R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal | Vol.11 No.2/2026
ISSN online (2528-3723)
http://doi.org/10.21070/rem.v11i2.1885

Pengaruh Temperatur Pemanasan terhadap *Fatigue Lifetime* dan *Grain Area* Baja ASTM A36 untuk Aplikasi Ruang Bakar Incinerator

Eko Nugroho[1*], Asroni[2], Hanif Aziz[3], Untung Surya Dharma[4]
*Email corresponding author: exonugros@gmail.com

Universitas Muhammadiyah Metro, Jl Ki Hajar Dewantara No 116, Kota Metro, Indonesia

Article history: Received: 15 September 2026 | Revised: 21 Oktober 2026 | Accepted: 26 Oktober 2026

Abstract. *This study aimed to analyze the effect of heating temperature on the fatigue lifetime and grain area of ASTM A36 steel. Specimens were heated at 600 °C, 650 °C, and 700 °C for 7 hours, then cooled in open air to room temperature and left undisturbed for 7 days. Fatigue tests were conducted using the rotary bending method, and microstructures were examined using an optical microscope. Grain area was measured using ImageJ and analyzed using Origin. The average number of cycles to failure decreased from 1,237,091 cycles for the raw material to 142,064 cycles, 86,639 cycles, and 69,296 cycles after heating at 600 °C, 650 °C, and 700 °C, respectively. Conversely, grain area increased from 7,071.828 μm² to 11,420.762 μm², 18,605.091 μm², and 38,990.618 μm², respectively. These results indicate that higher heating temperatures were associated with increased grain area and reduced fatigue lifetime.*

Keywords - *ASTM A36; Fatigue Lifetime; Grain Area; High Temperature; Incinerator.*

Abstrak. *Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh temperatur pemanasan terhadap fatigue lifetime dan grain area baja ASTM A36. Spesimen dipanaskan pada temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C selama 7 jam, kemudian didinginkan di udara terbuka hingga mencapai temperatur ruang dan didiamkan selama 7 hari. Pengujian fatigue dilakukan menggunakan metode rotary bending, sedangkan struktur mikro diamati menggunakan mikroskop optik. Grain area diukur menggunakan ImageJ dan dianalisis menggunakan Origin. Hasil menunjukkan bahwa rata-rata jumlah siklus hingga patah menurun dari 1.237.091 siklus pada raw material menjadi 142.064 siklus, 86.639 siklus, dan 69.296 siklus setelah pemanasan masing-masing pada 600 °C, 650 °C, dan 700 °C. Sebaliknya, grain area meningkat dari 7.071,828 μm² menjadi 11.420,762 μm², 18.605,091 μm², dan 38.990,618 μm². Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pemanasan berkaitan dengan peningkatan grain area dan penurunan fatigue lifetime.*

Kata Kunci - *ASTM A36; Grain Area; Fatigue Lifetime; Incinerator; Temperatur Tinggi.*

PENDAHULUAN

Incinerator merupakan perangkat yang digunakan untuk membakar limbah pada temperatur tinggi di dalam ruang pembakaran yang terisolasi dan terkendali [1]. Proses pembakaran pada incinerator umumnya berlangsung pada temperatur sekitar 600–1000°C dan menghasilkan gas hasil pembakaran serta residu berupa abu [2]. Pengoperasian incinerator juga bertujuan mengurangi volume dan massa limbah serta mengendalikan dampak pembakaran terhadap lingkungan [3], [4]. Berbagai penelitian mengenai desain, pirolisis, dan penerapan teknologi termal pada incinerator menunjukkan pentingnya kondisi operasi dan karakteristik ruang bakar dalam mendukung proses pembakaran [5],[7]. Kondisi temperatur tinggi tersebut menjadikan pemilihan material sebagai salah satu aspek penting dalam menunjang keandalan ruang bakar. Selain mampu memenuhi kebutuhan konstruksi, material yang digunakan perlu dievaluasi berdasarkan perubahan karakteristiknya setelah mengalami paparan temperatur tinggi.

Baja ASTM A36 merupakan baja karbon yang memiliki kekuatan memadai, kemampuan pembentukan yang baik, serta kemampuan las yang relatif baik [8], [9], [12]. Karakteristik tersebut menjadikan baja ini banyak digunakan untuk keperluan konstruksi dan berpotensi digunakan pada konstruksi ruang bakar incinerator. Namun, paparan temperatur tinggi dapat mengubah karakteristik mikrostruktur dan sifat mekanik baja, sebagaimana ditunjukkan dalam kajian mengenai hubungan struktur mikro dan sifat mekanik baja struktural setelah mengalami kebakaran [11]. Penelitian terhadap baja ASTM A36 dengan perlakuan *pack carburizing* juga telah dilakukan, tetapi berfokus pada pengaruh variasi temperatur proses terhadap laju korosi material [19]. Temuan dari penelitian terdahulu tersebut menunjukkan bahwa perubahan karakteristik baja setelah perlakuan termal perlu dikaji sesuai dengan jenis perlakuan dan sifat material yang menjadi perhatian. Oleh karena itu, evaluasi terhadap baja ASTM A36 untuk aplikasi ruang bakar perlu mempertimbangkan respons material terhadap kondisi pemanasan serta perubahan karakteristik mikrostrukturnya.

Copyright © 2026 Author [s]. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms

Selain perubahan sifat material akibat paparan temperatur tinggi, respons material terhadap pembebanan siklik juga berkaitan dengan kondisi termal dan karakteristik mikrostruktur. Zhang et al. [13] mengkaji mekanisme inisiasi dan propagasi retak selama *thermal fatigue* pada superalloy DZ125, sedangkan Suhartono [14] membahas hubungan ukuran butir dengan kekuatan fatik melalui pendekatan eksperimen, perhitungan, dan simulasi. Kedua penelitian tersebut memberikan dasar untuk mempertimbangkan kondisi termal dan karakteristik butir dalam kajian perilaku fatik material. Meskipun demikian, hasil dari material dan kondisi pengujian yang berbeda tidak dapat langsung digunakan untuk menjelaskan perilaku baja ASTM A36 yang mengalami pemanasan sebelum pengujian fatik. Dengan demikian, hubungan antara perubahan karakteristik butir dan *fatigue lifetime* baja ASTM A36 setelah perlakuan pemanasan masih perlu dievaluasi pada kondisi pengujian yang ditetapkan.

Berdasarkan kajian pustaka tersebut, kesenjangan penelitian terletak pada perlunya evaluasi terpadu terhadap perubahan *grain area* dan *fatigue lifetime* baja ASTM A36 setelah pemanasan pada temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C selama 7 jam, dilanjutkan dengan pendinginan di udara terbuka hingga mencapai temperatur ruang dan pendiaman selama 7 hari. Berbeda dari penelitian terdahulu yang membahas baja struktural setelah kebakaran, perlakuan *pack carburizing* pada ASTM A36, atau perilaku *thermal fatigue* pada material lain, penelitian ini mengkaji *grain area* melalui pengamatan struktur mikro dan *fatigue lifetime* melalui pengujian *rotary bending* pada baja ASTM A36 dalam rangkaian kondisi perlakuan tersebut. Dengan demikian, kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi kedua parameter tersebut secara bersamaan untuk mengidentifikasi kecenderungan hubungan antara temperatur pemanasan, perubahan *grain area*, dan *fatigue lifetime*. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan *grain area* dan *fatigue lifetime* baja ASTM A36 setelah perlakuan pemanasan pada variasi temperatur tersebut serta mengevaluasi keterkaitan di antara ketiganya sebagai informasi awal dalam mempertimbangkan penggunaan material untuk aplikasi ruang bakar incinerator.

METODE

Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja ASTM A36 berbentuk silinder pejal yang telah difinishing melalui proses *machining*. Karakteristik material baja ASTM A36 yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik baja ASTM A36 [9], [10], [12]

Komposisi Kimia (%)														
C	**Si**	**Mn**	**P**	**S**	**No**	**Cu**	**Cr**	**Ni**	**Mo**	**V**	**Al**	**Ti**	**N**	**Cl**
0,14	0,223	0,68	0,006	0,011	0,004	0,05	0,02	0,02	0,002	0,001	0,040	0,001	0,003	0,26

Physical Properties	***Metric***	***English***	***Comments***
Density	7,80 g/cc	0,282 lb/in^3	*Typical of ASTM Steel*

Mechanical Properties	***Metric***	***English***	***Comments***
Tensile Strength, Ultimate	400 – 550 MPa	58000 – 79800 psi	
Tensile Strength, Yield	250 MPa	36300 psi	
Elongation at Break	20%	20%	In 200 mm
	23%	23%	In 50 mm

Mechanical Properties	***Metric***	***English***	***Comments***
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi	*Typical for Steel*
Bulk Modulus	160 GPa	23200 ksi	
Poissons Ratio	0,26	0,26	
Shear Modulus	79,3 GPa	11500 ksi	

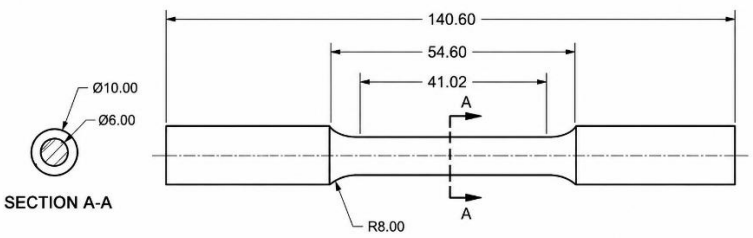
Pembuatan Spesimen Uji

Spesimen uji dibuat berbentuk silinder pejal yang telah difinishing melalui proses *machining* (Gambar 1). Jumlah spesimen yang digunakan dalam penelitian ini sebanyak 12 spesimen, yang terdiri atas 3 spesimen *raw material* dan 9 spesimen yang diberikan tiga variasi perlakuan pemanasan yaitu 600 °C, 650 °C, dan 700 °C. Untuk setiap temperatur dilakukan tiga kali pengujian.

Bentuk dan dimensi spesimen uji disesuaikan dengan standar ISO 1143:2021 untuk pengujian *rotating bar bending fatigue* [22], seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Dimensi spesimen tersebut digunakan sebagai acuan dalam proses pembuatan spesimen agar diperoleh bentuk dan ukuran yang seragam untuk seluruh kondisi pengujian.



Gambar 1. Spesimen Uji



Gambar 2. Dimensi spesimen uji

Pemanasan dalam *Furnace*

Pemanasan spesimen dilakukan menggunakan furnace Nabertherm buatan Jerman yang dilengkapi sistem pengendali temperatur digital. Temperatur furnace ditetapkan pada 600 °C, 650 °C, dan 700 °C sesuai dengan variasi perlakuan. Laju pemanasan tidak diatur secara khusus, melainkan dibiarkan berlangsung hingga furnace mencapai temperatur target. Setelah temperatur target tercapai, sistem pengendali digital mempertahankan temperatur yang ditetapkan selama 7 jam dan mematikan furnace secara otomatis setelah waktu penahanan berakhir. Keseragaman distribusi temperatur di dalam ruang furnace tidak diukur secara khusus menggunakan sensor tambahan. Oleh karena itu, penelitian ini tidak mengasumsikan bahwa temperatur di seluruh posisi spesimen sepenuhnya seragam, meskipun temperatur target dikendalikan melalui sistem digital bawaan furnace. Setelah pemanasan, spesimen didinginkan di udara terbuka hingga mencapai temperatur ruang dan didiamkan selama 7 hari sebelum pengujian selanjutnya.

Pengujian *Fatigue*

Untuk menentukan besar beban yang digunakan dalam pengujian fatigue, dilakukan perhitungan beban lentur berdasarkan persamaan yang mengacu pada Maryadi dan Saputra [15], sebagai berikut:

$$W = \frac{\pi d^3 \sigma_a}{32(l/2)} \quad (1)$$

Di mana W adalah beban lentur (kg), d adalah diameter benda uji (mm), l adalah panjang benda uji (mm), dan σ_a adalah tegangan lentur yang digunakan (kg/mm²). Tegangan lentur yang digunakan dalam penelitian ini ditetapkan sebesar 25% dari *yield strength* material. Berdasarkan karakteristik mekanik baja ASTM A36 pada Tabel 1, nilai *yield strength* material adalah 250 MPa. Dengan demikian, tegangan lentur yang digunakan dalam pengujian *fatigue* dihitung sebagai berikut:

$$\sigma_a = 25\% \times 250 \text{ MPa} \sigma_a = 62{,}5 \text{ Mpa} \approx 6{,}36 \text{ kg/mm}^2 \quad (2)$$

Selanjutnya, nilai tegangan lentur tersebut digunakan dalam persamaan pembebanan dengan mempertimbangkan dimensi spesimen uji. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh beban lentur yang digunakan pada mesin uji *fatigue* adalah sebesar 6,13 kg. Setelah beban ditentukan, setiap spesimen diuji *fatigue* dengan putaran motor yang ditetapkan sebesar 1000 rpm. Pengujian dilakukan hingga spesimen mengalami patah. Data yang diperoleh berupa jumlah siklus hingga patah (*fatigue lifetime*) dan waktu putus, yang selanjutnya digunakan sebagai data hasil pengujian.

Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengamati karakteristik mikrostruktur material dan menentukan *grain area* pada setiap spesimen uji. Tahap preparasi spesimen diawali dengan pemotongan spesimen, kemudian dilakukan *mounting* menggunakan resin agar spesimen dapat diposisikan dan diamati dengan lebih mudah menggunakan mikroskop optik.

Selanjutnya, permukaan spesimen diamplas secara bertahap menggunakan *grid size* 100, 150, 200, 400, 800, 1000, 1500, dan 2000. Setelah proses pengamplasan selesai, permukaan spesimen dibersihkan menggunakan udara bertekanan untuk menghilangkan sisa material hasil pengamplasan. Proses berikutnya adalah *polishing* menggunakan Autosol hingga diperoleh permukaan yang halus dan mengilap. Spesimen kemudian dicuci dengan akuades dan dikeringkan. Setelah proses preparasi permukaan selesai, dilakukan *etching* menggunakan larutan HNO_3 2% dengan mencelupkan permukaan spesimen selama 10 detik. Proses *etching* dilakukan untuk menampilkan batas butir sehingga karakteristik mikrostruktur dapat diamati dengan lebih jelas. Citra struktur mikro yang diperoleh selanjutnya

digunakan untuk menentukan *grain area* pada masing-masing spesimen uji. Pengukuran *grain area* dilakukan menggunakan perangkat lunak ImageJ dengan mengacu pada prinsip penentuan ukuran butir dalam ASTM E112 [23], sedangkan data hasil pengukuran selanjutnya diolah dan dianalisis secara statistik menggunakan perangkat lunak Origin dari OriginLab. Hasil pengolahan data digunakan untuk memperoleh distribusi dan nilai rata-rata *grain area* pada masing-masing kondisi material.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Temperatur terhadap *Fatigue Lifetime* Baja ASTM A36

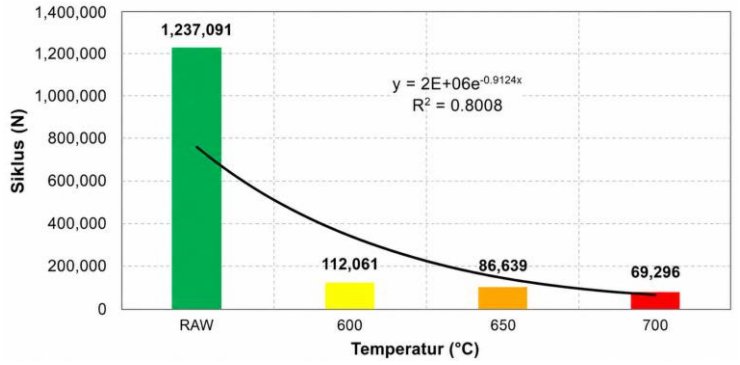
Hasil pengujian *fatigue* baja ASTM A36 pada kondisi tanpa perlakuan (*RAW*) dan setelah pemanasan ditunjukkan pada Tabel 2. Parameter yang digunakan untuk mengevaluasi *fatigue lifetime* adalah jumlah siklus hingga spesimen mengalami kegagalan (*number of cycles to failure*, N_f) dan waktu pengujian hingga terjadi kegagalan.

Tabel 2. Hasil Uji Fatigue

Temperatur (°C)	Waktu Tahan (Jam)	Jumlah Siklus Hingga Patah	Rata – Rata Jumlah Siklus	Waktu Putus (Jam)	Rata – Rata Waktu Putus (Jam)
RAW	0	1.277.371	1.237.091	21,29	20, 61
		1.198.425		19,97	
		1.235.478		20,59	
600	7	175.116	142.064	2,92	2,36
		135.756		2,26	
		115.320		1,92	
650	7	88.607	86.639	1,48	1,44
		82.608		1,38	
		88.701		1,48	
700	7	65.188	69.296	1,09	1,15
		64.233		1,07	
		78.466		1,31	

Berdasarkan hasil pengujian, spesimen pada kondisi *RAW* memiliki *fatigue lifetime* paling tinggi, dengan rata-rata jumlah siklus hingga mengalami kegagalan sebesar 1.237.091 siklus dan waktu pengujian rata-rata 20,61 jam. Setelah material diberikan perlakuan pemanasan, terjadi penurunan jumlah siklus hingga terjadi kegagalan. Pada temperatur 600°C diperoleh rata-rata 142.064 siklus dengan waktu pengujian 2,36 jam, sedangkan pada temperatur 650°C diperoleh rata-rata 86.639 siklus dengan waktu pengujian 1,44 jam. Pada temperatur 700°C, rata-rata jumlah siklus hingga kegagalan semakin menurun menjadi 69.296 siklus, dengan waktu pengujian rata-rata 1,15 jam. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan temperatur perlakuan pada baja ASTM A36 diikuti oleh penurunan fatigue lifetime. Dibandingkan dengan kondisi *RAW*, fatigue lifetime mengalami penurunan sekitar 88,52% pada 600°C, 92,99% pada 650°C, dan 94,40% pada 700°C. Dengan demikian, pada kondisi pembebanan fatigue yang digunakan dalam penelitian ini, peningkatan temperatur perlakuan memberikan kecenderungan penurunan kemampuan material dalam mempertahankan jumlah siklus sebelum mengalami kegagalan.

Hubungan antara temperatur perlakuan dan jumlah siklus hingga kegagalan pada baja ASTM A36 ditunjukkan pada Gambar 3. Kurva tersebut menunjukkan bahwa kondisi *RAW* memiliki nilai N_f yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan material yang mengalami pemanasan. Selanjutnya, peningkatan temperatur dari 600°C hingga 700°C menghasilkan penurunan N_f secara bertahap.

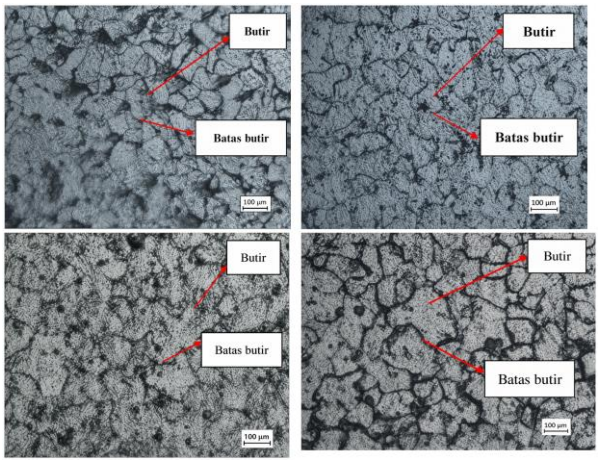


Gambar 3. Grafik Hubungan Antara Temperatur dan Siklus

Hasil ini menunjukkan adanya hubungan negatif antara temperatur perlakuan dan fatigue lifetime, yaitu semakin tinggi temperatur perlakuan, semakin rendah jumlah siklus yang mampu dicapai material sebelum mengalami kegagalan. Kecenderungan penurunan fatigue lifetime pada pengujian rotary bending juga telah diamati pada material logam lain [17]. Hasil pengujian *fatigue* pada temperatur tinggi pada baja feritik juga menunjukkan kecenderungan penurunan *fatigue* life ketika temperatur meningkat [16]. Oleh karena itu, penggunaan jumlah siklus hingga patah sebagai indikator *fatigue lifetime* relevan untuk membandingkan kondisi material.

Hasil Pengamatan Struktur mikro Baja ASTM A36

Hasil pengamatan struktur mikro baja ASTM A36 menggunakan mikroskop optik dengan pembesaran 500× pada kondisi *raw material* dan setelah pemanasan pada temperatur 600°C, 650°C, dan 700°C ditunjukkan pada Gambar 4. Pengamatan dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik butir dan batas butir serta melihat perubahan struktur mikro yang terjadi setelah material mengalami perlakuan temperatur. Pada Gambar 4(a), kondisi *raw material* memperlihatkan butir dengan bentuk dan ukuran yang bervariasi serta batas butir yang relatif jelas. Struktur ini menunjukkan kondisi awal material sebelum diberikan perlakuan pemanasan. Setelah pemanasan pada temperatur 600°C selama 7 jam, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4(b), struktur mikro memperlihatkan perubahan pada karakteristik ukuran butir dibandingkan dengan kondisi awal. Variasi ukuran butir masih terlihat pada bidang pengamatan, dengan beberapa butir yang memiliki area lebih besar dibandingkan dengan kondisi *raw material*. Perubahan tersebut semakin terlihat pada spesimen yang dipanaskan pada 650°C selama 7 jam pada Gambar 4(c), di mana distribusi ukuran butir tampak semakin beragam. Selanjutnya, pada Gambar 4(d), yaitu spesimen yang dipanaskan pada 700°C selama 7 jam, perubahan ukuran butir tampak lebih menonjol dibandingkan dengan ketiga kondisi sebelumnya. Secara visual, beberapa butir menunjukkan area yang lebih besar dengan batas butir yang tetap dapat diamati.



Gambar 4. Hasil Pengamatan Struktur Mikro (a) *Raw Material*, (b) 600 ºC, (c) 650 ºC, (d) 700 ºC

Hubungan Temperatur terhadap Grain Area Baja ASTM A36

Dari hasil pengamatan mikrostruktur, dianalisis melalui pengukuran grain area menggunakan perangkat lunak ImageJ dan data yang didapat diolah secara statistik menggunakan aplikasi Origin. Tabel 3 menyajikan statistik deskriptif hasil pengukuran area butir pada citra mikroskop untuk kondisi *raw* dan setelah pemanasan.

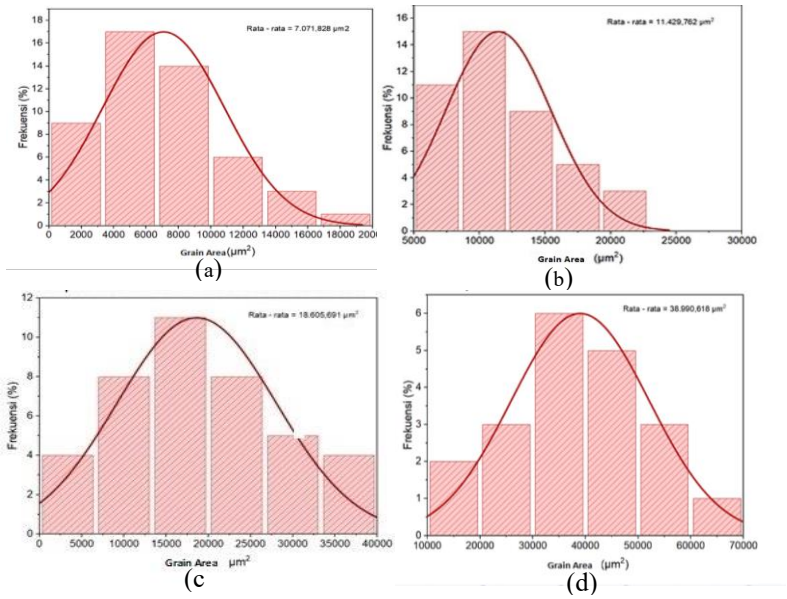
Tabel 3. Nilai *Grain Area* baja ASTM A36

Kondisi material	Jumlah pengukuran (n)	Rata-rata *grain area* (µm²)
RAW	50	7.071,828
600 °C	43	11.420,762
650 °C	40	18.605,091
700 °C	31	38.990,618

Hasil distribusi nilai *grain area* untuk masing-masing kondisi ditampilkan pada Gambar 5. Pada Gambar 5(a), distribusi nilai *grain area raw material* didominasi oleh rentang nilai yang relatif rendah, dengan frekuensi tertinggi pada kisaran sekitar 4.000–8.000 µm² dan nilai rata-rata sebesar 7.071,828 µm². Distribusi tersebut masih menunjukkan adanya variasi nilai *grain area* hingga kisaran sekitar 20.000 µm². Seiring dengan peningkatan temperatur, distribusi nilai *grain area* menunjukkan kecenderungan untuk bergeser ke nilai yang lebih tinggi. Pada Gambar 5(b), spesimen 600°C memiliki frekuensi tertinggi pada kisaran sekitar 8.000–12.000 µm², dengan nilai rata-

rata yang meningkat menjadi 11.420,762 µm². Pada temperatur 650°C, distribusi pada Gambar 5(c) semakin bergeser ke arah nilai yang lebih tinggi, dengan frekuensi terbesar berada pada kisaran sekitar 12.000–18.000 µm² dan nilai rata-rata mencapai 18.605,091 µm². Sementara itu, Gambar 5(d) menunjukkan perubahan distribusi yang paling jelas pada temperatur 700°C, dengan frekuensi tertinggi berada pada kisaran sekitar 30.000–40.000 µm² dan nilai rata-rata sebesar 38.990,618 µm².

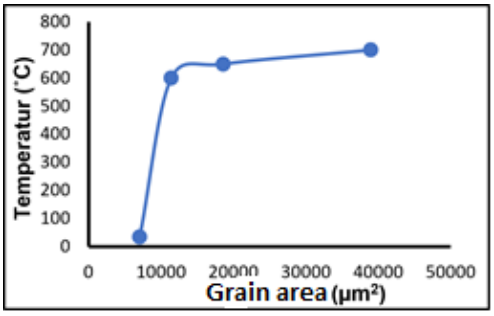
Kecenderungan perubahan tersebut diperjelas melalui Gambar 6 yang menunjukkan hubungan antara temperatur perlakuan dan nilai *grain area*. Grafik memperlihatkan bahwa peningkatan temperatur diikuti oleh peningkatan nilai *grain area*. Namun, perubahan tersebut tidak menunjukkan pola linier sederhana, karena kenaikan nilai *grain area* pada rentang temperatur yang lebih tinggi tampak lebih besar. Peningkatan nilai *grain area* paling nyata terjadi antara temperatur 650°C dan 700°C, ketika nilai rata-rata meningkat dari 18.605,091 µm² menjadi 38.990,618 µm². Pada kondisi 700 °C, nilai tersebut mencapai sekitar 5,51 kali nilai pada *raw material*.



Gambar 5. Grafik Nilai *Grain area* (a) *Raw Material*, (b) 600 ºC, (c) 650 ºC, (d) 700 ºC

Kecenderungan perubahan tersebut diperjelas melalui Gambar 6 yang menunjukkan hubungan antara temperatur perlakuan dan nilai *grain area*. Grafik memperlihatkan bahwa peningkatan temperatur diikuti oleh peningkatan nilai *grain area*. Namun, perubahan tersebut tidak menunjukkan pola linier sederhana, karena kenaikan nilai *grain area* pada rentang temperatur yang lebih tinggi tampak lebih besar. Peningkatan nilai *grain area* paling nyata terjadi antara temperatur 650°C dan 700°C, ketika nilai rata-rata meningkat dari 18.605,091 µm² menjadi 38.990,618 µm². Pada kondisi 700 °C, nilai tersebut mencapai sekitar 5,51 kali nilai pada *raw material*.

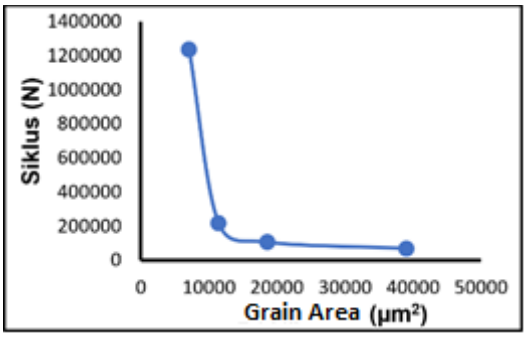
Berdasarkan keseluruhan hasil pengamatan pada Gambar 4(a)–(d), distribusi statistik pada Gambar 5(a)–(d), serta hubungan antara temperatur dan *grain area* pada Gambar 6, dapat diketahui bahwa peningkatan temperatur perlakuan pada baja ASTM A36 diikuti oleh peningkatan nilai *grain area*. Perubahan tersebut menunjukkan adanya perubahan karakteristik struktur mikro material setelah mengalami paparan temperatur yang semakin tinggi. Fenomena perubahan mikrostruktur dan pembesaran butir pada material yang mengalami paparan temperatur tinggi juga ditemukan pada analisis perlakuan termal baja [18], serta pada penelitian perlakuan temperatur terhadap ASTM A36 [19].



Gambar 6. Grafik Temperatur vs *Grain area*

Hubungan *Grain area* dengan *Fatigue Lifetime*

Hubungan antara *grain area* dan *fatigue lifetime* baja ASTM A36 ditunjukkan pada Gambar 7. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat kecenderungan bahwa peningkatan *grain area* diikuti oleh penurunan *fatigue lifetime* material. Pada *raw material*, *grain area* rata-rata sebesar 7.071,828 µm² menghasilkan *fatigue lifetime* rata-rata sebesar 1.237.091 siklus. Setelah material mengalami pemanasan pada temperatur 600 °C, *grain area* meningkat menjadi 11.420,762 µm², sedangkan *fatigue lifetime* menurun menjadi 142.064 siklus.



Gambar 7. Grafik Siklus vs *Grain area*

Selanjutnya, peningkatan *grain area* menjadi 18.605,091 µm² pada temperatur 650 °C diikuti oleh penurunan *fatigue lifetime* menjadi 86.639 siklus. Pada temperatur 700 °C, *grain area* mencapai 38.990,618 µm² dan *fatigue lifetime* kembali menurun menjadi 69.296 siklus.

Secara keseluruhan, data tersebut menunjukkan adanya hubungan yang berlawanan antara *grain area* dan *fatigue lifetime*. Dibandingkan dengan *raw material*, peningkatan *grain area* hingga 38.990,618 µm² pada kondisi pemanasan 700 °C disertai dengan penurunan *fatigue lifetime* dari 1.237.091 menjadi 69.296 siklus. Dengan demikian, perubahan mikrostruktur berupa pertumbuhan *grain area* yang terjadi akibat pemanasan pada temperatur tinggi berkaitan dengan penurunan kemampuan material dalam mempertahankan ketahanannya terhadap pembebanan siklik. Hasil penelitian ini sejalan dengan Suhartono [14], yang menunjukkan bahwa mikrostruktur memiliki pengaruh terhadap proses kerusakan akibat pembebanan fatik, khususnya terhadap pertumbuhan retak mikro. Hasil perhitungan dan simulasi yang dilakukan Suhartono menunjukkan bahwa peningkatan diameter butir menyebabkan penurunan kekuatan fatik dan *fatigue lifetime* material. Suhartono juga menjelaskan bahwa pada pembebanan berulang, mikrostruktur material berpengaruh terhadap pertumbuhan retak, sehingga pemahaman terhadap mekanisme kerusakan pada skala mikroskopis penting dalam memprediksi umur fatik.

Pertumbuhan *grain area* yang diamati pada penelitian ini menyebabkan jumlah batas butir relatif berkurang. Berkurangnya batas butir sebagai penghambat pergerakan dislokasi dapat menyebabkan material menjadi lebih mudah mengalami deformasi lokal selama pembebanan berulang. Kondisi tersebut selanjutnya dapat mempermudah perkembangan kerusakan pada skala mikro dan berkontribusi terhadap penurunan *fatigue lifetime*. Interpretasi ini diperkuat oleh penelitian *thermal fatigue* yang menunjukkan bahwa siklus termal dapat memicu inisiasi dan propagasi retak [21], sedangkan pengembangan metode evaluasi kuantitatif memperlihatkan pentingnya karakterisasi retak untuk menilai tingkat kerusakan *fatigue* [20]. Hasil eksperimen *thermal fatigue* pada baja austenitik juga menunjukkan bahwa proses inisiasi dan propagasi retak merupakan bagian penting dalam degradasi material akibat pembebanan termal berulang [21]. Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa pertumbuhan *grain area* akibat peningkatan temperatur pemanasan berkaitan dengan penurunan *fatigue lifetime* baja ASTM A36.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, pemanasan baja ASTM A36 selama 7 jam pada temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C diikuti oleh penurunan rata-rata *fatigue lifetime* dibandingkan dengan kondisi *raw material*. Rata-rata jumlah siklus hingga patah menurun dari 1.237.091 siklus pada *raw material* menjadi 142.064, 86.639, dan 69.296 siklus pada masing-masing temperatur perlakuan. Dalam kondisi pengujian yang digunakan, nilai rata-rata terendah diperoleh pada pemanasan 700 °C. Pengukuran mikrostruktur menunjukkan kecenderungan peningkatan rata-rata *grain area* seiring kenaikan temperatur pemanasan. Kecenderungan ini berlangsung bersamaan dengan penurunan *fatigue lifetime*, sehingga perubahan *grain area* dan *fatigue lifetime* menunjukkan hubungan yang berlawanan pada kondisi yang diteliti. Namun, karena pengukuran *grain area* dilakukan pada satu citra mikroskop untuk setiap kondisi, hasil tersebut belum dapat digunakan untuk memastikan variasi antarspesimen atau membuktikan hubungan sebab-akibat antara perubahan *grain area* dan penurunan *fatigue lifetime*. Oleh karena itu, temuan ini menunjukkan adanya keterkaitan antara kondisi pemanasan, karakteristik mikrostruktur yang terukur, dan umur lelah baja ASTM A36, tetapi mekanisme kegagalan yang mendasarinya masih memerlukan pengujian lebih lanjut.

REFERENSI

[1] R. Praharsa, A. Asroni, and B. Surono, "Design, modelling dan stress analysis pada frame incinerator dengan variasi beban dari sampah anorganik," TURBO, vol. 12, no. 2, pp. 421–423, 2023, doi:10.24127/trb.v12i2.3008.

[2] Hermansyah, M. Said L., and Hernawati, "Rancang bangun insinerator dua tahap (solusi mengatasi polusi udara pada pembakaran sampah)," JFT: Jurnal Fisika dan Terapannya, vol. 4, no. 1, pp. 38–48, 2017, doi: 10.24252/jft.v4i1.15686.

[3] J. Lumbantobing, I. N. S. Winaya, and I. G. P. A. Suryawan, "Studi laju pembakaran pada insinerator sampah residu," J. Ilm. Tek. Des. Mek., vol. 10, no. 2, pp. 1289–1292, 2021.

[4] A. Lasmana, Junaidi, and E. Kurniawan, "Rancang bangun alat pembakar sampah (incinerator) dengan burner oli bekas," J. Teknol. Rekayasa Tek. Mesin, vol. 2, no. 1, pp. 35–40, 2021.

[5] I. Abdullah, Y. N. Manik, Barita, Jufrizal, Supriatno, and Zainuddin, "Desain insinerator menggunakan bahan bakar cangkang kelapa sawit," J. Rekayasa Mater. Manufaktur Energi, vol. 2, no. 1, pp. 34–43, 2019, doi: 10.30596/rmme. v2i1.3067.

[6] N. Nuriman, E. T. Astuti, and N. Rohmat, "Analisa pirolisis di dalam incinerator menggunakan simulasi software SolidWorks," JIPTEK, vol. 3, no. 1, 2021.

[7] P. E. Broto, Fitriyanti, A. Kusmiran, and K. Ihsan, "Rancang bangun insinerator pengolahan sampah dengan penerapan teknologi termal yang ramah lingkungan," JFT: Jurnal Fisika dan Terapannya, vol. 11, no. 1, pp. 19–30, 2024, doi: 10.24252/jft.v11i1.45734.

[8] E. Nugroho, N. Rajabiah, and Y. Pramudya, "Analisa pengaruh waktu dan suhu pada ruang bakar incinerator menggunakan ASTM A36 terhadap nilai korosi," TURBO, vol. 13, no. 2, pp. 451–458, 2024, doi: 10.24127/trb. v13i2.3825.

[9] M. U. Fajri, Ahsan, and Y. Handoyo, "Analisis material baja ASTM A36 pada daun pintu air bendung Bekasi dengan metode simulasi building information modeling," J. Ilm. Tek. Mesin, vol. 6, no. 2, 2018.

[10] Y. B. Saputro, Nurhadi, and R. F. Listyanda, "Studi komparatif pengaruh nitrocarburizing terhadap sifat mekanik dan sifat fisik baja karbon rendah," ELEMEN J. Tek. Mesin, vol. 11, no. 2, pp. 63–72, 2024, doi: 10.34128/je. v11i2.282.

[11] H. U. Sajid, D. L. Naik, and R. Kiran, "Microstructure–mechanical property relationships for post-fire structural steels," J. Mater. Civ. Eng., vol. 32, no. 6, p. 04020133, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003190.

[12] J. Arifin, H. Purwanto, and I. Syafa'at, "Pengaruh jenis elektroda terhadap sifat mekanik hasil pengelasan SMAW baja ASTM A36," Momentum, vol. 13, no. 1, pp. 27–31, 2017, doi: 10.36499/jim. v13i1.1756.

[13] J. Zhang, Z. Zhao, Y. Kong, Z. Zhang, and Q. Zhong, "Crack initiation and propagation mechanisms during thermal fatigue in directionally solidified superalloy DZ125," Int. J. Fatigue, vol. 119, pp. 355–366, 2019, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2018.09.001.

[14] H. A. Suhartono, "Pengaruh besar butir terhadap kekuatan fatik: eksperimen, perhitungan dan simulasi," J. Sains Mater. Indonesia, vol. 6, no. 3, pp. 37–45, 2005.

[15] M. Maryadi and R. Saputra, "Analisa kekuatan baja karbon AISI 1045 pada uji fatik tipe rotary bending," J. Baut Manufaktur, vol. 4, no. 1, pp. 47–53, 2022, doi: 10.34005/baut dan manufaktur. v4i1.2017.

[16] A. Nagesha, M. Valsan, R. Kannan, K. Bhanu Sankara Rao, and S. L. Mannan, "Influence of temperature on the low cycle fatigue behaviour of a modified 9Cr–1Mo ferritic steel," Int. J. Fatigue, vol. 24, no. 12, pp. 1285–1293, 2002, doi: 10.1016/S0142-1123(02)00035-X.

[17] E. Budiyanto, E. Nugroho, and A. Zainudin, "Uji ketahanan fatik aluminium scrap hasil remelting piston bekas menggunakan alat uji fatik tipe rotary bending," TURBO, vol. 7, no. 1, 2018, doi: 10.24127/trb. v7i1.717.

[18] R. S. Simanjuntak, U. Budiarto, and I. P. Mulyatno, "Analisis pengaruh variasi larutan garam pada proses quenching terhadap ketahanan aus, struktur mikro, dan kekerasan baja VCN 150 sebagai material poros propeller," J. Tek. Perkapalan, vol. 12, no. 3, 2024.

[19] A. W. Y. P. Parmita, B. C. Priyandoko, H. A. Dewanto, R. A. Tanjung, S. A. Bramantyo, and R. Febriyanto, "Analisis pengaruh variasi temperatur proses pack carburizing terhadap laju korosi material baja karbon ASTM A36," SPECTA J. Technol., vol. 5, no. 2, pp. 186–195, 2021, doi: 10.35718/specta.v5i2.279.

[20] Y. Qi, B. Wang, S. Li, X. Ren, J. Zhou, Y. Li, and J. Mo, "Improved quantitative analysis method for evaluating fatigue cracks in thermal fatigue testing," Mater. Lett., vol. 242, pp. 115–118, 2019, doi: 10.1016/j.matlet.2019.01.113.

[21] Y. Wang, A. Charbal, F. Hild, S. Roux, and L. Vincent, "Crack initiation and propagation under thermal fatigue of austenitic stainless steel," Int. J. Fatigue, vol. 124, pp. 149–166, 2019, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.02.036.

[22] International Organization for Standardization, "ISO 1143:2021, Metallic materials — Rotating bar bending fatigue testing," Geneva, Switzerland, 2021.

[23] ASTM International, "ASTM E112-25: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size," ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2025, doi: 10.1520/E0112-25.