

Pengaruh Proses Austempering Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja AISI 4140

Purnomo¹, M. Badaruddin^{2*}, Sugiyanto³, Zulhanif⁴, dan Nafrizal⁵

¹ Postgraduate student at the Magister Study Program of the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Lampung.

^{2,3,4,5} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Lampung

*Corresponding author: mbruddin@eng.unila.ac.id

Abstract

This research aims to determine the influence of austempering treatment on the mechanical properties and microstructure of AISI 4140 steel. Tensile, impact, and hardness specimens were prepared from the round bar AISI 4140 steel with a diameter of 16 mm. All specimens were subjected to annealing heat treatment by heating in the electrical furnace at 800 °C for 2 hour and later cooled in the furnace until the specimen's temperature reached room temperature. After annealing treatment, all specimens were ultrasonically washed using acetone. Furthermore, each specimen was given the austempering treatment by firstly heating at 800 °C in an induction coil heater for 10 minutes, then quickly immersed into a salt bath at 312 °C for 1 hour, and later cooled at room temperature. The hardness of the steel in annealing condition is about 24.33 HRC. The hardness of the steel in austempering increases significantly by about 72.63%. The impact energy of the annealed and austempered steels is about 17.33 joules and 37.67 joules, respectively. A similar increase in yield strength of the AISI 4140 steel from 316.6522 MPa (annealing condition) to 533.7562 MPa (austempering condition). The microstructures of the annealed steel are dominant pearlite and ferrite, then after austempering treatment, the bainite, martensite, and residual austenite phase are formed in the microstructure of the steel. The fractural surface of annealed steel is dominated by brittle and ductile fractures with relatively large grain sizes. On the other hand, by austempering treatment, the fractural surface morphologies of steel exhibit the tendentious-ductile type accompanied by an small amount of brittle fracture in fine grain size area.

Keywords: aisi 4140 steel, annealing, austempering, bainite.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perlakuan austempering terhadap sifat mekanik dan struktur mikro baja AISI 4140. Benda uji tarik, impak, dan kekerasan dibuat dari baja tulangan bulat AISI 4140 dengan diameter 16 mm. Semua spesimen mengalami perlakuan panas anil dengan cara memanaskan dalam tanur listrik pada suhu 800°C selama 2 jam dan kemudian didinginkan dalam tanur sampai suhu benda uji mencapai suhu kamar. Setelah perlakuan anil, semua benda uji dicuci secara ultrasonik menggunakan aseton. Selanjutnya masing-masing benda uji diberi perlakuan austemper dengan terlebih dahulu dipanaskan pada suhu 800°C dalam pemanas koil induksi selama 10 menit, kemudian segera direndam dalam bak garam cair suhu 312°C selama 1 jam, kemudian didinginkan pada suhu kamar. Kekerasan baja dalam kondisi anil sekitar 24.33 HRC. Kekerasan baja dalam austemper meningkat secara signifikan sekitar 72.63%. Energi impak baja anil dan baja austemper masing-masing sekitar 17.33 joule dan sekitar 37.67 joule. Peningkatan yang serupa pada kekuatan luluh baja AISI 4140 dari 316.65 MPa (kondisi anil) menjadi 533.76 MPa (kondisi austemper). Struktur mikro baja yang dianil adalah dominan perlit dan ferit, kemudian setelah dilakukan perlakuan austemper, fasa bainit, martensit, dan austenit bisa terbentuk pada struktur mikro baja. Permukaan patahan baja anil didominasi oleh patahan getas dan ulet dengan ukuran butir relatif besar. Di sisi lain, dengan perlakuan austempering, morfologi permukaan patahan baja menunjukkan tipe kecenderungan ulet disertai dengan sejumlah kecil patah getas di area ukuran butiran halus.

Kata kunci: baja aisi 4140, perlit, bainit, anil, austemper.

1. Pendahuluan

Baja merupakan material yang sangat banyak digunakan, hal ini mengingat baja mempunyai kekuatan tinggi, sifat mampu mesin yang baik, mudah dibentuk, dan juga sangat mudah diperoleh. Sifat baja

tergantung pada unsur yang terkandung didalamnya. Baja AISI 4140 banyak diaplikasikan pada komponen mesin seperti roda gigi, spindel, poros, sproket, pompa, rams, dan *ring gear*. Produksi baja AISI 4140 biasanya menggunakan metode *quenching* dan *tempering* (Q&T) yang

menghasilkan fasa martensit temper [1]. Proses kombinasi *quenching* dan *tempering* meningkatkan keuletan dan ketangguhan baja tetapi harus mengorbankan besarnya rasio kekuatan luluh dan kekuatan maksimum baja [2], yang menyebabkan kerugian produksi dan ekonomis [3]. Rekayasa butir untuk menghasilkan fasa bainit [4] adalah metode yang sekarang dikembangkan melalui *austempering*.

Baja dengan kadar karbon sekitar 0,40% dapat diaustemper dan akan menghasilkan kekuatan yang sama seperti baja yang dihasilkan dari proses *quenching* dan *tempering* (Q&T) [5]. Berbagai faktor termasuk transformasi fasa, austenit yang tertahan, media *quenching*, keseragaman dan proses pemilihan bahan secara langsung mempengaruhi dimensi akhir produk komponen mesin yang dihasilkan [6].

Dalam beberapa tahun terakhir, beberapa peneliti lebih berminat untuk mengembangkan proses *austempering* baja AISI 4140 sebagai pengganti proses perlakuan panas tradisional, yaitu *austenitizing*, *quenching* dan *tempering*. Pengaruh struktur mikro terhadap sifat mekanik baja paduan rendah telah menjadi subyek yang menarik bagi para peneliti melalui rekayasa mikrostruktur/metalurgi fisik untuk mendapatkan sifat mekanik baja yang sesuai dengan aplikasinya [7]. Untuk mendapatkan sifat baja AISI 4140 dengan kekuatan dan keuletan tinggi serta rasio kekuatan yang relatif rendah terhadap kekuatan maksimum baja, rekayasa mikrostruktur dapat dilakukan dengan menghambat pembentukan fasa martensit, dimana austenit langsung bertransformasi menjadi sedikit ferit dan perlit, serta struktur fasa bainit yang dominan.

Evolusi sifat mekanik baja paduan dengan kombinasi kekuatan, keuletan, dan ketangguhan yang lebih baik telah dihasilkan dari serangkaian proses austemper yang menghasilkan multi-fasa (bainit-ferit-perlit) dan fasa bainit yang dominan dengan butir sangat halus (*nano-bainite*) pada baja kekuatan tinggi paduan rendah [8]. Beberapa aplikasi industri,

terutama pada industri transportasi selalu menuntut baja berkekuatan tinggi yang lebih ekonomis dengan keuletan dan ketangguhan dampak yang baik untuk meringankan bagian struktur utama, sebagai upaya menghemat penggunaan bahan bakar fosil [9].

Penelitian sebelumnya menunjukkan perlakuan *quenching* baja AISI 4140 sedikit sensitif terhadap temperatur *tempering* yang menghasilkan struktur martensit karena rendahnya distribusi elemen-elemen pengotor S dan P yang terpisah dari batas butir austenit sebelumnya [10]. Proses perlakuan panas *quenching* ganda menghasilkan peningkatan yang signifikan dari kekuatan dan ketangguhan sebesar 40% dari penyempurnaan butir austenit dalam baja AISI 52100 [11]. Proses *austempering* sangat ditentukan oleh temperatur awal pembentukan martensit (M_s), di mana temperatur isothermal pembentukan bainit awal (B_s) harus lebih tinggi daripada M_s . Hal ini untuk memastikan transformasi austenit ke bainit akan menghasilkan struktur dominan fasa bainit yang halus. Namun, tujuan untuk mendapat struktur bainit cukup sulit karena dua faktor: (1) struktur mikro bainit dan martensit metastabil sulit diprediksi secara akurat karena komposisi elemen baja yang heterogen dan kompleks, sehingga struktur bainit umumnya kasar karena temperatur transformasi yang tidak tepat, (2) karakteristik termodinamika dan kinetik dari transformasi fasa austenit menjadi ferit, perlit dan bainit sulit untuk dirumuskan.

Oleh karena itu, perlakuan *austempering* lanjutan secara langsung perlu dilakukan untuk mendapatkan struktur bainit yang lebih halus untuk menghasilkan sifat mekanik dan keuletan baja yang tinggi. Regita Bendikiene, et. al [12] melakukan eksplorasi pada pengaruh perlakuan panas bainit satu dan dua tahap dalam baja karbon sedang (0.34C-1.52Mn-1.48Si-0.93Ni-1.15Cr-0.40Mo-0.71Al wt.%), dan membuat kesimpulan bahwa kombinasi yang lebih baik dari ketangguhan dampak dan kekuatan tarik dapat diperoleh melalui modifikasi mikro struktur: bainit-ferit dan

penahanan pembentukan austenit. [13] dari penelitiannya menyatakan bahwa ketangguhan impak dan kekuatan mekanik baja paduan 0.83C-1.43Si-1.90Mn-1.16Cr-1.28Co-0.32Mo-0.66Al (wt.%) dengan struktur nano bainit meningkat secara signifikan setelah 12 jam pada suhu 200°C dalam proses austemper dua tahap dibandingkan dengan austemper satu tahap pada 300°C. Mikrostruktur bainit yang dihasilkan dari proses austemper satu tahap lebih kasar dibandingkan dengan austemper dua tahap.

Dari penelitian yang akan dilakukan ini diharapkan akan mendapatkan material berstruktur mikro bainit yang memiliki sifat mekanik yang lebih baik, sehingga kebutuhan akan baja AISI 4140 nantinya lebih mudah diperoleh.

2. Metode Penelitian

2.1. Persiapan Material

Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium Teknik Material Universitas Lampung. Sedangkan pengujian dilakukan di Pusat Pengembangan Mineral, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Tanjung Bintang, Lampung Selatan. Benda uji dibuat dari material baja AISI 4140 diameter 16 mm, dengan komposisi kimia seperti yang tertera dalam Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi AISI 4140 [1].

Element	(w.t%)
Carbon (C)	0.443
Chromium (Cr)	1.150
Molibdenum (Mo)	0,198
Mangan (Mn)	0.805
Silicon (Si)	0.308
Sulfur (S)	0.010
Phosphor (P)	0.021
Nickel (Ni)	0.253

Dari beberapa literatur, didapat juga sifat-sifat mekanik baja AISI 4140 sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat mekanik baja AISI 4140 [20]

Properties	Metric	Imperial
Tensile strength	655 Mpa	95,000 psi
Yield strength	415 Mpa	60,200 psi
Bulk Modulus	140 Gpa	20,300 ksi
Shear Modulus	80 Gpa	11,600 ksi
Elastic Modulus	190-210 GPa	27,557-30,458 ksi
Elongation at break (50mm)	25.70%	25.70%
Hardness Rockwell C	13	13

2.2. Material dan Alat Uji

Pada penelitian ini, mesin yang digunakan untuk pembuatan benda uji adalah *CNC Feeler FTC350XL* dan *CNC Feeler VMP40A* buatan Taiwan. Proses austenisasi dengan menggunakan *furnace Nabertherm*. Media pendingin yang digunakan adalah larutan garam KNO_3 50% dan $NaNO_3$ 50%, dalam *saltbath* yang temperturnya terkontrol menggunakan termokopel *type K (XCIB from Omega USA)*. Suhu austemper yang dipilih adalah 312°C yang merupakan temperatur awal bainit (T_1). Untuk memperoleh nilai T_1 adalah dengan memasukkan komposisi kimia dari baja AISI 4140 ke dalam *software Bhadesia* [14], sehingga diperoleh temperatur awal bainit (T_{Bs}) sebesar 460°C. Kemudian dimasukkan kedalam ketentuannya, dimana $T_1 = 460^\circ C - 100^\circ C = 360^\circ C$. Pada penelitian ini digunakan temperatur austemper 312°C, dengan harapan mendapat bainit yang halus.

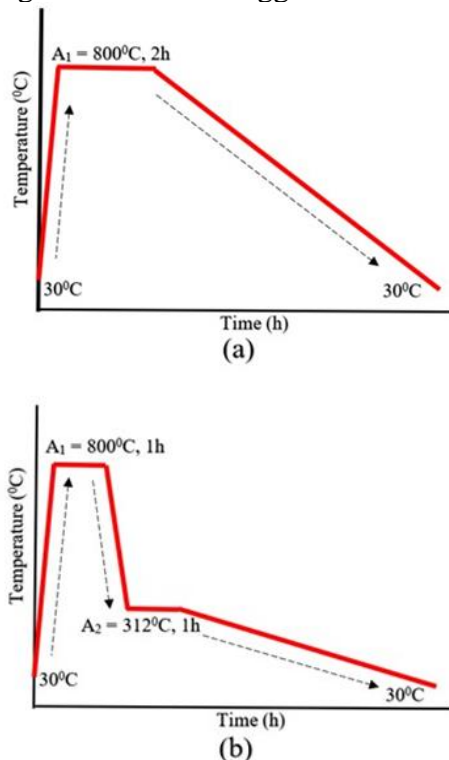
2.3. Proses Perlakuan Panas

Faktor-faktor yang mempengaruhi hasil dari perlakuan panas mencakup: suhu atau temperatur saat perlakuan panas (*heat treatment*), waktu penahanan (*holding time*) serta media pendinginan yang dipakai. Untuk mendapatkan hasil yang sesuai kebutuhan, dapat dilakukan variasi berupa temperatur yang berbeda pada saat *heat treatment* [15]

Proses perlakuan panas anil (AN) dan austemper (SA) secara skematik ditunjukkan oleh Gambar 1. Benda uji AN didapat dengan memanaskan material AISI 4140 dalam tanur listrik pada temperatur

austenit 800°C dan ditahan selama 2 jam, selanjutnya didinginkan secara perlahan dalam tanur hingga suhu ruang.

Benda uji SA diperoleh dengan memanaskan material baja AISI 4140 pada temperatur 800°C dan ditahan selama 1 jam, selanjutnya didinginkan secara cepat didalam *saltbath* yang berisi larutan KNO₃ 50% dan NaNO₃ 50% ditahan pada suhu 312°C selama 1 jam, dan selanjutnya didinginkan diudara hingga suhu kamar.



Gambar 1. Prosedur perlakuan panas (a)Anil (AN), (b)Austemper (SA),

2.4. Metode Pengujian

Mechanical properties, termasuk pengujian kekerasan, pengujian tarik dan *V-notch Impact energy* dilakukan pada ketiga benda uji perlakuan panas.

Pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell* sesuai dengan standar ASTM E18 [16]. *Charpy V-notch impact testing* dengan dimensi benda uji sesuai dengan standar ASTM E23 [17]. Untuk pengujian tarik menggunakan mesin uji tarik *MTS Landmark 100kN* mengikuti standar ASTM E8 [18]. Untuk pengujian mikrostruktur menggunakan SEM EDS dan XRD mengikuti standar ASTM E2809-13 [19].

Pada pengujian kekerasan, pada setiap benda uji dilakukan pada 5 titik pengujian, menggunakan mesin *Mitutoyo hardness Tester HR200* dengan metode *Rockwell-C*. Menggunakan indentor *diamond* bersudut 120°, menekan dengan beban mayor 150N dan minor 10N selama 15 detik.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Sifat Mekanik

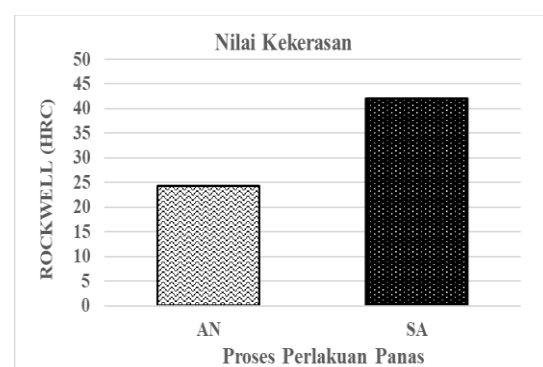
Hasil pengujian sifat mekanik baja AISI 4140, yaitu uji kekerasan *Rockwell-C*, *Tensile test* serta *V-notch Impact energy test* tersaji dalam Tabel 3 berikut ini:

Tabel 3. Kekuatan mekanik baja AISI 4140 dari hasil penelitian

Heat Treatment	0.2%Yield (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)
AN	325.44	598.06	28.43
SA	533.76	922.36	13.09

Heat Treatment	Reduction in area (%)	Impact Energy (Joule)	Hardness (HRC)
AN	47.65	17.33	24.33
SA	30.35	41.00	42.00

3.1.1. Hasil Uji kekerasan



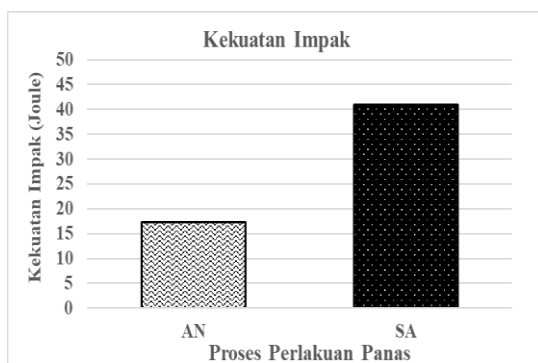
Gambar 2. Nilai kekerasan baja AISI 4140

Dari hasil penelitian terlihat bahwa nilai kekerasan benda uji SA akan meningkat hampir dua kali lipat dari benda uji AN. Pada perlakuan panas SA menghasilkan nilai kekerasan 42 HRC yang lebih baik daripada hasil perlakuan panas

AN yang bernilai 24.33 HRC, ataupun dari *raw material* baja AISI 4140 yang bernilai 13 HRC. Dari penelitian ini menunjukkan bahwa perlakuan austemper pada baja AISI 4140 mampu menghilangkan tegangan sisa yang ditunjukkan dengan nilai kekerasan yang tinggi. Austempering dapat meningkatkan kekerasan material, dan ini terutama terkait dengan transformasi fasa yang terjadi selama proses. Pada umumnya, austempering melibatkan pembentukan fasa bainit yang berstruktur kristal dengan kekerasan yang relatif tinggi. Ketika baja mengalami transformasi fasa dari austenit menjadi bainit selama proses austempering, struktur yang dihasilkan memiliki kekerasan yang lebih tinggi. Selain bainit, dalam austempering, terjadi transformasi ke fasa martensit. Martensit adalah fasa sangat keras dan rapuh. Proses austempering yang menciptakan martensit dapat meningkatkan kekerasan material secara signifikan.

3.1.2. Hasil Uji Impak

Dari hasil pengujian terlihat bahwa energi impak benda uji SA bernilai 41.00 joule, meningkat 137% terhadap AN yang bernilai 17.33 joule.



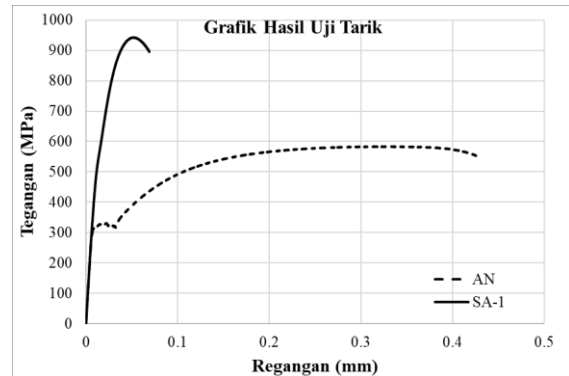
Gambar 3. Kekuatan impak baja AISI 4140

3.1.3. Hasil Uji Tarik

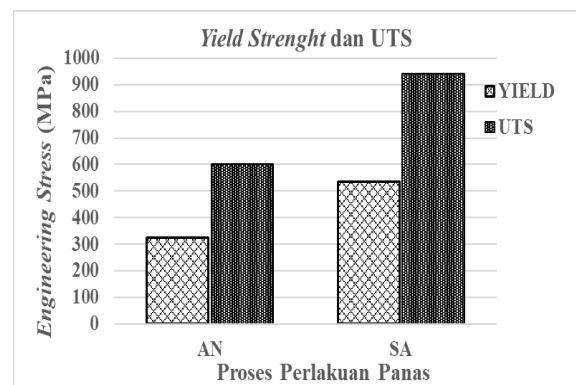
Dari hasil uji tarik, didapatkan grafik tegangan regangan seperti pada Gambar 4.

Pada penelitian ini, *yield strength* yang diperoleh dengan perlakuan SA sebesar 533.76 MPa. Nilai ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan hasil perlakuan AN yang bernilai 325.44 MPa maupun *raw material* baja AISI 4140 yang bernilai 412 MPa. Hal ini terjadi karena proses perlakuan

panas SA yang menyebabkan terjadinya perubahan struktur kristal menjadi lebih halus dan padat, yang mengarah pada peningkatan nilai kekerasan dan *yield strength*. Selain itu, proses austempering juga membantu mengurangi kekerasan yang berlebihan yang mungkin terjadi setelah quenching dan meningkatkan kekuatan dan ketangguhan material.



Gambar 4. Grafik tegangan regangan AISI 4140



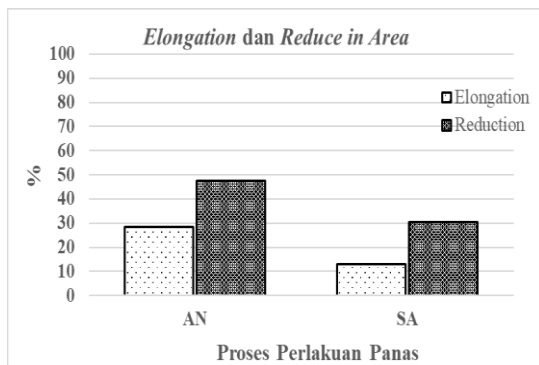
Gambar 5. Yield dan UTS baja AISI 4140

Nilai *ultimate tensile strength (UTS)* yang diperoleh dengan perlakuan SA adalah sebesar 922.36 MPa, lebih tinggi jika dibandingkan dengan hasil perlakuan AN yang bernilai 598.06 MPa maupun *raw material* baja AISI 4140 yang bernilai 655 MPa.

Nilai *elongation* yang diperoleh dari hasil penelitian untuk benda uji SA adalah 13.09%, jauh lebih rendah dibandingkan dengan nilai *elongation* AN yang 28.43% maupun *raw material* AISI 4140 yang bernilai 25.70%. Ini menunjukkan bahwa material yang dihasilkan memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi, karena material dengan nilai kekerasan tinggi cenderung memiliki nilai elongasi yang rendah.

Dari penelitian ini menunjukkan bahwa perlakuan SA menghasilkan material yang keuletannya (daktilitas) lebih rendah.

Daktilitas rendah menunjukkan bahwa suatu material rapuh dan akan patah sebelum berubah bentuk jauh di bawah beban tarik, sedangkan daktilitas yang tinggi menunjukkan bahwa suatu material akan lebih cenderung berubah bentuk dan tidak pecah. Perlakuan SA yang menghasilkan nilai kekerasan yang tinggi cenderung memiliki struktur kristal yang halus dan rapat sehingga tidak memungkinkan terjadinya perpindahan butir saat deformasi dan menghambat kemampuan material untuk meregang sebelum patah. Austempering juga menghasilkan struktur bainit yang kasar atau struktur martensit yang sangat keras, tetapi lebih rapuh. Kekerasan yang berlebihan ini dapat menyebabkan kekurangan ketangguhan dan ketahanan aus logam. Kekerasan yang tinggi cenderung menghasilkan bahan yang lebih rapuh dan kurang dapat menahan deformasi plastis sebelum pecah.



Gambar 6. Elongation dan reduction in area AISI 4140

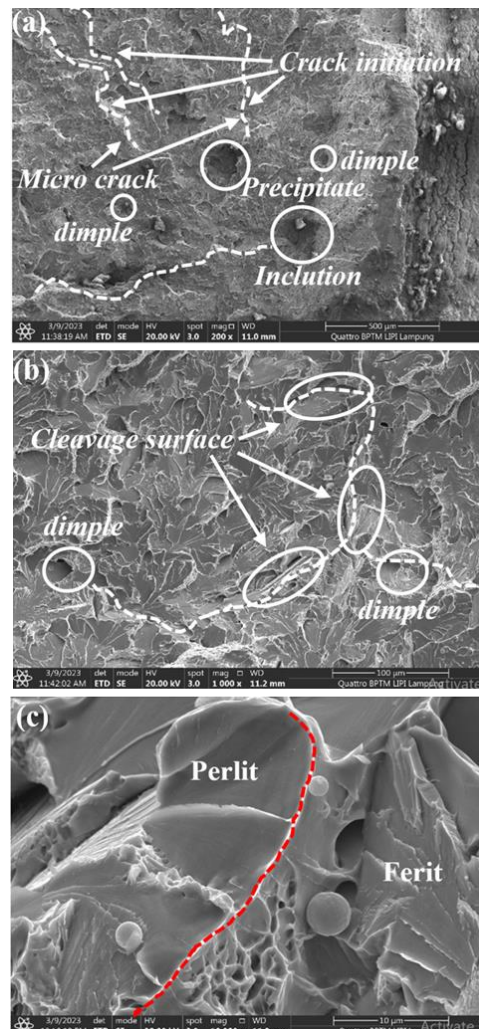
3.2. Pengamatan Fraktografis

Pada penelitian ini digunakan 2 kelompok benda uji yang berbeda, yaitu benda uji perlakuan anil (AN) dan austemper (SA). Pengamatan diambil dari *fracture* benda uji impact yang telah menjalani proses persiapan, dilanjutkan dengan proses SEM (*Scanning Electron Microscopy*).

3.2.1. Pengamatan SEM benda uji AN

Mikrograf SEM pada Gambar 7(a) menjelaskan bahwa benda uji impact hasil perlakuan panas AN pada jarak 0 mm dari patahan dan pembesaran 200x akan menampilkan *initial cracking* dan *micro*

cracking yang terlihat sangat jelas. Retakan terjadi dibagian tengah daerah takikan. menjalar *vertical* dan mengarah ke titik pusat beban impact. Benda uji AN juga memiliki permukaan patahan lebih cerah, lebih rata dan lesung *dimple* yang lebih dangkal. Permukaan yang relatif rata juga menunjukkan bahwa material tidak mengalami deformasi. Hal ini menandakan bahwa material cenderung rapuh (*brittle*). *Fracture* yang dihasilkan pada AN lebih didominasi oleh *brittle fracture*, yang ditandai dengan permukaan patahan yang cenderung halus, lebih cerah dan mengkilap, serta permukaan yang relatif rata.



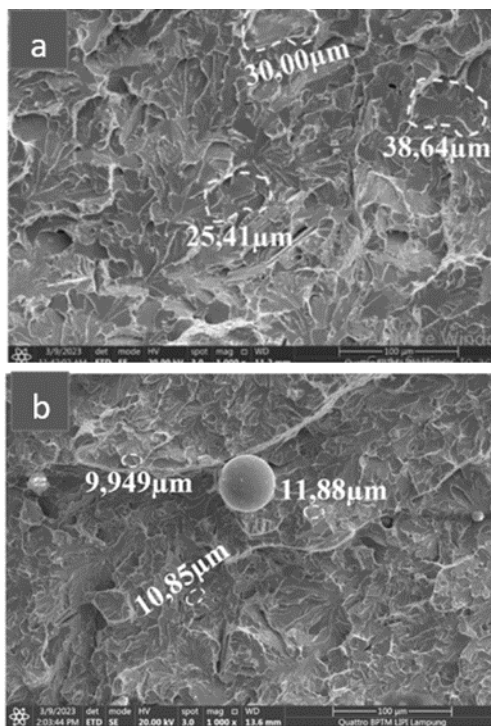
Gambar 7. Mikrograf SEM pada patahan benda uji AN pada jarak 0 mm (a)pembesaran 200x (b)pembesaran 2,000x (c)pembesaran 10,000x

Gambar 7(b) observasi dilakukan pada pembesaran 2,000x. Pada permukaan

retakan terdapat *cleavage surface* di beberapa daerah patahan.

Ukuran butir yang relatif besar pada suhu rendah cenderung akan retak, hal inilah yang disebut *cleavage surface*. Dengan pembesaran 10,000x pada Gambar 7(c) terlihat fasa ferit dan perlit yang sangat dominan pada patahan perlakuan panas AN. Proses anil cenderung menghasilkan struktur ferit-perlit kasar (ukuran butir besar) [16]. Fasa ferit dapat dilihat menyerupai warna hitam yang lebih terang atau bergaris-garis dan berbintik-bintik putih, dan perlit berwarna lebih gelap.

3.2.2. Pengamatan SEM benda uji SA

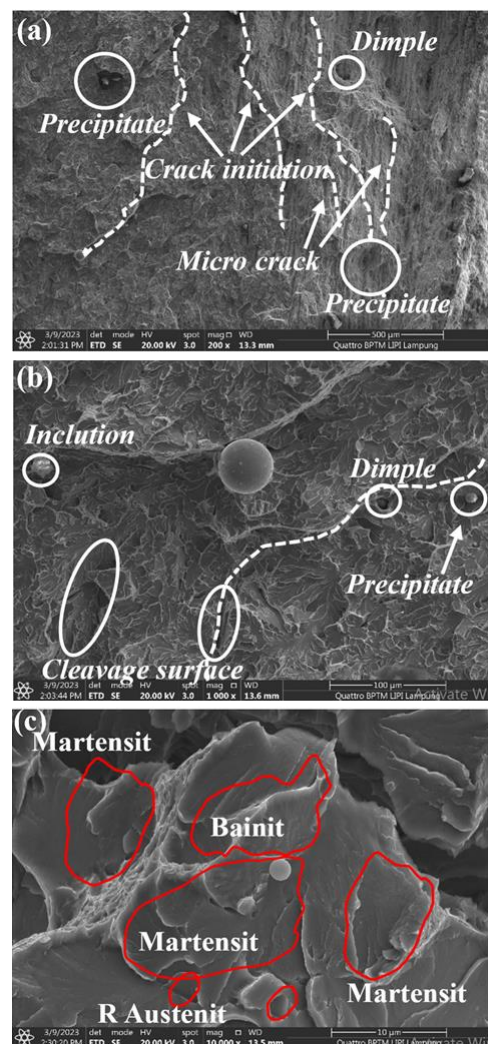


Gambar 8. (a) Ukuran butir sampel AN (b) sampel SA, Mikrograf SEM pada patahan benda uji pada jarak 0 mm pembesaran 1000x

Benda uji SA merupakan material yang batas butirnya lebih halus jika dibandingkan dengan AN. *Fracture* yang dihasilkan pada SA lebih didominasi oleh *ductile fracture*, yang ditandai dengan permukaan patahan yang cenderung sedikit kasar dan gelap, serta permukaan yang tidak rata, seperti pada Gambar 8.

Mikrograf SEM pada Gambar 9(a) menunjukkan bahwa penembakan pada

benda uji dampak hasil perlakuan panas SA pada jarak 0 mm dari patahan dan pembesaran 200x akan menampakkan *initial cracking* dan *micro cracking* yang cukup jelas. Dapat diketahui bahwa retakan terjadi sejajar takikan sampai merembet mengarah ke titik pusat beban dampak secara vertikal. *Fracture* diawali dengan *micro voids/cracks*, dilanjutkan dengan terjadinya *local failure* dan pada fase berikutnya adalah terbentuk oksida, inklusi atau partikel pengotor dan terbentuk endapan (Gambar 9b). Pergeseran batas butir juga sangat mempengaruhi pembentukan *dimple*.



Gambar 9. Mikrograf SEM pada patahan benda uji SA pada jarak 0 mm (a)pembesaran 200x (b)pembesaran 2,000x (c)pembesaran 10,000x

Pada permukaan retakan terdapat *cleavage surface* di beberapa daerah patahan. Munculnya *cleavage surface* atau

pola seperti aliran sungai melalui proses bertahap, karena terjadi orientasi berbeda pada perambatan retak daerah batas butir.

4. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa, perbandingan kekuatan impak baja kondisi anil dan baja kondisi austemper meningkat 135,34%. Pengujian kekerasan pada benda uji perlakuan panas menunjukkan perubahan kekerasan sebagai berikut: nilai kekerasan benda uji AN adalah 24.33 HRC dan pada benda uji SA meningkat menjadi 42.00 HRC. Selanjutnya, perubahan kekuatan dan ketangguhan tegangan tarik maksimal benda uji AN adalah 584.71 MPa dengan regangan 28.43%. Pada benda uji SA meningkat 61.28% menjadi 943.03 MPa dengan regangan 13,09%. Peningkatan nilai tegangan dan penurunan nilai regangan menunjukkan bahwa benda uji SA memiliki kekuatan dan ketangguhan yang lebih baik.

Observasi struktur mikro melalui pengamatan daerah retakan dengan SEM menunjukkan *initial cracking* dan *micro cracking* yang sangat jelas terjadi dibagian tengah ujung takikan sampai merambat secara vertikal mengarah ke titik pusat beban impak untuk baja kondisi anil. Sedangkan benda uji kondisi SA retakan terjadi sejajar takikan dan merambat mengarah ke titik pusat beban impak secara vertikal. Terbentuk *cleavage surface* dan fasa berwarna cerah merepresentasikan adanya bainit dan warna gelap mengindikasikan blok martensit serta blok hitam kecil adalah *retained austenite*. *racture* pada benda uji AN didominasi patah rapuh dengan bentuk patahan yang halus, lebih mengkilap dan hampir merata di seluruh area dan diikuti beberapa daerah patahan ulet.

Ucapan Terimakasih

Hasil penelitian yang disajikan dalam artikel ini merupakan bagian dari riset yang didanai melalui DIPA Fakultas Teknik-Universitas Lampung dengan kontrak No. 3154/UN26.15/LK03/2023.

Referensi

- [1] Badaruddin M, Sugiyanto, Wardono H, Andoko, Wang C J, Rivai AK “*Improvement of low-cycle fatigue resistance in AISI 4140 steel by annealing treatment*”, *International Journal of Fatigue*, 125, 406-417, 2019.
- [2] R. Schneider, S. Kaar, S. Schneider, D. Krizan and C. Sommitsch, “*Comparison of the Hardness-Toughness Relationship of Medium-Mn Steels after Q&T and Q&P Treatments*”, *Journal of Heat Treatment and Materials* 76(6):445-457, DOI: 10.1515/htm-2021-0020, December 2021.
- [3] Bingzhe Bai, Guhui Gao, Xiaolu Gui, Zhunli Tan & Yuqing Weng, “*Enhanced mechanical properties of ultrahigh strength Mn–Si–Cr–C steels treated by a novel bainitic transformation plus quenching and partitioning process*”, *Heat Treatment and Surface Engineering*, 1:1-2, 63-71, DOI:10.1080/25787616.2018.1560133, March 2019.
- [4] Feng Wang, Qian Sun, Haichao Ren, Nana Cao, Xinda Song, Song Deng, Dongsheng Qian, Min Wu, “*A novel quenching-electroshocking-tempering process for toughness improvement by microstructure refining and austenite stability tailoring in aviation bearing steel*”, *Material Science and Engineering: A*, Vol 854, DOI: 10.1016/j.msea.2022.143817, September 2022.
- [5] Aleksandra Krolicka, Krzysztof Radwanski, Andrzej Ambroziak, Andrzej Zak, “*Analysis of grain growth and morphology of bainite in medium-carbon spring steel*”,

- Materials Science & Engineering A* 768 (2019) 138446, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138446>, September 2019.
- [6] Nancy M. López-Granados, A. Salinas-Rodríguez, “*Effect of Heat Treatment on Phase Transformation Texture and Mechanical Properties in Hot-Rolled High-Strength Steels*”, *Metal Science and Heat Treatment* volume 64, pages 80–86 (2022), August 2022.
- [7] Erfan Abbasi, Quanshun Luo & Dave Owens, “*Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Low-Alloy, Medium-Carbon Steels After Multiple Tempering*”, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* volume 32, pages 74–88, September 2018.
- [8] Xiao-xiao Liu, Zheng Zhang, Jie Zhang, Ran Yang, Cheng-shuang Yu, Jun-wei Qiao & Li-na Han, “*Enhanced strength and toughness in 40CrNiMo steels by austempering below martensite start temperature*”, *Journal of Iron and Steel Research International* volume 29, pages 810–818, DOI: 10.1007/s42243-021-00662-7, September 2022.
- [9] A. Talebi, R. Bakhtiari, B. Abbasi Khazaei, M. Ghoheiti-Hasab, “*Effect of tempering temperature on microstructure and work hardening behavior of a triple-phase AISI 4140 steel*”, *International Journal of ISSI*, Vol. 18(2021), No. 2, pp. 23-29, September 2021.
- [10] Fei Zhu, Xiaobing Luo, Feng Chai, Caifu Yang, Zhengyan Zhang, “*Effect of double quenching process and tempering*”, *Materials Science and Engineering* 772 (2020) 012010, 2020.
- [11] M Badaruddin, R P Pratama, Sugiyanto, Harnowo, “*Effect of Single and Double Quenching-Tempering Heat Treatments on Microstructures and Tensile Strength of AISI 4140 in Annealing Condition*”, AIP Conference Proceedings 2592, 020016, DOI: 10.1063/5.0115822, May 2023.
- [12] Regita Bendikiene, Antanas Ciuplys, Ramunas Cesnavicius, Audrius Jutas, Aliaksandr Bahdanovich, Dzianis Marmysh, Aleh Nasan, Liudmila Shemet, Sergei Sherbakov, “*Influence of Austempering Temperatures on the Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Cast Iron*”, *Metals* 2021, 11(6), 967, DOI: 10.3390/met11060967, June 2021.
- [13] Mousalou H, Yazdani S, Avishan B, Ahmadi N P, Chabok A, Pei Y, “*Microstructural and mechanical properties of low-carbon ultra-fine bainitic steel produced by multi-step austempering process*”, *Materials Science and Engineering A*, 734, 329-337, August 2018.
- [14] Bhadeshia H.K.D.H: *Materials algorithms project*, available at (<https://www.msm.cam.ac.uk/map/steel/programs/mucg83.html>). (diakses tanggal 10 Februari 2022)
- [15] Eko Nugroho, dkk., “*Pengaruh variasi temperatur dan holding time pada proses annealing leaf spring dumb truck bekas terhadap nilai kekerasan*”, *Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro, TURBO* Vol. 12 No. 1. 2023
- [16] ASTM E18-02, “*Standard test methods for Rockwell hardness and Rockwell superficial hardness of metallic materials*,” *Book of*

Standards Volume: 03.01: 39, DOI: 10.1520/E0018-22, May 2022.

- [17] ASTM E 23-18, “*Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials,*” *Annu. B. ASTM Standard.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–26, February 2019.
- [18] ASTM E8, “*ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials 1,*” *Annu. B. ASTM Stand.* 4, vol. 02, no. C, pp. 1–27, DOI: 10.1520/E0008, 2010.

- [19] ASTM E2809-13, *Standard guide for using Scanning Electron Microscopy/X-Ray Spectrometry in forensic paint examinations*, <https://www.astm.org/e2809-13.html>, 2003.

- [20] *AISI 4140 Alloy Steel (UNS G41400)* (azom.com), diakses tanggal 10 Mei 2023.