

SKRIPSI

**PENGARUH KONSENTRASI NaCl TERHADAP KOROSI KELELAHAN
PADA ALUMINIUM 5005**

Oleh :

IMAM ADLI AGIL
D211 15 029



DEPARTEMEN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

SKRIPSI

**PENGARUH KONSENTRASI NaCl TERHADAP KOROSI KELELAHAN
PADA ALUMINIUM 5005**

Disusun dan diajukan oleh:

**IMAM ADLI AGIL
D211 15 029**

**Merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2021

LEMBAR PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan mengikuti ujian akhir guna memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Pada tanggal 2 Juni 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

JUDUL :

**PENGARUH KONSENTRASI NaCl TERHADAP KOROSI KELELAHAN
PADA ALUMINIUM 5005**

IMAM ADLI AGIL
D211 15 029

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Hairul Arsyad, ST., MT
NIP. 19750322 200212 1 001

Dr. Muhammad Syahid, ST., MT
NIP. 19770707 200501 1 001

Mengetahui,
Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT.
19720825 200003 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Imam Adli Agil
NIM : D21115029
Program Studi : Teknik Mesin
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

PENGARUH KONSENTRASI NaCl TERHADAP KOROSI KELELAHAN PADA ALUMINIUM 5005

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri .

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa Sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain ,maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa , 2 Juni 2021

Yang Menyatakan



Imam Adli Agil

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Nama : Imam Adli Agil

Tempat Tanggal Lahir : Tebba 2 Mei 1996

Alamat : Perintis Kemerdekaan 9

Jenis Kelamin : Laki-laki

Agama : Islam

Telepon : 0821 8952 7355

E-mail : imamadliagil09@gmail.com

Riwayat Pendidikan : SMKN 5 MAKASSAR
SMPN 1 SALOMEKKO
SDN 254 TEBBA

Riwayat Organisasi : OKFT UH
HMM FT UH
EGRECIF (East Green for Indonesian
Future Hasanuddin University)
ANGING MAMMIRI TEAM

Pengalaman Magang (*Internship*) : PT VALE INDONESIA Tbk

ABSTRAK

Imam Adli Agil (D21115029).Pengaruh Konsentrasi NaCl Terhadap Perlakuan Korosi Kelelahan Pada Aluminium 5005. (Dibimbing oleh Dr. Hairul Arsyad, ST., MT. Dan Dr. Muhammad Syahid, ST., MT.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui (1) Pengaruh penambahan NaCl terhadap Korosi Kelelahan Aluminium 5005 pada Kekasaran permukaan kasar, sedang dan 500. (2)Pengaruh kekasaran terhadap Korosi Kelelahan aluminium 5005 pada konsentrasi NaCl 5%,10%,20% (3) Hasil foto patahan pada pengujian korosi kelelahan aluminium 5005.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah siklus yang menurun pada spesimen yang telah diberi konsentrasi NaCl 5% sampai dengan 20% dengan kekasaran permukaan kasar dengan jumlah siklus 14476 sampai 7059, pada spesimen dengan kekasaran permukaan sedang memiliki jumlah siklus 25101 sampai 8482, dan pada spesimen dengan kekasaran permukaan halus memiliki jumlah siklus 33569 sampai 12183. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi konsentrasi NaCl yang diberikan maka semakin rendah jumlah siklus yang didapatkan, sedangkan pada spesimen yang memiliki kekasaran permukaan dengan kekasaran permukaan kasar sampai dengan halus menunjukkan bahwa jumlah siklus yang meningkat. Pada spesimen dengan NaCl 5% memiliki jumlah siklus 12104 sampai 33569, pada spesimen dengan NaCl 10% memiliki jumlah siklus 10233 sampai 18395, dan pada spesimen NaCl 20% memiliki jumlah siklus 7059 sampai 12183. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi tingkat kekasaran permukaan maka semakin besar jumlah siklus yang didapatkan. Dari pengamatan hasil foto makro patahan bentuk patahan spesimen yang diberikan konsentrasi NaCl tinggi cenderung memiliki bentuk patahan yang halus Sementara, untuk spesimen yang diberikan konsentrasi NaCl rendah cenderung memiliki bentuk patahan yang kasar

Kata kunci : Aluminium AL5005, Konsentrasi NaCl, Kekasaran Permukaan, Foto Makro Patahan

ABSTRACT

Imam Adli Agil (D21115029). Effect of concentration of NaCl Against Treatment of Fatigue Corrosion In Aluminum 5005. (Supervised by Dr. Hairul Arsyad, ST., MT. And Dr. Muhammad Shahid, ST., MT .

This study aims to determine (1) The effect of the addition of NaCl on the corrosion fatigue of Aluminum 5005 at Grit Sandpaper kasar, sedang and 500. (2) The effect of roughness on the corrosion fatigue of 5005 aluminum at a concentration of NaCl 5%, 10%, 20% (3) The results of the photo of the fracture in the 5005 aluminum fatigue test.

Results of the study showed that the number of cycles that decreases the specimen which has been given the concentration of NaCl 5% up to 20% by rough surface roughness with the number of cycles 14476 until 7059 , on specimens with medium surface roughness has a number of cycles 25101 until 8482 , and the specimens with smooth surface roughness has a number of cycles of 3 3569 to 1 2183 . It is caused due to increasingly higher concentrations of NaCl were given the increasingly lower number of cycles were obtained , while the specimen which has roughness surface with grit sandpaper kasar up to 40 0 indicates that the number of cycles are increased . The specimens with 5% NaCl had a cycle number of 12104 to 3 3569 , the specimens with 10% NaCl had a number of cycles of 10 233 to 18395 , and the 20% NaCl specimens had a number of cycles of 7 059 to 12183 . It is caused due to increasingly higher levels of roughness surface of the increasingly large number of cycles that didpapatkan . From the observation results of photo macro fracture form fracture specimens were given the concentration of NaCl higher tend to have a form of fracturing the delicate Meanwhile , for specimens that given the concentration of NaCl low tend to have a form of fracturing the rough

Words key : Aluminum AL 5005 , concentrations of NaCl, Roughness Surface , Photo Macro Fault

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr.Wb.

Puji dan syukur dipanjatkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan kekuatan, rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini dengan judul **“Pengaruh Konsentrasi NaCl Terhadap Korosi Kelelahan Pada Aluminium 5050”** Penyusunan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Makassar.

Penulis menyadari dalam penyusunan skripsi ini masih terdapat kekurangan dikarenakan keterbatasan penulis sebagai manusia biasa. Untuk itu penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dalam skripsi ini. Semoga skripsi ini berguna bagi penulis dan pihak-pihak lain sebagai acuan untuk kebutuhan ilmu pengetahuan.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan bimbingan serta masukan, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulis juga sangat menyadari penyusunan skripsi ini tidak akan selesai tanpa kerja keras penulis dan bantuan orang-orang terdekat yang selalu memberikan berbagai macam dukungan dan masukan demi kelancaran skripsi ini. Atas alasan itu pula penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua saya tercinta Saharuddin dan Sudarliati terima kasih atas semua kasih sayang, doa dan petuahnya yang tidak pernah putus, beliau adalah semangat penulis dalam menyelesaikan studi ini.
2. Khaerunnisa sebagai kakak yang selalu siap sedia memberi doa dan dukungan kepada penulis serta adik Syukran Almujaahid, Zafira, Subhan terima kasih doa dan dukungannya.
3. Bapak Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT. selaku ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin beserta seluruh staff Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bantuan dan kemudahan administrasi yang diberikan.
4. Bapak Dr. Hairul Arsyad, ST., MT. selaku pembimbing I penulisan Skripsi ini.

5. Bapak Dr. Muhammad Syahid, ST., MT. selaku pembimbing II penulisan Skripsi ini.
6. Bapak Dr.Eng Lukmanul Hakim Arma, ST., MT. selaku penguji I.
7. Bapak Dr.Ir.H. Ilyas Renreng, M.T.selaku penguji II.
8. Segenap Dosen Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
9. Saudara-saudara seperjuangan penulis Hydraulic 2015 yang sudah menjadi tim hore dan tim support paling hebat yang selalu ada dalam suka maupun duka, yang bahkan saya tidak yakin bisa menyelesaikan penelitian ini dengan baik tanpa mereka.
10. Penghuni kost Lantai 1 A. Ilham Akbar, Lukman Hakim, Al Ashry, Fahrul Islam, Akbar Ali, Wahyudi Rizal Amil. A. K, Arifuddin, Rijal S. Amin, Hasan, Chatib, Kaspar, Agim, Fadil. H,terima kasih saudara atas kebersamaannya selama ini.
11. Penghuni warkop EWR ,Iqra,Chandra,Imran,Fadil
12. Teman – teman seperjuangan Laboratorium Metalurgi Fisik
13. Pengurus HMM FT UH Periode 2018 atas pengalaman dan kisah berkesannya.
14. Tim Anging Mammiri atas perjuangan dan semangatnya dalam lomba KMHE.
15. Teman-teman KKN PPM Pulau Batang Lampe tahun 2019 yang selalu memberikan semangat untuk penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
16. Terakhir untuk Ayu Lestari.S,Si yang selalu memberi motivasi penulis sejak dari awal pengerjaan tugas akhir ini.

Imam Adli Agil

Gowa, April 2021

DAFTAR ISI

SKRIPSI.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT.....	vi
KATA PENGANTAR	vii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Aluminium.....	5
2.2 Aluminium dan Paduannya	6
2.3 Korosi	16
2.4 Kekuatan Fatik.....	20
2.5 Korosi Kelelahan.....	26
2.6 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Korosi Kelelahan.....	30
2.7 Mekanisme Korosi Kelelahan	39
2.8 Kekasaran Permukaan	41
BAB III METODELOGI PENELITIAN	46
3.1 Waktu dan Tempat	46
3.2 Alat dan Bahan	46
3.3 Diagram Alir Penelitian.....	53
3.4 Prosedur Penelitian.....	54
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	60
4.1 Hasil Penelitian.....	62

BAB V KESIMPULAN	78
5.1 Kesimpulan dan Saran.....	78
5.2 Saran.....	79
DAFTAR PUSTAKA	80
LAMPIRAN	82

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram fasa Aluminium 5005	13
Gambar 2. 2	Struktur Mikro Paduan Aluminium.....	14
Gambar 2. 3	Grafik uji Tarik Aluminium 5005.....	14
Gambar 2.4	Distribusi mode kegagalan	20
Gambar 2.5	kurva khusus Fatik untuk besi dan logam bukan besi	21
Gambar 2.6	Superposisi dari tegangan terapan dan sisa (Dieter, 1988).....	21
Gambar 2.7	Grafik pembebanan dengan Amplitudo Konstan	22
Gambar 2.8	kurva S-N.....	24
Gambar 2. 9	Diagram Goodman.....	25
Gambar 2.10	Corrosion-fatigue and its general effect on the behaviour of steel	26
Gambar 2.11	Solubility of oxygen in water at different temperatures	32
Gambar 2.12	Effect of NaCl concentration on the corrosion of Fe.....	32
Gambar 2.13	Surface Texture Features	42
Gambar 2.14	Kurva Kekasaran High of Roughness Curve (Rt)	43
Gambar 3.1	Mesin Uji fatik.....	46
Gambar 3.2	Mikroskop Optik Gerinda,.....	48
Gambar 3.3	Gerinda tangan.....	48
Gambar 3.4	kikir tangan Ragum.....	48
Gambar 3.5	Ragum.....	49
Gambar 3.6	Jangka Sorong.....	49
Gambar 3.7	Gelas Beaker Volume kasar 0 ml	49
Gambar 3.8	Mesin amplas	50
Gambar 3.9	Timbangan digital.....	50
Gambar 3.10	Lab Chamois.....	50
Gambar 3.11	Pegas uji tarik	51
Gambar 3.12	Plat Aluminium 5005.....	51
Gambar 3.13	NaCl Padat.....	51
Gambar 3.14	Aquades	52
Gambar 3.15	Bentuk Spesimen pengujian fatik	54
Gambar 3.16	Proses pembuatan alat uji fatik	56
Gambar 3.17	Proses Uji Tarik Pegas.....	56
Gambar 3.18	Proses kalibrasi beban pada alat uji fatik.....	57
Gambar 3.19	Proses pembuatan larutan NaCl.....	57
Gambar 3.20	Proses pengujian Korosi Kelelahan	58
Gambar 3. 21	Proses penimbangan spesimen	59
Gambar 4. 1	Proses pengujian Korosi Kelelahan	60
Gambar 4. 2	Kalibrasi pegas pada alat uji tarik.....	61
Gambar 4. 3	Grafik uji tarik pegas.	62
Gambar 4. 4	Grafik siklus pada alat fatik.....	63

Gambar 4. 5 Grafik pengujian Korosi Kelelahan pada kekasaran permukaan kasar	64
Gambar 4. 6 Grafik pengujian Korosi Kelelahan pada kekasaran permukaan sedang.....	65
Gambar 4. 7 Grafik pengujian Korosi Kelelahan pada kekasaran permukaan halus	66
Gambar 4. 8 Grafik pengujian Korosi Kelelahan dengan variasi larutan NaCl..	67
Gambar 4. 9 Grafik hubungan antara siklus dengan kekasaran permukaan pada konsentrasi NaCl 5%	68
Gambar 4. 10 Grafik hubungan antara siklus dengan kekasaran permukaan pada konsentrasi NaCl 10%	69
Gambar 4. 11 Grafik hubungan antara siklus dengan kekasaran permukaan pada konsentrasi NaCl 20%	70
Gambar 4. 12 Grafik pengujian Korosi Kelelahan dengan variasi kekasaran permukaan.....	71
Gambar 4. 13 Foto patahan pada Kekasaran permukaan kasar dan 3 variasi konsentrasi NaCl	74
Gambar 4. 14 Foto patahan pada Kekasaran permukaan sedang dan 3 variasi konsentrasi NaCl	75
Gambar 4. 15 Foto patahan pada Kekasaran permukaan halus dan 3 variasi konsentrasi NaCl	76

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Daftar seri paduan aluminium tempa	7
Tabel 2. 2 Klasifikasi paduan tempa aluminium, mekanisme penguatan, dan rentang nilai kekuatannya	8
Tabel 2. 3 Klasifikasi paduan aluminium.....	9
Tabel 2. 4 Klasifikasi paduan aluminium tempaan dengan unsur paduan utamanya.	9
Tabel 2. 5 Paduan Aluminium 5005.....	13
Tabel 4. 1 Perbandingan siklus vs konsentrasi NaCl	67
Tabel 4. 2 Perbandingan antara siklus vs Kekasaran permukaan.....	71

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Aluminium adalah logam ringan yang banyak digunakan dalam kehidupan manusia setelah baja, karena memiliki beberapa kelebihan yaitu aluminium merupakan logam ringan, konduktivitas panas dan listrik yang tinggi, memiliki kekuatan tarik yang tinggi, ketahanan korosi yang baik, memiliki keuletan tinggi, mudah dibentuk dan mudah disambung (seperti dilas) bahkan mudah di daur ulang (Shahnavaz dkk, 2010).

Dalam dunia industri saat ini sangat memperhatikan efek korosi pada kekuatan kelelahan komponen dan struktur mekanik. Pengaruh gabungan dari korosi dan pembebanan siklik diketahui mempengaruhi sifat-sifat mekanis dari paduan logam dan telah terbukti memicu retakan dari cacat permukaan yang disebabkan oleh korosi . Kerusakan Korosi Kelelahan terkait dengan efek sinergis mekanik / elektrokimia. Efek-efek ini diatur oleh beberapa parameter: faktor mekanik, metalurgi, fisika, kimia dan elektrokimia (Mohamed El May, dkk 2015).

Kelelahan (*fatigue*) adalah melemahnya suatu material yang disebabkan oleh beban yang berkali-kali diberikan terhadap material (Dieter, 1998). Mekanisme terjadinya kegagalan fatik dapat dibagi menjadi tiga fase yaitu : awal retak (*initiation crack*), perambatan retak (*crack propagation*) dan perpatahan akhir (*fracture failure*). Dua tahap pertama menentukan umur material . Kegagalan Korosi Kelelahan secara istimewa dimulai dari lubang-lubang korosi, karena pembubaran anodik di dalam lubang dipercepat oleh mekanisme mekanik dan kerusakan yang tidak dapat diperbaiki yang disebabkan oleh produk korosi. Meskipun mekanisme perambatan retak fatik sangat rumit, efek korosi pada perambatan retak jelas tidak dapat diabaikan (Han, dkk. 2019).

Secara umum, umur Korosi Kelelahan dapat diklasifikasikan ke dalam dua langkah: *the corrosion fatigue crack initiation* (CFCI) dan *the corrosion fatigue crack propagation* (CFCP). Mekanisme CFCP mirip dengan *stress corrosion cracking* (SCC). Meskipun mekanisme SCC tidak jelas, biasanya dijelaskan dengan embrittlement hidrogen. Di sini, laju CFCP dianggap sebagai laju perambatan retak yang dipercepat dari SCC yang dipromosikan dalam lingkungan korosif tertentu dengan pembebanan siklik. Dua mekanisme yang mungkin seperti pembubaran anodik dan hidrogen embrittlement diadopsi untuk menggambarkan percepatan laju perambatan retak pada lingkungan korosif. *The corrosion fatigue crack propagation* (CFCP) terjadi akibat adanya kombinasi kerusakan korosi dan slip relatif logam pada ujung retak di bawah pembebanan siklik. Proses ini dikendalikan oleh tiga mekanisme utama: slip relatif dari logam di ujung retak, korosi permukaan kosong dari elemen material yang retak dan penutupan retak. Korosi dalam proses CFCP terjadi terutama pada permukaan yang terbuka setelah elemen materialnya retak (Hwan Kang, dkk. 2011).

Menurut Marta Morgantini penelitian telah banyak dilakukan untuk memahami bagaimana lingkungan korosif mempengaruhi umur kelelahan baja dan bagaimana kekuatan Korosi Kelelahan material berkurang. Biasanya, kondisi air laut diuji dan banyak data tersedia dalam literatur yang relevan dengan kondisi ini. Namun, lingkungan korosif lainnya kurang mendapat perhatian dalam penelitian dan, akibatnya, lebih sedikit data yang tersedia (Marta Morgantini, dkk 2018). Namun pada penelitian ini, peneliti berfokus pada perilaku Korosi Kelelahan pada lingkungan asam. Adapun tambahan penjelasan mengenai tegangan rata-rata pada paragraf ini hanya sebagai informasi pelengkap tentang Korosi Kelelahan.

Berdasarkan uraian tersebut, maka penulis terdorong untuk melakukan penelitian sebagai tugas akhir dengan judul **“Pengaruh Konsentrasi NaCl Terhadap Korosi Kelelahan Pada Aluminium 5005”**

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dikemukakan diatas, maka dapat dirumuskan beberapa rumusan masalah, yakni

1. Bagaimana pengaruh penambahan NaCl terhadap korosi kelelahan Aluminium 5005 pada kekasaran permukaan kasar, sedang dan halus?
2. Bagaimana pengaruh kekasaran terhadap Korosi Kelelahan aluminium 5005 pada konsentrasi NaCl 5%,10%,20% ?
3. Bagaimana bentuk hasil foto patahan pada pengujian korosi kelelahan aluminium 5005?

1.3 Tujuan Penelitian

Beberapa hal Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini, yakni sebagai berikut

1. Menganalisa pengaruh penambahan NaCl terhadap korosi kelelahan Aluminium 5005 pada kekasaran permukaan kasar, sedang dan halus?
2. Menganalisa pengaruh kekasaran terhadap korosi kelelahan aluminium 5005 pada konsentrasi NaCl 5%,10%,20% ?
3. Menganalisa bentuk patahan pada pengujian korosi kelelahan aluminium 5005?

1.4 Batasan Masalah

Agar penulisan Tugas Akhir ini lebih terarah, maka penulis memberikan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Material yang digunakan adalah aluminium 5005.
2. Penambahan NaCl 5%,10%,20% pada aquades.
3. Pengujian korosi kelelahan dan foto patahan
4. Variasi kekasaran permukaan Kasar (100),Sedang (240),Halus (400).
5. Menganalisis pengaruh konsentrasi NaCl terhadap korosi kelelahan.
6. Pengujian Korosi Kelelahan tarik tarik
7. Pengujian korosi kelelahan ini menggunakan beban konstan dimana beban maksimum 150 Mpa dan beban minimum 140 Mpa.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat dari penelitian tersebut dibagi menjadi dua, yaitu sebagai berikut:

1. Manfaat Langsung

Dapat mengetahui Korosi Kelelahan pada Aluminium 5005 dan menambah ilmu pengetahuan, khususnya mengenai ilmu metalurgi.

2. Manfaat Tidak Langsung

Secara tidak langsung, data-data yang diperoleh dalam penelitian ini dapat bermanfaat bagi perusahaan aluminium maupun bagi para Peneliti selanjutnya.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I Pendahuluan

Berisi latar belakang yang memperkenalkan gambaran mengenai korosi kelelahan, serta rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, metode pengumpulan data dan sistematika penulisan.

BAB II Landasan Teori

Berisi tentang tinjauan pustaka atau teori-teori penunjang yang berhubungan dengan penelitian.

BAB III Metodologi Penelitian

Berisi tentang proses penelitian secara lengkap.

BAB IV Hasil dan Pembahasan

Berisi tentang hasil dari eksperimen korosi kelelahan dengan pembahasan dan analisisnya.

BAB V Penutup

Berisi kesimpulan dari hasil penelitian serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aluminium

Aluminium ditemukan oleh Sir Humphrey Davy dalam tahun 1809 sebagai suatu unsur, dan pertama kali direduksi sebagai logam oleh Oersted. Tahun 1825. Secara industri tahun 1886, Paul Heroult di Perancis dan C.M. Hall di Amerika Serikat secara terpisah telah memperoleh logam aluminium dari alumina dengan cara elektrolisis dari garamnya yang terfusi. Sampai saat ini proses Heroult Hall masih dipakai untuk memproduksi aluminium. Penggunaan aluminium sebagai logam setiap tahunnya adalah urutan yang kedua setelah besi dan baja, yang tertinggi di antara logam non-fero. Aluminium merupakan logam ringan mempunyai ketahanan korosi yang baik dan hantaran listrik yang baik dan sifat-sifat yang baik lainnya sebagai sifat logam. (Surdia and Saito, 1999)

Aluminium dikenal sebagai bahan yang tahan terhadap korosi yang diakibatkan karena fenomena pasivasi, yaitu proses pembentukan lapisan aluminium oksida dipermukaan logam aluminium setelah logam terpapar oleh udara bebas. Lapisan aluminium oksida ini mencegah terjadinya oksidasi lebih jauh. Namun, pasivasi dapat terjadi lebih lambat jika dipadukan dengan logam yang bersifat katodik, karena dapat mencegah oksidasi. (Rahmad & Ari Satmoko, 2012)

Untuk menambahkan kekuatan mekaniknya maka aluminium dipadukan dengan Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Ni, dsb, secara satu persatu atau bersama-sama, memberikan juga sifat-sifat yang baik lainnya seperti ketahanan korosi, ketahanan aus, koefisien pemuaian dsb. Material ini dipergunakan dalam bidang yang luas bukan saja untuk peralatan rumah tangga tapi juga dipakai untuk keperluan material pesawat terbang, mobil, kapal laut, konstruksi dsb. (Surdia and Saito, 1999)

Aluminium memiliki kerapatan hanya 2,7 g / cm³, kira-kira sepertiga sebagai sebanyak baja (7,83 g / cm³). Satu kubik baja beratnya sekitar 490 lb sedangkan aluminium, hanya sekitar 170 lb. Bobot yang ringan, ditambah dengan kekuatan tinggi dari beberapa paduan aluminium (melebihi baja struktural), memungkinkan desain dan konstruksi struktur yang kuat dan ringan yang sangat menguntungkan untuk segala sesuatu yang bergerak kendaraan ruang angkasa dan pesawat terbang serta semua jenis kendaraan darat dan air. Aluminium menolak jenis oksidasi progresif yang menyebabkan baja berkarat. Permukaan aluminium yang terbuka bergabung dengan oksigen untuk membentuk film aluminium oksida inert hanya sekitar sepuluh juta inci tebal, yang menghalangi oksidasi lebih lanjut. Dan, tidak seperti besi karat, film aluminium oksida tidak mengelupas untuk mengekspos permukaan baru untuk oksidasi lebih lanjut. Jika lapisan pelindung aluminium tergores, ia akan langsung melindungi kembali dirinya. Lapisan oksida tipis itu sendiri melekat erat pada logam dan tidak berwarna dan transparan tidak terlihat oleh mata telanjang. Perubahan warna dan pengelupasan karat besi dan baja tidak terjadi pada aluminium.

Bila dipadukan dengan baik, aluminium dapat menahan korosi oleh air, garam, dan faktor lingkungan lainnya, dan oleh berbagai macam bahan kimia dan fisik lainnya. Karakteristik korosi paduan aluminium diperiksa pada bagian permukaan aluminium bisa sangat reflektif. Energi radiasi, panas radiasi, dan gelombang elektromagnetik secara efisien direfleksikan, sementara permukaan anodisasi anodized dan gelap dapat menjadi reflektif atau penyerap. Reflektansi dari aluminium yang dipoles, pada rentang panjang gelombang yang luas, mengarah pada pemilihannya untuk berbagai penggunaan dekoratif dan fungsional (Davis, 2013)

2.2 Aluminium dan Paduannya

Berdasarkan metode peleburannya, paduan aluminium dikelompokkan menjadi dua kelompok utama yaitu paduan tempa (*wrought*) dan paduan tuang (*casting*). Jenis paduan aluminium saat ini sangat banyak dan tidak menutup kemungkinan ditemukannya lagi jenis paduan aluminium baru, oleh

karena itu dibuat sistem penamaan sesuai dengan komposisi dan karakteristik paduan aluminium tersebut untuk memudahkan pengklasifikasinya. Salah satu penamaan paduan standar AA, seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Daftar seri paduan aluminium tempa

Paduan Tempa	Penandaan
Aluminium (min.) 99.00%	1XXX
Tembaga	2XXX
Mangan	3XXX
Silikon	4XXX
Magnesium	5XXX
Magnesium dan Silikon	6XXX
Seng	7XXX

(Sumber: Smallman, R.E. dan Bishop, R.J., 2000)

Paduan aluminium tempa, seri 1xxx digunakan untuk aluminium murni, paduan aluminium diidentifikasi dengan sistem empat digit berdasarkan elemen paduan utamanya. Untuk paduan tempa (*wrought*, yang mengalami perubahan bentuk) digit pertama mengidentifikasi kelompok paduan dan digit kedua menunjukkan modifikasi paduan asli yang diidentifikasi dengan dua digit terakhir.

Untuk paduan tunag (*casting*) sistem penamaan agak berbeda. Di sini digit pertama mengidentifikasi kelompok, dua digit berikutnya mengidentifikasi paduan dan digit terakhir yang didahului desimal mengacu bentuk produk (misalnya, 0 untuk hasil coran dan 1 untuk ingot). (Smallman, R.E. dan Bishop, R.J., 2000)

Berdasarkan metode pengerasannya, aluminium dapat dibagi menjadi dua kelompok, *heat treatable alloys* dan *non-heat treatable alloys*. *Heat treatable alloys* adalah paduan aluminium yang dapat diperkeras dengan penuaan (*aging*). Sementara *non-heat treatable alloys* tidak dapat diperkuat dengan penuaan melainkan dengan penguatan larutan-padat (*solid solution*

strengthening), pengerasan butir (*strain hardening*), atau pengerasan dispersi (*dispersion strengthening*).

Paduan tempa yang dapat diperkuat lewat perlakuan panas adalah kelas 2xxx, 6xxx, 7xxx, dan beberapa jenis dari kelas 8xxx. Beberapa kombinasi penambahan unsur pepadu, mekanisme penguatannya, serta perkiraan nilai kekuatan yang dapat dicapai dapat dilihat dalam Tabel 2.2 . (Hatch, 1984)

Tabel 2. 2 Klasifikasi paduan aluminium, mekanisme penguatan, dan rentang nilai kekuatannya

Seri Aluminium	Sistem Paduan	Tensile Strength (MPa)
Work- hardenable alloys		
1xxx	Al murni	70-75
3xxx	Al-Mn-Mg	140-280
4xxx	Al-Si	105-350
5xxx	Al-Mg	140-280
Precipitation-hardenable alloys		
2xxx	Al-Cu-Mg	170-310
2xxx	Al-Cu-Mg-Si	380-520
6xxx	Al-Mg-Si	150-380
7xxx	Al-Zn-Mg	380-520
7xxx	Al-Zn-Mg-Cu	520-620
8xxx	Al-Li-Cu-Mg	280-560

(Sumber: Subagyo, 2017)

Berikut ini tabel klasifikasi aluminium paduan yang dapat diperkuat dengan perlakuan panas dan yang tidak dapat di berikan perlakuan panas. Seperti pada Tabel 2.2 yang memeberikan perkiraan nilai kekuatan yang dapat dicapai dan Tabel 2.3 yang merupakan pengelompokan paduan Aluminium. Dari tabel tersebut akan diketahui kodefikasi dan sifat bahan alumunium dengan paduan yang berbeda-beda sesuai dengan pengelompokan atau klasifikasi.

Tabel 2. 3 Klasifikasi paduan aluminium.

Al paduan untuk dimesin	Paduan jenis tidak dapat di perlakuan panas (non-heat-treatable)	Al murni (seri 1000) Paduan Al-Mn (seri 3000) Paduan Al-Si (seri 4000) Paduan Al-Mg (seri 5000)
	Paduan jenis dapat perlakuan panas (heat-treatable)	Paduan Al-Cu (seri 2000) Paduan Al-Mg-Si (seri 6000) Paduan Al-Zn (seri 7000)
Al paduan untuk coran	<i>Non-heat-treatable alloy</i>	Paduan Al-Si (Silumin) Paduan Al-Mg (Hydronarium)
	<i>Heat-treatable alloy</i>	Paduan Al-Cu (Lautal) Paduan Al-Si-Mg (Silumin, Lo-ex)

(Sumber: Subagyo, 2017)

Selain klasifikasi aluminium paduan Tabel 2.5, berikut ini merupakan tabel klasifikasi aluminium berdasarkan paduan utama dan proses pengerjaannya dengan proses penempaan, dapat dijelas melalui Tabel 2.6 merupakan klasifikasi aluminium berdasarkan perlakuan yang dilakukan.

Tabel 2. 4 Klasifikasi paduan aluminium tempaan dengan unsur paduan utamanya.

Standar AA	Standar Alcoa terdahulu	Keterangan
1001	1S	Al murni 99,5% atau di atasnya
1100	2S	Al murni 99,0% atau di atasnya
2010-2029	10S-29S	Cu merupakan unsur paduan utama
3003-3009	3S-9S	Mn merupakan unsur paduan utama
4030-4039	30S-39S	Si merupakan unsur paduan utama
5050-5086	50S-69S	Mg merupakan unsur paduan utama
6061-6069		Mg ₂ Si merupakan unsur paduan utama
7070-7079	70S-79S	Zn merupakan unsur paduan utama

(Sumber: Surdia T. dan Saito, 1995)

Berikut ini merupakan jenis-jenis aluminium paduan yang sering digunakan dan paduan aluminium dengan proses pengerjaan yang berbeda-beda.

a. Paduan Aluminium-Silikon

Paduan aluminium dengan silikon hingga 15% akan memberikan kekerasan dan kekuatan tensil yang cukup besar, hingga mencapai 525 MPa pada aluminium paduan yang dihasilkan pada perlakuan panas. Jika konsentrasi silikon lebih tinggi dari 15%,

tingkat kerapuhan logam akan meningkat secara drastis akibat terbentuknya kristal granula silika.

b. Paduan Aluminium-Magnesium

Keberadaan magnesium hingga 15,35% dapat menurunkan titik lebur logam paduan yang cukup drastis, dari 660°C hingga 450°C. Namun, hal ini tidak menjadikan aluminium paduan dapat ditempa menggunakan panas dengan mudah karena korosi akan terjadi pada suhu di atas 60°C. Keberadaan magnesium juga menjadikan logam paduan dapat bekerja dengan baik pada temperatur yang sangat rendah, di mana kebanyakan logam akan mengalami *failure* pada temperatur tersebut.

c. Paduan Aluminium-Tembaga

Paduan aluminium-tembaga juga menghasilkan sifat yang keras dan kuat, namun rapuh. Umumnya, untuk kepentingan penempaan, paduan tidak boleh memiliki konsentrasi tembaga di atas 5,6% karena akan membentuk senyawa CuAl_2 dalam logam yang menjadikan logam rapuh.

d. Paduan Aluminium-Mangan

Penambahan mangan memiliki akan berefek pada sifat dapat dilakukan pengerasan tegangan dengan mudah (*work-hardening*) sehingga didapatkan logam paduan dengan kekuatan tensil yang tinggi namun tidak terlalu rapuh. Selain itu, penambahan mangan akan meningkatkan titik lebur paduan aluminium.

e. Paduan Aluminium-Seng

Paduan aluminium dengan seng merupakan paduan yang paling terkenal karena merupakan bahan pembuat badan dan sayap pesawat terbang. Paduan ini memiliki kekuatan tertinggi dibandingkan paduan lainnya, aluminium dengan 5,5% seng dapat memiliki kekuatan tensil sebesar 580 MPa dengan elongasi sebesar 11% dalam setiap 50 mm bahan. Bandingkan dengan aluminium

dengan 1% magnesium yang memiliki kekuatan tarik sebesar 410 MPa namun memiliki elongasi sebesar 6% setiap 50 mm bahan.

Selain jenis-jenis aluminium paduan diatas, Aluminium memiliki kelas atau *grade* yang tergantung pada unsur paduan dan perlakuan panas yang dilakukan terhadap paduan aluminium tersebut. *Grade* (kelas) dari aluminium dapat menunjukkan berbagai sifat mekanik dari aluminium tersebut dari penampilan yang baik, kemudahan fabrikasi, ketahanan korosi yang baik, mampu las yang baik dan ketangguhan retak tinggi. Pemilihan *grade* (kelas) aluminium yang tepat tergantung pada aplikasi yang diperlukan dan kondisi kerja. Berikut adalah aluminium paduan yang sesuai dengan *grade* dan kodefikasi yang dimiliki setiap paduan aluminium itu sendiri.

1. *Grade* aluminium Seri 1xxx

Grade dari aluminium ini (1050, 1060, 1kasar, 1145, 1200, 1230, 1350 dan lain-lain) ditandai dengan ketahanan korosi yang sangat baik, konduktivitas termal dan elektrik yang tinggi, sifat mekanik yang rendah, dan kemampuan kerja yang sangat baik. *Grade* aluminium ini memiliki kandungan Besi dan silikonyang besar.

2. *Grade* aluminium Seri 2xxx

Paduan aluminium ini (2011, 2014, 2017, 2018, 2124, 2219, 2319, 201,0; 203,0; 206,0; 224,0; 242,0 dll) memerlukan *solution heat treatment* untuk mendapatkan sifat yang optimal, didalam kondisi *solution heat treatment* , sifat mekanik yang mirip dengan baja karbon rendah dan kadang-kadang melebihi sifat mekanik baja karbon rendah. Dalam beberapa contoh, proses perlakuan panas (aging) digunakan untuk lebih meningkatkan sifat mekanik. Paduan aluminium dalam seri 2xxx tidak memiliki ketahanan korosi yang baik ketimbang kebanyakan paduan aluminium lainnya, dan dalam kondisi tertentu paduan ini mungkin akan terjadi korosi pada antar butir. *Grade* aluminium dalam seri 2xxx ini baik untuk bagian yang

membutuhkan kekuatan yang bagus yaitu pada suhu sampai 150°C (300°F). Kecuali untuk kelas 2219, paduan aluminium ini sudah memiliki mampu las tetapi masih terbatas. beberapa paduan dalam seri ini memiliki kemampuan mesin yang baik.

3. *Grade* aluminium Seri 3xxx

Paduan aluminium ini (3003, 3004, 3105, 383,0; 385,0; A360; 390,0) umumnya memiliki ketidakmampuan panas tetapi memiliki kekuatan sekitar 20% lebih dari paduan aluminium seri 1xxx karena hanya memiliki presentase mangan yang sedikit (sampai sekitar 1,5%) yang dapat ditambahkan ke aluminium. Mangan digunakan sebagai elemen utama dalam beberapa paduan.

4. *Grade* aluminium Seri 4xxx

Unsur paduan utama dalam paduan seri 4xxx (4032, 4043, 4145, 4643 dll) adalah silikon, yang dapat ditambahkan dalam jumlah yang cukup (hingga 12%) menyebabkan substansial menurunkan rentang lebur. Untuk alasan ini, paduan aluminium-silikon yang digunakan dalam kawat las dan sebagai paduan untuk menyolder digunakan untuk menggabungkan aluminium, di mana titik lebur lebih rendah dari logam dasar yang digunakan.

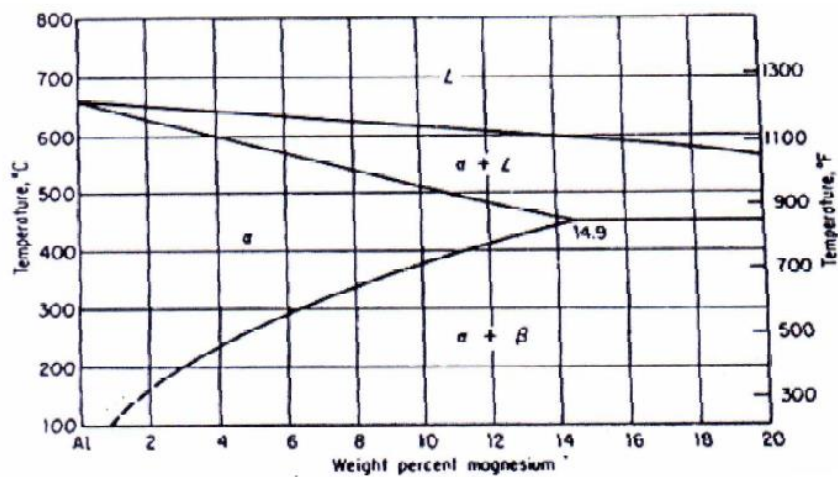
5. *Grade* aluminium Series 5xxx

Unsur paduan utama *grade* aluminium ini adalah magnesium, bila digunakan sebagai elemen paduan utama atau digabungkan dengan mangan, hasilnya adalah paduan yang memiliki kekerasan sedang hingga kekuatan yang tinggi. Magnesium jauh lebih efektif daripada mangan sebagai pengeras - sekitar 0,8% Mg sama dengan 1,25% Mn dan dapat ditambahkan dalam jumlah yang jauh lebih tinggi. Paduan aluminium dalam seri ini (5005, 5052, 5083, 5086, dll) memiliki karakteristik pengelasan yang baik dan ketahanan yang relatif baik terhadap korosi dalam atmosfer laut. Namun, pada pekerjaan dingin harus dilakukan pembatasan dan suhu operasi (150°) diperbolehkan untuk paduan

aluminium yang memiliki magnesium tinggi untuk menghindari kerentanan terhadap korosi retak.

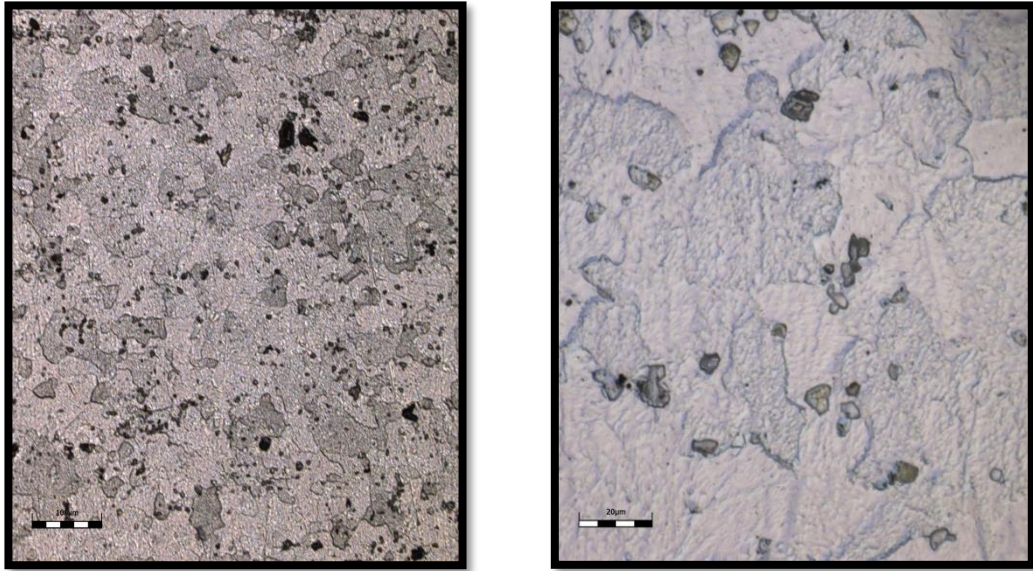
Tabel 2. 5 Paduan Aluminium 5005

HASIL PENGUJIAN XRF	
UNSUR	%
Al	98.60
Cu	1.04
Fe	0.18
Si	0.16
Zn	0.03
Ni	-
-	-
-	-



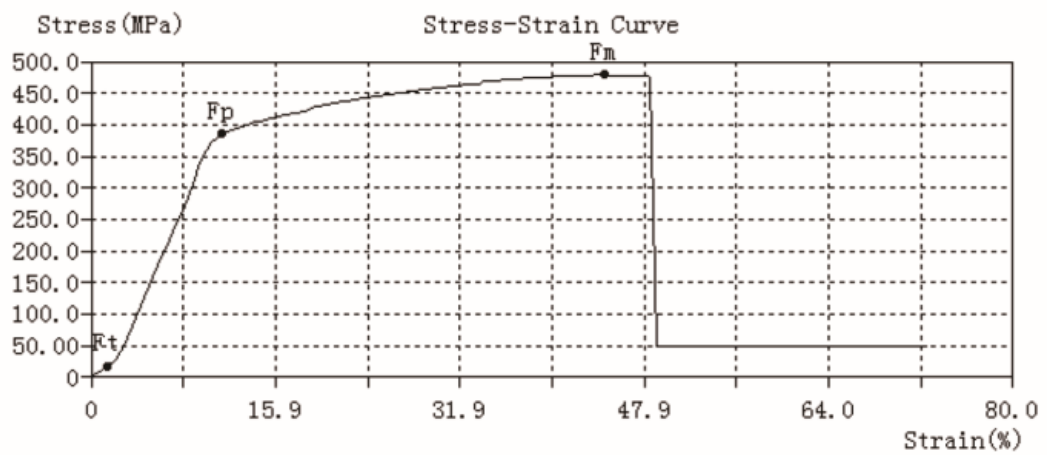
Gambar 2.1 Diagram fasa Aluminium 5005

Garis *solvus* menunjukkan penurunan yang sangat tajam pada kelarutan magnesium dengan penurunan temperature, kebanyakan paduan aluminium tempa pada kelompok ini mengandung magnesium kurang dari 5% dan juga kandungan silikon yang rendah, karakteristik paduan ini ialah mampu las yang baik dan ketahanan korosi yang tinggi.



Gambar 2. 2 Struktur Mikro Paduan Aluminium

SampleID	N3	TestDate	13/9/2020
Operator		Type	Flat
Size(mm)	12.5*1.4	Ao(mm ²)	17.50
Lo(mm)	57	Lu(mm)	
A(%)	/	Au(mm ²)	
Z(%)	/	Fm(kN)	8.40
Rm(MPa)	480	FeH(kN)	/
UYS(MPa)	/	FeL(kN)	/
LYS(MPa)	/	Fp(kN)	6.75
Rp(MPa)	385	Ft(kN)	/
Rt(MPa)	/	E(GPa)	7.89



Gambar 2. 3 Grafik uji Tarik Aluminium 5005

6. *Grade aluminium Seri 6xxx*

Paduan aluminium dalam seri 6xxx (6061 dan 6063) mengandung silikon dan magnesium sekitar dalam proporsi yang diperlukan untuk pembentukan magnesium silisida (Mg_2Si), sehingga membuat paduan ini memiliki mampu perlakuan panas yang baik. Meskipun tidak sekuat pada paduan 2xxx dan 7xxx, paduan aluminium seri 6xxx memiliki sifat mampu bentuk yang baik, mampu las, mampu mesin, dan ketahanan korosi yang relatif baik dengan kekuatan sedang.

Untuk paduan aluminium seri 6xxx yang memiliki unsur paduan utama Al-Mg-Si, dalam sistem klasifikasi AA dapat diperoleh paduan Al 6063 dan Al 6061. Paduan dalam sistem ini mempunyai kekuatan kurang sebagai bahan tempaan dibandingkan dengan paduan–paduan lainnya, tetapi sangat liat, sangat baik mampu bentuknya untuk penempaan, ekstrusi dan sebagainya. Paduan 6063 dipergunakan untuk rangka–rangka konstruksi, maka selain dipergunakan untuk rangka konstruksi. Sedangkan paduan aluminium seri 6061 adalah salah satu jenis material yang banyak penerapannya pada industri maju karena memiliki keunggulan dari berbagai sisi yaitu seperti kemampuan permesinan yang baik, penyelesaian permukaan sempurna, kekuatan yang tinggi dan ringan, serta tahan terhadap korosi.

7. *Grade aluminium Seri 7xxx*

Zinc jumlah dari 1% sampai 8%) merupakan unsur paduan utama dalam paduan aluminium seri 7xxx (7075, 7050, 7049, 710,0; 711,0 dll) dan ketika digabungkan dengan persentase magnesium yang lebih kecil didalam perlakuan panas yang cukup maka paduan ini akan memiliki kekuatan yang sangat tinggi. Biasanya unsur-unsur lain, seperti tembaga dan kromium, juga ditambahkan dalam jumlah kecil. paduan seri 7xxx digunakan dalam struktur badan

pesawat, peralatan besar yang bergerak dan bagian lainnya memiliki tekanan yang sangat tinggi. (Subagyo, 2017)

2.3 Korosi

Korosi adalah penurunan kualitas material khususnya logam karna reaksi dengan lingkungan. Korosi dapat pula diartikan sebagai perubahan struktur logam atau sebagai kerusakan logam akibat adanya interaksi dengan lingkungan yang korosif seperti larutan asam. Syarat terjadinya korosi adalah adanya bahan yang berperan sebagai anoda dan katoda sehingga terjadi perbedaan nilai potensial ,elektrolit sebagai penghubung pertukaran elektron dan kontak antara logam. Proses korosi dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu adanya zat terlarut seperti O_2 dan CO_2 , suhu ,Kelembaban udara ,pH dan jenis logam.(Femiana Gapsari,2017)

Aluminium memiliki ketahanan yang baik terhadap lingkungannya karna permukaan logam aluminium memiliki lapisan yang tipis oksida yang mencegah oksidasi lebih lanjut. Namun apabila logam aluminium terpapar dalam kondisi asam ($pH < 5$) maka lapisan lapisan oksida tersebut akan melarut. Ada beberapa cara mencegah terjadinya korosi, seperti membuat paduan logam yang berfungsi agar tidak terjadi korosi, melapisi bagian logam agar tahan dari medium korosif, atau dengan cara membuat zat yang dapat menghambat korosif yang berfungsi sebagai inhibitor.(Ari Susandy Sanjaya, Mardiah ,2018)

2.3.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Korosi

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Korosi Umumnya masalah korosi disebabkan oleh air, tetapi ada beberapa faktor selain air yang mempengaruhi laju korosi, diantaranya:

1. Faktor Gas Terlarut.

- ✓ Oksigen (O_2), adanya oksigen yang terlarut akan menyebabkan korosi pada metal seperti laju korosi pada mild steel alloys akan bertambah dengan meningkatnya kandungan oksigen. Reaksi korosi secara umum pada besi karena adanya kelarutan oksigen.

- ✓ Karbondioksida (CO_2) jika karbondioksida dilarutkan dalam air maka akan terbentuk asam karbonat (H_2CO_3) yang dapat menurunkan pH air dan meningkatkan korosifitas, biasanya bentuk korosinya berupa pitting.
2. Faktor Temperatur Penambahan temperatur umumnya menambah laju korosi walaupun kenyataannya kelarutan oksigen berkurang dengan meningkatnya temperatur. Apabila metal pada temperatur yang tidak uniform, maka akan besar kemungkinan terbentuk korosi.
 3. Faktor pH pH netral adalah 7, sedangkan $\text{pH} < 7$ bersifat asam dan korosif, sedangkan untuk $\text{pH} > 7$ bersifat basa juga korosif. Tetapi untuk besi, laju korosi rendah pada pH antara 7 sampai 13. Laju korosi akan meningkat pada $\text{pH} < 7$ dan pada $\text{pH} > 13$.
 4. Faktor Bakteri Pereduksi atau Sulfat Reducing Bacteria (SRB) Adanya bakteri pereduksi sulfat akan mereduksi ion sulfat menjadi gas H_2S , yang mana jika gas tersebut kontak dengan besi akan menyebabkan terjadinya korosi.
 5. . Faktor Padatan Terlarut
 - ✓ Klorida (Cl), klorida menyerang lapisan mild steel dan lapisan stainless steel. Padatan ini menyebabkan terjadinya pitting, crevice corrosion dan juga menyebabkan pecahnya alloys.
 - ✓ Karbonat (CO_3), kalsium karbonat sering digunakan sebagai pengontrol korosi dimana film karbonat diendapkan sebagai lapisan pelindung permukaan metal, tetapi dalam produksi minyak hal ini cenderung menimbulkan masalah scale.
 - ✓ Sulfat (SO_4), ion sulfat ini biasanya terdapat dalam minyak. Dalam air, ion sulfat juga ditemukan dalam (Sidiq, 2013)

2.3.2 Metode Pencegahan Korosi

Dengan dasar pengetahuan tentang proses korosi yang dapat menjelaskan mekanisme dari korosi, dapat dilakukan usaha untuk pencegahan terbentuknya korosi.

a) Pengubahan Media Korosi merupakan interaksi antar logam dengan media sekitarnya, maka pengubahan media sekitarnya akan dapat mengubah laju korosi. Ada tiga situasi yang dapat terjadi yaitu:

- ✓ Media sekitar / lingkungan berupa gas .
- ✓ Media sekitar berupa larutan dengan ion-ion tertentu.
- ✓ Logam terbenam dalam tanah

b) Seleksi Material Metode umum yang sering digunakan dalam pencegahan korosi yaitu pemilihan logam atau paduan dalam suatu lingkungan korosif tertentu untuk mengurangi resiko terjadinya korosi.

c) Proteksi Katodik (*Cathodic Protection*)

Proteksi katodik adalah jenis perlindungan korosi dengan menghubungkan logam yang mempunyai potensial lebih tinggi ke struktur logam sehingga tercipta suatu sel elektrokimia dengan logam berpotensial rendah bersifat katodik dan terproteksi.

Macam : Impressed Current

Galvanic Sacrificial Anode

Galvanic Zinc Application

- Zinc Metallizing
- Zinc-Rich Paints
- Hot-Dip Galvanizing

d) Proteksi Anodik (*Anodic Protection*)

Adanya arus anodik akan meningkatkan laju ketidaklarutan logam dan menurunkan laju pembentukan hidrogen. Hal ini bisa terjadi untuk logam-logam “active-passive” seperti Ni, Fe, Cr, Ti dan paduannya. Jika arus yang lewat logam dikontrol seksama (dengan

potentiostat) maka logam akan bersifat pasif dan pembentukan logam-logam tak terlarut akan berkurang.

e) Inhibitor Korosi

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mencegah terjadinya korosi adalah dengan penggunaan inhibitor korosi. Secara umum suatu inhibitor adalah suatu zat kimia yang dapat menghambat atau memperlambat suatu reaksi kimia. Sedangkan inhibitor korosi adalah suatu zat kimia yang bila ditambahkan ke dalam suatu lingkungan, dapat menurunkan laju penyerangan korosi lingkungan itu terhadap suatu logam. Mekanisme penghambatannya terkadang lebih dari satu jenis. Sejumlah inhibitor menghambat korosi melalui cara adsorpsi untuk membentuk suatu lapisan tipis yang tidak nampak dengan ketebalan beberapa molekul saja, ada pula yang karena pengaruh lingkungan membentuk endapan yang nampak dan melindungi logam dari serangan yang mengkorosi logamnya dan menghasilkan produk yang membentuk lapisan pasif, dan ada pula yang menghilangkan konstituen yang agresif.

f) Perubahan Media / Lingkungan

Korosi merupakan interaksi antara logam dengan media sekitarnya, maka perubahan media sekitarnya akan dapat mengubah laju korosi. Ada tiga situasi yang dapat terjadi yaitu:

- ✓ Media sekitar / lingkungan berupagas
- ✓ Media sekitar berupa larutan dengan ion-ion tertentu
- ✓ Logam terbenam dalam tanah.

g) Pelapisan (*Coatings*)

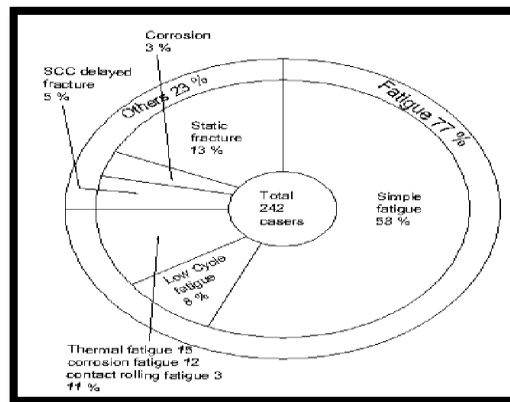
Prinsip umum dari pelapisan yaitu melapiskan logam induk dengan suatu bahan atau material pelindung. Jenis - jenis coating :

- ✓ *Metallic coatings*
- ✓ *Paint /organic coatings*
- ✓ *Chemical conversion coatings*

- ✓ *Miscellaneous coatings (enamel, thermoplastics)*.(Sidiq, 2013)

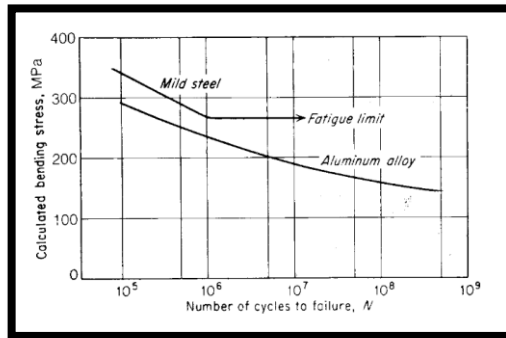
2.4 Kekuatan Fatik

Kelelahan (*Fatigue*) adalah salah satu jenis kegagalan (patah) pada komponen akibat beban dinamis (pembebanan yang berulang-ulang atau berubah-ubah). Pembebanan dinamis bekerja hanya untuk rentang waktu tertentu saja, akan tetapi walaupun hanya bekerja sesaat akibat yang ditimbulkan dapat merusak struktur benda, oleh karena itu beban harus diperhitungkan di dalam merencanakan struktur. Kerusakan pada struktur dapat dilihat pada Gambar 2.1, dimana diperkirakan 50%-77% kegagalan mekanis disebabkan oleh kelelahan/*fatigue*.



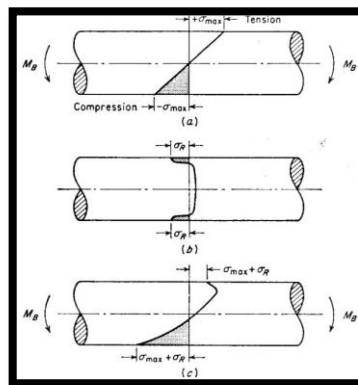
Gambar 2.4 Distribusi mode kegagalan

Fatigue atau kelelahan menurut ASM (1975) didefinisikan sebagai proses perubahan struktur permanen *progressive localized* pada kondisi yang menghasilkan fluktuasi regangan dan tegangan dibawah kekuatan tariknya dan pada satu titik atau banyak titik yang dapat memuncak menjadi retak (*crack*) atau patahan (*fracture*) secara keseluruhan sesudah fluktuasi tertentu.



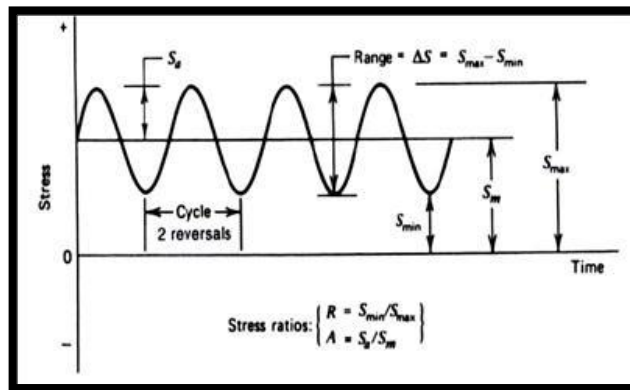
Gambar 2.5 kurva khusus Fatik untuk besi dan logam bukan besi

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Dieter dan kawan-kawan pada tahun 1988, baja murni memiliki *endurance limit* dibandingkan pada aluminium. Kurva tersebut diperoleh dari pemetaan tegangan terhadap jumlah siklus sampai terjadi kegagalan pada benda uji. Pada kurva ini, siklus menggunakan skala logaritma. Batas ketahanan *fatigue* (*endurance limit*) ditentukan pada jumlah siklus (Gambar 2.5).



Gambar 2.6 Superposisi dari tegangan terapan dan sisa (Dieter, 1988)

Pada Gambar 2.6 merupakan spesimen yang sedang dalam pengujian fatik. Tegangan dan momen lentur terjadi pada proses tersebut, dan akan menghasilkan amplitudo (Gambar 2.7). Pemberian momen pada benda axial yang diberikan tegangan akan mengakibatkan nilai amplitudo bersifat fluktuasi. Dengan kecepatan dan tegangan tertentu, maka spesimen akan mengalami kelelahan (*fatigue*) (Dieter, 1992).



Gambar 2.7 Grafik pembebanan dengan Amplitudo Konstan

Mekanisme terjadinya kegagalan fatik dapat dibagi menjadi tiga fase yaitu : awal retak (*initiation crack*), perambatan retak (*crack propagation*), dan perpatahan akhir (*fracture failure*).

2.4.1 Awal Retakan (*Initiation Crack*)

Cacat (*defect*) pada struktur dapat bertindak sebagai awal keretakan. Cacat pada struktur berdasarkan asal terbentuknya dapat dikategorikan menjadi dua kelompok.

2.4.1.1 Cacat yang terbentuk selama masa fabrikasi, disebabkan oleh :

- ✓ Cacat lateral yang terjadi pada material (*material defect*).
- ✓ Cacat yang disebabkan karena proses pengerjaan material (*manufacturing defect*). Contohnya seperti tumpulnya peralatan peralatan atau jeleknya peralatan yang digunakan untuk pengerjaan material, panas yang berlebihan yang disebabkan karena pengelasan dan sebagainya.
- ✓ Pemilihan material yang salah atau proses perlakuan panas material (*poor choise of material or heat treatment*). Contoh pemilihan material yang salah seperti, material yang seharusnya digunakan untuk fatigue tetapi cenderung digunakan untuk *corrosion cracking* oleh karena pemilihan perlakuan panas yang tidak diketahui. Perlakuan panas

seperti *carburizing* pengerasan permukaan hampir selalu menyebabkan perubahan pada permukaan.

- ✓ Teknik produksi dari material yang salah (*poor choice of production technique*).
- ✓ Desain material yang salah (*poor detail design*).

2.4.1.2 Cacat yang terbentuk selama *service* struktur, diantaranya disebabkan oleh:

- ✓ Kelelahan struktur, terjadi saat struktur mencapai umur kelelahannya.
- ✓ Fluktuasi tegangan pada permukaan yang telah mengalami korosi

2.4.2 Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

Jumlah total siklus yang menyebabkan kegagalan fracture merupakan penjumlahan jumlah siklus yang menyebabkan retakan awal dan fase perambatannya. *Initiation Crack* ini berkembang menjadi microcracks. Perambatan atau perpaduan microcracks ini kemudian membentuk macrocracks yang akan berujung pada failure.

2.4.3 Perpatahan Akhir (*Fracture Failure*)

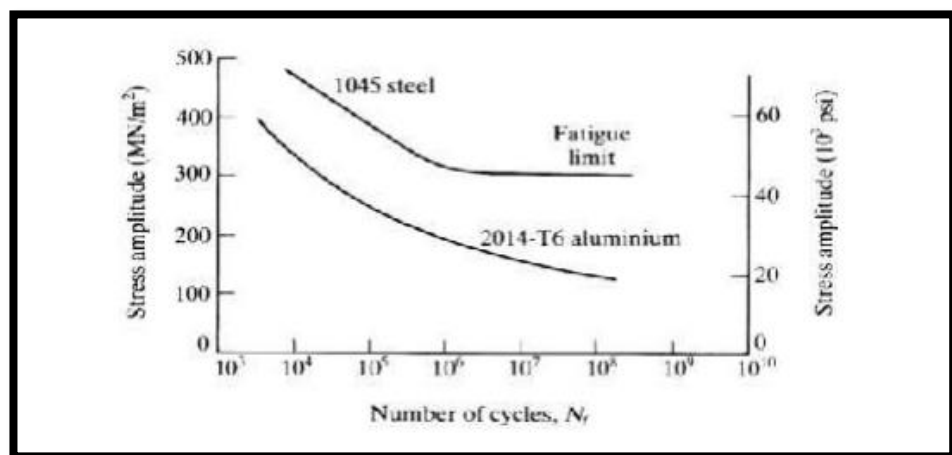
Final fracture adalah proses akhir kerusakan pada struktur saat mengalami pembebanan, sehingga struktur tersebut mengalami kegagalan. Ketika terjadi penjarangan retak, penampang pada bagian tersebut akan berkurang. Sampai pada kondisi dimana penampang pada bagian tersebut tidak mampu menahan beban.

Ketahanan fatik suatu bahan tergantung dari perlakuan permukaan atau kondisi permukaan dan temperatur operasi. Perlakuan permukaan merubah kondisi permukaan dan tegangan sisa di permukaan. Perlakuan permukaan shoot peening menghasilkan tegangan sisa tekan yang mengakibatkan ketahanan lelah yang meningkat (Collins,1981). Sedangkan perlakuan permukaan yang menghasilkan tegangan sisa tarik menurunkan ketahanan fatigue-nya. Hal itu terjadi karena pada permukaan terjadi konsentrasi

tegangan tekan atau tarik yang paling tinggi. Pada kondisi permukaan sedang menerima tegangan tarik maka tegangan sisa tekan pada permukaan akan menghasilkan resultan tegangan tekan yang semakin besar. Tegangan tekan akan menghambat terjadinya initial crack atau laju perambatan retak. Sehingga ketahanan lelah meningkat, dan akan terjadi sebaliknya apabila terjadi tegangan sisa tarik di permukaan.

Pada dasarnya kegagalan fatik dimulai dengan terjadinya retakan pada permukaan benda uji. Hal ini membuktikan bahwa sifat-sifat fatik sangat peka terhadap kondisi permukaan, yang dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain kekasaran permukaan, perubahan sifat-sifat permukaan dan tegangan sisa permukaan (Dieter,1992).

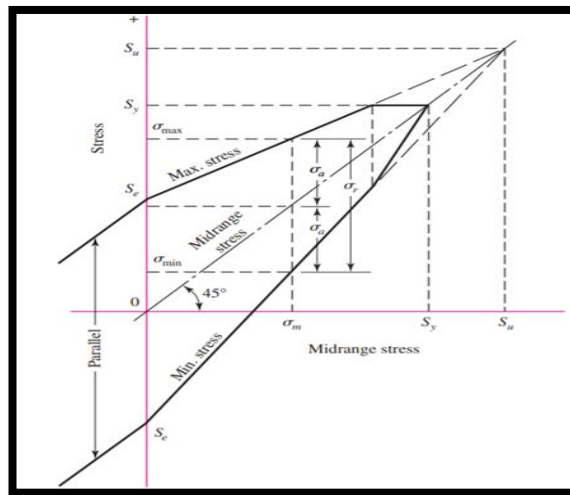
Penyajian data fatik rekayasa adalah menggunakan kurva S-N yaitu pemetaan tegangan (S) terhadap jumlah siklus sampai terjadi kegagalan (N). Kurva S-N ini lebih diutamakan menggunakan skala semi log seperti ditunjukkan pada gambar 2.8. Untuk beberapa bahan teknis yang penting.



Gambar 2.8 kurva S-N

Kurva tersebut didapat dari pemetaan tegangan terhadap jumlah siklus sampai terjadi kegagalan pada benda uji. Pada kurva ini siklus menggunakan skala logaritma. Batas ketahanan fatik (*endurance limit*) baja ditentukan pada jumlah siklus $N > 7$ (Dieter,1988).

Diagram goodman adalah persamaan yang digunakan untuk mengukur interaksi tegangan rata-rata dan tegangan bolak-balik pada umur kelelahan suatu material. Persamaan ini biasanya ditunjukkan dalam bentuk kurva linear antara tegangan bolak-balik berbanding dengan tegangan rata-rata yang akan menunjukkan jumlah maksimum siklus tegangan bolak-balik yang dapat ditahan material sebelum material patah akibat kelelahan.

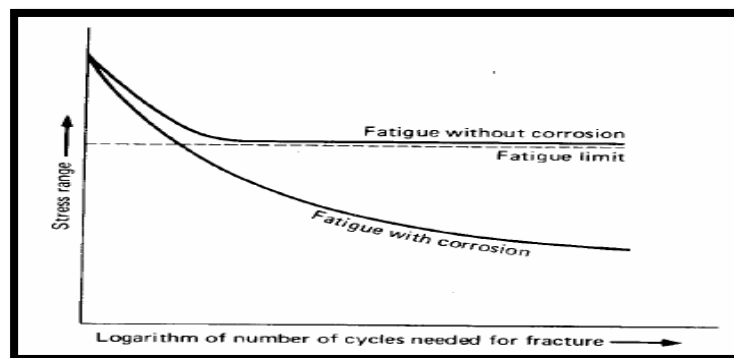


Gambar 2. 9 Diagram Goodman

Ada berbagai teknik untuk merencanakan hasil uji kegagalan fatik dari bagian struktur yang mengalami tegangan yang berfluktuasi. Salah satunya disebut diagram Goodman yang dimodifikasi dan ditunjukkan pada gambar diatas. Untuk diagram ini tegangan rata-rata diplotkan pada absis dan komponen tegangan lainnya pada ordinat. Seperti yang ditunjukkan pada gambar, garis tegangan rata-rata membentuk sudut 45^0 dengan absis. Garis yang di hasilkan di tarik ke S_e di atas dan dibawah titik asal sebenarnya adalah diagram Goodman yang di modifikasi. Kekuatan luluh S_y juga diplot pada kedua sumbu, karena luluh dapat dianggap sebagai kriteria kegagalan jika $\sigma_{max} > S_y$.

2.5 Korosi Kelelahan

Korosi Kelelahan, seperti namanya, adalah aksi gabungan dari stres siklik dan lingkungan korosif pada material. "Korosi Kelelahan tergantung pada interaksi antara faktor pemuatan, lingkungan, dan metalurgi" (Glaeser,W,2003). Secara umum, efek korosi akan merusak ketahanan bahan, karena korosi dapat menyebabkan inisiasi retak yang lebih cepat, laju perambatan retak yang lebih tinggi, atau keduanya. Efek dari media agresif pada kinerja kelelahan dapat sangat bervariasi, dan terutama tergantung pada hubungan antara logam dan lingkungan (Phull,B,2003). Salah satu perbedaan utama antara Korosi Kelelahan dan kelelahan lingkungan lambat adalah bahwa tidak ada "rentang tegangan aman" di mana logam memiliki masa pakai yang tak terbatas. Karena jumlah siklus kegagalan meningkat, kekuatan kelelahan logam di lingkungan korosif terus turun (Evins,J.L,2004).



Gambar 2.10 Corrosion-fatigue and its general effect on the behaviour of steel

Karena korosi menyerang permukaan bagian, retakan Korosi Kelelahan akan selalu berasal dari permukaan, kecuali jika bahan tersebut menunjukkan cacat di bawah permukaan, yang akan bertindak sebagai lokasi konsentrasi tegangan dan memulai retakan di bawah permukaan (Evins,J.L,2004). Retakan-korosi kelelahan biasanya transkristalin, meskipun retakan antar-kristal dapat berinti jika media menyerang batas butir secara istimewa (Frost,N.E,1974). Retakan fatik akan memulai dan merambat dalam material tergantung pada sifat metalurgi dari masing-masing alloy; untuk baja karbon, misalnya, retakan sering kali berawal dari lubang korosi dan biasanya mengandung banyak produk korosi, biasanya menyebar secara trans-granular

dan bercabang. Namun ini bukan persyaratan; retak pada baja karbon dapat dimulai tanpa lubang korosi dan mengikuti batas butir. Sebagian besar waktu Korosi Kelelahan menghasilkan kegagalan karakteristik di mana produk korosi dapat diamati pada permukaan fraktur atau pada retakan yang tumbuh. Namun demikian, produk-produk korosi seperti itu tidak ada dalam beberapa kasus tertentu, misalnya, ketika baja berkekuatan tinggi diserang oleh atmosfer yang kaya hidrogen. Juga, ketika frekuensinya cukup tinggi, permukaan fraktur yang dihasilkan oleh Korosi Kelelahan mungkin tidak berbeda secara signifikan dari permukaan fraktur kelelahan di lingkungan non-agensif (Glaeser, W, 2003).

Secara umum, umur Korosi Kelelahan dapat diklasifikasikan ke dalam dua langkah: *the corrosion fatigue crack initiation* (CFCI) dan *the corrosion fatigue crack propagation* (CFCP). Mekanisme CFCP mirip dengan *stress corrosion cracking* (SCC). Meskipun mekanisme SCC tidak jelas, biasanya dijelaskan dengan embrittlement hidrogen. Di sini, laju CFCP dianggap sebagai laju perambatan retak yang dipercepat dari SCC yang dipromosikan dalam lingkungan korosif tertentu dengan pembebanan siklik. Dua mekanisme yang mungkin seperti pembubaran anodik dan hidrogen embrittlement diadopsi untuk menggambarkan percepatan laju perambatan retak pada lingkungan korosif. *The corrosion fatigue crack propagation* (CFCP) terjadi akibat adanya kombinasi kerusakan korosi dan slip relatif logam pada ujung retak di bawah pembebanan siklik. Proses ini dikendalikan oleh tiga mekanisme utama: slip relatif dari logam di ujung retak, korosi permukaan kosong dari elemen material yang retak dan penutupan retak. Korosi dalam proses CFCP terjadi terutama pada permukaan yang terbuka setelah elemen materialnya retak (Hwan Kang, dkk. 2011).

2.5.1 Tahapan dan Mekanisme Korosi Kelelahan

Di bawah kondisi pembebanan siklik, lingkungan korosif dapat mempercepat inisiasi cacat permukaan pada bahan yang awalnya bebas retak dan menyebarkan cacat untuk ukuran kritis tertentu. Korosi Kelelahan adalah istilah yang biasa digunakan untuk menunjukkan

kerusakan dan kegagalan bahan di bawah aksi kombinasi dari tekanan siklik dan media korosif meskipun sebagian besar adaptasi tersebar luas dalam konteks lingkungan berair. Lingkungan korosif menghasilkan produk korosi. Korosi Kelelahan dikaitkan dengan dua mekanisme yang berbeda: pembubaran anodic mekanisme Korosi Kelelahan dan Korosi Kelelahan dibantu hydrogen (ali nurdin,2014)

2.5.2 *fatigue corrosion cracking (CFC)*

Dari sudut pandang teknik analisis, proses kerusakan kelelahan di logam terdiri dari dua tahap, yaitu, inisiasi retak kelelahan dan propagasi retak kelelahan. Oleh karena itu, kita memiliki dua kategori tes Korosi Kelelahan laboratorium: siklus kegagalan (inisiasi retak) tes dan retak tes propagasi. Dalam retak pengujian inisiasi, spesimen atau bagian yang mengalami jumlah *stres* atau tegangan siklus diperlukan untuk *fatigue corrosion cracking* (CFC) untuk memulai dan kemudian tumbuh cukup besar untuk menghasilkan kegagalan. Data tersebut biasanya diperoleh dengan menguji spesimen halus atau berlekuk. Dengan jenis pengujian, bagaimanapun, sulit untuk membedakan antara kehidupan inisiasi CFC dan kehidupan propagasi *fatigue corrosion cracking* (CFC). Dalam retak pengujian propagasi, *Fracture Mechanics* (FM) metode yang digunakan untuk menentukan tingkat pertumbuhan retak retak yang sudah ada sebelumnya di bawah beban siklik. retak yang sudah ada sebelumnya atau cacat tajam dalam material mengurangi atau mungkin menghilangkan bagian inisiasi retak dari umur kelelahan komponen. Kedua jenis pengujian yang penting; Namun, tampak bahwa inisiasi retak lebih penting dalam proses kegagalan bagian yang relatif tipis, sementara pertumbuhan retak muncul untuk mendominasi daya tahan komponen bagian yang tebal (berbaring,1992)

Korosi Kelelahan adalah salah satu metode kegagalan utama untuk struktur yang fleksibel, periode kegagalan Korosi Kelelahan umumnya dibagi menjadi tiga tahap yaitu nukleasi retak, perambatan retak kelelahan, dan pecah. Dua tahap pertama menentukan umur layanan Kegagalan Korosi

Kelelahan, secara istimewa dimulai dari lubang-lubang korosi karena pembubaran anodik di dalam lubang dipercepat oleh mekanisme mekanik dan kerusakan yang tidak dapat diperbaiki yang disebabkan oleh produk korosi. Meskipun mekanisme perambatan retak fatik sangat rumit dan sedang efek korosi pada perambatan retak jelas tidak dapat diabaikan. Oleh karena itu, metode untuk menghambat korosi untuk memperpanjang umur Korosi Kelelahan telah banyak diadopsi, seperti peningkatan permukaan dengan laser burnishing, plastisitas rendah dan perlindungan katodik.(Cammett, J, 2004).

Kelelahan (fatik) suatu struktur diawali dengan pembentukan awal retak dilanjutkan dengan perambatan retak hingga struktur mengalami patah. Telaah tentang laju perambatan retak plat aluminium paduan 2024-T3 dengan beban fatigue uniaksial, specimen dibuat lubang terbuka diameter konstan dengan jarak antar lubang berbeda, hasil penelitian yang dilakukan Sanyoto, dkk (2008) menunjukkan bahwa jarak lubang yang kecil menimbulkan distribusi tegangan yang besar, sehingga laju perambatan retak yang terjadi lebih besar. Menurut Prihatno (2009) dalam penelitiannya perilaku perambatan retak fatik pada sambungan las FSW tak sejenis antara Al2024-T3 dan Al11kasar dalam media korosif hasilnya menunjukkan umur fatik dengan konsentrasi 3,5% NaCl mengalami penurunan siklus fatik sebesar 61,7% dan untuk media 5% NaCl mengalami penurunan siklus fatik sebesar 68,2%.

Sejumlah komponen mesin yang menggunakan bahan Al 2024-T3 di lingkungan korosif seperti lingkungan air laut akan mempercepat terjadinya korosi. Proses tersebut berakibat rusaknya lapisan pasif pada permukaan material Al 2024- T3. Permasalahan ini perlu diperhatikan sehingga laju korosi dapat dihambat dan dikendalikan pada komponen yang menggunakan bahan Al 2024-T3. Pengendalian korosi menurut Davis (2000), dapat dilakukan dengan metode pemilihan material, pelapisan, inhibitor, dan desain. Salah satu cara yang dapat dipergunakan untuk menghambat laju korosi pada Al 2024-T3 dengan menggunakan inhibitor.

Perilaku laju perambatan retak fatik (korosi fatik) di lingkungan udara, air laut dan air laut yang ditambahkan dengan inhibitor kalium kromat dapat dijelaskan dengan merepresentasikan hubungan panjang retakan (a) dan jumlah siklus (N). Disamping itu juga dapat ditentukan hubungan antara faktor intensitas tegangan (ΔK) dengan laju perambatan retak (da/dN), sehingga dapat untuk memperkirakan umur suatu material.

Berdasarkan hasil pengujian laju korosi fatik di lingkungan udara, air laut dan air laut yang ditambahkan inhibitor kalium kromat dengan konsentrasi 0,1%; 0,3% dan 0,5%, hubungan panjang retakan (a) dan jumlah siklus (N). Terlihat bahwa umur retakan yang terdapat pada Al 2024-T3 di udara adalah sekitar 154572 siklus, di media air laut sebesar 99807 siklus, penambahan konsentrasi inhibitor 0,1% jumlah siklus 108275, konsentrasi inhibitor 0,3% sebesar 118296 dan untuk media konsentrasi inhibitor 0,5% sebesar 131873 siklus. Jumlah siklus terendah dari pengujian rambat retak fatik di lima lingkungan yang berbeda menunjukkan lingkungan air laut memiliki jumlah siklus terendah. Hal ini menunjukkan bahwa lingkungan air laut dengan pH 7,64 memiliki kecenderungan sebagai media yang korosif.

2.6 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Korosi Kelelahan

Seperti yang telah diungkapkan pada bagian sebelumnya, inisiasi retak dan perambatan retak adalah dua proses terpisah yang digerakkan oleh berbagai fenomena. Maka penting untuk memperhatikan bahwa media korosif akan memiliki efek yang berbeda pada masing-masing media tersebut. Bagian berikut menjelaskan faktor-faktor yang diketahui mempengaruhi satu atau kedua langkah ini.

2.6.1 Lingkungan

Korosi Kelelahan akan ditingkatkan oleh peningkatan aktivitas kimia lingkungan. Beberapa faktor yang memiliki pengaruh kuat terhadap Korosi Kelelahan adalah suhu, pH, tekanan lingkungan gas, dan konsentrasi spesies korosi. Tidak ada aturan praktis untuk menggeneralisasi perilaku material ketika terpapar

dengan kondisi lingkungan yang beragam karena, sebagaimana disebutkan sebelumnya, karakteristik metalurgi dari masing-masing material menentukan perilakunya dikombinasikan dengan lingkungan. Namun, ada beberapa reaksi yang umum diamati pada kondisi individu tertentu. Sebagai contoh, pH rendah, tekanan tinggi dari lingkungan gas, konsentrasi tinggi dari spesies korosif dan suhu tinggi umumnya memiliki efek yang merugikan pada ketahanan korosi-kelelahan material. Pada baja berkekuatan tinggi, laju pertumbuhan retak meningkat ketika tekanan uap air meningkat hingga saturasi tercapai (Glaeser, W, 2003).

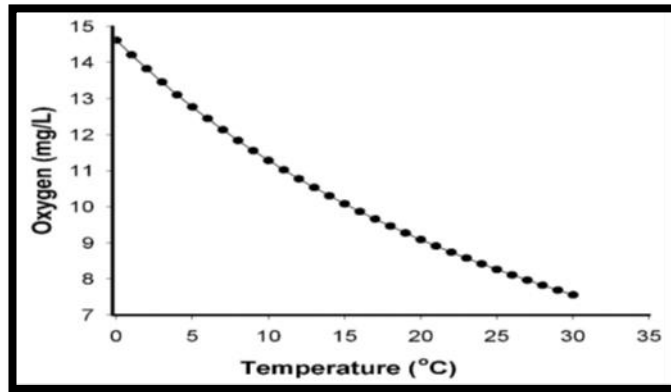
1. Konsentrasi Spesies Korosi

Kehadiran oksigen dikenal sangat merugikan kinerja Korosi Kelelahan banyak logam, karena meningkatkan banyak proses kimia yang agresif. Oleh karena itu, jika atmosfer memiliki akses bebas ke permukaan logam - memungkinkan oksigen untuk memiliki kontak dengan logam - efek korosi akan disukai.

Korosi Kelelahan akan lebih rendah jika spesimen disemprotkan atau ditetaskan dengan cairan korosif daripada jika benar-benar tenggelam di dalamnya (Glaeser, W, 2003). Efek yang serupa diamati ketika cairan korosif diangin-anginkan (mengandung oksigen terlarut) dibandingkan dengan ketika mengalami deaerasi, menjadi larutan aerasi yang paling agresif.

2. Suhu

Efek suhu adalah kompleks dan dapat sangat bervariasi tergantung pada bahan dan kisaran suhu. Sebagai contoh, karena suhu air menurunkan kelarutan oksigennya beberapa material dapat mengambil manfaat dari tingkat oksigen yang lebih rendah di lingkungan dan karenanya memiliki ketahanan korosi-kelelahan yang lebih baik pada suhu air yang tinggi.

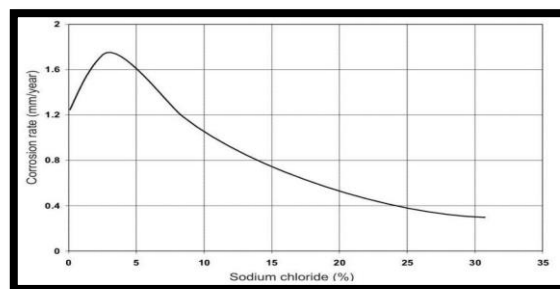


Gambar 2.11 Solubility of oxygen in water at different temperatures

Di sisi lain, dengan mengurangi kandungan oksigen, mekanisme evolusi hidrogen (tipikal dalam larutan de-aerasi) dapat terjadi dan menyebabkan embrittlement hidrogen (Evins,J.L,2004).

3. Efek NaCl

Telah diketahui bahwa keberadaan NaCl dalam media korosif menyebabkan kekuatan Korosi Kelelahan menurun secara drastis. Tingkat Korosi Kelelahan memiliki tingkat maksimum ketika konsentrasi NaCl adalah sekitar 3 - 4% berat (Jonsson,S,1995). Maksimum ini diyakini disebabkan oleh kombinasi efek yang dimiliki jumlah NaCl dalam listrik, konduktivitas dan pada kelarutan oksigen, yang bertentangan. Ketika jumlah garam meningkat, konduktivitas listrik meningkat dan kelarutan oksigen berkurang. Bentuk kurva adalah hasil dari dua



Gambar 2.12 Effect of NaCl concentration on the corrosion of Fe

efek yang bekerja bersama dalam intensitas yang berbeda tergantung pada konsentrasi garam.

Rollins et al (Rollins,v.1967) mempelajari pengaruh konsentrasi NaCl dalam inisiasi retak dan perambatan retak secara terpisah untuk baja. Dapat diamati bahwa jumlah siklus kelelahan untuk memulai penurunan retak karena konsentrasi NaCl meningkat dari 0 menjadi 4% berat, memiliki minimum pada 4% berat dan kemudian meningkat untuk konsentrasi NaCl yang lebih tinggi. Di sisi lain, perambatan retak tampaknya tidak tergantung pada keparahan larutan korosif (yang maksimum pada 4% berat NaCl), jika tidak kurva akan diharapkan memiliki bentuk yang mirip dengan inisiasi. Konduktivitas tinggi pada konsentrasi NaCl yang tinggi memungkinkan retak untuk tumbuh lebih dalam dengan aksi sel elektrokimia atau bahwa adsorpsi ion klorida pada ujung retak meningkatkan perambatan retak.

4. Pengaruh pH

Menurut Rollins,v telah menunjukkan bahwa pengaruh pH rendah (1,2 dan 5,5) pada baja (1,0% berat C, 1,0% berat Cr, 0,25% berat Mo, 0,3% berat Si, 0,5% berat Si, 0,5% berat Mn) di bawah rotating bending test memiliki sedikit pengaruh pada inisiasi retak kelelahan, sedangkan sebagian besar pengurangan daya tahan terjadi selama perambatan retak . Dalam penelitian lain yang dilakukan pada baja yang sama dalam larutan NaCl 0,4% diusulkan bahwa dalam kisaran pH 4 - 10, laju korosi ditentukan oleh difusi oksigen ke katoda. Pada nilai pH di bawah 4, laju korosi meningkat karena evolusi hidrogen di katoda dan peningkatan konduktivitas. Pada nilai pH di atas 12, korosi tidak terjadi, dan disarankan bahwa logam dilindungi oleh film logam hidroksida atau oksigen yang diserap,mencegahnya mengembangkan korosi retak kelelahan (Jonsson,S,1995).

2.6.2 Permukaan

Permukaan memiliki efek penting pada kelelahan pada lingkungan inert dan korosif. Nukleasi jika microcracks menjadi lebih mudah ketika permukaan material memberikan hasil yang kasar. Efek, misalnya, tanda pemesinan pada permukaan material dapat bertindak sebagai takik di mana retakan akan mulai terbentuk. Tanda seperti itu juga membuat material lebih rentan terhadap korosi, sedangkan permukaan yang dipoles lebih tahan terhadap serangan lingkungan ini. Efek negatif lain yang mungkin terjadi dari pembuatan spesimen adalah bahwa, selain tanda pemesinan, permukaan dapat mengalami pengerasan akibat kerja dingin atau pelunakan dengan dekarburisasi. Juga, tegangan sisa dapat dimasukkan ke dalam lapisan permukaan sebagai hasil dari pemesinan dan persiapan (Glaeser,W,2003).

2.6.3 Rasio Stres

stres, seperti yang dijelaskan pada bagian sebelumnya, adalah rasio antara stress minimum dan maksimum yang diterapkan dalam siklus. Ini menunjukkan cara bagian dimuat dalam hal besarnya batas uniaksial-gelombang stres. Rasio stres positif menunjukkan bahwa baik tegangan maksimum dan minimum adalah positif, yaitu tarik, dan semakin tinggi rasio stres (semakin dekat dengan 1), semakin dekat besarnya satu sama lain. Untuk pengujian kelelahan-kering, beban yang sepenuhnya terbalik ($R = -1$) biasanya yang paling parah (Boardman ,B,1990). Namun, perilaku sebaliknya dapat diharapkan untuk Korosi Kelelahan; ketika stres positif, retakan akan terbuka, meninggalkan bahan segar di bagian dalamnya terkena atmosfer agresif. Semakin lama waktu paparan, semakin tinggi kerusakan korosif yang diderita di ujung retak. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa - secara umum - laju perambatan retak meningkat oleh rasio tegangan tinggi . Jika rasio tegangan meningkat sementara intensitas tegangan (ΔK) dijaga

konstan, regangan ujung retak dan laju regangan meningkat. Akibatnya, pecah film pasif ditingkatkan dan oleh karena itu perambatan retak meningkat (Phull, B, 2003).

2.6.4 Beban Frekuensi

Dari siklus stres memiliki sedikit efek pada perilaku kelelahan di lingkungan yang tidak agresif. Namun, itu adalah faktor paling penting yang mempengaruhi Korosi Kelelahan untuk sebagian besar material, lingkungan dan kondisi intensitas stres. Ini terjadi terutama karena korosi adalah fenomena yang tergantung waktu. Kemudian, jika korosi akan berpengaruh pada material setelah waktu tetap tertentu, frekuensi akan menentukan jumlah siklus material yang akan dicapai sebelum selang waktu korosi ini selesai. Oleh karena itu, semakin tinggi frekuensinya, semakin lama umur yang dicapai oleh komponen. Bahkan, "frekuensi ada di atas yang menghilangkan korosi kelelahan". Di sisi lain, pada frekuensi di bawah 10Hz efek yang merugikan pada kekuatan Korosi Kelelahan ditingkatkan. Efek lain dari frekuensi adalah waktu retakan terbuka selama setiap siklus. Hal ini dipahami berdasarkan paparan bahan segar oleh retakan terbuka: ketika retakan terbuka karena tekanan positif 15 diterapkan, ujung retak memaparkan bahan segar ke lingkungan korosif, meningkatkan korosi serangan pada setiap siklus. Akibatnya, tingkat pertumbuhan retak meningkat dan umur total komponen berkurang. Frekuensi beban juga mempengaruhi suhu bagian, tergantung pada materialnya dan pada tingkat tegangan. Secara umum, semakin tinggi tingkat stres dan kecepatan, panas yang dihasilkan oleh deformasi meningkat dan laju disipasi panas oleh spesimen berkurang. Overheating spesimen kurang umum pada tes rotasi-bending daripada pada tes statis lainnya karena rotasi spesimen membantu pendinginan dengan konveksi paksa. Selain itu, dalam uji Korosi Kelelahan, media

korosif cair dapat membantu pembuangan panas dengan prinsip yang sama (Phull,B,2003).

2.6.5 Intensitas Stres

Meskipun korelasi antara intensitas tegangan dan retak kelelahan bervariasi, kecenderungan umum adalah bahwa tingkat pertumbuhan retak dalam Korosi Kelelahan meningkat ketika meningkatkan intensitas tegangan. Namun, perilaku laju pertumbuhan retak berbeda untuk masing-masing dari tiga rezim yang berbeda (dekat ambang batas, wilayah hukum Paris, dan fraktur akhir), Ketergantungan yang ditandai ini menjadi lebih jelas untuk bahan yang sangat peka terhadap lingkungan, seperti baja berkekuatan sangat tinggi dalam air suling . (Phull,B,2003).ga dalam banyak kasus, kombinasi intensitas tegangan dengan faktor-faktor lain seperti bentuk gelombang tegangan, frekuensi siklus dan karakteristik metalurgi memiliki efek beragam dan bahkan lebih drastis pada tingkat pertumbuhan retak. Secara umum, telah umum diterima bahwa perilaku kelelahan logam di lingkungan agresif pada intensitas tekanan tinggi mirip dengan yang ada di udara atau *atmosfer inert*. Alasannya adalah bahwa pertumbuhan yang dikontrol mekanik yang terjadi pada kelelahan kering meningkat ketika faktor intensitas *stress* bertambah (Jonsson,S,1995).

2.6.6 Efek ukuran dan Gradien Kekerasan

Ada beberapa cara untuk meningkatkan kekerasan dan suatu material, keduanya umumnya memiliki efek menguntungkan pada ketahanan lelahnya. Dalam karya ini, bahan yang dipelajari menjadi sasaran pengerasan mekanis dengan *shot peening* dan perlakuan panas dengan pengerasan case atau melalui pengerasan.Pengerasan case menciptakan lapisan material yang lebih keras pada bagian dibandingkan dengan intinya, sedangkan melalui pengerasan meningkatkan kekerasan keseluruhan komponen. Semakin keras materialnya, semakin tahan terhadap keletihannya, sehingga dapat

disimpulkan bahwa material yang dikeraskan umumnya akan bekerja lebih baik di bawah kelelahan daripada yang dikeraskan. Dalam lingkungan non-korosif, secara umum diamati bahwa ketika diameter spesimen meningkat, batas kelelahan material akan berkurang. Ini terjadi karena beragam alasan terkait dengan distribusi tegangan di seluruh geometri, dan sangat dipengaruhi oleh jenis tes yang dilakukan, baik tegangan langsung terbalik atau rotating-bending (Glaeser, W, 2003).

2.6.7 Variabel Metalurgi

Komposisi bahan juga memiliki efek pada kelelahan, misalnya penambahan karbon pada baja, karena meningkatkan kekerasan material, dan sebagai hasilnya, batas kelelahan meningkat. Ukuran butir baja memiliki pengaruh tidak langsung pada perilakunya karena kelelahan karena memiliki hubungan yang erat dengan kekuatan material dan ketangguhan retak. Dengan demikian, ukuran butir yang lebih halus memiliki kekuatan kelelahan yang lebih baik daripada baja berbutir kasar. Untuk baja dengan tingkat kekuatan yang sama, struktur mikro dapat membuat perbedaan nyata dalam perilaku kelelahan. Sebagai contoh, struktur pearlitic memiliki ketahanan lelah yang buruk, sedangkan struktur martensitik temper memberikan batas kelelahan tertinggi (Boardman, B. 1990). Namun, sebuah penelitian yang dilakukan oleh Novak telah menunjukkan bahwa, dalam kondisi asin, inisiasi retak tidak sensitif terhadap mikrostruktur suatu bahan.

2.6.8 Permukaan Sisa Tegangan

Meskipun tidak ada generalisasi yang secara akurat memprediksi efek dari tegangan sisa pada kinerja Korosi Kelelahan dari logam, umumnya terlihat bahwa tegangan sisa tekan meningkatkan kekuatan kelelahan, dan tegangan sisa Tarik tidak. Efek yang menguntungkan dari tekanan tekan residual pada kekuatan kelelahan lebih besar pada material yang lebih keras,

sedangkan material yang lebih lembut akan memiliki peningkatan yang lebih baik ketika bekerja keras . Alasan untuk tegangan sisa tekan permukaan yang bermanfaat untuk kekuatan kelelahan adalah bahwa hal itu akan menurunkan - atau bahkan membatalkan - tegangan umum yang disebabkan oleh pemuatan,memperlambat pembentukan retak permukaan. Deformasi plastis dapat menyebabkan penurunan bertahap pada tingkat tegangan tekan . Sebaliknya, tegangan sisa tarik akan memiliki efek sebaliknya. Karena tegangan sisa tarik dapat diproduksi di permukaan dengan pemesinan, sangat penting untuk berhati-hati dalam masalah ini, yang menyebabkan efek yang sangat berbahaya pada kekuatan kelelahan-dan korosi-kelelahan. Cara khas untuk secara efektif memperkenalkan tegangan sisa permukaan tekan pada baja adalah dengan shot peening, carburizing, dan nitriding (Phull,B,2003).

2.6.9 Efek Penutupan Retak

Ketika bahan mengalami bagian pembongkaran siklus,permukaan retak saling bersentuhan, dan bahan tersebut rileks. Ketika ini terjadi, intensitas tegangan di ujung retak berkurang, mengurangi laju pertumbuhan retak. Fenomena ini sangat relevan untuk perambatan retak mendekati ambang batas, pada aplikasi beban besar, dan ketika embrittlement korosif hadir . Embrittlement lingkungan menghasilkan permukaan retak intergranular yang kasar, yang mendorong penutupan retak karena “retakan yang dimuat secara uniaksial terbuka dalam mode tiga dimensi yang kompleks, memungkinkan interaksi permukaan dan transfer beban” . Selain itu, interaksi permukaan retak menjadi lebih relevan ketika perpindahan celah retak kurang dari ukuran butir retak . Produk korosi yang terbentuk pada permukaan retak juga memiliki dampak besar pada tingkat pertumbuhan retak, dan dalam beberapa kasus, itu dapat memperlambat laju pertumbuhan ke nilai-nilai bahkan lebih rendah daripada yang untuk udara atau vakum .

Efek ini sangat tergantung pada stabilitas produk korosi selama pemuatan kompresi-ketegangan yang kompleks dan pada kondisi fluida . Dengan cara yang sama, cairan juga bisa masuk ke rongga retak dan bertindak sebagai irisan untuk retak (Phull,B,2003).

2.7 Mekanisme Korosi Kelelahan

Terutama empat mekanisme telah diekspos dalam upaya menjelaskan proses Korosi Kelelahan. Meskipun setiap mekanisme dapat mencakup beberapa aspek dari fenomena kompleks ini, tidak satupun dari mereka yang mampu menjelaskan keseluruhan proses (Evins,J.L,2004).

2.7.1 Pitting Corrosion

Salahsatu mekanisme pertama yang diusulkan sebagai penjelasan untuk pengurangan yang nyata dalam daya tahan lelah di lingkungan yang korosif adalah pembentukan lubang korosi pada permukaan material, yang bertindak sebagai titik konsentrasi tegangan di mana retakan mudah diinti, seperti yang diamati McAdam dalam 1928 (Evins,J.L,2004). Penekan siklik bahan mempercepat lubang korosi dan menyebabkan ekstensi melintang lubang, mengembangkan celah atau celah . Studi lain telah menunjukkan bahwa kehadiran konstan media korosif menyebabkan efek yang paling merusak, dibandingkan dengan situasi di mana lingkungan yang agresif hanya hadir sampai pembentukan lubang-lubang korosi. Dalam kasus-kasus terakhir, lubang-lubang korosi bertindak sebagai takik mekanis pada spesimen, menghadirkan kekuatan kelelahan yang jauh lebih tinggi pada daya tahan lama dibandingkan dengan yang memiliki media korosif yang diterapkan secara terus menerus selama seluruh pengujian (Frost,N.E,1974). Penurunan umur komponen di bawah Korosi Kelelahan juga telah diamati pada lingkungan dan bahan yang tidak menunjukkan pembentukan lubang korosi. Pada tahun 1971, Laird dan Duquette mengklaim bahwa pembentukan lubang dating sebagai hasil dari retakan yang sebelumnya terbentuk .

2.7.2 Korosi di Lokasi Prefensial

Mekanisme ini mengusulkan bahwa korosi menyerang bintik-bintik dimana logam segar terpapar ke media yang agresif, membuat material rentan terhadap kerusakan korosif. Bintik-bintik lemah tersebut diciptakan oleh intrusi dan ekstrusi yang disebabkan oleh bidang slip persisten. Serangan itu menghasilkan konsentrator stres di mana bahan itu sudah sangat tegang, menyebabkan penurunan kekuatan kelelahan bahan. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa bintik-bintik yang sangat cacat pada material adalah anodik sehubungan dengan daerah yang tidak terdeformasi, meningkatkan proses elektrokimia. Meskipun fenomena ini tidak disukai secara termodinamik, logam segar diyakini menghadirkan energi aktivasi yang lebih rendah dan karenanya lebih rentan untuk bereaksi dengan lingkungan korosif (Evins,J,L,2004).

2.7.3 Hidrogen Embrittlement

Ketika baja tegang di hadapan hidrogen, mikrostruktur material mengalami proses berbahaya yang dikenal sebagai embrittlement hidrogen, yang terdiri atas difusi atom hidrogen terlarut ke dalam kisi logam, menyebabkan pelebaran dan melemahkan ikatan atomnya. Hal ini menyebabkan embrittlement dari bahan yang mengelilingi ujung retak, yang mempromosikan penyebaran retak lebih lanjut. Hidrogen embrittlement khas dalam paduan kekuatan tinggi Karena kerusakan semacam ini tergantung pada difusi dan adsorpsi, itu dianggap sebagai mekanisme yang tergantung waktu. Berlawanan dengan mekanisme disolusi, proses ini tidak membentuk lapisan oksida pasif apa pun, sehingga difusi hidrogen dapat terjadi selama seluruh siklus beban. Penambahan oksigen dalam jumlah kecil diketahui praktis menghilangkan mekanisme Korosi Kelelahan rapuh dalam pertumbuhan retak (Jonsson,S,1995).

2.7.4 Pecah film Pelindung Oksidasi

Beberapa logam, seperti aluminium, tembaga dan stainless steel, membentuk lapisan oksida pelindung, yang mencegah bahan di bawahnya dari serangan korosif lebih lanjut. Oleh karena itu, mekanisme ini mengusulkan bahwa Korosi Kelelahan terjadi karena film pelindung ini rusak dan retak Korosi Kelelahan terbentuk dengan mudah. Karena pekerjaan ini tidak berurusan dengan logam yang membentuk film oksida pelindung, mekanisme ini tidak akan dipertimbangkan di sini

2.7.5 Pengurangan Energi Permukaan

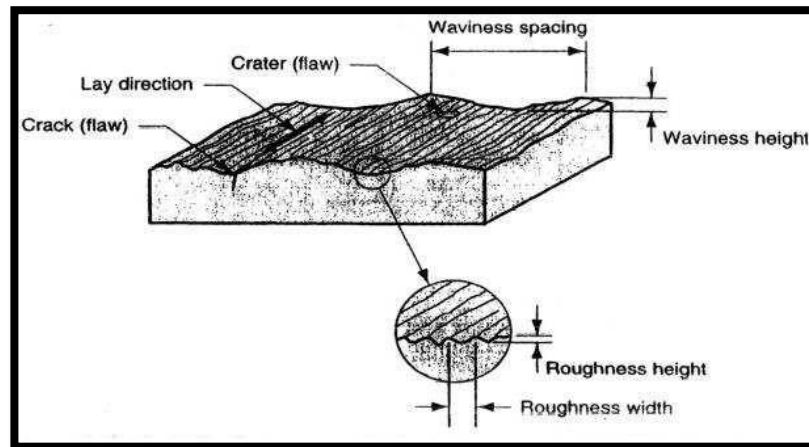
Pengurangan energi permukaan karena adsorpsi spesies lingkungan dikenal sebagai mekanisme Rebinder, yang awalnya menyatakan bahwa agen permukaan-aktif teradsorpsi ke dalam retakan, meningkatkan tekanan internalnya, mengakibatkan perbanyakkan retakan. Kemudian, teori ini dimodifikasi untuk menyatakan bahwa spesies yang menyerap benar-benar mengurangi energi permukaan material, memungkinkan pembentukan tonjolan lebih mudah yang dihasilkan dari slipping band (Evins,J.L,2004).

2.8 Kekasaran Permukaan

2.8.1 Pengertian

Kekasaran permukaan adalah karakteristik terukur yang mengacu pada penyimpangan kekasaran sebagaimana uraian di atas. Permukaan akhir (surface finish) adalah suatu istilah hubungan yang mencerminkan kehalusan atau mutu umum suatu permukaan. Didalam pemakaian kata yang umum, permukaan akhir sering digunakan sebagai suatu kata lain untuk kekasaran permukaan. Tekstur permukaan seperti yang ditampilkan pada gambar 2.9 terdiri dari penyimpangan acak yang berulang pada permukaan normal dari suatu obyek permukaan. Kekasaran mengacu pada jarakpenyimpangan dari permukaan yang nominal yang ditentukan oleh karakteristik material dan cara memproses

hinggadiperoleh bentuk permukaan itu. Waviness menggambarkan besar penyimpangan pengaturan jarak sayatan saat pengerjaan, kondisi ini dapat diakibatkan oleh getaran, lenturan, perlakuan panas dan factor lain (Karmin dkk, 2013).



Gambar 2.13 Surface Texture Features

Kekasaran permukaan merupakan parameter penting yang mempengaruhi umur kelelahan / kekuatan suatu material. Pengaruh kekasaran permukaan terhadap umur kelelahan paduan Al 6160 diselidiki dalam penelitian ini. Spesimen kelelahan standar dibuat sesuai dengan persyaratan mesin uji kelelahan aksial 25KN dan diuji untuk umur kelelahan siklus rendah. Spesimen dari tiga kategori diuji umur kelelahan dan hasilnya dibandingkan. Pertama, spesimen halus sesuai standar yang diuji, diikuti spesimen dengan tingkat kekasaran tingkat pertama, diikuti oleh spesimen dengan tingkat kekasaran tingkat dua. Jelas terlihat dari hasil pengujian bahwa, dengan meningkatnya kekasaran permukaan, umur kelelahan menurun secara drastis (Gopini Akula,2018)

2.8.2 Parameter Kekerasan

- a) Penyimpangan Rata-rata Aritmatik dari Garis Rata-rata Profil (R_a)

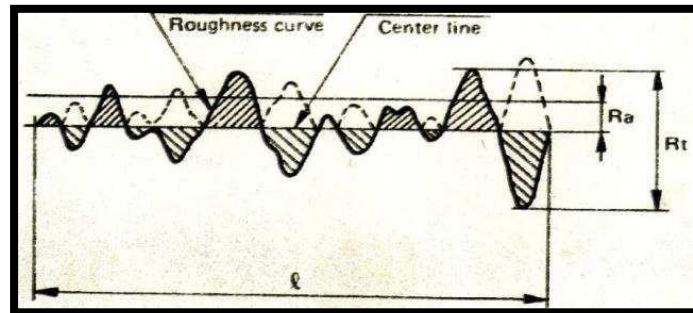
R_a adalah rata-rata absolut penyimpangan yang diukur dari

garis rata-rata (*center line*) profil efektif .

$$Ra = M / l$$

M = Luas keseluruhan (arsiran) diatas dan dibawah *center line*

l = Panjang bagian yang diuji (*evaluation length*)



Gambar 2.14 Kurva Kekasaran High of Rougness Curve (Rt)

Ketidak rataan ketinggian maksimum adalah jarak antara dua garis sejajar yang menyinggung profil pada titik tertinggi dan terendah antara panjang bagian yang diuji

b) Ketidak rataan Ketinggian Sepuluh Titik (Rz)

Ketidak rataan ketinggian sepuluh titik (Rz) adalah jarak rata-rata antara lima puncak tertinggi dan lima lembah terdalam disepanjang bagian yang diuji, yang diukur dari garis sejajar dengan garis rata-rata disepanjang "*evaluation length*"

2.8.3 Pertimbangan Yang Menyangkut Kekasaran Permukaan

Pertimbangan pertimbangan yang menyangkut kekasaran permukaan antaralain;

- a) Alasan estetika, permukaan itu halus dan bebas goresan dan memungkinkan memberi suatu kesan baik kepada pelanggan.
- b) Permukaan mempengaruhi keselamatan.
- c) Gesekan dan Keausan tergantung pada karakteristik permukaan.

- d) Permukaan mempengaruhi sifat mekanik dan sifat fisis; contoh, permukaan yang kasar menjadikan titik konsentrasi tegangan.
- e) Perakitan bagian-bagian permukaan mengikat sambungan (suaian sesak)
- f) Memperbaiki kontak elektrik permukaan.

2.8.4 Cara Mengukur Permukaan

Banyak cara yang dapat digunakan untuk mengukur tingkat kekerasan permukaan. Cara yang paling sederhana dengan meraba atau menggeruk permukaan yang diperiksa. Cara ini sudah pasti ada kelemahannya, karena sifat hanya membandingkan saja. Dan dasar pengambilan keputusan baik tidaknya suatu permukaan adalah berdasarkan perasaan si pengukur belak, yang tentu antara pengukuran satu dengan pengukuran lainnya akan berbeda. Berikut beberapa cara pengukuran permukaan yang lebih teliti;

- a) Pemeriksaan kekasaran permukaan dengan Mikroskop (*Microscopic Inspection*) Keterbatasan pemeriksaan permukaan dengan mikroskop ini adalah pengambilan bagian permukaan yang sempit setiap kali akan melakukan pengukuran. Maka dari itu, dalam pemeriksaan kekasaran permukaan harus dilakukan berulang-ulang untuk kemudian dicari harga rata-ratanya. Pemeriksaan kekasaran permukaan dengan mikroskop ini termasuk juga salah satu pengukuran dengan cara membandingkan, yaitu membandingkan hasil pemeriksaan permukaan yang diukur dengan permukaan dari pembanding yang kedua-duanya dilihat dengan mikroskop. Pertama melihat permukaan ukur dengan mikroskop, kemudian ganti melihat permukaan pembanding. Dengan membandingkan kedua permukaan yang dilihat dengan

mikroskop ini maka dapat dianalisis bagaimana keadaan yang sesungguhnya dari permukaan yang diperiksa.

- b) Pemeriksaan kekasaran permukaan dengan foto (*surface photograph*) Pengukuran dengan cara ini adalah mengambil gambar atau memotret permukaan yang akan diperiksa. Kemudian foto permukaan tersebut diperbesar dengan perbesaran yang berbeda-beda. Perbesaran yang diambil adalah perbesaran secara vertikal. Dengan membandingkan hasil perbesaran foto permukaan yang berbeda-beda ini maka dapat dianalisis ketidakteraturan dari permukaan yang diperiksa.
- c) Pemeriksaan Kekasaran dengan peralatan Kekasaran secara Mekanik *Mechanical Roughness Instrument* yang disingkat dengan *MECRIN* adalah peralatan untuk memeriksa kekasaran permukaan yang merupakan perkembangan dari cara perabaan atau penggarukan permukaan. Alat ini bekerja dengan sistem mekanik dan diproduksi oleh *Messrs. Ruber and Co.* Peralatan ini hanya cocok untuk permukaan yang tidak teratur. Sebagai peraba dari alat ini adalah sebuah pelat tipis. Alatnya terdiri dari pelat tipis sebagai peraba, penutup pelat, jam ukur (*dial indicator*) dan kait pengatur.