



Studi perbandingan perilaku lelah AISI 316L dengan menggunakan metode eksperimen dan simulasi

*Fakhriza¹, Syifaul Huzni², Murtaadhahadi¹, Abubakar Dabet³

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Lhokseumawe

²Jurusan Teknik Mesin, Universitas Syiah Kuala

³Program Studi Pendidikan Vokasional Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh
Lhokseumawe, 24301, Indonesia

*Email: fakhriza@pnl.ac.id

Abstrak

Kegagalan lelah yang terjadi pada suatu material pada keadaan beban dinamis merupakan hal yang berbahaya, karena dapat terjadi tanpa petunjuk awal. Pengujian lelah perlu dilakukan untuk memprediksi umur pakai. Penelitian ini difokuskan pada baja tahan karat AISI 316L yang banyak digunakan di industri, karena memiliki sifat mekanik, mampu las, ketahanan korosi dan proses permesinan yang baik. Pengujian dilakukan berdasarkan standar ASTM E466 dan E468 dengan menggunakan mesin uji lelah tipe *rotary bending*. Pengujian lelah dipresentasikan dalam kurva S-N dan pola patahan diamati. Hasil menunjukkan batas kekuatan lelah pada tegangan 277 MPa dengan 2870667 siklus. Sebagai perbandingan dari simulasi yang dilakukan, diperoleh tegangan 258 MPa dengan 2870677 siklus. Ditinjau dari umur *fatigue*, pengujian material berada pada kelompok *high cycle* dan jenis patahan tergolong *low stress*.

Kata Kunci: Baja tahan karat, umur lelah, batas lelah, pola patahan, siklus tinggi

Analysis fatigue behavior of AISI 316L by using physical experiment and simulation

Abstract

Fatigue failure occurring at a material in the dynamic loads is very dangerous because it is happen without initial guidance, fatigue testing to predict the life of use need to be done. This study focused on AISI 316L stainless steel which is used in industries because it's mechanical properties, weldability, corrosion resistance and good machining. Fatigue testing are based on ASTM E466 and E468 standard in laboratory's environmental by using fatigue testing machine rotary bending type. The results of fatigue testing present in S-N curve, it showed that the endurance limit of stress 277 MPa at 2870667 cycles. For comparison, from the simulasi carried out, the stress is 258 MPa at 2870677 cycles. In terms fatigue life, the material is categorized in the high cycles and fracture pattern is low stress.

Keywords: *Stainless steel, fatigue life, endurance limit, crack pattern, high cycle*

1. Pendahuluan

Kegagalan lelah (*fatigue failures*) merupakan kegagalan yang terjadi pada keadaan beban dinamik, kegagalan terjadi setelah periode pemakaian yang cukup lama, dimana semuanya mengalami beban berulang dan getaran. Kegagalan lelah adalah hal yang sangat berbahaya karena terjadi tanpa adanya peringatan awal [1]. Secara umum, kegagalan lelah merupakan suatu fenomena yang sangat penting, karena diperkirakan 50-90% penyebab kegagalan mekanik disebabkan oleh kegagalan lelah [2].

Secara teoritis, kegagalan lelah merupakan pembebanan berulang (*repeated loading*) yang dapat memperlemah suatu bagian mesin atau struktur dalam waktu tertentu (bulanan hingga tahunan), walaupun tegangan yang terjadi pada bagian tersebut lebih kecil daripada batas tegangan-tegangan yang dizinkan (tegangan mulur/*yield*) [3]. Beberapa mesin dengan komponen yang mengalami beban fatis: kompresor, *turbine blade*, tulang buatan, *surface buoy* [4], dan poros *propeller boat* [5].

Kegagalan yang disebabkan oleh kelelahan lebih berbahaya daripada kegagalan statik, dikarenakan kegagalan tersebut terjadi tanpa peringatan terlebih dahulu, secara tiba-tiba dan menyeluruh [2].

Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh beban atau tegangan yang terjadi terhadap kekuatan lelah material, ada dua metode pendekatan yang dapat digunakan untuk menentukan umur lelah, yaitu secara eksperimen dan secara simulasi, dengan menggunakan pendekatan kurva S-N. Menggunakan Kurva S-N, hubungan antara beban tegangan dengan putaran dikaitkan dengan umur lelah dari suatu bahan [1].

AISI 316L adalah jenis baja tahan karat *austenitic*, unsur pembentuk utamanya terdiri dari besi (Fe), karbon (C) dalam kadar sangat rendah, chromium (Cr) dan nikel (Ni) dengan kadar cukup tinggi. Komposisi unsur-unsur paduan itu menentukan sifat ketahanan korosi dan sifat mekaniknya. Kadar khromium yang berfungsi

sebagai *ferrite stabilizer*, dan membentuk lapisan *film khromium oksida* (Cr₂O₃) yang protektif jika beroksidasi dengan oksigen, sehingga meningkatkan ketahanan korosi [6].

Komposisi kimia dan sifat mekanik dari baja tahan karat AISI 316L ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2, [7].

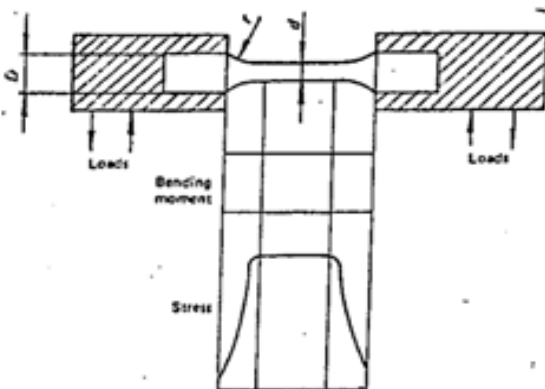
Tabel 1. Komposisi kimia

Unsur	Berat (%)
C	0,03
Mn	2,00
Si	1,00
Cr	16,0-18,0
Ni	10,0-14,0
P	0,045
S	0,03

Tabel 2. Sifat mekanik

Properties	Nilai
Tensile Strength (MPa)	515
Yield Strength (MPa)	205
Elongation (%)	40
Hardness (HRB)	95

Variabel yang mempengaruhi umur lelah suatu logam adalah: tegangan, ukuran benda uji, variabel metalurgi, korosi, keausan, dan kekasaran permukaan [8]. Gambar 1 menunjukkan gaya-gaya yang bekerja pada pengujian lelah tipe *rotary bending*, tegangan maksimum yang bekerja spesimen berada pada daerah area uji [9].



Gambar 1. Bentuk tegangan maksimum pada pengujian lelah tipe *rotary bending*

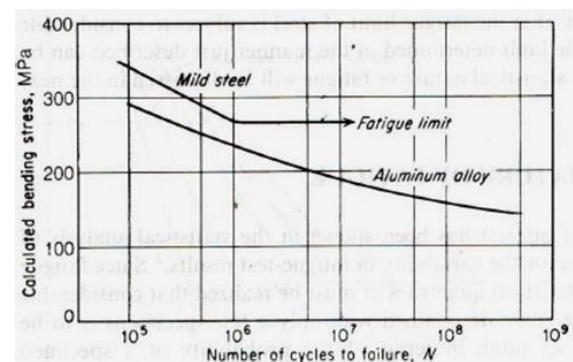
Dari hasil pengujian ini diperoleh informasi mengenai kekuatan lelah dari bahan dan pada benda uji yang berputar diberikan beban maka terjadi momen lentur sebesar (M). Tegangan lentur yang terjadi pada permukaan bahan dapat ditentukan dengan menggunakan momen inersia dan jarak melintang benda uji dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{16 W L}{\pi d^3} \quad (1)$$

Dimana: σ = Tegangan lentur (kg/cm²), d= Diameter benda uji (cm), W= Beban yang digunakan (kg) dan L = antara beban dan titik area pengujian (cm)

Metode dasar untuk penyajian data kelelahan menggunakan kurva S-N, yaitu pemetaan tegangan (S) terhadap jumlah siklus hingga terjadi kegagalan (N). Nilai tegangan yang diplot dapat berupa nilai tegangan maksimum, minimum atau nilai rata-rata [8].

Kekuatan lelah atau batas lelah (S_e) adalah tegangan yang memberikan umur tak berhingga. Gambar 2 menunjukkan kurva kelelahan untuk logam besi dan bukan besi (*non ferrous*) [10]. Siklus S-N yang melampaui batas lelah, (S_e): $N > 10^6$ atau 10^7 Siklus baja dianggap mempunyai umur yang tak berhingga atau diprediksi tidak akan terjadi kegagalan. Logam bukan besi tidak terdapat batas lelah yang signifikan, sehingga kurva S-N menunjukkan gradien yang turun sedikit demi sedikit sejalan dengan bertambahnya jumlah siklus.



Gambar 2. Kurva kelelahan untuk logam besi dan bukan besi

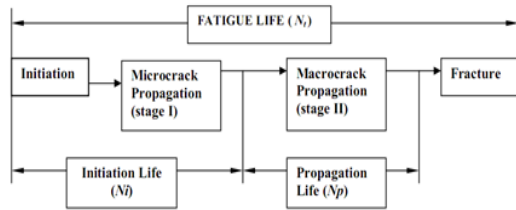
Untuk beberapa macam baja, kekuatan lelah berkisar antara 35%-60% dari kekuatan *ultimate*-nya (S_u). Kekuatan lelah baja untuk berbagai kondisi pembebanan dapat didekati dengan rumus berikut [8]: Beban bending: $S_e = 0,5 S_u$, Beban aksial: $S_e = 0,45 S_u$ dan Beban torsi: $S_e = 0,29 S_u$.

Diagram S-N memperlihatkan suatu tipe yang berbeda untuk jumlah siklus yang dicapai sampai terjadi kegagalan. Dua *basic regime* pada diagram S-N adalah *Low Cycle Fatigue* (LCF) dan *High Cycle Fatigue* (HCF). Secara umum LCF berada pada jumlah siklus (N) di bawah 10^3 sedangkan jumlah HCF berada antara 10^3 dan 10^6 Siklus.

Kelelahan mengakibatkan terjadinya patah lelah. Ada tiga tahapan terjadinya patah lelah (Gambar 3) [11], yaitu:

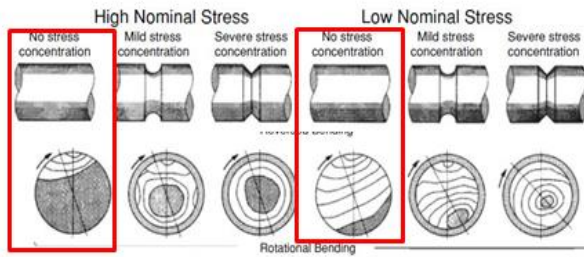
1. Tahap retak awal (*crack initiation*),
2. Tahap penjarangan retak (*crack propagation*)
3. Tahap patah statik.

Setelah retak lelah merambat cukup jauh, maka beban yang bekerja hanya didukung oleh penampang tersisa yang belum retak dan akhirnya komponen patah (tahap *final failure* atau patah statik) [12].



Gambar 3. Fase-fase kegagalan lelah

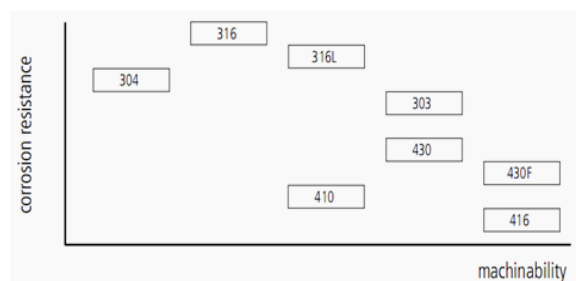
Gambar 4 menunjukkan secara skematis penampilan permukaan patahan dari kegagalan lelah pada berbagai kondisi pembebanan [13].



Gambar 4. Skematik permukaan lelah dari penampang poros pada pengujian *rotary bending*

Baja tahan karat tipe AISI 316L merupakan material baja tahan karat yang banyak digunakan dalam dunia industri karena memiliki sifat mekanik, mampu las, ketahanan korosi dan proses pemesinan yang baik [14][15]. Gambar 5 baja tahan karat AISI 316L mempunyai rasio ketahanan korosi dan pemesinan yang sama baik dibandingkan dengan jenis yang lain pada golongan austenitik [16]. Sebelumnya telah dilakukan beberapa penelitian tentang perilaku lelah [17,18,19] pada beberapa material untuk mengetahui batas kekuatan lelah bahan pada material tersebut.

Tujuan penelitian ini dilakukan karena penggunaan yang luas dari baja tahan karat ini, maka diperlukan penanganan yang tepat untuk mendeteksi kegagalan yang mungkin terjadi pada baja tahan karat tipe AISI 316L sehingga kegagalan yang mungkin terjadi dapat diantisipasi dengan baik, salah satu yang dapat dilakukan adalah dengan mengetahui batas kekuatan lelah bahan (*endurance limit*) [16].

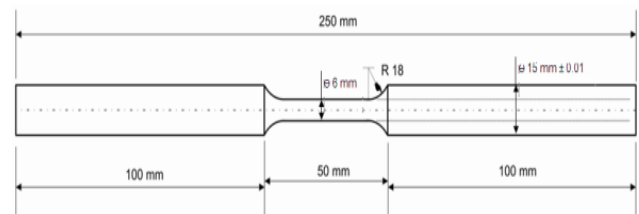


Gambar 5. Rasio ketahanan korosi dan pemesinan baja tahan karat austenitic.

2. Metode Penelitian

Bahan atau material yang digunakan untuk pembuatan spesimen uji lelah adalah baja tahan karat AISI 316L, kemudian dilakukan uji komposisi bahan serta uji kekerasan pada bahan spesimen tersebut. Pengujian komposisi material dilakukan dengan menggunakan *optical emission spectrometer* PDA-7000 dan pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan *rockwell hardness test*. Hasil uji komposisi kimia dan kekerasan bahan untuk pembuatan spesimen dibandingkan dengan standar komposisi kimia bahan baja tahan karat AISI 316L (Tabel 1) dan sifat mekanik (*hardness/ HRB*) (Tabel 2), material spesimen AISI 316L.

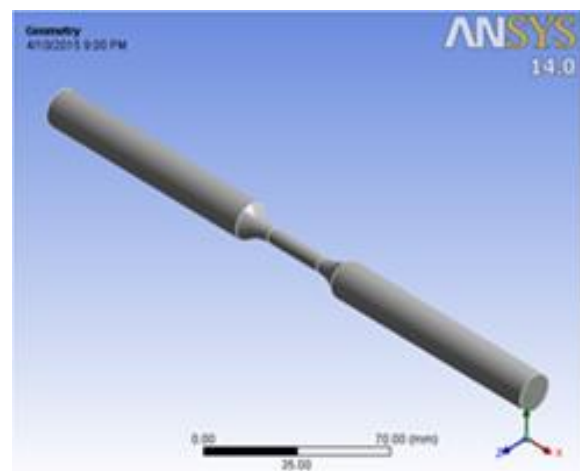
Pembuatan spesimen uji lelah mengikuti dengan standar ASTM E466 [20] mulai dari pembubutan, *grinding* dan *polishing*, dengan jenis spesimen *tangentially blending fillets*. Ukuran dan dimensi spesimen jenis *tangentially blending fillets* berdasarkan standar ASTM E466 dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Ukuran spesimen uji lelah

Pengujian kekasaran permukaan spesimen dilakukan setelah proses pembuatan spesimen, dilakukan dengan menggunakan *surface roughness tester merk* TR200 hingga didapatkan kekasaran permukaan maksimum 2 μ inchi [21].

Pengujian uji lelah baja tahan karat AISI 316L dilakukan secara simulasi dan eksperimen sesuai standar ASTM E468 [22]. Simulasi kelelahan menggunakan ANSYS *workbench release* 14, dengan model geometri seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Geometri spesimen untuk Simulasi

Properties strain life parameters sebagai fatigue properties dalam melakukan simulasi [23], dapat dilihat pada Table 3 [2].

Tabel 3. Strain life parameters dari AISI 316L

Sifat lelah	Nilai
Strength coefficient, $\sigma'f$ (Pa)	$9,86 \times 10^8$
Strength exponent, b	-0,106
Ductility coefficient, $\epsilon'f$	0,194
Ductility exponent, C	-0,416
Cyclic strength coefficient, K' (Pa)	1×10^9
Cyclic strain hardening exponent, n'	0,2

Uji lelah secara eksperimen dilakukan dengan menggunakan mesin uji lelah tipe rotary bending fatigue testing (RBFT) di laboratorium. Mesin tersebut memiliki spesifikasi alat uji: merek JTT JT Toshi Inc, tipe FTO-10, daya motor 400W, frekuensi 50Hz, putaran mesin 2900 RPM dan rasio tegangan $R = -1$. Pembebanan dilakukan dari tingkat beban tertinggi 10 kgf ($0,9 \times$ tensile strength) hingga terendah pada batas lelah bahan atau $S_e = 0,5S_u$ (untuk beban bending), sehingga didapat 5 titik variasi pembebanan dengan 3 kali pengujian.

Untuk mengetahui keadaan permukaan patahan, spesimen diperiksa dengan menggunakan scanning electron microscope (SEM) merek hitachi, jenis tabletop microscope tipe TM 3000.

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1 Uji komposisi material

Hasil uji komposisi kimia bahan spesimen yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4. Hasil uji komposisi kimia telah dibandingkan dengan standar komposisi kimia baja tahan karat AISI 316L. Dilihat dari komposisi kimia C dan Cr dapat dipastikan bahan spesimen adalah AISI 316L, namun untuk lebih akurat perlu dilakukan uji kekerasan material.

Tabel 4. Hasil pengujian komposisi kimia

Bahan spesimen	Komposisi Kimia (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
	0,02354	0,29173	1,2843	0,01335	0,01335	5,72	16,125

3.2 Uji kekerasan material

Hasil uji kekerasan bahan spesimen dapat dilihat pada Tabel 5. Nilai rata-rata kekerasan hasil uji kekerasan didapat 96,6HRB (standart properties AISI 316L: Hardness= 95HRB, Rockwell Hardness Skala B) [7]. Dari uji kekerasan spesimen dipastikan bahan yang digunakan adalah AISI 316L.

Tabel 5. Hasil pengujian kekerasan

Bahan spesimen	Kekerasan (HRB)					Rata-rata
	I	II	III	IV	V	
	96,8	99,6	95,4	97,2	91,8	96,16

3.3 Uji kekasaran permukaan material

Pengujian kekasaran permukaan dilakukan dengan menggerinda spesiman dan dipolis dengan kekasaran maksimum 2 μ inch. Dari hasil uji pengukuran kekasaran menunjukkan kisaran angka kekasaran permukaan antara 1,602 dan 1,098 μ inchi (Tabel. 6). Hasil pengukuran menunjukkan permukaan spesimen masih pada batas bawah standar kekasaran permukaan yang diizinkan ASTM E468 [18].

Tabel 6. Hasil pengujian kekasaran

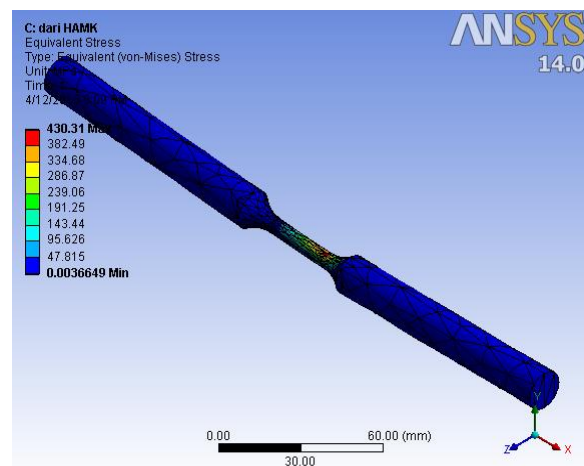
Specimen	Harga Kekasaran Permukaan Ra
Beban (kgf)	(μ inchi)
10	1,602
9	1,098

3.4 Uji Leleh

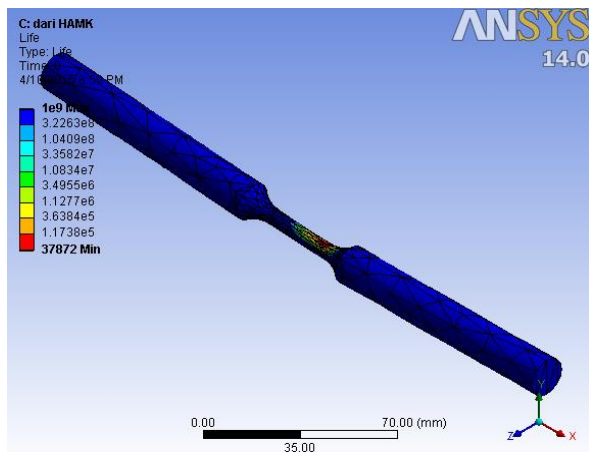
Pengujian bahan dilakukan secara simulasi dan eksperimen di laboratorium, menggunakan mesin uji lelah tipe rotating bending fatigue testing (RBFT). Pengaturan tegangan tertinggi yang diberikan dalam pengujian uji lelah adalah $S_e = 0,9S_u$ atau 464 MPa yang terjadi pada beban 10 kgf, sedangkan batas kekuatan lelah endurance limit adalah $S_e = 0,5S_u$ atau 258 MPa pada beban 6 kgf. Dari hasil diatas maka pemberian beban divariasikan dengan besar beban yaitu: 10 kgf, 9 kgf, 8 kgf, 7 kgf dan 6 kgf.

Pengujian secara numerik

Simulasi kekuatan lelah baja tahan karat AISI 316L, hasilnya berupa nilai distribusi tegangan equivalent (von mises stress) dan umur lelah (fatigue life) spesimen dapat dilihat pada Gambar 8.



a. Tegangan



b. Siklus

Gambar 8. Hasil simulasi pada beban 9 kgf

Gambar 8.a menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi, dengan konsentrasi tegangan *von-mises* tertinggi di bagian tengah spesimen sebesar 438 MPa, sedangkan distribusi jumlah siklus ditunjukkan pada Gambar 8.b merupakan prediksi umur lelah dengan jumlah siklus tertinggi, 37872. Data hasil simulasi lelah bahan pada beban yang lain ditampilkan pada Tabel 7.

Pengujian dengan simulasi didapat tegangan tertinggi sebesar 478Mpa, selisih 3% dibandingkan secara teoritis 464Mpa, dengan jumlah siklus: 21212. Juga diperoleh, tegangan terendah sebesar 255Mpa, selisih 1% dibandingkan secara teoritis: 258MPa dengan 1043000 siklus.

Tabel 7. Data hasil simulasi lelah AISI 316L

No.	Beban (kgf)	Teg. (MPa)	Siklus (N)	Ket.
1	10	478	21212	Patah
2	9	438	37872	Patah
3	8	382	74321	Patah
4	7	335	165750	Patah
5	6	255	1043000	Patah

Pengujian secara eksperimen

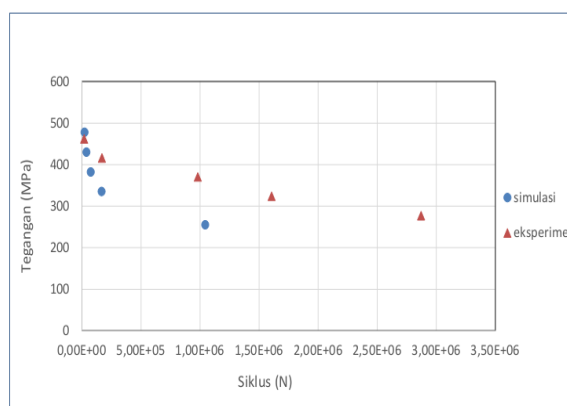
Hasil pengujian kekuatan lelah bahan ditampilkan pada Tabel 8. Batas tegangan tertinggi sebesar 462 MPa, dengan selisih 0,3% dibandingkan secara teoritis, 464 Mpa, pada 19167 siklus. Tegangan terendah atau batas tegangan lelah diperoleh sebesar 277 MPa, dengan selisih 7% secara teoritis, 258 Mpa, dengan 2870677 siklus.

Dengan jumlah siklus sudah di atas 10^6 , baja dianggap mempunyai umur tak berhingga. Ditinjau dari umur lelah, pengujian lelah bahan mulai dari beban tertinggi sampai beban terendah berada pada kelompok *high cycle* dengan jumlah siklus di atas 10^3 siklus.

Tabel 8. Data hasil uji lelah AISI 316L

No.	Beban (kgf)	Teg. (MPa)	Siklus (N)	Ket.
1	10	462	19167	Patah
2	9	416	168567	Patah
3	8	370	980633	Patah
4	7	324	1604767	Patah
5	6	277	2870667	Tidak Patah

Data numerik dan eksperimen uji lelah ditampilkan dalam bentuk kurva S-N (Gambar 9). Kurva S-N bahan pada Gambar 9 menunjukkan perbandingan batas kekuatan lelah dengan beban 6kgf. Hasil simulasi dan eksperimen diperoleh berturut-turut 255MPa dan 277MPa, dengan penyimpangan sebesar 8%.



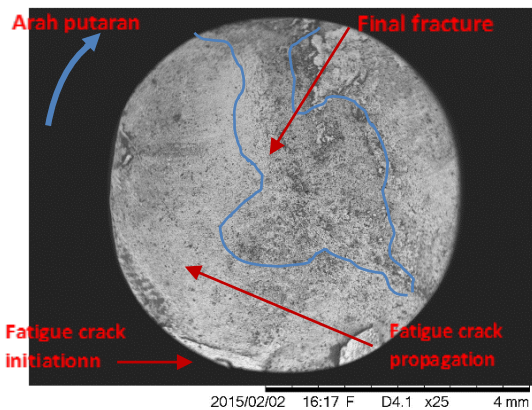
Gambar 9. Perbandingan uji simulasi dan eksperimen, Kurva S-N AISI 316L

Untuk memastikan pengujian telah melalui mekanisme kegagalan lelah, maka dilakukan pengamatan pada penampang patahan spesimen dengan pengamatan secara visual dan *macroscopic*.



Gambar 10. Bentuk patahan AISI 316L secara *macroscopic* pada tegangan 462 MPa

Permukaan patahan uji lelah dilihat secara visual ada pola perambatan retak (daerah yang halus atau terang) dan daerah patah statik/patah akhir (daerah yang kasar atau gelap) (Gambar 10). Secara *macroscopic* bentuk permukaan patahan yang terjadi pada tegangan 462MPa menampakkan pola-pola mekanisme kegagalan lelah (Gambar 11).



Gambar 11. Pola patahan material pada tegangan 462 MPa.

Bentuk permukaan patahan yang terjadi adanya pembentukan retak awal (*initial crack*) berupa porositas, pola perambatan retak (daerah yang halus atau terang) dan daerah patah statik/ patah akhir (daerah yang kasar atau gelap) (Gambar 11). Terlihat, luas daerah permukaan perambatan retaknya lebih luas dari daerah permukaan patah akhir, sehingga jenis patahan tergolong *low stress*. Hal yang sama juga terjadi pada kondisi beban yang lain untuk dengan menggunakan mesin uji lelah tipe RBFT jenis patahan tergolong *low stress*.

Dari pengujian lelah secara eksperimen, material mengalami mekanisme patah lelah dengan batas kekuatan lelah berada pada daerah beban <6kgf atau tegangan <277MPa, dapat digunakan untuk mendesain perkiraan usia pakai.

4. Kesimpulan

Perilaku kurva S-N baja tahan karat AISI 316L dengan batas kekuatan lelah sebesar 277 MPa dengan jumlah 2870667 siklus. Pola patahan specimen yang mengalami patah ditandai adanya awal retak, pertumbuhan retak yang lambat, tidak adanya penampakan beach mark dan striasi yang jelas sebagai salah satu ciri kegagalan fatik dan daerah patah. Pada beban 10 kgf ditinjau dari umur lelah berada pada kelompok *high cycle* dan perambatan retaknya lebih luas dari daerah permukaan patah akhir, sehingga jenis patahan tergolong *low stress*. Hal yang sama juga terjadi pada kondisi beban yang lain jenis patahan tergolong *low stress*.

Referensi

- [1] Jaap Schijve. *Fatigue of Structures and Materials*. Netherlands: Springer Science, 2009
- [2] ASM Handbook Vol 19. *Fatigue and Fracture*, ASM International, 1997.
- [3] Malik Irawan. *Analisis Lelah Berbantuan Komputer*, Teknika, Vol. XXXII, No.1. 2011
- [4] Sahlan, Soeweify, Nugroho, Suastika. "Studi Eksperimental Penentuan Umur Kelelahan Struktur Keel Buoy Tsunami Akibat Beban Gelombang", *Seminar Nasional Pascasarjana XI- ITS*, Surabaya, 2011
- [5] Fahir Arisoy, Gokhan Basman, M.Kelami Sesen. *Failur of a 17-4 PH Stainless Steel Sailboat Propeller Shaft*, Elsevier Ltd., 2003.
- [6] Callister William D. *Materials Science and Engineerig: An Introduction*, U.S America: Seventh Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [7] J. R. Davis. *Metals Handbook*, Desk Edition:2nd, ASM International Handbook, 1998
- [8] Julie A. Bannantine et.al, *Fundamental of Metal Fatigue Analysis*, Prentice-Hall, New Jersey, 1990
- [9] Anonymous. *Manual Operation for 10 Kgf-m Rotary Bending Fatigue Testing Machine*, Tokyo: Model FTO 10, JT. TOHSI Inc., 1997
- [10] George E. Dieter. alih bahasa Djaprie, Sriati, *Metalurgi Mekanik*, Erlangga, Jakarta, 1992.
- [11] Calalettin Karaagac. *Fracture and Fatigue Analysis of an Agitator Shaft with A Circumferential Notch*, Tesis, Dokuz Eylul University, 2002.
- [12] Colangelo, VJ. *Analisis of Metalurgi Failures*, New York: John Willey and Sons, 1973
- [13] Milella Pietro Paolo. *Morphological Aspects of Fatigue Crack Formation and Growth*, Italy: Department of Civil and Mechanical Engineering, University of Cassinoe, 2012
- [14] Michael F. McGuire, *Stainless Steels For Design Engineering*, United State of Amerika: ASM International, 2008.
- [15] S. Soeharto, D. I. Rahmawati, and T. Suyitno, "PENGARUH IMPLANTASI ION TITANIUM NITRIDA TERHADAP SIFAT MEKANIK BIOMATERIAL AISI 316L," *J. Sains Mater. Indones.*, vol. 13, no. 4, pp. 22–26, 2018
- [16] Dumenico Surpi. *Stainless Steels*, Italy: Gruppo Lucefin, 2011
- [17] A. H. Atho'ullah and H. Yudiono, "Karakterisasi Ketahanan Lelah Takik Ulir Whitworth Akibat Pembebanan Puntir Dinamis pada Baja Karbon Rendah," *J. Din. Vokasional Tek. Mesin*, vol. 5, no. 2, pp. 154–162, 2020.
- [18] H. Susanto, S. Ali, M. Taufik, and F. Yulitda, "Kekuatan Lelah Baja Karbon dengan Lasan Alur Ganda V dan U," *J. Mekanova Mek. Inov. dan Teknol.*, vol. 1, no. 1, 2015.

- [19] H. Setiyono, "Standar Spesifikasi Desain Untuk Analisis Umur Lelah Pelat Baja Tahan Karat Akibat Beban Dinamis Aksial," *J. Stand.*, vol. 16, no. 1, pp. 57–64, 2014
- [20] ASTM E 466-96, *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*.
- [21] Chandra, Hendri, *Fatigue Life Prediction (Strategi Prediksi Umur Lelah/Sisa Umur Alat)*, Bahan Ajar Staf Dosen Kelompok Bidang Keahlian Material, Universitas Sriwijaya, Palembang, 2009
- [22] ASTM E 468-96, *Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Result for Metallic Materials*.
- [23] Syifaul Huzni, Kashah Nasthy, Syahrizal Fonna, M. Ridha. "Parameter Study of Fatigue Behavior Simulations Using Finite Element Method". *Conference CAIC Syiah Kuala University*, Banda Aceh, 2015.