

**PERILAKU PERAMBATAN RETAK FATIK STAINLESS STEEL 304
YANG DILAPISI ALUMINIUM CELUP PANAS SECARA
EKSPERIMENTAL DAN NUMERIKAL**

(Tesis)

Oleh

**FARID NANDA SYANUR
NPM 1925021007**



**MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

PERILAKU PERAMBATAN RETAK FATIK STAINLESS STEEL 304 YANG DILAPISI ALUMINIUM CELUP PANAS SECARA EKSPERIMENTAL DAN NUMERIKAL

Oleh :

Farid Nanda Syanur

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 perambatan retak 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 0,70 mm, sedangkan untuk hasil eksperimen retakan terjadi di siklus 5000 dengan panjang retak 0,27 mm. Lalu SS304 tanpa pelapisan memiliki siklus terpanjang yaitu, retakan pada hasil simulasi terjadi di siklus 8103 dengan Panjang retak 0,63 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 : SS304, Hot-dip, Perambatan Retak Fatik, CFD.

ABSTRACT

ANALYSIS OF FATIGUE CRACK PROPAGATION OF 304 STAINLESS STEEL COATED WITH ALUMINUM BY HOT-DIP METHOD EXPERIMENTALLY AND NUMERICALLY

by :

Farid Nanda Syanur

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 0.70 mm, while for experimental results the crack occurs at cycle 5000 with a crack length of 0.27 mm. Then SS304 without coating has the longest cycle, namely, cracks in simulation results occur in cycle 8103 with a crack length of 0.63 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.

Keywords : SS304, Hot-dip, Fatigue Crack Propagation, CFD

**PERILAKU PERAMBATAN RETAK FATIK STAINLESS STEEL 304
YANG DILAPISI ALUMINIUM CELUP PANAS SECARA
EKSPERIMENTAL DAN NUMERIKAL**

Oleh

FARID NANDA SYANUR

Tesis

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar
MAGISTER TEKNIK**

Pada

**Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

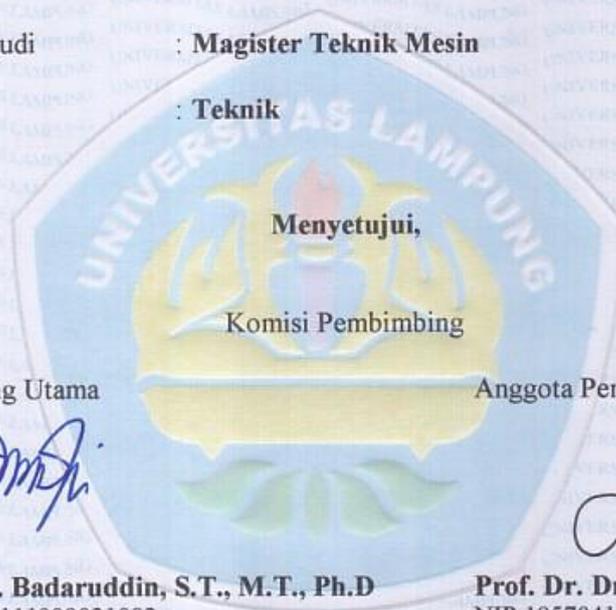
Judul Tesis : **PERILAKU PERAMBATAN RETAK FATIK STAINLESS STEEL 304 YANG DILAPISI ALUMINIUM CELUP PANAS SECARA EKSPERIMENTAL DAN NUMERIKAL**

Nama Mahasiswa : *Farid Nanda Syanur*

Nomor Pokok Mahasiswa : 1925021007

Program Studi : **Magister Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**



Menyetujui,

Komisi Pembimbing

Pembimbing Utama

Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D
NIP 197212111998031002

Anggota Pembimbing

Prof. Dr. Drs. Sugiyanto, M.T
NIP 195704111986101001

Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin

Gusri Akhyar, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 197108171998021003

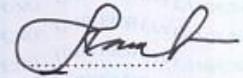
MENGESAHKAN

1. Tim penguji

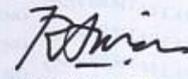
Ketua : Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D.



Anggota Penguji : Prof. Dr. Drs. Sugiyanto, M.T.



Penguji Utama I : Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D., IPU.



Penguji Utama II : Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met.



2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)
NIP.197509282001121002



3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung

Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP.196403261989021001



Tanggal Lulus Ujian Tesis : 10 Juni 2023

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Farid Nanda Syanur
NPM : 1925021007
Fakultas : Teknik
Jurusan : Teknik Mesin
Program Studi : Program Studi Magister Teknik Mesin

Menyatakan bahwa tesis dengan judul **“Perilaku Perambatan Retak Fatik Stainless Steel 304 yang Dilapisi Aluminium Celup Panas Secara Eksperimental dan Numerikal”** adalah karya saya sendiri dan bukan hasil plagiat sebagaimana diatur didalam Pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor Nomor 3187/H26/DT/2010. Hak intelektual atas karya ilmiah ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung. Atas pernyataan ini, apabila di kemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan perundangan yang berlaku.

ar Lampung, 10 Juni 2023



buat Pernyataan

Farid Nanda Syanur

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung 08 Januari 1995, sebagai anak sulung dari pasangan Bapak Syahrul dan Ibu Nurhaida. Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 02 Rajabasa Bandar Lampung pada tahun 2006, pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 22 Bandar Lampung pada tahun 2009, pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA 3 Al-Azhar 3 Bandar Lampung pada Tahun 2012, dan pada tahun 2012 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Teknik Mesin Universitas Lampung melalui jalur undangan.

Tahun 2019 penulis diterima di Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung. Pada tahun 2020, penulis terdaftar sebagai tenaga kependidikan (laboran) Program Studi Teknik Material, Institut Teknologi Sumatera hingga sampai sekarang.

Bandar Lampung, 10 Juni 2023

Penulis

Farid Nanda Syanur

PERSEMBAHAN

Puji syukur hamba panjatkan kepada ALLAH SWT yang telah memberikan kelancaran dan kemudahan kepada hamba dalam menyelesaikan tesis ini.

Untuk Kedua Orangtuaku, Bapak Syahrul dan Ibu Nurhaida yang tak pernah henti-hentinya memberikan dukungan dan doa untuk kesuksesan penulis sehingga dapat menyelesaikan studi S2.

Untuk Ummana, Nur Syahidah Aini dan adek, yang telah mendukung, menemani dan membantu penulis serta doa dan kasih sayang sehingga penulis dapat menyelesaikan studi S2.

Untuk adik-adik ku serta keluarga besar yang telah mendukung penulis dalam menyelesaikan studi S2.

Untuk rekan seperjuanganku, Magister Teknik Mesin Universitas Lampung Angkatan 2019. Terima kasih untuk semua yang telah kalian berikan.

Untuk semua dosen yang dengan tulus mengajarkan banyak hal kepadaku. Terima kasih untuk ilmu, pengetahuan, dan pelajaran hidup tak ternilai yang telah diberikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah rabbilalamin, puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah, serta inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tesis sebagai salah satu syarat dalam meraih gelar Magister Teknik pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung dengan tugas akhir berjudul “Perilaku Perambatan Retak Fatik Stainless Steel 304 yang Dilapisi Aluminium Celup Panas Secara Eksperimental dan Numerikal”. Shalawat beriring salam selalu tercurah kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW.

Dalam penyusunan tesis ini penulis banyak mendapat bimbingan, motivasi dan bantuan baik moral maupun materi oleh banyak pihak. Untuk itu dengan sepuh ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A.IPM, selaku Rektor Universitas Lampung
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si., selaku Direktur Pascasarjana Universitas Lampung
3. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung

4. Bapak Dr. Amrul, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung
5. Bapak Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., selaku selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung
6. Bapak Prof. Moh. Badaruddin, S.T., M.T., Ph.D., selaku pembimbing akademik serta pembimbing utama tesis ini yang memberikan waktu, ide pemikiran dan motivasi bagi penulis.
7. Bapak Prof. Dr. Drs. Sugiyanto, M.T., selaku pembimbing kedua tesis ini yang memberikan saran dan nasihat bagi penulis.
8. Bapak Irza Sukmana, S.T.,M.T., Ph.D., selaku pembahas tesis ini yang memberikan saran dan nasihat bagi penulis.
9. Seluruh Dosen Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung berkat ilmu yang telah diajarkan kepada penulis selama menjalani masa studi di perkuliahan.
10. Ibuku Nurhaida dan Ayahku Syahrul, yang tak pernah henti-hentinya memberikan dukungan dan doa untuk kesuksesan penulis sehingga dapat menyelesaikan studi S2.
11. Ummana, Nur Syahidah Aini dan adek, yang telah mendukung, menemani dan membantu penulis serta doa dan kasih sayang sehingga penulis dapat menyelesaikan studi S2.
12. Adik-adik ku, Fitri Andani S, Sofi, Aziz, Fitri, Fina, Fikar, Hasna, Husen, Sarah, Iman dan Ira serta keluarga besar yang telah mendukung penulis dalam menyelesaikan studi S2.

13. Teman-teman Magister Teknik Mesin angkatan 2019, Mas Salam, Mas Dadang dan semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan tesis ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu

Akhir kata, Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kesempurnaan, akan tetapi sedikit harapan semoga yang sederhana ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Bandar Lampung, Juni 2023
Penulis,

Farid Nanda Syanur
NPM. 1925021007

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
JUDUL TESIS	iii
MENGESAHKAN	iv
SURAT PERNYATAAN	v
RIWAYAT HIDUP	vi
PERSEMBAHAN	vii
UCAPAN TERIMA KASIH	viii
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Baja Tahan Karat (<i>Stainless Steel</i>).....	6
2.2. Kelelahan (<i>Fatigue</i>)	11
2.3. <i>Hot Dipping</i>	17
2.4. Penelitian Terdahulu	18

III. METODE PENELITIAN	21
3.1. Tempat Penelitian	21
3.2. Alat dan Bahan Penelitian.....	21
3.3. Prosedur Penelitian	23
3.4. Metode <i>Polynomial Incremental</i>	27
3.5. Metode SMART <i>crack growth</i>	28
3.6. Diagram Alir Penelitian	34
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1. Simulasi Pertumbuhan Retak (FCGR) pada <i>Stainless Steel 304</i>	35
4.2. Hasil dan Pembahasan	36
4.2.1. Perambatan Retak Fatik.....	36
4.2.1.1 <i>Stainless Steel 304</i> tanpa Perlakuan.....	40
4.2.1.2 <i>Stainless Steel 304</i> HAD.....	41
4.2.1.3 <i>Stainless Steel 304</i> HDA + Dif 1 Jam	42
4.2.1.4 <i>Stainless Steel 304</i> HDA + Dif 9 Jam	43
4.2.1.5 <i>Stainless Steel 304</i> HDA + Dif 49 Jam	44
4.2.2. Tegangan	47
V. KESIMPULAN DAN SARAN	54
5.1 Kesimpulan	54
5.2 Saran	55

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Tebal spesimen uji.....	28
2. Beban.....	33
3. Hasil Uji Tarik SS304.....	38
4. Perbandingan Nilai Hukum Paris Law	46

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kurva S-N.....	13
2. Skematika panjang retak sebagai fungsi jumlah siklus (N)	13
3. Diagram Fasa Fe-Al.....	18
4. Hasil SEM SS316 dengan HDA 5 menit.....	19
5. Hasil Uji Tarik SS321.....	20
6. Mesin MTS <i>Landmark</i> 100 kN.....	22
7. Mikroskop <i>digital portable</i>	22
8. Spesimen uji tarik sesuai ASTM 8	24
9. Dimensi Spesimen Uji Fatik.....	24
10. Sistem koordinat pada retakan	29
11. Benda yang telah dimesh.....	30
12. <i>Mesh setting</i>	30
13. <i>Patch conforming method</i>	31
14. <i>Face sizing</i>	31
15. <i>Pre-meshed crack</i>	32
16. <i>SMART crack growth</i>	32
17. <i>Analysis setting</i>	32
18. Kondisi batas	33
19. Diagram Alir Penelitian	34
20. Panjang Retak vs Siklus (Simulasi).....	36
21. Panjang Retak vs Siklus (Eksperimental).....	37
22. Panjang Retak vs Siklus SS 304	40
23. Panjang Retak vs Siklus SS 304 HAD	41
24. Panjang Retak vs Siklus SS 304 HAD + Dif 1 Jam	42

25.	Panjang Retak vs Siklus SS 304 HAD + Dif 9 Jam	43
26.	Panjang Retak vs Siklus SS 304 HAD + Dif 49 Jam	44
27.	Perbandingan da/dn vs ΔK (Simulasi).....	45
28.	Perbandingan da/dn vs ΔK (Eksperimental).....	45
29.	Perbandingan Grafik K1(a), K1(c) Vs panjang retak arah (a) Hasil Eksperimen dan Hasil Simulasi ANSYS.....	47
30.	<i>Crack Probe vs Stress</i> SS304	48
31.	<i>Maximum Principal Stress</i> (a) SS 304, (b) SS 304 + Al, (c) SS 304 + Dif 1 Jam, (d) SS 304 + Dif 9 Jam dan (e) SS 304 + Dif 49 Jam	49
32.	Hasil Uji OM	50
33.	Hasil Uji SEM (a) SS 304, (b) SS 304 + Dif 9 Jam dan (c) SS 304 + Dif 49 Jam.....	50

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sifat mekanik yang ada pada material meliputi kekuatan luluh, kekuatan tarik, 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 pembebanan dinamis yaitu pembebanan berulang/ berubah-ubah tiap waktunya. Semakin besar nilai amplitudo pembebanan dinamisnya, maka semakin cepat pula retak merambat (Timing (1998)). Maka diperlukan suatu material yang memiliki sifat mekanik yang baik, salah satunya yaitu *stainless steel*. *Stainless steel*/ baja tahan karat merupakan baja paduan tinggi yang memiliki sifat ketahanan korosi yang baik, kekuatan tinggi, keuletan dan ketangguhan yang baik. Unsur pembentuk *stainless steel* yaitu terdiri dari besi, 10,5% *chromium* dan paduan unsur lainnya seperti nikel, molybdenum, mangan, silikon aluminium, dll. Paduan unsur inilah yang menjadikan *stainless steel* dapat bertahan terhadap oksidasi. Unsur *chromium* ini juga merupakan pelindung utama pada *stainless steel* yang berfungsi untuk melindungi *stainless steel* pada kondisi lingkungan yang ekstrim (Covert dan

Tuthill, 2000). Sehingga, *stainless steel* banyak digunakan pada konstruksi *shells*, tangki bahan bakar untuk rudal dan bagian struktur kendaraan serta di bidang 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 terhadap oksidasi dan sulfidasi yang cukup 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 Abdalnaser, 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 kegagalan fatik pada SS 316L secara eksperimental dan secara simulasi menggunakan *software* ANSYS 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 oleh Ziyi 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”.

1.2. Tujuan Penelitian

Berikut adalah tujuan dalam penelitian ini yaitu:

1. Mengetahui perbandingan laju perambatan retak fatik secara eskperimen dan secara simulasi dengan metode numerik yang berbasis program CFD (simulasi menggunakan Ansys 19.2)
2. Mengetahui dampak laju perambatan retak serta sifat mekanik pada *stainless steel* 304 setelah melalui proses *hot dipping aluminium* dan perlakuan difusi.

1.3. Batasan Masalah

Berikut adalah batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. Rasio regangan ($R = 0,3$) dan beban maksimum $P_{\max} = 0,7 P_{\text{yield}}$
2. Uji fatik dalam temperatur ruang.
3. Analisa hasil semulasi hanya untuk pengujian perambatan retak fatk.
4. Material yang digunakan *Stainless Steel* 304 pada metode simulasi diasumsikan homogen dan isotropik.
5. Ukuran *meshing* yang digunakan pada bagian retakan sebesar 0,5 mm, sedangkan bagian di luar retakan dimeshing dengan ukuran 1 mm menggunakan *patch conforming method*.

1.4. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan pada tesis ini yaitu:

I. PENDAHULUAN

Memuat tentang latar belakang yang menjadi dasar penelitian ini dilakukan, lalu berisikan tujuan penelitian, beberapa batasan masalah serta sistematika penulisan yang digunakan pada penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka memuat tentang baja tahan karat (*stainless steel*), kelelahan (*fatigue*), perambatan retak fatik, *hot dipping* dan penelitian terdahulu.

III. METODE PENELITIAN

Metode penelitian berisikan tempat penelitian seperti tempat pengujian tarik, pengujian perambatan retak fatik, uji SEM, uji OM, lalu bahan penelitian dan peralatan penelitian yang digunakan, prosedur pengujian seperti pemotongan spesimen sesuai ASTM E8 dan ASTM E647, proses *hot dipping aluminium* serta diagram alir pelaksanaan penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini memuat data hasil Simulasi dan Ekperimen Pertumbuhan Retak (FCGR) pada Stainless Steel 304 beserta pembahasan meliputi hasil uji OM dan SEM.

V. PENUTUP

Memuat kesimpulan dari tujuan tesis yang merujuk pada data hasil dan pembahasan pada tesis ini serta beberapa saran untuk penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Memuat literatur berupa identitas jurnal, buku, dll yang digunakan oleh penulis untuk membantu dalam penyelesaian tesis ini.

LAMPIRAN

Berisikan tabel hasil data siklus dan panjang retak fatik lalu perhitungan da/dn secara manual serta data pelengkap pada laporan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Baja Tahan Karat (*Stainless Steel*)

Menurut Afshan. S dan Gradner (2013), baja tahan karat adalah baja paduan tinggi yang unsur pembentuknya memiliki lebih dari 10% wt, sehingga membentuk suatu logam baru yang mempunyai sifat atau karakteristik logam yang lebih baik. Adapun beberapa karakteristik dari baja tahan karat menurut Vaghani, M, Vanaswala dan Desai (2014) *stainless steel* yaitu memiliki bentuk baik, mudah dalam perawatan dan memiliki ketahanan korosi yang baik, kekuatan tinggi, kekakuan dan daktilitas, kemampuan las, tahan api yang baik dan dapat digunakan dibidang arsitektural dan aplikasi struktural. Selain itu menurut H. G. Simms, (2011), baja tahan karat berbentuk plat banyak digunakan pada bagian struktur kendaraan, tangki bahan bakar untuk rudal, pada konstruksi *shells* serta di bidang pertahanan dan nuklir. Hal tersebut dikarenakan *stainless steel* mempunyai ketahanan terhadap korosi yang baik pada lingkungan ekstrim seperti pada lingkungan yang dekat air laut. Sifat seperti itu dikarenakan *stainless steel* mengandung paduan besi, nikel, chromium dan beberapa kadar molybdenum didalamnya.

Menurut Barbara Rossi (2014) umumnya *stainless steel* mengandung besi dan lebih dari 10,5% chromium. Berikut adalah beberapa unsur yang terdapat pada *stainless steel* :

a. Chromium (Cr)

Chromium adalah salah satu unsur paling penting pada paduan. Hal tersebut dikarenakan Cr memiliki sifat ketahanan terhadap korosi yang sangat baik dan pada temperature tinggi, dapat meningkatkan ketahanan oksidasi. Selain itu, Jumlah unsur Cr pada *stainless steel* cukup tinggi yaitu 10,5%.

b. Nikel (Ni)

Nikel umumnya dapat meningkatkan duktilitas dan kekerasan pada paduan. Selain itu, nikel dapat mengurangi laju korosifitas pada lingkungan yang ekstrim. Dalam presipitasi pengerasan baja nikel juga digunakan untuk membentuk senyawa intermetalik yang digunakan untuk meningkatkan kekuatan baja Pada baja stainless martensitik, penambahan nikel dan sedikit karbon dapat meningkatkan kemampuan las.

c. Molibdenum (Mo)

Molibdenum secara signifikan dapat meningkatkan ketahanan korosi baik itu korosi yang bersifat menyeluruh maupun terlokalisasi pada satu tempat. Selain itu, molybdenum juga dapat meningkatkan kekuatan mekanik paduan. Pada baja stainless martensitik, molybdenum dapat meningkatkan kekerasan pada temperatur temper tinggi.

d. Silikon

Silikon dapat meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi, baik pada temperatur yang tinggi maupun rendah.

e. Karbon (C)

Sebagai pembentuk utama baja tahan karat austenitik, unsur karbon memiliki kemampuan meningkatkan kekuatan mekanik pada baja tahan karat.

f. Mangan (Mn)

Mangan umumnya digunakan pada stainless steel untuk meningkatkan duktilitas pada suhu tinggi. Hal itu memberikan efek terhadap stabilitas baja stainless ferit/austenit. Penambahan lebih dari 2% mangan pada paduan tidak memberikan efek yang baik pada paduan baik dari segi kekuatan dan keuletan paduan. Unsur mangan sangat penting pada baja stainless seri 2xx.

g. Tembaga (Cu)

Unsur *stainless steel* yang dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi saat di dalam larutan asam tertentu adalah tembaga. Selain itu, penambahan tembaga dapat mengurangi *work hardening* pada seri tertentu yang dapat meningkatkan kekuatan mekanik paduan.

h. Terdapat penambahan unsur penstabil karbida (niobium atau titanium) dan unsur karbon rendah yang saat proses sensitasi terjadi, dapat berfungsi menekan korosi batas butir pada material.

Stainless steel berdasarkan bentuk struktur kristal beserta jumlah unsur-unsur pembentuknya dibagi menjadi 4 kategori, meliputi:

a. Baja tahan karat martensitik

Baja tahan karat martensitik memiliki kandungan 12-15% kromium, 0,2-1% molybdenum serta karbon 0,1-1% (lebih banyak unsur karbonnya dibandingkan baja tahan karat feritik). Kombinasi ini bersifat feromagnetik. Sifat magnetnya tergantung pada kekuatan medan magnet yang diterapkan. Baja tahan karat martensitik akan menunjukkan sifat magnet permanen jika menjadi magnet selama proses pengerasannya. (Dutta, S.K., 2018). Baja tahan karat martensitik memiliki seri *grade 400* dan umumnya banyak digunakan sebagai bahan pembuat alat makan, *sport knives* dan alat perkakas. (Shin-Ichi Teraoka, Masahiro Fukuda, *et al*, 2010).

b. Baja tahan karat ferritik

Baja tahan karat feritik memiliki struktur mikro yang mirip dengan baja karbon dengan komposisi kromium antara 10,5% dan 27% serta memiliki sedikit atau tanpa nikel (Dutta, S.K., 2018). Beberapa tipe baja memiliki komposisi berupa unsur aluminium, titanium, molybdenum, niobium dan silikon. Lalu terdapat penambahan unsur sulfur yang dapat memperbaiki sifat mampu mesin. Baja dengan panduan ini, merupakan feromagnetik yang memiliki sifat ulet dan mampu bentuk yang baik, akan tetapi kekuatan/*strength* baja ini pada suhu/temperatur tinggi lebih rendah jika

dibandingkan dengan baja tahan karat *stainless* austenitik. Perlakuan panaspun tidak dapat mengeraskan kandungan karbon rendah pada baja ferritik.

Tingkat kekerasan pada beberapa tipe baja *stainless* ferritik, dapat ditingkatkan melalui cara pelapisan celup cepat. Metode ini adalah metode pencelupan material secara cepat pada suhu/temperatur yang tinggi lalu didinginkan dalam suhu/temperatur ruang. Keuletan, ketahanan korosi serta sifat mampu lasnya ditingkatkan dengan mengatur kandungan tertentu nitrogen dan unsur karbon. (Seitovirta, Mika. 2013). Tipe baja ini sering digunakan sebagai bahan peralatan memasak, *trim* dan pembuat knalpot.

c. Baja tahan karat dupleks

Baja tahan karat dupleks merupakan baja *stainless* yang memiliki mikrostruktur paduan dari austenit dan ferit (50/50). Selain itu, baja *stainless* dupleks memiliki kandungan kromium yang cukup tinggi antara 19-32%, kandungan nikel yang lebih rendah dibandingkan baja tahan karat austenitik dan kandungan molibdenum hingga 5% (Dutta, S.K., 2018). Baja *stainless* dupleks memiliki kemampuan ketahanan terhadap korosi yang hampir sama dengan baja *stainless* austenitik. Kelebihannya yaitu nilai luluh serta tegangan tarik yang lebih tinggi dan ketahanan terhadap korosi retak tegang yang lebih baik dari pada baja *stainless* austenitik. (Seitovirta, Mika. 2013).

d. Baja tahan karat austenitik

Baja tahan karat austenitik yaitu termasuk dalam baja paduan, yang mengandung nikel antara 14 sampai 25%, besi, kromium 17 sampai 25%, dan nitrogen. Baja austenitik termasuk baja paduan dengan struktur kristal *Face Centered Cubic* (FCC) dan berbasis ferrous. Jika unsur nikel dalam paduan diganti mangan (Mn), maka struktur kristal akan tetap berfasa austenitik karena kedua unsur merupakan penstabil fasa austenit. Fasa austenitik tidak akan berubah dilakukan perlakuan panas (*annealing*), lalu didinginkan pada temperatur ruang. Baja ini tidak dapat dikeraskan melalui perlakuan celup

cepat. Pada dasarnya, jenis baja ini dapat menjaga sifat asutenitik pada temperatur ruang, memiliki ketahanan korosi yang baik dan lebih bersifat ulet dibandingkan baja tahan karat martensit dan ferritik (Dutta, S.K., 2018).

Baja tahan karat austenitik memiliki sifat mekanik yang baik, dapat digunakan pada lingkungan yang bersuhu tinggi dan bersifat *cryogenic*. Material ini hanya bisa dikeraskan melalui pengerjaan dingin. Material ini *Stainless steel* dibagi menjadi 2 tipe yaitu tipe/seri 200 dan 300. Untuk tipe 2xx mengandung mangan antara 4-15,5%, kandungan nikel 7% dan nitrogen. Tipe 3xx memiliki kandungan mangan maksimal 2%wt dan mengandung unsur nikel tinggi. Unsur aluminium, tembaga, titanium, niobium, molybdenum dan silicon serta penambahan karakter material tertentu yang mampu meningkatkan ketahanan oksidasi atau korosi. Sifat mampu mesin juga dapat diperbaiki dengan penambahan unsur sulfur pada tipe tertentu. Salah satu *stainless steel* austenitik yaitu *stainless steel* 304. SS304 merupakan baja yang memiliki sifat ketahanan terhadap korosi yang baik dan memiliki struktur kubus satuan bidang atau *face center cubic* (FCC). Unsur-unsur pepadu yang terkandung dalam baja/ SS304 akan menentukan kemampuan ketahanan korosi dan sifat mekaniknya.

1. *Stainless steel* 304

Stainless steel 304 memiliki kandungan sekitar 18-20% chromium dan 8%-10% nikel (Dutta, S.K., 2018). SS 304 memiliki sifat ketahanan terhadap korosi yang baik sehingga baja 304 ini sering digunakan pada kondisi yang ekstrim seperti bahan pembuat tabung baja *stainless* pada kondensor pembangkit listrik (Liang, L., Yiqiong, P., *et al*, 2013), cocok untuk pengelasan dan sebagai reaktor bejana tekan pada pembangkit listrik.

2.2. Kelelahan (*Fatigue*)

Kelelahan (*fatigue*) adalah kondisi logam/material dimana terjadinya kerusakan atau patah yang disebabkan oleh fluktuasi tegangan yang bekerja dengan terus menerus dibawah kekuatan tariknya. Tegangan kerja yang terjadi dapat berupa lentur (*bending*), punter (*twisting*) dan tegangan aksial. Secara umum, fluktuasi tersebut dibagi menjadi dua tipe utama yaitu fluktuasi tegangan dengan amplitudo konstan dan bervariasi (*random*). (Harkali, 2013).

Kegagalan *fatigue* diawali munculnya *crack*/retakan kecil yang terdapat pada material, retakan dapat terjadi pada permukaan/ daerah yang paling rentan dan lemah, lalu retakan menjalar dan tumbuh hingga batas kritisnya. Selain itu, fatik memiliki tingkat kepekaan yang tinggi terhadap kondisi permukaan benda. Hal itu dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu adanya tegangan sisa pada permukaan, kekasaran permukaan, serta perubahan sifat-sifat pada permukaan (Dieter,1992).

Tiga proses/ tahapan kegagalan fatik/ *failure*, meliputi *crack initiation* (pengintian retak), *crack growth* (perambatan retak) dan *fracture* (patah/ kegagalan) yang terjadi secara tiba-tiba disebabkan adanya pertumbuhan retakan/ *crack* yang tidak stabil. Tiga proses/ tahapan kegagalan fatik yaitu: (Timing, 1998)

1. *Crack Initiation* (pengintian retak)

Crack initiation adalah proses awal terjadinya perambatan retak. Sebab utama terjadinya perambatan retak adalah fatik. Awal retakan biasanya terjadi pada permukaan/ daerah yang paling rentan dan lemah akibat adanya pembebanan siklik/ beban berulang. Pada proses ini terjadi konsentrasi tegangan (seperti adanya goresan, lubang-pits, notch dll).

2. *Crack propagation* (Perambatan Retak)

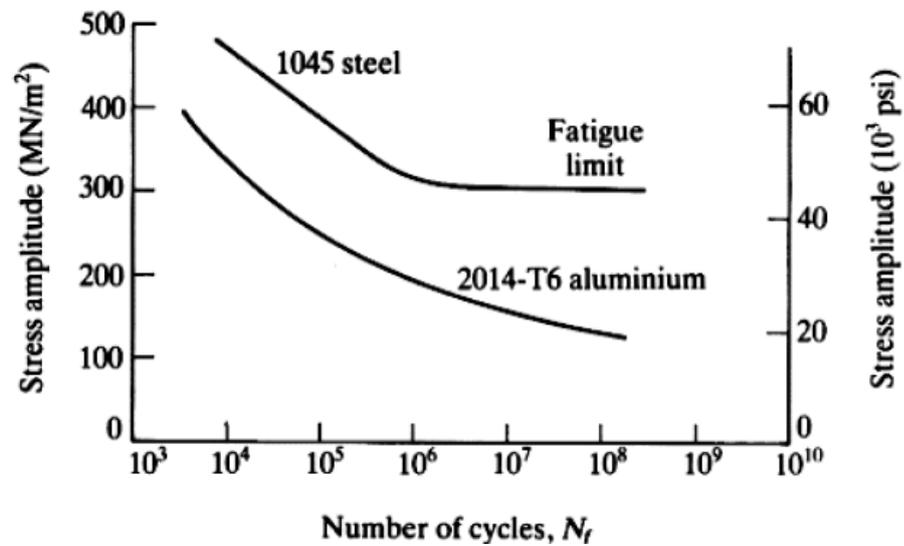
Perambatan retak yaitu tahapan kedua setelah terjadinya pengintian retak, dimana retakan tumbuh hingga mencapai batas kritisnya. Laju perambatan retak fatik merupakan fungsi dari factor iintensitas tegangan (K). Retakan

awal muncul dari permukaan/daerah yang lemah lalu retakan menjalar seiring dengan siklus pembebannanya. *Initiation Crack* ini berkembang menjadi *micro crack growth*, lalu gabungan dari *micro crack* ini membentuk *macro crack* yang akan mengakibatkan *fracture/ patah*.

3. *Fracture* (Patah)

Fracture yaitu tahap terakhir pada proses kerusakan atau kegagalan pada struktur saat terjadi pembebanan, sehingga benda/ material uji menjadi patah permanen. Pada tahapan ini, penjalaran retak yang terjadi sangat cepat sehingga mengakibatkan benda/ spesimen uji akan patah, lalu menjadi dua bagian. Proses perambatan retak yang sangat cepat tadi disebut juga *fast fracture*. Ketika terjadi penjalaran retak, penampang pada bagian tersebut akan berkurang sehingga bagian tersebut tidak mampu menahan beban dan menyebabkan specimen uji patah. Selain itu, specimen uji mengalami siklus tegangan dan regangan saat proses perambatan retak.

Kekasaran dan ketidakraturan pada permukaan benda dapat menyebabkan ketahanan fatik benda lebih rendah dibandingkan dengan permukaan benda yang lebih halus. Dalam beberapa kasus pelapisan seperti pelapisan dengan krom (*chromizing*), dilaporkan kekuatan fatik benda dengan perlakuan pelapisan menjadi lebih rendah dibandingkan dengan material tanpa pelapisan (Collins, 1993). Penyajian data fatik menggunakan kurva S-N. Kurva S-N menggambarkan hubungan tegangan (S) terhadap jumlah siklus (N) hingga terjadi kegagalan (*failure*). Dimana pada kurva S-N, nilai tegangan maksimum yang dibutuhkan untuk merambatkan retak akan semakin menurun hingga siklus (N) benda mengalami perpatahan. Pembuatan Kurva S-N dengan menggunakan skala semi log seperti ditunjukkan pada gambar 1.



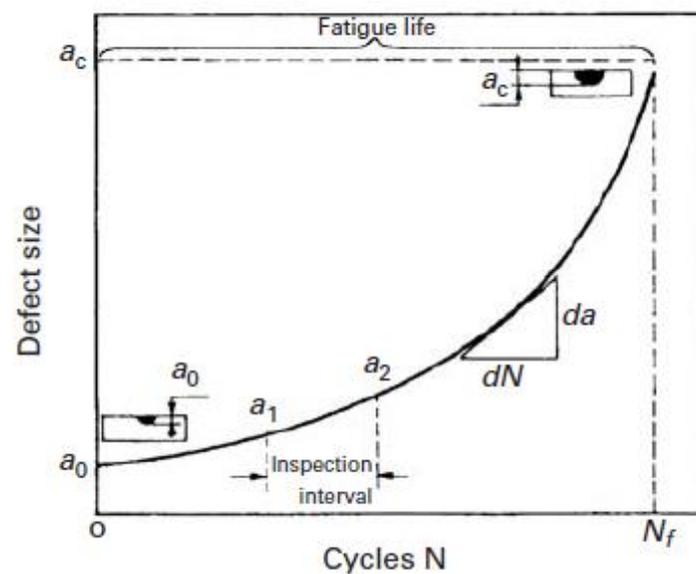
Gambar 1. Kurva S-N

(Sumber: Dieter,1992)

Pada kurva diatas siklus yang digunakan skala logaritma. Batas ketahanan fatik (*endurance limit*) baja ditentukan pada jumlah siklus $N > 10^7$. (Dieter,1992).

1. Perambatan Retak Fatik

Perambatan retak fatik adalah perambatan retak yang diakibatkan pembebanan siklik. Berikut adalah plot yang menunjukkan laju perambatan retak.

Gambar 2. Skematika panjang retak sebagai fungsi jumlah siklus (N)

(Meyers, M.,A., Chawla, K., K., 2008)

Ukuran retak, a , ditampilkan sebagai fungsi dari siklus, N , dari beban yang diterapkan. Tingkat pertumbuhan retak adalah da/dN dan merupakan kemiringan sesaat dari kurva pertumbuhan retak. Perhatikan bahwa retakan awalnya tumbuh sangat lambat, tetapi pertumbuhannya semakin cepat seiring dengan bertambahnya ukuran retakan yaitu da/dN meningkat. Alasan percepatan pertumbuhan ini adalah karena laju pertumbuhan tergantung pada faktor intensitas tegangan pada ujung retak, dan faktor intensitas tegangan tergantung pada ukuran retakan, a . Saat retakan tumbuh, faktor intensitas tegangan meningkat, yang mengarah pada pertumbuhan yang lebih cepat. Retakan tumbuh hingga mencapai ukuran kritis dan terjadi kegagalan. Perambatan retak fatik dapat dihitung pendekatannya dengan menggunakan persamaan Paris (Meyers, M.,A., Chawla, K., K., 2008), yaitu sebagai berikut:

$$da/dN = C (\Delta K)^m \dots\dots\dots (1)$$

dimana:

C = Konstanta Material/ Benda

ΔK = Selisih faktor intensitas tegangan

m = Nilai Eksponensial (*Weibull Modulus*)

Retakan dimulai dari daerah yang paling lemah atau daerah yang mengalami pemusatan konsentrasi tegangan sehingga retakan berkembang bersamaan dengan berjalannya siklus pembebanan. Saat dilakukan pengujian perambatan retak fatik, perambatan retak dapat diukur dengan alat ultrasonik, secara visual dapat diukur menggunakan alat teleskop dan dapat juga diukur dengan alat pengubah resistivitas listrik. Pertumbuhan retak merupakan perubahan panjang retak terhadap siklus. Panjang retak (a) dapat diplot dengan siklus N , maka da/dN dievaluasi pada suatu panjang retak, kemudian ΔK untuk panjang retak tersebut.

Dapat diasumsikan bahwa panjang retak (a) pada suatu panjang konstan serta hanya tegangan yang dapat bervariasi. Hal tersebut dapat ditunjukkan untuk suatu kalibrasi K sederhana (Meyers, M.,A., Chawla, K., K., 2008):

$$K = Y \sigma \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (3)$$

dimana :

Y = Faktor geometri spesimen

$\Delta \sigma$ = Selisih antara tegangan maksimum dan minimum (MPa)

a = Panjang retak (mm)

2. Faktor yang Memengaruhi Kekuatan *Fatigue* (Kelelahan)

Kekuatan *fatigue* (lelah) pada material dapat dipengaruhi oleh beberapa hal, meliputi:

a. Faktor kelembapan lingkungan

Kelembapan lingkungan yang semakin tinggi, akan mengakibatkan terbentuknya pit korosi sehingga retakan pada permukaan benda dapat terjadi dan menyebabkan kegagalan/ kerusakan menjadi cepat.

b. Kualitas Permukaan

Kualitas permukaan meliputi kondisi permukaan benda, yaitu kekasaran pada permukaan benda yang menyebabkan konsentrasi *stress microscopic* sehingga dapat menurunkan ketahanan benda terhadap fatik.

c. Besar Butir

Ukuran butir sangat memengaruhi umur lelah benda, semakin kecil ukuran butir maka akan memperpanjang *fatigue life* benda tersebut.

d. Faktor suhu

Temperatur/ suhu tinggi pada lingkungan dapat menyebabkan molekul air yang terbentuk mengecil di atas permukaan baja sehingga mempercepat terjadinya reaksi oksidasi dan terbentuknya pit korosi dan berkembang lebih banyak. Pit korosi pada benda tadi yang menyebabkan retakan muncul dan tumbuh sehingga terjadinya kegagalan/ kerusakan.

e. Faktor tegangan sisa

Tegangan sisa yang ada pada permukaan benda disebabkan oleh proses manufaktur seperti pemotongan, pengelasan, pengecoran dan proses lainnya yang melibatkan deformasi dan panas yang mengakibatkan terbentuknya tegangan sisa. Tegangan sisa tersebut dapat mengakibatkan ketahanan fatik benda turun.

f. Tipe Material

Tipe material juga memiliki *Fatigue life* yang berbeda beda.

3. Pemodelan dengan menggunakan program Ansys

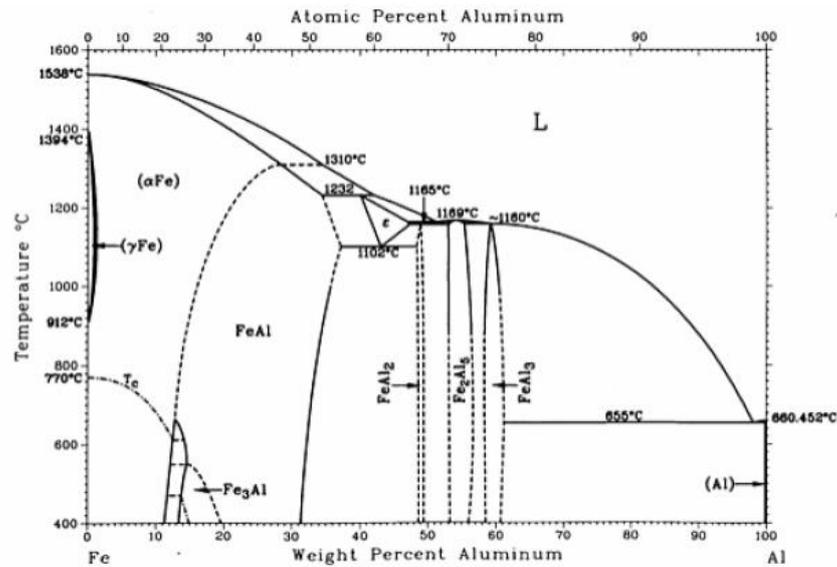
Salah satu perangkat lunak yang berbasis metode numerik/elemen hingga ialah *Ansys Workbench*. Ansys dapat digunakan untuk membuat simulasi struktur, *heat transfer*, akustik, dll. Selain itu ansys dapat digunakan untuk menganalisa masalah-masalah rekayasa (*engineering*) salah satunya yaitu dapat mensimulasikan perambatan retak fatik, lalu kemudian didapatkan nilai faktor intensitas tegangan yang akan digunakan saat memprediksi laju perambatan retak yang terjadi. Seperti penelitian Anky, dkk, 2019, yang melakukan penelitian menggunakan metode *SMART crack growth* guna menganalisa faktor intensitas tegangan serta usia siklus pada simulasi perambatan retak komponen poros.

2.3. *Hot Dipping* (Celup Panas)

Hot dipping atau celup panas merupakan proses teknik pelapisan logam dengan mencelupkan benda/ material ke tangki/ pot berisi logam yang terlebih dahulu dilebur dengan menggunakan energi panas dari proses pembakaran atau menggunakan termoelektrik. Pada proses *hot dipping* (celup panas), laju difusi atom pada logam besi dan aluminium akan meningkat ketika temperatur logam cair ditingkatkan, sehingga dapat meningkatkan ketebalan lapisan seiring meningkatnya temperatur logam cair lalu aluminium cair akan menyelimuti seluruh permukaan logam dan membentuk lapisan intermetalik dipermukaan (Serra, E., Glasbrenner, H., dkk, 1998).

Proses pelapisan hot-dip adalah metode yang menguntungkan karena memberikan perlindungan tinggi dengan biaya rendah. (Liang H-C, Wang C-J., 2018). Selain itu, hot-dip aluminium 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, serta dapat melindungi logam dari lingkungan korosif dengan terbentuknya lapisan pelindung aluminium oksida (Al_2O_3) pada permukaan logam. Lapisan ini mengontrol penetrasi luar elemen paduan, serta mencegah penetrasi bahan korosif ke dalam. (Targhi, V.,T., Omidvar, H., dkk, 2020).

Paduan Fe-Al sering diaplikasikan dikarenakan kombinasi yang baik dari sifat-sifat magnetik dan mekanik. Selain itu, paduan Fe-Al memiliki ketahanan terhadap korosi yang tinggi, ketahanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan besi, dan tidak mahal harganya. Disamping ketahanan oksidasi dan sulfidasi yang baik, besi alumunide dengan fase Fe_3Al dan fase Fe-Al banyak diaplikasikan sebagai material dengan temperatur tinggi dan ketahanannya meningkat seiring peningkatan temperatur selama masih dibawah temperatur 600°C . Akan tetapi, paduan ini kurang direkomendasikan digunakan sebagai material struktur karena sifat duktilitasnya kurang baik. Masalah ini dapat diselesaikan dengan proses termomekanik atau perlakuan permukaan, dan menambahkan chromium (Cr).



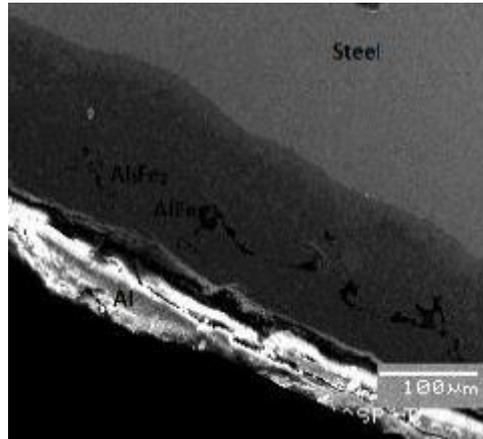
Gambar 3. Diagram Fasa Fe-Al (Kobayashi and Yakou, 2002)

2.4. Penelitian Terdahulu

Berikut adalah beberapa penelitian terdahulu yang membahas tentang perambatan retak fatik pada SS304 yang dilapisi dengan *hot dip aluminium* secara eksperimen maupun simulasi antara lain:

- a. Penelitian yang dilakukan Mukhtar, S., Asghar, W., *et al* (2018). Penelitian ini pelapisan aluminium menggunakan paduan Al-Si pada SS 316L dikarakterisasi dengan menggunakan mikroskop optik, EDS, indentasi nano dan teknik pengujian korosi. Proses HDA yang digunakan untuk melapisi spesimen SS 316L yaitu pada suhu 765 °C selama 2 menit waktu perendaman. Sebagian dari spesimen juga diperlakukan difusi dalam tanur Muffle pada suhu 550 °C selama 4 jam untuk menghasilkan spesimen SS 316L yang terdifusi. Uji struktur mikro menunjukkan terbentuknya lapisan rata/permukaan substrat akibat penambahan Si. Lalu dalam analisis EDS pembentukan intermetalik kompleks pada antarmuka lapisan/substrat menyebabkan peningkatan sifat kekerasan dan ketahanan korosi pada lapisan.

- b. Penelitian yang Mukhtar, S., Ahmad, T., *et al.* (2016). Penelitian ini SS316 dilapisi Aluminium Celup Panas pada suhu 765°C masing-masing selama 3 menit, 5 menit dan 7 menit. Lalu dilakukan pengujian mikro *hardness*, dimana kekerasan sampel pelapis baja ditemukan meningkat dari 292 Hv menjadi 385Hv. Berikut hasil SEM SS316 dengan HDA selama 5 menit.

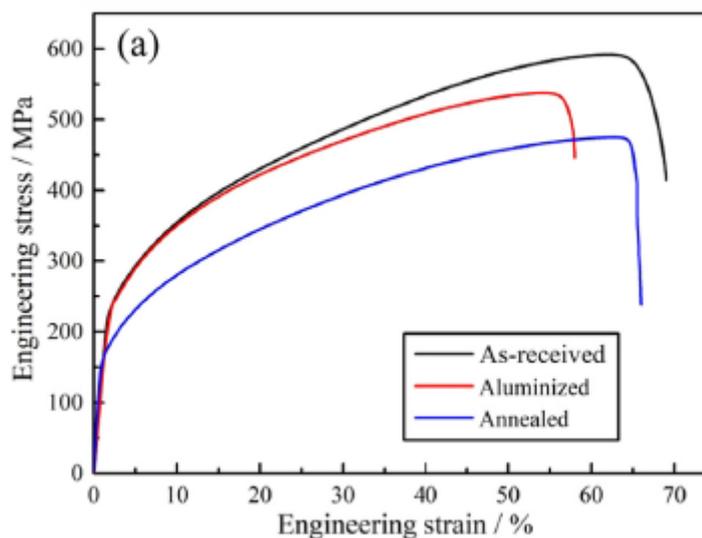


Gambar 4. Hasil SEM SS316 dengan HDA 5 menit

(Sumber: Jurnal dari Mukhtar, S., Ahmad, T., *et al.* (2016))

Dari gambar 4 diatas, dimana terlihat jelas lapisan aluminium dibagian bawah lalu ada lapisan Al_3Fe_2 dan $AlFe_3$ setelah itu lapisan substrat SS316.

- c. Lalu penelitian yang dilakukan Omar. A., et al (2010), SS 316L dilapisi dengan pencelupan panas ke dalam Al murni dan dua paduan Al-Si dengan kandungan 7%Si dan 11,5% Si pada waktu pencelupan bervariasi dari 1 hingga 60 menit dan suhu berkisar antara 750 hingga 900°C. Selanjutnya dilakukan pengujian mikro *hardness*, dimana penambahan Si mengurangi ketebalan lapisan intermetalik dan meningkatkan kekerasannya.
- d. Lalu penelitian yang dilakukan Wei Li, et al (2021), SS321 dilapisi aluminium celup panas pada suhu 500 °C hingga 950 °C lalu di *annealing* pada suhu 1050 °C untuk 1 jam. Lalu dihasilkan pengujian tarik sebagai berikut:



Gambar 5. Hasil Uji Tarik SS321

(Sumber: Penelitian dari Wei Li, et al (2021))

Pada gambar 5 menunjukkan menunjukkan kurva tegangan-regangan dari SS321 dimana didapat YS, UTS, EL dan RA dari baja aluminisasi yang lebih rendah dari baja yang diterima. Setelah anil, kekuatan ditekan saat EL dinaikkan.

- e. Penelitian yang dilakukan Setiawan, Ferry (2022), yaitu pengaruh variasi waktu proses *hot-dip* dengan aluminium sebagai pelapis SS304 terhadap karakteristik materialnya. Dimana SS304 dicelup dalam aluminium pada suhu 700°C selama 2, 4 dan 6 menit. Lalu dilakukan uji tarik dengan hasil kekuatan tarik SS304 tanpa HDA lebih besar yaitu 584 MPa dibandingkan SS304 dengan HDA yang tegangan tarik rata-rata yaitu 203 MPa.
- f. Selanjutnya, Fakhrizal, 2021, melakukan studi perbandingan perilaku *fatigue*/lelah pada baja *stainless* 316L dengan menggunakan metode eksperimen dan simulasi dengan hasil penyimpangan data uji kekuatan lelah dengan beban 6 kgf yaitu sebesar 8%.
- g. Lalu penelitian yang dilakukan oleh Berata, 2003, melakukan simulasi perambatan retak menggunakan ANSYS dengan penyimpangan terbesar 11,68% dengan eksperimental yang dilakukan Ziyi Chen dan Zhenyuan Cui (1988), sehingga penggunaan metode elemen hingga menggunakan ANSYS cukup valid dalam mensimulasikan perambatan retak fatik.

III. METODE PENELITIAN

3.1. Tempat Penelitian

Pengujian terhadap tarik dan perambatan retak fatik spesimen dilakukan di Laboratorium Material, Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Lalu untuk uji *Optical Microscope* dilakukan di Laboratorium Metalurgi ITB (Institut Teknologi Bandung) dan uji SEM dilakukan di Pusat Sains & Teknologi Bahan Maju Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan. Sedangkan pemodelan dan analisis dengan menggunakan *software Ansys* dilakukan di Institut Teknologi Sumatera.

3.2. Alat dan Bahan Penelitian

1. Alat Penelitian

Adapun alat yang dipakai untuk penelitian ini yaitu sebagai berikut:

a. Mesin MTS *Landmark* 100 kN

Fungsi Mesin MTS *Landmark* 100 kN yaitu sebagai mesin untuk menguji tarik statis dan uji perambatan retak fatik spesimen. *Max Load* atau beban maksimum Mesin MTS *Landmark* yaitu 100 kN.



Gambar 6. Mesin MTS *Landmark* 100 kN

b. Mikroskop *Digital Portable*

Mikroskop *digital portable* digunakan saat mengamati laju pertumbuhan serta perambatan retak fatik pada spesimen. Alat ini memiliki kemampuan hingga 100x perbesaran saat mengamati perambatan retak.



Gambar 7. Mikroskop *digital portable*

- c. SEM (*Scanning Elektron Microscope*)
Scanning Elektron Microscope (SEM) adalah alat yang untuk mengobservasi bentuk patahan pada permukaan baja setelah dilakukan uji perambatan retak fatik melalui penampang patahan spesimen uji.
- d. OM (*Optical Microscope*)
OM (*Optical Microscope*) digunakan untuk melihat dan mengamati morfologi bentuk perambatan retak pada penampang patahan spesimen uji.

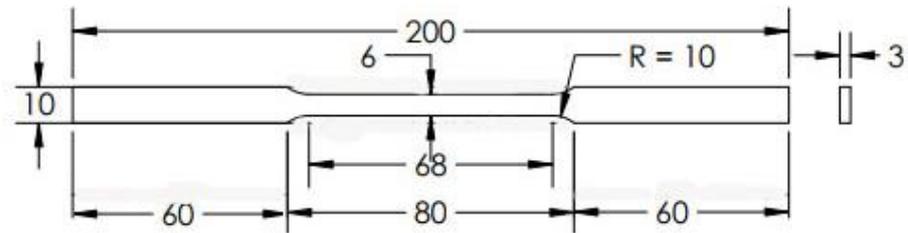
2. Bahan Penelitian

Beberapa bahan penelitian yang digunakan yaitu *Stainless Steel 304* berbentuk plat dibuat melalui proses pengerolan dingin. *Stainless steel 304* memiliki kadar chromium antara 18-20%.

3.3. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian meliputi tahapan-tahapan sejak awal persiapan spesimen yang diuji hingga bentuk-bentuk pengujian yang akan dilakukan, berikut adalah tahapan-tahapan prosedur penelitian:

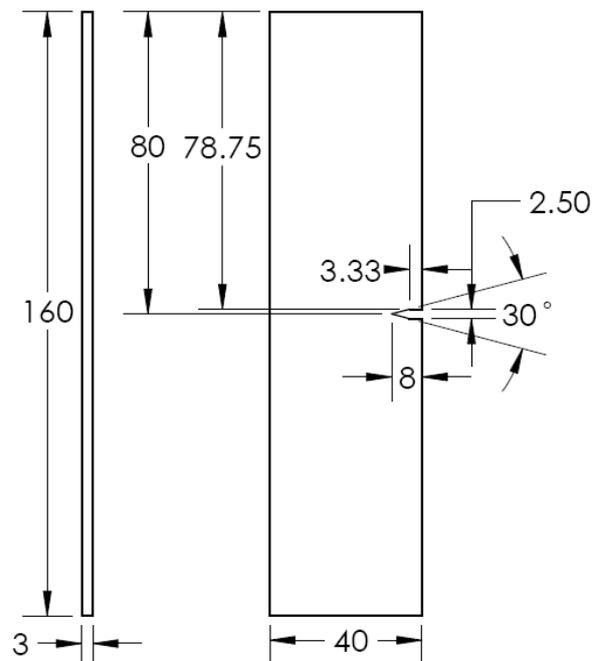
1. Persiapan Spesimen
Material atau bahan yang dipakai pada penelitian ini yaitu *stainless steel 304* dengan bentuk plat datar.
2. Pembuatan Spesimen Uji
Plat *stainless steel 304* memiliki ketebalan 3 mm, panjang plat 185 mm serta memiliki lebar 25 mm. Spesimen tersebut dibuat menjadi 2 bentuk yaitu spesimen uji tarik dan uji fatik.
 - a. Uji Tarik
Spesimen uji tarik dibentuk berdasarkan acuan standar ASTM E 8 (*Subsize Specimen*). Dimensi spesimen uji ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Spesimen uji tarik sesuai ASTM 8

b. Spesimen Uji Fatik

Spesimen uji fatik dibentuk berdasarkan acuan standar ASTM E 647. Dimensi spesimen uji fatik yaitu panjang 160 mm, lebar 40 mm, lalu panjang retak awal ($a_o = 8$ mm) dan ketebalan plat adalah 3 mm.



Gambar 9. Dimensi Spesimen Uji Fatik (ASTM E647, 2004)

3. *Hot Dipping* (Pelapisan celup panas)

Proses *hot dipping* adalah proses pencelupan *stainless steel* 304 kedalam *aluminium*. Berikut ini adalah tahapan-tahapan pelapisan celup panas:

a. *Cleaning*

Cleaning yaitu proses pembersihan pada permukaan logam dengan acetone dan etanol selama 4 menit menggunakan alat ultrasonik. Hal

tersebut bertujuan untuk menghilangkan kotoran yang terdapat pada permukaan logam.

b. *Pickling*

Pickling yaitu proses pembersihan permukaan logam menggunakan larutan kimia yaitu NaOH dan H₃PO₄ selama beberapa detik.

c. Netralisasi

Setelah dibersihkan dengan larutan kimia, spesimen kemudian dinetralisasi dengan cara dicelupkan ke dalam aquades sambil diputar-putar selama beberapa menit.

d. Fluksasi

Fluksasi yaitu proses pencelupan logam substrat selama beberapa menit ke dalam larutan fluks aluminium.

e. Pengeringan

Proses pengeringan dilakukan agar logam substrat yang telah dilapisi fluks lebih cepat mengering. Proses ini menggunakan *hair dryer*.

f. Pencelupan

Proses pencelupan yaitu mencelupkan *satinless steel* ke dalam aluminium cair dengan waktu tahan selama 2 menit dan temperatur 700 °C.

g. *Cooling*

Cooling yaitu spesimen dibiarkan hingga dingin dengan temperatur kamar. Proses pendinginan dilakukan setelah proses celup panas selesai.

4. Perlakuan 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.

5. Uji Tarik Statis

Pengujian tarik statis dilakukan untuk mendapatkan nilai tegangan luluh (σ_y) dan tegangan tarik *stainless steel* 304. Berikut adalah prosedur uji tarik statis pada *stainless steel* 304:

- a. Siapkan *stainless steel* 304 sesuai dengan standar ASTM E8.
- b. Buka program Controller 793B setelah itu klik *manual command*, pilih *displacement mode*, lalu naikan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
- c. Memasang spesimen pada *cross head grip* atas kemudian spesimen dicekam.
- d. Kemudian *cross head* diturunkan hingga ujung bawah spesimen masuk ke dalam grip bawah di kedalaman 3 cm.
- e. Klik *manual command* dan klik *control mood* ke *force*.
- f. Lalu klik *auto offset* untuk *force*. Setelah itu grip bagian bawah dicekam sehingga ujung spesimen bagian bawah tidak berubah.
- g. Memasang *extensometer* ke spesimen dengan posisi zero pin, dan klik *manual offset* untuk *extensometer*. Lalu lepaskan *zero* pin dari *extensometer*.
- h. Buka *Software MTS Test Suite* (MPE), lalu pilih *template* untuk uji tarik statis.
- i. Masukkan data tebal plat, Panjang serta lebar.
- j. Masukkan *initial speed* dan *secondary speed* (mm/s).
- k. Setelah data diinput selanjutnya klik RUN.

6. Uji Perambatan Retak Fatik

Berikut adalah prosedur uji perambatan retak fatik *stainless steel* 304:

- a. Siapkan spesimen uji yang sesuai dengan standar ASTM E 647.
- b. Buka program Controller 793B, kemudian klik *manual command*, pilih *displacement mode*. Setelah itu, naikan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
- c. Memasang spesimen uji pada *cross head grip* atas. Lalu spesimen uji dicekam.
- d. Selanjutnya *cross head* diturunkan hingga ujung bawah spesimen masuk ke dalam grip bawah di kedalaman 3 cm.

- e. Kemudian Klik *manual command* serta *control mood* ke *force*.
- f. Lalu klik *auto offset* untuk *force*. Selanjutnya grip bagian bawah dicekam hingga ujung spesimen bagian bawah tidak berubah.
- g. Buka *Software* MTS Test Suite (MPE), lalu pilih *template* untuk *high cycle fatigue testing*.
- h. Masukkan data P_{maks} dan P_{min} , siklus total, *incremental cycles* untuk mengatur stop mesin secara otomatis pada setiap jumlah siklus tertentu dengan tujuan agar retak dapat diamati/diukur dengan menggunakan mikroskop *digital portable*.
- i. Masukkan *initial speed* serta *secondary speed (mm/s)*.
- j. Setelah data diinput selanjutnya klik RUN.

3.4. Metode *Polynomial Incremental*

Untuk menghitung perambatan retak fatik menggunakan metode *polynomial incremental* sesuai ASTM E647. Metode ini dipakai untuk menghitung da/dN meliputi pas polinomial urutan kedua (parabola) ke rangkaian $(2n+1)$ titik data yang berurutan, di mana n biasanya 1,2,3 atau 4. Bentuk persamaannya ditunjukkan pada rumus berikut:

$$a_i = b_0 + b_1 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right) + b_2 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right)^2 \dots\dots\dots(4)$$

Dimana :

$$-1 \leq \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right) \leq +1 \dots\dots\dots(5)$$

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

$$\left(\frac{da}{dN} \right) d_i = \frac{*b_1}{C_2} + 2 b_2 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right)^2 \dots\dots\dots(6)$$

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 :

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.6 \alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \dots (7)$$

Dimana :

$$\alpha = \frac{a}{W} \dots \dots \dots (8)$$

3.5. Metode *SMART crack growth*

Simulasi perambatan retak fatik pada penelitian ini menggunakan metode *SMART Crack Growth* yang terdapat pada Ansys 19.2. Berikut adalah proses/ tahapan simulasi perambatan retak.

1. Pemodelan Geometri

Geometri benda didesain menggunakan Solidwork dengan dimensi berdasarkan standar ASTM E647. Dimensi benda ditunjukkan pada Gambar 7 dengan ketebalan untuk benda tanpa dan dengan lapisan pada Tabel 1. Ketebalan yang dipakai berdasarkan pengukuran pada spesimen uji eksperimen.

Tabel 1. Tebal spesimen uji

	Tanpa Perlakuan (SS304)	SS304 + Al	SS304 Difusi 1 Jam	SS304 Difusi 9 Jam	SS304 Difusi 49 Jam
Tebal setelah <i>Hot-dip</i> (mm)	-	3,04	3,11	3,14	3,13
Tebal sebelum <i>Hot-dip</i> (mm)	2,98	2,99	3,02	3,03	3,01

2. Material dasar yang digunakan adalah SS304. Material ini dilapisi oleh alumunium dan diberikan perlakuan difusi 1, 9, dan 49 jam sehingga menghasilkan sifat mekanik yang berbeda. Sifat mekanik berupa kekuatan tarik, kekuatan luluh dan young modulus yang diperoleh berdasarkan uji tarik. Dari data *young modulus* SS304, kita mendapatkan data *shear* dan *bulk modulus*. Berikut rumus yang dipakai pada program untuk mendapatkan nilai *shear modulus* (G):

$$E = 2G (1 + \nu) \dots\dots\dots(9)$$

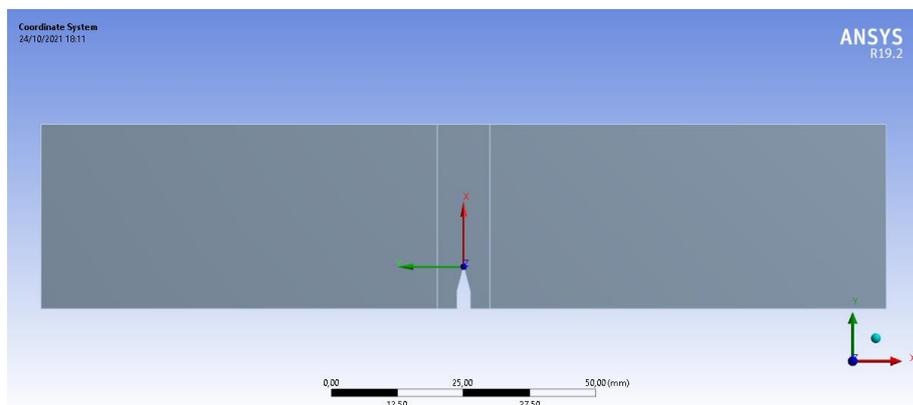
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots\dots\dots(10)$$

Lalu untuk nilai *bulk modulus* (K) dapat dicari dengan rumus:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \dots\dots\dots(11)$$

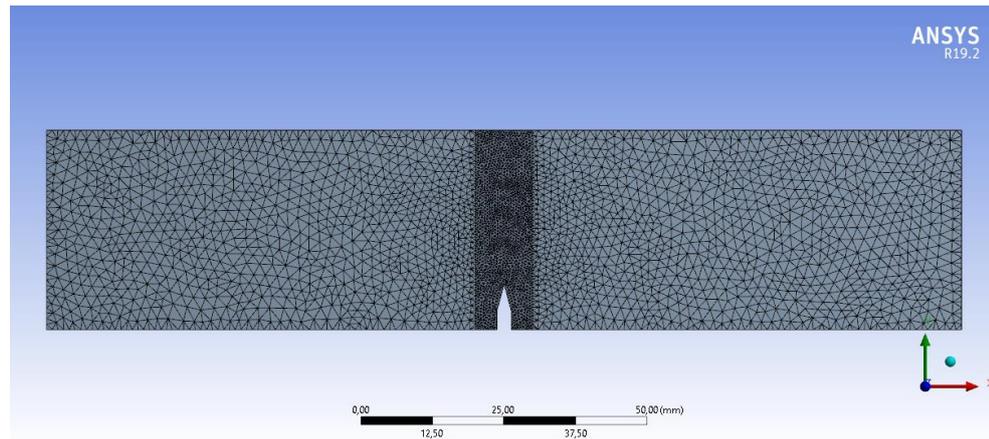
Lalu nilai C dan m yang merupakan konstanta Paris Law diperoleh dari uji kelelahan. Masukkan data tersebut ke dalam *Data Engineering*.

3. Kemudian Lokasi retakan pada spesimen didefinisikan oleh sistem koordinat. Sistem koordinat diletakkan pada ujung retakan dengan sumbu x sebagai arah retak dan sumbu y sebagai bidang retak (Gambar 10).

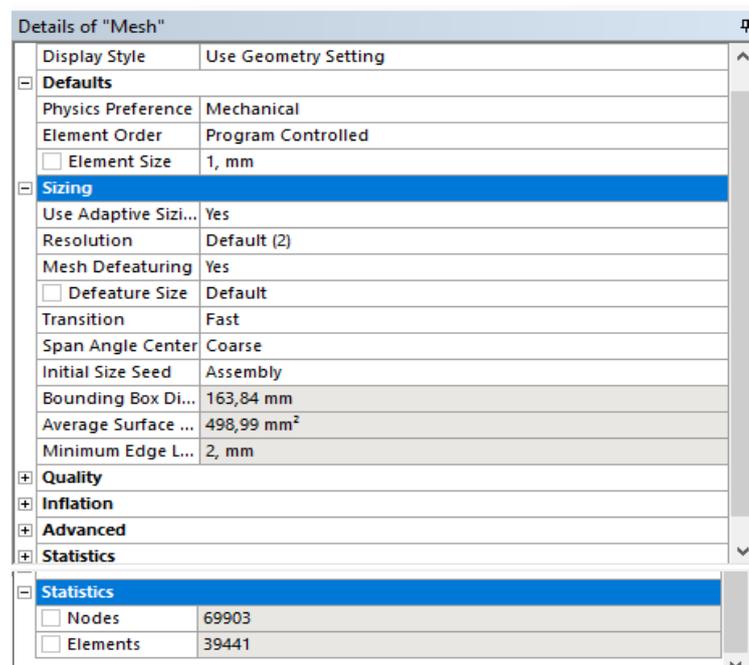


Gambar 10. Sistem koordinat pada retakan

4. Selanjutnya tentukan penggunaan *mesh*. Jenis *mesh* yang digunakan untuk simulasi adalah tetrahedron. Tetrahedron menghasilkan hasil yang lebih teliti dan akurat. Ukuran meshing pada bagian retakan sebesar 0,5 mm melalui menu *sizing*, sedangkan bagian di luar retakan dimeshing dengan ukuran 1 mm menggunakan *patch conforming method*.



Gambar 11. Benda yang telah dimesh



Gambar 12. Mesh setting

Details of "Patch Conforming Method" - Method	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Method	Tetrahedrons
Algorithm	Patch Conforming
Element Order	Use Global Setting

Gambar 13. *Patch conforming method*

Details of "Face Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	11 Faces
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	0,5 mm
Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Behavior	Soft

Gambar 14. *Face sizing*

5. Lalu pilih menu *fracture* pada ANSYS karena simulasi yang ingin dilakukan melibatkan retak yang mengarahkan pada perpatahan. Jenis retak yang dipilih adalah *pre-meshed crack*. *Pre-meshed crack* memiliki pengertian bahwa retak dibuat secara manual pada proses desain. Ujung retak dan bidang depan retak didefinisikan dengan nodes yang telah dibuat menggunakan *name selection*. Perkembangan atau pertumbuhan retak menggunakan *SMART crack growth*, dengan inisiasi retak *pre-meshed crack* dan memilih material yang telah diberikan konstanta paris law. Besarnya rasio pembebanan sebesar 0,3. Jumlah step diatur 16 agar retak dapat merambat pada menu Analysis Setting.

Details of "Pre-Meshed Crack" ⌵	
Scope	
Source	Pre-Meshed
Scoping Method	Named Selection
Crack Front (Named Selection)	Selection-Front
Crack Faces Nodes	On
--Top Face Nodes	Selection-Left
--Bottom Face Nodes	Selection-Right
Definition	
Coordinate System	Coordinate System
<input type="checkbox"/> Solution Contours	6
Symmetry	No
Suppressed	No

Gambar 15. Pre-meshed crack

Details of "SMART Crack Growth" ⌵	
Definition	
Analysis	Crack Growth
Method	SMART
Suppressed	No
Options for Crack Growth	
Initial Crack	Pre-Meshed Crack
Crack Growth Option	Fatigue
Failure Criteria Option	Material Data Table
Material	SS304 + Dif 49
Crack Growth Law	Paris Law
Crack Growth Methodology	Life Cycle Prediction
Min Increment of Crack Extension	Program Controlled
Max Increment of Crack Extension	Program Controlled
Stop At Max Crack Extension	None
<input type="checkbox"/> Stress To Load Ratio	0,

Gambar 16. SMART crack growth

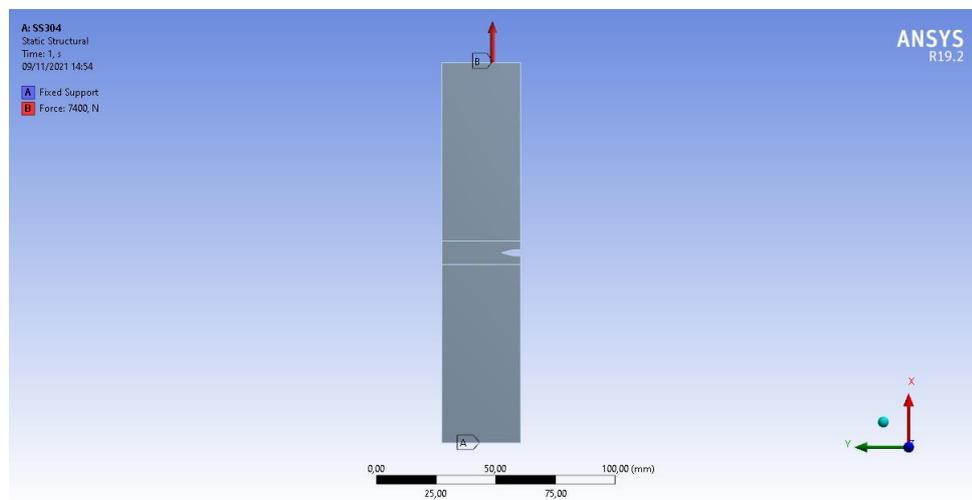
Details of "Analysis Settings" ⌵	
Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Off
Define By	Substeps
Number Of Substeps	16,
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
Rotordynamics Controls	
Restart Controls	
Fracture Controls	
Fracture	On
SIFS	Yes
J-Integral	No
Material Force	No

Gambar 17. Analysis setting

6. Kondisi batas pada simulasi ini berdasarkan pengujian *compact Spesimen* yang terdiri dari beban tunggal dan dua tumpuan (Gambar 18). Beban yang dipakai saat simulasi menggunakan beban maksimum saat eksperimen (P_{max}). dimana,

$$P = \sigma_{max} \times A \dots \dots \dots (12)$$

Besarnya beban untuk masing-masing perlakuan ditunjukkan pada Tabel 2.

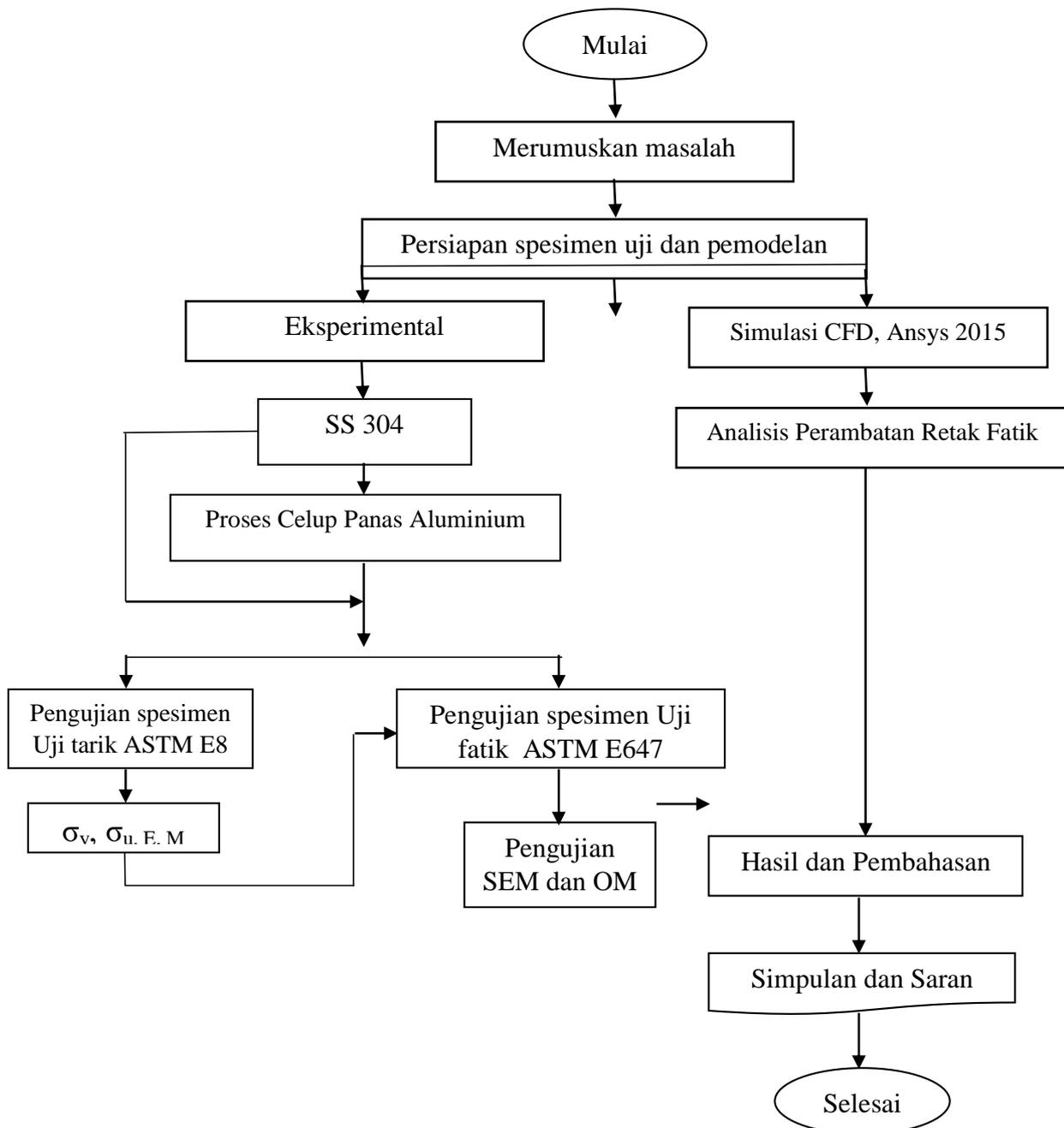


Gambar 18. Kondisi batas

Tabel 2. Beban

	Tanpa Perlakuan (SS304)	SS304 + Al	SS304 + Al + Difusi 1 Jam	SS304 + Al + Difusi 9 Jam	SS304 + Al + Difusi 49 Jam
Beban (kN)	7,4	8,05	8,157	8,455	8,324

3.6. Diagram Alir Penelitian



Gambar 19. Diagram Alir Penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Adapun simpulan dalam tesis ini yaitu sebagai berikut:

- a. Terdapat penyimpangan hasil laju perambatan retak fatik dengan metode simulasi dan metode eksperimen. Pada SS304 tanpa pelapisan terdapat penyimpangan pada siklus 16000 sebesar 0,9 mm. Lalu SS304 dengan lapis aluminium, penyimpangan nilai retakannya sebesar 0,24 mm pada siklus 8060 dengan panjang retak hasil simulasi yaitu 0,6414 mm, sedangkan pada data hasil eksperimen panjang retak di siklus 8000 yaitu 0,4 mm. Penyimpangan panjang retak SS304 difusi 1 jam, 9 jam dan 49 jam yaitu, 1,31 mm, 1,22 mm dan 1,022 mm. Penyimpangan terjadi disebabkan hasil laju perambatan retak Material SS304 lapis aluminium dan perlakuan difusi secara simulasi diasumsikan sebagai material yang homogen dan isotropik sedangkan secara eksperimen material SS304 memiliki ketebalan lapisan aluminium yang dapat memengaruhi laju perambatan retak fatiknya.
- b. Hasil laju perambatan retak fatik dengan menggunakan *software* ANSYS pada SS 304 dengan difusi 1 jam memiliki siklus terpendek yaitu pada data simulasi, panjang retakan yang terjadi selama 8778 hingga 24223 siklus yaitu 11,59 mm. Sedangkan untuk hasil eksperimen, retakan yang terjadi selama 5000 hingga 25300 siklus yaitu mencapai 11,27 mm. Lalu SS304 tanpa pelapisan memiliki siklus terpanjang yaitu, panjang retakan pada hasil simulasi yang terjadi selama 8103 hingga 35500 siklus yaitu mencapai 9,05 mm. Sedangkan pada data hasil eksperimen, panjang retakan yang terjadi selama 8700 hingga 43438 siklus yaitu mencapai 7,97 mm.

- c. Berdasarkan analisis laju perambatan retak fatik dan tegangan, pemberian perlakuan difusi pada SS304 memberikan dampak baik untuk umur kelelahan maupun tegangan untuk merambatkan retak.
- d. Kekuatan dan plastisitas SS304 terdegradasi oleh perlakuan aluminisasi. Setelah perlakuan difusi, SS304 menunjukkan keuletan yang lebih tinggi dan kekuatan yang lebih rendah yang dikaitkan dengan pertumbuhan butir dan pembentukan fase α .

5.2. Saran

Adapun saran yang disampaikan yaitu sebagai berikut:

- a. Pada pengujian ini hanya bisa dilakukan sampai 16 substeps sehingga untuk penelitian selanjutnya bisa dilakukan sejumlah siklus yang dilakukan secara eksperimen.
- b. Pada penelitian ini menggunakan ukuran meshing pada bagian retakan sebesar 0,5 mm, bisa diterapkan ukuran mesh lebih kecil namun membutuhkan spesifikasi komputer yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulnaser M. Alshoaibi, 2021. *Numerical Modeling of Crack Growth under Mixed-Mode Loading*. *Applied Science*. 2021, 11, 2975.
- Afshan, S and Gardner, L. 2013. *Experimental Study of Cold-Formed Ferritic Stainless Steel Hollow Sections*. American Society of Civil Engineers. 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000580.
- Anky, F., W., dkk. 2019. Analisa Faktor Intensitas Tegangan dan Usia Siklus pada Simulasi Perambatan Retak Komponen Poros Menggunakan Metode *Smart Crack Growth*. *JURNAL TEKNIK ITS* Vol. 8, No. 2, (2019) ISSN: 2337-3539.
- ASTM E647. 2004. *Metal Test Methods and Analytical Procedures*. Annual Book of STM Standard. Sec.3, Vol.03.01, pp.615-657, Bar Harbor Drive, West Conshohocken.
- ASTM E8. 2001. *Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials*. USA.
- 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.

- Collins, J.A. 1993. *Failure of Material in Mechanical Design, Analysis Prediction and Prevention*, John Willey & Son, Inc US. New York. United States of America.
- Dieter, George E. 1992. *Metalurgi Mekanik*. Jilid 1. Edisi ketiga. Alih bahasa oleh Sriati Djaprie, Erlangga, Jakarta.
- Dutta, S.K., 2018. *Different Types and New Applications of Stainless Steel*. Metallurgical & Materials Engineering Department. M. S. University of Baroda. Vadodara, India. Vol. 62 No. 5.
- Duyi 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.
- Fageehi, Y.A., 2021. Fatigue Crack Growth Analysis with Extended Finite Element for 3D Linear Elastic Material. *Journal of MDPI, Metals*. Pp. 1-14.
- 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.
- H. G. Simms, 2011. *Oxidation behaviour of austenitic stainless steels at high temperature in supercritical plant*. University of Birmingham.
- Hazmi, Sehon, dkk., 2021. Pengaruh Metode Hot Dipping Alumunizing Coating Pada Material Stainless Steel 304 Dalam Komponen Firewall Pesawat Cessna 150. *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine* (2021) 7(1) 132-139.

- Jian, D., et al. 2019. *Formation mechanism of multilayer aluminide coating on 316L stainless steel by low-temperature pack cementation*. *Surface & Coatings Technology* 375 (2019) 833–838
- 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
- Kobayashi, S and Yakou. T. 2002. *Control of Intermetallic Compound Layers at Interface Between Steel and Aluminum by Diffusion Treatment*. *Materials Science and Engineering*. Vol. 338, pp. 44-53.
- Liang, L., Yiqiong, P., et al. 2013. *Corrosion Of 304L Stainless Steel Tube in Power Plant Condenser*. School Of Energy and Mechanical Engineering Of Shanghai University of Electric Power. Shanghai, China. Vol. 448-453, pp 83-87.
- Mao, S, W., et al., 2010. *Microstructure of aluminized stainless steel 310 after annealing*. *Surface & Coatings Technology* 205 (2010) 533–539.
- Meyers, M.,A., Chawla, K., K., 2008. *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge University Press. New York. United States of America.
- Mukhtar, S., Asghar, W., et al. 2018. *Development and Characterization of Hot Dip Aluminide Coated Stainless Steel 316L*. *J. Cent. Suouth Univ*. Pp. 2578-2588.
- Mukhtar, S., Ahmad, T., et al. (2016). *The Effect Of Aluminum Coating On Stainless Steel 316l And Alpha Iron*. *Journal of Faculty of Engineering & Technology*. Pp. 09-17.

- Omar, A, A., et al. 2010. *Hot dip aluminizing of 316L stainless steel on aluminum and aluminum-silicon alloys*. Trade Science Inc. India. Pp. 142-149
- Rossi, Barbara. 2014. *Stainless Steel in structures in view of sustainability*. University Of Liege.
- Seitovirta, Mika. 2013. *Handbook of Stainless Steel*. Finland:Outkumpu
- Serra, E., Glasbrenner, H., dkk. 1998. *Hot-dip aluminium deposit as a permeation barrier for MANET steel*. Fusion Engineering and Design 41. Pp 149–155.
- Setiawan, Ferry. 2022. Pengaruh Variasi waktu Proses *Hot Dipping Aluminizing Coating Stainless Steel 304 Terhadap Karakteristik Material dan Konduktivitas Termal*. *Journal Of Mechanical Engineering, Manufactures, Materials And Energy*. Pp. 32-47
- Shin-Ichi Teraoka, Masahiro Fukuda, et al. 2010. *Development of NSSC® 420J1M-a Highly Corrosion-resistant Martensitic Stainless Steel for Cutlery*. Nippon Steel Technical Report No. 99
- Smith, Kevin L., Kutyan, Armen, et al. 2013. *Aluminide Coatings on 304 Stainless Steel*. California State Polytechnic University. United States of America.
- Timings, Roger Leslie. 1998. *Engineering Materials*. Jilid 1, edisi 2. Penerbit Longman Scientific & Technical. New York.
- Vaghani, Minakshi, Dr. S.A. Vasanwala, Dr. A.K. Desai. 2014. *Stainless Steel As A Structural Material: State Of Review*. Journal of Engineering Research and

Applications. ISSN: 2248-9622, Vol. 4, Issue 3(Version 1), March 2014, pp.657-662.

Wanga, S.P., Zhoua, L., *et al*, 2019. *Morphology Of Composite Coatings Formed On MoI Substrate Using Hot-Dip Aluminising And Micro-Arc Oxidation Techniques*. China. Pp. 1-9.

Wei Li, *et., al.*, 2021. *Microstructure and tensile properties of AISI 321 stainless steel with aluminizing and annealing treatment*. *Materials & Design* 205 (2021) 109729.