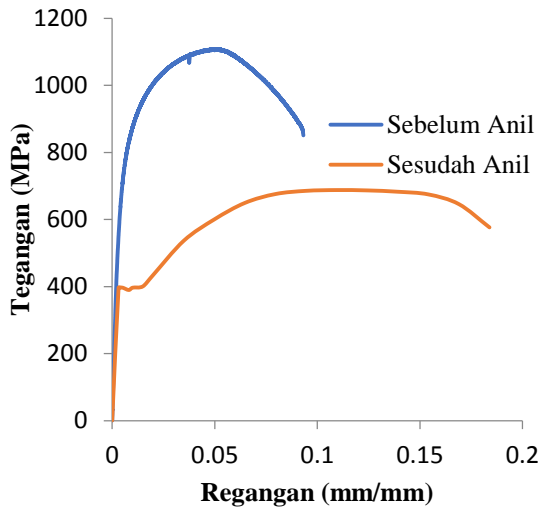
Hasil uji komposisi digunakan untuk menentukan temperatur austenisasi menggunakan algoritma software Bhadeshia yang digunakan untuk proses *annealing*.

3.1. Hasil Pengujian Tarik

Hasil pengujian tarik yang menggunakan mesin *MTS Landmark 100 kN* dapat dilihat pada Table 2.

Tabel 2. Hasil uji tarik baja ASSAB 709 M

Hasil Uji Tarik	Sebelum Annealing	Setelah Annealing
E(GPa)	215,31	206,45
σ_y (MPa)	735,44	396,65
σ_{ult} (MPa)	1097,85	687,786
e (%)	21,40	28,35



Gambar 5. Kurva tegangan vs regangan baja ASSAB 709 M sebelum dan sesudah *annealing*

Kurva tegangan-regangan untuk *baja ASSAB 709 M* sebelum dan sesudah *annealing* digambarkan pada Gambar 5. Kekuatan luluh, σ_y , dihitung menggunakan metode offset 0,2%. Meskipun perlakuan *annealing* *baja ASSAB 709 M* mengurangi kekuatan ultimit (σ_{ult}) dan kekuatan luluh (σ_y) *baja*, keuletan dan regangan plastis meningkat secara signifikan terlihat pada kurva sesudah *annealing* dimana regangannya meningkat.

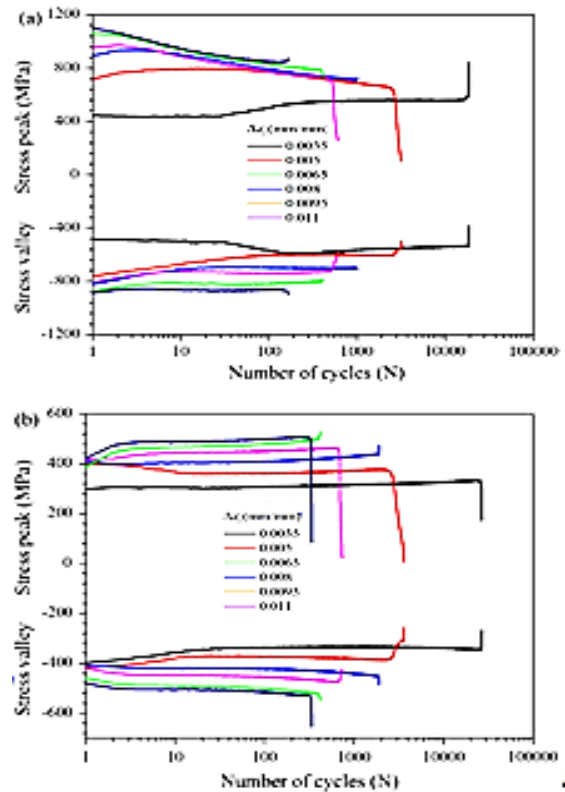
3.2. Hasil Pengujian Fatik Siklus Rendah (*Low Cycle Fatigue*)

Hasil pengujian fatik siklus rendah (LCF) yang menggunakan mesin *MTS Landmark 100 kN* sepekerja pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil uji fatik siklus rendah *baja ASSAB 709 M* tanpa anil (TA) dan sesudah anil (SA).

Spesimen	$\Delta \epsilon_t$ (mm/mm)	E (GPa)	N_f (cycles)	σ_a (MPa)
TA-1	0.0035	207.484	21.490	559.50
TA-2	0.0050	207.082	2454	633.00
TA-3	0.0065	208.756	1385	687.00
TA-4	0.0080	208.242	823	738.50
TA-5	0.0095	207.735	357	776.50
TA-6	0.0110	207.846	197	803.00
SA-1	0.0035	207.101	26,858	332.96
SA-2	0.0050	202.070	3606	380.94
SA-3	0.0065	202.059	1912	436.52
SA-4	0.0080	198.269	733	464.49
SA-5	0.0095	200.249	415	497.86
SA-6	0.0110	195.458	336	515.89

Dari Tabel 3 didapat nilai rata-rata modulus elastisitas untuk *baja ASSAB 709 M* sebelum dan sesudah *annealing* masing-masing adalah 207,86 GPa dan 200,87 GPa. Puncak tegangan *baja*



Gambar 6. Tegangan siklik – Jumlah siklus selama pengujian fatik siklus rendah (a) sebelum *annealing* (b) setelah *annealing* (*MTS Landmark 100 kN*)

ASSAB 709 M meningkat dengan amplitudo regangan (Gambar 6a).

Sebaliknya, sesudah *annealing* menunjukkan tegangan siklik yang identik pada amplitudo regangan yang lebih tinggi (Gambar 6b). Pada amplitudo regangan yang lebih rendah, perbedaan tegangan siklik pada tegangan puncak (ketegangan) dan tegangan lembah (tekanan) spesimen SA1 dan dengan spesimen TA1 adalah sekitar 125 MPa dan sekitar 90 MPa. Spesimen TA1 menunjukkan perilaku pelunasan siklik ringan terus menerus selama 30 siklus, dan perilaku pengerasan siklik progresif diamati dari siklus ke-1000 sampai *baja* mengalami pengerasan siklik dan akhirnya patah.

Gambar 6a dengan jelas menunjukkan perilaku pengerasan siklik awal dan pelunasan siklik berkelanjutan dari *baja ASSAB 709 M* yang sebelum di anil, yang sangat berkorelasi dengan porsi martensit yang relatif tinggi dalam struktur mikro awal (Gambar 8a). Perilaku serupa umumnya ditemukan di banyak *baja karbon* menengah, seperti *baja fase ganda ferrite-martensit* (Paul et al 2015), *baja CrMoV* (Sigh et al 2019) dan *baja bainitic bebas karbida* (Kang et al 2016), struktur mikro yang memiliki fase martensit lebih dari fase ferit. Sebaliknya, *baja ASSAB 709 M* dalam kondisi *annealing*, spesimen SA-1 pada awal menunjukkan pengerasan siklik, dan dengan

pembebanan seterusnya spesimen SA-1 (Gambar 6b) mengalami pelunakan siklik dalam beberapa siklus dan kemudian mengalami pengerasan siklik yang stabil sampai runtuh dengan amplitudo regangan yang meningkat.

3.3. Hasil Pengujian Impak

Pengujian impak pada spesimen sebelum dan sesudah annealing yang dilakukan menggunakan mesin impak Charpy. Adapun metode uji impak yang dipakai pada pengujian ini adalah metode Charpy dengan luas penampang lintang bujur sangkar spesimen 10 x 10 mm dan dengan sudut takikan sebesar $V-45^\circ$ dengan posisi takikan membelakangi dari arah datangnya pendulum.

Hasil pengujian impak diolah dengan persamaan berikut:

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

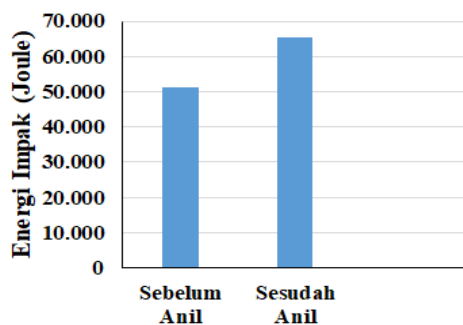
$$E_2 = P (D - D \cos \theta) \quad \dots\dots(2)$$

$$E_{Tot} = E_1 - E_2 \quad \dots\dots(3)$$

Semua hasil dari pengolahan data pengujian impak terhadap spesimen Baja ASSAB 709 M sebelum dan sesudah proses annealing disajikan dalam Tabel 4 :

Tabel 4. Hasil pengujian impak

No	Spesimen	E (Joule)	W (Joule)	E Rata (Joule)	W Rata-rata (Joule)
1.	Sebelum Annealing	56.870	0.711		
2.	Sebelum Annealing	51.224	0.640	51.253	0.640
3.	Sebelum Annealing	45.551	0.569		
4.	Sesudah Annealing	68.804	0.871		
5.	Sesudah Annealing	66.471	0.880	65.553	0,849
6.	Sesudah Annealing	61.384	0.797		

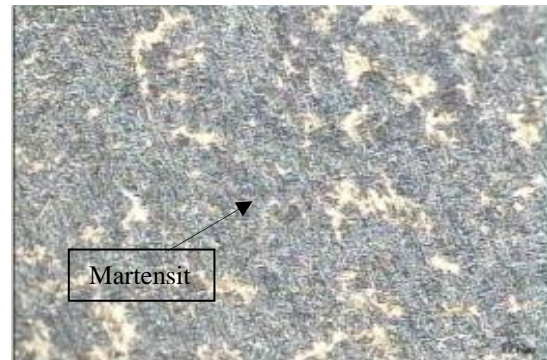


Gambar 7. Grafik energi impak baja ASSAB 709 M sebelum dan sesudah annealing

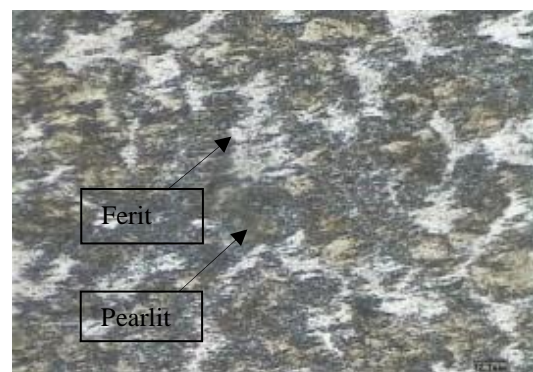
Dari hasil perhitungan data uji impak Tabel 4. dan Gambar 7 terdapat perbedaan karakteristik ketangguhan dari spesimen baja ASSAB 709 M sebelum dan sesudah proses annealing dimana adanya penambahan nilai energinya dari 51,253 menjadi 65,553 J. Meningkatnya ketangguhan tersebut akibat proses annealing, yang mana makin besarnya luas daerah dibawah kurva sesudah annealing (Gambar 5).

3.4. Pengamatan Struktur Mikro

Daerah yang diamati pada pengujian struktur mikro ini adalah permukaan baja ASSAB 709 M sebelum dan sesudah menjalani proses annealing. Larutan yang digunakan untuk melihat struktur mikro baja karbon adalah larutan nital 3% (dengan komposisi 3 ml asam nitrat dan 97 ml alkohol). Gambar 8 dan 9 adalah hasil pengujian struktur mikro pada spesimen yang telah di etsa. Dari pengamatan pengujian struktur mikro ini spesimen sebelum di annealing terdapat struktur martensit yang membuktikan bahwa material baja ASSAB 709 M yang digunakan pada penelitian ini telah dilakukan proses quenching pada saat produksi untuk meningkatkan kekuatan baja karena banyak digunakan dalam sistem konstruksi.



Gambar 8. Struktur mikro baja ASSAB 709 M sebelum annealing.

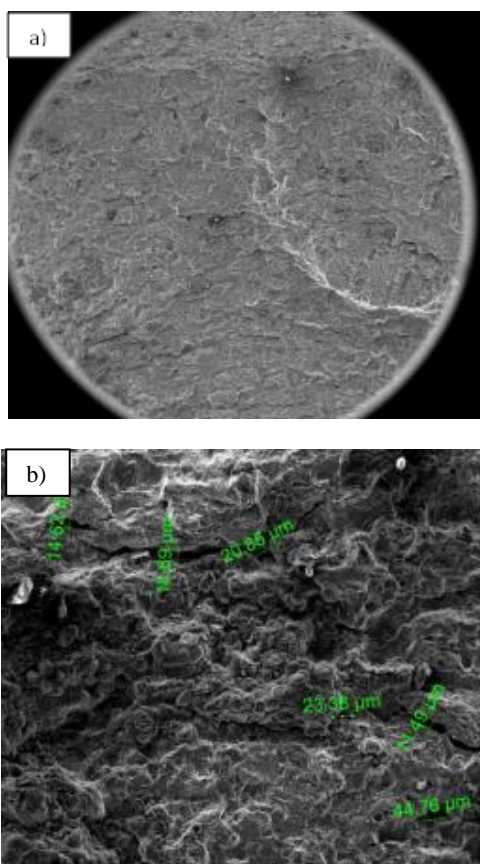


Gambar 9. Struktur mikro baja ASSAB 709 M setelah annealing.

Struktur mikro pada benda uji yang telah dilakukan proses *annealing*, terjadi perubahan fasa dimana terbentuk pearlit dan ferit. Ferit berwarna lebih terang, karena memiliki kandungan karbon rendah, ferit mempunyai sifat lunak dan ulet. Sedangkan pearlit lebih gelap warnanya, karena mengandung lebih banyak kandungan karbon dari pada ferit, pearlit bersifat kuat dan keras. Jelas bahwa perubahan mikrostruktur yang disebabkan oleh perlakuan annealing baja ASSAB 709 M (Gambar 9) secara signifikan mempengaruhi kekuatan mekanik baja, daktilitas ferit akan meningkatkan daktilitas baja ASSAB 709 M. Selain itu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 9, ketebalan relatif dari lapisan ferit dalam struktur mikro adalah salah satu alasan untuk daktilitas yang relatif tinggi dari baja yang di *annealing*.

3.5. Pengamatan Fraktografi

Fraktografi SEM pada Gambar 11a dan b menampilkan permukaan patahan dari spesimen uji Low Cycle Fatigue (LCF), menunjukkan partikel sementit berbentuk bulat dan pipih didekat permukaan patahan. Partikel sementit bulat-bulat



Gambar 11. Pemukaan patahan setelah LCF baja ASSAB 709 M

dengan karbon dapat bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi, yang dapat berkontribusi

pada pengerasan siklik awal untuk beberapa siklus pada amplitudo regangan rendah. Namun, sementit bulat yang secara acak di daerah cluster kecil tidak dapat secara efektif menahan gerakan dislokasi kompleks selama deformasi siklik regangan (Zhou Q et al 2015).

Selain itu, regangan plastis kecil yang terlokalisasi dan tegangan tinggi yang terkonsentrasi pada fase martensit diyakini menyebabkan pembentukan retakan mikro yang cepat (Cieślak BA et al 2019); dengan demikian, banyak sub-retak terbentuk pada batas ferit-martensit seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 11b yang mempercepat perambatan retak

4. KESIMPULAN

Ketangguhan dan ketahanan fatik siklus rendah (*low cycle fatigue*) setelah proses *annealing* pada baja ASSAB 709 M mengalami peningkatan yang signifikan. Daktilitas baja tersebut meningkat setelah mengalami *annealing* namun kekuatan tariknya mengalami penurunan. Struktur mikro baja ASSAB 709 M mengalami perubahan akibat proses *annealing*, dimana sebelum *annealing* banyak fasa martensit dan setelah *annealing* banyak pearlit dan ferit yang terbentuk. Permukaan patahan terdapat banyak retak-retak yang terbentuk pada batas ferit-martensit yang akan mempercepat perambatan retak.

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., Saputro, D., (2018), Pengaruh perlakuan panas Quenching dan tempering Terhadap kekuatan tarik, bending, fatik dan struktur mikro pada baja AISI 6145 yg akan digunakan sebagai pegas daun.
- Badaruddin, M., Sugianto, H. Wardonoa, Andokob, C.J. Wangc, A.K. Rivaid, (2019), Improvement of low-cycle fatigue resistance in AISI 4140 steel by annealing treatment, International Journal of Fatigue
- Cieślak BA, Korálnik M, Kuziak R, Brynk T, Zygmunt T, Mizera J. (2019) Low-cycle fatigue behaviour and microstructural evolution of pearlitic and bainitic steels. Mater Sci Eng A;747:144–53. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.043>.
- Chakrabarty, I., (2017), Heat Treatment of Cast Irons, Comprehensive Materials Finishing, 2, pp. 246-287
- 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.
- Kang J, Zhang FC, Long XY, Lv B. (2016) Low cycle fatigue behavior in a medium-carbon-carbide-free bainitic steel. *Mater Sci Eng A*;666:88–93. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.077>.
- 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.
- 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.
- Mordyuk, B.N., G. I. Prokopenko, P. Yu. Volosevich, L. E. Matokhnyuk, A.V. Byalovich, 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.
- Paul SK, Stanford N, Hilditch T. (2015) Effect of martensite volume fraction on low cycle fatigue behaviour of dual phase steels: experimental and microstructural investigation. *Mater Sci Eng A* ;638:296–304. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.04.059>.
- Purnadi, (2017), Evaluasi sifat fatik siklus rendah baja AISI 4140 yang dianil, Skripsi, Jurusan Teknik Mesin-Universitas Lampung.
- Singh V, Raju PVSS, Namboodhiri TKG, Rao PR. (2009) Low cycle fatigue behaviour of a low-alloy high-strength steel. *Int J Fatigue*;12:289–92. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(90\)90457-P](https://doi.org/10.1016/0142-1123(90)90457-P).
- Zhou Q, Qian L, Meng J, Zhao L, Zhang F. Low-cycle fatigue behavior and microstructural evolution in a low-carbon carbide-free bainitic steel. *Mater Des* 2015;85:487–96. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.172>.