

Low Cycle Fatigue Analysis of an Annealed AISI 4140 Steel

Mohammad Badaruddin^{1*}, Purnadi Sri Kuncoro², Ahmad Suudi³ dan Sugiyanto⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung – Bandar Lampung

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

Abstract. An AISI 4140 steel is widely applied for machine element components on vehicles. A Chemical compositions of alloy elements are 0.443C, 1.15Cr, 0.805Mn, 0.320Cu, 0.253Ni, 0.308Si, dan 0.198Mo (wt.%). The steel was subjected to annealing-heat treatment for increase of the ductility, and thus the plastic region is a larger size than the elastic region. The mechanical strength and the low cycle fatigue properties of the annealed steel were tested in according to ASTM E8 standard with a displacement control of 0.2 mm/min and in according to ASTM E606 standard with the strain amplitude total in ranging of 0.003-0.007 mm/mm under a constant strain rate of 0.005/s, respectively. The tensile test results show that the annealing treatment on AISI 4140 significantly decreased the mechanical properties of the steel. However, the plastic strain energy in the steel with annealing treatment is larger than that of the steel without annealing treatment. A large plastic energy in the steel gives a contribution in improvement of the steel's fatigue life, for example; the fatigue life of annealed steel increases by 2.43 fold which is fatigued under a strain amplitude of 0.003 mm/mm. The empirical equation obtained from the present research can be used to predict the fatigue life of annealed AISI 4140 steel in terms of elastic condition, $\sigma_a = 1018.72(2N_f)^{-0.1770}$ and plastic condition, $\epsilon_p = 0.1154(2N_f)^{-0.4290}$.

Abstrak. Baja AISI 4140 banyak diaplikasikan pada komponen elemen mesin poros dan roda gigi pada kendaraan. Komposisi kimia elemen-elemen pemuatan yang dominan adalah 0.443C, 1.15Cr, 0.805Mn, 0.320Cu, 0.253Ni, 0.308Si, dan 0.198Mo (wt.%). Perlakuan anil diberikan pada baja AISI 4140 untuk meningkatkan daktilitas baja agar daerah plastis lebih besar dari daerah elastisnya. Pengujian tarik dilakukan dengan kontrol displasemen 0.2 mm/min (Standar ASTM E8) dan pengujian fatik siklus rendah (ASTM E606) dengan variasi amplitudo regangan dari 0.003-0.007 mm/mm dengan laju regangan konstan 0.005/s. Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa proses anil pada baja AISI 4140 menurunkan sifat mekaniknya secara signifikan. Namun, energi plastis baja anil lebih besar dibandingkan dengan baja tanpa perlakuan anil. Peningkatan energi plastis yang dialami baja anil memberikan pengaruh yang signifikan terhadap umur fatik baja dimana pada amplitudo regangan 0.003 mm/mm, umur fatik baja anil AISI 4140 meningkat sebesar 2.43 kali. Persamaan empirik yang diperoleh dari hasil penelitian ini dapat digunakan untuk memprediksi umur fatik baja anil AISI 4140 dalam kondisi elastis, $\sigma_a = 1018.72(2N_f)^{-0.1770}$ dan kondisi plastis, $\epsilon_p = 0.1154(2N_f)^{-0.4290}$.

Keywords: baja AISI 4140, fatik siklus rendah, perlakuan anil, energi plastis,

© 2018. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Baja AISI 4140 merupakan baja karbon sedang (0.443 wt.% C) dengan elemen-elemen pemuatan lainnya: 1.15% Cr, 0.805% Mn, 0.320% Cu, 0.253% Ni, 0.308% Si, dan 0.198% Mo [1]. Baja ini mempunyai beberapa keunggulan diantaranya kekuatan tinggi, ketangguhan tinggi, dan cukup ulet. Baja AISI 4140 banyak digunakan sebagai komponen elemen utama pada mesin seperti poros, gear, dan piston pada kendaraan, yang berfungsi meneruskan daya baik berupa puntiran ataupun bending. Poros yang mengalami pembebanan yang berulang, akhirnya dapat menimbulkan retak yang terus berlanjut mengalami kegagalan pada saat operasinya. Kegagalan ini terjadi umumnya akibat

ketidakmampuan bahan terhadap beban siklik dimana bahan mengalami deformasi plastis besar, dan akhirnya bahan mengalami kelelahan dan patah.

Fatigue atau kelelahan adalah bentuk dari kegagalan yang terjadi pada struktur bahan karena beban fluktuasi. Kegagalan lelah pada bahan dapat terjadi pada kondisi beban lebih rendah atau lebih tinggi daripada kekuatan luluhnya. Ada dua jenis kegagalan lelah: (1) kegagalan fatik siklus rendah (*low cycle fatigue*) dan (2) Kegagalan lelah siklus tinggi (*high cycle fatigue*). Kegagalan fatik siklus rendah umumnya terjadi pada logam dalam siklus pendek dengan jumlah siklus dibawah 100000 yang disebabkan oleh regangan plastis. Sedangkan

Kegagalan lelah siklus tinggi merupakan kegagalan pada bahan pada jumlah siklus antara 10^3 sampai 10^7 dimana bahan gagal dibawah tegangan luluhnya.

Beberapa penelitian sebelumnya tentang fatik siklus rendah baja 10%Cr–2%W–0,7%Mo–3%Co–Nb–V dengan 0,008%B dan 0,003%N (wt) oleh Mishnev dkk. [2], dimana baja diuji dalam kondisi amplitudo regangan konstan kisaran dari $\pm 0,2\%$ sampai $\pm 1,0\%$ pada temperatur pengujian 20 °C dan 650 °C. Hasil penelitian mereka menunjukkan efek pelunakan siklik disebabkan oleh perubahan struktur martensit pada baja dengan meningkatnya derajat deformasi plastis. Li dkk. [3] melakukan penelitian perilaku fatik siklus rendah baja paduan rendah Cr–Mo–V untuk aplikasi cakram rem kereta api. Dari hasil penelitian tersebut dilaporkan baja menunjukkan perilaku pelunakan siklik pada level regangan yang lebih besar dan perilaku tipe *Masing* baja diamati pada temperatur ruang. Selain itu, Verma dkk. [4] melakukan penelitian sifat fatik siklus rendah baja 9Cr–1Mo yang dimodifikasi melalui perlakuan *normalizing* dan *tempering* pada kondisi laju regangan dari 0.002/s sampai 0.004/s dengan amplitudo regangan antara 0.25 % dan 0.5% pada temperatur ruang. Pada regangan amplitudo tinggi 0.375% dan 0.50% setelah bahan mengalami siklus 20–30 dan setelah siklus 200–300 dengan regangan amplitudo terendah 0.25% baja mengalami efek pelunakan. Sedangkan Hu dkk. [5] melaporkan bahwa baja 9CrWVTa mengalami pengerasan regangan pada siklus 2–100, kemudian bahan mengalami pelunakan siklik sampai patah.

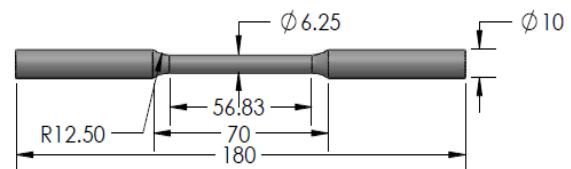
Berdasarkan uraian di atas, kami melakukan penelitian mengenai pengaruh perlakuan panas anil pada baja AISI 4140 terhadap sifat fatik siklus rendah. Analisis parameter fatik siklus rendah ditentukan menggunakan pendekatan Coffin-Manson-Basquin [2].

Metode Penelitian

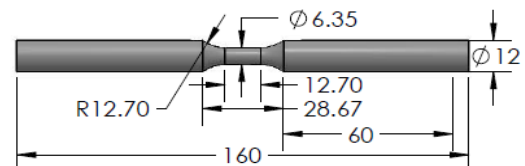
Bahan dan spesimen. Baja paduan AISI 4140 berbentuk silinder diameter 16 mm dan panjang 180 mm diberi perlakuan anil. Spesimen baja tidak diberi perlakuan disimbolkan sebagai “TA”, dan baja diberi perlakuan anil disimbolkan sebagai “A”. Proses anil dilakukan dengan memanaskan baja pada temperatur 815 °C selama 1 jam, kemudian didinginkan pada temperatur 665°C di dalam tungku dengan kecepatan penurunan temperatur 11 °C/menit [1]. Setelah temperatur baja mencapai 665 °C, kemudian baja didinginkan di udara. Spesimen uji tarik disiapkan sesuai standar ASTM E8 [6] (Gambar 1) dan spesimen uji fatik

siklus rendah dibuat sesuai standar ASTM E606 [7] (Gambar 2).

Pengujian tarik dan fatik siklus rendah. Pengujian tarik statis dan fatik siklus rendah 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 rendah dilakukan pada baja dengan variasi amplitudo regangan total ($\Delta\epsilon_a$) 0.003-0.007 mm/mm dengan kondisi laju regangan 0.005/s. Data hasil pengujian tarik diplot dalam bentuk kurva tegangan-regangan. Kurva histeresis tegangan-regangan pada setengah umur siklus patah (0.5Nf) diplot. Analisis fatik siklus rendah dilakukan berdasarkan data regangan plastis dan regangan elastis menggunakan pendekatan Coffin-Manson-Basquin untuk menentukan parameter fatik siklus rendah baja AISI 4140 yang diberi perlakuan anil.



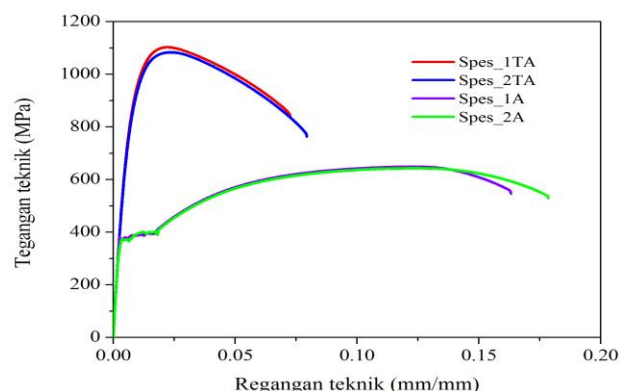
Gambar 1. Bentuk dan ukuran spesimen uji tarik



Gambar 2. Bentuk dan ukuran spesimen uji fatik siklus rendah

Hasil dan Pembahasan

Analisis sifat mekanik baja anil AISI 4140. Berikut ini merupakan data hasil pengujian tarik dalam bentuk kurva stress vs regangan (Gambar 3).



Gambar 3. Kurva tegangan versus regangan baja AISI 4140 yang mengalami perlakuan anil dan tanpa perlakuan.

Modulus elastisitas baja AISI 4140 ditentukan menggunakan metode kuadrat terkecil dengan jangkauan panjang garis linier kurva tegangan vs regangan sebesar 20% [6]. Berdasarkan Gambar 3, modulus elastisitas specimen_1, $E_{TA1} = 206.866$ GPa dan specimen_2, $E_{TA2} = 211.710$ GPa. Sedangkan modulus elastisitas untuk baja yang dianil, specimen_1 $E_{A1} = 204.130$ GPa dan specimen_2, $E_{A2} = 206.946$ GPa. Hasil uji tarik baja AISI 4140 dari keempat specimen yang berbeda ditampilkan pada Tabel 1. Nilai tegangan luluh rata-rata dari specimen_A1 dan _A2, $\sigma_{yA} = 384.965$ MPa. Nilai elongasi diperoleh dari hasil pengukuran panjang awal specimen dalam daerah *gage length* dan setelah specimen putus ditampilkan

pada Tabel 1. Dari hasil pengujian diperoleh nilai elongasi untuk specimen_1A adalah 24.19 %. Nilai elongasi sepesimen_2A adalah 17.80 %. Berdasarkan data-data dari Tabel 1, hasil perlakuan anil pada baja AISI 4140 menurunkan sifat mekaniknya; tegangan ultimate dan luluh, namun daktilitas baja meningkat dan energi plastis juga meningkat signifikan. Luasan daerah plastis dalam kurva beban vs displasemen menunjukkan besaran energy plastis bahan (kJ). Besarnya energy plastis berkontribusi terhadap peningkatan umur fatik bahan yang diuji pada kondisi fatik siklus rendah, menunjukkan kemampuan bahan mengalami deformasi siklik selama mengalami pembebanan [8].

Tabel 1. Hasil uji tarik baja AISI 4140

Nama Spesimen	Tegangan (MPa)		Energi plastis (kJ)	Energi elastis (kJ)	Reduksi luas penampang (%)	Elongasi total (%)
	Luluh (0.2%)	Ultimate				
TA1	949.725	1103.540	0.001	0.027	42.80	14.12
TA2	929.306	1083.842	0.001	0.029	52.83	15.05
A1	376.33	649.20	0.085	0.002	46.919	24.19
A2	393.6	684.52	0.088	0.002	46.227	17.80

Analisis fatik siklus rendah. Berdasarkan teori kegagalan fatik siklus rendah, retak awal terbentuk pada daerah dimana penurunan tegangan terjadi, dan kemudian retak terus merambat diiringi dengan turunnya kemampuan bahan menahan beban siklik yang berlanjut hingga bahan patah [3]. Data hasil pengujian fatik siklus rendah dengan variasi amplitudo regangan berbeda ditampilkan secara lengkap pada tabel 2 dan tabel 3 pada kondisi 0.5N_f.

Tabel 2 menunjukkan variasi amplitudo regangan yang digunakan yaitu; 0.003 mm/mm,

0.005 mm/mm, dan 0.007 mm/mm, dimana siklus tertinggi dalam pengujian fatik siklus rendah dialami baja pada amplitudo regangan 0.003 mm/mm dengan jumlah total 26858 siklus. Sebaliknya pada amplitudo regangan 0.007 mm/mm, umur fatik baja menurun namun regangan plastis yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan pada amplitudo regangan 0.003 dan 0.005 mm/mm.

Tabel 2. Hasil uji fatik siklus rendah baja 4140 dengan perlakuan anil

Spesimen	Amplitudo regangan (mm/mm)	Frekuensi (Hz)	Regangan plastis (mm/mm)	Regangan elastis strain (mm/mm)	Modulus elastis (GPa)	Siklus patah (Nf)
A1	0.003	0.4167	0.0014	0.0016	207.0989	26858
A2	0.005	0.2500	0.0031	0.0019	202.0705	3606
A3	0.007	0.178	0.0049	0.0021	202.062	1912

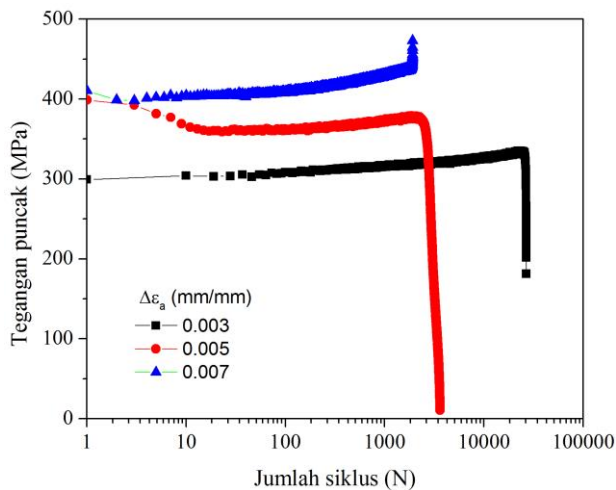
Tabel 3. Hasil uji fatik siklus rendah baja 4140 tanpa perlakuan

Spesimen	Amplitudo regangan (mm/mm)	Frekuensi (Hz)	Regangan plastis (mm/mm)	Regangan elastis (mm/mm)	Siklus patah (Nf)
TA1	0.003	0.4167	0.00015	0.0029	11045
TA2	0.005	0.2500	0.0015	0.0035	3161
TA3	0.007	0.1780	0.0035	0.0035	1000

Pengujian fatik siklus rendah menunjukkan semakin tinggi amplitudo regangan maka semakin turun jumlah siklus patah yang dihasilkan (Tabel 2 dan Tabel 3). Nilai modulus elastis siklik pada kondisi setengah siklus patah (0.5N_f) ditampilkan pada Tabel 2, dan nilai rata-rata modulus elastis for baja anil AISI 4140 = 203.7438 GPa. Nilai ini digunakan untuk menghitung koefisien kekuatan

fatik, σ'_f (MPa) [2]. Berdasarkan Tabel 2 dan Tabel 3 regangan plastis yang diperoleh untuk baja AISI 4140 dengan perlakuan anil menunjukkan nilai regangan yang lebih besar dibandingkan baja AISI 4140 tanpa perlakuan. Besarnya nilai regangan plastis dibandingkan dengan regangan elastis yang dihasilkan dari proses anil menunjukkan umur fatik baja dapat ditingkatkan secara signifikan.

Pengaruh amplitudo regangan terhadap tegangan puncak (*peak stress*) dan jumlah siklus untuk specimen_A1, _A2 dan _A3 diplot secara bersama pada Gambar 4.



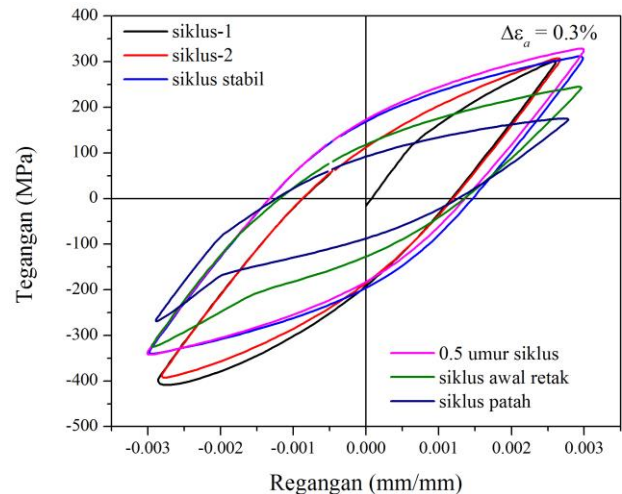
Gambar 4. Hubungan tegangan puncak terhadap jumlah siklus baja AISI 4140 yang dianil dengan amplitudo regangan berbeda.

Gambar 4 menunjukkan bahwa pada amplitudo regangan 0.003 mm/mm pada siklus kedua baja mengalami pengerasan (*hardening*) dan selanjutnya siklus ketiga mengalami pelunakan (*softening*). Setelah siklus ketiga baja mengalami pengerasan kembali, kemudian berlanjut hingga specimen mengalami patah. Pada amplitudo regangan 0.005 mm/mm menunjukkan bahwa pada siklus pertama sampai siklus sepuluh mengalami pelunakan sampai mencapai siklus sebelas, dan selanjutnya baja mengalami pengerasan hingga mengalami kegagalan. Pada amplitudo regangan 0.007 mm/mm menunjukkan pada siklus pertama hingga siklus ketiga mengalami pelunakan. Selanjutnya siklus keempat dan seterusnya mengalami peningkatan pengerasan hingga specimen patah pada kondisi plastis yang besar. Pada pengujian ini menunjukkan semakin kecil amplitudo regangan semakin tinggi siklus yang kegagalan dihasilkan.

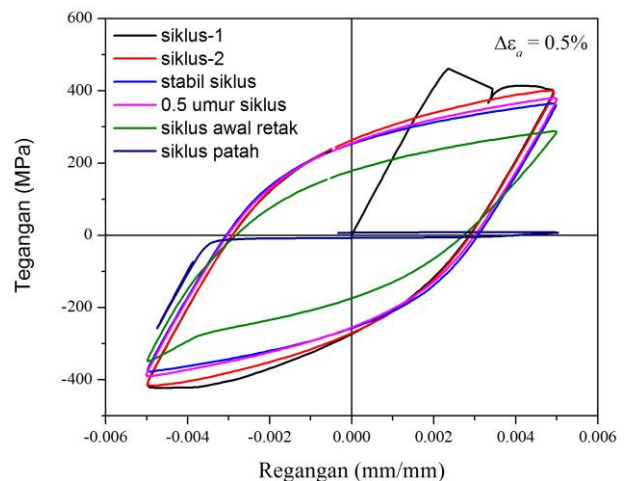
Gambar 5 menunjukkan kurva histeresis specimen_A1 pada amplitudo regangan 0.003 mm/mm dan pada siklus ke-1 baja mengalami tegangan tarik sebesar 300.7606 MPa dan tegangan tekan sebesar -408.824 MPa. Pada siklus ke-2 baja mengalami peningkatan tegangan tarik sebesar 307.9811 MPa dan tegangan tekan sebesar -392.581 MPa. Selanjutnya pada kondisi siklus stabil ($N = 111$ siklus) baja mengalami peningkatan tegangan tarik sebesar 311.7883 MPa dan tegangan tekan sebesar -340.501.

Pada setengah umur siklus ($0.5N_f = 10.000$ siklus), baja kembali mengalami pengerasan

regangan yang ditandai dengan meningkatnya tegangan tarik dan tekan, masing-masing sebesar 327.9822 MPa dan -342.237 MPa. Setelah itu pada 26780 siklus, retak awal (*crack initiation*) pada baja sudah terbentuk yang ditandai dengan penurunan tegangan tarik sebesar 245.1137 MPa dan tegangan tekan sebesar -325.121 MPa. Selanjutnya baja mengalami kegagalan pada total siklus 26858 dengan tegangan tarik dan tekan turun sebesar masing-masing sebesar 175.6086 MPa dan sebesar -268.87 MPa.



Gambar 5. Evolusi perubahan kurva histeresis tegangan-regangan pada amplitudo regangan 0.003 mm/mm.

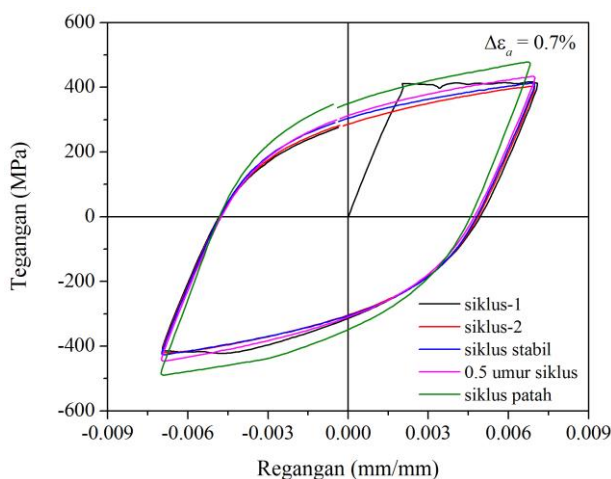


Gambar 6. Evolusi perubahan kurva histeresis tegangan-regangan pada amplitudo regangan 0.005 mm/mm.

Pada Gambar 6, kurva histeresis specimen_A2 dengan amplitudo regangan 0.005 mm/mm menunjukkan pada siklus pertama baja mengalami tegangan tarik puncak sebesar 414.6113 MPa dan tegangan tekan sebesar -422.488 MPa. Selanjutnya baja mulai mengalami pelunakan sama seperti ditunjukkan pada Gambar 4, tegangan pada siklus kedua turun sebesar 401.0262 MPa (tarik) dan sebesar -416.571 MPa (tekan). Pada 106 siklus

(stable cycle) baja mengalami secara perlahan penurunan tegangan tarik sekitar 350.496 MPa, dan tegangan tekan hanya turun sekitar 380.995 MPa. Selanjutnya pada 2000 siklus (*half life cycles*) baja mengalami pengerasan regangan kembali, yang dapat diindikasikan melalui kenaikan tegangan tarik sebesar 380.9406 MPa dan tegangan tekan sebesar -390.154 MPa. Pada amplitudo regangan 0.005 mm/mm, *crack initiation* mulai terbentuk pada baja terjadi pada siklus 2857 (Gambar 6), dimana tegangan tarik mulai turun drastis yaitu sebesar 288.438 MPa dibandingkan dengan terhadap tegangan pada kondisi siklus stabil. dan tegangan tekan menurun sebesar -348.798 MPa. Kemudian kegagalan baja terjadi pada siklus 3606 dimana tegangan turun sangat drastis ke nilai 8.470 MPa, namun baja masih mengalami kondisi tekan dengan nilai tegangan tekan -257.394 MPa. Berdasarkan kurva histeresis dari Gambar 6 dan 7, menunjukkan bahwa pada amplitudo regangan yang berbeda, tegangan puncak menurun seiring dengan meningkatnya jumlah siklus.

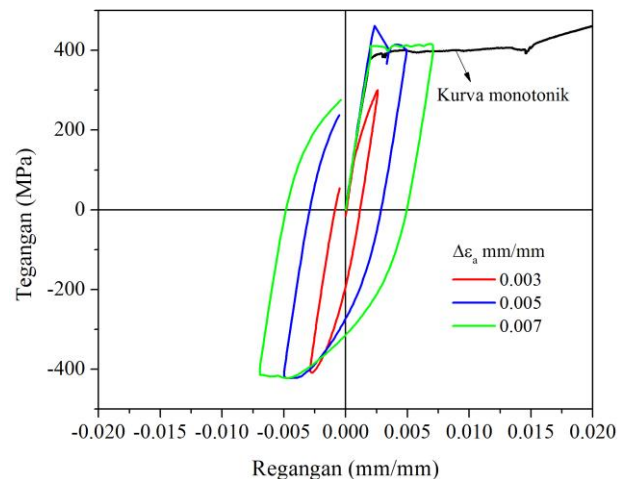
Selanjutnya pengujian fatik siklus rendah pada amplitudo regangan 0.007 mm/mm, dimana mulai siklus kedua sampai siklus ketiga baja mengalami pelunakan yang ditandai dengan menurunnya tegangan tarik, seperti tinjauan pada Gambar 4. Selanjutnya pada siklus keempat baja mengalami peningkatan tegangan tarik sampai pada kondisi siklus stabil dengan tegangan tarik sebesar 412.5948 MPa dan tegangan tekan sebesar -426.311 MPa (Gambar 7).



Gambar 7. Evolusi perubahan kurva histeresis tegangan-regangan dengan amplitudo regangan 0.007 mm/mm.

Jumlah setengah siklus (*half life cycles*) yang dialami baja yaitu: 1000 siklus menunjukkan baja mengalami kondisi pengerasan regangan dengan tegangan tarik maupun tegangan tekan terus meningkat, yaitu: 434.1233 MPa (tarik) dan sebesar -446.563 MPa (tekan). Kondisi ini terus

berlanjut sampai siklus kegagalan baja mencapai 1912 siklus. Peningkatan pengerasan regangan yang dialami baja pada kondisi pengujian fatik siklus rendah 0.007 mm/mm menunjukkan bahwa baja mengalami deformasi plastis yang besar, yang dapat diobservasi melalui meningkatnya luasan kurva histeresis yang dihasilkan oleh spesimen_A3 (Gambar 7).



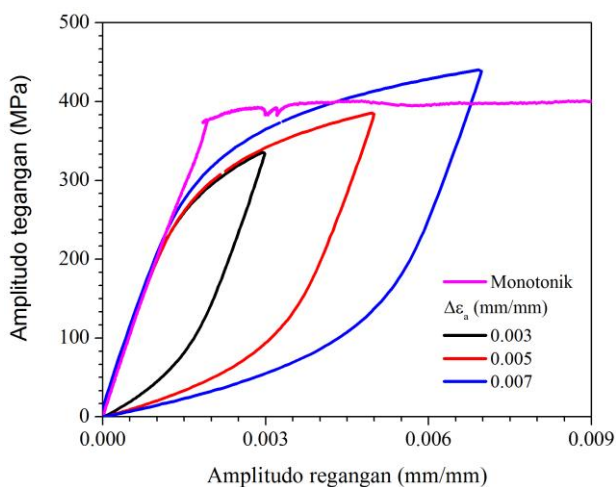
Gambar 8. Kurva tegangan versus regangan pada siklus pertama untuk kondisi siklik dan kondisi monotonik.

Hasil pengujian fatik siklus rendah kurva histeresis pada siklus pertama dengan amplitudo regangan yang berbeda di plot secara bersama dengan kurva tegangan vs regangan pada kondisi monotonik (hasil uji tarik hanya untuk batas regangan 0.02 mm/mm) ditampilkan pada Gambar 8. Gambar 8 menunjukkan siklus pertama pada amplitudo regangan 0.003 mm/mm mengalami pelunakan yang dapat dilihat dari tegangan puncak berada di bawah tegangan monotoniknya. Selanjutnya pada amplitudo regangan ditingkatkan sampai 0.005 mm/mm dan 0.007 mm/mm baja mengalami pengerasan siklik dimana tegangan puncak melebihi tegangan pada kondisi monotonik. Hasil yang sama dialami baja 9Cr-1Mo dengan kondisi *normalizing* dan *tempering*, pengerasan regangan yang dialami baja pada pengujian fatik siklus rendah secara langsung dipengaruhi oleh amplitudo regangan yang digunakan dalam pengujian [4].

Baja anil AISI 4140 menunjukkan perilaku non-Masing yang dapat diamati dari plot kurva histeresis tegangan-regangan pada kondisi setengah siklus (0.5Nf) pada amplitudo regangan berbeda (Gambar 9). Gambar 9 menunjukkan bahwa baja anil AISI 4140 mengalami perilaku sifat non-Masing [8] karena setiap lintasan ujung tegangan tidak berimpit (*co-incident*) pada lintasan pembebanan siklik dalam setiap amplitudo regangan berbeda. Umumnya fenomena ini terjadi karena instabilitas

mikrostruktur dan rendahnya mobilitas dislokasi dalam substrukturnya yang dialami bahan selama pembebanan siklik [8].

Pendekatan prediksi umur fatik berbasis regangan selalu digunakan untuk memprediksi umur fatik bahan melalui persamaan Coffin–Manson–Basquin dengan memplot data-data jumlah kebalikan total siklus patah (reversals to failure, $2N_f$) terhadap amplitudo regangan plastis dan regangan elastis dalam bentuk kurva logaritma pada sumbu- x dan - y [2]. Hasil perhitungan diperoleh parameter fatik siklus rendah baja anil AISI 4140, yang ditampilkan pada Tabel 4.



Gambar 9. Kurva histeresis tegangan-regangan pada tiga amplitudo regangan yang berbeda.

Tabel 4. Nilai parameter fatik siklus rendah dan sifat monotonik (hasil uji tarik)

Parameter fatik siklus rendah	Nilai parameter
Koefisien pengerasan regangan statis, K (MPa)	701.88
Eksponensial pengerasan regangan statis, n	0.0549
Koefisien kekuatan siklik, K'	1413.10
Koefisien kekuatan fatik, σ_f' , MPa	1018.72
Eksponen pengerasan regangan siklik, n'	0.2231
Eksponen kekuatan fatik, b	-0.1770
Koefisien daktilitas kelelahan, ϵ_f' , mm/mm	0.1154
Eksponen daktilitas fatik, c	-0.4290

Kesimpulan

Proses anil pada baja AISI 4140 menurunkan tegangan ultimate sebesar 60.97% dan tegangan luluh sebesar 40.97%. Sebaliknya energi regangan plastis meningkat 98.85% dan elongasi total meningkat 43.84%. Perlakuan panas anil juga meningkatkan umur fatik baja yang disebabkan oleh peningkatan energi regangan plastis. Koefisien kekuatan siklik (K') dan nilai eksponensial pengerasan regangan siklik (n') meningkat sangat signifikan. Persamaan empiris untuk memprediksi

umur fatik baja anil AISI 4140 berbasis regangan adalah:

$$\epsilon_a = 1018.72(2N_f)^{-0.1770} + 0.1154(2N_f)^{-0.4290}.$$

Penghargaan

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Kemenristekdikti yang telah memberikan dana melalui Direktorat Riset dan Pengabdian kepada Masyarakat (DRPM) dalam hibah penelitian kerjasama dan publikasi internasional (PKLN) dengan kontrak No. 062/SP2H/LT/DRPM/2018.

Referensi

- [1] Matweb, <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=AISI%204140>. (diakses tanggal 2 november 2017)
- [2] Mishnev, R. Dudova, N and Kaibyshev, R., 2016, Low cycle fatigue behavior of a 10Cr–2W–Mo–3Co–NbV steel, *International Journal of Fatigue*, 83, 344–355.
- [3] Li, Z. Han, J. Li, W and Pan, L., 2014, Low cycle fatigue behavior of Cr–Mo–V low alloy steel used for railway brake disc, *Materials and Design*, 56, 146–157.
- [4] Verma, P. Srinivas, N.C.S. Singh, S.R and Singh, V., 2016, Low cycle fatigue behavior of modified 9Cr–1Mo steel at room temperature, *Material Science & Engineering A*, 652, 30–41
- [5] Hu, X. Huang, L. Yang, Z. Wang, W. Sha, W. Shan, Y and Yang, W., 2013. Low cycle fatigue properties of CLAM steel at room temperature, *Fusion Engineering and Design*, 88, 3050–3059.
- [6] ASTM E8/E8M Standard test methods for tension testing of metallic materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [7] ASTM E 606-04 Standard practice for strain-controlled fatigue testing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [8] Sarkar, A. Kumawat, B.K and Chakravartty, J.K., 2015, Low cycle fatigue behavior of a ferritic reactor pressure vessel steel, *Journal of Nuclear Materials*, 462, 273–279.