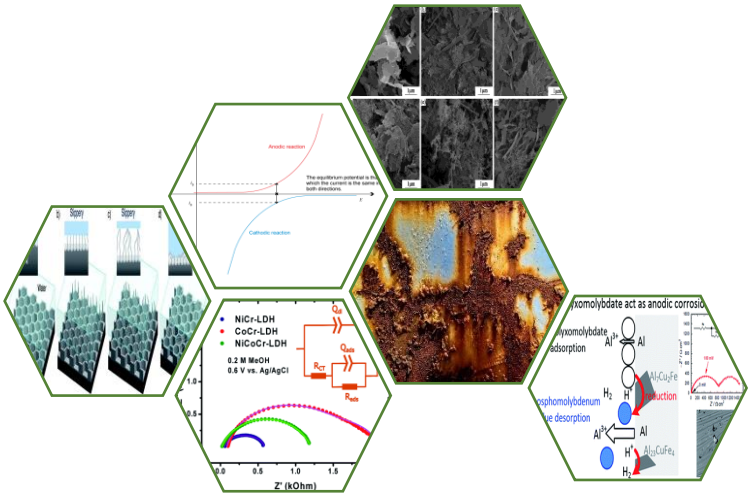
LAJU KOROSI DAN PERAMBATAN RETAK FATIK KOROSI ALUMINIUM PADUAN 2024 HASIL ANODIZING BSAA *(Boric Sulfat acid anodizing)* DENGAN PENAMBAHAN INHIBITOR MOLIBDAT

Corrosion Rate and Fatigue Crack Propagation Of Aluminium Alloy 2024 Resulting BSAA (Boric Sulphate Acid Anodizing) Anodizing With The Addition Of Molybdate Inhibitor



MUHAMMAD ZUCHRY M

D043191003

PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

DISERTASI

LAJU KOROSI DAN PERAMBATAN RETAK FATIK KOROSI ALUMINUIM PADUAN 2024 HASIL ANODIZING BSAA *(Boric Sulfat acid anodizing)* DENGAN PENAMBAHAN INHIBITOR MOLIBDAT

Corrosion Rate And Fatigue Crack Propagation Of Aluminium Alloy 2024 Resulting BSAA (Boric Sulphate Acid Anodizing) Anodizing With The Addition Of Molybdate Inhibitor

MUHAMMAD ZUCHRY M

D043191003

PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024

PENGAJUAN DISERTASI

LAJU KOROSI DAN PERAMBATAN RETAK FATIK KOROSI ALUMINIUM PADUAN 2024 HASIL ANODIZING BSAA *(Boric Sulfat acid anodizing)* DENGAN PENAMBAHAN INHIBITOR MOLIBDAT

Disertasi

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Doktor

Program studi Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

Muhammad Zuchry M

D043191003

Kepada

PROGRAM STUDI S3 ILMU TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024

LEMBAR PENGESAHAN

LAJU KOROSI DAN PERAMBATAN RETAK FATIK KOROSI ALUMINIUM PADUAN 2024 HASIL ANODIZING BSAA *(Boric Sulfat acid anodizing)* DENGAN PENAMBAHAN INHIBITOR MOLIBDAT

Disusun dan diajukan oleh

MUHAMMAD ZUCHRY M
NIM D043191003

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian Studi Program Doktor Teknik Mesin
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 26 November 2024

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Promotor

Prof. Dr. Ir. H. Ilyas Renreng, M.T.
NIP.195709141987031001.

Co-promotor 1

Dr. H. Hairul Arsyad, S.T., M.T.
NIP.197503222002121001

Co-promotor 2

Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, S.T., M.T.
NIP.197404151999031001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

Prof.Dr.Eng.Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., IPM., ASEAN.Eng.
NIP.197309262000121002

Ketua Program Studi
S3 Teknik Mesin

Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, S.T.,M.Sc.
NIP.197602162010121002

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI
DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi berjudul laju korosi dan perambatan retak fatik korosi aluminuim paduan 2024 hasil anodizing BSAA *(Boric Sulfat Acid Anodizing)* dengan penambahan inhibitor molibdat adalah benar karya saya dengan arahan dari tim pembimbing Prof.Dr. Ir. Ilyas Renreng ,MT sebagai promotor dan Dr. H. Hairul Arsyad, ST., MT. sebagai ko-promotor 1 serta Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT. sebagai ko-promotor 2. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Jurnal (Eastern-European Journal of interprise Technologi Volume 4 (6 (124)), 35–44. doi: 10.15587/1729-4061.2023.286351) sebagai artikel ldengan judul "Effect of anodizing on aluminum alloy 2024 with boric sulfate acid in medium 3.5 % NaCl". Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebahagian atau keseluruhan disertasi ini adalah orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin

Gowa, 26 November 2024

Muhammad Zuchry M
NIM D043191001

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur kehadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmat-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan disertasi Disertasi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor dalam bidang Teknik Material di Universitas hasanuddin.

Penelitian ini tidak akan terwujud tanpa dukungan dan bimbingan dari banyak pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, izinkan saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Ir. Ilyas Renreng M.T., selaku promotor, Dr. H. Hairul Arsyad selaku Ko promotor I dan Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma S.T., M.T., selaku Ko promotor II atas arahan, bimbingan, serta motivasi yang tiada henti selama proses penyusunan disertasi ini.
2. Prof. Dr Zulkifli Djafar S.T., M.T., Prof. Dr. Eng Andi Erwin Eka Putra S.T.,M.T., Dr. Muhammad Syahid S.T.,M.T., Azwar Hayat S.T.,M.Sc., Ph.D selaku tim penguji, atas masukan, kritik konstruktif, dan dukungan yang sangat berarti dalam penyempurnaan disertasi ini.
3. Rektor Universitas Hasanuddin, Dekan Fakultas Teknik, Ketua Departemen Teknik Mesin , dan Ketua Program Studi S3 Universitas Hasanuddin beserta seluruh staf pengajar di Program Studi Teknik Mesin yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan membantu selama masa studi saya.
4. Keluarga besar Mubarik Rasjid, atas doa, dukungan moral, dan materi yang tak ternilai harganya.
5. Teman-teman dan rekan-rekan seperjuangan, yang telah berbagi pengalaman, semangat, dan dukungan selama studi.

Saya menyadari bahwa disertasi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat saya harapkan untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga disertasi ini dapat memberikan kontribusi positif bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik Mesin,.

Terima kasih.

Makassar, 2024

Muhammad Zuchry M

ABSTRAK

MUHAMMAD ZUCHRY M. *Laju Korosi dan Perambatan Retak Fatik Korosi Aluminuim Paduan 2024 Hasil Anodizing BSAA (Boric Sulfat Acid Anodizing) dengan Penambahan Inhibitor Molibdat* (dibimbing oleh **Ilyas Renreng, Hairul Arsyad**, dan **Lukmanul Hakim Arma**)

Studi ini dilatar belakangi banyaknya penggunaan paduan aluminium 2024 pada industri dirgantara, namun aluminium 2024 rentan terhadap korosi. Disamping itu penyebab lain seperti lingkungan korosif jenis material dan tegangan statis juga berpengaruh terhadap korosi. Untuk memperbaiki sifat korosi tersebut diperlukan cara untuk menghambat laju korosi diantaranya dengan anodisasi dan penggunaan inhibitor. Penelitian ini bertujuan untuk (1) Menganalisis pengaruh anodisasi dengan penambahan inhibitor dalam menghambat laju korosi dan perambatan retak dalam larutan 3,5% NaCl. (2) Menganalisis pengaruh konsentrasi inhibitor dalam menghambat laju korosi dan perambatan retak dalam larutan 3,5% NaCl. Penelitian ini menggunakan paduan aluminium 2024 dengan proses anodisasi BSAA (Borat sulfat acid anodizing) menggunakan elektrolit asam sulfat 45 gr/l dan 8 gr/l asam boric, dengan *sealing* asam asetat 50 gr/l, tegangan (10, 15) Volt dan waktu anodisasi (10, 15, 20) menit kemudian dilakukan uji mekanik (kekerasan Vickers), kekasaran, uji mikro struktur (SEM-EDS), uji korosi dan uji perambatan retak fatik dalam media 3,5% NaCl.

Pengujian tahap I membandingkan hasil anodisasi BSAA tanpa dan menggunakan *sealing*, dengan SEM, uji kekerasan, uji kekasaran dan uji korosi. Tahap II dilakukan anodisasi BSAA dengan penambahan inhibitor molibdat kemudian dilakukan uji korosi dan perambatan retak dengan tanpa penambahan dan dengan penambahan inhibitor molibdat dan akan diperoleh effesiensi.

Dari hasil pengujian I diperoleh ketebalan lapisan oksida bertambah seiring bertambahnya waktu anodisasi dan penggunaan *sealing* dapat meningkatkan kekerasan dan menurunkan kekasaran serta laju korosi. Hasil pengujian II diperoleh laju korosi dan perambatan retak dengan anodisasi BSSA yang ditambahkan inhibitor molibdat dengan konsentrasi 0,3% ;0,5%; dan 0,7%, bahwa inhibitor dapat menurunkan laju korosi dan perambatan retak pada penambahan inhibitor molibdat 0,3 % dengan effesiensi optimum juga pada 0,3% sebesar 77%.

Kata kunci : Paduan aluminium 2024, laju korosi, perambaten retak, anodizing, elektrolit *boric sulfat* , inhibitor molibdat.

ABSTRACT

MUHAMMAD ZUCHRY M. Corrosion Rate and Fatigue Crack Propagation of 2024 Aluminum Alloy Anodized with BSAA (Boric Sulphate Acid Anodizing) with the Addition of Molybdate Inhibitor (supervised by Ilyas Renreng, Hairul Arsyad, and Lukmanul Hakim Arma)

This study is motivated by the widespread use of 2024 aluminum alloy in the aerospace industry, but 2024 aluminum is susceptible to corrosion. In addition, other causes such as corrosive environments, material types and static stress also affect corrosion. To improve the corrosion properties, a method is needed to inhibit the corrosion rate, including anodization and the use of inhibitors. This study aims to (1) Analyze the effect of anodization with the addition of inhibitors in inhibiting the corrosion rate and crack propagation in a 3.5% NaCl solution. (2) Analyze the effect of inhibitor concentration in inhibiting the corrosion rate and crack propagation in a 3.5% NaCl solution. This study used 2024 aluminum alloy with BSAA (Borate sulfate acid anodizing) process using 45 gr/l sulfuric acid electrolyte and 8 gr/l boric acid, with 50 gr/l acetic acid sealing, voltage (10, 15) Volts and anodization time (10, 15, 20) minutes then mechanical tests (Vickers hardness), roughness, microstructure test (SEM-EDS), corrosion test and fatigue crack propagation test in 3.5% NaCl media were carried out.

Phase I testing compared the results of BSAA anodization without and using sealing, with SEM, hardness test, roughness test and corrosion test. Phase II carried out BSAA anodization with the addition of molybdate inhibitor then corrosion and crack propagation tests were carried out without and with the addition of molybdate inhibitor and efficiency will be obtained.

From the results of test I, the thickness of the oxide layer increased with increasing anodization time and the use of sealing can increase hardness and reduce roughness and corrosion rate. The results of test II obtained the corrosion rate and crack propagation with BSSA anodization added with molybdate inhibitor with a concentration of 0.3%; 0.5%; and 0.7%, that the inhibitor can reduce the corrosion rate and crack propagation at the addition of 0.3% molybdate inhibitor with optimum efficiency also at 0.3% of 77%.

Keywords: Aluminum alloy 2024, corrosion rate, crack propagation, anodizing, boric sulfate electrolyte, molybdate inhibitor.

DAFTAR ISI

Sampul…….. i
Sampul Dalam……. ii
Pernyataan Keabsahan Disertasi…… iv
Ucapan Terima kasih…… v
Daftar Isi……... vi
Daftar Gambar…… vii
Daftar Tabel……. x
Abstrak…….. xi
Abstrack…… xii
Bab I Pendahuluan.
1.1. Latar Belakang……. 1
1.2. Rumusan Masalah…….. 6
1.3. Tujuan Penelitian……. 6
1.4 Batasan Masalah……. 7
1.4. Manfaat Penelitian…….. 7
Bab II Kerangka Konseptual Dan Hipotesis Penelitian…….. 8
2.1 Kerangka Konseptual……. 8
2.2 Hipotesa Penelitian……. 33
Bab 3 Topik Penelitian I
3.1 Abstrak…….. 34
3.2 Pendahuluan ……... 35
3.3 Metodologi Penelitian……. 36
3.4 Hasil dan pembahasan…… 46
3.6 Kesimpulan…….. 54
Daftar Pustaka……... 55
Bab IV Topik Penelitian II
4.1 Abstrak…….. 57
4.2 Pendahuluan…… 58
4.3 Metodologi Penelitian……. 63
4.4 Hasil dan pembahasan…….. 64
4.5 Kesimpulan…….. 72

Daftar Pustaka……... 73

Bab V Pembahasan Umum

5.1 Pembahasan Hasil penelitian Tahap I…… 74

5.2 Pembahasan Hasil penelitian Tahap I…… 75

Bab VI Kesimpulan dan Saran

6.1 Kesimpulan…….. 76

6.2 Saran…….. 76

Daftar Pustaka…… **77**

Lampiran

Daftar Gambar

Gambar 2.1	Distribusi material boing 777 …….	11
Gambar 2.2	Sel elektrokimia ……..	14
Gambar 2.3	Lapisan penghalang dan lapisan berpori …….	15
Gambar 2.4	Lapisan berpori …….	16
Gambar 2.5	Klasifikasi inhibitor secara kualitatif……	19
Gambar 2.6	Diagram *active-passive metal*……..	21
Gambar 2.7	Kurva polarisasi ditandai dengan adanya inhibitor katodik……	21
Gambar 2.8.a	Adsorpsi inhoibitor bermuatan negatif pada permukaan logam bermuatan positif……..	22
Gambar 2.8.b	Adsorpsi inhoibitor bermuatan positif tidak berinteraksi dengan permukaan logam bermuatan…….	22
Gambar 2.9	Efek konsentrasi terhadap inhibitor anodic pada laju korosi…….	22
Gambar 2.10	Potensial (v) terhadap log [i] atau *taffel plot* ……...	24
Gambar 2.11	Hubungan ketebalan material dan harga ketangguhan…….	27
Gambar 2.12	Skema kurva perambatan retak fatik…….	28
Gambar 2.13	Hubungan intensitas tegangan dengan laju pertumbuhan retak…..	29
Gambar 2.14	Skema fatik korosi……	29
Gambar 2.15	Karakteristik umum kurva lelah korosi ……..	31
Gambar 3.1	Asam sulfat (H_2SO_4)……	37
Gambar 3.2	Asam borak (H_3BO_3)……	37
Gambar 3.3	Deterjen murni/natrium karbonat (Na_2CO_3)……	38
Gambar 3.4	Asam cuka/asam asetat (CH_3CO_2H)……..	38
Gambar 3.5	Soda api……	38
Gambar 3.6	Air ro (*reverse osmosis*)……	39
Gambar 3.7	Power supply……	39
Gambar 3.8	Kabel penghantar……..	39
Gambar 3.9	Wadah pet……..	40
Gambar 3.10	Gelas ukur……	40
Gambar 3.11	Stopwatch……..	40
Gambar 3.12	Timbangan digital……	41

Gambar 3.13	Alat uji kekerasan……	41
Gambar 3.14	Alat uji korosi……	41
Gambar 3.15	Spesimen uji korosi……	42
Gambar 3.16	Posisi penekanan vickers……..	43
Gambar 3.17	Instrumen pengujian polarisasi……..	44
Gambar 3.18	Diagram alir penelitian i……	45
Gambar 3.19	Foto sem permukaan paduan aluminium 2024 (a) tanpa anodisasi, (b) dengan anodisasi……..	46
Gambar 3.20	Foto sem ketebalan lapisan oksida permukaan paduan aluminium 2024 (a) 10v -10 s (b) 10v -10 s……	47
Gambar 3.21	Hasil uji EDS anodisasi paduan aluminium 2024…….	48
Gambar 3.22	Hasil uji EDS aluminium oksida paduan aluminium 2024…….....	49
Gambar 3.23	Grafik uji kekerasan ……..	49
Gambar 3.24	Grafik uji kekasaran ……..	50
Gambar 3.25	Grafik laju korosi anodizing 10 v…….	52
Gambar 3.26	Grafik laju korosi anodizing 15 v……..	52
Gambar 3.27	Kurva polarisasi taffel 10 v…….	53
Gambar 3.28	Kurva polarisasi taffel 15 v…….	53
Gambar 4.1	Spesimen uji korosi……	61
Gambar 4.2	Spesimen uji rambat retak……	61
Gambar 4.3	Instrumen pengujian laju korosi ……..	62
Gambar 4.4	Alat uji perambatan retak fatik…….	62
Gambar 4.5	Diagram alir penelitian 2……..	63
Gambar 4.6	Laju korosi dengan penambahan inhibitor…….	64
Gambar 4.7	Effesiensi inhibitor……..	65
Gambar 4.8	Hubungan siklus dengan panjang retakan…….	66
Gambar 4.9	Laju perambatan retak pada aa 2024 dalam udara dan larutan nacl 3,5 % serta NaCl 3,5 % + inhibitor……..	68
Gambar 4.10	Diagram *Niquist plot*…….	70
Gambar 4.11	Daiagram *Bode plot*……..	71

Daftar Tabel

Tabel 2.1	Pengaruh variabel mekanikal, metalurgi dan lingkungan terhadap sifat fatik korosi……	29
Tabel 3.1	Komposisi paduan Aluminium 2024…….	37
Tabel 3.2	Karakterisasi komposisi Paduan aluminium 2024……..	46
Tabel 3.3	Hasil pengujian korosi tanpa inhibitor……...	51
Tabel 4.1	Hasil pengujian korosi dengan penambahan inhibitor……	64
Tabel 4.2	Effesiensi inhibitor……...	65
Tabel 4.3	Konstanta Paris……...	68
Tabel 4.4	Hasil pengujian EIS…….	70

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Penggunaan aluminium murni untuk struktur kurang diminati, karena memberikan ketahanan kekuatan yang rendah. Hal ini menyebabkan industri tidak menggunakan aluminium dalam bentuk murni tetapi dipadukan dengan unsur seperti silikon, magnesium, mangan, seng dan tembaga, untuk meningkatkan kinerja serta dapat memperbaiki dan meningkatkan sifat-sifat fisik dan mekaniknya (Stevenson, 1994). Pada industri dirgantara paduan aluminium telah banyak digunakan karena sifat mekaniknya yang unggul, seperti aluminium 2024 banyak digunakan untuk aplikasi pesawat pada struktur dan bagian bawah sayap karena kekuatannya yang tinggi terhadap rasio berat, tahan terhadap pertumbuhan retak fatik yang tinggi namun pada paduan aluminium 2024 (Al, Cu, Mg) dapat lebih mudah mengalami korosi dibandingkan aluminium murni (Moutarlier dkk, 2001) disebabkan adanya tembaga (Cu) yang menyebabkan sambungan galvanik mikro antara matriks paduan dan intermetalik dan berakibat pada kekuatan fatik. (Starke dan Staleyt, 1996); Heller dkk, (2010), dan Venugopal dkk, (2012).

Korosi paduan aluminium dapat juga disebabkan oleh lingkungan dimana dapat terjadi s*tress corrosion cracking* (SCC) dan *fatique corrosion* (FC), disamping penyebab lain seperti jenis material serta tegangan statis (Davis 2008). Untuk memperbaiki sifat korosi paduan aluminium dapat dilakukan beberapa cara diantaranya dengan anodisasi dan penggunaan inhibitor.

Anodisasi merupakan proses elektrolitik yang digunakan untuk menghasilkan lapisan oksida yang jauh lebih tebal (biasanya 8-25 μm) daripada yang diperoleh secara alami. Cree dan Weidmann, (1997). Proses anodisasi menghasilkan lapisan alumina amorf (acak), secara umum terdiri dari lapisan penghalang yang tipis dan daerah berpori yang lebih tebal dengan pori-pori linier membentang dari daerah penghalang ke lapisan permukaan berfungsi melindungi paduan aluminium terhadap korosi (Elabar dkk, 2017) dan (Hashimoto dkk, 2016).

M. Saeedikhani dkk, (2013) meneliti anodisasi untuk menghasilkan lapisan alumina pada permukaan untuk meningkatkan ketahanan korosi, dimana metode ini sudah diterima secara luas. Anodisasi biasanya dikaitkan dengan aluminium dan mengacu pada konversi lapisan permukaan aluminium membentuk aluminium oksida berpori. Anodisasi dapat dilakukan dengan berbagai jenis elektrolit, beragam kondisi

operasi termasuk konsentrasi, komposisi elektrolit, penambahan aditif, suhu, tegangan, dan arus listrik (Stevenson, 1994).

Du dkk,. (2012) meneliti pengaruh anodisasi terhadap ketahanan korosi. struktur mikro dan ketahanan korosi lapisan anodik asam borat/sulfat (BSAA) pada paduan aluminium 7050 menggunakan mikroskop gaya atom (AFM), spektroskopi impedansi elektrokimia (EIS) dan pemindaian probe Kelvin (SKP). Hasilnya menunjukkan bahwa asam borat tidak mengubah struktur lapisan penghalang lapisan anodik, tetapi secara signifikan akan mempengaruhi struktur lapisan berpori, akibatnya mempengaruhi ketahanan korosi dari lapisan anodik. Jika asam borat dalam elektrolit meningkat 0 hingga 8 gr/l, resistansi lapisan berpori (Rp) lapisan BSAA meningkat, kapasitansi lapisan berpori (CPEp) menurun, permukaan potensial bergerak secara positif, ukuran pori berkurang, dan ketahanan korosi meningkat. Sebaliknya potensi Rp, CPEp dan permukaan akan berubah dan berlawanan bila kandungan asam borat lebih dari 8 gr/l

Saeedikhani dkk, (2013) dan Domingues dkk, (2003) meneliti ketahanan korosi paduan aluminium 2024-T3 dengan anodisasi dalam elektrolit campuran yang mengandung asam sulfat 10%, asam borat 5% dan asam fosfat 2%. Anodisasi paduan aluminium 2024-T3 dalam asam sulfat/borat/fosfat memberikan ketahanan korosi dan daya tahan yang lebih baik dibandingkan dengan anodisasi dalam asam fosfat atau asam borat/sulfat. Elektrolit ini dapat menjadi alternatif yang cocok untuk menggantikan kromat yang umumnya digunakan pada anodisasi paduan aluminium.

Inhibitor merupakan zat yang ditambahkan pada lingkungan sehingga dapat menghambat atau memperlambat laju korosi. Inhibitor dapat berupa zat organik maupun anorganik dimana inhibitor jika ditambahkan akan membentuk lapisan tipis pada permukaan material sehingga berfungsi sebagai penghalang Roberge, (2008). Solusi inhibitor korosi sebagai sistem pelindung ini diterapkan di industri dirgantara meliputi pembentukan lapisan penghalang tinggi bersama-sama dengan komponen perlindungan aktif. Serdechnoval dkk., (2018); Moreto dkk, (2014); dan Fares dkk., (2015).

Molibdat pertama kali teridentifikasi digunakan secara praktis sebagai inhibitor korosi dan paling banyak digunakan secara luas karena kemampuan untuk melindungi besi dan logam *nonferrous* , serta toksisitasnya yang sangat rendah, sehingga relevan untuk digunakan dalam penghambatan korosi yang menekankan aspek lingkungan Vukasovich dan Farr, (1986). Inhibitor molibdat (MoO_4), juga banyak digunakan karena dapat memberikan dampak yang baik meskipun dalam konsentrasi yang rendah (Mu dkk, 2006). *Sodium molibdate* (Na_2MoO_4) merupakan inhibitor korosi yang tidak beracun dan ramah lingkungan untuk perlindungan sistem pendingin air, dan diklasifikasikan sebagai

inhibitor anodik, yang penggunaannya membutuhkan oksigen atau oksidator lain dalam larutan. Pencampuran dengan beberapa senyawa organik dapat meningkatkan sinergisme penghambatan. Molibdenum juga telah diteliti sebagai alternatif pengganti kromium pada beberapa aplikasi industri karena toksisitas kromium terkenal mempunyai efek dibanding molibdenum Diamantino dkk. (2000). (Li, Deng, dan Fu (2011) meneliti inhibitor molibdat terhadap efek penghambatan natrium molibdat (Na_2MoO_4) pada korosi aluminium dalam larutan 1,0 M H_3PO_4 menggunakan metode kehilangan berat, kurva polarisasi potensiodinamik dan impedansi elektrokimia spektroskopi (EIS), hasilnya menunjukkan bahwa Na_2MoO_4 merupakan inhibitor yang baik, dan efisiensi inhibisi yang diperoleh lebih tinggi pada 84% dan 20 mM, dan merupakan inhibitor anodik. Silva dkk, (2005) menjelaskan bahwa kromat dan molibdat pada paduan 2024 dan 7050 dengan menggunakan teknik elektrokimia, mikroskopis dan spektroskopi memiliki efek penghambat korosi, sedangkan tungstat meningkatkan pitting. Kurva polarisasi larutan menunjukkan bahwa molibdat memberikan penghambatan dalam pH larutan mendekati netral pada konsentrasi ambang 0,1 M. Efek terbesar adalah peningkatan 250 mV potensi kerusakan yang terkait dengan pitting dan penurunan 350 mV pada potensi sirkuit terbuka (OCP). Selain itu, impedansi elektrokimia menunjukkan bahwa mekanisme penghambatan korosi bergantung pada oksigen karena perlindungan yang diberikan menghasilkan jenis Mo (VI). Direkomendasikan bahwa penghambatan korosi AA2024-T3 oleh molibdat dapat terjadi setelah proses dua langkah dimana molibdat dengan cepat direduksi menjadi $MoO.(OH)^2$ melalui partikel intermetalik dan kemudian dioksidasi menjadi zat antara molibdenum oksida dengan bantuan oksigen Lopez dkk, (2014). García-rubio dkk, (2009), meneliti paduan aluminium 2024 T3 yang telah dianodisasi dalam media asam tartarat /sulfur yang mengandung natrium molibdat dan dianalisa dengan *salt spray*. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan natrium molibdat dalam anodisasi menghasilkan residu molibdat dan pori, serta meningkatkan ketahanan korosi. Moutarlier dkk, (2003) mempelajari efek penambahan molibdat dalam asam sulfat pada anodisasi paduan aluminium 2024 , dan hasilnya menunjukkan pada konsentrasi tinggi, pertumbuhan lapisan anodik meningkat dan ketahanan korosi meningkat secara signifikan. Moutarlier dkk,(2005) meneliti elektrolit yang terdiri dari asam sulfat dan inhibitor korosi (molibdat atau permanganat), hasil penelitian menunjukkan bahwa morfologi dan ketahanan korosi lapisan anodik yang terbentuk dalam asam sulfat dengan molibdat tetap tidak berubah. Sebaliknya, sifat morfologis dari lapisan anodik pada spesies permanganat dimodifikasi untuk mendukung kinerja korosi.

Anodisasi asam kromat (CAA) saat ini masih banyak digunakan untuk pencegahan korosi karena adanya senyawa kromium heksavalen (penghambat korosi yang efisien) dalam lapisan anodik Chaussumier dkk. (2013). Namun, CAA memiliki kelemahan fatal yaitu chromium VI merupakan polutan yang sangat toksik bagi lingkungan, sehingga tahun 2006, undang-undang lingkungan Uni Eropa (UE) telah melarang penggunaan senyawa kromium heksavalen dalam industri sehingga banyak peneliti secara bertahap memberikan perhatian yang lebih besar pada proses konversi non-Cr (VI) untuk membuat lapisan oksida.

Awal tahun 1990, para insinyur di *Boeing Company* mengembangkan *Boric Sulfuric Acid Anodization* (BSAA) sebagai pengganti anodisasi asam kromat Zhang dkk. (2008). Anodisasi ini dianggap ramah lingkungan dan memberikan ketahanan korosi yang tinggi. Dalam dua dekade terakhir, para peneliti melakukan sejumlah besar eksperimen untuk mengoptimalkan lapisan BSAA pada berbagai seri paduan Al (Ma dkk, 2008). Untuk mengubah tebal lapisan pada proses BSAA dilakukan dengan mengubah waktu anodisasi atau konsentrasi larutan. Secara teori, efek meningkatkan waktu anodising menyebabkan peningkatan ketebalan lapisan sampai kesetimbangan tercapai. Laju disolusi setara dengan laju pembentukan dan oksida tetap konstan, namun lapisan tebal dikaitkan dengan kinerja fatik yang buruk Cristian dan Tileagă, (2013).

Zhang dkk, (2013). Meneliti anodisasi asam sulfat / borat sebagai pengganti anodisasi asam kromat untuk komponen pesawat terbang, efek penambahan asam borat ke asam sulfat terhadap waktu, kepadatan, dan morfologi, dimana laju pertumbuhan lapisan anodik berpori terbentuk sesuai kondisi pada proses industri. Selanjutnya, laju disolusi lapisan ditentukan dari laju penipisan daerah penghalang dan lapisan berpori selama pencelupan dalam elektrolit. Pengamatan terhadap lapisan-lapisan anodik menunjukkan tidak ada perbedaan morfologi yang signifikan, seperti diameter pori stabil, kepadatan populasi pori, ketebalan lapisan penghalang, dan laju pertumbuhan serta disolusi lapisan yang terbentuk antara asam sulfat dan asam sulfat/borat. Selanjutnya, perilaku pitting dari substrat dalam media 3,5% natrium klorida adalah sama untuk lapisan yang dihasilkan pada dua jenis elektrolit tersebut.

Ketika komponen/material yang mengalami korosi terkena beban fatik, maka pembentukan dan pertumbuhan retak akan menjadi lebih cepat, sehingga mengurangi masa umur pemakaian Zamber dan Hillberry, (1999). Diperkirakan bahwa sebagian besar dari semua kerusakan pemakaian pada logam disebabkan oleh fatik. Fakta menunjukkan bahwa suatu material gagal setelah sejumlah siklus dan beberapa perubahan permanen terjadi di setiap siklus. Setiap siklus menghasilkan beberapa

deformasi plastis, meskipun mungkin sangat kecil Parkhutik dan Albella, (1989). Secara umum penelitian perlakuan anodisasi pada aluminium dan paduannya memiliki efek yang merugikan secara intrinsik pada umur fatik, dikaitkan dengan lapisan oksida yang rapuh dan berpori serta tegangan sisa yang diinduksi selama proses anodisasi Nie dkk, (2013). Al-Fattal dan Al-Rabii, (2016) mempelajari efek dari menggunakan proses anodisasi pada sifat mekanik serta umur fatik untuk paduan aluminium (2024-T3), Anodizing memiliki pengaruh terhadap kekerasan, kekasaran permukaan, ketebalan lapisan, laju korosi, sesuai dengan waktu anodisasi. Efek dari ketebalan lapisan anodizing belum terlihat pada amplitudo tegangan yang tinggi, tetapi terlihat pada amplitudo tegangan yang lebih rendah. Umur fatik AA 2024-T3 sedikit menurun setelah anodisasi dibandingkan dengan paduan tanpa perlakuan. Laju korosi berkurang pada paduan aluminium yang dianodisasi dibandingkan dengan tanpa perlakuan. Di bawah tegangan siklik tarik, lapisan anodik mudah retak dan inisiator retak fatik terjadi karena kerapuhan lapisan oksida, yang menghasilkan pengurangan umur fatik. (Shahzad dkk, 2010) meneliti umur fatik dari komponen mesin sangat bergantung pada kondisi permukaannya dan dalam kebanyakan kasus, kegagalan fatik dimulai pada permukaan, ini disebabkan permukaan yang terpapar oleh kondisi lingkungan yang parah dan menanggung beban terbesar. M. Saeedikhani dkk., (2013) Mempelajari proses anodisasi asam borat/sulfat/phosporik. Hasilnya menunjukkan bahwa struktur fisik lapisan dipengaruhi tidak hanya oleh elektrolit yang digunakan, tetapi juga dan terutama oleh substrat, yaitu 2024-T3 atau Al. Ketahanan korosi spesimen yang dianodisasi sesuai untuk aplikasi praktis, dan ketahanan fatiknya tidak jauh berbeda denngan anodisasi asam kromat. Chaudhuri dkk, (1992) melakukan Uji fatik korosi pada Al-Clad 2024, 2024 dan 6013 tanpa perlakuan. Hasilnya Al-clad 2024 memiliki ketahanan terhadap korosi dibandingkan 2024, dan 6013 tanpa perlakuan, kemudian 2024 tanpa perlakuan sedikit lebih baik daripada 6013 tanpa perlakuan. Uji fraktografi dan mikro menunjukkan bahwa lapisan pelindung Alclad 2024 memberikan perlindungan kepada logam dasar dari korosi, menghasilkan umur korosi yang lebih lama. Umur fatik korosi lebih rendah dari 6013 tanpa pelindung disebabkan karena korosi intergranular.

(Tu, Chen, dan Hwang 1990) meneliti perilaku fatik korosi (CF), pada kondisi defleksi konstan dalam bentuk tegangan pulsasi pada paduan aluminium 2024-T3 yang di anodising dalam larutan NaCl 3,5% dibandingkan dengan paduan tanpa anodisasi. Hasilnya Persamaan dan perbedaan variasi potensi korosi (Ecorr) selama proses CF ditemukan di antara keduanya, dimana Ecorr dapat digunakan menentukan sisa umur CF pada paduan ini atau paduan aluminium lainnya, terlepas apakah paduan tersebut

dianodisasi atau tidak. Lebih lanjut, temper T3 menghasilkan mikrostruktur yang dapat menghambat pembentukan retakan awal dan penetrasi pada proses CF dari paduan anodized, ini sebagian mengurangi efek negatif dari lapisan anodik yang mudah retak.

Proses anodisasi menghasilkan pori-pori yang dapat menyerap media korosif dan kontaminan di atmosfer, yang pada gilirannya mengurangi ketahanan korosi. Oleh karena itu, sealing setelah anodisasi diperlukan untuk menutup pori-pori dengan tujuan meningkatkan ketahanan korosi Wang dkk, (2015). Sealing secara tradisional telah dilakukan dengan perendaman dalam air deionisasi mendidih, metode yang dikenal sebagai sealing air panas. MC Garcia-Alonso dkk, (2001); Gonzalez JA dkk, (1997) ; Herrera H dkk, (2007) Suhu tinggi yang dibutuhkan dan kinetika lambat, bagaimanapun, menyiratkan konsumsi energi yang cukup besar. Lopez dkk, (1998) Akibatnya proses air panas secara bertahap digantikan sejak tahun 1980-an dengan sealing dingin. Gonzalez JA dkk, (1997). Sealing dikromat dan nikel asetat dianggap yang paling efektif metode sealing untuk pencegahan korosi Zuo Y dkk, (2003) Namun Cr(VI) diakui sebagai racun. Zhao ZM dkk, (2012) (Herrera H dkk, 2007) sejumlah sealing telah diusulkan untuk aplikasi sealing. Studi terbaru tentang sealing baru dan proses sealing termasuk asetat nikel dingin, Air panas, Potassium dichromate asam Stearic dan Nickel fluoride Zuo, Y. dkk, (2003); Herrera H dkk, (2007), Cr_2HAI_3, natrium asetat, Gonzalez JA dkk, (1997); Lopez dkk, (1998), cerium asetat, Zhao ZM dkk, (2012) serium nitrat dan yttrium sulfat, sol-gel, dan bahkan proses sealing yang mahal menggunakan polytetrafluroethylene (PTFE)

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang di atas maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan terkait dengan penelitian yang akan dilakukan :

1. Bagaimana pengaruh anodisasi dengan penambahan inhibitor dalam menghambat laju korosi dan perambatan retak fatik korosi paduan aluminium 2024.
2. Bagaimana pengaruh konsentrasi inhibitor dalam menghambat laju korosi dan perambatan retak fatik korosi paduan aluminium 2024.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Menganalisis pengaruh anodisasi dengan penambahan inhibitor dalam menghambat laju korosi dan perambatan retak fatik korosi paduan aluminium 2024.

2. Menganalisis pengaruh konsentrasi inhibitor dalam menghambat laju korosi dan perambatan retak fatik korosi paduan aluminium 2024.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat mencapai tujuaan yang diharapkan maka penulis memberi batasan pada :

1. Material yang digunakan adalah aluminium paduan 2024 berbentuk silinder ukuran diameter 12 mm dan tebal 3 mm.
2. Anodisasi menggunakan campuran elektrolit asam sulfat 45 g/l dan asam borik 8 g/l
3. Pengujian yang dilakukan berupa pengujian kekerasan menggunakan metode Vickers, pengujian kekasaran permukaan, pengujian laju korosi potensiodinamik menggunakan CS 300 merk EG & G Princeton applied research metode polarisasi tiga elektroda dan uji perambatan retak dengan inisiasi Centre Crack Tension (CCT) menggunakan standar ASTM E647 menggunakan mesin uji merk Landmark kapasitas 100 kN
4. Besar tegangan yang digunakan aadalah 10 dan 15 Volt dengan waktu pencelupan 10, 15 dan 20 menit menggunakan power supply DS 304M kapasitas 0-40 volt
5. Proses sealing dilakukan menggunakan asam asetat (CH_3CO_2H) atau Asam cuka

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan diperoleh dalam penelitian ini adalah :

1. Mendapatkan informasi ilmiah tentang penggunaan proses anodisasi dan inhibitor dalam menghambat laju korosi dan laju korosi dan perambatan retak fatik paduan aluminium 2024.
2. Menganalisis dan memperoleh informasi penggunaan elektrolit anodizing dan inhibitor yang optimal dalam menghambat laju korosi dan perambatan retak fatik
3. Memperoleh pengetahuan dalam rekayasa menghambat laju korosi dan perambatan retak fatik korosi aluminium untuk aplikasi industri dirgantara
4. Menunjang perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di Indonesia khususnya dan di dunia pada umumnya untuk aplikasi bahan teknik.

BAB II

KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS PENELITIAN

2.1. Kerangka konseptual

Pengertian Korosi

Korosi logam adalah proses kimia atau elektrokimia dimana atom dalam permukaan logam padat bereaksi dengan zat yang bersentuhan dengan logam pada permukaan terbuka yang dapat berupa zat cair, gas atau padatan (Davis 2008) .

Faktor yang berpengaruh pada proses korosi adalah :

1. Material

Dalam suatu peristiwa korosi, suatu material akan bersifat sebagai anoda. Anoda adalah suatu bagian dari suatu reaksi yang akan mengalami oksidasi. Akibat reaksi oksidasi, suatu logam akan kehilangan elektron, dan senyawa logam tersebut ion berubah menjadi ion-ion bebas.

2. Lingkungan

Dalam suatu peristiwa korosi, suatu lingkungan akan bersifat sebagai katoda. Katoda adalah suatu bagian dari rekasi yang akan mengalami reduksi. Akibat reaksi reduksi, lingkungan yang bersifat katoda akan membutuhkan elekron yang akan diambil dari anoda. Beberapa lingkungan yang dapat bersifat katoda adalah Lingkungan air, atmosfer, gas, mineral *acid*, tanah, dan minyak.

3. Reaksi antaramaterial dan lingkungan

Adanya reaksi antara suatu material dengan lingkungannya merupakan suatu persyaratan yang sangat penting dalam terjadinya suatu peristiwa korosi. Reaksi korosi hanya akan terjadi jika terdapathubungan atau kontak langsung antara material dan lingkungan. Akibat adanya hubungan tersebut, akan terjadi reaksi reduksi dan oksidasi yang berlangsung secara spontan.

4. Elektrolit

Untuk mendukung suatu reaksi reduksi dan oksidasi dan melengkapisirkuit elektrik, antara anoda dan katoda harus dilengkapi dengan elektrolit. Elektrolit menghantarkan listrik karena mengandung ion-ion yang mampu menghantarkan *elektroequivalen force* sehingga reaksi dapat berlangsung. Reaksi korosi logam melibatkan dua reaksi setengah sel, yaitu reaksioksidasi pada anoda dan reaksi

reduksi pada katoda. Reaksi katoda dan anoda yang terjadi dalam proses korosi adalah sebagai berikut (Vargel 2004) :

Anoda : $M \rightarrow M^{n+} + ne^-$

Katoda :

a. Evolusi hidrogen (asam) : $2H^+ + 2\ e^- \rightarrow H^2$

b. Reduksi air (netral/basa) : $H_2O + 2e^- \rightarrow H^2 + 2OH^-$

c. Reduksi oksigen (asam) : $O_2 + 4H^+ + 4\ e^- \rightarrow 2H_2O$

d. Reduksi oksigen (netral/basa) : $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

e. Reduksi ion logam : $M^{3+} + e^- \rightarrow M^{2+}$

Berbeda dengan aluminium, hasil korosi berupa Al_2O_3 membentuk lapisan yang melindungi lapisan logam dari korosi selanjutnya. Korosi secara keseluruhan merupakan proses elektrokimia.

$$Al(s) \rightarrow Al^{3+}(aq) + 3e^-$$

Elektron yang dibebaskan dalam oksidasi akan mengalir ke bagian lain untuk mereduksi oksigen.

$$Al + 3H^+ \rightarrow \frac{3}{2}H_3 \text{ atau}$$

$$Al + 3H_3O \rightarrow Al(OH)_3 + \frac{3}{2}\ H_3$$

Reaksi ini diiringi oleh suatu perubahan dalam bilangan oksidasi pada aluminium, dari O di dalam logam berubah menjadi bilangan oksidasi alumina (+3). Dengan pertukaran elektron, maka aluminium kehilangan tiga elektron yang diambil oleh $3H^+$. Korosi aluminium diperoleh dalam formasi alumina $Al(OH)_3$ yang tidak larut dalam air dan mengendap sebagai gel putih dimana di dalamnya ditemukan korosi sumuran sebagai kepingan gelatin putih (Vargel 2004).

Jenis-Jenis Korosi

Adapun korosi yang menyerang logam dapat diklasifikasikan beberapa jenis yaitu (Roberge 2008) :

1. Korosi Seragam (*Uniform attack*)

Korosi jenis ini sering terjadi pada konstruksi-konstruksi logam, biasanya dikategorikan menurut reaksi *electro-chemical* yang secara homogen terjadi karat keseluruh bagian material yang terbuka.

2. Korosi Lubang *(Pitting corrosion)*

Pitting corrosion adalah bentuk korosi yang terpusat pada satu titik dengan kedalaman tertentu yang dimulai dari korosi lokal.

3. Korosi Erosi (*Errosion Corrosion*)

Erosion corrosion adalah salah satu jenis korosi yang timbul dari reaksi serangan kombinasi kimia dan abrasi mekanik atau sebagai akibat dari gerakan fluida.

4. Korosi Sambungan Dua Logam (*Galvanis Corrosion*)

Korosi jenis ini terjadi apabila ada kontak atau secara listrik kedua logam yang berbeda dihubungkan, perbedaan potensial tersebut akan menimbulkan aliran elektron atau listrik diantara kedua logam, logam yang mempunyai tahanan korosi rendah (potensial rendah) akan terkikis dan yang tahanan korosinya tinggi akan mengalami penurunan daya korosinya.

5. Korosi Tegangan (*Stress Corrosion*)

Korosi tegangan terjadi karena butiran logam yang berubah bentuk yang diakibatkan karena logam mengalami perlakuan khusus (seperti diregang, ditekuk dll) sehingga butiran menjadi tegang dan butiran ini sangat mudah bereaksi dengan lingkungan

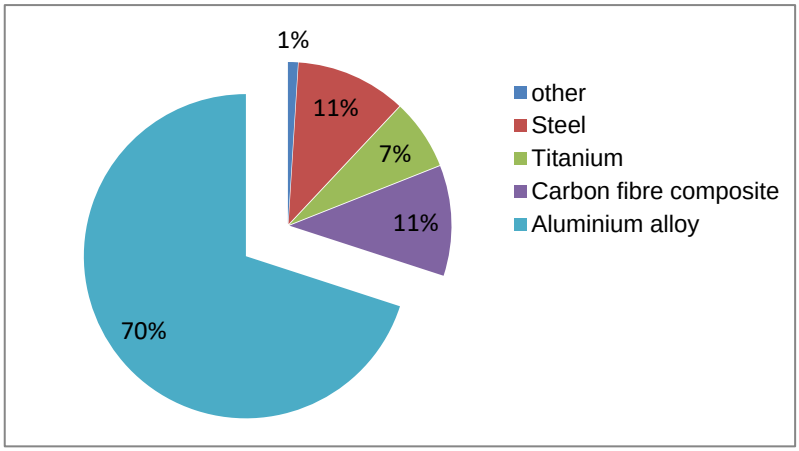
6. Korosi Celah (*Crevice Corrosion*)

Mirip dengan korosi galvanis, dengan pengecualian pada perbedaan konsentrasi media korosifnya. Celah atau ketidak teraturan permukaan lainnya seperti celah paku keling (*rivet*), baut, *washer*, gasket, deposit dan sebagainya, yang bersentuhan dengan media korosif dapat menyebabkan korosi terlokalisasi.

Aluminium

Aluminium adalah elemen paling umum ketiga yang ditemukan di kerak bumi. Karena reaktivitasnya, biasanya ditemukan dikombinasikan dengan unsur-unsur lain seperti besi, oksigen atau silikon. Aluminium sebagai logam diperoleh dari bijih bauksit menggunakan prosedur ekonomis. Ini terdiri dalam memperoleh alumina menggunakan proses Bayer dengan natrium hidroksida, diikuti oleh reduksi alumina menjadi logam aluminium dengan cara elektrolisis.

Meskipun selama beberapa tahun terakhir bahan komposit berkinerja tinggi baru telah dikembangkan, aluminium masih merupakan salah satu bahan yang paling banyak digunakan dalam industri aeronautika karena menghadirkan karakteristik yang menarik untuk sektor ini. Sebagai contoh, pada Gambar 1, dapat dilihat distribusi material Boing 777 di mana persentase berat aluminium 70%.



Gambar 1.1. Distribusi material Boing 777 (Cristian and Tileagă 2013)

Aluminium menarik untuk industri pesawat terbang karena dapat mencapai kekuatan mekanik yang tinggi dan merupakan logam yang sangat ringan, yang kepadatannya 2,7g.cm^{-3}. Aluminium murni memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi karena lapisan oksida yang terbentuk pada permukaannya bersentuhan dengan oksigen. Lapisan ini tidak berpori dan tahan air dan mampu melindungi bahan dasar dari oksidasi di masa depan. Meskipun lapisan oksida ini memiliki ketahanan korosi yang baik terhadap larutan asam, ia dapat diserang oleh media alkali. Ini dapat ditingkatkan dengan meningkatkan ketebalannya menggunakan proses anodisasi. Kekuatan mekanik aluminium murni rendah, antara 7 dan 11 MPa, tetapi dapat mencapai 690 MPa, melalui perlakuan panas dan paduan. Namun, sebagian besar elemen paduan yang meningkatkan kekuatan mekaniknya memengaruhi ketahanan korosi. Untuk alasan ini, perlu menerapkan perlakuan permukaan untuk mencapai perlindungan yang baik.

Paduan Aluminium

Seperti disebutkan di atas, aluminium murni memiliki sedikit minat dalam penggunaan struktural karena memberikan ketahanan kekuatan yang rendah. Dalam industri aluminium tidak digunakan dalam bentuk murni tetapi dikombinasikan dengan elemen paduan seperti silikon, magnesium, mangan, seng dan tembaga untuk meningkatkan kinerjanya, dimana elemen paduan meningkatkan sifat spesifik yang berbeda-beda. Silikon meningkatkan kekuatan dan daktilitas mekaniknya serta mengurangi titik lebur, Magnesium sebagai paduan mengurangi titik leleh juga dan meningkatkan ketahanan terhadap korosi, Tembaga memberikan kekuatan tinggi tetapi

memperburuk ketahanan terhadap korosi, keuletan, dan kemampuan las, Mangan dapat meningkatkan kekuatan dengan tidak mempengaruhi ketahanannya terhadap korosi, serta seng memberikan kekuatan mekanik yang besar dan memungkinkan pengerasan presipitasi panas dan dingin (Verdaguer 2015).

Paduan aluminium 2024 merupakan aluminium dengan paduan utamanya adalah *cooper*. Paduan ini banyak digunakan dalam aplikasi pesawat karena kekuatannya yang tinggi terhadap rasio berat, ketahanannya yang baik terhadap pertumbuhan retak fatik dan ketangguhan retak yang tinggi. Namun, kemampuan las dan kemampuan permesinan yang rendah serta memiliki ketahanan korosi yang buruk, disebabkan adanya tembaga, banyak digunakan dalam struktur pesawat pada bagian bawah sayap Verdaguer (2015).

Anodisasi

Anodisasi adalah proses elektrokimia yang terdiri dari memperoleh lapisan pelindung alumina pada aluminium dengan cara melewatkan aliran arus melalui larutan asam atau larutan elektrolit alkali. Lapisan anodik tumbuh dari substrat berkat proses elektrokimia, sehingga diintegrasikan ke dalam logam dan memiliki daya rekat yang besar. Tumbuh 50% hingga ke permukaan dan kedalaman 50% sehingga harus diperhitungkan peningkatan dimensi Verdaguer (2015).

Bebrapa jenis elektolit yang digunakan pada anodizing seperti

Jika aluminium bersentuhan dengan oksigen menghasilkan lapisan oksida tipis alami yang disebut alumina, Al_2O_3, yang ketebalannya sekitar 0,02 µm. Ini memberikan perlindungan alami yang relatif baik terhadap kondisi atmosfer dan cenderung diregenerasi ketika logam terkikis menghindari korosi selanjutnya.

Tetapi lapisan alami tidak selalu mampu melindungi logam dan mencegah munculnya titik korosi. Perilaku korosi aluminium paduan sensitif terhadap sejumlah kecil pengotor dalam logam. Lapisan oksida alami memiliki sifat heterogen dan tidak teratur yang mempengaruhi sifat pelindungnya. Ini dapat diatasi dengan meningkatkan ketebalan lapisan alumina secara artifisial melalui proses anodisasi. Perlakuan ini mampu menghasilkan lapisan yang memberikan perlindungan yang sangat baik terhadap korosi dan juga meningkatkan adhesi lapisan organik dibandingkan dengan logam tanpa anodisasi.

Proses anodisasi dapat dibagi dalam tiga langkah penting berturut-turut yaitu :

1. Pra-proses

Persiapan permukaan sangat penting dan tidak dapat diremehkan, tanpa pengkondisian yang baik kinerja dan kualitas pada proses selanjutnya dapat dipengaruhi dan hasil yang diinginkan tidak tercapai.

2. Pembersihan dan pencucian

Pembersihan dan *degreasing* adalah proses pertama sebelum melakukan perlakuan permukaan. Tujuannya adalah untuk menghilangkan kotoran pada permukaan logam material seperti : cat, minyak, pelumas, debu, tanda jari, sisa logam, cairan pengelasan atau mematri. Pembersihan ini diperlukan untuk mencapai reaksi anodik yang baik dan untuk mendapatkan lapisan aluminium oksida yang seragam.

Metode terbaru yang digunakan adalah produk *degreasing* alkali. Sebagai pengganti metode *degreasing* uap berdasarkan pelarut terklorinasi dan berfluorinasi yang lama karena masalah lingkungan. Namun, ada metode pembersihan ultrasonik, yang biasanya digunakan dalam kasus-kasus tertentu ketika yang lain tidak cocok.

Saat ini, ada banyak produk degreasing alkali di pasaran seperti *natrium hidroksida*, inhibitor korosi dan zat pembasah. Zat ini harus disesuaikan dengan logam dan penggunaannya harus diminimalkan dan dikendalikan. Untuk aluminium, pH harus antara 9 dan 11. Zat ini harus mempunyai kinerja pembilasan tinggi, kelarutan tinggi, sifat pembasahan yang baik dan daya pengemulsi yang besar.

Metode pembersihan ultrasonik membutuhkan peralatan yang mahal dan lebih cocok bila bagian yang akan dibersihkan kecil. Metode ini digunakan ketika pembersihan sulit dan metode perendaman tidak cukup baik.

3. Etsa

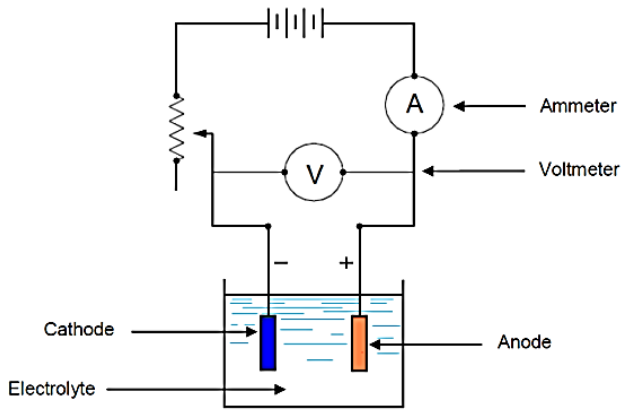
Etsa permukaan merupakan langkah penting dalam proses ini. Hal ini dimaksudkan menghilangkan aluminium oksida yang mungkin ada pada permukaan dalam jumlah dan bentuk yang berbeda dan menggantinya dengan lapisan tipis dan dasar yang sama untuk anodisasi. Ada dua jenis etsa: etsa alkali dan etsa asam. Tingkat etsa mereka tergantung pada konsentrasi produk dan suhu operasi.

Bak etsa alkali biasanya tersusun oleh larutan natrium hidroksida cair, dengan konsentrasi 5 hingga 10% dan suhu operasi antara 40 dan 50 ºC. Ini adalah metode etsa yang paling ekonomis. Kekurangannya adalah dibutuhkan proses selanjutnya dengan asam nitrat, terutama dalam kasus aluminium paduan dengan tembaga, untuk menghilangkan produk yang tidak larut yang dihasilkan selama etsa alkali. Karena alasan ini, ini jarang digunakan di sektor penerbangan.

Etsa asam telah secara tradisional dilakukan dengan menggunakan larutan yang terdiri dari asam sulfat, asam hidrofluorat dan natrium dikromat pada suhu kamar. Komponen terakhir ini, seperti semua senyawa kromium heksavalen, dianggap berbahaya dan bersifat karsinogen. Karena masalah kesehatan, produk-produk alternatif telah dikembangkan seperti larutan asam fosfat dan sulfur. Dalam sektor aeronautika, formulasi terbaru yang menguntungkan terdiri dari asam sulfat, besi sulfat dan asam nitrat.

Proses Anodisasi

Seperti dijelaskan di atas, anodisasi terdiri dari oksidasi permukaan aluminium dikonversi menjadi aluminium oksida atau alumina. Gambar 2. menunjukkan skema perangkat yang diperlukan untuk melakukan anodisasi. Ini terdiri dari dua elektroda yang terhubung ke penyearah arus dan direndam dalam sel elektrokimia yang mengandung elektrolit. Untuk mengontrol intensitas dan tegangan proses, ammeter dihubungkan secara seri dan voltmeter secara paralel. Aluminium bertindak sebagai anoda dan merupakan tempat oksidasi terjadi. Katoda, yang fungsinya untuk menutup sirkuit elektrolit, biasanya terbuat dari baja atau timah, meskipun yang terakhir ini sudah tidak digunakan lagi. Ketika arus listrik diterapkan ke sistem, elektron mengalir dari anoda ke katoda pada permukaan aluminium paduan



Gambar 2.2 Sel elektrokimia

Jika elektrolit adalah larutan asam, oksigen dari disosiasi elektrolitik air akan bereaksi dengan kation anoda untuk menghasilkan alumina pada permukaan paduan. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:

Cathode: $6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2$

Anode: $2Al \rightarrow Al^{3+} + 6e^-$

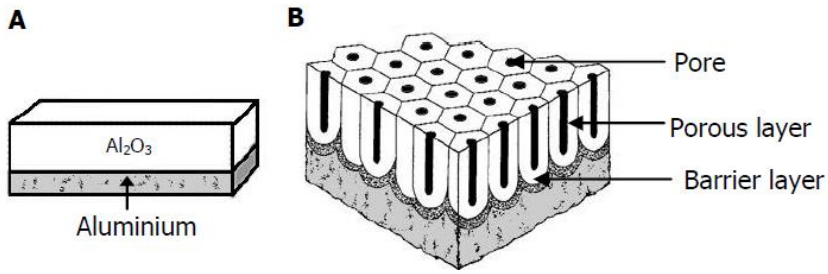
$2Al^{3+} + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 6H^+$

Balance equation: $2Al + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2$

Proses konversi aluminium ditentukan oleh waktu dan kepadatan arus listrik dari anodisasi jika parameter ini meningkat maka konversi juga meningkat. Morfologi dan ketebalan lapisan anodik juga tergantung pada tegangan, suhu dan komposisi elektrolit.

Struktur lapisan anodik

Ada faktor berbeda yang akan mempengaruhi struktur lapisan anodik, diantara yang paling penting adalah komposisi elektrolit dan kondisi anodisasi seperti: suhu, tegangan atau durasi proses. Namun, struktur lapisan anodik dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama: lapisan penghalang dan lapisan berpori seperti terlihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 2.3 Lapisan penghalang dan lapisan berpori

Lapisan anodik penghalang

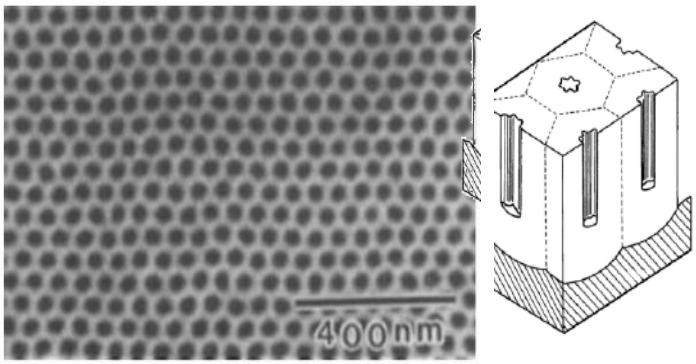
Lapisan penghalang anodik dihasilkan dalam elektrolit yang pH-nya hampir netral, antara 5 dan 7, di mana aluminium bersifat pasif, seperti larutan asam borat dengan natrium borat atau amonium tartrat. Elektrolit-elektrolit ini tidak memiliki aksi pelarut pada lapisan aluminium oksida, untuk alasan ini, sebuah lapisan oksida tipis terbentuk di permukaan. Lapisan-lapisan ini tumbuh seragam di sepanjang permukaan

aluminium paduan. Mereka sangat patuh dan tidak konduktif. Pertumbuhan oksida berlangsung sampai hambatan listriknya sangat tinggi sehingga aliran arus tidak dapat bersirkulasi ke anoda, ketebalannya terutama tergantung pada tegangan yang diberikan. Karena sifat dielektriknya banyak digunakan dalam industri elektronik.

Lapisan anodik berpori

Lapisan anodik berpori dihasilkan dalam elektrolit yang pH-nya berada dalam kisaran di mana terjadi oksidasi aluminium, seperti asam sulfat, asam kromat atau larutan tartarat-sulfur. Berkat studi mikroskop elektron telah diamati bahwa lapisan anodik terdiri dari dua lapisan yang berbeda: lapisan internal tipis, padat dan kompak yang disebut lapisan penghalang dan satu lagi eksternal dan keropos.

Lapisan penghalang dihasilkan pada menit-menit pertama anodisasi. Ketebalannya adalah antara 0,1 dan 2% dari total lapisan anodik dan itu tergantung langsung pada tegangan yang diberikan dan berbanding terbalik dengan laju disolusi oksida dalam elektrolit. Lapisan ini tidak berpori dan karena kegagalan struktur mikronya konduktif. Ketika lapisan penghalang mencapai ketebalan batasnya, di atas permukaannya lapisan berpori terus menerus dihasilkan. Karena sifat berpori, lapisan ini meningkatkan ketebalannya selama anodisasi sedangkan ketebalan lapisan penghalang tetap konstan. Oksidasi dan pelarutan aluminium terjadi melalui pori-pori, dan seperti yang dapat disimpulkan dari keberadaan lapisan, laju oksidasi lebih tinggi daripada pelarutan. Pada Gambar 2.4 dapat dilihat lapisan berpori menggunakan mikrograf elektron pemindaian.



Gambar 2.4 Lapisan berpori

Untuk menghitung ketebalan hasil anodisasi dapat digunakan persamaan berikut Henley (1982)

$$Ticknes\ (\mu m) = \frac{Current\ density\ \frac{amp}{dm^2} x\ Time\ (min)}{3} \quad (1)$$

Elektrolit

Elektrolit biasanya adalah larutan asam, meskipun dimungkinkan untuk dianodisasi dalam media alkali. Elektrolit asam yang paling banyak digunakan adalah asam sulfat, asam kromat, asam oksalat, dan asam fosfat. Dalam industri, yang paling banyak digunakan adalah asam sulfat, tetapi di sektor aeronautika adalah asam kromat. Sebagai alternatif dari elektrolit terakhir ini, Airbus telah mengembangkan anodisasi sulfur tartarat dan Boeing anodisasi sulfat borat. Verdaguer (2015). Berikut adalah penjelasan lebih rinci mengenai elektrolit yang digunakan dalam proses anodizing diantaranya

1. Asam Sulfat (H_2SO_4)

adalah salah satu elektrolit paling umum digunakan dalam proses anodizing aluminium. Ini adalah larutan yang bersifat korosif dan kuat, yang dapat digunakan untuk meningkatkan ketahanan korosi dan mengubah sifat permukaan aluminium.

Bebrapa karakteristi dari asam sulfat berupa Konsentrasi: Biasanya digunakan dalam konsentrasi antara 10% hingga 20%. Konsentrasi yang lebih tinggi dapat digunakan untuk aplikasi tertentu, tetapi memerlukan pengaturan yang lebih hati-hati. Untuk suhu proses anodizing dengan asam sulfat biasanya dilakukan pada suhu antara 15°C hingga 25°C, meskipun suhu yang lebih tinggi dapat digunakan untuk meningkatkan laju anodizing.

Pada proses anodizing reaksi elektrokimia aluminium berfungsi sebagai anoda dalam sel elektrolit. Ketika arus listrik mengalir, ion aluminium teroksidasi dan membentuk lapisan aluminium oksida (Al_2O_3) di permukaan.

Lapisan yang dihasilkan biasanya berwarna transparan dan dapat bervariasi dalam ketebalan, tergantung pada waktu anodizing dan kondisi lainnya. Ketebalan ini bisa mencapai 25 µm atau lebih.

Kelebihan Menggunakan Asam Sulfat **adalah m**enghasilkan lapisan anodizing yang sangat tahan terhadap korosi, membuat aluminium lebih tahan lama dalam berbagai kondisi lingkungan, lapisan aluminium oksida yang dihasilkan sangat keras dan dapat meningkatkan kekuatan mekanik permukaan, lapisan ini dapat dengan mudah

diwarnai, memungkinkan aplikasi estetika dalam industri otomotif, arsitektur, dan produk konsumen. Asam sulfat relatif murah dan mudah didapat, menjadikannya pilihan yang ekonomis untuk anodizing.

2. Asam borat (H_3BO_3)

adalah senyawa kimia yang sering digunakan sebagai elektrolit dalam proses anodizing, terutama untuk aluminium dan paduan tertentu. Ini merupakan elektrolit yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan asam konvensional lainnya.

Karakteristik Kimiia Asam borat adalah senyawa yang lemah dan memiliki sifat antiseptik serta anti-korosi., Umumnya digunakan dalam larutan yang berkisar antara 4% hingga 10% untuk anodizing. Larutan asam borat cenderung memiliki pH yang lebih netral, yang dapat membantu mengontrol reaksi anodizing dan mengurangi risiko kerusakan pada permukaan.

Proses Anodizing menggunakan asam borat, aluminium berfungsi sebagai anoda, di mana arus listrik mengalir melalui larutan, menghasilkan lapisan aluminium oksida (Al_2O_3) di permukaan. Lapisan yang dihasilkan biasanya lebih halus dan memiliki tampilan yang bersih, serta dapat bermanfaat untuk aplikasi yang memerlukan estetika tinggi.

Kelebihan Menggunakan Asam Borat: Asam borat merupakan pilihan yang lebih aman dan tidak berbahaya dibandingkan dengan asam kuat lainnya, sehingga lebih baik untuk kesehatan dan lingkungan.,dapat menghasilkan lapisan anodizing yang lebih halus dan merata, meningkatkan kualitas estetika produk akhir, meskipun tidak sekuat asam sulfat dalam hal ketahanan korosi, asam borat tetap memberikan perlindungan yang baik terhadap korosi.

1. Campuran elektrolit

Beberapa elektrolit menggunakan campuran beberapa asam, seperti asam sulfat dan asam oksalat, asam borat dan asam sulfat dan lain-lain, tujuannya adalah untuk mendapatkan karakteristik lapisan oksida yang diinginkan, sesuai dengan (sheasby dan Pinner, 2001).

Inhibitor

Inhibitor adalah suatu zat yang apabila ditambahkan kedalam sistem dapat mengurangi laju korosi suatu material. Iinhibitor ditambahkan untuk menghambat reaksi antarmuka yaitu antara material dengan lingkungannya. Efektifitas inhibitor sangat tergantung kepada komposisi kimia yang dimiliki struktur molekul dan aktifitasnya terhadap permukaan logam (Vargel, 2004)

Pemilihan inhibitor diambil berdasarkan pada logam dan lingkungan dimana inhibitor tersebut digunakan. Inhibitor dapat berfungsi sebagai pengkondisi lingkungan (*environment conditioner*) dan antarmuka (*interface*), sedangkan inhibitor *Environment conditioner* ini bekerja mengendalikan sifat korosif dari media tersebut dengan mengikat senyawa yang agresif, sedangkan inhibitor *interface* bekerja mengendalikan korosi dengan membentuk lapisan (*lapisan*) antarmuka antara logam dan lingkungannya.

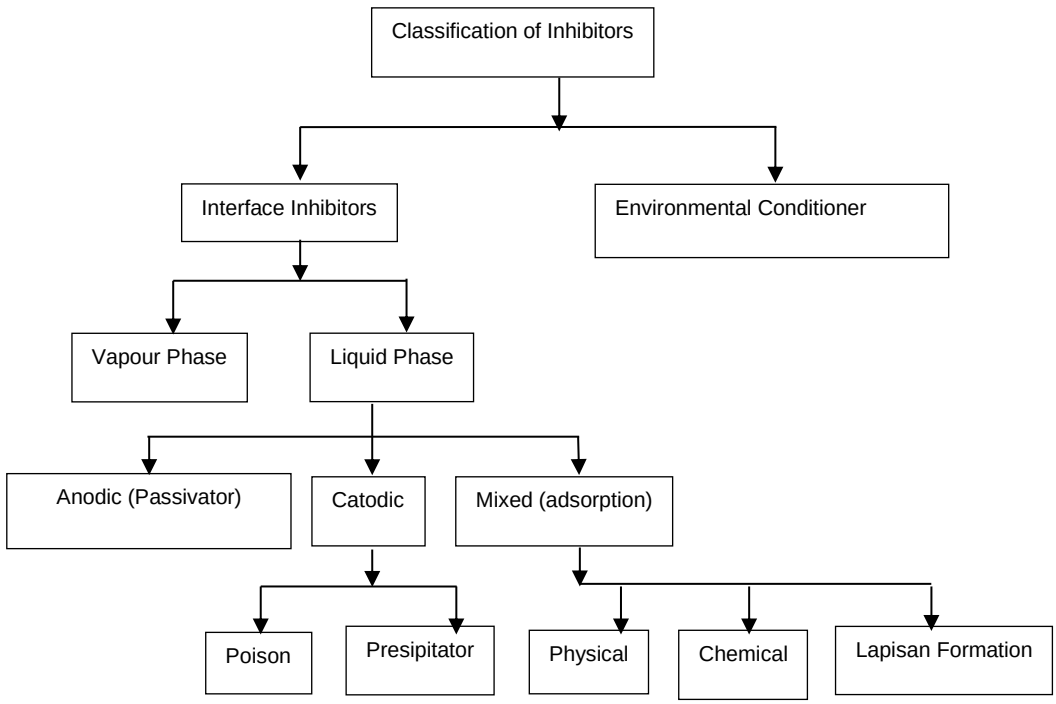
Untuk mengetahui efesiensi suatu inhibitor maka digunakan persamaan Roberge (2008) :

$$\text{Efesiensi inhibitor} = \frac{r_o - r_{inh}}{r_o}\ x\ 100\ \% \qquad (2)$$

Dengan

r_o = laju korosi tanpa inhibitor (*mpy*)

r_{inh} = laju korosi dengan inhibitor (*mpy*)



Gambar 2.5. Klasifikasi inhibitor secara kualitatif (Papavinasam 2000)

Inhibitor diklasifikasikan sebagai berikut :

1. Inhibitor anodik

Disebut juga *"passivators"* adalah kelompok inhibitor yang bila ditambahkan kelingkungan akan meningkatkan potensial korosi dari logam, tetapi perubahan potensial korosi korosi belum menginformasikan perubahan laju korosi dari material yang bersangkutan. Inhibitor anodik membentuk lapisan pasif melalui reaksi dengan ion-ion logam yang terkorosi untuk menghasilkan selaput pasif tipis yang akan menutupi anoda (permukaan logam) dan lapisan ini akan menghalangi pelarutan anoda. Inhibitor anodik dapat dibedakan atas :

1. Inhibitor pengoksidasi

Inhibitor jenis ini akan membentuk lapisan yang akan menutup daerah anoda sehingga tidak terjadi kontak antara logam dengan lingkungan yang korosif dan korosi lebih lanjut tidak terjadi. Contoh inhibitor tipe ini antara lain; kromat nitrit dan nitrat.

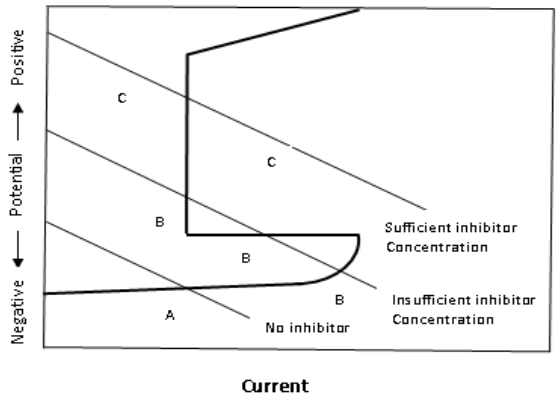
2. Inhibitor bukan pengoksidasi

Inhibitor ini dapat menjaga lapisan pasif yang ada dipermukaan sehingga berfungsi dengan baik. Inhibitor ini mempertahankan pH interfasa logam/larutan pada nilai yang cukup tinggi untuk mempertahankan kestabilan lapisan pelindung. Contoh inhibitor ini antara lain; molibdat, silikat, fosfat dan borat.

2. Inhibitor Katodik

Inhibitor katodik bereaksi dengan ion OH untuk mengendapkan senyawa-senyawa tidak larut pada permukaan logam sehingga dapat menghalangi masuknya oksigen. Tahapan penting dalam penghambatan korosi oleh senyawa organik untuk membentuk lapisan penghalang korosi adalah dengan terserapnya inhibitor untuk membentuk lapisan tipis contoh seng, magnesiam dan kalsium. Gambar 6 menunjukkan logam tanpa inhibitor akan terkorosi pada laju korosi yang bersesuain dengan titik A. Dengan meningkatnya konsentrasi inhibitor laju korosi juga meningkat sampai konsentrasi kritis tercapai

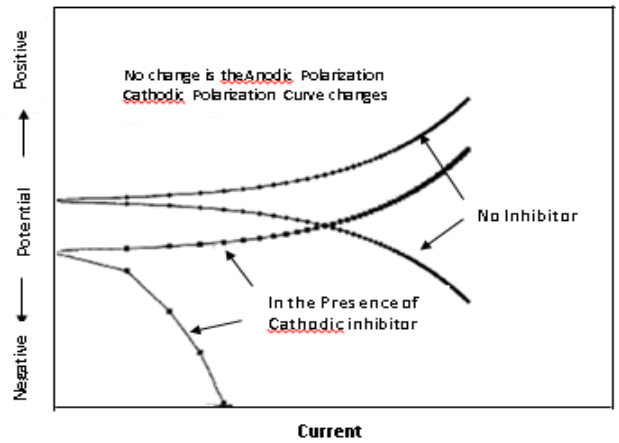
pada titik B, kemudian ada transisi yang cepat dari logam menjadi pasiv dan laju korosi menurun (titik c)



Gambar 2.6 Diagram *active-passive metal* (Papavinasam 2000)

Inhibitor katodik pada larutan asam ditandai adanya reduksi ion hidrogen menjadi asam hidrogen. Inhibitor katodik akan menghambat reaksi katodik seperti diatas. Gambar 7 juga memperlihatkan pengaruh inhibitor katodik pada kurva

polarisasi, dalam hal ini slop pada kurva anodik tidak terpengaruh akan tetapi slop pada kurva katodik akan berubah



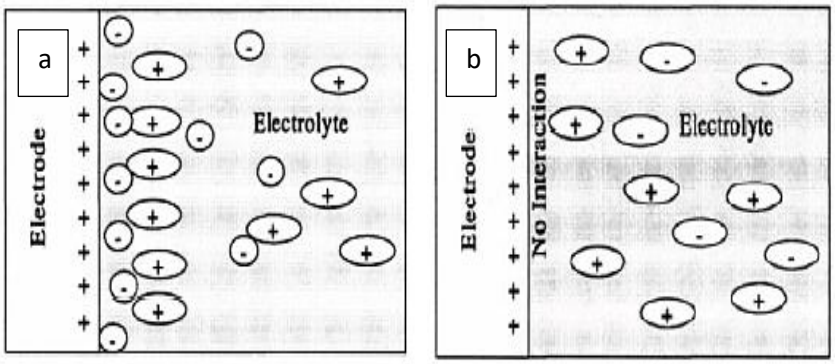
Gambar 2.7 Kurva polarisasi ditandai dengan adanya inhibitor anodic (Papavinasam 2000)

3. *Mixed* inhibitor

Adalah senyawa organik yang secara khusus tidak dapat dikategorikan sebagai anodik dan katodik. Efektifitas inhibitor tergantung bagaimana inhibitor diserap dan melindungi permukaan logam tergantung pada struktur inhibitor muatan dari permukaan logam dan tipe elektrolit. *Mixed inhibitor* melindungi logam melalui 3 cara yaitu :

1. *Physical adsorption*

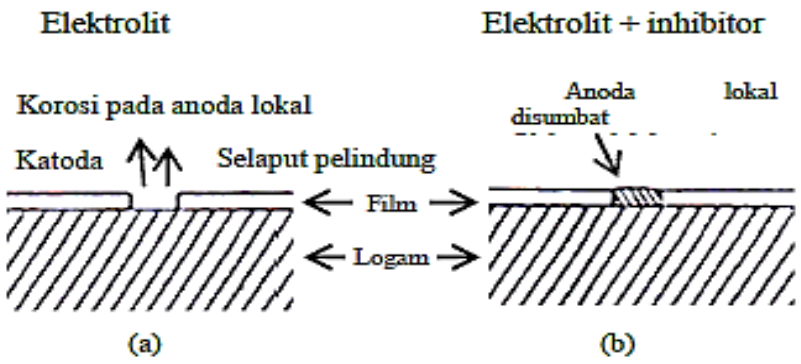
Merupakan hasil interaksi elektrostatik antara inhibitor dan permukaaan logam. Jika permukaan logam bermuatan positif, adsorpsi inhibitor akan bermuatan negatif seperti ditunjukkan oleh Gambar 8a. sedangkan aksi molekul-molekul bermuatan positif yang berkombinasi dengan muatan negatif diantaranya dapat menghambat logam bermuatan positif seperti ditunjukkan pada Gambar 8b



Gambar 2.8 a.dan b Adsorpsi inhoibitor bermuatan negatif dan positif pada permukaan logam (Papanisam, 2000)

2. *Chemisorption*

Melibatkan transfer muatan atau berbagi muatan antara molekul inhibitor dan permukaan logam dengan berinteraksi dengan atom-atom pada permukaan logam. Proses *Chemisorption* lebih lambat dibanding *Physical adsorption* dan semakin meningkat suhu proses adsorpsi, inhibasi juga meningkat.



Gambar 2.9 Efek konsentrasi terhadap inhibitor anodic pada laju korosi (Trethewey, 1991)

3. *Lapisan formation*

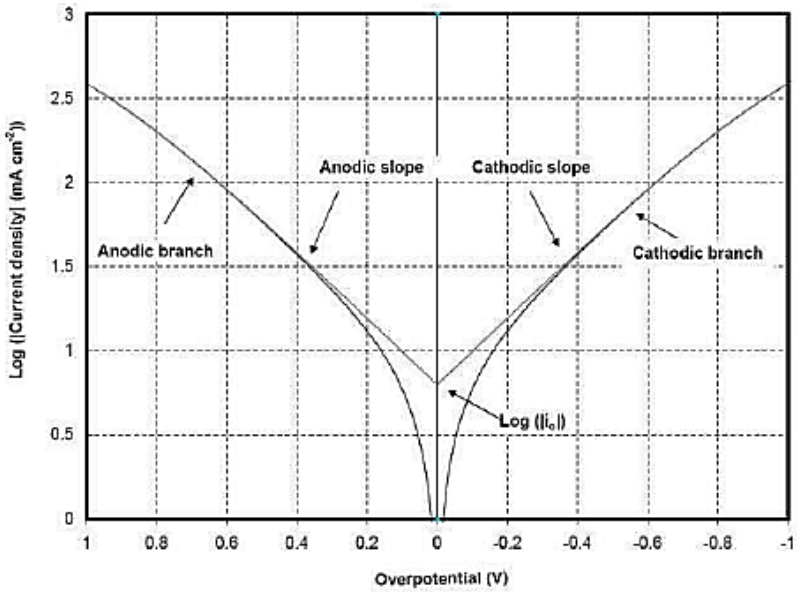
Gambar 2.12 menujukkan molekul-molekul inhibitor yang terserap juga dapat membentuk lapisan-lapisan lapisan polimer pada reaksi-reaksi permukaan. Proteksi terhadap korosi akan meningkat seiring berkembangnya lapisan lapisan dengan ketebalan beberapa ratus *Angstrom*. Inhibisi akan efektif apabila lapisan lapisan tidak larut dan menghambat masuknya larutan menuju logam.

Laju Korosi

Korosi merupakan suatu reaksi elektrokimia, semua yang mempengaruhi kecepatan suatu reaksi kimia atau jumlah arus yang mengalir akan mempengaruhi laju korosi. Hukum *Ohm* dapat diterapkan untuk bagian elektrik dari sel korosi. Laju korosi berbanding lurus dengan sejumlah arus yang mengalir pada sel korosi elektrokimia. Jika arus dapat diukur, kehilangan metal dapat ditentukan. Salah satu cara mengukur laju korosi dengan menggunakan metode elektrokimia (Polarisasi).

(Sastri, Ghali, and Elboujdaini 2012) menjelaskan, bahwa ketika suatu logam tidak berada dalam keseimbangan dengan larutan yang mengandung ion-ionnya, potensial elektrodanya berbeda dari potensial korosi bebas, maka selisih antara keduanya disebut polarisasi

Jika proses kesetimbangan terjadi pada permukaan logam maka potensial koosi yang terjadi adalah kompromi antara beberapa potensial dari reaksi kesetimbangan anodik dan katodik yang terlibat. Aktivasi polarisasi merupakan fenomena elektrokimia yang berhubungan dengan perpindahan arus dimana tahapan dari reaks dikendalikan oleh laju aliran elektron dari permukaan dan mengalami oksidasi. Salah satu metode pengujian laju korosi yang digunakan adalah polarisasi potensiodinamik dengan melakukan pengamatan intensitas arus korosi (I_{corr}) benda uji pada lingkungannya dan hasilnya dalam *Taffel plot* ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Potensial (V) terhadap log [i] atau *Taffel plot* (Roberge 2008)

Rapat arus korosi *(Icorr*) diperoleh dari hasil kurva potensial dengan logaritma intensitas arus yaitu dengan cara menentukan titik perpotongan garis *Taffel* reaksi reduksi (*βa*) dan garis tafel reaksi osidasi (*ηa*) pada garis potensial korosi (*Ecorr*). Nilai *βa* dan *ηa* ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\eta a = \beta a \, log \frac{ia}{io} \quad (3)$$

$$\eta c = -\beta c \, log \frac{ic}{io} \quad (4)$$

Dimana :

ηa = potensial polarisasi anodik

ηc = potensial polarisasi katodik

ia = arus pada reaksi anoda

ic = arus pada reaksi katoda

io = arus saat perubahan reaksi -0reduksi menuju reaksi oksidasi = $ia = -ic = icorr$

βa = gradien tafel reaksi anoda

βc = gradien tafel reaksi katoda

Akurasi hasil pengukuran nilai rapat arus korosi sangat dibutuhkan disebabkan rapat arus korosi sebanding dengan laju korosi pada logam pada lingkungannya. Menghitung laju korosi dapat digunakan hukum Faraday sebagai berikut ASTM G31-72 ASTM (2004):

Menghitung laju korosi pada paduan, berat eqivalen (EW = Equivalent weight) terlebih dahulu dilakukan memakai Persamaan berikut (Jones,1992) :

$$EW = (N_{eq})^{-1} \quad (5)$$

$$N_{eq} = \sum \left[\frac{\omega_i}{a_{i\,/n_i}} \right] = \sum \left[\frac{\omega_i . n_i}{a_i} \right] \quad (6)$$

Dengan:

EW = berat eqivalen

N_{eq} = nilai eqivalen total

ω_i = fraksi berat

a_i = massa atom

n_i = electron valensi

sehingga persamaan menjadi :

$$CR = 0,00327 \frac{(EW) i_{corr}}{\rho} \quad (7)$$

Dimana :

CR dalam mm/yr , I_{corr} dalam $\mu A/cm^2$

K_1 = 3,27 x 10^{-3} (mmg/ $\mu A/cm^2$)

ρ =density (g/cm^3)

EW = berat eqiuvalent

Retak rambat bahan

Retak rambat bahan didekati dengan persamaan Paris (Broek, 1987) sebagai berikut :

$$\frac{da}{dN} = A \Delta K^n \quad (8)$$

Laju perambatan retak fatik dapat dihitung mengunakan metode *secant* (ASTM, 2003) sebagai berikut :

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B} \sqrt{\frac{\pi \alpha_{aw}}{2W}} \operatorname{Sec} \frac{\pi \alpha_{aw}}{2} \quad (9)$$

$$\left(\frac{dA}{dN} \right)_{\bar{a}} = \frac{(a_{i+1} - a_i)}{(N_{i+1} - N_i)}$$

$$\bar{a} = \frac{1}{2} (a_{i+1} - a_i)$$

$$\alpha_{aw} = \frac{2a}{w} \text{ untuk } \frac{2a}{w} < 0,95$$

$$\Delta P = P_{max} - P_{min} \, untuk \, R > 0$$

$$\Delta P = P_{max} \, untuk \, R \leq 0$$

Dengan a = panjang retak, α_{aw} = perbandingan dua kali panjang retak dengan lebar spesimen, N= jumlah spesimen A dan n konstanta Paris, ΔK = beda faktor intensitas tagangan P = beban, W = lebar spesimen, B tebal spesimen dan R = rasio tegangan.
Dari persamaan Paris bila A dan n dapat diperoleh secara empirik, maka umur perambatan retak fatik dapat diturunkan sebagai berikut :

$$\frac{da}{dN}=A(\Delta K)^n= A(\Delta S\sqrt{\pi\alpha}\,\beta)^n$$

$$\frac{da}{dN}= A(\Delta S^n a^{n/2}\pi^{n/2}\beta^n)$$

$$da= A(\Delta S^n a^{n/2}\pi^{n/2}\beta^n)dN$$

$$N_f=\int_0^{N_t} dN= \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{A(\Delta S^n a^{n/2}\pi^{n/2}\beta^n)}$$

$$N_f = \frac{1}{A(\Delta S^n \pi^{n/2}\beta^n)}\int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{a^{n/2}} \rightarrow n \neq 2$$

$$\int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{a^{n/2}} = \left.\frac{a^{-(n/2)+1}}{-n/2+1}\right| = \frac{a_f{}^{-(n/2)+1}-a_i{}^{-(n/2)+1}}{-n/2+1}$$

$$N_f= \frac{a_f{}^{-(n/2)+1}-a_i{}^{-(n/2)+1}}{[-n/2+1]A(\Delta S^n \pi^{n/2}\beta^n)} \qquad (10)$$

$$a_f=\frac{1}{\pi}\left[\frac{K_c}{S_{max}\beta}\right]^2$$

Dimensi Benda

Harga faktor Intensitas tegangan K akan berubah jika dimensi bendanya berubah (Gambar 3.13), persamaan faktor intensitas tegangan secara umum dapat dituliskan :

$$K_I = Y.\sigma\sqrt{\pi.a} \qquad (11)$$

Dimana Y adalah faktor geometri yang biasanya tergantung dari dimensi benda, sebagai contoh adalah geometri retak dibawah ini:

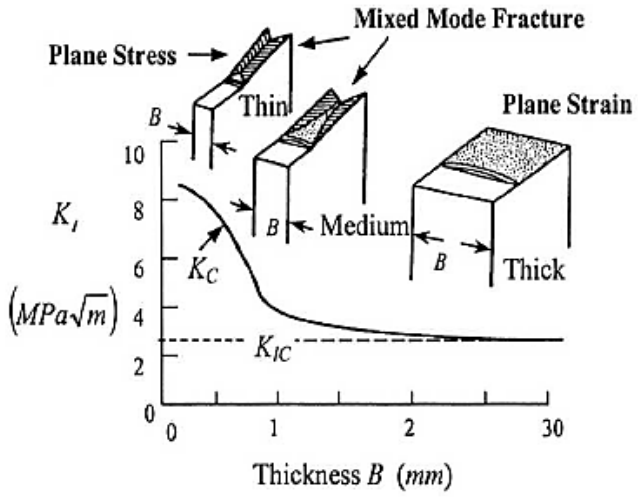
a. Retak ditengah pelat :

1. Untuk pelat tak berhingga dengan Y=1 atau $K= Y.\sigma\sqrt{\pi.a}$
2. Untuk pelat berhingga dengan lebar W, maka $Y= (\sec\frac{\pi.a}{W})^{1/2}$ atau

$$K= \sigma\sqrt{\pi.a}(\sec\frac{\pi.a}{W})^{1/2} \qquad (12)$$

b. Retak pada kedua sisi pelat :

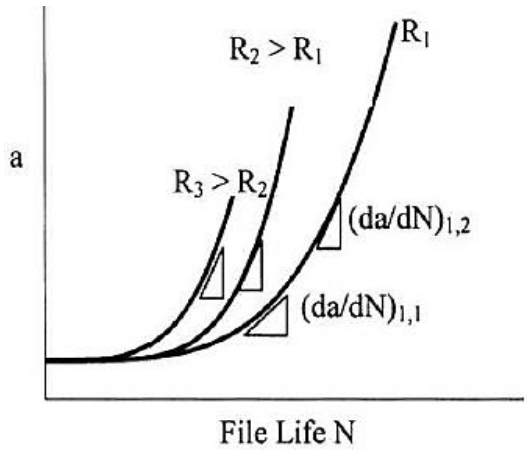
1. Untuk pelat tak berhingga Y = 1.12
2. Untuk pelat dengan lebar W, maka Y= $1.12(\frac{W}{2.a}\ tan\frac{\pi.a}{W})^{1/2}$



Gambar 2.11. Hubungan ketebalan material dan harga ketangguhan (Perez, 2004)

Karakteristik Laju Perambatan Retak

Pertumbuhan panjang retak dan jumlah siklus dapat disajikan dalam kurva a dan N.

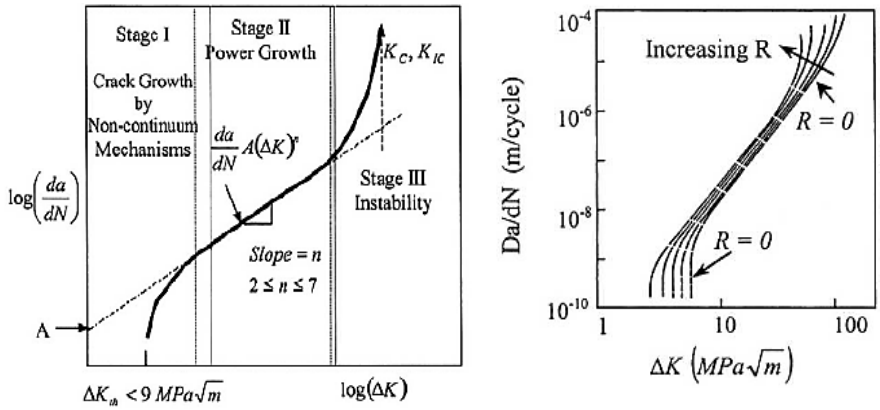


Gambar 2.12 Skema kurva perambatan retak fatik (Perez,2004)

Gambar 2.12 menunjukan secara skematis tiga spesimen yang dikenai tegangan berbeda pada pengujian fatik, R3>R2>R1. Benda uji mempunyai ukuran retak awal

yang sama dan tegangan siklik minimumnyapun sama, yaitu nol. Rasio tegangan mempengaruhi laju perambatan retak dimana meningkatnya nilai rasio tegangan cenderung meningkatkan laju pertumbuhan retak.

Perilaku perambatan retak pada material dapat juga disajikan dengan grafik hubungan antara laju perambatan retak dan selisih intensitas tegangan. Grafik dibuat dalam skala logaritmik seperti terlihat pada Gambar 2.13 berikut :



Gambar 2.13 Hubungan intensitas tegangan dengan laju pertumbuhan retak (Perez, 2004)

Gambar 2.13 menjelaskan bahwa kurva tersebut dapat dibagi menjadi tiga daerah. Daerah I menunjukan suatu daerah harga ambang ΔKth, dibawah harga ini tidak ada perambatan retak yang terjadi, kecuali pada orde sekitar $2{,}5.10^{-10}$ m/siklus. Daerah III merupakan daerah perambatan retak yang sangat cepat sehingga perambatan retak sulit untuk diamati dimana faktor intensias tegangannya diatas harga faktor intensitas tegangan kritis, sehingga daerah ini tidak begitu penting dalam pengamatan situasi fatik. Daerah II merupakan daerah terpenting dimana daerah ini menunjukan hubungan linier antara laju perambatan retak dan selisih intensitas tegangan yang bekerja.

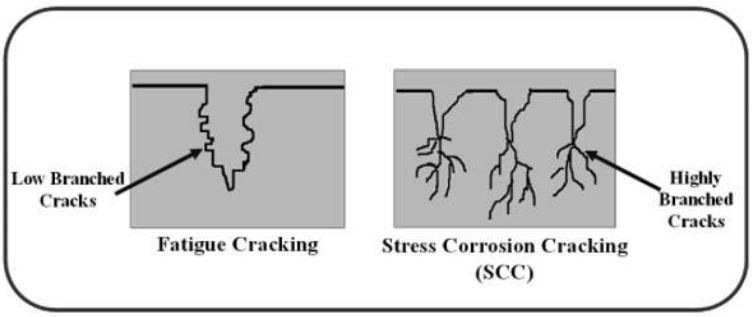
Fatik Korosi

Fatik korosi adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan fenomena retak, termasuk inisiasi dan propagasi, dalam material di bawah aksi gabungan dari fluktuasi atau siklik stres dan lingkungan yang korosif. Fatik korosi sangat bergantung pada variabel interaksi antara mekanik (pembebanan), metalurgi, dan lingkungan yang tercantum pada tabel berikut :

Tabel 2.1 Pengaruh variabel mekanikal, metalurgi dan lingkungan terhadap sifat fatik korosi

Variable	Type
Mechanical	Maximum stress or stress-intensity factor, σ_{max} or K_{max}
	Cyclic stress or stress-intensity range, $\Delta\sigma$ or ΔK
	Stress ratio, R
	Cyclic loading frequency
	Cyclic load waveform (constant-amplitude loading)
	Load interactions in variable-amplitude loading
	State of stress
	Residual stress
	Crack size and shape, and their relation to component size and geometry
Metallurgical	Alloy composition
	Distribution of alloying elements and impurities
	Microstructure and crystal structure
	Heat treatment
	Mechanical working
	Preferred orientation of grains and grain boundaries (texture)
	Mechanical properties (strength, fracture toughness, etc.)
Environmental	Temperature
	Types of environments: gaseous, liquid, liquid metal, etc.
	Partial pressure of damaging species in gaseous environments
	Concentration of damaging species in aqueous or other liquid environments
	Electrical potential
	pH
	Viscosity of the environment
	Coatings, inhibitors, etc.

Fatik korosi adalah kerusakan pada logam akibat mengalami tegangan dimana besar dan arahnya berubah-ubah serta adanya serangan kimia Threthewey, (1991) sedangkan fatik hanya disebabkan adanya tegangan yang berulang. Kelelahan korosi menghasilkan retakan halus hingga lebar dengan sedikit atau tanpa percabangan dengan demikian, fatik korosi berbeda dari SCC, yang sering menunjukkan cukup banyak percabangan, dan biasanya diisi dengan produk korosi padat. Retakan dapat terjadi sendiri-sendiri tetapi umumnya muncul sebagai gabungan atau retak parallel yang sering dikaitkan dengan lubang, alur, atau lainnya bentuk konsentrator stress, dimana jalur fraktur transgranular lebih sering terjadi dibandingkan fraktur intergranular seperti terlihat pada Gambar 2.14.

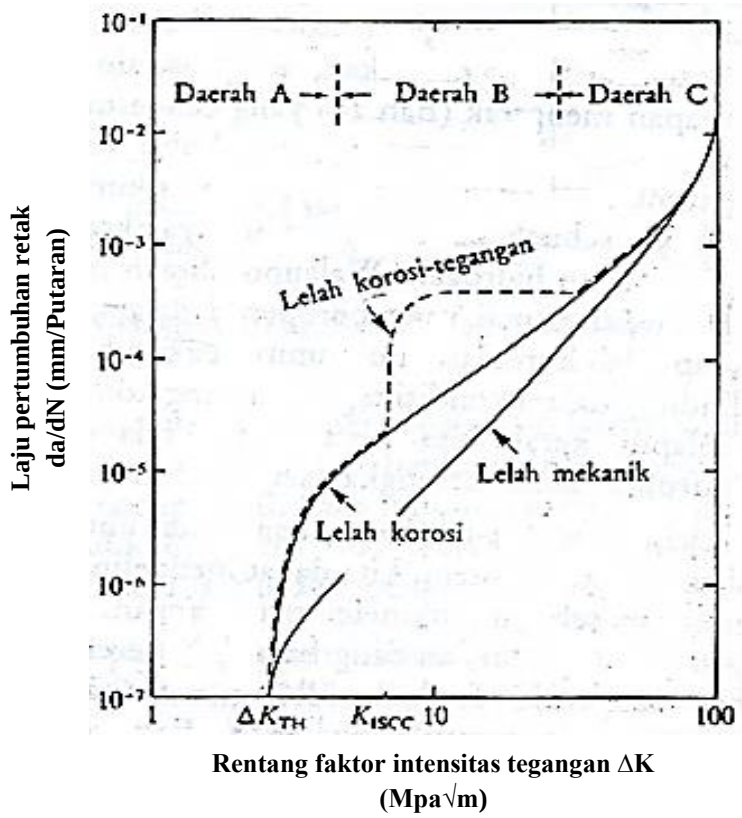


Gambar 2.14 Skema fatik korosi

Paada Gambar 15 menjelaskan akibat adanya serangan korosi tanpa beban biasanya akan mengakibatkan lubang pada permukaan logam dan lubang tersebut bertindak sebagai takik yang mengakibatkan berkurangnya kekuatan lelah pada logam (daerah A). Penurunan sifat lelah yang lebih besar dapat di akibatkan jika serangan korosi disertai dengan pembebanan jika dibandingkan dengan serangan korosi tanpa beban tegangan dan laju rambat retak akan semakin cepat bila korosi dan fatik terjadi bersamaan fluktuasi tegangan dibawah kekuatan tariknya baik pada suatu titik atau banyak titik dapat memuncak menjadi retak (*Crack*) atau patahan (*fracture*) secara keseluruhan sesudah flukuasi tertentu (daerah B). Kegagalan lelah (*fatigue failure*) terjadi secara tiba-tiba, mengakibatkan patah yang terlihat rapuh, pada tegangan jauh dibawah tegangan maksimumnya dan tercapai pada periode siklus tertentu (daerah C).

Pada lingkungan basah ketahanan logam terhadap lelah menurun sehingga korosi fatik dijumpai dalam bentuk korosi dan dapat terjadi mengikuti dari tiga kategori sebagai berikut :

1. Aktif : terkorosi bebas misalnya baja dalam air laut
2. Imun : logam dalam keadaan terlindung baik secara katodik ataupun coating
3. Pasif : logam dalam keadaan terlindung oleh selaput permukaan berupa selaput oksida yang tebentuk oleh korosi itu sendiri



Gambar 15 Karakterustik umum kurva Lelah korosi (Trethewey, 1991)

Kebaruan/Novelty Penelitian

Beberapa anodisasi memiliki sifat beracun dan ketahanan korosinya kurang baik karena lapisan tipis dengan porositas tinggi dan pori-pori besar dan dapat mengurangi umur fatik. Sehingga diperlukan anodizing yang dapat memperbaiki sifat korosi dan umur fatik .Anodizing BSAA sudah digunakan berupa campuran asam borat dan sulfat. direkomendasikan untuk campurannya yaitu 30,5 hingga 52,0 gr/l asam sulfat, 5,2 sampai 10,7 gr/l asam borat (Wong, 1989).

Penggunaan inhibitor molibdat karena kemampuan untuk melindungi besi dan logam *nonferrous* serta toksisitasnya yang sangat rendah (Vukasovich dan Farr 1986). Disamping itu hasil penelitian menunjukkan bahwa Na_2MoO_4 merupakan inhibitor yang baik, dan efisiensi inhibisi diperoleh lebih tinggi dari 84% pada 20 mM (Li dkk. 2011). Molibdat dapat menjadi pengganti pelapis berbasis kromium (Liang dkk. 2014),

(Hamdy, Beccaria, and Traverso 2005), dan juga merupakan inhibitor korosi yang efisien dalam media netral dan asam (Silva dkk. 2005), (Li dkk. 2011), dan (Emregül dan Aksüt 2003).

Sebagai teknik anodisasi yang ramah lingkungan, lapisan anodik asam borat / sulfat (BSAA) menghasilkan ketahanan korosi yang sangat baik dan tidak mengurangi umur fatik paduan aluminium7050 (Du dkk, 2012). (Shen dkk. 2015) meneliti dua jenis lapisan anodik CAA dan BSAA, dimana lapisan BSAA memiliki ketahanan korosi yang hampir sama dengan lapisan CAA, lapisan BSAA juga tidak memiliki pengaruh yang besar terhadap inisiator retak fatik dibandingkan lapisan CAA pada paduan Al-Li 2060-T8, sehungga digunakan elektrolit BSAA (*Boric/Sulfuric acid*) karena memiliki karakteristik ketahanan korosi dan umur fatik yang baik.

Dari berbagai penelitian sebelumnya terlihat bahwa anodisasi memberikan efek yang baik terhadap laju korosi, namun berdampak pada pengurangan umur fatik, sehingga diperlukan proses anodisasi yang berdampak pada pengurangan laju korosi dan peningkatan umur fatik korosi. Pada anodisasi BSAA *(Boric/Sulfuric acid)* dengan penambahan inhibitor molibdat (MoO_4) diharapkan ditemukan kombinasi yang optimal, dan menjadi alternatif untuk meningkatkan performa dalam menghambat laju korosi sekaligus fatik korosi dalam media 3,5% NaCl serta memberikan peluang pada pengembangan metode selanjutnya.

2.2 Hipotesis Penelitian

Berikut adalah hipotesis mengenai laju korosi dan perambatan retak pada hasil anodizing BSAA dengan penambahan inhibitor molibdat:

1. **Pengaruh penggunaan sealing**

   penggunaan sealing pada proses anodizing BSAA akan mengurangi laju korosi. Sealing dapat berfungsi menutupi pori akibat proses anodizing dapat menjadikan permukaan lebih homogen sehingga menghalami interaksi media korosif masuk kedalam pori lebih jauh.sehingga dapat memperlambat laju korosi

2. **Pengaruh sealing terhadap Perambatan Retak:**

   Inhibitor molibdat tidak hanya berfungsi untuk mengurangi laju korosi, tetapi juga dapat memperlambat perambatan retak. Dengan mengurangi korosi, potensi pembentukan retakan yang disebabkan oleh korosi akan berkurang, sehingga meningkatkan umur pakai material.

3. **Korelasi antara Konsentrasi Inhibitor dan Laju Korosi:**

Terdapat hubungan invers antara konsentrasi inhibitor molibdat dan laju korosi diperoleh hubungan bahwa dengan penambahan molibdat akan berpengaruh terhadap perambatan retak **Dampak Lingkungan Terhadap Efektivitas Inhibitor:** Efektivitas inhibitor molibdat dapat bervariasi tergantung pada kondisi lingkungan (seperti pH, suhu, dan keberadaan ion lain), yang akan mempengaruhi laju korosi dan perambatan retak.

Metodologi untuk Pengujian

1. **Analisis Mikroskopis:** Melakukan analisis mikroskopis permukaan (SEM) untuk mengamati perubahan struktur dan lapisan pelindung yang mungkin terbentuk akibat proses anodizing
2. **Uji Korosi:** Menggunakan metode pengukuran laju korosi (pengukuran potensiodinamik) untuk memperoleh laju krosi baik tanpa atau dengan penambahan inhibitor dan menghasilkanTaffel plot.
3. **Uji Perambatan Retak:** Menggunakan teknik pengujian fatik korosi menghasilkan data ketahanan retak untuk menilai perambatan retak pada kondisi yang berbeda.

Hipotesis ini dapat menjadi dasar untuk penelitian lebih lanjut dalam memahami pengaruh inhibitor molibdat pada material anodizing BSAA.