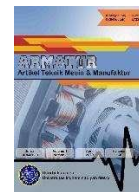


Contents list available at [Sinta](https://sinta)

# A R M A T U R

: Artikel Teknik Mesin &amp; Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.unmetro.ac.id/index.php/armatur>

## Perilaku perambatan retak fatik stainless steel 304 yang dilapisi aluminium celup panas secara eksperimental dan numerikal

Farid Nanda Syanur<sup>1\*</sup>, Moh. Badaruddin<sup>2</sup>, Sugiyanto<sup>3</sup><sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung, Jl. Prof. Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung, Jl. Prof. Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145<sup>3</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung, Jl. Prof. Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145

### I N F O R M A S I

### A B S T R A K

#### A R T I K E L

##### Keywords:

Stainless steel

Aluminium celup panas

Perambatan retak fatik

Ansys

*Analysis of fatigue crack propagation of 304 stainless steel coated with aluminum by hot-dip method experimentally and numerically to determine changes in mechanical properties of SS304 and predict fatigue test results numerically based on CFD program with experimental results. The simulation results of the fatigue crack propagation cycle show the same results. SS 304 with 1 hour diffusion has the shortest cycle, namely in the simulation data a crack occurs at cycle 8778 with a crack length of 0.703 mm, while for experimental results the crack occurs at cycle 5000 with a crack length of 0.267 mm. Then SS304 without coating has the longest cycle, namely, cracks in simulation results occur in cycle 20351 with a crack length of 0.6787 mm, while in the experimental data the initial crack in cycle 8700 with a crack length of 0.6 mm. Based on the analysis of fatigue crack propagation rate and stress, giving diffusion treatment to SS304 has an impact on both fatigue life and stress to propagate cracks. The strength and plasticity of SS304 were degraded by the aluminization treatment. After treatment, SS304 showed higher ductility and lower strength.*

### Pendahuluan

Sifat mekanik pada suatu material, seperti kekuatan tarik, kekuatan luluh, modulus elastisitas, serta elongasi

merupakan parameter yang paling mendasar untuk desain struktur, khususnya dalam perhitungan tegangan-regangan dan analisis kekuatan komponen dan elemen struktur.

\*Corresponding author: xxx@mail.ac.id

DOI: <https://10.24127/armatur.v4i2.3786>

Received 29 May 2023; Received in revised form 30 May 2023; Accepted 24 Agustus 2023

Available online 1 September 2023

Sifat material tidak hanya bergantung pada faktor metalurgi saja, seperti ukuran butir dan elemen paduan tetapi juga dapat dipengaruhi oleh riwayat pembebanan material, lingkungan, suhu, dll. Struktur material yang bekerja di bawah kondisi pembebanan dinamis, sifat mekaniknya cenderung akan menurun seiring dengan waktu material tersebut beroperasi. Fenomena degradasi sifat bahan tersebut disebut juga kerusakan fatik [1].

Fatik adalah kerusakan struktural terlokalisasi dan progresif yang terjadi ketika material mengalami pembebanan siklik atau dimana kondisi material menerima beban dinamis (pembebanan yang berulang-ulang atau berubah-ubah tiap waktu). Semakin besar amplitudo pembebanan dinamis semakin cepat retak merambat [2]. Stainless steel merupakan baja paduan tinggi yang memiliki sifat ketahanan korosi yang sangat baik, kekuatan tinggi, keuletan dan ketangguhan yang baik. Stainless steel memiliki sifat yang dapat bertahan terhadap oksidasi dikarenakan stainless steel mengandung unsur chromium lebih dari 11%. Unsur chromium ini merupakan pelindung utama baja dalam stainless steel terhadap gejala gejala yang disebabkan oleh kondisi lingkungan. Sehingga, stainless steel banyak digunakan pada konstruksi shells, tangki bahan bakar untuk rudal dan bagian struktur kendaraan serta pertahanan dan bidang nuklir [3].

Berdasarkan uraian diatas aplikasi stainless steel sangat memungkinkan terjadinya korosi mencakup sulfidasi, karburisasi, korosi suhu tinggi dan oksidasi. Maka salah satu pendekatan untuk dapat memertahankan sifat mekanik pada *stainless steel* terhadap korosi adalah dengan penerapan lapisan pelindung (*coating*) [4], Pelapisan *hot dip aluminium* adalah metode yang efektif sehingga, teknologi ini sering digunakan pada permukaan baja yang bertujuan untuk ketahanan korosi pada suhu tinggi serta memiliki ketahanan keausan dengan membentuk lapisan senyawa intermetalik

Fe–Al dan lapisan aluminium murni pada permukaan baja [5].

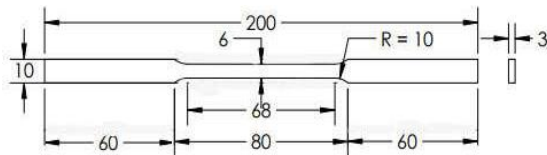
Efek oksidasi dapat dikurangi melalui pelapisan *hot dip aluminium*. Pada kondisi suhu tinggi, permukaan kaya aluminium teroksidasi menjadi lapisan aluminium oksida yang sangat protektif yang dapat menghambat korosi. Sehingga, *stainless steel 304* memiliki ketahanan oksidasi dan sulfidasi yang baik. Seperti penelitian yang dilakukan [6], *Stainless steel 316 hot dip* mampu meningkatkan kekerasan dan ketahanan korosi, namun belum dapat diketahui apakah pelapisan difusi juga dapat memengaruhi *stainless steel* terhadap laju perambatan retak fatik.

Pada penelitian ini, pemodelan perambatan retak fatik menggunakan software Ansys 19.2 dengan metode *SMART Crack Growth*. Seperti yang dilakukan oleh Abdulnaser, 2021 [7], Analisis numerik menggunakan FEM yang diterapkan pada ANSYS APDL (ANSYS Parametric Design Language) 19.2 adalah metode yang efektif untuk mengurangi waktu komputasi dan biaya yang terkait dengan pelaksanaan studi eksperimental sehingga hasil simulasi dapat dicompare dengan ekperimental dengan kesesuaian yang baik untuk semua kasus. Selanjutnya, Fakhrizal, 2021 [8], melakukan studi perbandingan perilaku leleh AISI 316L dengan menggunakan metode eksperimen dan simulasi dengan hasil penyimpangan data uji kekuatan leleh dengan beban 6 kgf yaitu sebesar 8%. Lalu penelitian yang dilakukan oleh Berata, 2003 [9], melakukan simulasi perambatan retak menggunakan ANSYS dengan penyimpangan terbesar 11,68% dengan eksperimental yang dilakukan Siji Chen dan Zhenyuan Cui (1988) [10], sehingga penggunaan metode elemen hingga menggunakan ANSYS cukup valid dalam mensimulasikan perambatan retak fatik. Berdasarkan uraian diatas, maka dilakukan penelitian tentang Perilaku Perambatan Retak Fatik Stainless Steel 304 yang Dilapisi Aluminium Celup Panas Secara Eksperimental dan Numerikal.

## Metode Penelitian

### 1. Pembentukan Spesimen dan Pemodelan Geometri

SS304 dibentuk dengan ketebalan plat 3mm dan Geometri benda didesain menggunakan *Solidwork* dengan dimensi berdasarkan standar ASTM E8 [11].



Gambar 1. Dimensi SS304 sesuai ASTM E8

Lalu Spesimen uji fatik dibentuk berdasarkan acuan standar ASTM E 647 [12], dimensi benda ditunjukkan pada Gambar 1 dengan ketebalan untuk benda tanpa dan dengan lapisan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ketebalan SS304

|       | SS304 | SS304+Al | SS304<br>Dif 1<br>Jam | SS304<br>Dif 9<br>Jam | SS304<br>Dif 49<br>Jam |
|-------|-------|----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Tebal | 2,98  | 3,04     | 3,107                 | 3,14                  | 3,13                   |

### 2. Hot dipping

Proses *hot dipping* adalah proses akhir atau pelapisan yang dilakukan dengan mencelupkan *Stainless steel* 304 ke dalam Aluminium dan waktu pencelupan yang akan dilakukan dalam proses pelapisan ini adalah 2 menit.

### 3. Difusi

Setelah proses *hot dipping*, spesimen uji dipanaskan kembali kedalam tanur/*furnace* dengan suhu 750°C selama kurun waktu 1 jam, 9 jam dan 49 jam.

### 4. Uji tarik

Setelah proses pelapisan, *stainless steel* 304 dilakukan pengujian tarik dengan menggunakan mesin MTS Landmark 100 kN. Pengujian tarik dilakukan untuk mendapatkan nilai tegangan luluh ( $\sigma_y$ ).

### 5. Uji fatik

Setelah melakukan proses uji tarik *stainless steel* 304 dilakukan pengujian perambatan retak fatik. Metode yang digunakan untuk menghitung perambatan retak fatik yaitu metode *polynomial incremental* [8].

$$a_i = b_0 + b_1 \left( \frac{N_i - C_1}{C_2} \right) + b_2 \left( \frac{N_i - C_1}{C_2} \right)^2 \quad (1)$$

Dimana :

$$-1 \leq \left( \frac{N_i - C_1}{C_2} \right) \leq +1 \quad (2)$$

Laju pertumbuhan retak pada  $N_i$  diperoleh dari turunan dari parabola di atas, sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\left( \frac{da}{dN} \right)_{d_i} = \frac{*b_1}{C_2} + 2b_2 \left( \frac{N_i - C_1}{C_2} \right)^2 \quad (3)$$

Nilai  $\Delta K$  terkait dengan nilai  $da/dN$  ini dihitung dengan menggunakan ukuran retak  $a_i$ , sesuai dengan  $N_i$ . Persamaan nilai  $\Delta K$  untuk spesimen retak sisi tunggal yaitu :

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.6\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (4)$$

Dimana :

$$\alpha = a/W \quad (5)$$

### 6. Simulasi dengan menggunakan Ansys 19.2

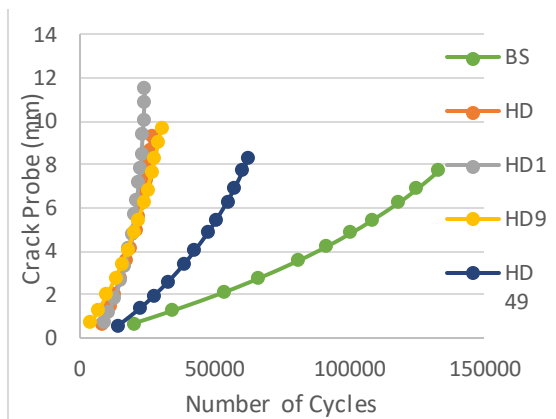
Material dasar yang digunakan adalah SS304. Material ini dilapisi oleh aluminium dan diberikan perlakuan difusi 1, 9, dan 49 jam sehingga menghasilkan sifat mekanik yang berbeda. Sifat mekanik berupa kekuatan material yang diperoleh berdasarkan uji tarik, sedangkan nilai C dan m yang merupakan konstanta Paris Law diperoleh dari uji kelelahan. Masukkan data tersebut ke dalam Data Engineering. Jenis mesh yang digunakan untuk simulasi adalah tetrahedron. Lalu perkembangan atau pertumbuhan retak menggunakan *SMART*

crack growth, dengan inisiasi retak *pre-meshed crack* dan memilih material yang telah diberikan konstanta paris law.

## Hasil dan Pembahasan

### 1. Hasil Uji Fatik

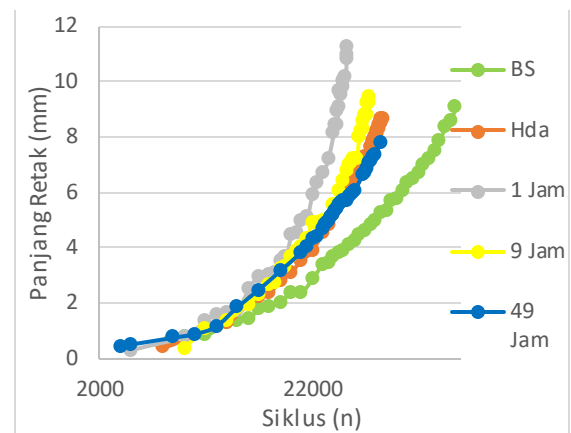
Perambatan retak hasil simulasi untuk SS304 tanpa dan dengan lapisan ditunjukkan oleh grafik *cycles vs crack probe* pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Panjang Retak vs Siklus (Simulasi)

Simulasi perambatan retak fatik ini material diasumsikan homogen, isotropik dan kontinyu serta tidak memperhitungkan adanya pengaruh lingkungan. Selanjutnya data perambatan retak diambil sebanyak 11 hingga 16 step. Berdasarkan grafik pada Gambar 2, terlihat bahwa SS304 tanpa lapisan memiliki jumlah siklus terpanjang, diikuti oleh, perlakuan 49 jam, perlakuan 9 jam, SS304 + Aluminium dan terakhir perlakuan 1 jam. Awal retak untuk kelima kondisi relatif sama, yakni pada panjang 0.5 – 0.7 mm. Retak paling panjang terjadi pada SS304 dengan difusi 1 jam dan difusi 9 jam. Kemudian oleh SS 304 lapisan aluminium, SS304 tanpa perlakuan, dan terakhir SS304 difusi 49 jam. Berdasarkan hasil simulasi perkembangan retak lelah, pelapisan SS304 dan perlakuan difusi memberikan pengaruh terhadap umur kelelahan. Pelapisan aluminium memberikan umur kelelahan yang hampir sama dengan difusi selama 9 jam dan lebih baik dibanding difusi selama 1 jam. Namun, pelapisan aluminium dan

perlakuan difusi selama 1 dan 9 jam memberikan penurunan umur kelelahan dibandingkan dengan SS304 tanpa lapisan.

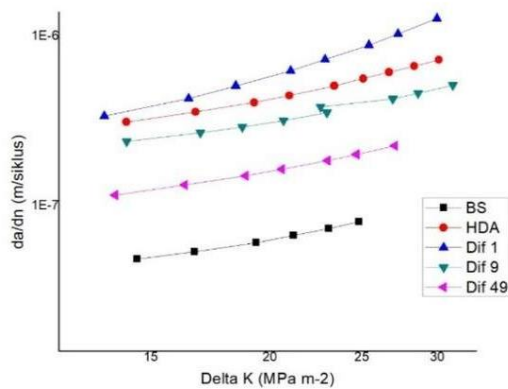


Gambar 3. Panjang Retak vs Siklus (Eksperimental)

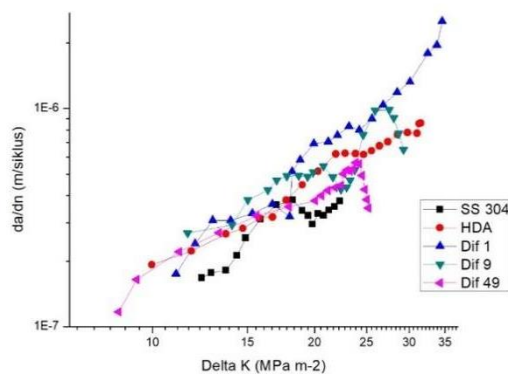
Jumlah siklus terhadap panjang retak eksperimental dengan hasil simulasi menunjukkan perbandingan yang tidak jauh berbeda, dimana SS304 tanpa pelapisan memiliki jumlah siklus terpanjang, dimana pada siklus 35500, panjang retak mencapai 9,045 mm. Lalu SS304 dengan lapisan aluminium memiliki penurunan jumlah siklus, dimana pada siklus 28600 panjang retak SS304 mencapai 8,643 mm.

Berdasarkan analisis perkembangan retak lelah, pemberian perlakuan difusi pada SS304 memberikan dampak baik untuk umur kelelahan maupun tegangan untuk merambatkan retak. Hasil yang ditunjukkan oleh SS304 dengan perlakuan difusi 49 menghasilkan siklus dan tegangan tertinggi dibanding dengan perlakuan yang lain.

Data panjang retak dan jumlah siklus digunakan untuk menentukan laju perambatan retak  $da/dN$  dan faktor intensitas tegangan ( $\Delta K$ ) menggunakan metode polynomial incremental (ASTM E647, 2004). Setelah diperoleh, nilai  $da/dN$  dan  $\Delta K$ , kemudian diplot kurva log-log pada gambar 4 dan gambar 5. Slope dari kurva  $da/dN$  vs  $\Delta K$  yang disebut konstanta Paris (nilai C dan m).



Gambar 4. Perbandingan da/dn vs ΔK (Simulasi) (by OriginPro)



Gambar 5. Perbandingan da/dn vs ΔK (Eksperimental) (by OriginPro)

Tabel 2. Perbandingan Nilai Hukum Paris Law

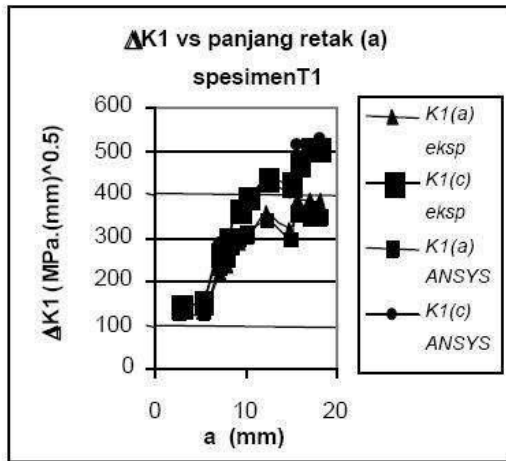
|        | Eksperimen              |             | Simulasi               |             |
|--------|-------------------------|-------------|------------------------|-------------|
|        | Konstanta C             | Konstanta m | Konstanta C            | Konstanta m |
| SS304  | $7.523 \times 10^{-9}$  | 1,2725      | $3,9 \times 10^{-8}$   | 0,9356      |
| HDA    | $7,639 \times 10^{-9}$  | 1,3708      | $1,493 \times 10^{-8}$ | 1,1316      |
| HDA 1  | $1,213 \times 10^{-9}$  | 2,0764      | $4,343 \times 10^{-9}$ | 1,6509      |
| HDA 9  | $1,382 \times 10^{-8}$  | 1,2001      | $1,67 \times 10^{-8}$  | 0,9899      |
| HDA 49 | $0,9655 \times 10^{-8}$ | 1,1536      | $8,69 \times 10^{-9}$  | 0,9809      |

Gambar 4 menunjukkan hasil dari grafik laju perambatan retak da/dN vs ΔK eksperimen dengan nilai m (slope dari kurva da/dN fungsi ΔK yang disebut konstanta Paris) pada SS 304 sebesar 1,2725, sedangkan hasil simulasi ANSYS mendapatkan nilai m sebesar 0,9356. Untuk grafik laju perambatan retak da/dN vs ΔK eksperimen pada SS 304 dengan lapisan mendapatkan nilai m sebesar 1,3708,

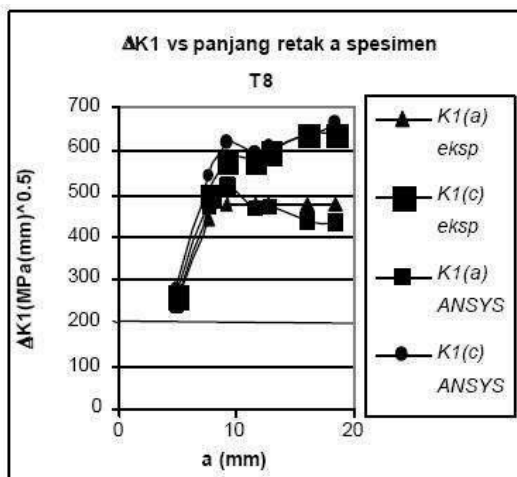
sedangkan hasil simulasi ANSYS mendapatkan hasil 1,1316. Lalu grafik laju perambatan retak da/dN vs ΔK eksperimen pada SS 304 + difusi 49 Jam mendapatkan nilai m sebesar 1,1536 sedangkan dengan simulasi yaitu 0,9809.

Terdapat penyimpangan antara hasil eksperimen dan hasil ANSYS untuk da/dN vs ΔK dimana hasil simulasi ANSYS lebih kecil dari hasil eksperimen. Artinya bahwa laju perambatan retak fatik dengan pemodelan ANSYS lebih lama dibandingkan dengan data hasil uji perambatan retak yang dilakukan secara eksperimen. Hal ini dipengaruhi oleh kondisi material saat pemodelan ANSYS, dimana material SS 304 dengan lapisan diasumsikan sebagai material homogen dan isotropic sedangkan pada kenyataannya material tidak memiliki sifat ideal.

Selanjutnya, pemodelan perambatan retak fatik ini dalam kondisi LEFM (Linear Elastic Fracture Mechanic) yang mengabaikan munculnya daerah plastis disekitar ujung retak, sedangkan kemunculan daerah plastis ini akan menyebabkan adanya perlambatan perambatan retak. Disamping itu dalam pemodelan ANSYS tidak menyertakan pengaruh lingkungan, padahal lingkungan berpengaruh terhadap laju perambatan retak seperti hasil dari penelitian Berata, W.,2003, dimana gambar 6 menunjukkan perbandingan grafik ΔK terhadap panjang retak dengan menggunakan ANSYS secara umum mendekati hasil eksperimen, dengan penyimpangan grafik sebesar 11.68 % serta mendapatkan hasil bahwa harga m dari konstanta paris pada kondisi hampa udara lebih besar dibanding dengan kondisi udara laboratorium.

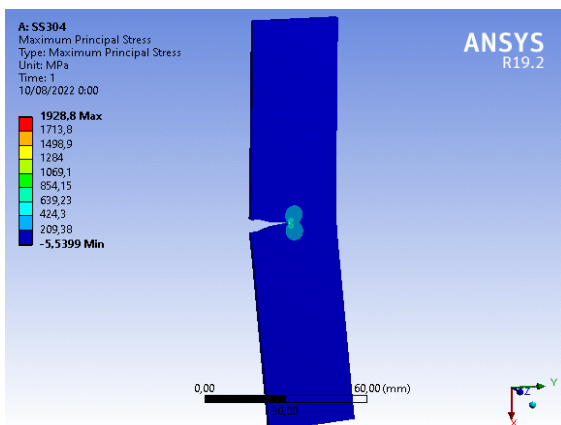


Gambar 6 (a). Perbandingan Grafik K1(a), K1(c) Vs Panjang retak arah Hasil Eksperimen (Sumber: Berata, W. 2003)

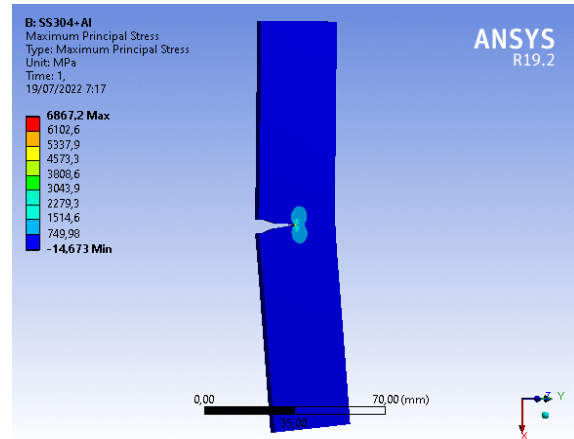


Gambar 6 (b). Perbandingan Grafik K1(a), K1(c) Vs Panjang retak arah Hasil Simulasi ANSYS (Sumber: Berata, W. 2003)

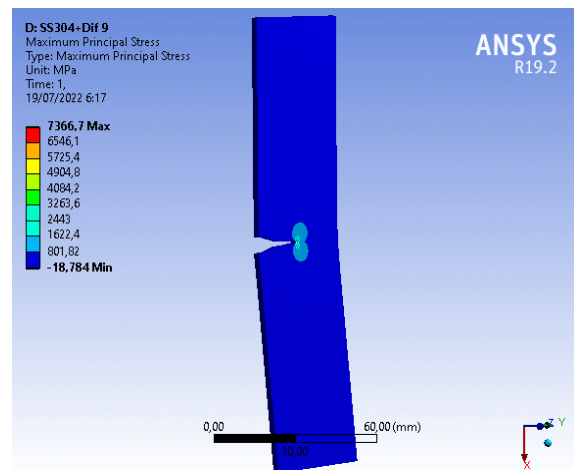
Adapun visualisasi perambatan retak dengan menggunakan ANSYS sebagai berikut:



Gambar 7 (a). Maximum Principal Stress SS 304



Gambar 7 (b). Maximum Principal Stress SS304 + HAD

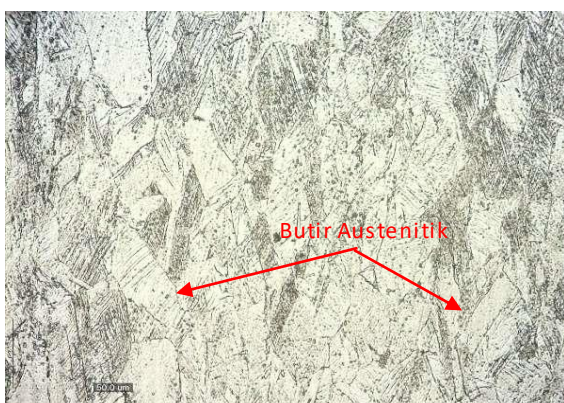


Gambar 7 (c). Maximum Principal Stress SS304 + Difusi 9 Jam

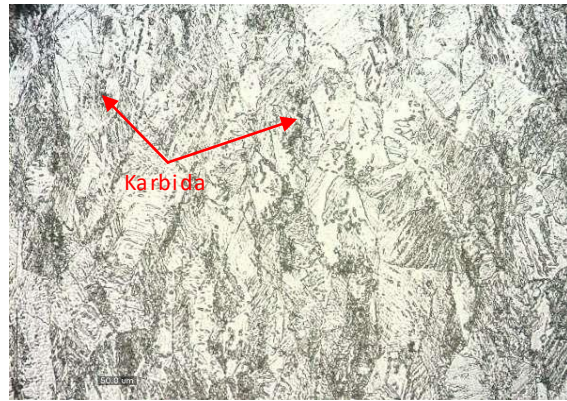
Dari gambar diatas tegangan maksimum paling besar yaitu SS304 difusi selama 9 jam, selanjutnya SS304 dengan pelapisan aluminium dan SS304 tanpa perlakuan. Jika dilihat dengan ukuran panjang retak yang sama, perlakuan difusi memberikan hasil terbaik dibanding dengan lainnya karena memerlukan tegangan yang cukup tinggi untuk merambatkan retak.

Berdasarkan hasil simulasi perkembangan retak lelah, pelapisan SS304 dan perlakuan difusi memberikan pengaruh terhadap umur kelelahan fatik. Pelapisan aluminium memberikan umur kelelahan yang hampir sama dengan difusi selama 9 jam dan lebih baik dibanding difusi selama 1 jam. Namun, pelapisan aluminium dan

perlakuan difusi selama 1 dan 9 jam memberikan penurunan umur kelelahan dibandingkan dengan SS304 tanpa lapisan. Hal ini sebanding dengan hasil uji OM yang ditunjukkan pada gambar 8. Terlihat pada gambar 8 (a) menunjukkan butir-butir austenitik. Lalu pada gambar 8 (b), SS 304 + Dif 1 jam terjadi perubahan fase  $\delta$ -ferit menjadi fase  $\alpha$  yang bersifat keras dan getas sehingga mengurangi elastisitas dan menyebabkan laju perambatan retaknya lebih cepat dibandingkan dengan SS304 tanpa pelapisan. Setelah perlakuan difusi, karbida pada batas butir larut, sedangkan fase  $\alpha$  masih terdeteksi pada butir austenitik. Selain itu, fraksi kembar mekanis meningkat. Di lain sisi, pertumbuhan butir yang terjadi saat perlakuan difusi 49 jam menyebabkan penurunan pada batas butir, yang mengurangi potensi cacat pada batas butir untuk terjadinya slip dislokasi. Sebaliknya fasa  $\alpha$  dengan sifat getas yang tinggi akan menurunkan kekuatan material. Cacat pada lapisan Fe-Al memberikan retakan mikro, sehingga terjadinya penurunan kekuatan SS304 secara terus-menerus selama proses uji tarik. Lalu, *void* yang terus berkembang pada batas butir seiring deformasi saat uji tarik juga dapat memengaruhi penurunan sifat mekanik pada SS304 *aluminized* dan perlakuan difusi. [13]

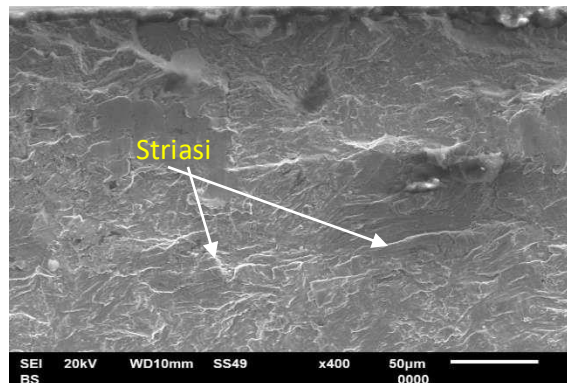


Gambar 8 (a). Hasil Uji OM SS 304

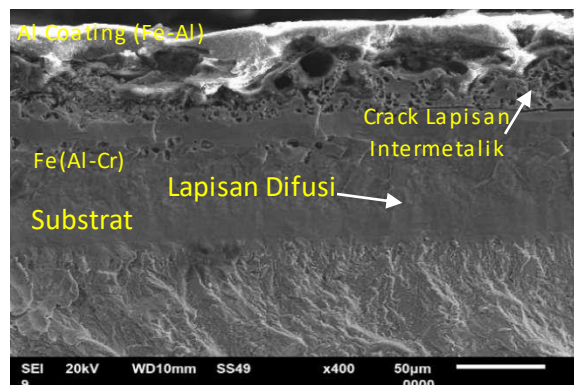


Gambar 8 (b). Hasil Uji OM SS 304 + Dif 1 Jam

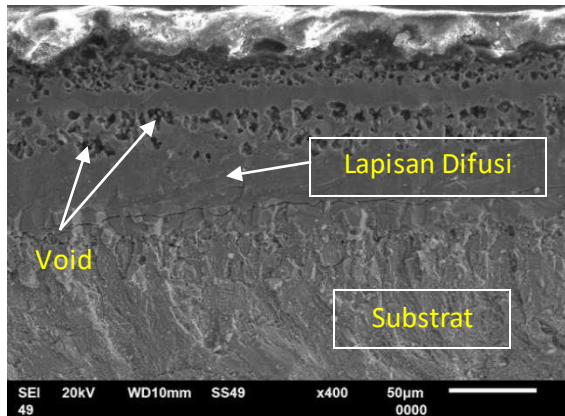
Sedangkan difusi selama 49 jam memberikan hasil yang lebih baik dibanding dengan perlakuan yang lain dan SS304. Sehingga, lamanya difusi berpengaruh terhadap umur leleh. Semakin lama waktu difusi akan meningkatkan ketahanan leleh pada material SS304.



Gambar 9 (a). Hasil Uji SEM SS 304



Gambar 9 (b). Hasil Uji SEM SS 304 + Dif 9 Jam



Gambar 9 (c). Hasil Uji SEM SS 304 + Dif 49 Jam

Pada gambar 9 menunjukkan hasil uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) dimana pada gambar (a) SS 304 tanpa lapisan terdapat striasi dan garis retakan. Garis striasi terjadi karena adanya pembebanan berulang dan terus menerus. Striasi dapat mengindikasikan posisi retakan dan arah perambatan retak pada spesimen. Lalu pada gambar (b) dan (c) terlihat ada 3 lapisan. Dimana pada lapisan atas terdapat lapisan aluminium. Selanjutnya lapisan intermetalik setelah *heat treatment* diperoleh senyawa dominan yaitu Fe dan Al sehingga terbentuk senyawa  $Fe_xAl_y$  dimana telah dilaporkan sebelumnya oleh Jian, D., et al. 2019, pelapisan pada SS316L pada suhu yang berbeda dan menunjukkan bahwa lapisan aluminium hanya terdiri dari fase  $Fe_2Al_5$  pada  $600^\circ C$ , tetapi beberapa fase  $Fe_3Al$ ,  $FeAl$ ,  $Fe_2Al_5$  dan  $FeAl_3$  dapat dideteksi ketika suhu pencelupan meningkat hingga  $650-680^\circ C$ . Untuk SS304 + Dif menunjukkan bahwa struktur pelapis dapat diklasifikasikan lebih lanjut menjadi lapisan atas,  $\beta-(Fe,Ni)Al$  lalu transisi menjadi fasa  $\beta-(Fe,Ni)Al/\alpha-(Fe, Cr)$ . Selain itu, transformasi fasa dari  $\delta-Fe_2Al_5$  (getas) menjadi  $\beta-FeAl$  (ulet) terjadi pada lapisan aluminium setelah perlakuan difusi anil, yang konduktif untuk meningkatkan plastisitas material [14].

SS304 memiliki kandungan *chrome* (Cr) yang cukup tinggi yaitu 18-20%. Namun, tingginya komposisi Cr pada substrat dapat memengaruhi pada lapisan

intermetalik, sehingga lapisan tersebut mengandung persenyawaan Cr. Atom-atom Cr yang berdifusi ke arah lapisan intermetalik, selain membentuk persenyawaan dengan Fe dan Al juga membentuk presipitat  $Al_x-Cr_y$  ketika atom-atom Cr mencapai lapisan aluminium. Namun, pada pelapisan aluminium SS304 memungkinkan penurunan jumlah atom Cr pada batas butir karena laju difusi atom Cr lebih rendah daripada atom C sehingga dapat memengaruhi daya ikat butir austenitik yang dapat menyebabkan kegagalan material ketika dilakukan pengujian tarik serta kekuatan dan plastisitas yang lebih rendah [15].

*Crack* yang terbentuk pada gambar 9(b) di lapisan intermetalik diakibatkan oleh tegangan yang terdistribusi melalui cacat-cacat rongga (*voids*) yang ada pada lapisan intermetalik. Proses terbentuknya voids (cacat rongga) salah satunya adanya inklusi sehingga menyebabkan berkurangnya sifat ketahanan pada material. Hal serupa yang pada gambar 9(c), dimana *Crack* yang muncul pada lapisan difusi disebabkan adanya deformasi plastis yang tinggi pada saat sampel dipanaskan (Wei Li, et., al., 2021). Namun tegangan yang diterima masing-masing perlakuan untuk pada ujung retak terlihat bahwa pemberian perlakuan berupa pelapisan dan difusi menghasilkan nilai yang lebih baik dibanding dengan tanpa perlakuan. Jika dilihat dengan ukuran panjang retak yang sama, perlakuan difusi 49 jam memberikan hasil terbaik dibanding dengan lainnya karena memerlukan tegangan yang cukup tinggi untuk merambatkan retak. Sehingga semakin lama waktu difusi, maka semakin tinggi tegangan yang diperlukan untuk merambatkan retak. Berdasarkan analisis perkembangan retak leleh dan tegangan, pemberian perlakuan difusi pada SS304 memberikan dampak baik untuk umur kelelahan maupun tegangan untuk merambatkan retak. Hasil terbaik ditunjukkan oleh SS304 dengan perlakuan difusi 49 jam yang menghasilkan siklus dan tegangan tertinggi dibanding dengan perlakuan yang lain



## Kesimpulan

Dengan menggunakan software ANSYS dapat memudahkan kita dalam memprediksi siklus perambatan retak fatik dimana hasil simulasi dengan hasil eksperimen menunjukkan hasil yang sama. SS 304 dengan difusi 1 jam memiliki siklus terpendek yaitu pada data simulasi terjadi retakan di siklus 8778 dengan Panjang retak 0,703 mm, sedangkan untuk hasil eksperimen retakan terjadi di siklus 5000 dengan panjang retak 0,267 mm. Lalu SS304 tanpa pelapisan memiliki siklus terpanjang yaitu, retakan pada hasil simulasi terjadi di siklus 20351 dengan Panjang retak 0,6787 mm, sedangkan pada data hasil eksperimen awal retakan di siklus 8700 dengan Panjang retak 0,6 mm. Lalu berdasarkan analisis laju perambatan retak fatik dan tegangan, pemberian perlakuan difusi pada SS304 memberikan dampak baik untuk umur kelelahan maupun tegangan untuk merambatkan retak. Sementara kekuatan dan plastisitas SS304 terdegradasi oleh perlakuan aluminisasi. Setelah perlakuan, SS304 menunjukkan keuletan yang lebih tinggi dan kekuatan yang lebih rendah.

## Referensi

Referensi jurnal/artikel/prosiding:

- [1] Syaifudin, A. et al., 2015. Effects of plaque lengths on stent surface. *Journal of Bio-Medical Materials and Engineering* 25, 189–202.

Referensi buku:

- [2] Strunk Jr., W. and White, E.B., 1979. *The elements of style*, 3<sup>rd</sup> Ed., Macmillan, New York.

Referensi bab dalam buku:

- [3] Mettam, G.R. and Adams, L.B., 1999. How to prepare an electronic version of your article, in: B.S. Jones, R.Z. Smith (Eds.), *Introduction to the electronic age*, E-Publishing Inc., New York, 281–304.

Referensi berupa paten:

- [4] Clem, P.G., Rodriguez, M., Voigt, J.A., and Ashley, C.S., 2001. Process for forming epitaxial perovskite thin film layers using halide precursors. US Patent No. 6231666.

Referensi berupa laman internet:

- [6] Informasi dari <http://www.weld.labs.gov.cn> (diakses pada hari-bulan-tahun)
- [1] Duyi, Ye. et al., 2010. Effects Of Low-Cycle Fatigue On Static Mechanical Properties, Microstructures And Fracture Behavior Of 304 Stainless Steel. Institute for Process Equipments. Zhejiang University, Hangzhou, China, 4092–4102.
- [2] Timings and Roger, L., 1998. *Engineering Materials*, Jilid 1, edisi 2., Penerbit Longman Scientific & Technical, New York.
- [3] Simms, H. G., 2011. Oxidation behaviour of austenitic stainless steels at high temperature in supercritical plant, University of Birmingham.
- [4] Smith, K.L. et al., 2013. Aluminide Coatings on 304 Stainless Steel, California State Polytechnic University, Pomona 3801, W, Temple Avenue Pomona, CA 91768, USA.
- [5] Wanga, S.P., Zhoua, L., et al., 2019. Morphology Of Composite Coatings Formed On Mo1 Substrate Using Hot-Dip Aluminising And Micro-Arc Oxidation Techniques. *Applied Surface Science* 508, 1–9.
- [6] Mukhtar, S., Asghar, W., et al., 2018. Development and Characterization of Hot Dip Aluminide Coated Stainless Steel 316L. *Journal of Central South University* 25, 2578–2588.
- [7] Abdulnaser, M. A., 2021. Numerical Modeling of Crack Growth under Mixed-Mode Loading. *Applied Science* 11, 2975.
- [8] Berata, W., 2003. Faktor Intensitas Tegangan Pada Part Through Crack Untuk Kasus Surface Crack Dengan

- Metode Elemen Hingga. Jurnal Teknik Mesin Vol. 5, No. 2, 48 – 55.
- [9] Fakhrial. et al., 2021. Studi perbandingan perilaku lelah AISI 316L dengan menggunakan metode eksperimen dan simulasi. Jurnal Polimesin 19, Nomor 2, 194-200.
- [10] Chen, S. and Cui, Z., 1998. Surface Crack Growth Behaviour Under Tensile Cyclic Loading. International Journal of Fatigue 10, Nomor 1, 43-47.
- [11] ASTM E8., 2001. Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials., USA.
- [12] ASTM E647., 2004. Metal Test Methods and Analytical Procedures, Annual Book of STM Standard., Bar Harbor Drive, West Conshohocken.
- [13] Wei Li, *et. al.*, 2021. Microstructure and tensile properties of AISI 321 stainless steel with aluminizing and annealing treatment. Materials & Design 205 (2021), 109729
- [14] Mao, S, W., et al., 2010. Microstructure of aluminized stainless steel 310 after annealing. Surface & Coatings Technology 205 (2010), 533–539.
- [15] Kevin, Mikhael., dkk. 2019. Pengaruh Komposisi Lelehan dan Waktu Celup terhadap Struktur Mikro Lapisan Hot Dip Aluminizing pada Baja Tahan Karat Martensitik 13Cr. Widyariset. Vol. 5 No. 1 (2019) Pp. 21 – 29.