

ANALISIS PERAMBATAN RETAK FATIK PADA STAINLESS STEEL 304 YANG DILAPISI ALUMINIUM CELUP PANAS

Farid Nanda Syanur^{1*}, Nur Syahidah Aini², Heri Budianto³

¹²Institut Teknologi Sumatera

³Sekolah Tinggi Ilmu Shuffah Al-Qur'an

*Faridnads185@gmail.com

Abstract

Mechanical component failures are often caused by material fatigue due to repeated dynamic loading. Although Stainless steel 304 has high corrosion resistance, it remains susceptible to damage under extreme conditions. One method used to enhance resistance to oxidation and corrosion is hot-dip aluminium coating. This study aims to analyze the effect of hot-dip aluminium coating on the fatigue crack propagation rate of Stainless steel 304. The research involved coating SS 304 by immersion in molten aluminium for two minutes, followed by tensile testing (ASTM E8), fatigue testing (ASTM E647), and microstructural characterization using Optical Microscopy (OM) and Scanning Electron Microscopy (SEM). The results showed that aluminium coating led to a reduction in the yield strength and ultimate tensile strength of SS 304, from 351.86 MPa to 325.19 MPa, and from 612.12 MPa to 561.95 MPa, respectively. Furthermore, aluminium-coated SS 304 exhibited a higher fatigue crack propagation rate ($m = 1.3638$) compared to untreated SS 304 ($m = 1.2725$), and demonstrated more brittle fracture characteristics. Therefore, hot-dip aluminium coating does not enhance the mechanical strength of SS 304 and instead decreases its resistance to fatigue crack propagation.

Keywords: *Stainless steel 304, Hot-Dip Aluminium, Fatigue Crack, Coating, SEM*

Abstrak

Kegagalan komponen mesin sering disebabkan oleh kelelahan material (fatigue) akibat pembebanan dinamis berulang. *Stainless steel* 304, meskipun memiliki ketahanan korosi yang tinggi, tetap berpotensi mengalami kerusakan pada kondisi ekstrem. Salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi dan korosi adalah pelapisan aluminium dengan metode hot-dip. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pelapisan aluminium celup panas terhadap laju perambatan retak fatik pada *Stainless steel* 304. Metode penelitian meliputi proses pelapisan hot-dip aluminium pada SS 304 selama dua menit, dilanjutkan dengan uji tarik (ASTM E8), uji fatik (ASTM E647), serta karakterisasi mikrostruktur menggunakan mikroskop optik (OM) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelapisan aluminium menyebabkan penurunan tegangan luluh dan tegangan maksimum SS 304, masing-masing dari 351,86 MPa menjadi 325,19 MPa, dan dari 612,12 MPa menjadi 561,95 MPa. Selain itu, SS 304 berlapis aluminium menunjukkan laju perambatan retak fatik yang lebih cepat ($m = 1,3638$) dibandingkan SS 304 tanpa perlakuan ($m = 1,2725$), serta memiliki sifat patahan yang lebih getas. Dengan demikian, pelapisan aluminium celup panas tidak

meningkatkan kekuatan mekanik SS 304, dan justru menurunkan ketahanan terhadap perambatan retak fatik.

Kata kunci: *Stainless steel* 304, Aluminium Celup Panas, Retak Fatik, *Hot-Dip Coating*, SEM

Pendahuluan

Salah satu penyebab terjadinya kegagalan (patah) pada komponen mesin yaitu kelelahan (fatigue) pada material (Fitri, 2020). Kelelahan (fatigue) ini terjadi akibat beban dinamis (pembebanan yang berulang-ulang atau berubah-ubah tiap waktu). Kegagalan ini biasanya terjadi saat level tegangan di bawah *yield strength* material (Akuan, 2007). Semakin besar amplitudo pembebanan dinamis semakin cepat retak merambat (Timings, 2014). Dalam proses terjadinya kelelahan (fatigue) terdapat 3 fase dalam perpatahan fatik yaitu permulaan retak, penyebaran retak dan patah. Dalam dunia teknik banyak terjadi kerusakan akibat kelelahan (fatigue) pada material. Biasanya kerusakan ini terjadi disebabkan oleh adanya cacat atau retakan dan juga adanya pembebanan pada saat beroperasi. Dengan demikian sangat dibutuhkan material yang memiliki ketangguhan yang baik untuk meminimalisir kegagalan (patah) pada komponen mesin akibat kelelahan material (fatigue).

Baja tahan karat (*Stainless steel*) adalah salah satu logam ferro yang sering digunakan dalam dunia teknik (Kartikasari, 2023). Baja tahan karat (*Stainless steel*) termasuk dalam baja paduan tinggi yang mempunyai sifat mampu bentuk yang baik, ketangguhan yang baik pada temperatur rendah maupun temperatur tinggi, memiliki sifat ketahanan korosi yang baik serta memiliki ketahanan tumpul yang cukup besar pada temperatur tinggi. Baja tahan karat dapat bertahan dari pengaruh oksidasi karena mengandung unsur chromium lebih dari 11% (Tuthill & Covert, 2000). Unsur chromium ini merupakan pelindung utama baja dalam *Stainless steel* terhadap kondisi ekstrim (Sheet, 2007). Sehingga, *Stainless steel* banyak digunakan pada konstruksi shells, tangki bahan bakar untuk rudal dan bagian struktur kendaraan serta pertahanan dan bidang nuklir (Setyowati & Widodo, 2017)

Berdasarkan uraian di atas aplikasi *Stainless steel* sangat memungkinkan terjadinya korosi mencakup sulfidasi, karburisasi, korosi suhu tinggi dan oksidasi. Maka salah satu pendekatan untuk dapat mempertahankan sifat mekanik pada *Stainless steel* terhadap korosi adalah dengan penerapan lapisan pelindung (*coating*) (Smith 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 (Wang et al., 2020)

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., et al, *Stainless steel* 316 hot-dip mampu meningkatkan kekerasan dan ketahanan korosi, namun belum dapat

diketahui apakah pelapisan aluminium juga dapat memengaruhi *Stainless steel* terhadap laju perambatan retak fatik.

Metode Penelitian

Pembuatan spesimen uji

Stainless steel 304 berbentuk plat datar dengan ketebalan 3 mm. *Stainless steel* 304 dibentuk sesuai Standar uji Tarik (ASTM E8) dan Uji Fatik (ASTM E 647).

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.

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).

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:

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

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

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

Karakterisasi

Setelah melalui proses uji perambatan retak fatik maka spesimen akan melalui tahapan pengujian karakterisasi. Proses yang akan dilakukan adalah Uji OM (*Optic Microscope*) dan Uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) untuk mengetahui fasa dan struktur mikro *Stainless steel 304*.

Hasil dan Pembahasan

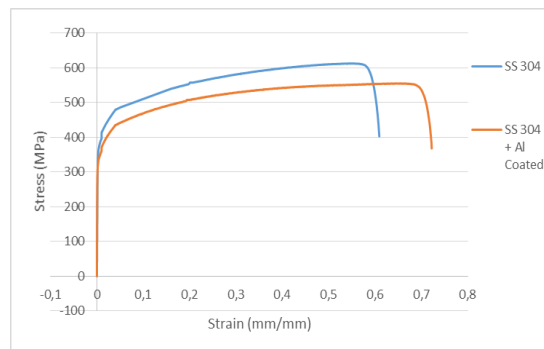
Hasil uji tarik

Uji tarik dilakukan untuk mengetahui tegangan luluh bahan dan tegangan maksimum *Stainless steel 304*. Setelah nilai tegangan luluh bahan (MPa) dan tegangan maksimum (MPa) *Stainless steel 304* didapatkan, selanjutnya dapat dihitung beban maksimum (Pmax) dan beban minimum (Pmin) *stainless steel 304* yang nantinya akan diberikan saat pengujian perambatan retak fatik. *Stainless steel 304* yang dipakai pada penelitian ini berbentuk plat datar dengan ketebalan 3 mm. Sedangkan standar uji tarik yang digunakan adalah ASTM E8 (*Subsize Specimen*).

Tabel 1. Hasil Uji Tarik *Stainless steel 304*

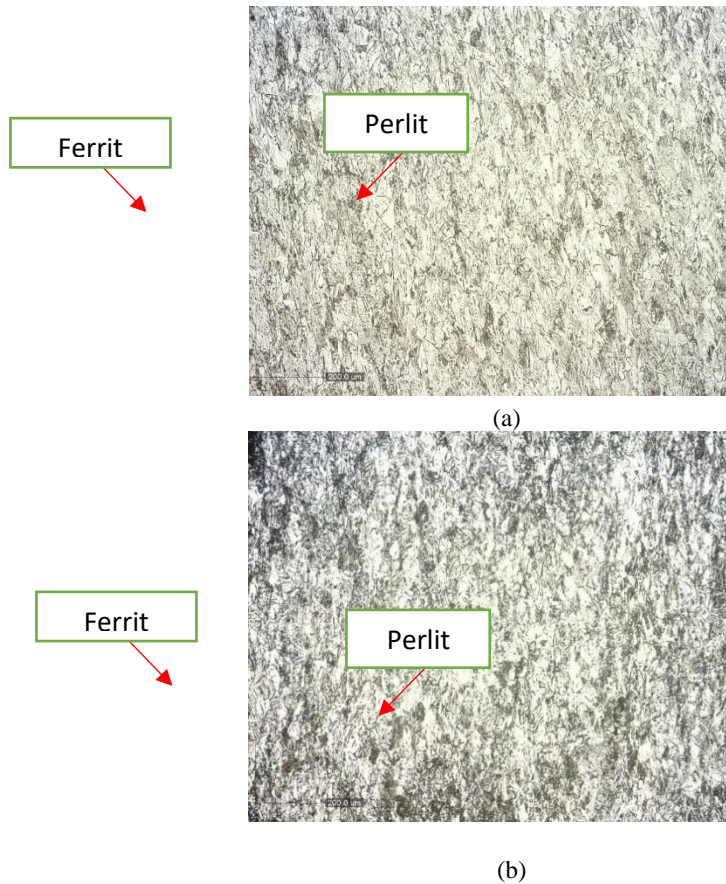
No	Nama	Yield Strength	Ultimate Strength	Modulus Elastisitas	Elongasi
1	SS 304	351,856	612,12	234690	60,933
2	SS 304 Al-Coating	325,1935	561,95	235981	72,247

Dari tabel 1 dapat diketahui tegangan luluh (*Yield Strength*) pada *Stainless steel 304* lapis aluminium mengalami penurunan yaitu sebesar 325,1935 MPa sedangkan tegangan luluh SS 304 base metal yaitu sebesar 351,856 MPa. Hal yang sama terjadi pada tegangan maksimum (*Ultimate Strength*) pada SS 304 lapis Aluminium yang mengalami penurunan sebesar 560,325 MPa sedangkan tegangan maksimum untuk base metal yaitu sebesar 612,12 MPa. Namun, elongasi pada SS 304 lapis aluminium meningkat. Berikut adalah kurva tegangan-regangan *Stainless steel 304* (lihat gambar 1).



Gambar 1. Kurva Tegangan-Regangan *Stainless steel 304*

Dari gambar 1 dapat dilihat kekuatan mekanik *Stainless steel* 304 mengalami penurunan. Dapat dilihat bahwa kekuatan tarik SS 304 lebih baik dibandingkan SS 304 yang dilapisi aluminium. Hal tersebut dikarenakan *Stainless steel* 304 termasuk baja tahan karat austenitik di mana material tersebut mempunyai sifat tidak dapat diberi perlakuan panas serta baja tahan karat austenitik tidak dapat dikeraskan melalui perlakuan celup cepat sehingga pada material yang mengalami proses pencelupan panas mengalami penurunan kekuatan mekaniknya. Berikut adalah hasil dari pengujian OM (*optical microscope*) yang bertujuan untuk melihat bentuk permukaan spesimen uji (lihat gambar 2).



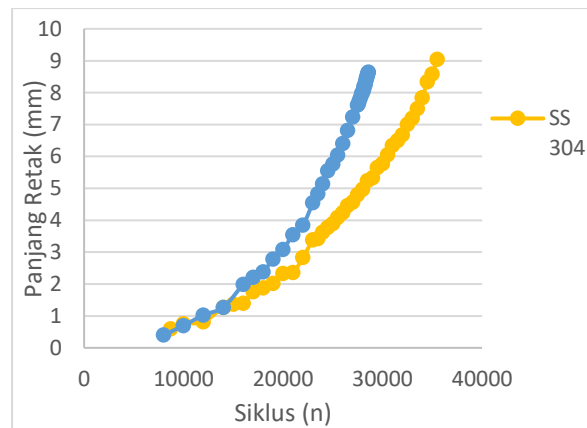
Gambar 2. (a) Struktur Mikro *Stainless steel* 304 tanpa perlakuan (*Base Metal*) dan (b) Struktur Mikro *Stainless steel* 304 dilapisi Aluminium

Berdasarkan gambar 1 dapat dilihat *mikrostruktur Stainless steel* 304 tanpa perlakuan dan *Stainless steel* lapis Aluminium di mana pada gambar-gambar tersebut terdapat perbedaan jumlah butir-butir ferrit (berwarna terang) dan butir-butir perlit (berwarna hitam). Pada *Stainless steel* 304 tanpa perlakuan terdapat lebih sedikit butir-butir perlit sedangkan pada *Stainless steel* 304 lapis Aluminium terdapat lebih banyak butir-butir perlit dibandingkan dengan *Stainless steel* 304 tanpa perlakuan. Hal tersebut menunjukkan bahwa fasa perlit pada *Stainless steel*

304 lapis Aluminium lebih dominan (lihat gambar b) dibandingkan fasa ferrit yang lebih sedikit sehingga membuat baja ini bersifat getas. Sedangkan pada *Stainless steel* 304 tanpa perlakuan (lihat gambar a), fasa ferrit lebih dominan dibandingkan fasa perlit sehingga membuat *Stainless steel* 304 ini lebih bersifat ulet.

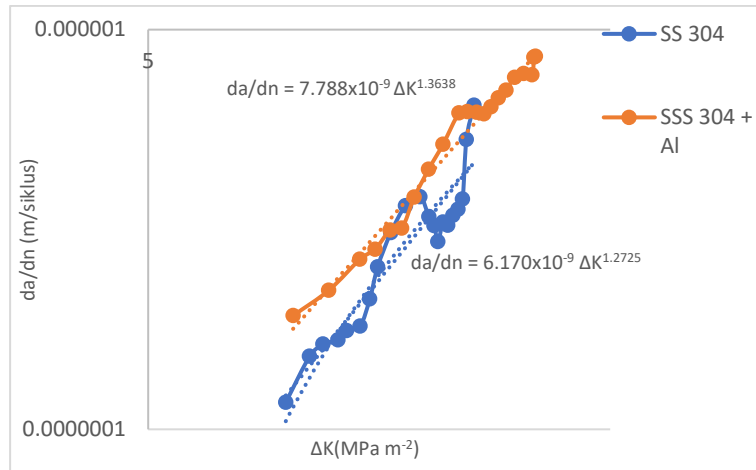
Hasil uji perambatan retak fatik

Pada pengujian perambatan retak fatik *Stainless steel* 304 dibentuk sesuai dengan standar ASTM E647. Kedalaman takikan *Stainless steel* 304 sebesar 0,08 mm dengan sudut 30°. Rasio pembebanan $R=0,3$ dan beban maksimum 0,7 dari σ_{yield} . Beban maksimum rata-rata sebesar 26,953 kN dan beban minimum rata-rata sebesar 8,085 kN diberikan kepada spesimen uji dengan frekuensi 10 Hz sebagai parameter pengujian perambatan retak fatik. Berikut adalah kurva panjang retak terhadap siklus dari hasil uji perambatan retak fatik pada SS 304 (lihat pada gambar 2).



Gambar 3. Kurva Panjang Retak (mm) Terhadap Siklus (n) *Stainless steel*

Dari gambar 3 dapat diketahui bahwa grafik hubungan panjang retak fatik terhadap siklus pada SS304 (*base metal*) memiliki siklus yang lebih lama dibandingkan SS304 lapis Aluminium di mana pada siklus 28500 panjang retak SS 304 yaitu 5.243 mm. Hal tersebut menunjukkan bahwa SS304 (*base metal*) mengalami perambatan retak yang lebih lambat dan jumlah siklus yang dibutuhkan untuk mematahkan spesimen pun lebih banyak dan lama (Anshari, 2010). Sedangkan SS 304 lapis Aluminium memiliki siklus yang lebih pendek di mana pada siklus 28500 panjang retak sudah mencapai 8.643 mm. Hal tersebut menunjukkan bahwa SS 304 lapis Aluminium mengalami perambatan retak yang lebih cepat dibandingkan dengan SS 304 *base metal* dan jumlah siklus yang dibutuhkan untuk mematahkan spesimen pun lebih sedikit. Data panjang retak dan jumlah siklus digunakan untuk menentukan laju perambatan retak da/dN dan faktor intensitas tegangan (ΔK) menggunakan metode *polynomial incremental*. Setelah diperoleh, nilai da/dN dan ΔK , kemudian diplot kurva log-log.



Gambar 4. Kurva da/dN terhadap ΔK pada *Stainless steel 304*

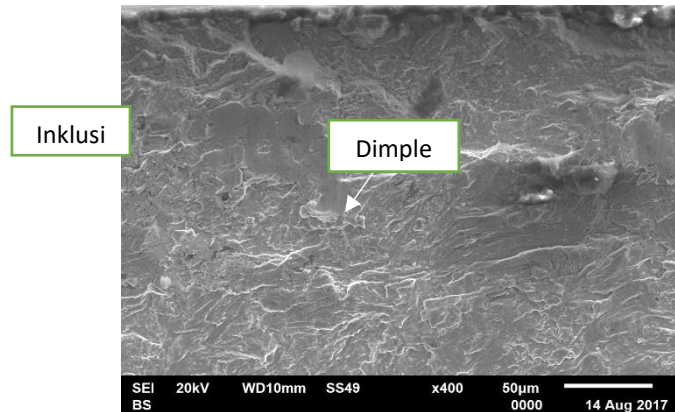
Nilai konstanta Paris (C dan m) diperoleh dengan menentukan persamaan regresi secara linier dari plot logaritma da/dN vs ΔK . Nilai m menunjukkan kemiringan atau gradien dari grafik tersebut. Secara umum daerah yang dipertimbangkan untuk harga m adalah daerah linier yang mempunyai kecepatan perambatan retak teratur. Formula karakteristik laju perambatan retak fatik (da/dN), semakin besar nilai/harga eksponensial m maka semakin cepat perambatan retaknya (Broek, 1982). Material yang memiliki nilai eksponensial m (angka eksponensial) yang lebih besar nilainya, memiliki laju perambatan retak yang lebih cepat (ketahanan lelah materialnya rendah).

Tabel 2. Nilai konstanta C dan m (nilai eksponensial) pada *Stainless steel 304*

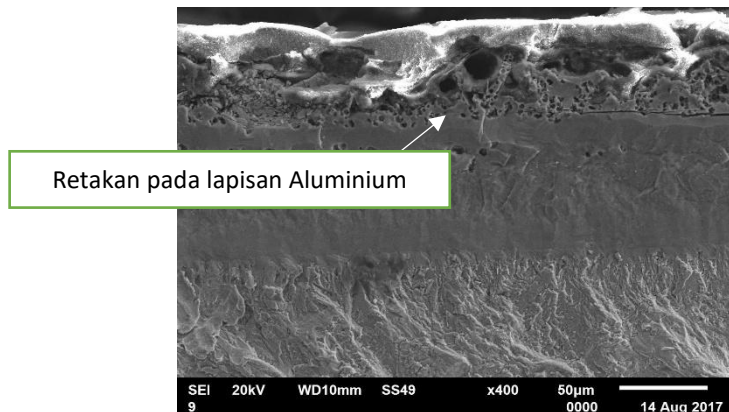
Nama	C (Konstanta bahan)	m (nilai eksponensial)
SS 304	7.523×10^{-9}	1,2725
SS 304 Al-Coating	7.788×10^{-9}	1,3638

Dari tabel 2 dapat mengetahui bahwa *Stainless steel 304* tanpa perlakuan (*base metal*) memiliki laju perambatan fatik yang lebih lambat dibandingkan dengan keempat spesimen lainnya di mana nilai eksponensial m -nya sebesar 1,2725. Sedangkan pada *Stainless steel 304* lapis Aluminium memiliki laju perambatan yang lebih cepat di mana nilai eksponensial m -nya lebih besar yaitu 1.3638. Ada beberapa faktor yang memengaruhi menurunnya kekuatan fatik pada *Stainless steel 304* yaitu faktor kekasaran permukaan di mana permukaan *Stainless steel 304* dengan lapis Aluminium lebih kasar dibandingkan dengan *Stainless steel 304* tanpa perlakuan. Kekasaran permukaan dapat menyebabkan konsentrasi *stress microscopic* yang mampu menurunkan ketahanan fatik. Selain itu, faktor suhu pada saat proses *hot dipping aluminizing* dapat memengaruhi kekuatan fatiknya. Dimana *Stainless steel 304* yang diberikan perlakuan pelapisan memiliki

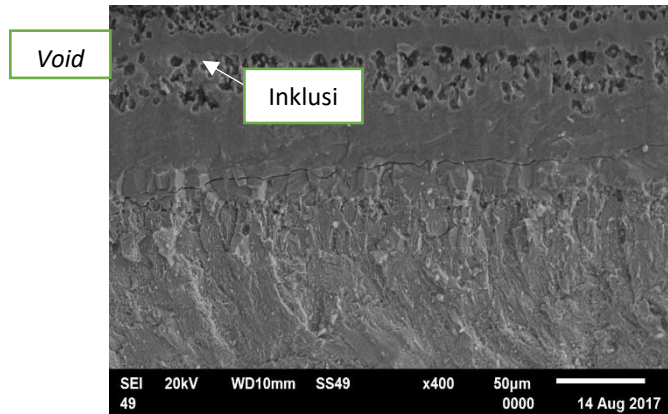
ketahanan fatik yang rendah dibandingkan dengan *Stainless steel* 304 tanpa perlakuan hal tersebut disebabkan unsur chromium pada *Stainless steel* terdegradasi pada suhu tinggi sehingga sifat mekanik *Stainless steel* menurun. *Stainless steel* 304 termasuk material yang tidak dapat diberi perlakuan panas untuk meningkatkan kekuatan mekaniknya sehingga pada saat dilakukan perlakuan panas akan menyebabkan butir kasar yang dapat menurunkan nilai laju perambatan retak fatiknya. Berikut adalah hasil dari pada Uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) pada *Stainless steel* 304.



(a)



(b)



(c)

Gambar 5. Hasil Uji SEM (a) *Stainless steel* 304 tanpa perlakuan (*base metal*) , (b) dan (c) *Stainless steel* 304 lapis Aluminium

Pada gambar 5 menunjukkan hasil uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) pada *Stainless steel* 304 tanpa perlakuan dimana pada gambar (a) terdapat dimple dan inklusi. Dimple merupakan bentuk penampang patahan berupa cekungan-cekungan kecil yang di dalamnya terdapat butiran kecil, sedangkan inklusi yaitu terjadi karena penggabungan microvoid dan terjebaknya partikel-partikel material asing dalam padatan. Pada gambar (b) dan (c) dapat dilihat bahwa pada SS 304 yang dilapisi Aluminium terdapat cacat rongga yaitu berupa voids (Lemmens et al., 2018). Voids yang terbentuk mengalami pengintian pada daerah-daerah *discontinuity*. Semakin besar regangan yang terjadi, voids akan semakin membesar dan berkembang menjadi macrovoids dan menyebabkan terjadinya retak pada lapisan alumunide (lihat pada gambar (b)) dan selanjutnya retak menjalar sehingga menyebabkan terjadinya perambatan retak yang akan berujung pada *fracture* (perpatahan permanen).

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian di atas bahwa tegangan luluh dan tegangan maksimum SS 304 *base metal* lebih baik dibandingkan SS 304 lapis aluminium yaitu 351,856 MPa dan 612,1200 MPa. Sedangkan, tegangan luluh dan tegangan maksimum SS 304 lapis aluminium yaitu 325,1935 MPa dan 561.9585 MPa. Laju perambatan retak fatik (da/dN) SS304 tanpa perlakuan (*base metal*) $da/dN=6.17 \times 10^{-9} \Delta K1.2725$ dan SS304 lapis Alumunium $da/dN=7.788 \times 10^{-9} \Delta K1.3638$. Berdasarkan nilai laju perambatan retak fatik di atas bahwa proses pelapisan aluminium terhadap SS 304 tidak dapat meningkatkan kekuatan mekanik pada material diakibatkan faktor kekasaran permukaan setelah proses pencelupan serta faktor suhu tinggi saat pencelupan sehingga sifat mekanik SS 304 menurun.

Daftar Pustaka

- Akuan, A. (2007). Diktat Kuliah Kelelahan Logam. *Jakarta, Universitas Jenderal Ahmad Yani*.
- Broek, D. (1982). *Elementary engineering fracture mechanics*. Springer Science & Business Media. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=LC4E70jnhuEC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Elementary+Engineering+Fracture+Mechanics,+Kluwer+Academics+Publiser.+London:+UK.&ots=bmWRwHfgzs&sig=3w3jYHpka9iAbJbg4D2UUnGHoac>
- Fitri, M. (2020). Pengaruh beban lentur pada poros *Stainless steel* terhadap siklus kegagalan fatik. *Jurnal Teknik Mesin*, 9(3), 149–155.
- Kartikasari, R. (2023). *Paduan Fe-Al-Mn Kandidat Pengganti Baja Tahan Karat Konvensional*. Deepublish. Retrieved from [https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=1XxLEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Baja+tahan+karat+\(Stainless+steel\)+adalah+salah+satu+logam+ferro+yang+sering+digunakan+dalam+dunia+teknik.+&ots=5j1QtVg1Ew&sig=ZP5xZlXImCFHFf0U2DeoAxUrAHO](https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=1XxLEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Baja+tahan+karat+(Stainless+steel)+adalah+salah+satu+logam+ferro+yang+sering+digunakan+dalam+dunia+teknik.+&ots=5j1QtVg1Ew&sig=ZP5xZlXImCFHFf0U2DeoAxUrAHO)
- Lemmens, B., Springer, H., Peeters, M., De Graeve, I., De Strycker, J., Raabe, D., & Verbeken, K. (2018). Deformation induced degradation of hot-dip aluminized steel. *Materials Science and Engineering: A*, 710, 385–391. <https://researchportal.vub.be/en/publications/deformation-induced-degradation-of-hot-dip-aluminized-steel>
- Setyowati, V. A., & Widodo, E. W. R. (2017). Analisis Kekuatan Tarik dan Karakteristik Xrd Pada Material *Stainless steel* dengan Kadar Karbon Yang Berbeda. *Semin. Nas. Sains Dan Teknol. Terap*, 2017, 57–62. https://www.academia.edu/91398381/Analisis_Kekuatan_Tarik_Dan_Karakteristik_XRD_Pada_Material_Stainless_Steel_Dengan_Kadar_Karbon_Yang_Berbeda
- Sheet, P. D. (2007). 304/304L Stainless Steel. *AK Steel*.
- Smith, K. L., Kutyan, A., Abolian, S. A., Krenek, T. F., Salas, S. A., & Ravi, V. A. (2013). Aluminide coatings on 304 stainless steel. *The NACE International Annual Conference*, 1–11. NACE International. Retrieved from https://content.ampp.org/nace/proceedings-abstract/CONF_MAR2013/2013/1/56244
- Timings, R. L. (2014). *Basic engineering technology*. Elsevier. Retrieved from https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=uxmjBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Engineering+Materials,+Part+1+Engineering+Materials,+Roger+Leslie+Timings&ots=dVAmxeH8Gv&sig=D9KHMLXs_hzWJehOGrhHBQILEZU
- Tuthill, A. H., & Covert, R. A. (2000). Stainless steels: An introduction to their metallurgy and corrosion resistance. *Dairy Food Environ San*, 20, 506–517. <https://nickelinstitute.org/en/library/technical-guides/stainless-steels-an-introduction-to-their-metallurgy-and-corrosion-resistance-14056/>

Wang, S.-P., Zhou, L., Li, C.-J., Li, Z.-X., Li, H.-Z., & Yang, L.-J. (2020). Morphology of composite coatings formed on Mo1 substrate using hot-dip aluminising and micro-arc oxidation techniques. *Applied Surface Science*, 508, 144761. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.077>