

KARAKTERISTIK PATAH DAN KETAHANAN LELAH BESI COR MALLEABLE

M Dzaky Hafidz ¹⁾ ✉, Hendri Chandra ¹⁾

¹⁾Jurusan Teknik Mesin
Universitas Sriwijaya
dzakyh21@gmail.com
hendrichandra@ft.unsri.ac.id

Abstract

Malleable cast iron is one of the cast irons that has excellent forging properties. Malleable cast iron is the result of heat treatment of white cast iron, so that cementite is decomposed to form graphite in the form of rosettes. Malleable cast iron is often used for tooling and on railway components. Testing to determine the fatigue limit of malleable cast iron is very important so that it can find out the maximum fatigue load that malleable cast iron can receive. Fatigue testing was carried out with variations in loading angles of 1o, 2o, 3o, 4o and 5o. From the tests carried out, the fatigue limit of malleable cast iron is below a voltage of 100.4 MPa. Metallographic testing is also carried out to determine the microstructure in malleable cast iron. The microstructure formed in the specimen is in the form of graphite in the form of a rosette and there is a ferrite phase, so the malleable cast iron tested is malleable matrix ferritic cast iron. Fault surfaces in specimens were also observed through visual observation and scanning electron microscopy (SEM). Through visual observations on the surface of the fault, beachmark are seen, in specimens given a loading angle of 1o has a wider area of beachmark compared to other loading angles. This is because the smaller the loading angle, the smaller the voltage so that the crack propagation area will be wider. SEM observations indicate that the fracture that occurred was a transgranular fracture.

Keywords: Fatigue Testing, Fatigue Limit, Malleable Cast Iron, S-N Curve, SEM.

1. PENDAHULUAN

Besi cor merupakan salah satu logam yang paling banyak digunakan. Volume produksi besi cor pun cenderung stabil, hal ini disebabkan oleh sifat pengecoran dan pengolahan besi cor yang lebih baik jika dibandingkan dengan baja ^[1]. Berdasarkan kadar karbon dan silikon yang terkandung, besi cor memiliki 4 jenis yaitu besi cor kelabu, besi cor *nodular*, besi cor putih dan besi cor *malleable* atau mampu tempa. Diantara ke empat jenis besi cor tersebut besi cor *malleable* menjadi salah satu material yang sangat dibutuhkan di industri teknik mesin ^[2]. Karena besi cor jenis ini memiliki sifat mampu tempa yang sangat baik. Besi cor *malleable* banyak digunakan sebagai perkakas, komponen-komponen kereta api, *fitting* pipa kecil dan perangkat keras pembangun, terutama untuk coran bagian tipis dan coran yang kemudian di *galvanis* ^[3].

Secara mikrostruktur, besi cor *malleable* dibentuk dengan campuran karbon temper dalam kisi *ferrit* yang terkandung silikon cair. Berasal dari besi cor putih yang melalui proses perlakuan panas ^[4]. Besi cor putih dianil pada suhu tertentu hingga beberapa jam untuk

Corresponding Author:
✉ M Dzaky Hafidz
Received on: 2022-07-07
Revised on: 2022-07-14
Accepted on: 2022-12-20

memecah *sementit* menjadi besi dan *grafit*, menghasilkan besi cor *malleable* [5]. Karena struktur mikro besi cor *malleable* mendominasi sifat mekaniknya kemampuan dari besi cor *malleable* ini bergantung pada kekerasan matriks [6]. Dibandingkan dengan besi cor *malleable* bermatriks *perlit*, yang memiliki kekerasan dan kekuatan tarik lebih tinggi tetapi daktilitas lebih rendah daripada besi cor bermatriks *ferritik*, besi cor *malleable* bermatriks ferrit memiliki daktilitas maksimum tetapi kekuatan tarik rendah [7]. Namun, sifat mekanik pada besi cor *malleable* juga akan semakin menurun. Karena beban yang diterima oleh besi cor *malleable* akan melebihi beban maksimum material jika material tersebut digunakan secara terus menerus dengan waktu yang lama [8][9]. Sehingga dapat terjadinya kegagalan pada material besi cor *malleable*, salah satu kegagalan yang sering terjadi adalah kegagalan *fatigue* [10].

Kegagalan *fatigue* atau kegagalan lelah adalah kegagalan pada suatu material yang terjadi akibat beban berulang. Umumnya, patah tersebut terjadi setelah periode pemakaian yang cukup lama. Tahapan terjadinya patahan pada kegagalan lelah memiliki tiga tahapan yaitu awal retak, rambatan retak dan patahan akhir [11][12]. Awal retak, umumnya diawali dengan munculnya retakan pada permukaan benda yang mengalami kecacatan atau area yang mengalami pengurangan tegangan pada benda, seperti takik atau lubang [13][14]. Rambatan retak terjadi setelah terjadinya retakan awal sehingga terjadi konsentrasi tegangan dan mengakibatkan rambatan retak. Patah akhir, terjadi ketika rambatan retak menyebar dan material akan mengalami kelelahan sehingga patah secara permanen [15].

Fatigue atau kelelahan adalah kerusakan material yang diakibatkan oleh adanya tegangan yang berfluktuasi yang besarnya lebih kecil dari tegangan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) dan tegangan luluh (*yield strength*). Suatu bagian dapat dikenakan berbagai macam kondisi pembebanan termasuk tegangan berfluktuasi, regangan berfluktuasi, temperatur berfluktuasi atau dalam kondisi lingkungan yang korosif atau temperatur tinggi. Kebanyakan kegagalan pemakaian terjadi sebagai akibat tegangan-tegangan lelah [16]. Kegagalan lelah secara jelas menunjukkan akumulasi kerusakan melalui proses rambatan retak atau *crack propagation*, dimana proses tersebut tidak akan terjadi tanpa adanya deformasi plastis pada ujung *crack* [17].

Ketahanan lelah atau *Fatigue* limit adalah kemampuan material dalam menerima beban lelah. Untuk mendapatkan ketahanan lelah memerlukan kurva S-N. Kurva S-N merupakan kurva yang dihasilkan dari pengujian lelah. Kurva S-N adalah grafik hubungan antara kekuatan lelah (S= *Strength*) dan jumlah siklus pembebanan (N= *Number of stress cycle*). Besarnya N dan rentang tegangan S berbanding terbalik [18]. Ketika tingkat *stress* atau tegangan meningkat, jumlah siklus kegagalan pun akan berkurang.

2. METODE DAN BAHAN

Penelitian dimulai dengan persiapan alat dan bahan untuk melakukan proses pengujian *fatigue*, setelah itu spesimen akan diuji metalografi untuk mengetahui struktur mikro dari besi cor *malleable*, lalu dilakukan pengamatan visual untuk menganalisa permukaan patahan lalu terakhir pengujian SEM untuk melihat perambatan retak pada spesimen.

2.1. Bahan Penelitian.

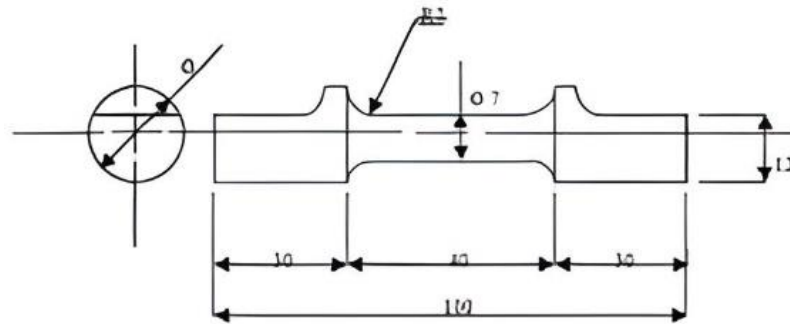
Spesimen pengujian adalah besi cor *malleable*, dengan komposisi kimia yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia besi cor *malleable*.

| C | Si | Mn | P | S |
|-------|------|------|-----|------|
| 2,6 % | 1,6% | 0,65 | 0,1 | 0,18 |

2.2. Pengujian *Fatigue*.

Pengujian *fatigue* dilakukan di laboratorium Teknik Mesin Universitas Sriwijaya Menggunakan *Fatigue Torsion Repeated and Bending Machine*. Berikut adalah dimensi ukuran standar spesimen pengujian *fatigue* dengan JIS Z 2273 seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Dimensi spesimen pengujian *fatigue* metode *repeated torsion*.

Untuk mendapatkan besar siklus (N) pada pengujian *fatigue* menggunakan rumus berikut.

$$N = t \times n \quad (1)$$

Dimana :

N = Siklus

T = Waktu (detik)

n = Putaran motor = 50 rps

Berikut adalah rumus tegangan maksimum pengujian *fatigue* sesuai dengan spesifikasi mesin *Fatigue Repeated Torsion* yang ada di laboratorium material Teknik Mesin Universitas Sriwijaya.

$$\tau = \frac{r G \theta}{L} \quad (2)$$

Dimana:

τ = Tegangan (MPa)

r = Radius spesimen Uji (3,5 mm)

l = Panjang spesimen (40 mm)

θ = Sudut pengujian (radian)

G = Modulus Geser (67500 MPa)

2.3. Pengujian Metalografi.

Pengujian metalografi bertujuan untuk mengetahui struktur mikro besi cor *malleable*. Pengamatan akan dilakukan di laboratorium Teknik Mesin Universitas Sriwijaya. Sebelum dilakukan pengamatan struktur mikro spesimen besi cor *malleable* diampas terlebih dahulu menggunakan amplas dari *grade* terkasar hingga *grade* terhalus yaitu 160, 220, 500, 600, 1000, 1500, 2000, 3000, dan 5000. Setelah diampas spesimen dioles dengan *autosol* lalu dietsa menggunakan cairan nital 3% dengan komposisi 3 ml asam nitrat dan 97 ml alkohol.

2.4. Pengamatan Visual dan Pengujian SEM.

Pada pengamatan visual, spesimen besi cor *malleable* akan diamati dan dianalisa pada permukaan patah spesimen. Hal tersebut bertujuan untuk melihat jenis dan karakteristik patah yang terjadi, lalu akan dibandingkan perbedaan permukaan patahan pada spesimen yang memiliki variasi sudut 1°, 2°, 3°, 4° dan 5°. Pada pengujian SEM bertujuan untuk mengamati struktur mikro pada permukaan patahan dan melihat rambatan retakan yang terjadi pada spesimen ^{[19][20]}. Pengujian SEM ini dilakukan di laboratorium Universitas Lampung.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Hasil Pengujian *fatigue*.

Pada pengujian *fatigue* dengan metode *Repeated Torsion* menggunakan spesimen besi cor *malleable* ini memiliki variasi pembebanan sudut mulai dari 1°, 2°, 3°, 4° dan 5°. Setelah dilakukan proses pengujian *fatigue* didapatlah data waktu patah dari tiap-tiap sudut, seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Waktu patah besi cor *malleable* pada pengujian lelah.

| SUDUT (θ) | WAKTU PATAH (DETIK) |
|--------------------|---------------------|
| 1° | 16543 |
| 2° | 7653 |
| 3° | 648 |
| 4° | 259 |
| 5° | 23 |

Setelah mendapatkan data waktu patah dari masing-masing pembebanan sudut, selanjutnya menghitung besaran siklus di masing-masing sudut. Besaran siklus ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Besar siklus besi cor *malleable* dalam pengujian *fatigue*.

| SUDUT (θ) | N (SIKLUS) |
|--------------------|------------|
| 1° | 827150 |
| 2° | 382650 |
| 3° | 32400 |
| 4° | 12950 |
| 5° | 1150 |

Selanjutnya adalah mencari tegangan maksimum dari tiap-tiap sudut pada pengujian *fatigue*. Seperti dilihat di Tabel 4. Berikut adalah tegangan maksimum dari tiap-tiap sudut.

Tabel 4. Besar tegangan maksimum dari masing-masing sudut.

| SUDUT (θ) | TEGANGAN (MPA) |
|--------------------|----------------|
| 1 $^{\circ}$ | 100,4 |
| 2 $^{\circ}$ | 200,8 |
| 3 $^{\circ}$ | 307,1 |
| 4 $^{\circ}$ | 407,5 |
| 5 $^{\circ}$ | 513,8 |

Setelah didapatkan data hasil dari waktu patah spesimen, besaran siklus dan besar tegangan maksimum di masing-masing sudut, dapat dilihat dari Tabel 5. Dibawah merupakan data hasil keseluruhan dari pengujian lelah besi cor *malleable* dengan menggunakan metode *repeated torsion* dengan sudut pembebanan 1 $^{\circ}$, 2 $^{\circ}$, 3 $^{\circ}$, 4 $^{\circ}$ dan 5 $^{\circ}$.

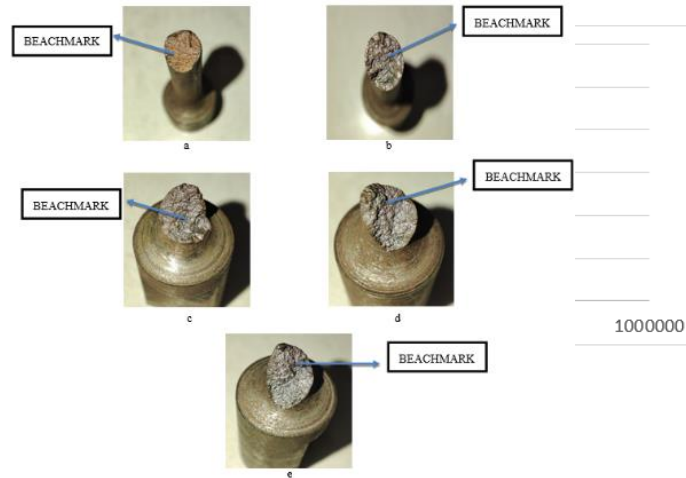
Tabel 5. Data hasil pengujian lelah besi cor *malleable*.

| SUDUT (RADIAN) | WAKTU (PATAH) | PUTARAN (RPS) | SIKLUS | TEGANGAN (MPA) |
|----------------|---------------|---------------|--------|----------------|
| 0,017 | 16543 | 50 | 827150 | 100,4 |
| 0,034 | 7653 | 50 | 382650 | 200,8 |
| 0,052 | 648 | 50 | 32400 | 307,1 |
| 0,069 | 259 | 50 | 12950 | 407,5 |
| 0,087 | 23 | 50 | 1150 | 513,8 |

Dilihat dari tabel data hasil pengujian *fatigue* besi cor *malleable* diatas dengan perbedaan variasi sudut dari 1 $^{\circ}$, 2 $^{\circ}$, 3 $^{\circ}$, 4 $^{\circ}$ dan 5 $^{\circ}$. Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa pada variasi pembebanan sudut terkecil yaitu 1 $^{\circ}$ yang mempunyai tegangan sebesar 100,4 Mpa memiliki siklus sebesar 863200 siklus dalam waktu 17264 detik dan mengalami penurunan siklus seiring dengan besarnya variasi pembebanan sudut yang diberikan. Siklus merupakan banyaknya putaran yang dilakukan oleh mesin uji lelah agar spesimen mengalami patahan. Semakin kecil nilai siklus yang dibutuhkan agar spesimen mengalami patahan maka semakin kecil pula nilai ketahanan lelah besi cor *malleable*. Pada pengujian *fatigue* dengan menggunakan metode *repeated torsion* tegangan yang berfluktuasi adalah tegangan geser, karena pada metode ini pembebanan nya berupa sudut puntir. Oleh karena itu nilai dari tegangan geser pada masing-masing sudut harus lebih kecil dari tegangan tarik maksimum dan tegangan luluh dari besi cor *malleable*. Pada sudut puntir 5 $^{\circ}$ nilai tegangan yang dimiliki adalah sebesar 513,8 Mpa, hal ini menyebabkan proses perpatahan pada sudut puntir 5 $^{\circ}$ sangat cepat terjadi karena nilai dari tegangan geser di sudut tersebut melebihi nilai tegangan luluh besi cor *malleable*.

Dari nilai siklus yang didapatkan setelah pengujian *fatigue*, dapat dilihat bahwasanya nilai siklus akan semakin berkurang atau mengecil apabila diberikan sudut yang semakin besar. Maka dapat disimpulkan semakin besar sudut puntir yang diberikan maka akan

semakin besar beban yang didapatkan dari besi cor *malleable* dan akan semakin cepat spesimen tersebut mengalami kegagalan *fatigue*. Dari data tegangan dan siklus pengujian



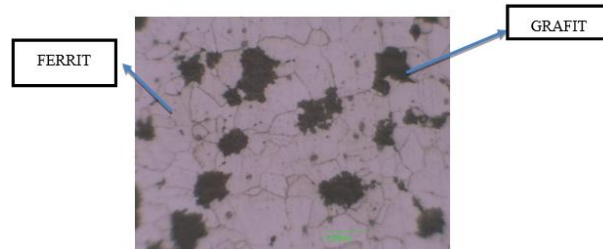
fatigue menghasilkan kurva S-N seperti pada Gambar 2.

Gambar 2. Logo kurva S-N besi cor *malleable*.

Dari hasil kurva S-N diatas kita dapat melihat hubungan antara kekuatan *fatigue* dan jumlah siklus pembebanan. Dari Kurva S-N dapat dilihat bahwa jumlah siklus berbanding terbalik dengan tegangan yang artinya jumlah siklus kegagalan akan menurun jika tegangan meningkat. Berdasarkan kurva S-N yang dihasilkan dari pengujian *fatigue* besi cor *malleable* didapatkan nilai ketahanan lelah dari spesimen besi cor *malleable* yaitu berada pada tegangan yang lebih kecil dari 100,4 Mpa.

3.2. Hasil Pengujian Metalografi.

Berikut adalah hasil dari pengujian metalografi besi cor *malleable*.



Gambar 3. Hasil struktur mikro besi cor *malleable* pembesaran 450x (dietsa menggunakan nital 3%).

Dari hasil pengamatan struktur mikro diatas terlihat bahwasanya struktur mikro dari spesimen besi cor *Malleable* terdapat *grafit* atau karbon bebas yang berbentuk *rosettee* dan dikelilingi oleh *matrix ferrit*. Hal ini menandakan bahwasanya spesimen besi cor *malleable* yang digunakan pada pengujian kali ini adalah besi cor *malleable* bermatriks *ferrit*.

3.3. Hasil Pengujian Visual.

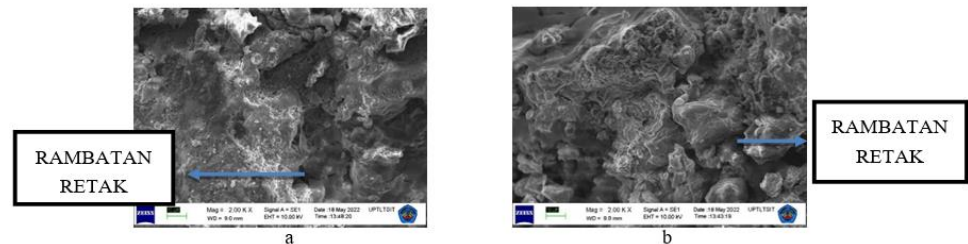
Berikut adalah hasil dari pengamatan visual permukaan patahan besi cor *malleable*

Gambar 4. Permukaan patahan besi cor *malleable* (a) sudut 1° (b) sudut 2° (c) sudut 3° (d) sudut 4° (e) sudut 5°.

Dari hasil pengamatan visual yang dilakukan pada permukaan patahan besi cor *malleable* setelah dilakukan pengujian *fatigue* dari sudut 1° , 2° , 3° , 4° dan 5° . Pada sudut 1° memiliki area rambatan retak yang lebih luas dibandingkan spesimen pada sudut 2° dan seterusnya. Hal ini dikarenakan pada sudut 1° spesimen akan menerima beban yang lebih kecil sehingga spesimen pada sudut 1° memiliki fase perambatan retak yang lebih lama menyebabkan area patah akhir akan lebih kecil dibandingkan area perambatan retak. Sedangkan pada spesimen yang diberikan sudut paling besar pada pengujian kali ini yaitu 5° mendapatkan beban dan getaran yang lebih besar sehingga proses fase perambatan retaknya lebih cepat terjadi dan spesimen pun menjadi lebih cepat patah, menyebabkan area rambatan retakan lebih kecil dibandingkan dengan area patah akhir. Hal ini terlihat dalam gambar permukaan patahan pada spesimen.

3.4. Hasil Pengujian SEM.

Dari hasil uji SEM yang dilakukan di Universitas Lampung, spesimen yang akan dibandingkan adalah dengan pembebanan sudut 3° dan 4° .



Gambar 5. Hasil pengujian SEM (a) permukaan patah sudut 3° (b) permukaan patah sudut 4° .

Gambar 3 menunjukkan hasil dari pengujian SEM yang dilakukan pada dua spesimen setelah dilakukan pengujian *fatigue*. Dua spesimen yang diamati tersebut adalah spesimen yang diberikan pembebanan berupa sudut sebesar 3° dan 4° . Gambar 3 yang menunjukkan hasil SEM, terlihat pada permukaan patahan besi cor *malleable* terdapat rambatan retakan dan dari hasil pengujian SEM dapat disimpulkan patah yang terjadi pada besi cor *malleable* adalah patah *transgranular*, yaitu patah yang terjadi melalui batas-batas butir pada permukaan patahan. Pada gambar 5 terlihat permukaan patahan terlihat bergelombang seperti batas butirnya, karena perpatahan *transgranular* terdislokasi sehingga menjalar membelah batas butir. Sehingga mengindikasikan pada besi cor *malleable* bahwa ikatan butirnya lebih baik dan kuat [21]. Terlihat perbedaan pada kedua spesimen tersebut, pada spesimen yang diberi pembebanan sudut sebesar 3° dapat dilihat pada hasil SEM memiliki permukaan patahan yang sedikit lebih halus dibandingkan dengan spesimen pada sudut 4° hal ini dikarenakan pada sudut 3° spesimen menerima beban berupa sudut yang sedikit lebih kecil dibandingkan dengan sudut 4° .

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian nilai dapat disimpulkan bahwa semakin besar sudut puntir yang diberikan maka akan semakin kecil nilai siklusnya. Melalui kurva S-N yang didapat menunjukkan batas lelah (*fatigue limit*) dari besi cor *malleable* berada pada tegangan yang lebih kecil dari 100,4 MPa. Pada pengujian metalografi menunjukkan bahwa struktur *grafit* pada spesimen berbentuk gumpalan *grafit* seperti *rosettes* dan terdapat *ferrit* pada struktur mikro spesimen yang menandakan bahwa spesimen besi cor *Malleable* ini bermatriks *ferritik*. Semakin besar sudut yang diberikan maka semakin kecil area perambatan retak dan semakin besar area patahan akhir. Melalui pengamatan SEM dan visual yang dilakukan terlihat bahwasanya patah yang terjadi adalah patah *transgranular*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] LAOUISSI, A., NOUIOUA, M., YALLESE, M.A., ABDERAZEK, H., MAOUCHE, H., and BOUHALAIS, M.L., “Machinability study and ANN-MOALO-based multi-response optimization during Eco-Friendly machining of EN-GJL-250 cast iron”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.*, vol. 117, pp. 1179–1192, 2021.
- [2] LI, S., LIN, H., ZHANG, T., SUI, J., and WANG, C., “High-Speed Machining of Malleable Cast Iron by Various Cutting Tools Coated by Physical Vapor Deposition”, *Chinese Journal of Mechanical Engineering.*, vol. 34, no. 1, pp. 1–18, 2021.
- [3] STEFANESCU, D.M. , *ASM Handbook: Volume 15: Casting, Technology*, 9th ed, ASM International, 1988.
- [4] FELDSHTEIN, E., DEVOJNO, O., WOJCIECHOWSKI, S., KARDAPOLAVA, M., and KASIAKOVA, I., “On the Microstructure, Microhardness and Wear Behavior of Gray Cast Iron Surface Layer after Laser Strengthening”, *Materials (Basel).*, vol. 15, no. 3, pp. 1075, 2022.
- [5] KALPAKJIAN, S., and SCHMID, S.R., *Manufacturing Engineering and Technology*, SI Edition, 7th ed., Singapore: Pearson Publications, 2013.
- [6] THEUWISSEN, K., LAFFONT, L., VÉRON, M. and LACAZE, J., “Crystallography of graphite spheroids in cast iron”, *International Journal of Cast Metals Research.*, vol. 29, pp. 12–16, 2016, doi: 10.1080/13640461.2016.1142233.
- [7] WHEELER, E.C., “Malleable Cast Iron”, *Journal of the American Society for Naval Engineers.*, vol. 11, no. 1, pp. 161–172, 2000, doi: 10.1111/j.1559-3584.1899.tb02456.x.
- [8] NATH, J., “Engineering of Malleable Iron Castings,” 2022. doi:<https://doi.org/10.31399/asm.tb.isceg.t59320157>
- [9] CHANDRA, H., “Mechanical fracture characterization of rice kernel under milling process,” In: *Proceeding of the Symposium of Emerging Nuclear Technology and Engineering Novelty*, Palembang, July 2018.
- [10] LACAZE, J., DAWSON, S., and HAZOTTE, A., “Cast Iron: A Historical and Green Material Worthy of Continuous Research”, *International Journal of Technology.*, vol. 12, no. 6, pp. 1123, 2021.
- [11] CHANDRA, H., NUKMAN, and SIANTURI, B., “Analysis of Fatigue Life and Crack Propagation Characterization of Gray Cast Iron under Normalizing Process”, In: *Journal of Physics: Conference Series.*, vol. 1198, no. 3, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1198/3/032006.
- [12] CHANDRA, H., LESTARI, V., “Analysis of the Effect of Stop Drilled Hole Diameter Variation on Fatigue Resistance in Medium Carbon Steel DIN HQ 705”, In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 810, Oct. 2020.
- [13] EKAPUTRA, I.M.W., LITAAY, A.A.I., and SETYAHANDANA, B., “Pengaruh Komposisi 2.9% dan 3.8% Si terhadap Kekuatan Lelah Besi Cor Kelabu,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 10, no. 3, pp. 227–234, 2019.
- [14] CHANDRA, H., “Perancangan Mesin Fatigue Pembebanan Tiga Titik dan Empat Titik dalam Menciptakan Retak Awal dan Perambatan Retak,” 2012, [Online]. Available: <https://repository.unsri.ac.id/6969/>
- [15] CALLISTER, W.D., *Materials Science and Engineering An Introduction*, vol. 26, no. 14. 2007. doi: 10.1007/BF01184995.

- [16] APRIANSYAH, CHANDRA, H. , PRATIWI, D.K., and FIRDAUS, A., “*Fatigue Failure on Drilling Pipe Thread: a Case Study on Drill Pipe Ss105*”, *Indonesian Journal of Engineering and Science.*, vol. 1, no. 1, pp. 011–019, 2021, doi: 10.51630/ijes.v1i1.6.
- [17] CHANDRA, H., MATARAM, A., and UTAMI, N.P.E., “The characterization of mechanical property and fatigue life of betel-falm fiber composite as environmentally-friendly material”, In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Palembang, Oct 2018.
- [18] VASKO, A., and BELAN, J., “Fatigue tests of nodular cast iron at low and high frequency cyclic loading,” In: *Materials Today: Proceedings.*, vol. 4, no. 5, pp. 5985–5988, 2017.
- [19] ZHOU, W., APKARIAN, R., WANG, Z.L., and JOY, D., “Fundamentals of scanning electron microscopy (SEM)”, In: *Scanning microscopy for nanotechnology*, Springer, pp. 1–40, 2006.
- [20] FALISA, CHANDRA, H., HARNANI, “Geochemical Studies of Claystone Based on Analysis of Scanning Electron Microscope (SEM), Talangsawah, Merapi District and Surroundings of Lahat Regency, South Sumatra,” In: *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1500, no. 1, p. 12079., 2020.
- [21] ASM METALS HANDBOOK VOL 11 : Failure Analysis and Prevention, vol. 11. ASM International. Handbook Committee., 2002. doi: 10.1016/S0026-0576(03)90166-8.