

Perilaku Perambatan Retak Fatik Stainless Steel 304 yang Dilapisi Aluminium Celup Panas Secara Eksperimental dan Numerikal.

F. Nanda¹, M. Badaruddin¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung
Jl. Prof. Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145
E-mail: mbruddin@eng.unila.ac.id

Abstrak

Analisa perambatan retak fatik stainless steel 304 yang dilapisi aluminium dengan metode hot-dip secara eksperimen dan numerikal untuk mengetahui perubahan sifat mekanik pada SS304 serta memprediksi hasil uji fatik secara metode numerik yang berbasis program CFD dengan hasil secara eksperimen. Hasil simulasi siklus perambatan retak fatik 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. Berdasarkan analisis laju perambatan retak fatik dan tegangan, pemberian perlakuan difusi pada SS304 memberikan dampak baik untuk umur kelelahan maupun tegangan untuk merambatkan retak. Kekuatan dan plastisitas SS304 terdegradasi oleh perlakuan aluminisasi. Setelah perlakuan, SS304 menunjukkan keuletan yang lebih tinggi dan kekuatan yang lebih rendah.

Kata kunci: Stainless steel, aluminium celup panas, perambatan retak fatik, ansys

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. 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 (Duyi Ye, Yuandong Xu, et al., 2010).

Fatig 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 (Timing (1998). 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 (Covert dan Tuthill, 2000). Sehingga, stainless steel banyak digunakan pada konstruksi shells, tangki bahan bakar untuk rudal dan bagian struktur kendaraan serta pertahanan dan bidang nuklir. (H. G. Simms, 2011).

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) (Kevin L. Smith, Armen Kutyan, et al., 2013). 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. (Wanga, S.P., Zhoua, L., et al., 2019).

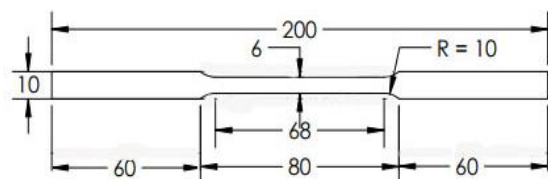
Efek oksidasi dapat dikurangi melalui pelapisan hot dip aluminium. Pada kondisi suhu tinggi, permukaan kaya aluminium teroksidasi menjadi lapisan aluminium oksida yang sangat protektif yang dapat menghambat korosi. Sehingga, stainless steel 304 memiliki ketahanan oksidasi dan sulfidasi yang baik. Seperti penelitian yang dilakukan Mukhtar, S., Asghar, W., dkk (2018), 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 Abdunaser, 2021, 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, melakukan studi perbandingan perilaku lelah AISI 316L dengan menggunakan metode eksperimen dan simulasi dengan hasil penyimpangan data uji kekuatan lelah dengan beban 6 kgf yaitu sebesar 8%. Lalu penelitian yang dilakukan oleh Berata, 2003, melakukan simulasi perambatan retak menggunakan ANSYS dengan penyimpangan terbesar 11,68% dengan eksperimental yang dilakukan Siyi Chen dan Zhenyuan Cui (1988), sehingga penggunaan metode elemen hingga menggunakan ANSYS cukup valid dalam mensimulasikan perambatan retak fatik. Berdasarkan uraian diatas, maka saya ingin meneliti tentang Perilaku Perambatan Retak Fatik Stainless Steel 304 yang Dilapisi Aluminium Celup Panas Secara Eksperimental dan Numerikal.

METODOLOGI

2.1 Pembentukan Spesimen dan Pemodelan Geometri

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



Gambar 1. Dimensi SS304 sesuai ASTM E8

Lalu Spesimen uji fatik dibentuk berdasarkan acuan standar ASTM E 647 dimensi benda ditunjukkan pada Gambar 7 dengan ketebalan untuk benda tanpa dan dengan lapisan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ketebalan SS304

	S	SS3	S	S
	S304	04+Al	S304 Dif 1 Jam	S304 Dif 9 Jam
Tebal	2,98	3,04	3,107	3,14

2.2 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.

2.3 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 (σ_y).

2.4 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. (ASTM E647, 2004)

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

Dimana :

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

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

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

Nilai ΔK terkait dengan nilai da/dN ini dihitung dengan menggunakan ukuran retak \hat{a}_i , sesuai dengan Ni . Persamaan nilai ΔK 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 :

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

2.5 Simulasi dengan menggunakan Ansys 19.2

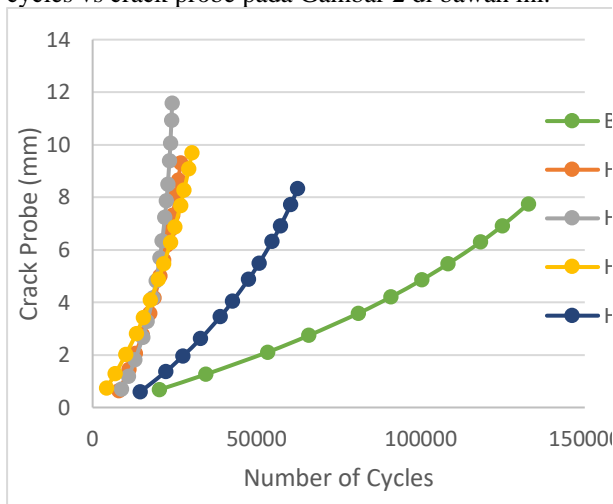
Material dasar yang digunakan adalah SS304. Material ini dilapisi oleh aluminium dan diberikan perlakuan difusi 1, 9, dan 49 jam sehingga menghasilkan sifat mekanik yang berbeda. Sifat mekanik berupa kekuatan material yang diperoleh berdasarkan uji tarik, sedangkan nilai C dan m yang merupakan konstanta 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

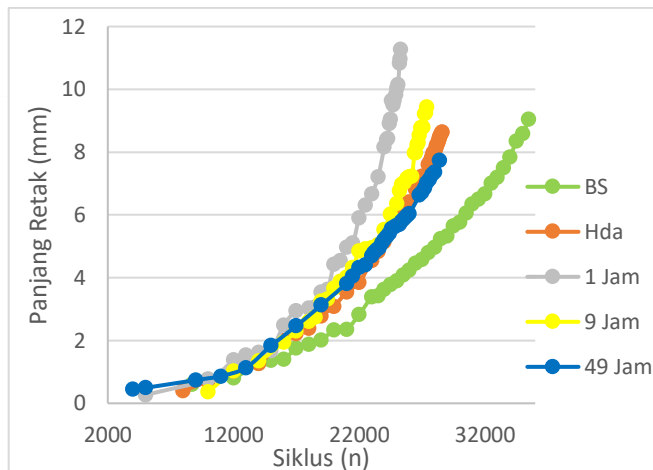
3.1 Hasil Uji Fatik

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 kontinu 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.

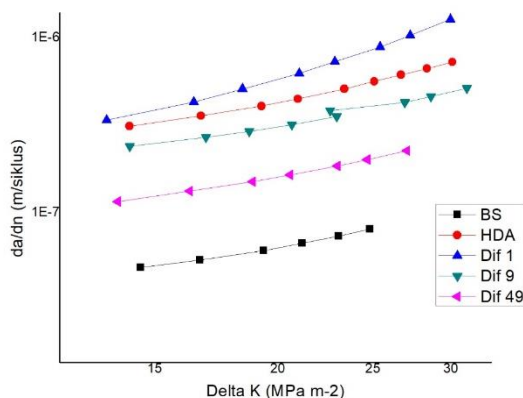


Gambar 3. Panjang Retak vs Siklus (Eksperimental)

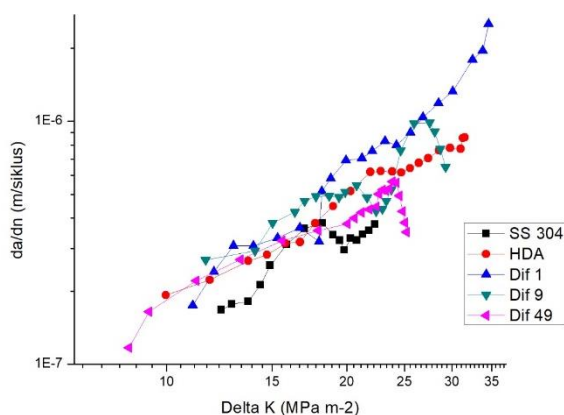
Jumlah siklus terhadap panjang retak eksperimental dengan hasil simulasi menunjukkan perbandingan yang tidak jauh berbeda, dimana SS304 tanpa pelapisan memiliki jumlah siklus terpanjang, dimana pada siklus 35500, panjang retak mencapai 9,045 mm. Lalu SS304 dengan lapisan aluminium memiliki penurunan 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 (ΔK) menggunakan metode polynomial incremental (ASTM E647, 2004). Setelah diperoleh, nilai da/dN dan ΔK , kemudian diplot kurva log-log pada gambar 25 dan gambar 26. Slope dari kurva da/dN vs ΔK yang disebut konstanta Paris (nilai C dan m).



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



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

Tabel 2. Perbandingan Nilai Hukum Paris Law

	Eksperimen		Simulasi	
	Konstanta C	Konstanta m	Konstanta C	Konstanta m
SS304	7.523×10^{-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	$1,382 \times 10^{-9}$	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 29 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 pada gambar 25 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 (gambar 26), 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 27 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.

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. Dengan asumsi harga dasar \$308/ton, penyesuaian harga akibat nilai GCV diperoleh 68.92% seharga \$224.106/ton, 30.84% seharga \$263.081/ton, dan 0.01% seharga \$282.569/ton.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Abdalnaser M. Alshoaihi, 2021. Numerical Modeling of Crack Growth under Mixed-Mode Loading. Applied Science. 2021, 11, 2975.

- [2] ASTM E647. 2004. Metal Test Methods and Analytical Procedures. Annual Book of ASTM Standards. Sec.3, Vol.03.01, pp.615-657, Bar Harbor Drive, West Conshohocken.
- [3] ASTM E8. 2001. Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials. USA.
- [4] Berata, Wajan. 2003. Faktor Intensitas Tegangan Pada Part Through Crack Untuk Kasus Surface Crack Dengan Metode Elemen Hingga. Jurnal Teknik Mesin Vol. 5, No. 2. Pp. 48 – 55.
- [5] Duiyi Ye, Yuandong Xu, 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. Pp 4092–4102.
- [6] Fakhrizal, Syifaul Huzni, dkk. 2021. Studi perbandingan perilaku lelah AISI 316L dengan menggunakan metode eksperimen dan simulasi. Jurnal Polimesin Volume 19, Nomor 2. Pp. 194-200.
- [7] H. G. Simms, 2011. Oxidation behaviour of austenitic stainless steels at high temperature in supercritical plant. University of Birmingham.
- [8] Kevin L. Smith, Armen Kutyan, et al., 2013. Aluminide Coatings on 304 Stainless Steel. California State Polytechnic University, Pomona 3801, W. Temple Avenue Pomona, CA 91768, USA.
- [9] Mukhtar, S., Asghar, W., et al., 2018. Development and Characterization of Hot Dip Aluminide Coated Stainless Steel 316L. J. Cent. South Univ. Pp. 2578-2588.
- [10] Timings, Roger Leslie. 1998. Engineering Materials. Jilid 1, edisi 2. Penerbit Longman Scientific & Technical. New York.
- [11] 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. China. Pp. 1-9.
- [12] Ziyi Chen dan Zhenyuan Cui, Surface Crack Growth Behaviour Under Tensile Cyclic Loading, Int. J Fatigue 10, 1988, no 1 pp 43-47