



Analisis Perambatan Retak Fatigue pada Baja AISI 4140 dengan Perlakuan Multi-austempering

Sugiyanto^{a,*}, Mohammad Badaruddin^a, Lusmeilia Afriani^b, Dikpride Despa^c, dan Ratna Widyawati^b

^aJurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung, Jl. Prof. Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145

^bJurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung, Jl. Prof. Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145

^cJurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, Jl. Prof. Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145

INFORMASI ARTIKEL

ABSTRAK

Riwayat artikel:

Diterima 10 April 2025

Diterbitkan 24 Juni 2025

Kata kunci:

Baja AISI 4140,
multi-austempering,
fatigue crack propagation,
struktur bainitik,
sisa austenit

Abstrak Penelitian ini mengkaji perilaku perambatan retak lelah pada baja AISI 4140 yang diberi perlakuan panas multi-austempering. Spesimen uji tarik dan *perambatan retak lelah (Fatigue Crack Propagation-FCP)* disiapkan masing-masing sesuai dengan ASTM E8 dan ASTM E647. Multi-austempering dilakukan dengan memanaskan spesimen pada suhu austenit selama 10 menit menggunakan koil pemanas induksi. Spesimen kemudian direndam dalam *salt bath* untuk setiap waktu transformasi isothermal 60 menit pada tiga tingkat suhu austempering dari 312°C hingga 412°C dengan kenaikan suhu 50°C. Uji pertumbuhan retak tarik dan lelah dilakukan pada spesimen anil dan multi-austemper. Telah diamati bahwa perlakuan panas multi-austempering secara signifikan meningkatkan sifat tarik dan sifat FCP baja AISI 4140. Pengamatan mikrostruktur menunjukkan bahwa fasa bainitik dan sisa austenit meningkatkan kekuatan tarik dan menurunkan laju perambatan retak lelah (da/dN). Ditemukan bahwa struktur bainitik merupakan penghalang yang efektif dalam mengurangi perambatan retak lelah seiring dengan meningkatnya siklus pembebanan lelah.

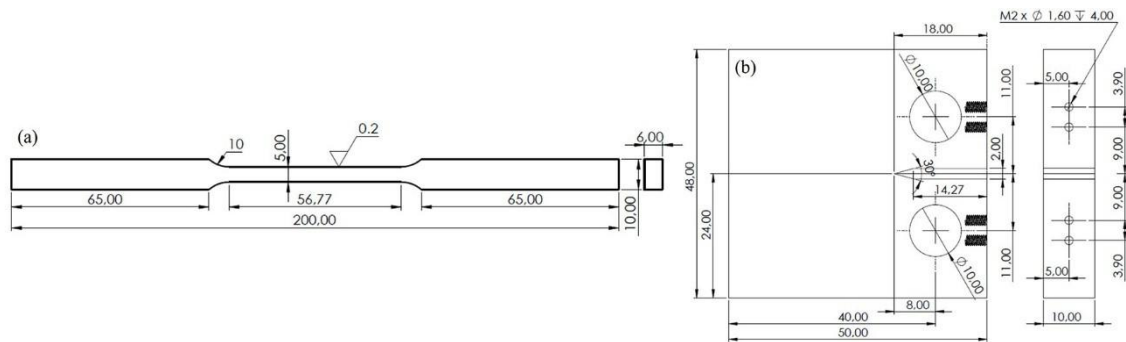
1. Pendahuluan

Baja AISI 4140 merupakan baja paduan rendah dengan kandungan karbon sekitar 0,4% berat. Ini banyak digunakan dalam aplikasi otomotif, komponen mesin dan elemen struktural yang terkena pembebanan siklik (Badaruddin, dkk., 2019). Salah satu kelemahan baja ini adalah kerentanannya terhadap kegagalan lelah akibat pembebanan siklik yang berulang-ulang. Oleh karena itu, penerapan perlakuan panas yang tepat diperlukan untuk meningkatkan kapasitas material dalam menahan perambatan retak lelah. Multi-austempering merupakan salah satu dari sejumlah metode perlakuan panas yang mampu meningkatkan sifat mekanik baja, dengan manfaat tambahan berupa peningkatan ketahanan terhadap perambatan retak lelah (Badaruddin, dkk., 2024). Prosesnya melibatkan peningkatan suhu baja hingga terbentuk austenit, diikuti dengan pendinginan cepat dalam serangkaian rendaman garam yang dipertahankan pada kisaran suhu bainit (Badaruddin, dkk., 2024). Tujuan dari perlakuan ini adalah untuk mendapatkan struktur mikro yang lebih beragam, serta meningkatkan ketangguhan baja (Bilal, dkk., 2019).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi sifat mekanik baja AISI 4140, termasuk ketahanannya terhadap perambatan retak lelah (*Fatigue Crack Propagation-FCP*), setelah perlakuan multi-austempering. Tujuan dari pengujian kelelahan adalah untuk memastikan perilaku retakan pada kondisi pembebanan siklik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan berharga mengenai pengaruh perlakuan multi-austempering terhadap ketahanan retak lelah baja AISI 4140 pada kondisi pembebanan kelelahan siklik.

2. Metodologi Penelitian

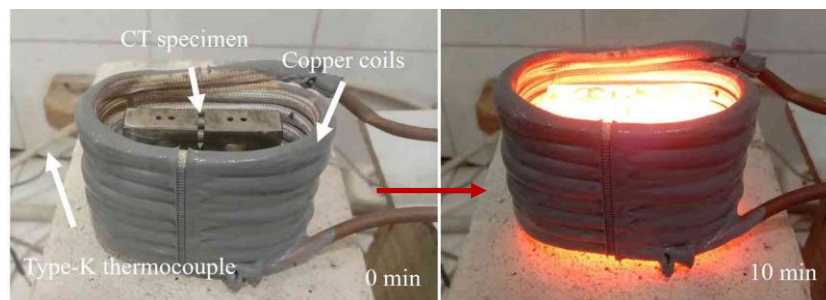
Bahan dan Perlakuan Panas. Dalam penelitian ini, spesimen dari baja AISI 4140 disediakan untuk masing-masing spesimen perambatan retak tarik dan lelah (FCP)-CT yang mengikuti standar ASTM E8 (ASTM E8M, 2004) (Gambar. 1a) dan standar ASTM E647 (ASTM E647, 2000) (Gambar. 1b).



Gambar 1. Detail dimensi dan geometri untuk (a) benda uji tarik dan (b) CT (satuan dalam mm)

Untuk perlakuan panas anil, spesimen dipanaskan dalam tungku pada suhu 815°C selama 60 menit. Kemudian didinginkan perlahan dalam tungku pada suhu 11°C/jam hingga 665°C. Ketika mencapai suhu 665°C, tungku dimatikan hingga mencapai suhu kamar.

Empat benda uji, yaitu benda uji tarik dan benda uji CT, secara kontinu dikenakan tiga tingkat suhu austempering (multi-austempering/MA) dengan menggunakan *salt bath*. *Salt bath* terdiri dari campuran garam yang terdiri dari 50 bagian natrium nitrat (NaNO_3) dan 50 bagian kalium nitrat (KNO_3) dengan perbandingan persentase berat. Spesimen dipanaskan sampai suhu austenit seragam selama 10 menit dalam koil pemanas induksi tembaga (Gambar 2). Warna oranye pada spesimen CT menunjukkan bahwa suhu spesimen telah mencapai sekitar 927°C (Badaruddin, 2024), yang menunjukkan suhu austenit yang seragam. Selanjutnya, spesimen dikenakan perlakuan multi-austempering yang terdiri dari tiga suhu transformasi isothermal, yaitu 312°C, 362°C, dan 412°C. Suhu pada setiap level dipertahankan untuk waktu transformasi isothermal tetap selama 60 menit. Setelah prosedur austempering tiga tahap selesai, spesimen kemudian didinginkan hingga suhu kamar



Gambar 2. Spesimen CT dipanaskan sampai suhu austenit dalam koil pemanas induksi tembaga

Pengujian Mekanis. MTS Landmark 100 kN yang terhubung ke PC digunakan untuk pengujian tarik. Template uji tarik MTS Test Suite (MPE) digunakan untuk melakukan uji tarik statis aksial. Benda uji ditarik terus menerus diberikan dengan laju beban konstan 0,02 kN/s hingga patah. Kurva tegangan-regangan yang diperoleh dari uji tarik digunakan untuk memastikan *yield strength* (σ_y) dan *ultimate tensile strength* kekuatan tarik ultimit (σ_{ult}). Nilai pengurangan luas dan perpanjangan masing-masing benda uji dihitung dengan mengukur diameter awal dan panjang alat ukur sebelum dan sesudah pengujian tarik.

Pengujian perambatan retak lelah (FCP) dilakukan menggunakan MTS Landmark 100 kN dengan perangkat lunak MTS Test Suite (MPE) dan dijalankan secara otomatis dari template FCP. Pengujian FCP dilakukan pada spesimen CT dengan beban maksimum 7,545 kN, *stress ratio* (R) 0,1, dan gelombang sinus sejati dengan pembebanan siklik pada 10 Hz.

Analisis laju perambatan retak lelah (da/dN) dilakukan dengan menggunakan pasangan data yang terdiri dari nomor siklus (N, dalam siklus) dan panjang retak (a, dalam mm). Perhitungannya laju perambatan retak lelah (da/dN) dan kisaran faktor intensitas tegangan (ΔK) dilakukan dengan menggunakan *the polynomial step seven-point method* (ASTM E647, 2000).

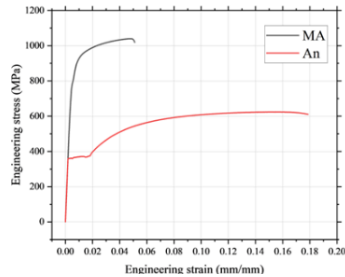
Karakterisasi Mikrostruktur. Pengamatan fraktografi SEM dilakukan untuk memastikan jenis fraktur yang terjadi pada spesimen CT setelah dilakukan pengujian FCP. Pengamatan mikrostruktur dilakukan menggunakan mikroskop optik (OM) untuk memastikan perubahan mikrostruktur dan fase yang ada pada baja AISI 4140 dalam kondisi annealing dan multi-austempering.

Hasil dan Pembahasan

Hasil uji tarik. Hasil uji tarik baja AISI 4140 setelah proses annealing (An) dan setelah proses austempering (MA) tiga tahap dapat disajikan dengan kurva tegangan-regangan seperti terlihat pada Gambar 3. Sifat tarik AISI 4140 pada kondisi annealing dan multi-austempering dirangkum dalam Tabel 1.

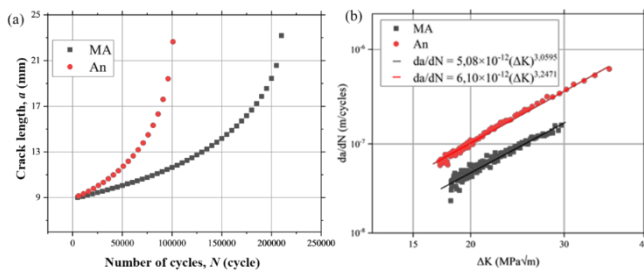
Tabel 1. Sifat tarik baja AISI 4140 pada perlakuan panas yang berbeda

Specimen	Tensile strength, MPa		Plastic energy (J)	Elastic energy (J)	Area reduction (%)	Elongation (%)
	σ_s	$\sigma_{0.2}$				
An	359	624	100.00	0.44	49.40	28.10
MA	829	1040	54.10	4.24	41.50	7.30



Gambar 3. Rekayasa regangan versus kurva tegangan baja AISI 4140 dalam perlakuan panas yang berbeda

Gambar 3 dan Tabel 1 menunjukkan bahwa hasil pengujian baja AISI 4140 dengan perlakuan panas MA menghasilkan nilai σ_y dan σ_{ult} yang lebih signifikan dibandingkan hasil uji tarik baja AISI 4140 dengan perlakuan panas annealing.



Gambar 4. (a) Kurva hubungan panjang retak dengan jumlah siklus dan (b) laju perambatan retak lelah (da/dN) vs rentang faktor intensitas tegangan (ΔK) baja AISI 4140 dalam kondisi perlakuan panas yang berbeda

Analisis Perambatan Retak Fatik. Pada kurva hubungan jumlah siklus terhadap panjang retak baja AISI 4140 untuk perlakuan panas anil, retakan mulai merambat pada 5961 siklus setelah panjang *pre-crack* 9,0 mm (Gbr. 4a) adalah sekitar 0,15 mm. Nilai panjang retak maksimum terjadi pada 100,961 cycle dengan total panjang retak 22,6 mm. Spesimen baja AISI 4140 yang dianil mengalami patah statis sebanyak 102.314 siklus. Hasil FCP baja AISI 4140 setelah perlakuan panas multi austempering menunjukkan perambatan retak dimulai pada 5000 siklus setelah siklus *pre-crack* dengan menghasilkan nilai panjang retak sebesar 0,003 mm. Panjang retakan total kira-kira 23,18 mm pada 210.000 siklus (Gbr. 4a). Terakhir, spesimen mengalami patah statis sebanyak 211.266 siklus.

Terdapat perbedaan jumlah siklus yang signifikan pada baja AISI 4140 setelah perlakuan panas anil dan multi-austemper. Setelah multi-austempering, hasil FCP untuk baja AISI 4140 multi-austemper menunjukkan jumlah siklus yang lebih tinggi, yang menunjukkan bahwa perambatan retak lebih lambat dibandingkan hasil FCP yang diperoleh setelah anil. Temuan ini menunjukkan bahwa multi-austempering dapat meningkatkan ketahanan FCP baja AISI 4140.

Perilaku FCP baja AISI 4140 dalam kondisi annealing dan multi-austemper dapat diselidiki dengan menentukan nilai konstanta material C dan m. Hal ini dicapai dengan memplot ΔK versus da/dN pada sumbu xy logaritmik ganda, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4b. Nilai-nilai ini ditetapkan sebagai konstanta Paris dan dinyatakan dalam Persamaan. 1 sebagai berikut:

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

Nilai konstanta C dan m diperoleh dari analisis kurva metode regresi linear hubungan antara ΔK dan da/dN , seperti diilustrasikan pada Gambar 4b. Persamaan da/dN untuk baja AISI 4140 pada kondisi annealing dan multi-austempering disajikan pada Persamaan. (2) dan (3), masing-masing.

$$da/dN = 6.10 \times 10^{-12}(\Delta K)^{3.25} \quad (2)$$

$$da/dN = 5.08 \times 10^{-12}(\Delta K)^{3.06} \quad (3)$$

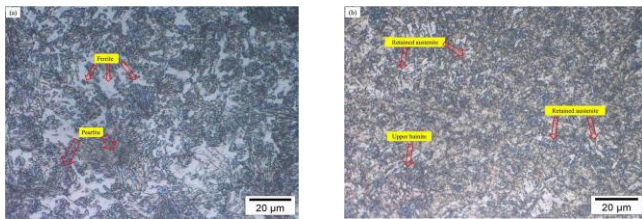
Perilaku FCP baja AISI 4140 dengan perlakuan panas annealing pada Gambar 4b menunjukkan nilai da/dN terendah sebesar $1,64 \times 10^{-8}$ m/cycle dengan nilai ΔK sebesar 15,58 MPa√m. Sedangkan nilai da/dN tercepat adalah $1,53 \times 10^{-6}$ m/siklus dengan nilai ΔK sebesar 46,67 MPa√m. Terlihat dari hasil FCP pada Gambar 4b, benda uji anil (An) mempunyai nilai da/dN yang lebih tinggi pada saat retakan mulai merambat hingga benda uji mencapai patah pada nilai da/dN yang cepat.

Berdasarkan Persamaan (2) dan (3), baja AISI 4140 pada kondisi multi-ustempering mempunyai da/dN yang lebih lambat dibandingkan AISI 4140 pada kondisi annealing. Perilaku FCP baja AISI 4140 dalam kondisi anil dan multi-austempering, seperti ditunjukkan pada Gambar 4, diselidiki melalui perambatan retakan terhadap siklus pembebanan pada setiap spesimen CT. Seperti ditunjukkan pada Gambar 4a, permulaan perambatan retakan relatif kecil, namun menjadi lebih jelas ketika spesimen pecah. Nilai da/dN terendah pada benda uji MA adalah sekitar $1,01 \times 10^{-8}$ m/siklus pada nilai ΔK sebesar 15,52 MPa√m. Selanjutnya nilai da/dN yang paling signifikan adalah $5,68 \times 10^{-7}$ m/siklus pada nilai ΔK sebesar 37,940 MPa√m. Proses austempering tiga tahap menunjukkan bahwa da/dN pada awal pembentukan retakan relatif kecil tetapi menjadi lebih jelas ketika spesimen mendekati patah.

Hasil FCP ΔK vs da/dN baja AISI 4140 pada Gambar 4b setelah perlakuan panas annealing dan setelah proses multi-austempering menunjukkan bahwa nilai ΔK meningkat seiring dengan meningkatnya nilai da/dN setiap spesimen. Gambar 4b mengilustrasikan kurva da/dN , yang menunjukkan fenomena penutupan retakan yang terjadi ketika retakan merambat di bawah 11,00 mm. Fenomena ini dapat dikaitkan dengan pertumbuhan retakan melalui fase keras yang terdiri dari karbida pipih atau struktur bainit. Selain itu, nilai ΔK sebesar 18,26 MPa√m untuk benda uji analog dengan nilai ΔK benda uji MA pada panjang retakan 11,52 mm. Penelitian (Wang dkk., 2014), transformasi austempering isothermal multi-tahap dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik baja paduan rendah dengan menyempurnakan struktur mikronya. Perlakuan panas austempering multi-tahap secara efektif mengurangi ukuran dan fraksi volume austenit yang tertahan dan meningkatkan ketebalan

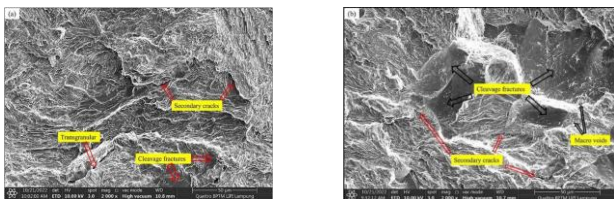
rata-rata pelat bainit. Hal ini menghasilkan peningkatan sifat mekanik baja (Lan, 2017).

Pengamatan Struktur Mikro dan Fraktografi SEM. Pengamatan struktur mikro untuk baja dalam kondisi anil dan multi-austempering masing-masing ditunjukkan pada Gambar 5a dan Gambar 5b. Struktur mikro ferit yang disajikan pada Gambar 5a menunjukkan sifat yang lebih cerah, sangat lembut dan *highly magnetic*, sehingga relatif lemah, lunak dan sangat ulet (Oger, 2023). Perlit merupakan campuran dua fasa yang mulai terbentuk ketika austenit dengan komposisi eutektoid secara bersamaan berubah menjadi ferit dan besi karbida (semenit/Fe₃C). Perlit, yang mengandung banyak endapan sementit pipih, dicirikan oleh kekuatan dan ketangguhan relatifnya.



Gambar 5. Struktur mikro khas baja AISI 4140 pada kondisi (a) annealing dan (b) multi-austempering

Pengamatan struktur mikro baja AISI 4140 setelah proses multi-austempering menunjukkan terbentuknya struktur mikro bainit bagian atas dan sisa austenit (Gambar 5b). Ketika austenit didinginkan pada laju sedang (lebih lambat dari laju yang diperlukan untuk membentuk martensit tetapi lebih cepat dari laju yang diperlukan untuk membentuk perlit) sambil mempertahankan suhu austempering yang konstan, struktur mikro bainit atas akan terbentuk. Klasifikasi bainit umumnya didasarkan pada kisaran suhu pembentukannya, menurut (Speer dkk., 2004) Bainit atas terbentuk secara isothermal pada kisaran suhu 400°C hingga 550°C, sedangkan bainit yang lebih rendah terbentuk secara isothermal pada kisaran suhu 200°C hingga 400°C.



Gambar 6. Pengamatan SEM pada rekahan permukaan spesimen CT pada (a) anil dan (b) kondisi multi-austempering

Gambar 6 menunjukkan morfologi permukaan fraktografi SEM spesimen setelah pengujian FCP. Fraktografi SEM menunjukkan keretakan pada baja AISI 4140 setelah perlakuan panas annealing dan multi-austempering. Hasil pengamatan fraktografi SEM pada baja AISI 4140 setelah perlakuan panas annealing menunjukkan pola patahan transgranular. Patahan transgranular terjadi akibat retakan yang merambat melalui butiran. Retakan sekunder dan patahan belahan ditunjukkan pada Gambar. 6a dan 6b. Retakan sekunder terjadi akibat perambatan *fatigue striations* akibat pembebanan yang terus menerus. Untuk spesimen CT anil, seperti ditunjukkan pada Gambar 6a, retakan sekunder merambat

terutama pada batas butir antara matriks ferit dan endapan Fe₃C *hard lamellar*. Sebaliknya, untuk spesimen CT austemper seperti ditunjukkan pada Gambar 6b, retakan sekunder disebabkan oleh perambatan retakan antara pelat bainitik dan fase austenit tertahan, dengan austenit tertahan mengandung karbon tingkat tinggi [2]. Patah belahan lebih mungkin terjadi pada baja AISI 4140 dengan perlakuan multi-austempering dibandingkan pada baja AISI 4140 dengan perlakuan annealing. Fraktur pembelahan dan mikrovoid adalah dua mekanisme fraktur mikro utama yang terjadi selama perambatan retakan pada material. Menurut penelitian (Birenis, dkk., 2018), patahan belahan mulai terdeteksi ketika tingkat tegangan di depan ujung retak mencapai nilai kritis.

Kesimpulan

Temuan penyelidikan menunjukkan bahwa proses multi-austempering pada suhu 312°C, 362°C, dan 412°C, dengan waktu penahanan terus menerus pada masing-masing suhu 60 menit. Penerapan perlakuan panas multi-austempering pada baja AISI 4140 yang dianil menghasilkan peningkatan yang signifikan dalam kekuatan luluh dan kekuatan ultimat. Peningkatan yang diamati cukup besar, dengan peningkatan kekuatan luluh sebesar 130% dan peningkatan *ultimate strength* sebesar 66,67%. Perambatan retak lelah (FCP) pada baja AISI 4140 ditemukan dipengaruhi secara signifikan oleh pembentukan struktur bainitik atas dengan *retained austenite structures* pada baja multi-austemper. Sebaliknya, pembentukan struktur ferit-perlit kasar pada baja anil menyebabkan laju da/dN yang relatif cepat. Nilai konstanta da/dN untuk baja multi austemper ($C = 5,08 \times 10^{-12}$ dan $m = 3.06$) diamati lebih rendah dibandingkan baja AISI 4140 yang dianil ($C = 6.10 \times 10^{-12}$ dan $m = 3.25$). Dapat dihipotesiskan bahwa penerapan multi-austempering pada baja AISI 4140 yang dianil menghasilkan pembentukan struktur mikro bainitik dan austenitik tertahan, yang pada gilirannya meningkatkan kekuatan tarik dan mengurangi perambatan retak lelah.

Ucapan terima kasih

Terimakasih kami sampaikan kepada Universitas Lampung terkhusus kepada Kepala Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) yang telah memberikan pendanaan dalam hibah penelitian Merdeka Belajar dan Kampus Merdeka (MBKM) berdasarkan kontrak nomor 545/UN26.21/PN/2024.

Daftar pustaka

- ASTM E647, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- ASTM-E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, West Conshohocken, PA, United States, DOI (2004).
- D. Birenis, Y. Ogawa, H. Matsunaga, O. Takakuwa, J. Yamabe, Ø. Prytz, A. Thøgersen, Hydrogen-assisted fatigue crack propagation in a pure BCC iron. Part II: Accelerated regime manifested by quasi-cleavage fracture at relatively high stress intensity range values, MATEC Web Conf., 165 (2018) 03010.
- H.F. Lan, L.X. Du, Q. Li, C.L. Qiu, J.P. Li, R.D.K. Misra, Improvement of strength-toughness combination in austempered low carbon bainitic steel: The key role of refining prior austenite grain size, Journal of Alloys and Compounds, 710 (2017) 702-710.

- J.G. Speer, D.V. Edmonds, F.C. Rizzo, D.K. Matlock, Partitioning of carbon from supersaturated plates of ferrite, with application to steel processing and fundamentals of the bainite transformation, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8 (2004) 219-237.
- L. Oger, S. Vernier, P. Joly, J.M. Cloue, L. Laffont, E. Andrieu, Study of the relationships between microstructure and local mechanical properties in the ductile-to-brittle transition of a bainitic steel containing local segregations, *Materials Today Communications*, 37 (2023) 107436.
- M. Badaruddin, R.A. Ainnayah, R.N. Wijaya, S. Sumardi, Investigation of Austempering Effect on Fatigue Crack Growth of AISI 4140 Steel, *Defect and Diffusion Forum*, 431 (2024) 115-120.
- M. Badaruddin, Sugiyanto, H. Wardono, Andoko, C.J. Wang, A.K. Rivai, Improvement of low- cycle fatigue resistance in AISI 4140 steel by annealing treatment, *International Journal of Fatigue*, 125 (2019) 406-417.
- M. Badaruddin, Sugiyanto, S. Sumardi, D. Asmi, Improvement of the fatigue crack growth resistance in AISI 4140 steel under single- and multi-austempering heat treatments, *Results in Engineering*, 21 (2024) 101814.
- M.M. Bilal, K. Yaqoob, M.H. Zahid, E.u. haq, W.H. Tanveer, A. Wadood, B. Ahmed, Effect of austempering conditions on the microstructure and mechanical properties of AISI 4340 and AISI 4140 steels, *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (2019) 5194-5200.
- X.L. Wang, K.M. Wu, F. Hu, L. Yu, X.L. Wan, Multi-step isothermal bainitic transformation in medium-carbon steel, *Scripta Materialia*, 74 (2014) 56-59.