

Pengaruh Rasio Regangan Terhadap Perilaku Low Cycle Fatigue (LCF) Paduan Al 7075-T7

Ari Beni Santoso^{1*)}, Mohammad Badaruddin², Shirley Savetlana²

¹SMK Negeri 1 Seputih Agung, Jl. Raya Dono Arum, Kecamatan Seputih Agung,
Kabupaten Lampung Tengah, Lampung.

²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung,
Jalan Profesor Soemantri Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung 35143.
Email. aribenisantoso@gmail.com

Abstract

The aluminium 7075 alloy is widely used in the aircraft industry for components on the front spar, stabilizer, frames that requires a high strength and low density ratio. The aerospace and automotive industries need to design for lightweight materials, where aluminum alloys are often used as the main component. Aluminum alloys have good corrosion resistance properties. This material is used in a wide field not only for household appliances but also for industrial purposes, for example air-craft, car, marine and other constructions. The phenomenon of ductility decreasing due to pre-fatigue deformation, is the most significant for the combination of long pre-fatigue time, high humidity, and low strain rate. The process of making specimen shapes and dimensions were prepared according to ASTM E8 standard for the tensile specimens and ASTM E606 standard for LCF test, respectively. Characterization of changes in material structures and the types of failure that occurred were carried out using OM, SEM and EDX.

The aluminium alloy 7075-T7 were systematically fatigued under low cycle fatigue testing with strain ratio (R) = -1, -0.05, 0.05, and 0.5, strain rate = 4×10^{-3} /s, and strain amplitude = 0.006 mm/mm, 0.008 mm/mm, 0.010 mm/mm, 0.012 mm/mm, 0.014 mm/mm and 0.016 mm/mm. Aluminum alloys show continuous stability for failure cycle, and the highest material life (fatigue life) is found for strain ratio = 0.05 with strain amplitude = 0.016 mm/mm while the lowest fatigue life is for strain ratio = -0.05 with strain amplitude = 0.006 mm/mm, in which the material show continuous cyclic hardening of the first failed cycle.

Abstrak

Paduan aluminium 7075 banyak digunakan di industri pesawat terbang untuk komponen pada spar depan, stabilizer, frame yang membutuhkan ragam kekuatan tinggi dan rasio kepadatan rendah. Industri kedirgantaraan dan otomotif perlu merancang material ringan, dimana paduan aluminium sering digunakan sebagai komponen utama. Aluminium paduan memiliki sifat tahan korosi yang baik. Bahan ini digunakan di lapangan yang luas tidak hanya untuk peralatan rumah tangga tetapi juga untuk keperluan industri, misalnya konstruksi pesawat terbang, mobil, kelautan dan konstruksi lainnya. Fenomena daktilitas menurun karena deformasi pra-kelelahan, adalah yang paling signifikan untuk kombinasi waktu pra-kelelahan yang lama, kelembaban tinggi, dan laju regangan yang rendah. Proses pembuatan bentuk dan dimensi spesimen disiapkan sesuai standar ASTM E8 untuk spesimen tarik dan standar ASTM E606 untuk uji LCF. Karakterisasi perubahan struktur material dan jenis kegagalan yang terjadi pada penggunaan OM, SEM dan EDX.

Paduan aluminium 7075-T7 mengalami kelelahan secara sistematis pada pengujian kelelahan siklus rendah dengan rasio regangan (R) = -1, -0.05, 0.05, and 0.5, laju regangan = 4×10^{-3} /s, dan amplitudo regangan = 0,006 mm / mm, 0,008 mm / mm, 0,010 mm / mm, 0,012 mm / mm, 0,014 mm / mm dan 0,016 mm / mm. Paduan aluminium menunjukkan stabilitas kontinu untuk siklus kegagalan, dan umur material tertinggi (umur kelelahan) ditemukan pada rasio regangan = 0,05 dengan amplitudo regangan = 0,016 mm / mm sedangkan umur kelelahan terendah adalah rasio regangan = -0,05 dengan amplitudo regangan = 0,006 mm / mm, di mana material menunjukkan pengerasan siklik pada siklus gagal pertama.

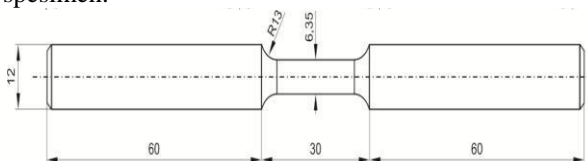
Kata kunci: Low Cycle Fatigue, Aluminum, Fatigue Life, cyclic, Strain Rate and Amplitude Regangan.

PENDAHULUAN

Paduan aluminium sekarang ini banyak sekali digunakan sebagai bahan konstruksi karena memiliki sifat yang luar biasa yang memungkinkan unsur Aluminium mempunyai banyak kegunaan untuk aplikasi dalam berbagai bidang. Memiliki penampilan berwarna putih keperakan dan sifat kekuatan tinggi, spesifik gravitasi rendah, mampu cor tinggi, ketahanan aus tinggi, termal ekspansi rendah dan ketahanan korosi tinggi membuat Aluminium memiliki aplikasi luas dalam domain yang berbeda, seperti transportasi, dekorasi rumah dan aksesoris, bangunan dan konstruksi bankan untuk industri pesawat terbang [Zu dkk.,2008]. Paduan Al 7075 lebih sering digunakan untuk mengurangi berat bobot material namun tetap mempertahankan kekuatan getasnya, dan ada beberapa konsekuensi yang tak terduga dalam aplikasi yang melibatkan paparan panas untuk suhu tinggi. Bahkan, efek paparan suhu tinggi mendekati kondisi anil pada perilaku kelelahan paduan Al 7075-T651 belum diteliti secara langsung. Namun, efek anil pada monotonik dan anisotropi pada 400°C selama 5 menit yang sudah dilakukan pada paduan Al-7075 menghasilkan karakteristik dan anisotropi yang berbeda [Song dkk., 2011]. Karakterisasi perubahan struktur material dan jenis patahan yang terjadi dilakukan dengan melakukan pengujian OM, SEM serta EDX.

MATERIAL, PERALATAN DAN METODE PENGUJIAN

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah paduan aluminium AL 7075 T7 dengan Komposisi dasar Si ~ 0,510%, Cu ~ 0.0104%, Fe ~ 0,225%, Zn ~ 0,0172%, Mg 0,494%, Mn ~ 0,0263%, dan Cr ~ 0,023%, Ti~ 0,0172%, dan Al~ 98.6%. Bentuk dan dimensi ukuran spesimen uji tarik disiapkan sesuai standar ASTM E8 [ASTM E8, 2004] dan untuk uji LCF menggunakan standar ASTM E606 [ASTME 606, 2004] seperti gambar 1 dan 2. Proses pemesinan pembuatan spesimen menggunakan CNC EMCOTronic TM02 buatan Austria, dikerjakan di P2TK/VEDC Malang-Jawa Timur. Diameter grip spesimen adalah 12 mm untuk uji tarik dan LCF. Total 3 spesimen uji dibuat untuk uji tarik sedangkan spesimen untuk LCF dibuat 30 spesimen.



Gambar 1. Dimensi uji tarik ASTM E8

Table 2: Hasil uji low cycle fatigue pada diameter 12 mm. The table contains multiple rows of data with columns for various parameters including stress, strain, and cycle counts.

Gambar 2. Dimensi uji fatigue ASTM E606

Peralatan Pengujian dan Metode Pengujian

Untuk pengujian Tarik dan LCF, semua spesimen uji yang sudah dibuat sesuai standar, diuji menggunakan mesin MTS Landmark 100 KN (statik dan dinamik). Pada penelitian ini, untuk menentukan sifat mekanik paduan Al-Si-Fe-Mg-Ti pengujian dilakukan dalam dua grup: yaitu pengujian LCF dan pengujian tarik pada kondisi temperatur ruang.

Pengujian low cycle fatigue

Spesimen bentuk silinder panjang total 150 dengan diameter reduksi 6.5 mm dan *gage length* 13 mm paling sedikit 38 spesimen digunakan untuk uji LCF pada temperatur ruang (± 25 °C). Masing-masing pengujian dilakukan setiap satu parameter uji sebanyak lima spesimen. Extensometer model 632.13F-20 dengan *gage length* 10 mm dan mempunyai kemampuan mengontrol regangan $\pm 15\%$ (tarik-tekan) dipasangkan pada daerah *gage length* spesimen. Pengujian low cycle fatigue dilakukan menggunakan MTS Landmark 100 KN dengan kondisi rasio regangan $R = -1, -0.05, 0.05, \text{ dan } 0.5$ laju regangan $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ dengan variasi amplitudo regangan 0.6%, 0.8%, 1.0%, 1.2%, 1.4%, dan 1.6%. Kurva hysteresis loops (σ vs. ϵ) dan kurva beban vs jumlah siklus secara otomatis direkam selama pengujian menggunakan program MTS *Testsuite* sebagai data-data kuantitatif untuk menentukan sifat fatigue paduan Al-Si-Mg-Ti. Semua data yang diperoleh dari hasil uji LCF dianalisis menggunakan software MTS *Fatigue Analyzer* (berlisensi).

Observasi mikrostruktur dan fraktografiservasi mikrostruktur dan fraktografi dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro karena pembentukan presipitasi elemen Si, Mg dan Ti menggunakan *optical microscopy* (OM)

and scanning electron microscopy (SEM). Begitu juga karakterisasi menggunakan EDS dilakukan untuk mempelajari perubahan fasa-fasa. Semua data kuantitatif dan kualitatif dari hasil OM, SEM dan EDS digunakan untuk mempelajari perilaku LCF melalui perubahan mikrostruktur dan perubahan fasa dalam paduan aluminium selama pengujian LCF.

Pengujian terhadap ketahanan uji tarik

Pengujian tarik pada temperatur ruang dilakukan paling sebanyak tiga spesimen. Selama pengujian tarik, kontrol pergerakan aktuator secara aksial pertama menggunakan laju regangan konstan 0.3%/min untuk menentukan modulus elastisitas dan tegangan luluh (0.2% offset). Setelah spesimen mencapai regangan 0.3%, kontrol aktuator secara otomatis dipindah ke kontrol perpindahan dengan laju 0.15 mm/min [ASTM E8, 2004]. Pengujian dilakukan sampai spesimen patah. Data tegangan luluh, modulus elastisitas, keuletan dan tegangan maksimum akan diperoleh. Nilai regangan plastis yang diperoleh dari kurva tegangan vs regangan digunakan sebagai nilai referensi untuk parameter pengujian LCF.

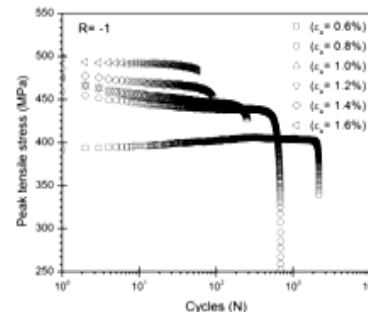
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil uji laju kelelahan siklus rendah

Tabel 1 menunjukkan daftar hasil pengujian *low cycle fatigue* yang menunjukkan jumlah siklus kegagalan pada setiap laju regangan terhadap amplitudo regangan yang berbeda. Respon perilaku tegangan siklik menunjukkan pengaruh amplitudo regangan dan laju regangan terhadap jumlah siklus kegagalan pada pengujian LCF. Gambar 3. pengaruh yang signifikan pada variasi puncak tegangan tarik vs jumlah siklus uji *low cycle fatigue* adapun variasi laju regangan yang digunakan ialah 0,004/s terhadap amplitudo regangan 0,006 mm/mm; 0,008 mm/mm; 0,010 mm/mm; 0,012 mm/mm 0,014 mm/mm; dan 0,016 mm/mm dengan rasio regangan -1. Pengujian pengaruh amplitudo regangan dan laju regangan pada paduan aluminium 7075-T7 memberikan representasi kecenderungan yang baik. Gambar 3 Variasi respon puncak tegangan tarik vs jumlah siklus pada amplitudo regangan yang berbeda dengan R= - 1 dapat dilihat pada. Gambar 3 memperlihatkan pelunakan siklik pada amplitudo regangan = 0,8% - 1,6% Pelunakan siklik cenderung mengalami penurunan seiring meningkatnya regangan amplitude. Namun, pengerasan regangan terjadi pada regangan amplitude 0.4%, seperti yang ditampilkan pada Gambar. 3.

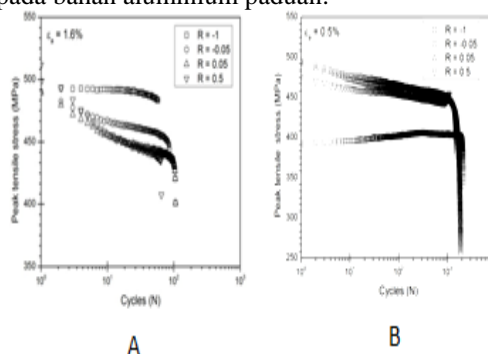
Hasil penelitian menunjukkan bahwa amplitudo regangan memiliki pengaruh yang signifikan pada variasi puncak tegangan tarik vs

jumlah siklus perilaku pelunakan/pengerasan paduan Al 7075-T7, bahwa amplitudo regangan rendah ($\epsilon_a = 0,6\%$) dapat menimbulkan efek pelunakan pada bahan dengan sifat ulet tertentu.



Gambar 3. Variasi respon puncak tegangan tarik vs jumlah siklus pada amplitudo regangan yang berbeda dengan R = -1.

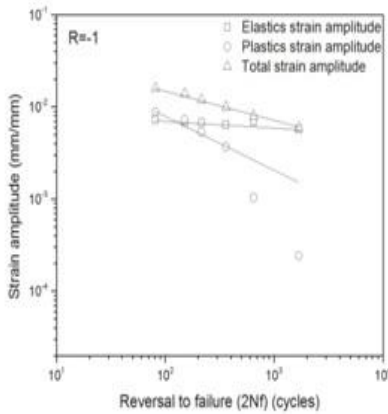
Gambar 4A menunjukkan, menunjukkan variasi respon puncak tegangan tarik vs jumlah siklus pada amplitudo regangan khas 0,5% dan 1,6% dengan rasio regangan dari rasio regangan -1 sampai 0.5. Pelunakan siklik memperlihatkan perbedaan pada amplitudo regangan 0,5% dibandingkan dengan kasus regangan amplitude 0,6%, pelunakan siklik lebih signifikan pada amplitudo regangan 0,5 % dari rasio regangan -1 ke rasio regangan 0,05,. Respon puncak tegangan tarik yang berbeda dari 7075 paduan aluminium pada amplitudo regangan 0.5% dengan R = 0.5, dimana pada rasio regangan 0.5 bahan cenderung mengalami pengerasan. Sedangkan pada amplitude regangan 0.6%, bahan cenderung mengalami pelunakan pada kondisi rasio regangan dari -1 sampai 0.5. Gambar 4B. Fenomena yang sama juga diamati oleh [Matsunaga dkk., 2014] pada bahan aluminium paduan.



Gambar 4. Menggambarkan variasi respon puncak tegangan tarik vs Jumlah siklus pada amplitudo regangan khas 0,6% dan 1,6%

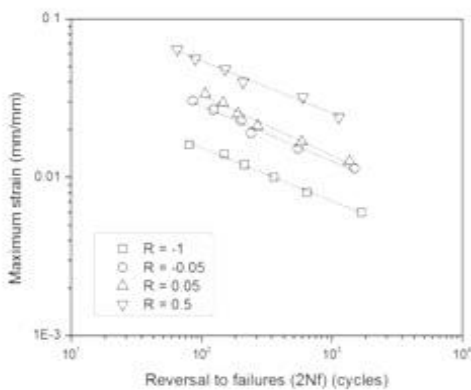
Gambar 5 menampilkan variasi respon puncak tegangan tarik elastic dan plastic pada regangan -1, yang disimbolkan dengan kotak untuk amplitudo regangan elastis, lingkaran untuk amplitudo regangan plastis disimbolkan dan segitiga untuk amplitudo regangan total dari tabel ini dapat kita lihat bahwa jika amplitudo regangan elastis jauh

lebih stabil dibanding dengan amplitudo regangan plastis yang cenderung semakin turun dan lebih mendekati softening yang sama halnya dengan amplitudo regangan totalnya.



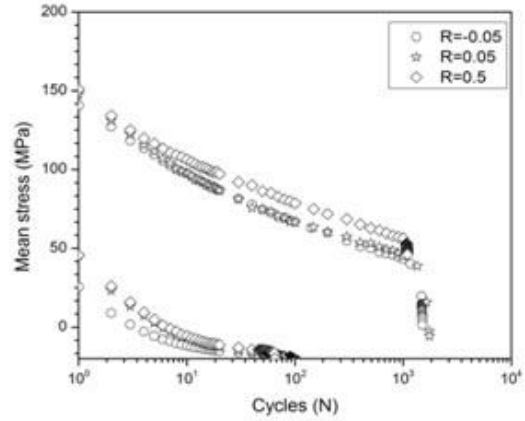
Gambar. 5 Menggambarkan variasi respon puncak tegangan tarik elastic dan plastic pada R = -1

Sedangkan pada gambar 6. Menampilkan variasi respon puncak tegangan tarik maksimum elastic dan plastic yang disimbolkan dengan kotak untuk, untuk R = -1 disimbolkan dengan lingkaran untuk R = -0,05 disimbolkan dengan persegi empat, untuk R = 0,05 disimbolkan dengan segitiga, dan untuk rasio regangan 0,5 disimbolkan dengan segitiga terbalik, dari tabel ini dapat kita lihat bahwa jika pada R = -1 mempunyai puncak tegangan tarik maksimum elastic dan plastic yang paling tinggi sedangkan pada R = -0,05 dan 0,05 puncak tegangan tarik maksimum elastic dan plastic cenderung sama sedangkan pada R = 0,5 mempunyai puncak tegangan tarik maksimum elastic dan plastic yang paling rendah.



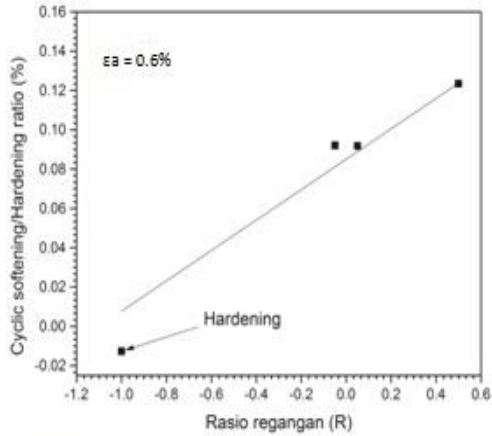
Gambar. 6. Variasi respon puncak regangan tarik maksimum terhadap jumlah siklus patah

Variasi respon puncak tegangan tarik vs jumlah siklus di bawah R = -1, -0.05, 0,05 dan 0,5: (a) ϵ_a 0.6% dan (b) ϵ_a 1.6% adalah puncak tegangan tarik pada siklus pertama dan setengah dari umur kelelahan, masing-masing.



Gambar. 7. Variasi respon tegangan rata-rata terhadap jumlah siklus pada amplitudo regangan (a) $\epsilon_a = 0.6\%$ dan (b) $\epsilon_a = 1.6\%$.

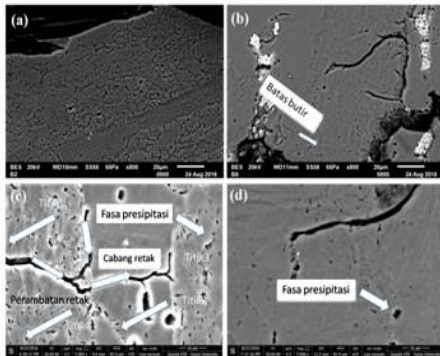
Hasil perilaku softening dan hardening pada (R) -1 dan amplitudo regangan berbeda secara lengkap diberikan. Rasio pelunakan diperlihatkan pada amplitudo regangan dan rasio ketegangan yang berbeda digambarkan dalam Gambar 8, rasio pelunakan siklik diplot sebagai fungsi dari amplitudo regangan. Nilai pada gambar grafik ini menunjukkan bahwa tingkat pelunakan siklik menurun secara linier dengan meningkatnya amplitudo regangan diterapkan. Ketika amplitudo regangan meningkat menjadi 0.5%, rasio pelunakan siklik adalah mendekati nol, menandakan fakta bahwa pelunakan siklik hampir tidak ada. Pada Gambar.8, rasio pelunakan siklik diplot sebagai fungsi dari rasio regangan diterapkan pada amplitudo regangan khas -1 dan 0,5%. bahwa dengan meningkatnya Rasio regangan maka tingkat pelunakan siklik meningkat secara linear di dua amplitudo regangan. Hal ini dapat diamati pada Gambar. 8 bahwa perilaku puncak tegangan tarik tergantung pada amplitudo regangan yang diterapkan. Semakin besar amplitudo regangan, semakin besar tingkat rata relaksasi stres. dan kesimpulan, pelunakan siklik dari 7075-T7 paduan aluminium tergantung pada kedua amplitudo regangan dan rasio regangan. Tingkat pelunakan siklik materi meningkat secara linear dengan amplitudo regangan menurun dan meningkatnya rasio regangan.



Gambar 8. Pengaruh pelunakan dan penerasan Al 7075-T7 pada amplitudo regangan 0.6% dengan rasio regangan yang berbeda.

Karakterisasi Struktur mikro

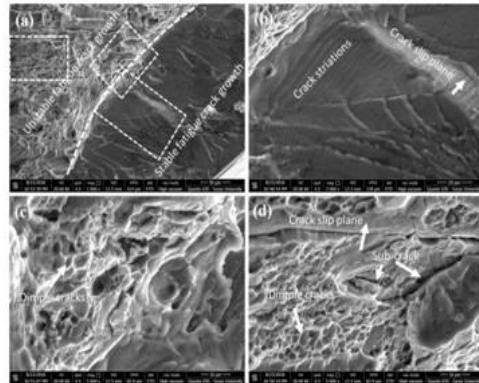
Strain rate berhubungan erat dengan retak yang terjadi saat kelelahan, retakan utama terus menerus menyebar seperti terlihat pada gambar 6. Sementara itu silikon tampak lebih cenderung ditembus oleh retakan utama partikel silikon yang disebabkan regangan elastis di bawah kondisi pembebanan siklik. Fenomena retak yang terjadi pada material disebabkan pengaruh strain rate amplitudo regangan yang menyebabkan terjadinya kelelahan, Pada gambar 9. menunjukkan dimana sebelum terjadinya fase presipitasi diawali dengan batas butir kemudian mengalami fase presipitasi lalu terjadi perambatan retak yang mengakibatkan cabang retak yang semakin melebar.



Gambar 9. SEM struktur mikro dan perambatan retak spesimen hasil uji LCF dengan a. R = -1, b. R = -0.05, c. R = 0.05, dan d. R = 0.5

Struktur mikro spesimen setelah uji LCF diobservasi pada daerah patahan dan daerah sekitar patahan menggunakan SEM. Sedangkan uji komposisi elemen (at.%) dilakukan dengan EDS analisis spektrum.

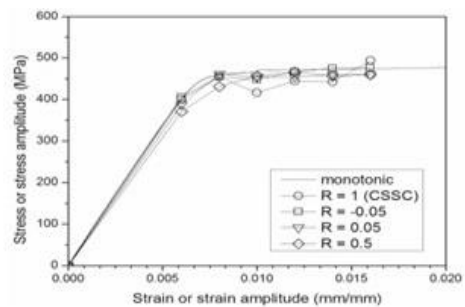
Pada gambar 10a. kondisi dimana material mengalami langsung patah tanpa mengalami proses perambatan retak, sedangkan pada gambar 10b arah retaknya mengikuti alur retaknya dan terjadi juga dimana retak patah pada 2 bidangnya, pada gambar 10c hanya terjadi yaitu patah pada bagian cekungan ductile, pada gambar 10 terjadi dimple crack, crack slip plane, dan sub crack retak pada cabang utama.



Gambar 10. SEM fractografi penampang patahan Al-7075T7 yang di uji LCF.

Ketahanan terhadap tegangan tarik

Kurva beban monotonik dan siklik. Hubungan antara tegangan dan regangan hasil uji tarik (monotonik) diplot pada gambar 11. Selain itu hubungan antara amplitudo tegangan dengan regangan amplitudo pada laju regangan (strain rate) hasil uji beban siklik (LCF) yang berbeda juga diplot pada gambar 11.



Gambar 11. Kurva tegangan vs regangan paduan Al 7075-T7 pada kondisi uji tarik statis dan siklik

Kurva regangan tegangan siklik diperoleh dengan menghubungkan titik puncak loop histeresis stabil untuk amplitudo strain yang berbeda. Kurva regangan tegangan siklik di bawah empat rasio regangan dibandingkan dengan kurva ketegangan monotonik untuk paduan Al 7075-T7. Perilaku tarik

monotonic dari paduan aluminium menunjukkan penurunan dimana kurva ini menunjukkan regangan dan tegangan untuk kondisi siklik dan monotonic untuk monotonic disimbolkan dengan garis, untuk rasio regangan = -1 disimbolkan dengan lingkaran untuk rasio regangan = -0,05 disimbolkan dengan persegi empat, untuk rasio regangan = 0,05 disimbolkan dengan segitiga, dan untuk rasio regangan = 0,5 disimbolkan dengan kotak, dari tabel ini dapat kita lihat bahwa jika rasio regangannya positif maka tegangan amplitudonya cenderung dibawah tegangan monotoniknya sedangkan jika rasio regangannya negative maka tegangan amplitudonya diatas tegangan monotoniknya.

Hal ini disebabkan adanya efek bousinger dimana untuk semua rasio regangannya itu kondisi umumnya adalah tarik tekan dan tekan tarik (cs/cs). Dimana K' adalah koefisien kekuatan siklis dan n' adalah eksponen pengerasan regangan siklik. Parameter karakteristik siklik K' dan n' untuk rasio regangan yang berbeda diperoleh dari analisis regresi linier log-log dengan amplitudo strain plastik dan amplitudo tegangan kerja pada paruh waktu. Ketergantungan yang kuat dari parameter karakteristik siklik K' dan n' pada rasio regangan yang dikenakan juga dilaporkan pada paduan aluminium lainnya, seperti campuran. Pelunakan siklik dari paduan Al 7075-T7 paduan aluminium tergantung pada kedua amplitudo regangan dan rasio regangan. Tingkat pelunakan siklik meningkat secara linear dengan amplitudo regangan menurun dan meningkatnya rasio regangan.

Kelelahan siklus rendah (LCF) berbasis pendekatan coffinmansion

Pemodelan pendekatan berbasis regangan sering digunakan dalam aplikasi Low Cycle Fatigue di mana secara akurat dapat melihat sifat plastisitas yang menghindarkan kerusakan keausan dalam daerah ini. Koefisien umur kelelahan dan eksponen umur kelelahan pada persamaan diperoleh dengan menentukan persamaan regresi yang terbentuk oleh masing-masing kurva. Harga-harga koefisien dan eksponen umur kelelahan untuk tiap material yang diujiditabelkan pada tabel 2. Berdasarkan data-data dari tabel 2, model matematika untuk prediksi perilaku sifat fatik siklus rendah dengan rasio teganga, R = -1 pada penguajian dengan amplitude regangan 0.6% - 1.6% diperoleh persamaan (1), sebagai berikut:

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c$$

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b$$

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{763.10}{E} (763.10)^{-0.0756} + (763.10)^{-0.624} \quad (1)$$

R-1	
Fatigue strength coefficient, σ'_f (Mpa)	763.10
Fatigue strength exponent, b	-0.0756
Fatigue keuletan coefficient, ϵ'_f (mm/mm)	0.231
Fatigue keuletan exponent, c	-0.624

Tabel 2. Sifat fatik siklus rendah paduan Al 7075-T7 pada penguajian R = -1

SIMPULAN

Pada penguajian ini, laju regangan untuk uji kelelahan siklus rendah pada laju regangan konstan (Strain rate) = 4×10^{-3} /s paduan Al7075-T7 secara sistematis diamati dalam rasio regangan (R) = -1, -0.05, 0.05, dan 0.5. Untuk setiap rasio regangan diberikan amplitudo regangan = 0.006 mm/mm, 0.008mm/mm, 0.010 mm/mm, 0.012mm/mm, 0.014 mm/mm dan 0.016 mm/mm. Paduan aluminium menunjukkan stabilitas yang kontinyu untuk siklus kegagalan, umur material (fatigue life) yang tertinggi didapatkan pada rasio regangan = 0.05 dengan amplitudo regangan = 0.016 mm/mm sedangkan umur (fatigue life) terendah yaitu pada laju regangan = -0.05 mm/mm dengan amplitudo regangan = 0.006 mm/mm, di mana material menunjukkan pengerasan siklik terus menerus dari siklus pertama sampai gagal. Fenomena yang diamati dalam loop histeresis tren yang baik dengan deformasi siklik (pengerasan atau stabilitas). Fraktur permukaan untuk paduan Al 7075-T7 menunjukkan beberapa crack strations, retak cekung pada bidang slip, dan retak kedua yang merupakan cabang retak utama.

REKOMENDASI

Dari penelitian yang telah dilakukan, rekomendasi yang dapat diberikan adalah: (1) Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang sistem siklus fatik tingi (HCF) dari Al 7075 T7. (2) Untuk pemilihan amplitudo regangan diupayakan di bawah 0.015mm/mm.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Agarwal H., Gokhale A.M., Graham S., Horstemeyer M.F. Pertumbuhan Void di 6061-aluminium campuran bawah negara stres triaksial, Material Science and Engineering 2003; A341: 35-42.

[2] Angeloni M., 2013, Fatigue life evaluation of A356 aluminum alloy used for engine cylinder head.

- [3] ASTM E8, 2004, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, West Conshohocken, United States. ASTM E606, 2004, Standard Practice for Strain.
- [4] Brammer A.T., 2013, Experiments and modeling of the effects of heat exposure on fatigue of 6061 and 7075 aluminium alloys.
- [5] Fan K.L., He G.Q., et.al., 2013, Tensile and fatigue properties of gravity casting aluminum alloys for engine cylinder heads, *Materials Science and Engineering: A*, 586: 78-85.
- [6] Fonte M.D., Reis L., Freitas M.D, 2015, Fatigue crack growth under rotating bending loading on aluminium alloy 7075-T6 and the effect of a steady torsion, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 80, Part A: 57-64.
- [7] Joshi T.C., Prakash U., Dabhade V.V., 2015, Microstructural development during hot forging of Al 7075 powder, *Journal of Alloys and Compounds*, 639: 123-130.
- [8] Matsunaga H., Makizaki M., Socie D.F., Yanase K., Endo M., 2014, Acceleration of fatigue crack growth due to occasional mode II loading in 7075 aluminum alloy, *Engineering Fracture Mechanics*, 123: 126-136.
- [9] Song M.S., Kong Y.Y., et.al., 2011, Cyclic stress-strain behavior and low cycle fatigue life of cast A356 alloys, *International Journal of Fatigue*, 33(12): 1600-1607.
- [10] Torabi A.R., Alaei M., 2015, Mixed-mode ductile failure analysis of V-notched Al 7075-T6 thin sheets, *Engineering Fracture Mechanics*, 150: 70-95.
- [11] Tschegg S.E.S., Meischel M., Arcari A., Iyyer N., Apetre N., Phan N., 2016, Combined cycle fatigue of 7075 aluminum alloy – Fracture surface characterization and short crack propagation, *International Journal of Fatigue*, [doi:10.1016/j.ijfatigue.2015.10.022](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.10.022).
- [12] Yamada H., Tsurudome M., Miura N., Horikawa K., Ogasawara N., 2015, Hydrogen loss of 7075 aluminum alloys affected by interaction of hydrogen, fatigue deformation, and strain rate, *Materials Science and Engineering: A*, 642: 194-203. *Journal of Fatigue*, 33(12) : 1600-1607.
- [13] Zhu X., Shyam A., et.al., 2006, Effects of microstructure and temperature on fatigue behavior of E319-T7 cast aluminum alloy in very long life cycles, *International Journal of Fatigue*, 28(11): 1566-1571.