

SKRIPSI
ANALISA PENGARUH BEBAN TERMAL TERHADAP
KEKUATAN *BENDING* DAN KETAHANAN KOROSI MATERIAL
STAINLESS STEEL 316L* DAN *STAINLESS STEEL 304

Disusun dan Diajukan Oleh:

RAHMAT FATAWY

D021181337



DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISA PENGARUH BEBAN TERMAL TERHADAP KEKUATAN BENDING DAN KETAHANAN KOROSI MATERIAL STAINLESS STEEL 316L DAN STAINLESS STEEL 304

Disusun dan diajukan oleh

RAHMAT FATAWY

D021 18 1337

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 14 November 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping


Azwar Hayat, S.T., M.Sc., Ph.D
NIP. 198401262012121002


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

Ketua Program Studi,


Prof. Dr. Ir. Jalaluddin, S.T., M.T
NIP. 197208252000031001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : Rahmat Fatawy

NIM : D021181337

Program Studi : Teknik Mesin

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

ANALISA PENGARUH BEBAN TERMAL TERHADAP KEKUATAN *BENDING* DAN KETAHANAN KOROSI MATERIAL *STAINLESS STEEL 316L* DAN *STAINLESS STEEL 304*

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

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

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

Gowa, 01. November 2023

Yang Menyatakan


Rahmat Fatawy

ABSTRAK

RAHMAT FATAWY. *Analisa pengaruh beban termal terhadap kekuatan bending dan ketahanan korosi material Stainless steel 316l dan Stainless steel 304* (dibimbing oleh Lukmanul Hakim Arma dan Azwar Hayat)

Stainless steel merupakan logam dengan kandungan krom di atas 10% sebagai fungsi baja tahan karat. Namun pemanasan pada suhu yang tidak tepat dapat memunculkan fenomena sensitisasi yang mengakibatkan krom pada *Stainless steel* mengendap ke batas butir sehingga *Stainless steel* rentan terhadap korosi sumuran. Penelitian memperlihatkan bagaimana memperbaiki kembali *Stainless steel* 304 dan 316L yang telah terkena fenomena sensitisasi dengan menggunakan proses heat treatment pada suhu diluar dampak suhu fenomena sensitisasi bekerja, dengan menggunakan larutan FeCl_3 sebagai metode pengkorosian cepat. Berdasarkan data yang didapatkan melalui pengujian *bending* dan struktur mikro, baik pada *Stainless steel* 304 maupun 316L pada suhu 650°C selama 1 jam mengalami sensitisasi dimana terlihat pada pengurangan kekuatan *bending* yang terjadi sebesar $1291,61 \text{ N/mm}^2$ pada 304 dan pada 316L sebesar $2124,32 \text{ N/mm}^2$, begitu pula dengan proses heat treatment pada suhu 450°C selama 1 jam dapat menaikkan kembali kekuatan *bendingnya* hingga $1764,66 \text{ N/mm}^2$ pada 304 dan pada 316L sebesar $2310,56 \text{ N/mm}^2$, namun pada material 316L proses heat treatment dianggap belum optimal dikarenakan belum mencapai kekuatan base materialnya yang kekuatan *bendingnya* mencapai $3290,85 \text{ N/mm}^2$. Berbeda dengan spesimen 316L, pada percobaan perendaman larutan FeCl_3 *Stainless steel* 304 mengalami desensitisasi setelah terkena dampak perendaman sehingga kekuatan *bending* setelah peredaman mengalami peningkatan sebesar $1548,73 \text{ N/mm}^2$ dari kekuatan *bending* base material yang hanya sebesar $1333,15 \text{ N/mm}^2$ dan pada hasil uji mapping EDS terlihat kandungan krom pada spesimen yang terpapar larutan FeCl_3 lebih merata dibandingkan dengan spesimen tanpa adanya pengaruh larutan FeCl_3 .

Kata Kunci : *Stainless steel*, Korosi, Sensitisasi, Desensitisasi, FeCl_3

ABSTRACT

RAHMAT FATAWY. *Analysis of the effect of thermal loads on the bending strength and corrosion resistance of Stainless steel 316L and Stainless steel 304 materials.* (supervised by Lukmanul Hakim Arma and Azwar Hayat)

Stainless steel is a metal with a chrome content above 10% with the function as corrosion resistance. Heating at an inappropriate temperature can cause a sensitization phenomenon which causes the chrome in Stainless steel to precipitate to the grain boundaries so that Stainless steel is susceptible to pitting corrosion. This research shows how to repair 304 and 316L Stainless steel which has been affected by the sensitization phenomenon by using a heat treatment process at a temperature beyond the temperature impact of the sensitization phenomenon at work, using FeCl_3 solution as a fast corrosion method. Based on data obtained through bending and microstructure testing, both 304 and 316L Stainless steel at a temperature of 650°C for 1 hour experienced sensitization which was seen in the reduction in bending strength which occurred by 1291.61 N/mm^2 for 304 and 2124.32 N/mm^2 for 316L., as well as the heat treatment process at a temperature of 450°C for 1 hour, can increase the bending strength again to 1764.66 N/mm^2 on 304 and 316L it is 2310.56 N/mm^2 , but on the 316L material process The heat treatment is considered not optimal because it has not reached the strength of the base material, whose bending strength reaches 3290.85 N/mm^2 . In contrast to the 316L specimen, in the FeCl_3 solution immersion experiment, Stainless steel 304 experienced desensitization after being exposed to the impact of immersion so that the bending strength after compression increased by 1548.73 N/mm^2 from the bending strength of the base material which was only 1333.15 N/mm^2 and in the results The EDS mapping test looks at the chrome content in specimens exposed to the FeCl_3 environment more evenly compared to specimens without the influence of the FeCl_3 environment.

Keywords : *Stainless steel, Corrosion, Sensitization, Desensitization, FeCl_3*

DAFTAR ISI

SAMPUL	Error! Bookmark not defined.
LEMBAR PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN KEASLIAN.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
KATA PENGANTAR.....	1
BAB I PENDAHULUAN.....	2
1.1 Latar Belakang	2
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Pengaplikasian <i>Stainless steel</i> di Bidang Otomotif dan Transportasi	6
2.1.1 Exhaust Manifold	8
2.1.2 Flexible Pipe.....	10
2.2 Baja tahan karat (<i>Stainless steel</i>).....	11
2.3 Baja Tahan Karat <i>Austenite Stainless steel</i>	13
2.4 Sensitisasi pada Baja Tahan Karat	14
2.5 Perlakuan Panas (<i>Heat Treatment</i>).....	17
2.6 <i>Post Weld Heat Treatment</i> (PWHT)	19
2.7 Besi (III) Klorida (FeCl_3)	21
2.8 Korosi	22
2.9 Klasifikasi Korosi.....	24
2.10 Uji Kekuatan <i>Bending</i>	28
2.11 Uji Mikrostruktur	29
2.12 Uji Dispersive X-Ray Spectroscopy.....	31
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	33
3.2 Alat dan Bahan	33
3.2.1 Alat.....	33

3.2.2	Bahan.....	33
3.3	Metode Pengambilan Data	34
3.3.1	Studi lapangan (<i>Field Research</i>).....	34
3.3.2	Studi kepustakaan (<i>library research</i>).....	34
3.4	Prosedur Penelitian.....	34
3.4.1	Tahap Preparasi Spesimen	34
3.4.2	Pemberian Beban Termal.....	35
3.4.3	Tahap Proses Uji Korosi	36
3.4.4	Tahap Pengujian <i>Bending</i>	36
3.4.5	Tahap Pengujian Struktur Mikro.....	36
3.5	Flowchart Penelitian.....	38
BAB IV PEMBAHASAN.....		39
4.1	Ketahanan Material Terhadap Korosi	39
4.1.1	Kekuatan <i>Bending Stainless steel</i> 316L Sebelum Pengkorosian	40
4.1.2	Kekuatan <i>Bending Stainless steel</i> 316L Setelah Pengkorosian.....	41
4.1.3	Kekuatan <i>Bending Stainless steel</i> 304 Sebelum Pengkorosian.....	42
4.1.4	Kekuatan <i>Bending Stainless steel</i> 304 Setelah Proses Pengkorosian 43	
4.2	Struktur Mikro.....	45
4.3.1	Penampakan Mikrostruktur <i>Stainless steel</i> 316L Setelah Korosi	45
4.3.2	Penampakan Mikrostruktur <i>Stainless steel</i> 304 Setelah Korosi.....	46
4.3.3	Penampakan Mikrostruktur <i>Stainless steel</i> 304 Sebelum Korosi	47
4.3	Korosi Yang Terbentuk	48
4.3.1	Penampakan Korosi <i>Stainless steel</i> 316L Setelah Korosi.....	49
4.3.3	Penampakan Korosi <i>Stainless steel</i> 304 Setelah Korosi	50
4.4	<i>Energi Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> (EDS)	50
BAB V PENUTUP.....		54
5.1	Kesimpulan.....	54
5.2	Saran.....	54
DAFTAR PUSTAKA.....		56
LAMPIRAN		

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Komposisi unsur kimia <i>Stainless steel</i> 304.....	14
Tabel 2 Komposisi unsur kimia <i>Stainless steel</i> 316L	14

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Bagian bagian sistem pembuangan	7
Gambar 2 <i>Stainless steel</i> pada bagian bagian pembuangan	9
Gambar 3 Exhaust manifold	10
Gambar 4 Flexible pipe	11
Gambar 5 Laju presipitasi Cr_{23}C_6 sebagai fungsi kadar karbon	15
Gambar 6 Penipisan kromium dari austenit dekat batas butir akibat pengendapan kromium karbida	16
Gambar 7 Variasi lokus pengendapan karbida terhadap waktu	16
Gambar 8 Proses PWHT	21
Gambar 9 Sel korosi sederhana	23
Gambar 10 Korosi seragam pada pipa	24
Gambar 11 Korosi galvanik	25
Gambar 12 Korosi sumuran	26
Gambar 13 Korosi batas butir	26
Gambar 14 Korosi retak tegangan	27
Gambar 15 Korosi erosi	27
Gambar 16 Korosi mikroba	28
Gambar 17 (a) Uji <i>bending</i> 3 titik, (b) Uji <i>bending</i> 4 titik	29
Gambar 18 Struktur mikro AISI 1030	30
Gambar 19 Mikroskop optik untuk logam	31
Gambar 20 SEM dengan unit EDS	32
Gambar 21 Hubungan temperatur dan waktu sebagai fungsi laju pemanasan pada saat penelitian	35
Gambar 22 <i>Flowchart</i> Penelitian	38
Gambar 23 (a) Pelarutan bubuk FeCl_3 dengan menggunakan magnetic stirer, (b) penampakan spesimen yang telah terendam FeCl_3 selama 1 jam, (c) larutan FeCl_3 , (d) perendaman spesimen didalam larutan FeCl_3	39
Gambar 24 Kekuatan <i>bending</i> <i>Stainless steel</i> 316L yang tanpa terkorosi	40
Gambar 25 Kekuatan <i>bending</i> <i>Stainless steel</i> 316L yang telah terkorosi	41

Gambar 26 Kekuatan <i>bending</i> <i>Stainless steel</i> 304 yang tanpa korosi.....	42
Gambar 27 Kekuatan <i>bending</i> <i>Stainless steel</i> 304 yang telah korosi.	44
Gambar 28 penampakan struktur mikro spesimen <i>Stainless steel</i> 316L (a) raw material, (b) beban termal 650°C selama 1 jam perendaman FeCl ₃ selama 1 jam, dan (c) <i>heat treatment normalizing</i> 450° perendaman FeCl ₃ selama 1 jam.....	45
Gambar 29 penampakan struktur mikro spesimen <i>Stainless steel</i> 316L (a) raw material, (b) beban termal 650°C selama 1 jam perendaman FeCl ₃ selama 1 jam, dan (c) <i>heat treatment normalizing</i> 450° perendaman FeCl ₃ selama 1 jam.....	46
Gambar 30 penampakan struktur mikro spesimen <i>Stainless steel</i> 304 (a) beban termal 650°C selama 1 jam, (b) <i>heat treatment normalizing</i> 450°C....	47
Gambar 31 penampakan korosi <i>pitting</i> pada spesimen <i>Stainless steel</i> 304 setelah tersensitisasi dan terkorosi.....	48
Gambar 32 penampakan bentuk korosi spesimen <i>Stainless steel</i> 316L (a) raw material, (b) beban termal 650°C selama 1 jam, perendaman FeCl ₃ selama 1 jam, dan (c) <i>heat treatment normalizing</i> 450°, perendaman FeCl ₃ selama 1 jam, (d) tampilan struktur mikro spesimen (b).....	49
Gambar 33 penampakan bentuk korosi spesimen <i>Stainless steel</i> 304 (a) raw material, (b) beban termal 650°C selama 1 jam perendaman FeCl ₃ selama 1 jam, dan (c) <i>heat treatment normalizing</i> 450° perendaman FeCl ₃ selama 1 jam, (d) tampilan struktur mikro spesimen (b).....	50
Gambar 34 Penampakan hasil uji EDS <i>Stainless steel</i> 304 setelah pemberian beban termal 650°C selama 1 jam tanpa perendaman larutan FeCl ₃	52
Gambar 35 Penampakan hasil uji EDS <i>Stainless steel</i> 304 setelah pemberian beban termal 650°C selama 1 jam disertai dengan perendaman larutan FeCl ₃ selama 1 jam.....	53

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT atas segala rahmat dan limpahan nikmat , dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhirnya dan skripsi dengan lancar dan baik. Serta tak lupa pula shalawat dan salam penulis haturkan kepada baginda Muhammad SAW sebagai obor keselamatan di dunia dan akhirat.

Dalam penelitian ini, penulis menerima begitu banyak bimbingan serta bantuan dari berbagai pihak baik pada lingkungan universitas maupun luar lingkungan universitas, dengan itu penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, ayahanda Makmur dan ibunda Rusmawati, serta saudara saudari yang senantiasa membantu dan mendukung jalannya penelitian baik berupa material maupun dengan doa dan semangat.
2. Bapak Ir. Azwar Hayat, ST., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing 1 dan Bapak Dr.Eng Lukmanul Hakim Arma, ST., MT selaku dosen pembimbing 2 yang telah banyak membantu dan membimbing penulis dalam penelitiannya.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Ilyas Renreng, MT dan bapak Dr. Ir. Hairul Arsyad, ST., MT selaku dosen penguji yang senantiasa memberikan saran dan masukan sehingga penelitian ini menjadi lebih baik.
4. Bapak Edi Iskandar S.T. selaku laboran lab metalurgi fisik yang senantiasa membantu penulis dalam menjalankan penelitiannya.
5. Bapak Prof. Dr. Eng. Jalaluddin ST., MT, selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, serta Bapak dan Ibu dosen serta Staf Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Seluruh anak-anak REACTOR18 yang selalu memberikan motivasi dan dukungan selama perkuliahan.

Demikian, penulis ucapkan terima kasih dan semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca maupun bagi penulis

Gowa,

2023

Penulis

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Korosi merupakan penurunan mutu logam akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungannya yang berhubungan langsung dengan udara terbuka, sering disebut juga dengan korosi atmosfer. Hampir seluruh produk korosi disebabkan oleh lingkungan atmosfer. Hal ini dikarenakan pada umumnya logam selalu berhubungan dengan udara terbuka yang kelembaban dan kandungan polutannya dapat mempengaruhi korosifitas logam. Korosi atmosferik sangat dipengaruhi oleh kondisi topografi dan iklim atau lingkungan. Faktor faktor seperti temperatur, kelembaban, dan kandungan bahan kimia dalam udara sangat menentukan laju korosi. Sementara itu, komposisi logam, struktur metalurgi, dan proses pembuatan logam juga mempercepat timbulnya korosi (Affandi, Tanjung, Nasution, Fonna, & Huzni, 2020).

Dalam perkembangan dunia teknologi dan industri, logam merupakan salah satu bahan utama yang sangat besar peranannya. Salah satu karakteristik logam yang paling rentan terjadi dan mengganggu kinerja logam adalah korosi. Meski logam memiliki lapisan pelindung, korosi tetap akan terjadi apabila logam terekspos terlalu lama dalam lingkungan asam atau medium yang mengandung klorida (hastuti, aldio, & nugroho, 2021).

Baja merupakan salah satu material logam yang banyak diaplikasikan dalam dunia industri. Ketahanan korosi pada baja dipengaruhi oleh unsur paduan yang terkandung di dalamnya seperti nikel (Ni), krom (Cr), dan mangan (Mn). Ketiga unsur tersebut akan berdampak pada sifat ketahanan korosi. *Stainless steel* merupakan baja anti karat yang tahan terhadap korosi karena memiliki unsur paduan minimal 18% krom dan 8% nikel. *Stainless steel* dapat diperoleh dengan mencampurkan feronikel (18-20% Ni, 75-78% Fe) ke dalam leburan nikel ferokrom melalui oksidasi sebelum dilakukan proses pembuatan baja. Feronikel yang ditambahkan disesuaikan dengan kandungan nikel yang terdapat dalam nikel ferokrom (Sinaga, Simajuntak, & Manurung, 2020).

Karbon cenderung berdifusi menuju batas butir pada baja tahan karat austenitik selama preparasi material atau pemanasan yang tidak tepat dalam kisaran suhu 425 - 815°C. Hal ini menyebabkan presipitasi $(Fe, Cr)_23C_6$ yang berdekatan dengan batas butir. Konsentrasi kromium di daerah batas butir berkurang sedangkan konsentrasi kromium di dalam butir tetap dan tidak berubah. Proses ini yang disebut dengan sensitisasi. Baru - baru ini, penelitian sebelumnya dari uji laboratorium menunjukkan bahwa sensitisasi pada 650°C dapat menyebabkan embrittlement (penggetasan) dari baja AISI 304. Sensitisasi merupakan fenomena buruk yang terjadi pada *austenitic Stainless steel* (SS) ketika diterapkan pada peningkatan suhu yang tidak tepat seperti apa yang terjadi selama pengelasan atau operasi pada kisaran suhu antara 400°C dan 800°C. Ini adalah fenomena yang terkenal dan terdiri dari presipitasi karbida pada batas butir dan pengurangan krom di daerah yang berdekatan dengan batas butir, membuat bahan yang rentan terhadap korosi intergranular (Nirmolo, 2012).

Stainless steel 316 L adalah *Stainless steel* molibdenum austenitik. Kandungan nikel dan molibdenum yang lebih tinggi di kelas ini memungkinkannya untuk menunjukkan sifat tahan korosi keseluruhan yang lebih baik daripada 304, terutama yang berkaitan dengan korosi *pitting* dan celah di lingkungan klorida. Selain itu, Alloy 316L memberikan kekuatan tarik, creep, dan tegangan pecah suhu yang sangat baik, serta kemampuan bentuk dan kemampuan las yang luar biasa. 316L adalah versi karbon yang lebih rendah dari 316 dan kebal dari kepekaan; oleh karena itu, sangat sering digunakan dalam komponen yang mengalami pengelasan berat (Sinaga A. J., 2020).

Berdasarkan uraian di atas, Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar laju korosi yang terjadi terhadap material besi *Stainless steel* 316L pada perubahan temperatur. Oleh karena itu peneliti tertarik untuk meneliti tentang **“ANALISA PENGARUH BEBAN THERMAL TERHADAP KEKUATAN BENDING DAN KETAHANAN KOROSI MATERIAL *STAINLESS STEEL* 316L DAN *STAINLESS STEEL* 304”**

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan Latar belakang di atas, terdapat beberapa permasalahan yang dapat dirumuskan yaitu:

1. Bagaimana kekuatan *bending* material setelah terjadi peningkatan suhu/pemberian beban termal dan pengkorosian pada *Stainless steel* 316L dan *Stainless steel* 304?
2. Bagaimana bentuk korosi yang terjadi setelah pemberian beban termal dan pengkorosian pada *Stainless steel* 316L dan *Stainless steel* 304?
3. Bagaimana morfologi permukaan pada material *Stainless steel* 316L dan *Stainless steel* 304 setelah pemberian beban termal dan perendaman larutan korosif FeCl_3 ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun beberapa tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan kekuatan *bending* material *Stainless steel* 316L dan *Stainless steel* 304 setelah pemberian beban termal dan perendaman larutan korosif FeCl_3 .
2. Mengamati bentuk korosi yang terjadi pada material *Stainless steel* 316L dan *Stainless steel* 304 setelah pembebanan termal dan perendaman larutan korosif FeCl_3 .
3. Mendapatkan struktur mikro *Stainless steel* 316L dan *Stainless steel* 304 setelah perendaman larutan korosif FeCl_3 dan pengujian *bending* dengan cara metalografi.

1.4 Batasan Penelitian

Adapun beberapa batasan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material yang digunakan berupa *Stainless steel* tipe 316L dan 304.
2. Menggunakan pembebanan termal pada temperatur 650°C selama 1 jam dan *heat treatment normalizing* pada temperatur 450°C selama 1 jam pada masing masing spesimen uji.
3. Menggunakan metode pengkorosian cepat menggunakan larutan FeCl_3 dengan lama perendaman 1 jam.
4. Kondisi lingkungan setelah pemanasan dianggap sama.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun beberapa manfaat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan pengetahuan mengenai sifat sifat yang terjadi pada *Stainless steel* tipe 316L dan 304 setelah mengalami beban termal, efek perendaman larutan FeCl_3 , serta efek *heat treatment* terhadap material.
2. Dapat memberikan informasi di bidang material.
3. Menjadi wadah pengaplikasian ilmu pengetahuan penulis, khususnya di bidang material.
4. Sebagai pemenuhan syarat untuk memperoleh gelar S1 pada program studi Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengaplikasian *Stainless steel* di Bidang Otomotif dan Transportasi

Penggunaan baja tahan karat pada mobil dulunya hanya berupa aplikasi dekoratif: penutup roda dan trim dengan jumlah kecil digunakan untuk katup dan klem selang. Namun, ketika mobil menjadi lebih canggih secara teknis dan seiring dengan meningkatnya tuntutan ketahanan dan lingkungan, peran baja tahan karat menjadi semakin fungsional dan kurang dekoratif. Paduan baja tahan karat yang umum digunakan di bidang otomotif saat ini umumnya dirancang dengan baik untuk aplikasi spesifiknya dan mewakili beberapa rekayasa aplikasi yang paling berkembang dalam penggunaan baja tahan karat. Pemeriksaan praktik yang disukai dalam pemilihan material dalam sistem otomotif adalah contoh yang sangat baik tentang aturan penggunaan kadar paduan yang paling sederhana dan terendah yang dapat melakukan pekerjaan tersebut. Karena para insinyur otomotif dan produsen baja telah berkolaborasi dengan baik, kedua belah pihak mendapatkan manfaat yang sangat besar, begitu pula konsumen, dan produsen mobil telah menjadi pengguna baja tahan karat terbesar. (McGuire, 2008)

Sistem pembuangan merupakan penggunaan baja tahan karat terbesar di pasar otomotif, namun ada aplikasi penting lainnya yang tidak dapat diabaikan: katup dan gasket, klem selang, komponen sabuk pengaman dan kantung udara, pipa, perangkat keras, dan filter. Dan, akan ada aplikasi baru yang merespons kebutuhan sosio-ekonomi baru, seperti kelayakan tabrakan yang lebih besar, bobot yang lebih ringan, atau ketahanan terhadap korosi pada bahan bakar baru. Namun, karena sistem pembuangan saat ini mendominasi, maka sistem tersebut dibahas terlebih dahulu. (McGuire, 2008)



Gambar 1 Bagian bagian sistem pembuangan

(www.goapr.co.uk/)

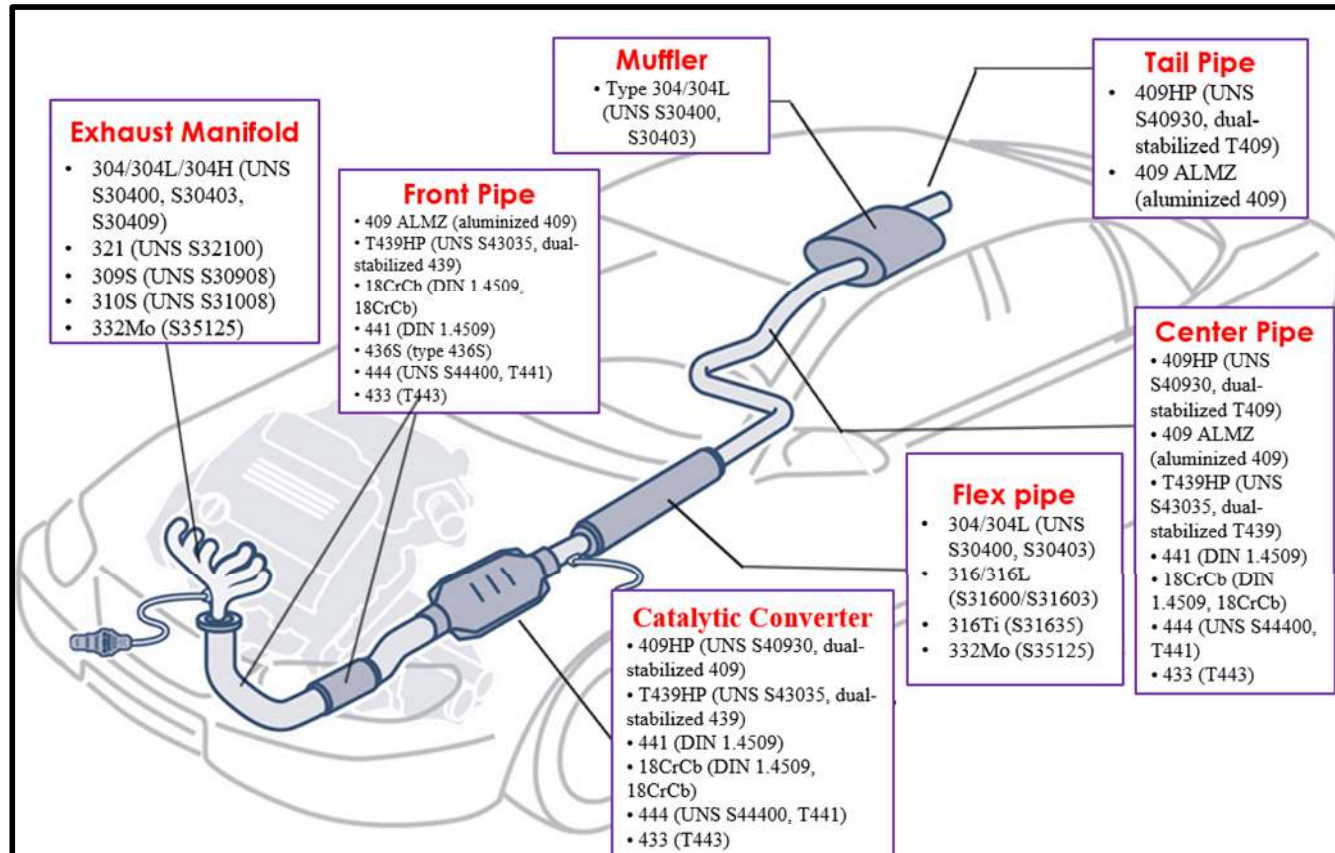
- Ketika kadar kromium meningkat, ketahanan terhadap oksidasi dan korosi juga meningkat, namun kekuatan luluh juga meningkat, dan keuletan menurun.
- Paduan dengan silikon, aluminium, dan molibdenum juga meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi, namun unsur-unsur ini mempunyai efek merugikan yang sama terhadap keuletan sekaligus meningkatkan kekuatan panas.
- Niobium yang melebihi kebutuhan untuk stabilisasi merupakan penguat larutan padat yang kuat dan efektif pada suhu tinggi.
- Baja tahan karat feritik mempunyai sifat pembentukan yang sangat anisotropik. Baja ini menyerupai baja karbon dengan kemampuan formabilitas tinggi karena cenderung tidak tipis saat diregangkan, sehingga sangat membantu dalam kemampuan formabilitas.
- Paduan feritik dapat membentuk fase keras dan rapuh yang disebut α' dalam proses yang biasa disebut penggetasan 885 °F (atau 475 °C). Ini hanya faktor pada paduan dengan kromium 18% atau lebih, terutama yang mengandung molibdenum dan aluminium. Pekerjaan dingin mempercepat pembentukan fase ini.
- Fasa σ tidak mudah terdapat pada paduan yang mengandung kurang dari 20% Cr, sehingga tidak dipertimbangkan untuk sistem pembuangan kecuali silikon atau molibdenum juga meningkat.

- Melapisi baja feritik dengan aluminium efektif dalam mencegah oksidasi dan korosi.

Semua faktor ini berperan dalam desain sistem pembuangan. Karena paduannya telah berevolusi dengan sangat baik agar sesuai dengan kebutuhan masing-masing komponen, kami membahasnya segmen demi segmen melalui sistem pembuangan. Manifold buang mengumpulkan gas panas yang terbakar dari mesin dan menyalurkannya ke pipa depan. Manifold buang harus memiliki kekuatan suhu tinggi yang baik dan ketahanan terhadap kelelahan termal. Itu juga harus mampu menahan oksidasi pada suhu gas buang yang bisa mencapai 950 (C (1740 (F). Manifold buang sebelumnya merupakan coran berat tetapi umumnya sekarang dibentuk dari lembaran baja tahan karat yang dicap atau dibentuk dari pipa las yang mungkin memiliki struktur ber dinding ganda untuk mengisolasi gas dari kehilangan panas, yang dapat menghalangi keberhasilan konversi katalitik di hilir. (McGuire, 2008)

2.1.1 Exhaust Manifold

- Temperatur saat bekerja : 750–950°C 1380–1740°F
- Spesifikasi yang dibutuhkan : Kekuatan bekerja pada suhu tinggi, kekuatan kelelahan termal, ketahanan oksidasi, sifat mampu bentuk
- Material yang dipakai :
 - T439HP (UNS S43035, d-s 439)
 - 18CrCb (DIN 1.4509, 18CrCb)
 - 441 (DIN 1.4509)
 - 304/304L/304H (UNS S30400, S30403, S30409)
 - 321 (UNS S32100)
 - 309S (UNS S30908)
 - 310S (UNS S31008)
 - 332Mo (S35125)
 - 600 (N06600)
 - 601 (N06601)
 - 625 (N06625)



Gambar 2 *Stainless steel* pada bagian-bagian sistem pembuangan (McGuire, 2008)



Gambar 3 Exhaust manifold (<https://bofiracing.co.uk/>)

Penambahan paduan kromium atau molibdenum meningkatkan ketahanan terhadap korosi, sedangkan penambahan aluminium atau silikon tidak meningkatkan sifat tersebut. Lapisan aluminium merupakan pembasmi korosi yang kuat, dan memiliki manfaat estetika karena tidak menunjukkan karat merah (McGuire, 2008).

Penggunaan molibdenum atau niobium meningkatkan kekuatan suhu tinggi. Paduan dengan penambahan ini berguna untuk manifold dengan desain yang membatasi ekspansi dan kontraksi, sehingga menimbulkan masalah kelelahan termal (McGuire, 2008).

Semua penambahan paduan mengurangi sifat mampu bentuk dan ketangguhan, serta menambah biaya bahan dasar. Oleh karena itu, tujuannya adalah untuk hanya menggunakan elemen-elemen paduan yang sangat diperlukan untuk kinerja (McGuire, 2008).

2.1.2 Flexible Pipe

- Temperatur saat bekerja : 600–800°C/1110–1470°F
- Spesifikasi yang dibutuhkan : Kekuatan bekerja pada suhu tinggi, kekuatan kelelahan termal, ketahanan oksidasi, sifat mampu bentuk, ketahanan terhadap serangan garam
- Material yang dipakai :
 - 304/304L (UNS S30400, S30403)
 - T321 (S32100)
 - 316/316L (S31600/S31603)
 - 316Ti (S31635)
 - 332Mo (S35125)
 - 625 (N06625)



Gambar 4 Flexible Pipe (www.amazon.com.au)

Sambungan fleksibel adalah salah satu segmen sistem pembuangan yang lebih disukai baja tahan karat austenitik. Fungsi sambungan fleksibel adalah untuk mencegah getaran dari mesin diteruskan ke seluruh sistem pembuangan. Ini terdiri dari pipa berdinding ganda dalam konfigurasi bellow dengan penutup luar dari kawat baja tahan karat yang dikepang. Ia harus memiliki kekuatan lelah suhu tinggi yang sangat baik untuk menahan tekanan siklik dari getaran yang diserapnya. Bahan yang digunakan harus mempunyai sifat mampu bentuk yang luar biasa untuk dapat dibentuk menjadi sebuah bellow. Oleh karena itu, kekuatan panas dan sifat mampu bentuk yang lebih besar dari baja austenitik berlaku. Sambungan fleksibel juga terkena garam jalan di beberapa daerah, sehingga harus tahan terhadap korosi garam panas. Hal ini mungkin memaksa penggunaan 316L versus pilihan normal 304L (McGuire, 2008).

2.2 Baja tahan karat (*Stainless steel*)

Baja tahan karat merupakan baja paduan tinggi dengan kandungan unsur kromium minimal 10%, sehingga mempunyai sifat tahan korosi. Selain unsur kromium terdapat unsur tambahan lain yaitu Ni, Mo, Mn, Al, Cu, Ti, C, dan Nb (Yunaidi, 2016). Setiap unsur memiliki pengaruh dalam proses oksidasi suhu tinggi. Proses oksidasi akan menghasilkan senyawa FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , dan CrO (Bandriyana dkk., 2004).

Pengaruh unsur tambahan yang terdapat pada baja tahan karat;

- a. Nikel (Ni)

Nikel (Ni) adalah unsur yang sangat penting dalam pembuatan baja tahan karat. Nikel dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan serta ketahanan terhadap korosi.

b. Molibdenum (Mo)

Molibdenum (Mo) berfungsi untuk meningkatkan kekuatan, kekerasan, ketangguhan, dan ketahanan baja terhadap korosi.

c. Mangan (Mn)

Mangan (Mn) dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tarik. Selain itu, dapat mengurangi distorsi pada baja.

d. Aluminium (Al)

Aluminium (Al) dapat meningkatkan ketahanan korosi pada saat oksidasi.

e. Tembaga (Cu)

Tembaga (Cu) dapat meningkatkan ketahanan korosi dalam larutan asam tertentu, menurunkan kekerasan, dan meningkatkan *machinability*.

f. Titanium (Ti)

Titanium (Ti) digunakan sebagai penstabil unsur dalam baja tahan karat.

g. Karbon (C)

Karbon (C) merupakan komponen utama dari baja karena dapat meningkatkan kekuatan tarik, kekerasan, dan ketahanan. Unsur karbon dapat menurunkan keuletan, ketangguhan, dan *machinability* pada baja.

h. Kromium (Cr)

Kromium (Cr) dapat meningkatkan kekuatan tarik, kekerasan, ketangguhan, ketahanan terhadap abrasi dan korosi karena membentuk lapisan pasif kromium oksida (Outokumpu, 2013).

2.4.1. Baja tahan karat austenite (*austenite Stainless steel*)

Austenite Stainless steel merupakan baja yang mengandung 18% Cr dan 8% Ni dengan kadar karbon rendah. Baja jenis ini diaplikasikan dalam pembuatan peralatan makanan. Baja austenitik bersifat non-magnetik, ulet, mudah dibentuk dan dilas serta tahan korosi. Tetapi, jika bereaksi dengan klorida akan menimbulkan korosi retak tegang (SCC). Jenis baja *austenite* misalnya AISI 201, 202, 304, 302, dan 316 (Dewangan *et al.*, 2015).

2.4.2. Baja tahan karat ferit (*ferrit Stainless steel*)

Ferrit Stainless steel merupakan baja dengan kandungan 11 – 27% kromium dan sedikit nikel atau tidak ada sama sekali. Tidak dapat dikeraskan dengan perlakuan panas, namun dapat dikeraskan dengan perlakuan dingin. Bersifat magnetik, ulet, tahan terhadap korosi dan oksidasi. Jenis baja tahan karat feritik misalnya AISI 430 dan 409 (Cobb, 1999).

2.4.3. Baja tahan karat martensit (*martensit Stainless steel*)

Martensitic Stainless steel merupakan baja dengan kadar kromium 10,5 – 18% dan karbon sekitar 1,2% tanpa tambahan nikel. Dikeraskan melalui pendinginan cepat (*quenching*). Bersifat magnetik dan rapuh, sehingga diperlukan proses *tempering* untuk mendapatkan keuletannya. Jenis baja martensit misalnya AISI 410 dan 440 (Davis, 1994).

2.4.4. Baja tahan karat dupleks (*duplex Stainless steel*)

Duplex Stainless steel merupakan baja dengan bentuk struktur campuran antara austenitik dan feritik, mempunyai kekuatan tarik dan luluh lebih tinggi dibandingkan dengan jenis austenitik maupun feritik. Baja ini biasa digunakan dalam peralatan atau mesin yang memiliki tegangan dinamis. Tipe dari baja ini antara lain AISI 2205 dan 2304 (Yunaidi, 2016).

2.4.5. Baja tahan karat pengerasan pengendapan (*precipitation hardenable Stainless steel*)

Precipitation Hardenable Stainless steel merupakan baja dengan kandungan 11 – 17,5%Cr, 4 – 8%Ni, dan 0 – 2%Mo. Bersifat magnetik dan dapat dikeraskan dengan perlakuan panas. Jenis baja ini misalnya S17400 dan S13800 (Davis, 1994).

2.3 Baja Tahan Karat *Austenite Stainless steel*

Baja tahan karat austenite tipe 304 merupakan baja paduan dengan kandungan Cr 18 – 20%, dan Ni 8 – 10,5% (Roberge, 2000). Baja jenis ini biasa digunakan sebagai bahan konstruksi utama dalam beberapa industri seperti industri nuklir, kimia, dan makanan. Baja ini memiliki ketahanan korosi yang baik karena terdapat lapisan kromium oksida pada permukaannya (Riszki dan Harmami, 2015).

Ketahanan korosi SS-304 akan menurun jika direndam secara terus menerus dalam larutan asam maupun air laut. Semakin lama baja tersebut direndam dalam medium korosif, laju korosinya akan semakin menurun (Iliyasu *et al.*, 2012). SS-304 merupakan baja yang memiliki tingkat kekerasan rendah sekitar 123 HB dan kekuatan tarik sebesar 505 N/mm². (Nasir, 2014)

Stainless steel 316L adalah *Stainless steel* molibdenum austenitic. Kandungan nikel dan molibdenum yang lebih tinggi di kelas ini memungkinkannya untuk menunjukkan sifat tahan korosi keseluruhan yang lebih baik daripada 304, terutama yang berkaitan dengan korosi *pitting* dan celah di lingkungan klorida. Selain itu, Alloy 316L memberikan kekuatan tarik, creep, dan tegangan pecah suhu yang sangat baik, serta kemampuan bentuk dan kemampuan las yang luar biasa. 316L adalah versi karbon yang lebih rendah dari 316 dan kebal dari kepekaan; oleh karena itu, sangat sering digunakan dalam komponen yang mengalami pengelasan berat.

Tabel 1 Komposisi unsur kimia baja tahan karat SS 316L

Unsur	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P
Kadar (%)	69,011	0,019	0,390	1,648	16,860	2,057	9,930	0,035	0,05

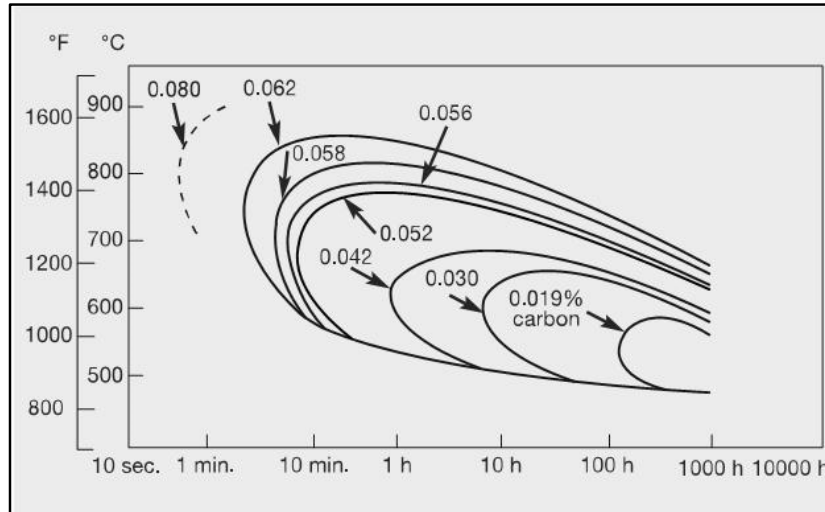
Tabel 2 Komposisi unsur kimia baja tahan karat SS 304

Unsur	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P
Kadar (%)	72,07	0,0432	0,57	1,1973	17,289	0,0241	8,4	0,0008	0,04

2.4 Sensitisasi pada Baja Tahan Karat

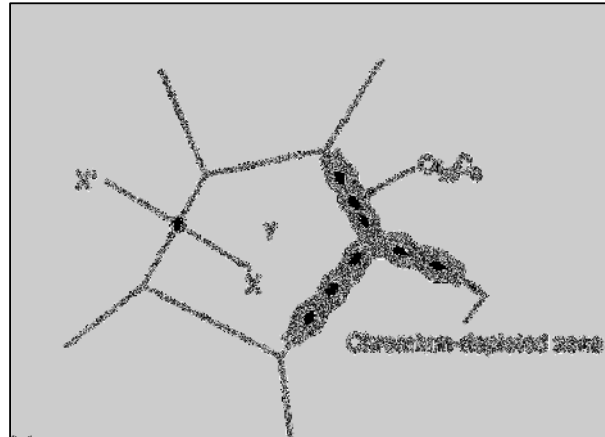
Sensitisasi merupakan fenomena buruk yang terjadi pada austenitic *Stainless steel* (SS) ketika diterapkan pada peningkatan suhu yang tidak tepat seperti apa yang terjadi selama pengelasan atau operasi pada kisaran suhu antara 400°C dan 800°C. Ini adalah fenomena yang terkenal dan terdiri dari presipitasi karbida pada batas butir dan pengurangan krom di daerah yang berdekatan dengan batas butir,

membuat bahan yang rentan terhadap korosi intergranular. Baru - baru ini, penelitian sebelumnya dari uji laboratorium menunjukkan bahwa sensitisasi pada 650°C dapat menyebabkan embrittlement (penggetasan) dari baja AISI 304.



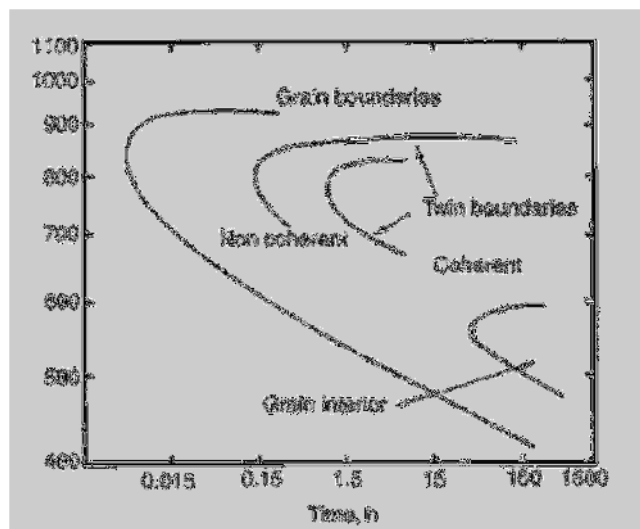
Gambar 5 Laju Presipitasi Cr_{23}C_6 sebagai fungsi kadar karbon (McGuire, 2008).

Mekanisme terjadinya sensitisasi adalah waktu pada suhu tertentu akan menentukan besarnya presipitasi karbida. Ketika kromium karbida mengendap di batas butir, daerah yang berbatasan langsung kehilangan kromium. Daerah ini miskin dalam kromium dan disebut zona habis. Studi STEM telah membuktikan bahwa peningkatan waktu penahanan menyebabkan lebar zona deplesi meningkat. Lebar penipisan krom di sepanjang batas butir di sekitar karbida individu jauh lebih besar daripada lebar zona penipisan ke bagian dalam butir. Karena pasivasi kromium memainkan peran utama dalam ketahanan korosi, penipisan krom di sepanjang batas butir membuat baja tahan karat austenitik jauh lebih rentan terhadap korosi intergranular. Waktu penahanan pada suhu juga sangat penting. Hanya perendaman terus menerus dalam suhu sensitisasi yang dapat menyebabkan sensitisasi. Jika waktu penahanan sangat singkat, akan ada sedikit pengendapan kromium karbida sehingga tidak ada penghapusan kromium yang signifikan dan sensitisasi tidak akan terjadi. Ini mengarah pada satu-satunya cara untuk memperbaiki sensitisasi baja tahan karat austenitik dengan cara annealing (pipingpipeline.com, 2020)



Gambar 6 Penipisan kromium dari austenit dekat batas butir akibat pengendapan kromium karbida (McGuire, 2008)

Gambar 6 menunjukkan bahwa penipisan kromium lokal sedemikian rupa sehingga kadar kromium bisa menjadi cukup rendah bahkan tidak cukup untuk menjadi tahan karat dan tentunya ketahanan terhadap korosi jauh lebih rendah dibandingkan daerah sekitarnya. Zona ini, karena kandungan kromiumnya lebih rendah, juga memiliki austenit yang sangat tidak stabil dan cukup rentan terhadap pembentukan martensit. Gambar 7 menunjukkan bagaimana locus pengendapan karbida berubah seiring waktu dan suhu. Karbon yang relatif jauh dari batas butir di bagian dalam butir tetap berada dalam keadaan jenuh hingga waktu yang lebih lama dan keadaan jenuh yang jauh lebih besar karena difusi massal diperlukan untuk nukleasi dan pertumbuhan endapan ini (McGuire, 2008).



Gambar 7 Variasi locus pengendapan karbida terhadap waktu (McGuire, 2008)

Pengamatan utamanya adalah bahwa setiap presipitasi padat dari endapan kaya kromium akan menyebabkan penipisan kromium lokal dan mengakibatkan hilangnya ketahanan terhadap korosi. Perlakuan panas dalam jangka waktu yang lebih lama diperlukan untuk menghilangkan zona-zona yang terkuras ini dengan menghomogenisasi kembali kromium yang berdifusi secara perlahan dibandingkan dengan waktu singkat yang diperlukan untuk membentuknya. Hal ini sangat jelas terlihat pada karbida, namun juga berlaku pada oksida. Di bawah kerak oksida yang kaya kromium terdapat lapisan yang kekurangan kromium dan ketahanan terhadap korosi lebih rendah. Inilah sebabnya mengapa tidak hanya kerak akibat pengelasan yang harus dihilangkan, tetapi juga zona kekurangan kromium di bawahnya (McGuire, 2008).

Karbon cenderung berdifusi menuju batas butir pada baja tahan karat austenitik selama preparasi material atau pemanasan yang tidak tepat dalam kisaran suhu 425 - 815°C. Hal ini menyebabkan presipitasi $(Fe, Cr)_{23}C_6$ yang berdekatan dengan batas butir. Konsentrasi kromium di daerah batas butir berkurang sedangkan konsentrasi kromium di dalam butir tetap dan tidak berubah. Proses ini yang disebut dengan sensitisasi. Daerah batas butir yang kekurangan kromium ketahanan korosinya berkurang daripada di dalam butir. Jika konsentrasi kromium turun di bawah nilai kritis, maka korosi terjadi pada batas butir sementara bagian dalam butir tetap pasif dalam kondisi elektrokimia tertentu. Proses ini dikenal sebagai korosi intergranular (Nirmolo, 2012).

2.5 Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

Perlakuan panas (*Heat Treatment*) adalah proses pemanasan, penahanan temperatur tertentu, dan pendinginan pada suatu baja untuk memperoleh perbedaan kombinasi sifat-sifat mekanik. Perlakuan panas dilakukan di dalam tungku listrik dengan pengontrolan temperatur yang tepat dan pendinginan kesuatu media pendingin sesuai dengan kondisi dan spesifikasi bajanya (Syamsul Hadi, 2016).

Sifat-sifat logam terutama sifat mekanik yang sangat dipengaruhi oleh struktur mikrologam disamping posisi kimianya, contohnya suatu logam atau paduan akan mempunyai sifat mekanis yang berbeda jika struktur mikronya diubah. Dengan adanya pemanasan atau pendinginan dengan kecepatan tertentu maka

bahan-bahan logam dan paduan memperlihatkan perubahan strukturnya (Daryanto, 2010).

2.8.1. Jenis Jenis *Heat Treatment*

1. *Quenching* (Pengerasan)

Proses *quenching* atau pengerasan baja adalah suatu proses pemanasan logam sehingga mencapai batas austenit yang homogen. Untuk mendapatkan kehomogenan ini maka austenit perlu waktu pemanasan yang cukup. Selanjutnya secara cepat baja tersebut dicelupkan kedalam media pendingin, tergantung pada kecepatan pendinginan yang kita inginkan untuk mencapai kekerasan baja.

Pada waktu pendinginan yang cepat pada fase austenit tidak sempat berubah ferit dan perlit karena tidak ada kesempatan bagi atom-atom karbon yang telah larut dalam austenit untuk mengadakan pergerakan difusi dan bentuk sementit oleh karena itu terjadi fase lalu yang martensit, ini berupa fase yang sangat keras dan bergantung pada keadaan karbon.

2. *Annealing*

Proses *annealing* atau melunakkan baja adalah proses pemanasan baja di atas temperatur kritis (723°C), selanjutnya dibiarkan beberapa lama sampai temperatur merata. Kemudian disusul dengan pendinginan secara perlahan-lahan sambil dijaga agar temperatur bagian luar dan dalam kira-kira sama hingga diperoleh struktur yang diinginkan dengan menggunakan media pendingin udara. Tujuan proses *annealing* adalah melunakkan material logam, menghilangkan tegangan dalam / sisa, dan memperbaiki butir-butir logam.

3. *Normalizing*

Normalizing adalah suatu proses pemanasan logam hingga mencapai fase austenit yang kemudian didinginkan secara perlahan-lahan dalam media pendingin udara. Hasil pendingin ini berupa perlit dan ferit namun hasilnya jauh lebih mulus dari *annealing*. Prinsip dari proses *normalizing* adalah untuk melunakkan logam. Namun pada baja karbon tinggi atau baja paduan tertentu dengan proses ini belum tentu

memperoleh baja yang lunak mungkin berupa paengerasan dan ini tergantung dari kadar karbon.

Normalizing dilakukan untuk mendapatkan struktur mikro dengan butir yang halus dan seragam. Proses ini diartikan sebagai pemanasan dan mempertahankan pemanasan pada suhu yang sesuai batas perubahan. Kemudian diikuti dengan pendinginan secara bebas didalam udara luar supaya terjadi ukuran butiran-butiran yang diinginkan.

4. *Tempering*

Proses *tempering* adalah pemanasan baja sampai temperatur sedikit di bawah temperatur kritis, kemudian didiamkan dalam tungku dan suhunya dipertahankan sampai merata selama 15 menit. Selanjutnya didinginkan dalam media pendingin. Jika kekerasan turun, maka kekuatan tarik juga turun pula. Dalam hal ini keuletan dan ketangguhan baja akan meningkat. Meskipun proses ini akan menghasilkan baja yang lebih lemah. Proses ini berbeda dengan *annealing* karena dengan proses ini belum tentu memperoleh baja yang lunak, mungkin berupa pengerasan dan ini tergantung oleh kadar karbon (Daryanto, 2010).

2.6 *Post Weld Heat Treatment (PWHT)*

Post Weld Heat Treatment (PWHT) adalah pemanasan kembali daerah las setelah pengelasan selesai dilakukan, hal ini bertujuan untuk melunakkan daerah yang terkena pengaruh las (Hestiawan dan Suryono, 2014). PWHT juga merupakan proses pemanasan dan pendinginan pada logam untuk mendapatkan sifat- sifat tertentu yang diperlukan untuk suatu konstruksi, misalnya kekuatan (*strength*), kelunakan (*softness*), memperhalus ukuran butir. Beberapa perlakuan panas (*heat treatment*) dapat diterapkan setelah pekerjaan pengelasan selesai. Perlakuan panas pasca las sering dilaksanakan untuk tujuan menghilangkan tegangan sisa. ASME Boiler Pressure Vessel Code menyebut perlakuan panas pasca las dengan *post weld heat treatment (PWHT)*, dimana istilah ini lebih disukai pada pengelasan *pressure vessel* dan kontruksi pipa. PWHT kadang-kadang disebut juga dengan membuang tegangan (*stress relief*) dan bisa juga

disebut dengan *tempering*. PWHT bisa diterapkan pada seluruh pengelasan atau hanya setempat. PWHT dilakukan karena alasan seperti berikut ini :

- a. Mengurangi tegangan sisa (*residual stress*).
- b. Mengurangi kekerasan di daerah pengelasan dan daerah *Heat Affected Zone* (HAZ).
- c. Meningkatkan ketangguhan (*toughness*).
- d. Mengeluarkan hidrogen dari logam las.
- e. Menghindarkan kerja dingin dari logam las.
- f. Meningkatkan keuletan (*ductility*).
- g. Meningkatkan daya tahan terhadap retak karena faktor lingkungan (*environmental cracking*) dan serangan karat.
- h. Meningkatkan stabilitas dimensional selama *machining* (Vlack, 1981).

Heat treatment pasca pengelasan tujuan utamanya untuk meningkatkan sifat mekanik dari logam, meningkatkan ketahanan korosi terutama korosi tegangan, dan memperkecil pengaruh terjadinya retak pada daerah las.

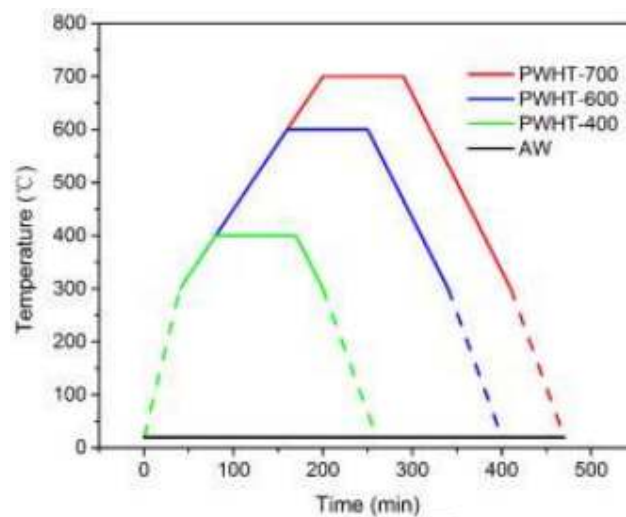
Proses PWHT ini dilakukan dengan pemanasan lokal di dekat daerah pengelasan. Parameter-parameter yang harus diperhatikan dalam PWHT adalah:

- a. *Heating Rate*: proses pemanasan sampai temperatur diatas atau dibawah temperatur kritis suatu material.
- b. *Holding Temperature*: proses penahanan material pada temperatur pemanasan untuk memberikan kesempatan adanya perubahan struktur mikro.
- c. *Cooling Rate*: proses pendinginan material dengan kecepatan tertentu tergantung pada sifat akhir material yang dibutuhkan (Novemry Yusuf, 2008).

Dalam melakukan PWHT ada beberapa faktor penting yang harus diperhatikan agar tujuan dari PWHT ini dapat tercapai. Berikut ini adalah faktor penting tersebut:

- a. *Expansion Area*: Proses pemanasan akan mengakibatkan terjadinya pemuaian dan ekspansi material. Sehingga harus diperhatikan bahwa saat *stress relief* material tersebut tidak mengalami *restraint*
- b. *Insulasi*: Area sekitar daerah yang akan di PWHT harus ditutup dilapisi dengan *ceramic fiber* untuk menjaga kestabilan suhu
- c. *Cleaning Material*: Permukaan material harus bersih
- d. *Support Material*: Proses pemanasan akan mengakibatkan pelunakan material sehingga diperlukan *support* agar tidak terjadi *distorsi* (Novemry Yusuf, 2008).

Berikut adalah diagram dari *Heating Treatment* (Perlakuan panas) yang ditampilkan dalam gambar 8



Gambar 8 Proses PWHT (Chengze Zhang, 2017).

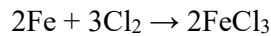
2.7 Besi (III) Klorida (FeCl_3)

Kristal besi klorida berbentuk pelat heksagonal tipis kecil mudah dibuat dengan memanaskan kawat besi bersih dalam aliran cepat klorin. Kristal mencair seketika saat bersentuhan dengan udara (Wooster, 1932).

Besi(III) klorida terjadi secara alami sebagai mineral molysite. Senyawa ini banyak digunakan untuk membuat sejumlah garam besi(III). Juga, itu diterapkan dalam proses pengolahan limbah dan limbah industri. Ini juga digunakan dalam pembuatan pewarna, pigmen dan tinta; sebagai agen klorin; dan sebagai katalis dalam reaksi klorinasi aromatik.

Komposisi unsur: Fe34.43%, Cl 65.57%. Senyawa tersebut dapat diidentifikasi dengan metode sinar-x. Besi dapat dianalisis dengan berbagai teknik instrumental. Klorida dalam larutan berair senyawa dapat diukur dengan titrasi dengan larutan standar perak nitrat atau merkuri nitrat atau dengan kromatografi ion (Patnaik, 2002).

Besi(III) klorida terbentuk melewati gas klor di atas serbuk besi pada 350 °C:



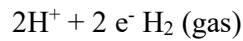
Beberapa penelitian dilakukan untuk membungkus kristal yang disiapkan dengan cara ini dalam tabung kaca kapiler berdinding tipis. Sebuah desikator yang dirancang sedemikian rupa sehingga operator dapat menangani isinya melalui sarung tangan karet yang dimasukkan ke samping terbukti tidak mungkin cukup kering, bahkan dengan fosfor pentoksida yang bekerja selama beberapa hari. Lebih berhasil adalah upaya untuk mentransfer kristal pada suhu rendah. Sebuah ruangan yang dipertahankan pada -10°C ditempatkan dengan baik untuk saya oleh Dr. Callow di Stasiun Penelitian Suhu Rendah. Sebuah tabung, berisi beberapa kristal yang sangat baik, dan kapiler diletakkan di ruang dingin selama satu jam, dan kemudian dilakukan upaya untuk menyegel beberapa kristal secara terpisah. Deliquescence (berbuih di udara lembap, karena munculnya HCl, yang terhidrasi membentuk kabut) melambat sedemikian rupa sehingga mungkin untuk melakukan ini tetapi untuk ketidaknyamanan akut bekerja pada suhu rendah seperti itu. Pembekuan peralatan saja, dan bekerja pada suhu kamar hanya setengah berhasil, kristal menjadi terhidrasi dalam proses transferensi (Wooster, 1932).

2.8 Korosi

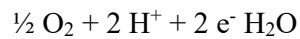
Korosi merupakan penurunan mutu logam akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungannya. Secara umum korosi meliputi hilangnya logam secara ionik pada bagian yang terekspos lingkungan. Korosi terjadi dalam berbagai macam bentuk, mulai dari korosi merata pada seluruh permukaan logam sampai dengan korosi yang terkonsentrasi pada bagian tertentu saja (Darmawi, Dewi, Alian, & Ginting, 2022).

Korosi terjadi secara perlahan menyebabkan suatu material mempunyai keterbatasan umur pemakaian, dimana material yang diperkirakan untuk pemakaian dalam waktu lama ternyata mempunyai umur yang lebih singkat dari umur pemakaian rata-ratanya (Tampubolon, et al. 2020).

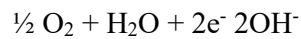
Korosi pada logam terjadi karena adanya aliran arus listrik dari satu bagian logam ke bagian yang lain di permukaan logam akibat adanya perbedaan potensial antara kedua bagian. Aliran arus ini akan menyebabkan hilangnya metal pada bagian dimana arus dilepaskan ke lingkungan (reaksinya disebut oksidasi atau reaksi anodik), dipihak lain terjadi reaksi reduksi, yaitu penerimaan electron oleh bagian katodik logam. Akseptor electron ini bisa juga dilakukan oleh ion H^+ dalam lingkungan (media), sehingga terjadi gas H_2 .



Reaksi penangkapan electron dapat berbeda sesuai keadaan media. Dilingkungan asam, reaksiya adalah sebagai berikut:



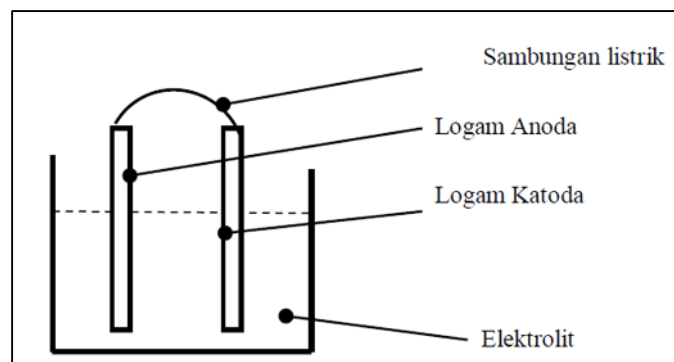
Dilingkungan basa reaksiya adalah sbb:



Terdapat empat unsur pokok yang harus dipenuhi agar korosi dapat terjadi. Jika salah satunya tiada, maka korosi tidak dapat terjadi. Empat unsur pokok tersebut adalah:

- Terdapat anoda, tempat terjadinya reaksi oksidasi.
- Terdapat katoda, tempat terjadinya reaksi reduksi.
- Terdapat Elektrolit, Lingkungan tempat katoda dan anoda terepose.

Terdapat sambungan logam, dimana katoda dan anoda disambung dengan menggunakan logam agar arus listrik dapat mengalir.



Gambar 9 Sel korosi sederhana

Sumber: (Dewi, et al.,2022)

2.9 Klasifikasi Korosi

Korosi dilihat dari kondisi permukaannya secara visual dapat dibedakan menjadi beberapa jenis yakni: Korosi Seragam (*uniform/general corrosion*), Korosi Galvanik (*galvanic corrosion*), Korosi Selektif (*selective leaching corrosion*), Korosi Celah (*Crevice Corrosion*), Korosi Sumuran (*Pitting Corrosion*), Korosi Batas Butir (*intergranular corrosion*), Korosi Retak Tegangan (*stress corrosion cracking*), Korosi Erosi (*erosion corrosion*), Korosi Mikroba (*bacterial & bio-fouling corrosion*).

2.2.1. Korosi Seragam (*uniform/general corrosion*)

Korosi merata atau *general corrosion* merupakan bentuk korosi yang paling lazim terjadi. Korosi yang muncul terlihat merata pada seluruh permukaan logam dengan intensitas yang sama. Salah satu contohnya adalah efek dari korosi atmosfer pada permukaan logam. Korosi merata terjadi apabila seluruh bagian logam memiliki komposisi yang sama. Korosi jenis ini biasanya diatasi dengan cara melapisi permukaan logam atau dengan memberikan ‘*corrosion allowance*’ dengan besaran tertentu yang disesuaikan dengan usia alat yang direncanakan (Darmawi, Dewi, Alian, & Ginting, 2022).

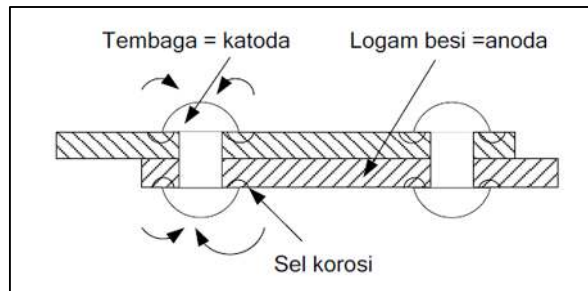


Gambar 10 Korosi seragam pada pipa (Dewi, et al., 2022)

2.2.2. Korosi Galvanik

Korosi galvanik merupakan suatu bentuk serangan korosi yang terjadi akibat adanya dua material yang berbeda dan adanya elektrolit yang bersifat korosif. Dimana, satu diantaranya akan terkorosi dan satu lainnya akan terproteksi dari serangan korosi karena dari ke dua material logam tersebut mempunyai perbedaan potensial korosi. Sebagai contoh dalam penyambungan /penyatuan material baja karbon paduan rendah (low alloy steel) dengan paduan seng (zinc alloy), dimana keduanya mempunyai

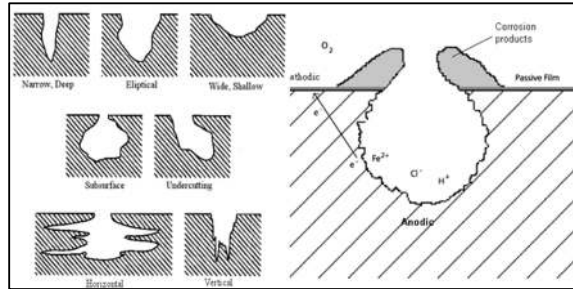
perbedaan potensial korosi yaitu baja karbon paduan rendah akan bersifat lebih aktif dibanding paduan seng yang pasif (Syahril, 2019).



Gambar 11 Korosi galvanik (Supriadi, et al., 2018)

2.2.4. Korosi Sumuran (*Pitting Corrosion*)

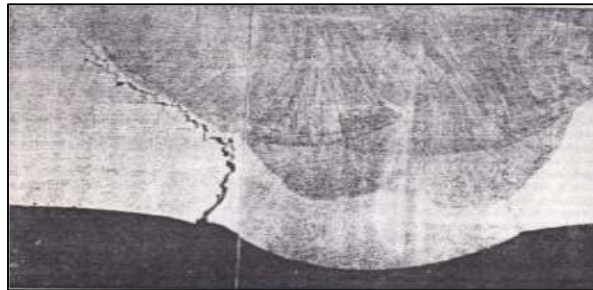
Korosi sumuran merupakan korosi yang muncul dan terkonsentrasi pada daerah tertentu. Inisiator serangan korosi ini biasanya adalah klorida. Penyebabnya bisa bermacam macam, antara lain: Pecahnya lapisan pasif, scratch pd permukaan, crack akibat beban mekanik, phasa kedua, impurities dll. Mekanisme terbentuknya korosi sumuran pada tahap awal biasanya hanya berupa korosi biasa. Namun pada tahap lanjut mekanisme korosi memiliki banyak kesamaan dengan korosi celah, yaitu dipicu oleh deplesi oksigen dalam celah yang pada gilirannya akan makin asam karena banyaknya ion H^+ dalam sumuran dan akan menarik ion Cl^- kedalam sumuran sehingga reaksi korosi di dalam sumuran akan makin dahsyat. Hanya saja korosi sumuran pada umumnya berukuran lebih kecil jika dibandingkan dengan korosi celah. Jika korosi sumuran berjumlah banyak dan jaraknya yang saling berdekatan satu sama lain, maka korosi sumuran akan mengakibatkan permukaan logam menjadi kasar. Korosi sumuran terjadi karena komposisi material yang tidak homogen, rusaknya lapisan pelindung, adanya endapan dipermukaan material, serta adanya bagian yang cacat pada material (Darmawi, Dewi, Alian, & Ginting, 2022).



Gambar 12 Korosi Sumuran (Dewi, et al., 2022)

2.2.5. Korosi Batas Butir (*intergranular corrosion*)

Korosi antar butir atau *intergranular corrosion* merupakan korosi yang terjadi pada *grain boundary* sebuah logam atau alloy. Korosi tipe ini biasanya disebabkan karena adanya karbida pada batas butir dan terjadi disepanjang batas butir pada logam paduan. Umumnya hal ini terjadi pada baja stainless yang terkena perlakuan panas, misalnya pengelasan (Darmawi, Dewi, Alian, & Ginting, 2022).



Gambar 13 Korosi batas butir (Dewi, et al., 2022)

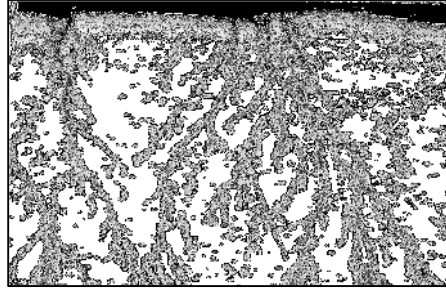
2.2.6. Korosi Retak Tegangan (*stress corrosion cracking*)

Merupakan type korosi yang terjadi akibat interaksi tiga unsur yang meliputi:

- Adanya tegangan tarik yang melampaui tegangan yield logam,
- Adanya material yang susceptible terhadap serangan korosi dan
- Adanya lingkungan yang korosif terhadap logam.

SCC pada umumnya berawal dari korosi setempat yang kemudian berpropagasi membentuk retakan yang akhirnya menyebabkan gagal katastrofik. Dalam banyak kejadian, SCC tidak kasat mata, sehingga baru

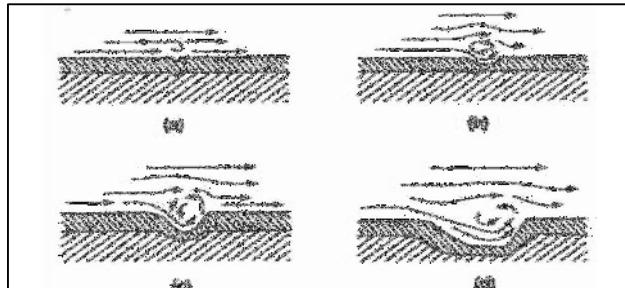
diketahui setelah terjadi kegagalan struktur. Mode retakan pada SCC dibagi dalam dua macam, yang meliputi intergranuler dan transgranuler (Darmawi, Dewi, Alian, & Ginting, 2022).



Gambar 14 Korosi retak tegangan (Dewi, et al., 2022)

2.2.7. Korosi Erosi (*erosion corrosion*)

Korosi erosi terjadi akibat adanya aliran fluida yang bersifat korosif mengikis logam yang dilaluinya sehingga jalur atau bekas kikisan dari fluida korosif tersebut mengakibatkan korosi pada logam. Korosi ini umumnya sering terjadi pada pipa logam.



Gambar 15 Korosi erosi (Dewi, et al., 2022)

2.2.8. Korosi Mikroba (*bacterial & bio-fouling corrosion*).

Korosi ini terjadinya karena adanya pertumbuhan mikroba yang mengakibatkan korosi pada logam. Korosi jenis ini dapat mempengaruhi dan mempercepat proses terjadinya korosi karena adanya aktivitas mikroba. Mikroorganisme penyebab korosi ini berperan aktif dalam proses korosi melalui reaksi katoda-anoda, pembentukan biofilm, dan menghasilkan metabolit sekunder yang korosif (Affifah, et al., 2019).



Gambar 16 Korosi mikroba (Utomo, 2009)

2.10 Uji Kekuatan *Bending*

Uji *bending* strength merupakan bentuk pengujian untuk mengetahui kekuatan *bending* suatu material. Pada uji *bending*, spesimen yang berbentuk batang ditempatkan pada dua tumpuan lalu diterapkan beban ditengah tumpuan dengan laju pembebanan konstan.

Material pada umumnya mempunyai nilai modulus elastisitas *bending* yang berbeda dengan nilai modulus elastisitas tariknya. Akibat pengujian *bending*, pada bagian atas spesimen akan mengalami tekanan, dan bagian bawah akan mengalami tegangan tarik. Kekuatan tekan suatu material pada umumnya lebih tinggi terhadap tegangan tariknya. Kegagalan yang terjadi akibat pengujian *bending*, material akan mengalami patah pada bagian bawah yang disebabkan karena tidak mampu menahan tegangan tarik yang diterima.

$$\sigma_b = \frac{3 P L}{2 b h^2}$$

Dimana : σ_b : Kekuatan *Bending*, N/mm^2

P: Beban, N

L: Jarak tumpuan, mm

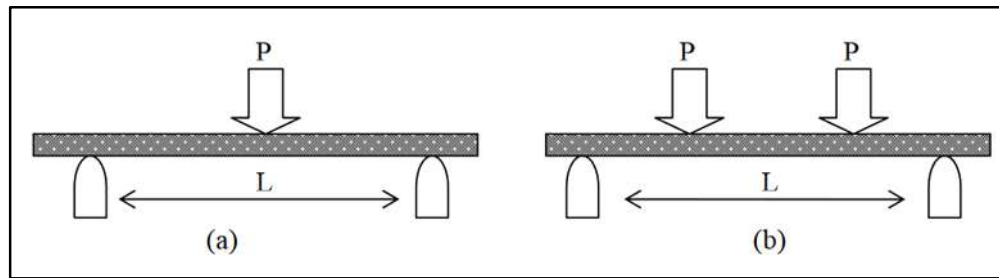
b: Lebar spesimen, mm

h: Tebal spesimen, mm

Pengujian *bending* dikenal dua metode yaitu *bending* empat titik dan *bending* tiga titik. Pada uji *bending* 3 titik daerah dengan tegangan yang seragam cukup kecil dan berada ditengan-tengah antara 2 tumpuan, sedangkan pada pengujian 4 titik,

daerah dengan tegangan seragam berada diantara dua titik pembebanan. Pada uji *bending* 3 titik, besarnya defleksi dapat diketahui dengan mengukur loading nose, sedangkan pada uji *bending* 4 titik, untuk mengetahui besarnya defleksi harus menggunakan alat deflektometer untuk mengetahui secara akurat besarnya defleksi yang terjadi pada bagian tengah tumpuan.

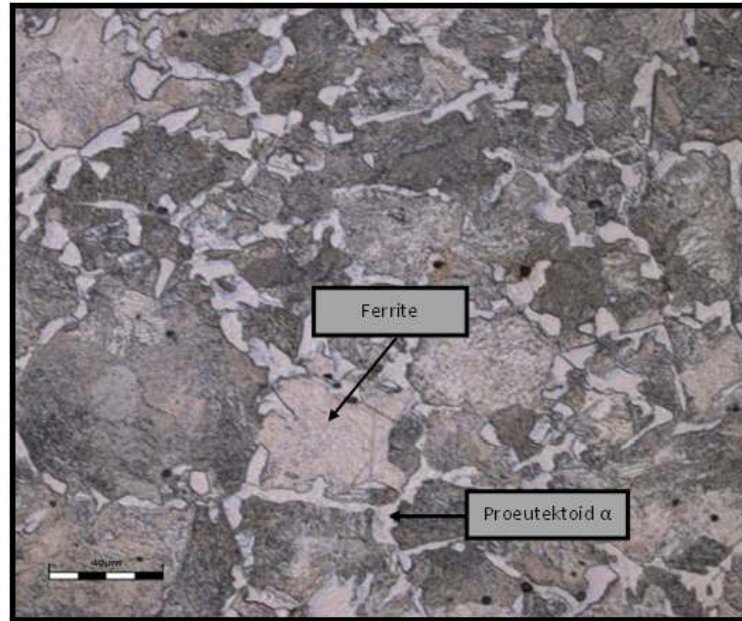
Uji *bending* 4 titik lebih diutamakan untuk material yang bersifat liat, dimana regangan yang terjadi melebihi batas 5%. Pada pengujian *bending* 3 titik apabila regangan maksimum telah mencapai 5% dan belum mengalami kegagalan *bending* maka direkomendasikan untuk menggunakan uji *bending* 4 titik. (Triyono, 2007)



Gambar 17 (a) Uji *Bending* 3 titik, (b) Uji *Bending* 4 titik (Triyono, 2007)

2.11 Uji Mikrostruktur

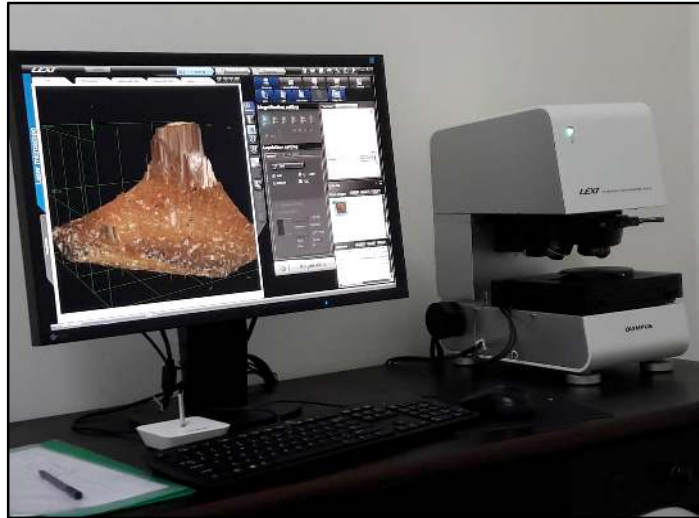
Metalografi adalah studi fisik dan komponen logam yang menggunakan mikroskop atau mengetahui perkiraan sifat-sifat fisik dengan mengenali ciri-ciri khusus dari struktur mikronya ataupun sebagai karakteristik bahan. Contoh foto struktur mikro AISI 1030 sebagaimana pada Gambar 2.13 berikut.



Gambar 18 Struktur mikro AISI 1030 (Nurul Ichsan, 2020).

Henry Clifton Sorby ilmuwan abad 19 merintis produksi besi dan baja modern di Sheffield (UK) menyatakan bahwa terdapat hubungan erat antara struktur mikro dan sifat makroskopik, dan menjelang akhir hayatnya mengatakan, “jika terjadi kecelakaan kereta api, maka perusahaan harus mengambil rel kereta api untuk diperiksa dengan mikroskop dan saya dianggap sebagai orang sehat yang dikirim ke rumah sakit jiwa, tetapi itu adalah apa yang sekarang sedang dilakukan”.

Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan mikroskop logam sebagaimana pada Gambar 19. mikroskop optik untuk logam dengan posisi spesimen menghadap ke atas (normal) dan posisi spesimen menghadap kebawah (*inverted*). Bedanya dengan mikroskop biologi/kedokteran adalah pada penerangan dilakukan dari atas spesimen, karena spesimen logam tidak transparan (*translucent*), sehingga tidak mungkin diberi penerangan dari arah bawah (Syamsul Hadi, 2016).



Gambar 19 Mikroskop optik untuk logam (Lab Metalurgi Fisik UNHAS)

2.12 Uji Dispersive X-Ray Spectroscopy

Fitur Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) dapat digunakan jika pada instrumen SEM terdapat detektor sinar X. EDS adalah sebuah teknik untuk menganalisis sampel secara kualitatif atau hampir semi kualitatif untuk menentukan komposisi elemen dari sebuah area yang ingin diidentifikasi dan diobservasi. Setelah elektron pemindai menumbuk permukaan sampel, elektron di dalam atom mengalami eksitasi. Ketika elektron-elektron pada atom kemudian kembali pada keadaan dasarnya, maka sinar x teremis. Sinar X ini kemudian dikumpulkan oleh detektor X Ray dan dikonversi menjadi informasi yang bermanfaat (Masta, 2020).

Sebuah image yang dihasilkan dari SE dan BSE memang penting, tapi emisi sinar X dari specimen memberikan informasi tentang komposisi elemen penyusun pada area yang dipindai. Sebagai hasilnya, teknik EDS dapat mendeteksi elemen dari karbon (C) hingga uranium (U) jika dengan kuantitas paling rendah 1.0 wt% di dalam material. Kombinasi teknik EDS dan SEM memberikan analisis dari area spesifik dari specimen berupa hasil gambar (image) pemindaian dan analisis semi kuantitatif (Masta, 2020).



Gambar 20 SEM dengan unit EDS (Masta, 2020)