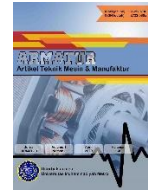
Contents list available at [Sinta](https://sinta)

# ARMATUR

: Artikel Teknik Mesin &amp; Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>

## Perilaku fatik baja kekuatan tinggi AISI 4140 pada kondisi austempering

Sugiyanto<sup>1\*</sup>, Moh. Badaruddin<sup>2</sup>, Sugiyanto<sup>3</sup><sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung, Jl. Prof. Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung, Jl. Prof. Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145<sup>3</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung, Jl. Prof. Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145

### INFORMASI

### ABSTRAK

### ARTIKEL

#### Keywords:

Baja AISI 4140

Uji fatik

Uji kekerasan

Austempering

Mikrostruktur

*AISI 4140 steel is low alloy steel that is widely used for machine components such as crankshafts, gears, piston rods in vehicles. These components experience cyclic loading during the initial and final operating conditions. Therefore, the plastic properties of steel are needed so that the plastic deformation that occurs in steel can increase its fatigue life. treatment is Austempering given to AISI 4140 steel, where austempering is a heat treatment that can be used to increase strength, toughness, plastic properties of steel, and produce bainite microstructure. The purpose of the study was to analyse the effect of austempering on low cycle fatigue values and changes in microstructure. Tensile tests (ASTM E8) and High cycle fatigue (ASTM E606) were carried out with samples of AISI 4140 Steel which were given treatment austempering with a holding time of 60 minutes, and the variation of the stress level start 40%,45%,50%,55%, 60%,and 65% .The effect of austempering on the tensile test results showed an increase in tensile strength compared to the AISI 4140 Steel sample without treatment, austempering namely the yield stress increased by 22.59%, the stress ultimate increased by 12,45% as well as the plastic energy value of 19,83%. Microstructural observation through a microscope and using 3% nital etching resulted in a bainite microstructure which directly affects the increase in fatigue life and tensile strength of AISI 4140 steel.*

### Pendahuluan

Sifat mekanik pada suatu material, seperti kekuatan tarik, kekuatan luluh, modulus elastisitas, serta elongasi merupakan parameter yang paling mendasar untuk desain struktur, khususnya dalam perhitungan tegangan-regangan dan analisis kekuatan komponen dan elemen struktur. Sifat material tidak hanya bergantung pada faktor metalurgi saja,

seperti ukuran butir dan elemen paduan tetapi juga dapat dipengaruhi oleh riwayat pembebanan material, lingkungan, suhu, dll. Struktur material yang bekerja di bawah kondisi pembebanan dinamis, sifat mekaniknya cenderung akan menurun seiring dengan waktu material tersebut beroperasi. Fenomena degradasi sifat bahan tersebut disebut juga kerusakan fatik [1].

\*Corresponding author: [sugi.kasui@gmail.com](mailto:sugi.kasui@gmail.com)

DOI: <https://10.24127/armatur.v4i2.3837>

Received 20 Juli 2023; Received in revised form 23 Juli 2023; Accepted 18 Agustus 2023

Available online 1 September 2023

Fatig adalah kerusakan struktural terlokalisasi dan progresif yang terjadi ketika material mengalami pembebanan siklik atau dimana kondisi material menerima beban dinamis (pembebanan yang berulang-ulang atau berubah-ubah tiap waktu). Semakin besar amplitudo pembebanan dinamis semakin cepat retak merambat [2]. Baja AISI 4140 merupakan material yang bisa dijumpai pada beberapa aplikasi industri seperti pada industri otomotif, industri manufaktur dan industri dirgantara. Unsur paduan dari Cr dan Mo yang disertakan dapat mempengaruhi kekerasan dan ketangguhan lebih tinggi sehingga bisa menjadi salah satu bahan substrat untuk mencegah dari keausan abrasif dan perekat [3].

Proses perlakuan panas merupakan proses pemanasan dan pendinginan pada suatu material dengan tujuan untuk mengubah sifat mekanik dari material tersebut. Dari proses perlakuan panas yang tepat maka tegangan dalam dapat dihilangkan, ukuran butir – butir dapat diperbesar atau diperkecil. Nilai ketangguhan dan keuletan juga dapat ditingkatkan, perlu diketahui komposisi kimia agar dapat memberikan perlakuan panas yang tepat dengan adanya perubahan komposisi kimia khususnya karbon dapat mengakibatkan perubahan – perubahan fisis [4]. Temperatur austenisasi adalah faktor yang sangat penting dalam memulai transformasi fasa menjadi austenit. Terlalu rendah temperatur austenisasi yang diterapkan maka tidak dimungkinkan seluruh fasa material menjadi austenit sehingga pengerasan tidak tercapai [5].

Austempering merupakan proses yang dilakukan untuk mendapatkan struktur yang dikenal dengan bainit, beberapa sifat yang bisa ditingkatkan adalah kekerasan, kekuatan, ketahanan terhadap benturan dan ketahanan aus yang ditingkatkan, struktur mikro ausferitik adalah campuran ferit bainitik dan austenit yang tertahan [6]. Baja yang telah dikeraskan bersifat rapuh dan tidak cocok untuk digunakan melalui proses tempering kekerasan dan kerapuhan

dapat ditingkatkan sampai memenuhi persyaratan penggunaan [7].

Transformasi martensit hanya terjadi pada austenit yang dilakukan pendinginan dengan sangat cepat tanpa disertai dengan penyusunan atom karbon secara difusi pada kisi – kisi austenit. Pembentukan martensit terjadi karena oleh proses pergeseran atom sebesar jarak atom – atomnya. Struktur martensit didalam baja merupakan struktur yang memiliki kekerasan paling tinggi [8]. menggunakan besi cor kelabu yang mempunyai struktur mikro perlitik, feritik, martensitik, dan bainitik setelah proses perlakuan panas yang sesuai. Perlakuan panas austempering telah merubah fasa matrik besi cor kelabu non paduan dari matrik perlit menjadi matrik bainit. Perlakuan panas austempering juga menaikkan kekuatan leleh besi cor kelabu non paduan sebesar 8,5% [9].

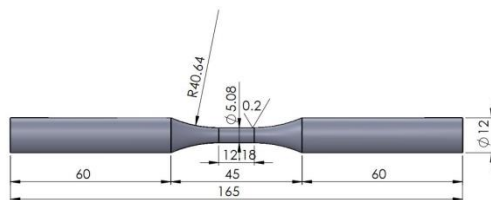
Quenching pada baja adalah proses perlakuan panas yang bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja dengan cara memanaskan logam tersebut pada temperatur tertentu. Biasanya antara 845°-870° C, kemudian didinginkan secara cepat pada media pendingin untuk mendapatkan struktur martensit. Quenching dilakukan untuk mencegah terjadinya pembentukan struktur perlit serta untuk memudahkan pembentukan struktur bainit atau martensit [10].

Pada penelitian ini, pengujian dilakukan dengan menggunakan suhu austempering 362<sup>o</sup> dengan membandingkan dengan raw material. Proses austempering dua langkah menghasilkan ketangguhan rekahan yang lebih tinggi secara signifikan pada besi cor daripada proses austempering pada satu langkah konvensional. Proses austempering dua langkah juga menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi pada besi cor dengan mangan yang rendah, fraksi volumen austenit maupun kandungan karbonnya meningkat seiring dengan temperatur austempering [11].

## Metode Penelitian

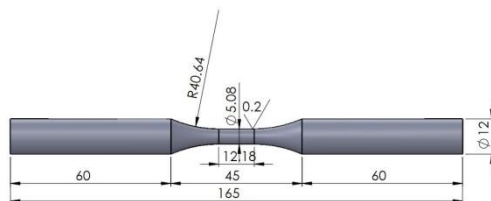
### 1. Pembentukan Spesimen Uji

Spesimen uji tarik dibuat dengan berdasarkan ASTM E8 [12], seperti tampak pada gambar 1 (a) dibawah ini.



Gambar 1 (a). Dimensi spesimen sesuai ASTM E8

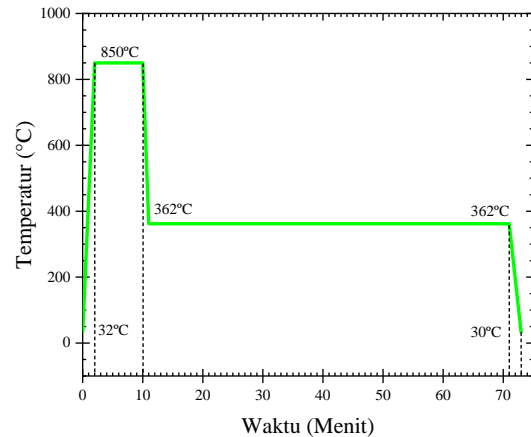
Kemudian spesimen uji fatik dibentuk berdasarkan acuan standar ASTM E 606 [13], dimensi benda ditunjukkan pada Gambar 1 (b).



Gambar 1 (b). Dimensi spesimen sesuai ASTM E606

### 2. Proses Austempering

Proses ini dilakukan dengan cara memanaskan baja sampai pada temperatur austenit menggunakan pemanas induksi selama 10 menit, kemudian specimen tersebut secepat mungkin dimasukkan kedalam larutan yang sudah disiapkan, yaitu larutan garam dengan komposisi (50% NaNO<sub>3</sub> + 50% KNO<sub>3</sub>), setelah baja dimasukkan kemudian ditahan pada temperatur 362°C selama 60 menit. Untuk temperatur awal bainit diperoleh menggunakan software bhadesia dengan memasukan komposisi kimia baja AISI 4140. Kemudian proses selanjutnya ketika baja AISI 4140 sudah melewati waktu penahanan maka dilakukan proses pendinginan hingga ketemperatur ruangan dengan media udara terbuka.



Gambar 3 Diagram proses austempering

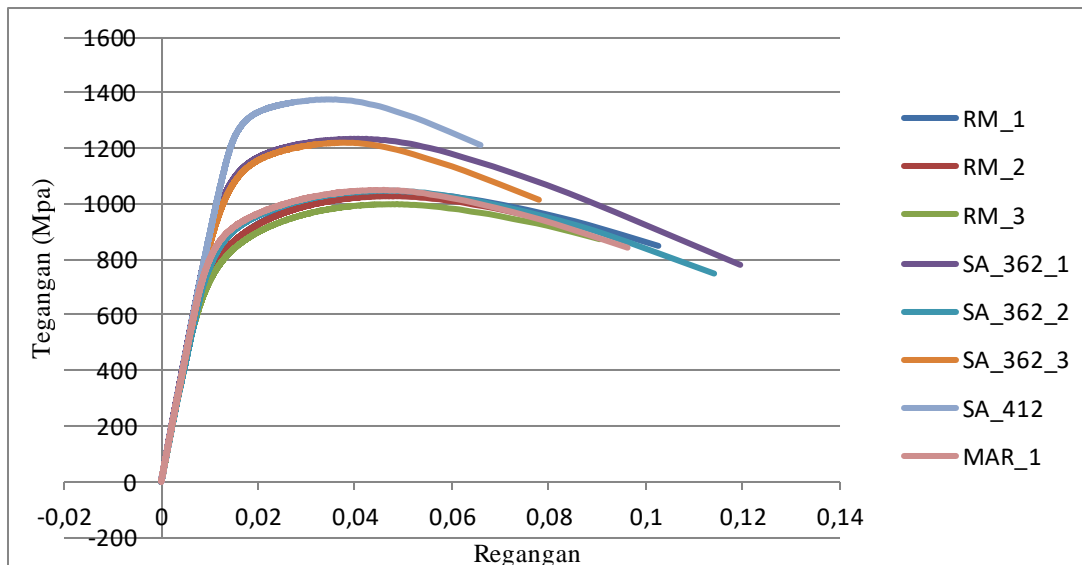
### 3. Uji Fatik

Untuk pengujian tarik statis dan fatik siklus tinggi dilakukan menggunakan Mesin MTS Landmark 100 kN. Pada pengujian tarik, baja ditarik dengan kecepatan konstan 0.2 mm/menit sampai spesimen patah. Pengujian fatik siklus tinggi dilakukan dengan menggunakan stress level 45-65% dari nilai tegangan ultimatnya. Data hasil pengujian tarik diplot dalam bentuk kurva tegangan - regangan. Analisis fatik siklus rendah dilakukan berdasarkan data regangan plastis dan regangan elastis menggunakan pendekatan persamaan Basquin untuk menentukan parameter fatik siklus tinggi baja AISI 4140 yang diberi perlakuan *austemper*.

## Hasil dan Pembahasan

### 1. Hasil Uji Tarik

Hasil uji tarik dari pengujian tarik seperti diperlihatkan dalam kurva tegangan vs regangan pada gambar 4 dibawah ini. Dari gambar tersebut disajikan data bahwa spesimen yang diberikan perlakuan *single austempering* memiliki nilai tegangan luluh yang lebih besar.



Gambar 4 Kurva tegangan vs regangan

Spesimen raw material memiliki tegangan luluh dan tegangan ultimate yang lebih kecil, seperti pada spesimen RM\_1 memiliki tegangan luluh sebesar 796,05 MPa dan tegangan ultimate sebesar 1040,80 MPa sedangkan untuk spesimen yang dilakukan proses austempering pada suhu 362<sup>o</sup>C memiliki tegangan luluh 1027,41 MPa dan tegangan ultimate 1235,53 MPa. Begitu juga untuk beberapa spesimen yang lain, tapi ada satu spesimen yang memiliki nilai hampir sama dengan raw material walaupun sudah dilakukan proses austempering, yaitu spesimen SA\_362\_2, dimana memiliki nilai tegangan luluh 790,62 MPa dan tegangan ultimate sebesar 1050,91 MPa. Untuk spesimen yang dilakukan proses austempering pada suhu 412<sup>o</sup>C memiliki hasil nilai 1376,03 MPa. Hal yang sama juga terjadi pada energi plastis dan elastis, yaitu mengalami peningkatan setelah spesimen dilakukan proses austempering. Untuk energi plastis mengalami kenaikan nilai sebesar 19,83%, dimana energi plastis yang raw material rata – rata memiliki nilai 0,0521 kJ sedangkan pada material yang diberi perlakuan austempering memiliki nilai 0,0650 kJ. Data disajikan dalam tabel 1 dibawah ini,

Tabel 1. Hasil pengujian tarik

Spesi men	Tegangan (MPa)		EP( kJ)	EE( kJ)	Red uksi (%)	Elon gas (%)
	Lul	Ult				
RM_1	796, 05	1040 ,8	0,0	0,0	38,3 7	14,7
RM_2	788, 36	1028 ,8	0,0	0,0	30,2 9	14,0
RM_3	793, 24	999, 36	0,0	0,0	30,3 5	14,4
SA_3 62_1	1027 ,41	1235 ,53	0,0	0,0	38,3 2	10,3
SA_3 62_2	790. 62	1050 ,91	0,0	0,0	40,5 4	14,5
SA_3 62_3	1020 ,51	1219 ,25	0,0	0,0	39,5 3	10,6
SA_4 12	1248 ,73	1376 ,03	0,0	0,0	40,0 8	12,1
MAR _1	813, 42	1048 ,11	0,0	0,0	40,5 8	12,4

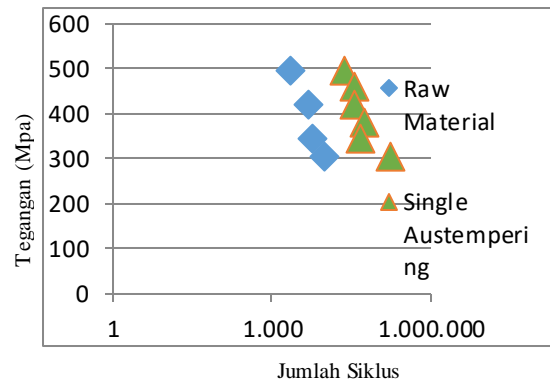
Spesimen yang telah dilakukan proses austempering juga memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan spesimen yang raw material (tanpa perlakuan). Hal ini bisa terjadi karena dengan adanya proses pemanasan kembali dan didinginkan dalam larutan garam bisa membuat perubahan struktur mikro sehingga merubah susunan dan bentuk struktur mikro yang pada akhirnya akan membuat nilai kekerasan pada spesimen

mengalami peningkatan. Besarnya nilai peningkatan mengalami kenaikan sebesar 7,61%, rata – rata pada spesimen raw material memiliki nilai kekerasan 85,5 HRB dan rata – rata pada spesimen yang diberikan proses austempering memiliki nilai 92,5 HRB. Seperti disajikan dalam tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2 hasil pengujian kekerasan

No	Spesimen Uji	Nilai Kekerasan (HRC)		Rata – rata
		Spesimen 1	Spesimen 2	
1	Raw Material 1	87,6	83,4	85,5
2	Single Austempering	97,9	87,2	92,5

Material yang tidak diberikan perlakuan atau raw material ketika diberi *stress level* sebesar 65% memiliki jumlah siklus 2.319 kemudian untuk *stress level* 55% memiliki jumlah siklus 4.873 begitu juga untuk *stress level* 45% dan 40% memiliki nilai siklus yang semakin tinggi. Maka dengan semakin kecil *stress level* yang diaplikasikan dalam pengujian akan menaikkan jumlah siklus perpatahan. Hal yang sama juga terjadi pada spesimen uji yang diberikan perlakuan *single austempering* dimana dengan diberikan aplikasi *stress level* yang semakin kecil maka akan membuat jumlah siklus perpatahan menjadi semakin tinggi. Namun perbedaan yang sangat mencolok disini adalah dengan sama – sama diberikan *stress level* 65%, maka kenaikan siklus perpatahan menjadi sangat tinggi, yaitu sebesar 90,15%. Pada *stress level* 55% naik menjadi 86,58%, *stress level* 45% naik sebesar 86,71% dan *stress level* 40% mengalami kenaikan 94,30%. Grafik nilai *stress level* dengan jumlah siklus bisa dilihat seperti pada gambar 5 dibawah ini.

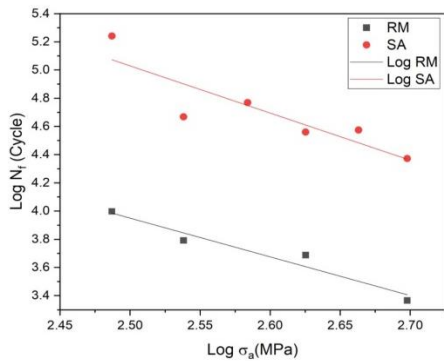


Gambar 5 tegangan vs jumlah siklus

Tabel 3 hasil pengujian fatik

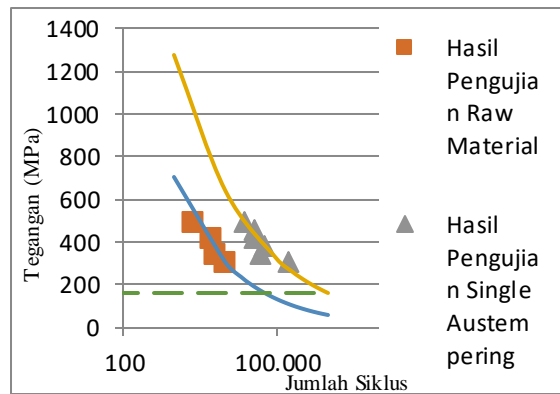
Kode Spesimen	Stress Level (kN)	F <sub>max</sub>	F <sub>min</sub>	Σ (MPa)	R	Jumlah Siklus (Nf)
HCF_R	65 %	13,4	-6,735	498,7	-	2.319
M_1	%	71		22	0,5	
HCF_R	55 %	11,3	-5,699	421,9	-	4.873
M_2	%	98		96	0,5	
HCF_R	45 %	9,25	-4,626	345,2	-	6.188
M_3	%	3		69	0,5	
HCF_R	40 %	8,22	-4,112	306,9	-	9.944
M_4	%	5		06	0,5	
HCF_SA	65 %	13,4	-6,709	498,7	-	23.556
_1	%	18		22	0,5	
HCF_SA	60 %	12,5	-6,266	460,3	-	37.539
_2	%	33		59	0,5	
HCF_SA	55 %	11,4	-5,722	421,9	-	36.301
_3	%	43		96	0,5	
HCF_SA	50 %	10,2	-5,120	383,6	-	58.776
_4	%	40		33	0,5	
HCF_SA	45 %	9,32	-4,663	345,2	-	46.571
_5	%	6		69	0,5	
HCF_SA	40 %	8,16	-4,080	306,9	-	174.319
_6	%	0		06	0,5	

Pada pengujian fatik baja yang diberi perlakuan austemper mempunyai jumlah siklus yang lebih banyak dibandingkan dengan tanpa perlakuan dikarenakan energi plastis pada baja austemper lebih besar dibandingkan dengan tanpa perlakuan [14] Kemudian dari data tersebut dibuatkan plot menjadi kurva dengan menggunakan metode kuadrat terkecil seperti terlihat pada gambar 6..



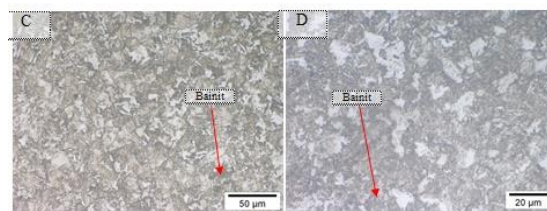
Gambar 6 Kurva Log  $\sigma_a$  Mpa vs Log  $N_f$  Cycle (Pratowo, 2018)

Dari data hasil pengujian dan data prediksi terlihat dalam plot pada gambar 7 dengan kurva SN. Dari gambar diatas bisa melakukan sebuah perencanaan *finite life* atau umur fatik terbatas, yaitu kegagalan komponen dapat diprediksi dan dikontrol dengan suatu perencanaan yang harus menggunakan tingkat tegangan diatas garis endurancinya dengan nilai 162 MPa. Beban tegangan tersebut merupakan nilai maksimum umur fatik yang digunakan sebagai batas yang aman dalam menggunakan kurva S-N secara langsung dalam perhitungan perencanaan. Ketika jumlah siklus pembebanan sudah mendekati batas umur yang ditentukan maka komponen harus dievaluasi untuk mengantisipasi kerusakan yang akan terjadi. Kemudian dalam penelitian ini menunjukkan hasil bahwasanya spesimen uji yang diberikan proses perlakuan single austempering mengalami kenaikan kemampuan fatik sebesar 2,85 kenaikan kali lipatnya dari spesimen uji raw material.



Gambar 7 Kurva S-N Baja AISI 4140 single austempering

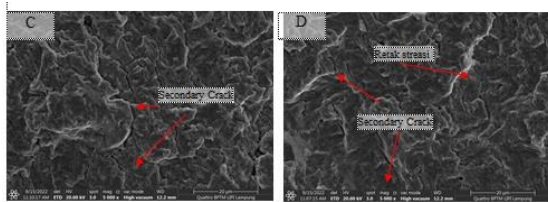
Dari gambar hasil pengamatan struktur mikro seperti terlihat pada gambar 8 setelah dilakukan single austempering menghasilkan struktur mikro bainit. Bainit adalah perpaduan antara ferit dan sementit yang bisa terbentuk pada material baja karbon setelah dilakukan proses pendinginan dengan cepat dari suhu austenitnya 850°C menjadi suhu diatas martensitnya atau diatas 301°C. Dari gambar tersebut juga menampilkan struktur bainit yang seperti ferit dengan terlihat lebih halus dan terbentuk lempengan yang tidak beraturan. Bainit ini tersebar secara acak, dengan semakin banyaknya bainit dalam suatu permukaan baja maka akan lebih cenderung dapat meningkatkan kekuatan mekanik baja itu sendiri, tetapi dari sisi lain justru akan membuat nilai keuletan baja akan lebih menurun.



Gambar 8 struktur mikro baja AISI 4140 dengan single austempering

Hasil pada fraktografi SEM menunjukkan adanya tahapan dari awal retak atau inisiasi retak sampai spesimen mengalami patah akibat beban siklik. Retakan fatik dimulai pada permukaan di mana lentur dan torsi dapat menyebabkan terjadinya tegangan-

tegangan yang tinggi atau di tempat-tempat yang tidak rata menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan [15]. Dari gambar 9 menampilkan area yang cepat patah dan area fatik, bisa terlihat dengan hasil permukaan pada area fatik lebih halus, berbeda dengan area permukaan pada patah cepat yang terlihat kasar dan tidak beraturan. Awal retak dimulai dari sisi pinggir spesimen seperti terlihat pada gambar tersebut dimana di area tersebut terjadi konsentrasi tegangan yang tinggi karena pembebanan yang diberikan secara berulang-ulang. Kemudian menyusul pada gambar tersebut sudah terlihat *secondary crack* atau retak kedua yang ditunjukkan dengan adanya celah pada permukaan dan hal tersebut menandakan bahwa baja lebih getas atau tidak ulet. Sedangkan pada gambar tersebut menunjukkan adanya retak streasi dengan berupa tanda putih yang lebih terang. perlakuan austemper menghasilkan struktur mikro bainit yang dipercaya meningkatkan kekuatan tarik dan fatik baja [16].



Gambar 9 struktur mikro baja AISI 4140 dengan single austempering

### Kesimpulan

Dengan diberikannya perlakuan *single austempering* maka mampu menaikkan tegangan luluh 22,5% dan *finite life* 2,85 kali lipat dari spesimen yang tidak diberikan perlakuan (*raw material*). Dan semakin kecil *stress level* yang diberikan maka akan membuat jumlah siklus dalam pengujian fatik semakin besar. Sedangkan persamaan empiris untuk memprediksi kekuatan fatik baja AISI 4140 dilakukan dengan pendekatan persamaan Basquin, dimana nilai untuk *raw material* 8.668,81  $(2Nf)^{-0,364087}$  sedangkan *single austempering* sebesar 10.071,83  $(2Nf)^{-0,298873}$ .

### Referensi

- [1] Duyi, Ye. et al., 2010. Effects Of Low-Cycle Fatigue On Static Mechanical Properties, Microstructures And Fracture Behavior Of 304 Stainless Steel. Institute for Process Equipments. Zhejiang University, Hangzhou, China, 4092–4102.
- [2] Timings and Roger, L., 1998. Engineering Materials, Jilid 1, edisi 2., Penerbit Longman Scientific & Technical, New York.
- [3] Ulutan.M, Celik.O.N, Gasan.H, Er.U. 2010. Effect Of Different Surface Treatment Methods On The Friction And Wear Behavior Of AISI 4140 Steel. J.Mater, Sci, Technol, 26(3), 251-257
- [4] Fendri Risno, Darmawi, Syahrul, Jasman. 2018. Analisis Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja Aisi 4140 Akibat Perbedaan Temperatur Pada Perlakuan Panas Tempering. Universitas. Negeri Padang. Padang.
- [5] Damanik, Ewaldo Zulfikar. 2010. Pengaruh Proses Austempering Terhadap Struktur Mikro Dan Sifat Mekanis Thin Wall Ductile Iron (TWDI) Hasil Pengecoran Vertikal Dengan Isolator Dan Tanpa Isolator. Universitas Indonesia. Depok.
- [6] Pratowo, Bambang. 2018. Analisa Keuletan Baja Karbon Rendah Setelah Dilakukan Perlakuan Panas Austempering. Universitas Bandar Lampung. Lampung.
- [7] Nandiawan.D.H, Sunardi, Fawaid.M. 2015. Pengaruh Variasi Suhu Pada Proses Self Tempering Dan Variasi Waktu Tahan Pada Proses Tempering Terhadap Sifat Mekanis Baja AISI 4140. Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Cilegon.
- [8] Mizhar, S., & Suherman, S. (2011). Pengaruh Perbedaan Kondisi Tempering Terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan Dari Baja AISI 4140. Jurnal Dinamis, Volume II, No. 8 Hal. 23 ISSN 0216-7492.
- [9] Suprihanto Agus & Ilmi Miftakhul. 2007. Pengaruh Temperatur Quenching Pada Proses Austempering Terhadap Kekuatan Lelah Austempering Grey Iron. Universitas Diponegoro. Semarang.

- [10] Razak.A.H, & Tangkemand.A. Quenching Bertingkat Pada Proses Hardening Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja Aisi 4140. Politeknik Negeri Ujung Pandang,Makassar.
- [11] Fakhrizal. et al., 2021. Studi perbandingan perilaku lelah AISI 316L dengan menggunakan metode eksperimen dan simulasi. Jurnal Polimesin 19, Nomor 2, 194-200.
- [12] ASTM E8., 2001. Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials., USA.
- [13] ASTM E606., 2004. Metal Test Methods and Analytical Procedures, Annual Book of STM Standard., Bar Harbor Drive, Weat Conshohocken.
- [14] Miftahudin, Badaruddin, Sugiyanto. 2022. Analisa Kekuatan Fatik Baja Paduan AISI 4140 Yang Diberi Perlakuan Austemper. Universitas Lampung. Lampung.
- [15] Pratowo, Bambang. 2018. Analisa Keuletan Baja Karbon Rendah Setelah Dilakukan Perlakuan Panas Austempering. Universitas Bandar Lampung. Lampung
- [16] Lubay, Asnadi. 2014. Variasi Waktu Tahan Pada Proses Austempering Berpengaruh Terhadap Sifat Mekanik Baja Karbon Tinggi. Universitas IBA. Palembang