

**KOROSI RETAK TEGANG MATERIAL STAINLESS STEEL AISI
304 DI LINGKUNGAN $MgCl_2$**

**Tesis diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar magister dalam ilmu
material**

Oleh :

**GADANG PRIYOTOMO
NPM : 0606000900**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
UNIVERSITAS INDONESIA
2008**

**LEMBAR PERSETUJUAN
TESIS INI TELAH DISETUJUI OLEH**

Prof.Dr. Johny Wahyuadi, DEA
Pembimbing

DR. Bambang Soegijono
Ketua Sidang

Dr. Azwar Manaf
Penguji

Dr. Muhammad Hikam, MSc
Penguji

Dr. Rudi Subagja
Penguji

DR. Bambang Soegijono
Kepala Program Magister Ilmu Material
Fakultas Material dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia

Tanggal 5 Juli 2008

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena dengan berkat dan rahmat-Nya akhirnya penulis dapat menyelesaikan laporan thesis ini.

Penelitian tesis ini dapat diselesaikan berkat bantuan dan kerja sama yang baik kepada semua pihak, untuk itu penulis memberikan penghormatan yang setinggi-tingginya dan ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada antara lain :

1. Istri tercinta penulis Aan Royani dan Putri tercinta Salwaa Salsabila Utami
2. Bapak Prof.DR.Johny Wahyuadi,DEA sebagai pembimbing dalam penelitian penelitian tesis S2
3. Bapak Sutisna sebagai teknisi pengujian di laboratorium korosi P2M-LIPI yang telah membantu segala sesuatu mengenai pengujian dan persiapan sampel uji.
4. Bapak Drs.Iing Musalam yang telah memberikan bantuan material logam uji dan bimbingan keilmuan di lingkungan P2M-LIPI
5. Karyawan Tata Usaha Program Magister Ilmu Material, Fakultas MIPA, Universitas Indonesia
6. Semua rekan-rekan seangkatan S2 Angkatan 2006 Program Ilmu Bahan FMIPA semua yang telah memberikan inspirasi dalam mengerjakan tesis S2.
7. Orang tua tercinta (Drs.Daliyo,MA & Sri Pujiastuti,Sm.Hk) yang telah memberikan dorongan moral dan doa kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penelitian tesis S2.
8. Adik-adik penulis bernama Sdr. Dadyo Satriyotomo, S.Kom dan M.Pandu Utomo telah membantu secara moril.
9. [Http://www.gadang-e-bookformaterialscience.blogspot.com/](http://www.gadang-e-bookformaterialscience.blogspot.com/), blog website pribadi penulis sebagai inspirasi keilmuan material dan korosi

Wassalamualaikum Wr.Wb

Jakarta, Juni 2008

Gadang Priyotomo

ABSTRAK

Baja tahan karat jenis austenitik AISI 304 mempunyai kerentanan terhadap korosi retak tegang di dalam larutan korosif klorida. Baja tipe ini juga rentan terhadap temperatur sensitasi antara 580⁰C – 815⁰C. Kerentanan tersebut jelas terjadi pada korosi batas butir. Batas butir mengandung krom karbida. Kombinasi antara internal material logam dan lingkungan memberikan efek korosi retak tegang. Lingkungan MgCl₂ merupakan lingkungan korosif yang berperan dalam jenis korosi ini.

Pengujian korosi retak tegang dilakukan dengan metode beban konstan (creep) melalui beban 20 kg/mm², 25 kg/mm², 30,5 Kg/mm², dan 40 Kg/mm² di larutan 42wt% MgCl₂ bersuhu 106⁰C. Perlakuan material dibagi dua yaitu anil 1100⁰C, tahan 1 jam, kemudian celup cepat air dan tanpa anil. Kedua perlakuan tersebut disensitasi (600⁰C,700⁰C,800⁰C). Pengujian kualitatif karbida, pengujian komposisi bulk, larutan uji (AAS), pengujian kekerasan Vickers, metalografi (foto makro) dan pengujian SEM EDS dilakukan.

Hasil menunjukkan pengujian kekerasan vickers pada suhu sensitasi 700⁰C mengalami penurunan berkisar 152,06 Hv (anil 1100⁰C) dan 199,1 Hv (non anil 1100⁰C) dibandingkan suhu sensitasi 600⁰C dan 800⁰C. Tren sama juga terjadi pada pengujian SCC beban konstan, pada temperatur sensitasi 700⁰C, waktu patah (t_f) lebih pendek dibandingkan suhu sensitasi 600⁰C & 800⁰C di dua kondisi material berbeda. Waktu patah tercepat pada beban 25 Kg/mm² 3 detik di kondisi anil 1100⁰C, suhu sensitasi 700⁰C dan terlama pada beban 30,5 Kg/mm² 86400 detik di kondisi tanpa anil, suhu sensitasi 600⁰C. Laju pemuluran (iss) tertinggi pada beban 25 kg/mm² 4,80 mm/detik di kondisi anil 1100⁰C, suhu sensitasi 700⁰C dan terendah pada beban 30,5 Kg/mm² 3.10⁻⁸ mm/detik di kondisi tidak anil 1100⁰C.

Bentuk patahan SCC berbentuk intergranular (tidak dianil 1100⁰C). Bentuk patahan transgranular dengan banyak struktur *dimple* (void-void) nampak banyak di material anil 1100 berbagai suhu sensitasi. Prosentase peningkatan

kelarutan Fe kedalam larutan uji antara 484% hingga 2050% , Kation Cr antara 750% hingga 3540%, dan Kation Ni hingga 110%.



ABSTRACT

Austenitic Stainless steel (AISI 304) has a susceptibility of stress corrosion cracking inside corrosive chloride solution. This material also is susceptible from sensitizing temperature (580⁰C-815⁰C). This susceptibility of material clearly is undergone in intergranular corrosion. Grain boundaries contain chromium carbide. The combination of internal material and environment can contribute a great effect of stress corrosion cracking (SCC). MgCl₂ circumstance have main role for SCC as corrosive solution.

SCC test was conducted with constant load method (creep) of 20 Kg/mm², 25 Kg/mm², 30,5 Kg/mm², and 40 Kg/mm² in 42 wt% MgCl₂ solution and constant temperature of 106⁰C. Material treatment is divided two sides : (1) annealing process (1100⁰C); holding 1 hour then quenching process and (2) without annealing. These two treatments were sensitized at 600⁰C, 700⁰C and 800⁰C. The qualitative test of carbide, the test of bulk chemical composition, solution test (AAS), Vickers hardness test, metallography, and SEM EDS test conducted.

Test results show Vickers hardness value on sensitizing temperature of 700⁰C that was undergone the decreasing of range 152,06 Hv (annealing of 1100⁰C) and 199,1 Hv (non annealing) by comparing sensitizing temperature of 600⁰C and 800⁰C. The same trend also was happen at the test of SCC. On sensitizing temperature of 700⁰C fracture time (t_f) is shorter than sensitizing temperature of 600⁰C and 800⁰C in two different material conditions. The shortest fracture time is happened at load of 25 Kg/mm² that is t_f of 3 seconds in annealing condition of 1100⁰C and sensitizing temperature of 700⁰C. The longest fracture time is also happened at load of 30,5 Kg/mm² that is t_f of 86400 seconds without annealing process and sensitizing 600⁰C. The Highest Elongation rate (i_{ss}) at load of 25 Kg/mm² is 4,80 mm/s in annealing condition of 1100⁰C for sensitizing temperature of 700⁰C. The lowest one at load of 30,5 Kg/mm² is 3.10⁻⁸ mm/s without annealing condition of 1100⁰C.

The average shape of fracture of SCC is intergranular form without annealing process of 1100⁰C. The shape of transgranular fracture with surface structure of dimples was undergone at annealing material of 1100⁰C with various sensitizing temperatures. The increasing of dissolution percentage of Fe ions to test solution between 484% to 2050%, from 750% to 3540% (Cr ion), and up to 110% (Ni ion).



DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Persetujuan	ii
Kata Pengantar	iii
Abstrak	iv
Daftar isi	viii
Daftar Gambar	x
Daftar Tabel	xiv
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Ruang Lingkup Penelitian	3
BAB II. STUDI LITERATUR	5
2.1. Tinjauan Umum	5
2.2. Baja Tahan Karat	7
2.3. Diagram Fasa	12
2.4. Korosi Retak Tegang (Stress Corrosion Cracking)	13
2.5. Fenomena Korosi Retak Tegang Klorida (Chloride Stress Corrosion Crack)	15
2.6. Scanning electron Microscope (SEM)	23
2.7. EDAX (Energy Dispersive X-Ray)	23
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN.	24
3.1. Metodologi Umum.	24
3.2. Persiapan Sampel	25
3.2.1. Preparasi Sampel Uji	25
3.2.2. Persiapan Larutan Uji	26
3.3. Pengujian Sampel	27

3.3.1. Pengujian Mekanik	27
3.3.2. Pengujian Keberadaan Karbida	27
3.3.3. Pengujian Uji Cantilever	28
3.3.4. Peralatan Uji Pendukung	30
3.4. Pengamatan Hasil Uji.	31
BAB IV.HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	33
4.1. Karakterisasi Komposisi Material.	33
4.2. Hubungan Temperatur Sensitasi dan sifat mekanik AISI 304.	35
4.3. Hubungan Variasi Beban, Temperatur dan Konsentrasi Konstan.	42
4.3.1. Material tanpa Anil 1100 ⁰ C (Solution Treatment)	42
4.3.2. Material Anil 1100 ⁰ C (Solution Treatment)	60
4.4. Hubungan temperatur sensitasi dengan laju pemuluran & waktu patah	71
4.5. Kelarutan Kation-Kation Material AISI 304 ke dalam larutan uji	75
BAB V. KESIMPULAN	78
DAFTAR PUSTAKA	79
LAMPIRAN	82

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 2.1. Diagram Tipe Baja Stainless Steel Austenitik	9
GAMBAR 2.2. Diagram Fasa Terner Fe-Cr-Ni pada suhu 800 ⁰ C	12
GAMBAR 2.3. Kurva Potensial vs Rapat Arus	14
GAMBAR 2.4. Kurva elongasi ; t_f (waktu gagal), i_{ss} (Steady State Elongation Rate) T_{ss} (waktu transisi), σ (tegangan), T (temperature)	16
GAMBAR 2.5. Hubungan antara Logaritma i_{ss} dan waktu patah (t_f) pada AISI 304 310, dan 316 di larutan $MgCl_2$	18
GAMBAR 2.6. Retakan Transgranular pada baja Stainless Austenitik	19
GAMBAR 2.7. Retakan Intergranular pada Baja stainless Austenitik	20
GAMBAR 2.8. Hubungan nilai Logaritma waktu patah (t_f) vs (1/T) AISI 304 Di larutan jenuh mendidih $MgCl_2$ Beban 300 MPa	21
GAMBAR 2.9. Hubungan Oksigen terlarut dan Konsentrasi Klorida	22
GAMBAR 3.1. Diagram Alir Penelitian yang menjadi acuan kegiatan penelitian	24
GAMBAR 3.2. Bentuk Geometri Benda Uji.	25
GAMBAR 3.3. Tungku Tabung alumina	25
GAMBAR 3.4. Alat Ultrasonic Cleaner	26
GAMBAR 3.5. Pengujian Keberadaan Karbida Krom Baja Tahan Karat AISI 304	28
GAMBAR 3.6. Peralatan uji korosi retak tegang dengan metode beban konstan .	29
GAMBAR 4.1. Penurunan nilai pH larutan 42wt% $MgCl_2$	34
GAMBAR 4.2. (a) Mikrostruktur AISI 304 tanpa pemanasan anil 1100 ⁰ C, etsa Elektrolit asam oksalat 10% perbesaran 177x, (b). Mikrostruktur AISI 304 tanpa Pemanasan anil 1100 ⁰ C, etsa elektrolit asam oksalat 10%, perbesaran 177 x	35
GAMBAR 4.3. (a) Mikrostruktur AISI 304 tanpa pemanasan anil 1100 ⁰ C, etsa Elektrolit asam oksalat 10% perbesaran 800x, (b). Mikrostruktur AISI 304 tanpa Pemanasan anil 1100 ⁰ C, etsa elektrolit asam oksalat	

10%,perbesaran 177 x	36
GAMBAR 4.4. (a) Mikrostruktur AISI 304 tanpa pemanasan anil 1100 ⁰ C,etsa Elektrolit asam oksalat 10% perbesaran 800x,(b). Mikrostruktur AISI 304 tanpa Pemanasan anil 1100 ⁰ C,etsa elektrolit asam oksalat 10%,perbesaran 600 x	37
GAMBAR 4.5. (a) Mikrostruktur AISI 304 tanpa pemanasan anil 1100 ⁰ C,etsa Elektrolit asam oksalat 10% perbesaran 800x,(b). Mikrostruktur AISI 304 tanpa Pemanasan anil 1100 ⁰ C,etsa elektrolit asam oksalat 10%,perbesaran 700 x	38
GAMBAR 4.6. (a) Mikrostruktur AISI 304 tanpa pemanasan anil 1100 ⁰ C,etsa Elektrolit asam oksalat 10% perbesaran 800x,(b). Mikrostruktur AISI 304 tanpa Pemanasan anil 1100 ⁰ C,etsa elektrolit asam oksalat 10%,perbesaran 800 x	39
GAMBAR 4.7. Mikrostruktur AISI 304 berbagai kondisi,etsa asam oksalat Perbesaran 600 x	41
GAMBAR 4.8 Nilai Kekerasan AISI 304.	42
GAMBAR 4.9 Kurva SCC Beban 30,5 Kg/mm ² . Suhu 106 ⁰ C	43
GAMBAR 4.10 Mikrostruktur AISI 304,Ts 600 ⁰ C, T 106 ⁰ C, 42 wt% MgCl ₂	45
GAMBAR 4.11 Mikrostruktur AISI 304,Ts 700 ⁰ C, T 106 ⁰ C, 42 wt% MgCl ₂	46
GAMBAR 4.12 Peak-Peak Unsur di Permukaan Patahan Melalui Uji EDS	47
GAMBAR 4.13 Mikrostruktur AISI 304,Ts 800 ⁰ C, T 106 ⁰ C, 42 wt% MgCl ₂	48
GAMBAR 4.14 Hasil Uji EDS Unsur-Unsur di Permukaan Patahan AISI 304 Bersuhu sensitasi 800 ⁰ C	49
GAMBAR 4.15 Mapping Area patahan AISI 304, suhu sensitasi 800 ⁰ C,42wtMgCl ₂	50
GAMBAR 4.16.Kurva SCC,Beban 40 Kg/mm ² , berbagai variasi suhu sensitasi 42 wt% MgCl ₂ , suhu larutan 106 ⁰ C	51
GAMBAR 4.17 Patahan, beban 40 Kg/mm ² ,suhu sensitasi 600 ⁰ C,suhu larutan 106 ⁰ C 42 wt% MgCl ₂	52
GAMBAR 4.18 Unsur-unsur yang mewakili permukaan patahan	53

GAMBAR 4.19 Mapping Area patahan AISI 304 bersuhu sensitasi 600 ⁰ C.	54
GAMBAR 4.20 Patahan, beban 40 Kg/mm ² , suhu sensitasi 700 ⁰ C, suhu larutan 106 ⁰ C 42 wt% MgCl ₂	55
GAMBAR 4.21 Unsur-unsur di permukaan patahan, beban 40 Kg/mm ² , suhu sensitasi 700 ⁰ C. suhu larutan 106 ⁰ C, 42 wt% MgCl ₂	56
GAMBAR 4.22 Mapping area unsur, beban 40 Kg/mm ² , suhu sensitasi 700 ⁰ C, suhu larutan 106 ⁰ C 42 wt% MgCl ₂	57
GAMBAR 4.23 Gambar patahan, beban 40 Kg/mm ² , suhu sensitasi 700 ⁰ C, suhu larutan 106 ⁰ C 42 wt% MgCl ₂	58
GAMBAR 4.24 Unsur-unsur di permukaan patahan dengan metode EDS	59
GAMBAR 4.25 Kurva SCC, Beban 25 Kg/mm ² , variasi suhu sensitasi, suhu larutan 106 ⁰ C, 42 wt% MgCl ₂	60
GAMBAR 4.26 Gambar Patahan, Beban 25 Kg/mm ² , suhu sensitasi 600 ⁰ C, suhu larutan 106 ⁰ C, 42 wt% MgCl ₂	62
GAMBAR 4.27 Unsur-unsur uji EDS ,Beban 25 Kg/mm ² , variasi suhu sensitasi, suhu larutan 106 ⁰ C, 42 wt% MgCl ₂	63
GAMBAR 4.28 Bentuk Patahan ,Beban 25 Kg/mm ² , suhu sensitasi 700 ⁰ C, suhu larutan 106 ⁰ C, 42 wt% MgCl ₂	64
GAMBAR 4.29 Bentuk Patahan ,Beban 25 Kg/mm ² , suhu sensitasi 800 ⁰ C, suhu larutan 106 ⁰ C, 42 wt% MgCl ₂	65
GAMBAR 4.30 Kurva SCC, Beban 20 Kg/mm ² , variasi suhu sensitasi, suhu larutan 106 ⁰ C, 42 wt% MgCl ₂	67
GAMBAR 4.31 Bentuk patahan dimple pada Material AISI bersuhu sensitasi 600 ⁰	68
GAMBAR 4.32 Bentuk Patahan pada Material AISI 304 bersuhu sensitasi 700 ⁰ C	69
GAMBAR 4.33 Bentuk Patahan pada Material AISI 304 bersuhu sensitasi 800 ⁰ C	70
GAMBAR 4.34 Kurva hubungan antara Laju Pemuluran dan Suhu sensitasi	71
GAMBAR 4.35 Grafik hubungan antara waktu patah dan suhu sensitasi	72
GAMBAR 4.36 Grafik hubungan antara waktu patah dan suhu sensitasi 600 ⁰ C	73
GAMBAR 4.37 Grafik hubungan antara waktu patah dan suhu sensitasi 700 ⁰ C	74
GAMBAR 4.38 Grafik hubungan antara waktu patah dan suhu sensitasi 600 ⁰ C	75

GAMBAR 4.39 . Plot hubungan konsentrasi kation 76
GAMBAR 4.40. Plot hubungan konsentrasi kation 77



DAFTAR TABEL

TABEL 2.1 Komposisi kimia baja AISI 304.	10
TABEL 2.2 Sifat mekanik AISI 304	11
TABEL 2.3 Sifat fisik dan listrik AISI 304 pada kondisi annealed	11
TABEL 4.1 Perbandingan komposisi unsur material AISI 304.	33
TABEL 4.2 Hasil pengujian AAS variasi konsentrasi 30% wt & 42% wt MgCl ₂	34
TABEL 4.3 Hasil pengujian pH larutan uji	34
TABEL 4.4 Nilai kekerasan vickers material	39
TABEL 4.5 Variasi suhu sensitasi dan waktu patah,laju elongasi	44
TABEL 4.6 Unsur di permukaan patahan hasil EDS	46
TABEL 4.7 Unsur di permukaan patahan AISI 304 bersuhu sensitasi 800 ⁰ C	49
TABEL 4.8 Variasi suhu sensitasi dan waktu patah,laju elongasi	50
TABEL 4.9 Unsur –unsur di permukaan patahan suhu sensitasi 600 ⁰ C	52
TABEL 4.10 Unsur –unsur di permukaan patahan suhu sensitasi 700 ⁰ C	56
TABEL 4.11 Unsur –unsur di permukaan patahan suhu sensitasi 800 ⁰ C	59
TABEL 4.12 Variasi suhu sensitasi dan waktu patah,laju elongasi	61
TABEL 4.13 Unsur –unsur di permukaan patahan suhu sensitasi 600 ⁰ C	63
TABEL 4.14 Unsur –unsur di permukaan patahan suhu sensitasi 700 ⁰ C	65
TABEL 4.15 Unsur –unsur di permukaan patahan suhu sensitasi 800 ⁰ C	66
TABEL 4.16 Variasi suhu sensitasi dan waktu patah,laju elongasi	68
TABEL 4.17 Unsur –unsur di permukaan patahan suhu sensitasi 700 ⁰ C	70
TABEL 4.18 Laju pemuluran pada variasi suhu sensitasi	71
TABEL 4.19 Pengujian AAS terhadap kation-kation terlarut di larutan uji.	76

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Baja tahan karat di dalam industri digunakan secara luas hingga sekarang dengan variasi paduan baru. Material ini memiliki secara umum sifat ketahanan korosi yang baik di berbagai lingkungan. Ketahanan korosi ini dikarenakan adanya kandungan unsur-unsur di dalam paduan tersebut. Unsur-unsur krom (Cr) dan Nikel (Ni) merupakan unsur yang bertanggung jawab atas ketahanan korosi. Baja tahan karat dengan kandungan unsur krom lebih dari 12% wt memberikan efek ketahanan korosi. Baja tahan karat dengan unsur krom lebih dari 10% wt akan membentuk suatu lapisan oksida protektif (Cr_2O_3) di permukaan baja untuk melindungi beberapa lingkungan korosif.

Korosi merupakan fenomena degradasi suatu material logam melalui suatu reaksi elektrokimia dengan lingkungan material berada. Reaksi elektrokimia mempunyai komponen anoda, katoda dan larutan elektrolit. Larutan elektrolit antara lain HCl, HNO₃, H₂SO₄, MgCl₂ dan sebagainya. Tiga komponen di atas akan memberikan efek korosi pada material logam. Kerugian kerusakan material akibat korosi membuat biaya produksi dan perawatan yang sangat besar sehingga pemilihan material dan cara proteksi terus dikembangkan melalui riset-riset di dunia. Di negara Amerika Serikat, biaya korosi di bidang produksi dan manufaktur berkisar 17,6 milyar dolar, bidang infrastruktur 16,8 milyar dolar, utiliti berkisar 47,9 milyar dolar dan transportasi 29,7 milyar dolar [1].

Di sektor industri antara lain petrokimia, minyak dan gas bumi, farmasi dan lain-lain harus mengeluarkan biaya pemeliharaan untuk komponen-komponen pabriknya seperti pressure vessel, heat exchanger, pipa-pipa penyalur, coller plant dan lain-lain. Pipa-pipa penyalur Gas, air pendingin bertekanan tinggi juga menjadi persoalan jika terjadi kegagalan seperti pipa meledak atau bocor. Selain aspek korosi

di lingkungan juga harus di lihat aspek internal material kemudian tekanan di dalam komponen tersebut yang bekerja pada material tersebut.

Jenis korosi dibagi beberapa macam antara lain korosi seragam, korosi celah, korosi sumuran, korosi erosi, korosi retak tegang dan sebagainya. Korosi retak tegang merupakan kombinasi antara lingkungan korosif, beban di material logam dan internal material itu sendiri. Baja tahan karat AISI 304 merupakan material yang umumnya rentan terhadap serangan korosi retak tegang. Umumnya korosi retak tegang terdapat pada aplikasi pengelasan pipa atau komponen-komponen lainnya.

Korosi retak tegang terjadi di lingkungan korosif khususnya $MgCl_2$ pada suhu di atas $100^{\circ}C$, peran lingkungan korosif tidak terlepas dari kehadiran oksigen dan keberadaan ion asing klorida. Peran beban luar yang bekerja pada material cukup penting karena peningkatan tegangan luar akan mengurangi waktu material untuk patah. Minimal tidak boleh melebihi 70% tegangan luluh suatu material. Namun di lapangan korosi retak tegang dapat terjadi di bawah tegangan luluh. Tegangan luar dapat berupa tegangan langsung, tegangan sisa, dan tegangan akibat termal.

Faktor metalurgi juga berperan dalam terjadinya korosi retak tegang. Kerentanan korosi ini di pengaruhi oleh komposisi kimia bulk, orientasi butir-butir, komposisi, dan distribusi presipitasi, dan dislokasi. Faktor metalurgi lainnya yaitu keberadaan krom karbida di batas butir. Baja tahan karat tipe austenitik mempunyai kerentanan terhadap proses sensitasi. Sensitasi adalah proses pembentukan senyawa baru di batas butir antara suhu $580 - 815^{\circ}C$ sehingga dapat memberikan efek korosi batas butir jika di dalam larutan korosif. Daerah kekurangan krom (chrom depleted zone) akan mengalami korosi sebagai anoda sehingga sifat ketahanan korosi berkurang karena tidak bisa mampu memulihkan secara cepat lapisan protektif krom oksida (Cr_2O_3). Lingkungan $MgCl_2$ kan menyerang daerah kurang lapisan protektif. Adanya beban luar dan tegangan sisa di material AISI 304 akan memberikan efek bersama terjadinya retakan di batas butir.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Korosi retak tegang terjadi pada baja stainless austenitik AISI 304 di lingkungan air yang mengandung klorida. Korosi ini umumnya terjadi pada perpipaan pendingin . Tegangan luar diterima oleh material melalui tekanan fluida yang tinggi. Dua dari berbagai parameter yang bertanggung jawab dalam kegagalan ini yaitu temperatur dan konsentrasi terlarut. Adanya tresshold atau pembatasan daerah suatu fenomena korosi retak tegang diperlukan untuk meminimalisasi kerusakan.

1.3. TUJUAN PENELITIAN

1. Menyelidiki pengaruh variasi beban luar dan konsentrasi larutan Magnesium klorida konsentrasi 42wt% serta suhu kerja 106°C pada material AISI 304 terhadap kerentanan korosi retak tegang.
2. Menginvestigasi adanya logam terlarut di larutan uji saat terjadinya material patah dengan variasi temperatur dan konsentrasi sodium klorida
3. Menentukan mekanisme retak pada material AISI 304 di larutan magnesium klorida dengan variasi temperatur dan konsentrasi.
4. Memberikan batasan-batasan aman melalui indikator waktu patah (t_f), steady-stade elongation rate (l_{ss}) melihat variabel suhu sensitasi 600°C , 700°C dan 800°C

1.4. RUANG LINGKUP PENELITIAN

Penelitian sepenuhnya dilakukan di Pusat Penelitian Metalurgi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Semua peralatan uji dan analisa dilakukan di instansi tersebut. Metode pengujian korosi retak tegang dengan beban statis 20 Kg/mm^2 , 25 Kg/mm^2 (AISI 304 dianil 1100°C , tahan 1 jam dan celup cepat) dan $30,5 \text{ Kg/mm}^2$ 40 Kg/mm^2 (AISI tanpa di anil). AISI 304 di anil 1100°C dan tidak di anil kemudian harus disensitasi pada temperatur 600°C , 700°C , dan 800°C .

Material awal diuji komposisi bulk dengan Arc Spectrometer, Pengujian larutan sebelum dan sesudah uji korosi retak tegang dilakukan dengan Atomic Absorbtion Spectrometer(AAS), Pengujian pH larutan dengan pHmeter. Pengujian keberadaan karbida diseluruh kondisi baja taha karat AISI dengan metode ASTM A262, pengujian nilai kekerasan dilakukan dengan metode Vickers, Pengujian metalografi (foto makro), pengujian *Scanning electron Microscope* serta *Energy Dispersive Spectrometer*.



BAB II

STUDI LITERATUR

2.1. Tinjauan Umum

Korosi merupakan proses degradasi sifat material disebabkan reaksi dengan lingkungannya. Korosi sebagai suatu reaksi elektrokimia yang memberikan kontribusi kerusakan fisik suatu material secara signifikan sehingga perlu perhatian untuk mencegah dan meminimalisasi kerugian yang timbul akibat efek korosi ^[1]. Jumlah logam dan paduannya merupakan fungsi dari lingkungan sehingga saling mempengaruhi kedua parameter tersebut antara lain lingkungan air tawar, air laut, tanah, air laut ^[2].

Pendekatan korosi secara umum melibatkan sifat material antara lain sifat fisik, mekanik dan kimia. Pendekatan lainnya juga mempertimbangkan struktur logam, sifat lingkungan sekitar dan reaksi antara permukaan logam dan lingkungan ^[3]. Faktor-faktor pendekatan korosi yaitu :

- **Logam.** Komposisi, struktur atom, keheterogenan struktur secara mikroskopik dan makroskopik, tegangan (tarik, tekan dan siklus).
- **Lingkungan.** Sifat kimia, konsentrasi bahan reaktif dan pengotor, tekanan, suhu, kecepatan dan lain-lain
- **Antar muka logam/lingkungan.** Kinetika oksidasi dan pelarutan logam, kinetika proses reduksi bahan di dalam larutan, lokasi produk korosi dan pertumbuhan film dan pelarutan film.

Berdasarkan pertimbangan di atas mengindikasikan mekanisme korosi logam sangat kompleks dengan melibatkan berbagai cabang bidang antara lain sifat fisik, metalurgi fisik, kimia, bakteri dan lain-lain.

Mekanisme korosi tidak terlepas dari reaksi elektrokimia. Reaksi elektrokimia melibatkan perpindahan electron-elektron. Perpindahan elektron merupakan hasil reaksi redoks (reduksi-oksidasi). Mekanisme korosi melalui reaksi elektrokimia

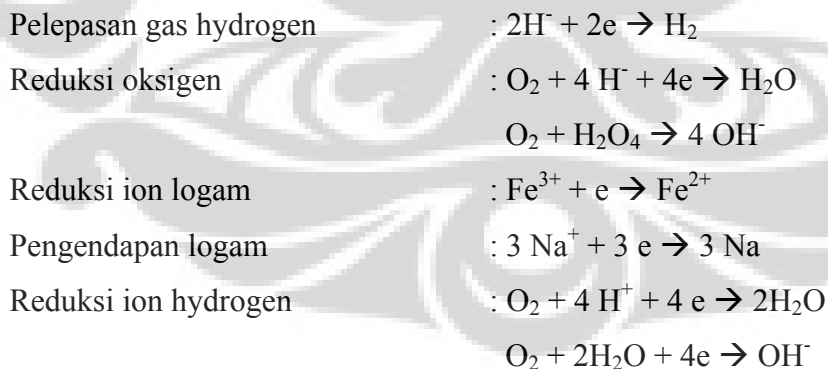
melibatkan reaksi anodic di daerah anodik. Reaksi anodik (oksidasi) diindikasikan melalui peningkatan valensi atau produk electron-elektron. Reaksi anodik yang terjadi pada proses korosi logam yaitu :



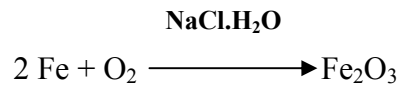
Proses korosi dari logam M adalah proses oksidasi logam menjadi satu ion (n^+) dalam pelepasan n electron. Harga dari n bergantung dari sifat logam sebagai contoh besi :



Reaksi katodik juga berlangsung di proses korosi. Reaksi katodik diindikasikan melalui penurunan nilai valensi atau konsumsi electron-elektron yang dihasilkan dari reaksi anodic. Reaksi katodik terletak di daerah katoda. Beberapa jenis reaksi katodik yang terjadi selama proses korosi logam yaitu :



Reaksi katodik dimana oksigen dari udara akan larut dalam larutan terbuka. Reaksi korosi tersebut sebagai berikut :



2.2. Baja Tahan Karat

Baja stainless merupakan baja paduan yang mengandung minimal 10,5% Cr. Sedikit baja stainless mengandung lebih dari 30% Cr atau kurang dari 50% Fe. Karakteristik khusus baja stainless adalah pembentukan lapisan film kromium oksida (Cr_2O_3). Lapisan ini berkarakter kuat, tidak mudah pecah dan tidak terlihat secara kasat mata. Lapisan kromium oksida dapat membentuk kembali jika lapisan rusak dengan kehadiran oksigen. Pemilihan baja stainless didasarkan dengan sifat-sifat materialnya antara lain ketahanan korosi, fabrikasi, mekanik, dan biaya produk. Penambahan unsur-unsur tertentu kedalam baja stainless dilakukan dengan tujuan sebagai berikut :

1. Penambahan Molibdenum (Mo) bertujuan untuk memperbaiki ketahanan korosi pitting dan korosi celah
2. Unsur karbon rendah dan penambahan unsur penstabil karbida (titanium atau niobium) bertujuan menekan korosi batas butir pada material yang mengalami proses sensitasi.
3. Penambahan kromium (Cr) bertujuan meningkatkan ketahanan korosi dengan membentuk lapisan oksida (Cr_2O_3) dan ketahanan terhadap oksidasi temperatur tinggi.
4. Penambahan nikel (Ni) bertujuan untuk meningkatkan ketahanan korosi dalam media pengkorosi netral atau lemah. Nikel juga meningkatkan keuletan dan mampu bentuk logam. Penambahan nikel meningkatkan ketahanan korosi tegangan.
5. Penambahan unsur molybdenum (Mo) untuk meningkatkan ketahanan korosi pitting di lingkungan klorida.
6. Unsur aluminium (Al) meningkatkan pembentukan lapisan oksida pada temperatur tinggi.

Umumnya berdasarkan paduan unsur kimia dan presentasi baja stainless dibagi menjadi lima kategori^[4]. Lima kategori tersebut yaitu :

Baja stainless martensitik.

Baja ini merupakan paduan kromium dan karbon yang memiliki struktur martensit *body-centered cubic* (bcc) terdistorsi saat kondisi bahan dikeraskan. Baja ini merupakan ferromagnetic, bersifat dapat dikeraskan dan umumnya tahan korosi di lingkungan kurang korosif. Kandungan kromium umumnya berkisar antara 10,5 – 18%, dan karbon melebihi 1,2%. Kandungan kromium dan karbon dijaga agar mendapatkan struktur martensit saat proses pengerasan. Karbida berlebih meningkatkan ketahanan aus. Unsur niobium, silikon, tungsten dan vanadium ditambah untuk memperbaiki proses temper setelah proses pengerasan. Sedikit kandungan nikel meningkatkan ketahanan korosi dan ketangguhan.

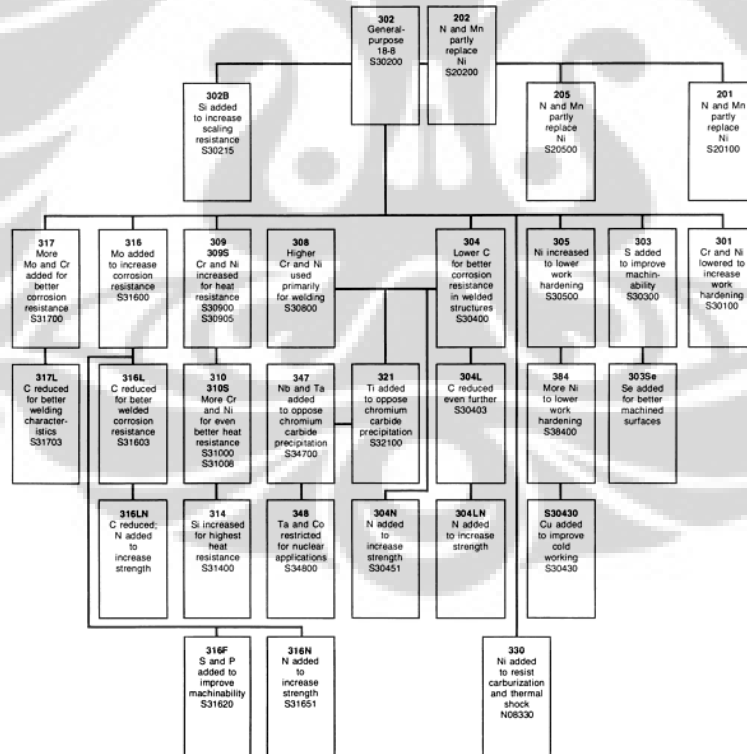
Baja stainless Ferritik

Baja jenis ini mempunyai struktur *body centered cubic* (bcc). Unsur kromium ditambahkan ke paduan sebagai penstabil ferrit. Kandungan kromium umumnya kisaran 10,5 – 30%. Beberapa tipe baja mengandung unsur molybdenum, silikon, aluminium, titanium dan niobium. Unsur sulfur ditambahkan untuk memperbaiki sifat mesin. Paduan ini merupakan ferromagnetik dan mempunyai sifat ulet dan mampu bentuk baik namun kekuatan di lingkungan suhu tinggi lebih rendah dibandingkan baja stainless austenitik. Kandungan karbon rendah pada baja ferritik tidak dapat dikeraskan dengan perlakuan panas.

Tingkat kekerasan beberapa tipe baja stainless ferritik dapat ditingkatkan dengan cara celup cepat. Metode celup cepat merupakan proses pencelupan benda kerja secara cepat dari keadaan temperatur tinggi ke temperatur ruang. Sifat mampu las, keuletan, ketahanan korosi dapat ditingkatkan dengan mengatur kandungan tertentu unsur karbon dan nitrogen.

Baja Stainless austenitik

Baja Stainless austenitik merupakan paduan logam besi-krom-nikel yang mengandung 16-20% kromium, 7-22%wt nikel, dan nitrogen. Logam paduan ini merupakan paduan berbasis ferrous dan struktur kristal face centered cubic (fcc). Struktur kristal akan tetap berfasa austenit bila unsur nikel dalam paduan diganti mangan (Mn) karena kedua unsur merupakan penstabil fasa austenit. Fasa austenitic tidak akan berubah saat perlakuan panas anil kemudian didinginkan pada temperatur ruang. Baja stainless austenitik tidak dapat dikeraskan melalui perlakuan celup cepat (quenching). Umumnya jenis baja ini dapat tetap menjaga sifat asutenitik pada temperature ruang, lebih bersifat ulet dan memiliki ketahanan korosi lebih baik dibandingkan baja stainless ferritik dan martensit. Setiap jenis baja stainless austenitik memiliki karakteristik khusus tergantung dari penambahan unsur pepadunya terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Diagram tipe baja stainless austenitik^[4].

Baja stainless austenitik hanya bisa dikeraskan melalui pengerjaan dingin. Material ini mempunyai kekuatan tinggi di lingkungan suhu tinggi dan bersifat cryogenic. Tipe 2xx mengandung nitrogen, mangan 4-15,5%wt, dan kandungan 7%wt nikel. Tipe 3xx mengandung unsur nikel tinggi dan maksimal kandungan mangan 2%wt. Unsur molybdenum, tembaga, silicon, aluminium, titanium dan niobium ditambah dengan karakter material tertentu seperti ketahanan korosi sumuran atau oksidasi. Sulfur ditambah pada tipe tertentu untuk memperbaiki sifat mampu mesin.

Salah satu jenis baja stainless austenitic adalah AISI 304. Baja austenitic ini mempunyai struktur kubus satuan bidang (face center cubic) dan merupakan baja dengan ketahanan korosi tinggi. Komposisi unsur – unsur pemuatan yang terkandung dalam AISI 304 akan menentukan sifat mekanik dan ketahanan korosi. Baja AISI 304 mempunyai kadar karbon sangat rendah 0,08%wt. Kadar kromium berkisar 18-20%wt dan nikel 8-10,5%wt yang terlihat pada Tabel 2.1. Kadar kromium cukup tinggi membentuk lapisan Cr_2O_3 yang protektif untuk meningkatkan ketahanan korosi. Komposisi karbon rendah untuk meminimalisasi sensitasi akibat proses pengelasan.

Tabel 2.1. Komposisi kimia baja AISI 304^[4].

Unsur	%wt
C	0,08
Mn	2
P	0,45
S	0,03
Si	0,75
Cr	18-20
Ni	8-10,5
Mo	0
Cu	0
Fe	Balanced

Komposisi kandungan unsur dalam baja AISI 304 tersebut diperoleh sifat mekanik material yang ditunjukkan pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Sifat mekanik AISI 304 ^[4]

Poison	Tensile	Yield	Elong	Hard	Mod	Density
0,27- 0,30	515	205	40	88	193	8

Keterangan :

- Poison : Rasio Poison
 Tensile : Tensile strength (MPa)
 Yield : Yield Strength (MPa)
 Elong : elongation %
 Hard : Kekerasan (HVN)
 Mod : Modulus elastisitas (GPa)
 Density : berat jenis (Kg/m³)

Tabel 2.3. Sifat fisik dan listrik AISI 304 pada kondisi annealed^[4]

Thermal ekspansi (10 ⁻⁶ /°C)	Thermal konduktivitas (W/m-K)	Spesific heat (J/kg- K)	Resistivitas (10 ⁻⁹ Ω- m)
17,2	16,2	500	720

Baja stainless dupleks

Jenis baja ini merupakan paduan campuran struktur ferrite (bcc) dan austenit. Umumnya paduan-paduan didesain mengandung kadar seimbang tiap fasa saat kondisi anil. Paduan utama material adalah kromium dan nikel, tapi nitrogen, molybdenum, tembaga, silicon dan tungsten ditambah untuk menstabilkan struktur dan memperbaiki sifat tahan korosi. Ketahanan korosi baja stainless dupleks hampir sama dengan baja stainless austenitik. Kelebihan baja stainless dupleks yaitu nilai tegangan tarik dan luluh tinggi dan ketahanan korosi retak tegang lebih baik dari pada baja stainless austenitik. Ketangguhan baja stainless dupleks antara baja austenitic dan ferritik.

2.4 Korosi Retak Tegang (Stress Corrosion Cracking)

Korosi retak tegang merupakan suatu kegagalan material dengan kombinasi antara lingkungan dan beban luar sehingga dapat menyebabkan penyebaran retak. Korosi retak tegang dapat juga dideskripsikan suatu kegagalan operasional pada material yang terjadi oleh lingkungan secara perlahan-lahan yang disebabkan perambatan retak ^[5]. Perambatan retak merupakan hasil kombinasi dan interaksi sinergis antara tegangan mekanik dan reaksi korosi. Korosi retak tegang mempunyai penampakan patahan getas walaupun material bersifat ulet.

Faktor-faktor utama terjadi korosi retak tegang yaitu tegangan luar, tegangan sisa material, kombinasi tegangan luar dan sisa, dan keberadaan lingkungan korosif ^[6]. Korosi retak tegang dapat terjadi di lingkungan korosif melalui pembebanan material. Pergerakan retak terjadi bila ada kombinasi dari interaksi tegangan dan reaksi kimia. Tegangan kecil yang dibutuhkan agar terjadi korosi retak tegang dibawah titik luluh (yield point) pada tegangan-regangan yang disebabkan adanya tegangan sisa. Tegangan konstan (statis) menyebabkan terjadi korosi retak tegang, bila terdapat lingkungan korosif. Fenomena ini terjadi di daerah korosi yang terkena konsentrasi tegangan dan akan menimbulkan korosi lebih banyak dibandingkan dengan tanpa tegangan.

Faktor yang mempengaruhi jenis korosi ini yaitu :

1. Faktor lingkungan korosif
2. Material rentan korosif
3. Tegangan tarik luar

Faktor lingkungan memberikan pengaruh yang berbeda pada masing-masing material. Faktor-faktor terjadinya perambatan retak yaitu :

1. Faktor komposisi dan paduan

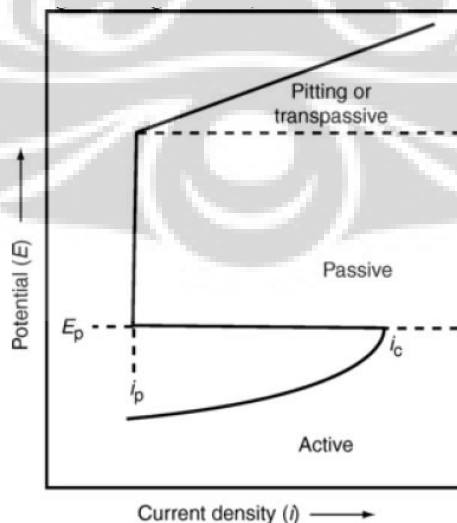
Setiap material memiliki kekuatan dan ketangguhan berbeda tergantung komposisi material. Setiap material memiliki karakterisasi masing-masing dan apabila dipadukan maka akan memiliki sifat kombinasi yang baik ^[7].

2. Faktor tegangan

Korosi retak tegang terjadi apabila pengaruh intensitas tegangan mendukung terjadinya inisiasi keretakan, yang selanjutnya akan menyebabkan perambatan retak. Retak ini akan menjalar sesuai intensitas tegangan semakin besar tegangan diberikan kemungkinan laju kerusakan semakin tinggi dan korosi retak tegang semakin cepat. Macam tegangan yang berpengaruh pada korosi retak tegang antara lain tegangan pakai, tegangan sisa, panas dan lain-lain.

3. Faktor lingkungan

Pengaruh lingkungan sekitar terhadap korosi retak tegang merupakan suatu hubungan timbal balik. Korosi retak tegang terjadi di berbagai lingkungan cairan. Kehadiran oksidizer sering mempengaruhi tendensi terjadinya korosi retak tegang. Kehadiran oksigen membuat kerentanan baja stainless austenitik terhadap retak di lingkungan klorida semakin besar. Kadar oksigen menurun akan menyebabkan kerentanan korosi retak tegang rendah. Korosi retak tegang semakin mudah terjadi jika temperatur larutan kerja meningkat. Pengaruh ini dapat menyebabkan inisiasi vibrasi antar atom-atom semakin tinggi sehingga dapat memutuskan suatu ikatan antar atom. Baja stainless austenitik sangat rentan terhadap lingkungan klorida ($MgCl_2$ dan $BaCl_2$), Larutan $NaCl-H_2O_2$, air laut, asam sulfur (H_2S), larutan $NaOH-H_2S$, dan uap air kondensat yang mengandung klorida. Pengaruh lainnya yaitu nilai pH larutan.



Gambar 2.3 Kurva potensial vs rapat arus

Potensial elektrokimia memiliki pengaruh terhadap korosi retak tegang di setiap logam. Daerah pasif merupakan daerah dimana variasi nilai potensial bahan tidak mempengaruhi nilai rapat arus sehingga lapisan oksida pasif akan terbentuk. Dalam kondisi pasivasi, logam tidak terlihat tanda-tanda terjadinya korosi. Tetapi saat melewati daerah pasif maka korosi akan terjadi dengan cepat. Karakterisasi logam atau paduan secara umum terbagi tiga daerah, aktif, pasif dan transpasif. Pada Gambar 2.3 terlihat laju korosi akan menurun pada daerah di atas titik kritis E_p . Daerah antara E_p - E_{p1} merupakan daerah terbentuknya lapisan oksida pasif. Nilai laju korosi turun drastis saat terbentuknya lapisan pasif. Saat melampaui titik E_{p1} , material mulai mengalami korosi sumuran. Selama terjadi transisi dari daerah aktif ke pasif, laju korosi logam akan menurun 10^3 hingga 10^6 di bawah laju korosi di daerah aktif.

Pada baja stainless austenitik terjadi pembentukan lapisan pasif protektif karena adanya unsur kromium dan udara luar. Adanya dua komponen tersebut membentuk lapisan kromium oksida (Cr_2O_3). Adanya kerapuhan lapisan oksida dapat menyebabkan terjadinya korosi lokal antara lain korosi sumuran, korosi celah, dan korosi retak tegang. Ion klorida dalam larutan akan menyebabkan kenaikan rapat arus dan mengecilkan daerah ruang pasifasi pada kurva potentiostatik.

4. Faktor metalurgis

Kerentanan korosi retak tegang diakibatkan oleh komposisi kimia, orientasi butir, komposisi dan distribusi endapan, interaksi dislokasi dan tingkat transformasi fasa (tingkat metastabil). Faktor-faktor ini saling berinteraksi dengan lingkungan dan beban luar untuk terjadinya korosi retak tegang

2.5 Fenomena Korosi Retak Tegang Klorida (Chloride Stress Corrosion Cracking)

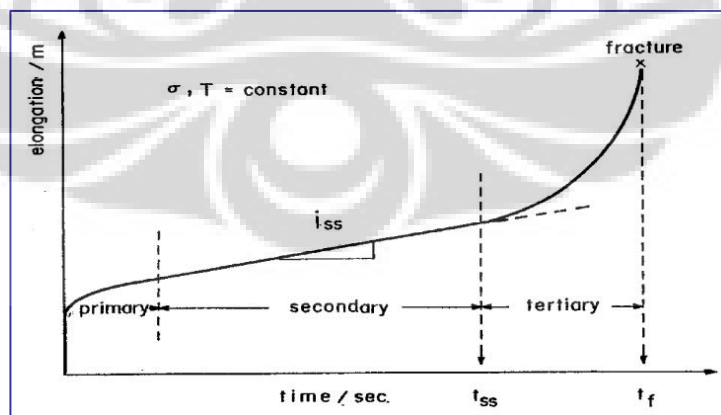
Korosi retak tegang merupakan proses kegagalan tidak spontan. Keretakan terinisiasi dan merambat pada laju regangan rendah hingga nilai tegangan melebihi kekuatan patah. Korosi retak tegang pada baja stainless austenitik telah divestigasi

sebagai fungsi tegangan luar, temperatur sensitasi, potensial dan lingkungan (pH, konsentrasi anion, jenis anion, inhibitor dan temperature) dengan menggunakan beban konstan^[9].

Proses korosi retak tegang dibagi ke dalam tiga tahapan^[8] sebagai berikut :

1. Inisiasi retak (daerah 1 /primer)
2. Perambatan retak steady state (daerah 2/ sekunder)
3. Perambatan retak atau final failure (daerah 3 / tersier)

Daerah 1 adalah daerah didominasi tegangan, daerah 2 didominasi korosi retak tegang dan daerah 3 didominasi oleh korosi. Daerah primer merupakan daerah awal laju elongasi yang selalu diamati dalam lingkungan korosif maupun inert terjadi segera setelah bahan uji diberi beban konstan. Perilaku elongasi dalam daerah primer sebagian besar tergantung pada tegangan uji dan bukan lingkungan^[11]. Elongasi dalam daerah primer disebabkan sebagian besar oleh proses creep. Dalam daerah sekunder, perilaku elongasi meningkat secara linear dengan waktu bilamana korosi retak tegang terjadi, sehingga diperoleh laju elongan steady state (I_{ss}). Nilai elongasi di dalam daerah sekunder tidak dapat diamati atau sedikit meningkat dalam lingkungan inert meskipun di bawah kondisi tegangan yang besar, sehingga creep dalam bulk akan memiliki sedikit kontribusi terhadap kenaikan elongasi. Ini mengindikasikan bahwa perilaku elongasi dalam daerah sekunder akan berhubungan dengan ujung retakan. Nilai I_{ss} berhubungan laju perambatan retak.



Gambar 2.4.Kurva elongasi korosi ; t_f (waktu gagal), I_{ss} (steady state elongation rate), t_{ss} (waktu transisi), σ (tegangan), T (temperatur)

Pada Gambar 2.4 mewakili tiga tahapan mekanisme korosi retak tegang secara umum. Kurva elongansi korosi terdiri daerah pertama (primary), kedua (secondary) dan ketiga (tertiary) yang berhubungan nukleasi retak pada bahan logam, propagasi steady retakan dan periode propagasi retakan terakhir. Dari kurva tersebut didapat tiga parameter utama antara lain :

1. Laju regangan steady state di daerah kedua (I_{ss})
2. Waktu transisi antara daerah kedua dan ketiga (t_{ss})
3. Waktu patah (t_f)

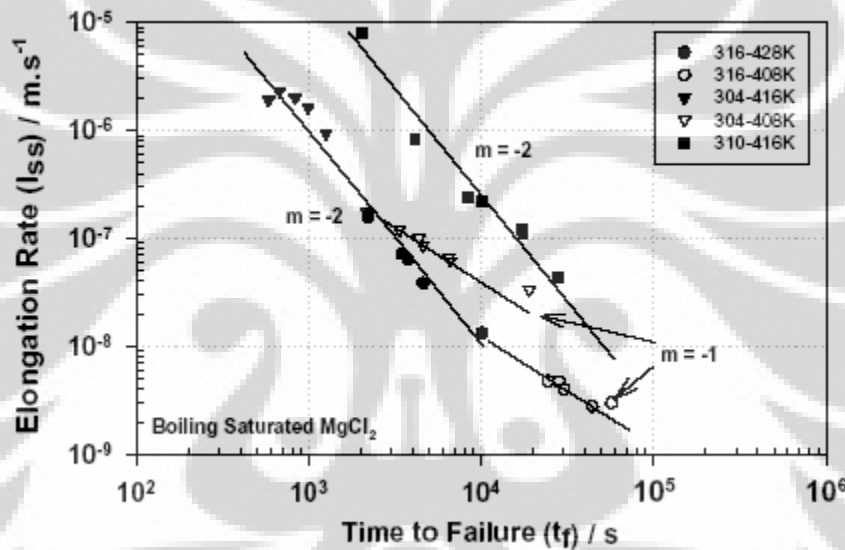
Jika bahan tidak patah atau rusak melalui skala waktu laboratorium ($<10^7$ detik), I_{ss} menjadi nilai orde 10^{-10} m/s atau kurang^[9]. Tegangan konstan diaplikasikan terhadap bahan uji pada temperatur konstan. Suatu kenaikan elongasi diamati terjadi secara berlanjut dan akhirnya patah. Perilaku elongasi tergantung pada besarnya tegangan yang dikenai terhadap bahan uji dan lingkungan sekitar. Kurva korosi elongasi yang diperoleh sama dengan kurva creep pada temperatur tinggi^[10].

Kenaikan nilai elongasi secara kontinyu berhubungan dengan perambatan korosi^[12]. Perambatan keretakan yang menimbulkan korosi retak tegang tergantung pada nilai I_{ss} . Jika nilai I_{ss} menjadi orde 10^{-10} m/s, korosi retak tegang tidak terjadi dalam skala waktu laboratorium (10^7 s). Daerah sekunder disebut periode induksi pada korosi retak tegang dan waktu transisi t_{ss} disebut waktu induksi. Daerah primer merupakan periode inkubasi dimana retakan atau sumuran akan terinisiasi. Setelah periode induksi diakhiri pada titik t_{ss} kemudian daerah tersier dimulai yang diikuti dengan peningkatan draktis kemudian material patah.

Dalam daerah tersier, selama perambatan retakan, kontribusi dari elongasi disebabkan penurunan luas penampang melintang benda uji pada daerah gauge length. Saat daerah tersier telah masuk, peran korosi retak tegang dimulai dan terjadi dalam skala waktu laboratorium ($<10^7$ detik). Daerah tersier disebut juga periode perambatan dalam korosi retak tegang. Jika tidak terjadi perpatahan di eksperimen tertentu, kurva korosi elongasi hanya menunjukkan samapi daerah sekunder sedangkan daerah tersier tak terbentuk sehingga hanya mendapatkan data i_{ss} . Dalam hal ini, tidak mungkin untuk mendapatkan nilai t_f dan t_{ss} bilamana terjadi perpatahan

(umumnya dalam periode waktu 300 jam) karena tidak ada criteria yang dapat memastikan apakah permatahan material terjadi^[13].

Metode beban konstan dalam pengujian dapat memplot kurva elongasi korosi dengan mendapatkan parameter utama yaitu waktu patah (t_f), laju elongasi steady state (i_{ss}) dan rasio waktu transisi dan patah (t_{ss}/t_f). Parameter tersebut digunakan untuk analisa karakter kegagalan dan laju elongasi steady state dapat digunakan untuk memperkirakan waktu kegagalan (t_f) yang tidak tergantung pada beban luar^[15].

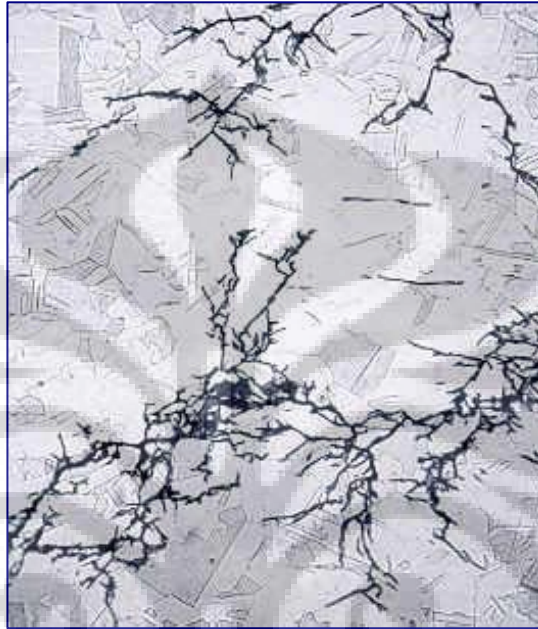


Gambar 2.5. Hubungan antara logaritma i_{ss} dan waktu patah (t_f) pada AISI 310,304 dan 316 di larutan MgCl_2 , dimana merupakan kemiringan garis lurus.

Korosi retak tegang klorida merupakan jenis korosi retak tegang yang diakibatkan adanya lingkungan klorida, komposisi material dan struktur. Serangan local dalam larutan klorida dapat disebabkan heterogenitas struktur seperti adanya pitting yang terinisiasi inklusi MnS dan intergranular corrosion unsur kromium di batas butir.

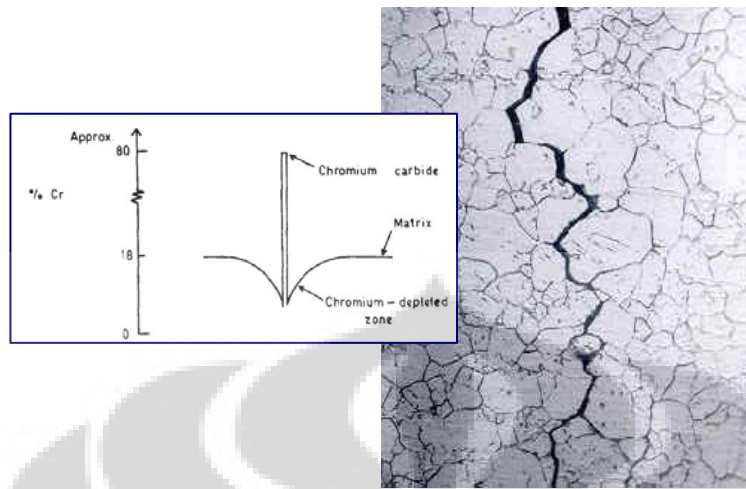
Umumnya Retakan akibat korosi retak tegang akibat klorida merupakan jejak transgranular dengan retakan mengikuti bidang slip pada kisi austenit terlihat pada Gambar 2.6. Bidang slip saling berinterseksi dengan permukaan pada ujung retakan.

Ini akan menyebabkan lapisan film pasif rusak dan permukaan logam terespos di lingkungan korosif. Adanya kompetisi antara dua fenomena yaitu tendensi material untuk membentuk lapisan pasif protektif dan pencegahan pembentukan lapisan film melalui pembentukan slip step hingga pecah^[16].



Gambar 2.6. Retakan Transgranular pada baja stainless austenitik^[16]

Jika ada nukleus retakan terinisiasi terbentuk di daerah batas butir, pecahnya lapisan film oleh slip step diharapkan dapat mengarahkan kembali jejak retakan sepanjang butiran. Bagaimanapun, Sedriks et al.^[17] memberikan catatan bahwa retakan batas butir (intergranular crack) diharapkan daerah batas butir lambat dalam pembentukan lapisan pasivasi daripada daerah butir. Tumbuhnya retakan terinisiasi pada daerah batas butir. Kerusakan lapisan film makin rendah jika menjauh dari batas butir. Korosi retak tegang klorida dapat menyerang baja stainless austenitic yang tersensitasi. Proses sensitasi terjadi akibat atom-atom kromium pindah ke batas butir dan bersenyawa dengan unsur karbon pada temperatur 950-1450⁰F terlihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Retakan intergranular pada baja stainless austenitik^[17]

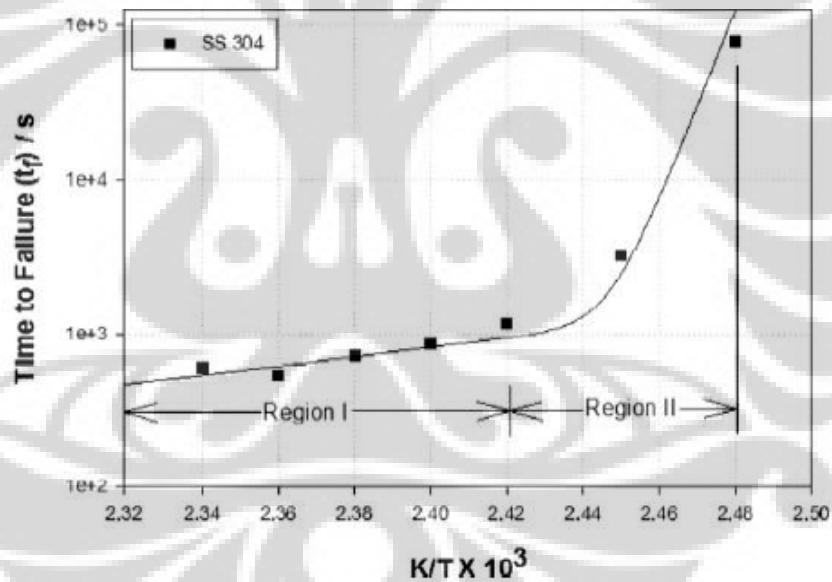
Faktor penting dalam lingkungan yang berperan terjadinya korosi retak tegang adalah temperatur, konsentrasi larutan

A. Faktor Temperatur

Korosi retak tegang semakin mudah terjadi jika temperatur larutan kerja meningkat. Pengaruh ini dapat menyebabkan inisiasi vibrasi antar atom-atom semakin tinggi sehingga dapat memutuskan suatu ikatan antar atom. Pada kondisi temperatur tinggi, laju korosi logam semakin tinggi dibandingkan pada kondisi temperatur rendah dan fenomena ini menghasilkan kelarutan logam pada ujung retak di permukaan logam dibandingkan memasukkan gas hydrogen ke struktur logam. Hydrogen merupakan hasil produk reaksi elektrokimia pada permukaan logam. Reaksi reduksi dengan menghasilkan gas hydrogen. Baja stainless austenitik mengalami perubahan fasa menjadi γ (austenit) berstruktur fcc menjadi α' (martensit) berstruktur BCT dikarenakan tegangan luar^[14]. Baja stainless AISI 304 merupakan material metastabil dimana regangan akibat struktur martensite sepanjang batas butir akan meningkatkan penetrasi hydrogen^[15]. Struktur martensit memiliki koefisien difusi sangat tinggi dan kandungan hydrogen sangat kecil dibandingkan struktur austenit. Ini akan menjelaskan retakan antar butir sebagai jejak retakan yang melewati struktur

martensit. Retakan ini disebabkan laju difusi besar hydrogen. Temperatur rendah mengakibatkan reaksi laju korosi tidak signifikan dan ini akan menghambat mekanisme rusaknya lapisan film dimana *hydrogen embrittlement* berperan mengontrol mekanisme retakan. Kandungan martensit diproduksi oleh tegangan atau regangan yang akan meningkatkan kerentanan material terhadap hidrogen embrittlement.

Korosi regang klorida menjadi lebih rentan dengan kenaikan temperatur kerja. Berdasarkan pengalaman empiris bahwa keretakan akibat klorida dapat terjadi di atas temperatur 60°C (140°F) dengan material terekspos dengan waktu yang lama. Hubungan antara keretakan material akibat lingkungan klorida dan temperatur kerja terlihat pada Gambar 2.8^[17].



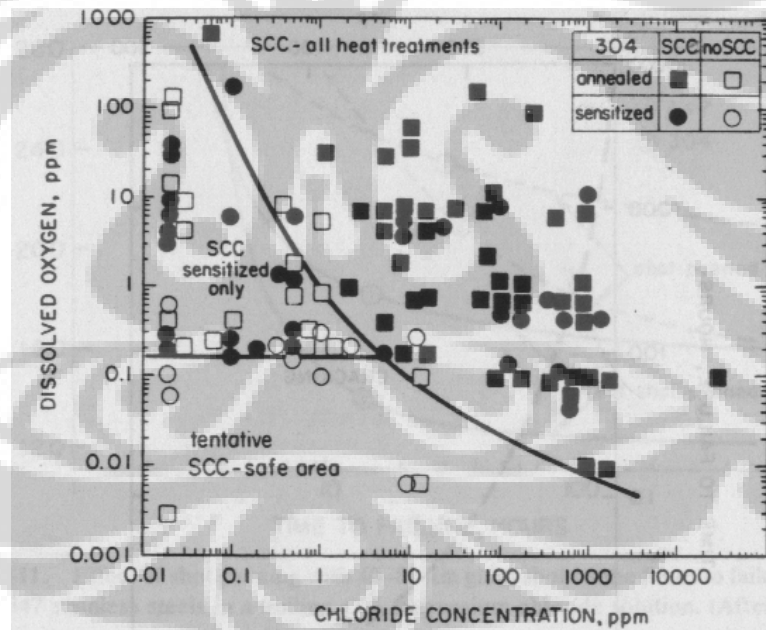
Gambar 2.8. Hubungan nilai logaritma waktu patah (t_f) vs ($1/T$) pada AISI 304 Di larutan jenuh mendidih $MgCl_2$ pada beban 300 MPa.

Daerah di atas garis kurva, material sangat rentan terjadi korosi retak tegang sedangkan di bawah garis kurva merupakan daerah tidak rentan terhadap korosi retak tegang. AISI 304 merupakan struktur austenit metastabil dan sangat rentan pembentukan martensit. Material dibagi menjadi dua karakter dengan variasi temperatur. Karakter *hydrogen embrittlement* terjadi dibawah temperatur kritis dan

korosi retak tegang terjadi di atas temperatur kritis, dimana temperatur kritis merupakan temperatur antara daerah I dan daerah 2. Hasil uji AISI 304 menggunakan beban konstan sangat rentan terhadap *hydrogen embrittlement* dan korosi retak tegang.

B. Faktor Konsentrasi

Hubungan antara konsentrasi klorida dan kerentanan terhadap retak tidak mudah karena harus dihubungkan konsentrasi oksigen di temperatur tinggi. Kadar oksigen pada larutan sodium klorida tinggi seiring dengan menurunnya kadar klorida memberikan kerentanan terhadap korosi retak tegang rendah terlihat pada Gambar 2.9. Dalam menjaga kadar klorida rendah tidak dapat memastikan bebas dari retak pada kondisi dimana klorida terkonsentrasi di daerah celah.



Gambar 2.9. Hubungan oksigen terlarut dan konsentrasi klorida

Kehadiran oksigen terlarut atau oksidiser dapat mempengaruhi retakan baja stainless austenitic di larutan klorida dan jika oksigen dihilangkan, retakan tidak terjadi [1].

2.6. Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM merupakan salah satu alat analisa struktur mikro dengan daya resolusi tinggi dan perbesaran tinggi. Daya resolusinya sekitar 100 amstrong dengan perbesaran 10.000 sampai 150.000 kali. Korelasi antara tegangan dan panjang gelombang serta resolusi (daya pisah) dan panjang gelombang merupakan prinsip dasar dalam pengoperasian SEM. Analisa dengan menggunakan SEM akan menghasilkan gambaran permukaan dan evaluasi struktur permukaan sampel. Pada analisa ini akan dihasilkan kualitas yang baik dari foto digital hitam putih pada beberapa perbesaran. Bahan yang dianalisa diradiasi dengan berkas elektron yang sangat fokus yang mampu melakukan penyapuan (scan) ke seluruh permukaan bahan uji.

Peralatan ini menggunakan quanta elektron sekunder elektron terhambur balik dan sinar X kakarakteristik yang dihasilkan oleh interaksi antar berkas elektron primer dengan spesimen dalam material. Kuanta yang digunakan ini akan memberikan informasi mengenai keadaan spesimen. Misalnya jenis unsur yang ada distribusi unsur dan bentuk permukaannya.

Berdasarkan sinar X karakteristik dapat dilakukan analisa kualitatif maupun kuantitatif dari unsur yang terkandung dalam material dengan menggunakan EDAX (Energy Dispersive X-Ray) yang dirangkai dengan peralatan SEM. Informasi dan kondisi permukaan spesimen dapat diketahui berdasarkan pengolahan electron sekunder dan electron terhambur balik dengan sistem scanning.

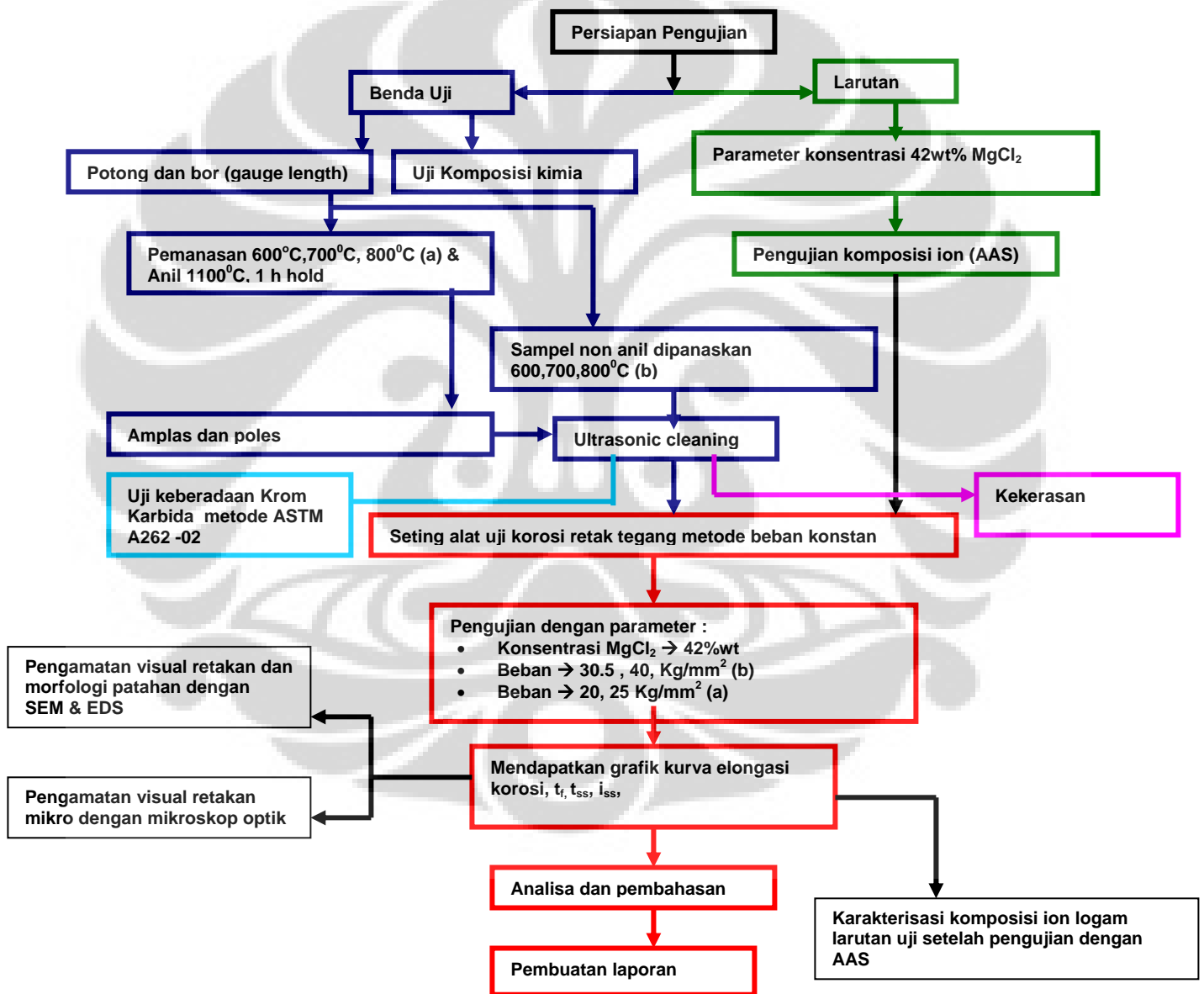
2.7. EDAX (Energy Dispersive X-Ray)

Bila electron dengan energi yang cukup besar menumbuk pada sampel sehingga menyebabkan terjadinya emisi sinar X yang energinya dan intensitasnya bergantung pada komposisi elemental sampel. Dengan menggunakan fenomena ini untuk menganalisa komposisi elemental dari volume mikro (kasarnya satu hingga beberapa ratus kubik micrometer) itulah disebut sebagai analisa mikro. Pada EDAX dimana sinar X diemisikan dikonversi dan disimpan secara elektronik dan bukan dengan difraksi kristal.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Umum

Prosedur penelitian thesis S2 secara umum dilakukan melalui beberapa tahap besar terlihat pada Gambar 3.1 berikut ini :



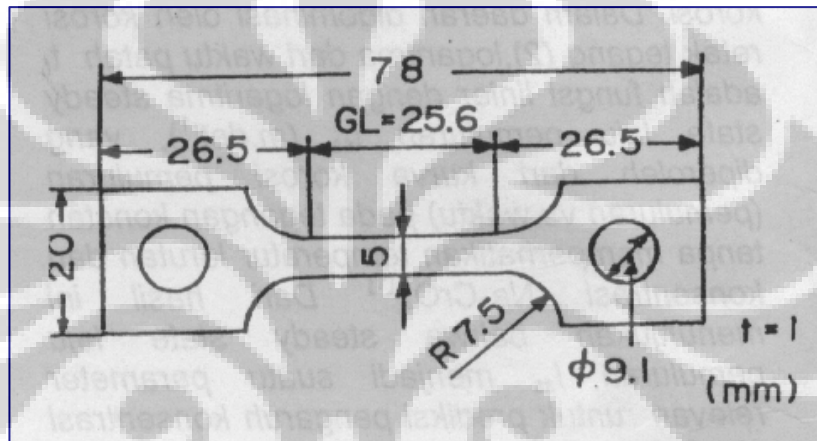
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian yang menjadi acuan kegiatan penelitian

3.2. Persiapan sampel

3.2.1 Preparasi sampel uji

Benda uji yang digunakan dalam penelitian adalah pelat AISI 304 komersial dengan kadar karbon maksimal 0,06%wt, kromium maksimal 18,31%wt dan nikel maksimal 8,75%wt. Ketebalan pelat 1 mm. Prosedur preparasi sebagai berikut :

- Pelat dipotong dengan mesin potong dan mesin bor untuk membentuk sampel uji seperti sampel uji tarik terlihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Bentuk geometri benda uji^[17].

- Benda uji AISI 304 diproses anil pada temperatur 1100⁰C dan ditahan selama 1 jam di dalam dapur alumina berbentuk tabung (tube furnace) di lingkungan gas inert (gas argon) terlihat pada Gambar 3.3. Benda uji didinginkan melalui proses celup cepat (quenching) di dalam bak air sehingga menghasilkan fasa austenit penuh.



Gambar 3.3. tungku tabung alumina

- Benda uji di ampelas dan dipoles dari nomor grit 120, 400, 800, dan no. 1000 kemudian dihilangkan dari kotoran serta lemak dengan larutan acetone melalui air destilat dengan alat *ultrasonic cleaner* selama 5 menit terlihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. alat ultrasonic cleaner

3.2.2. Persiapan Larutan Uji

Persiapan larutan uji dilakukan melalui beberapa tahap pengerjaan antara lain :

- Penimbangan serbuk $MgCl_2$ masing sebanyak 420 gram dengan timbangan digital dengan ketelitian digit empat.
- Pembuatan larutan uji dengan menggunakan elemeyer flask 1 L. Pencampuran dengan komposisi masing-masing 420 gram dengan aqua regia hingga 1 liter.
- Campuran larutan uji diaduk secara manual hingga terlarut sehingga menghasillkan prosentase larutan uji 42 % $MgCl_2$).
- Larutan uji dikarakterisasi awal dengan AAS untuk mendapatkan informasi ion-ion terlarut antara lain Ba, Ca, Mg, Fe, Ni, dan Cr di larutan uji

3.3 Pengujian sampel

3.3.1 Pengujian mekanik

Pengujian mekanik dilakukan melalui dua Uji kekerasan. Sampel uji untuk pengujian mekanik dilakukan dengan kondisi sampel sebagai berikut :

- a) Sampel uji asli
- b) Sampel uji dipanaskan 1200°C , ditahan 1 jam dan dicelup cepat di dalam bak air
- c) Sampel uji poin b, dipanaskan temperatur $600, 700, 800^{\circ}\text{C}$ dan didinginkan di tungku
- d) Sampel uji poin a, dipanaskan temperatur $600, 700, 800^{\circ}\text{C}$ dan didinginkan di tungku

Pengujian kekerasan dilaksanakan dengan metode kekerasan vickers (ASTM E-384) dengan beban 10 kgf dan ditahan 15 detik di permukaan sampel uji. Pengujian kekerasan Vickers dilakukan dengan tiga titik penjejakan berjarak 50 mikron. Nilai tersebut dirata-rata sehingga mendapatkan nilai kekerasan Vickers rata-rata (Hv).

3.3.2. Pengujian keberadaan karbida

Pengujian keberadaan karbida dilakukan dengan standar uji ASTM A262-02a. Langkah pengujian pada Gambar 3.5 tersebut antara lain :

- a) Sampel dipotong secara melintang dengan ukuran $2,5\text{ mm} \times 2,5\text{ mm}$ dengan berbagai kondisi.
- b) Sampel dikeraskan dengan resin agar mudah dilakukan proses ampelas dan poles.
- c) Sampel diampelas dari grit 120 hingga 1200. Sampel dipoles dari 1 mikron hingga 0.05 mikron.

- d) Pembuatan larutan etsa melalui penambahan 100 gram kristal asam oksalat ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan 900 mL air distilasi. Dua bahan dicampur hingga 1000 mL hingga terlarut sempurna.
- e) Sampel – sampel tersebut dietsa pada rapat arus 1 A/cm^2 selama satu setengah menit tercelup.
- f) Setelah proses tersebut, dilakukan observasi dengan mikroskop optik dengan perbesaran 100 x hingga 500 x untuk mengidentifikasi secara kualitatif jejak krom karbida di batas butir.

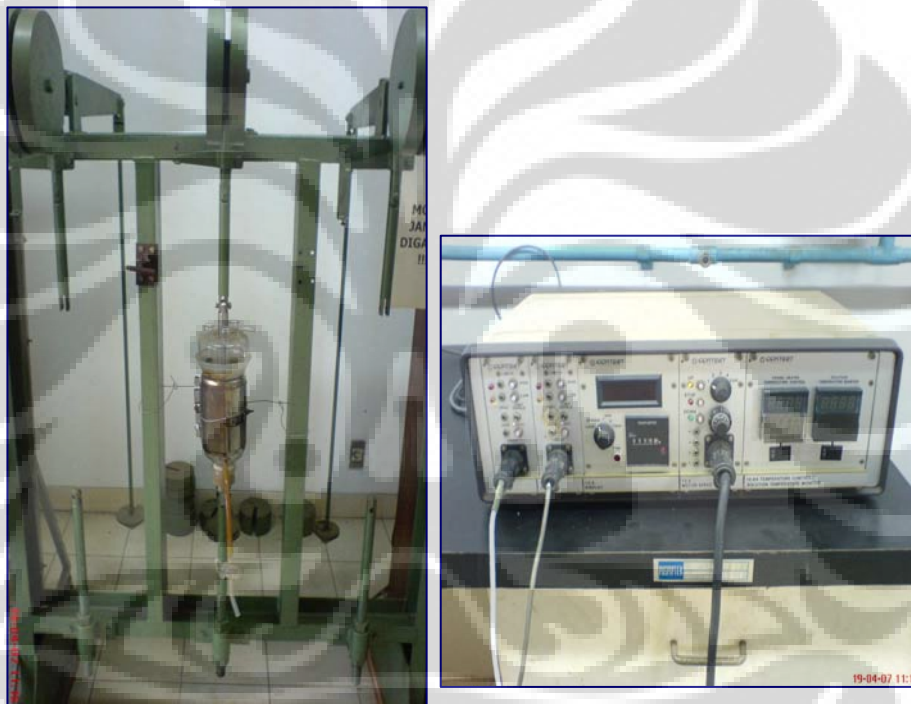


Gambar 3.5 Pengujian keberadaan karbida krom pada baja tahan karat AISI 304

3.3.3 Pengujian Uji Cantilever

Peralatan uji cantilever yang digunakan merupakan alat korosi retak tegang dengan metode beban konstans jenis tuas (perbandingan tuas 1 : 10). Beban maksimum alat uji adalah 2000 Kg. Benda-benda uji dapat disisipkan secara terpisah dan simultan dalam sel seperti Gambar 3.6. Sel yang digunakan terbuat dari gelas pyrex dan pada bagian atas dilengkapi dengan system pendingin untuk menghindari

penguapan larutan. Proses penguapan terjadi saat larutan dipanaskan oleh pemanas di sel uji. Sampel uji yang disisipkan ke dalam sel diisolasi dengan batang dan grip yang terbuat dari logam zirconium. Nilai elongasi sampel uji pada kondisi beban konstan diukur melalui alat *inductive linear transducer* dengan akurasi $\pm 0,01$ mm. Peralatan uji korosi retak tegang dengan metode beban konstan terlihat pada Gambar 3.5. Data yang diperoleh di lapangan antara lain waktu patah dan nilai elongasi hingga patah.



Gambar 3.6. Peralatan uji korosi retak tegang dengan metode beban konstan

Langkah-langkah secara umum pada pengujian beban konstan model cantilever antara lain :

- Persiapan penempatan sel uji terlihat pada Gambar 3.6 terdiri dari pemanas yang mengelilingi sel gelas pyrex untuk memanaskan larutan uji.

- Penempatan thermometer /thermokopel untuk mengukur temperatur yang dihubungkan alat potentiostat untuk menjaga temperatur stabil.
- Pengisian air pendingin untuk inlet dan outlet agar larutan tidak menguap ke luar dan akan terkondensasi ke larutan kembali.
- Penempatan manometer untuk mengukur nilai pemuluran bahan uji dan terhubung dengan transducer agar terbaca nilai secara digital.
- Sampel uji dimasukkan ke dalam sel setelah dipasangkan di holder atas dan bawah dengan sistem pengait baut.
- Larutan uji sodium klorida dengan kadar tertentu dimasukkan ke dalam sel uji
- Set beban konstan 20 Kg/mm², 25 Kg/mm², 30.5 Kg/mm², 40 Kg/mm² dengan bandul
- Ukur waktu pemuluran setiap 3 menit dan nilai pemuluran di transducer
- Setelah material patah, timbang material tersebut kemudian bersihkan dengan air distilasi kemudian ultrasonic (ethanol)
- Larutan bekas pengujian kemudian ditampung di tabung elmyer untuk diuji komposisi ion logam yang lepas ke larutan dengan AAS
- Ulangi langkah awal dengan bervariasi berbagai konsentrasi dan temperatur.

3.3.4 Peralatan Uji pendukung

Peralatan uji lainnya yang digunakan untuk karakterisasi material dan larutan uji yaitu :

- Spark spectrometer, alat ini digunakan untuk menguji komposisi kimia unsur bulk secara kuantitatif material uji.
- Atomic Absorption Spectrometer (AAS), Peralatan ini digunakan untuk menganalisa logam terlarut di larutan uji seperti ion Fe, Cr, Ni, Ba dan Ca

- *Scanning Electron Microscope* (SEM) Peralatan ini digunakan untuk melihat bentuk patahan atau retakan di permukaan benda uji. Secara melintang. Perbesaran per tiap sampel 30, 100, 500 dan 1000 x. Penggunaan peralatan Energy Dispersive Spectrometer (EDS) untuk mendeteksi unsur-unsur di permukaan sampel patahan setiap kondisi. Metode mapping area dilakukan di setiap daerah patahan pada perbesaran 1000 x.
- Mikroskop optik digunakan untuk melihat secara makro retakan-retakan material dan jejak-jejak kromium karbida saat kondisi berbagai suhu sensitasi (600°C , 700°C , 800°C) dengan perbesaran 320x dan 800x
- Peralatan digital pH meter untuk mengukur pH larutan sebelum uji dan sesudah uji

3.4. Pengamatan hasil pengujian

1. Pengamatan hasil uji menggunakan *Scanning Electron Microscope*. Bentuk patahan secara melintang diamati dengan perbesaran 30, 100, 500, 1000 X hingga dapat mengidentifikasi jenis retak transgranular atau intergranular.
2. Pengamatan hasil pengujian secara horisontal untuk melihat rambatan retakan jenis transgranular atau intergranular dengan menggunakan mikroskop optik perbesaran 100 -200 X. etsa yang digunakan Nital.cairan nital merupakan pencampuran cairan asam nitrat (HNO_3) dan etanol
3. Pengambilan data komposisi ion larutan uji dengan AAS setiap beban dan konsentrasi.
4. Data –data pengujian utama yang dapat dianalisa antara lain :
 - Data elongasi (perpanjangan) material (mm)
 - Waktu patah (t_f) saat beban konstan
 - Laju steady-state (I_{ss}) dengan cara ekstrapolasi grafik atau cara menarik dan memperpanjang grafik hasil percobaan kemudian menghitung nilai tangensial.

- Rasio waktu transisi dan waktu patah (t_{ss}/t_f)
- Konsentrasi ion-ion logam terlarut (Ni, Fe, Mg, Cr) saat material patah.
- Data Gambar mikrostruktur benda uji dan tiap permukaan patahan uji.
- Data unsur-unsur kimia di permukaan patahan uji



BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi komposisi material

Karakterisasi material uji dalam penelitian sangat penting untuk mevalidasi data-data selanjutnya. Material baja tahan karat austenitik tipe 304 sesuai standar American Iron and Steel Institute (AISI) mengandung unsur utama 18-20%wt kromium dan 8-10%wt nikel. Pengujian dilakukan untuk mengidentifikasi sampel uji baja tahan karat austenitik tipe 304 dengan pengujian *arc spectrometer*. Hasil pengujian tersebut terlihat pada Tabel 4.1 bahwa unsur utama kromium 18,309%wt dan unsur nikel 7,9165 %wt telah memenuhi standar AISI. Unsur karbon tidak melebihi batas kadar maksimum 0.08%wt

Tabel 4.1 Perbandingan komposisi unsur material AISI 304

	Unsur (%wt)						
	C	Mn	Si	Ni	S	Cr	Fe
AISI Standar	0,08(max)	2,00(max)	1,00(max)	8-10	0.03(max)	18-20	Balanced
Pengujian Arc Spectrometer	0,04	1,14	0.71	7,9	0.008	18,3	Balanced

Pengujian larutan awal telah dilaksanakan dengan menggunakan alat uji *Atomic absorption spectrometry* (AAS). Ini bertujuan untuk mengkarakterisasi unsur-unsur kation di dalam larutan uji. Pengujian AAS dilakukan dengan variasi konsentrasi 30%wt dan 42%wt $MgCl_2$. Pada Tabel 4.2 terlihat kation-kation terlarut di dalam larutan $MgCl_2$ di setiap variasi konsentrasi. Pada umumnya kation Mg mengambil porsi terbesar dibandingkan kation-kation lainnya. Kation Fe, Ni dan Cr akan berubah konsentrasinya saat setelah pengujian Stress corrosion cracking dilakukan.

Tabel 4.2. Hasil pengujian AAS variasi konsentrasi 42%wt MgCl₂.

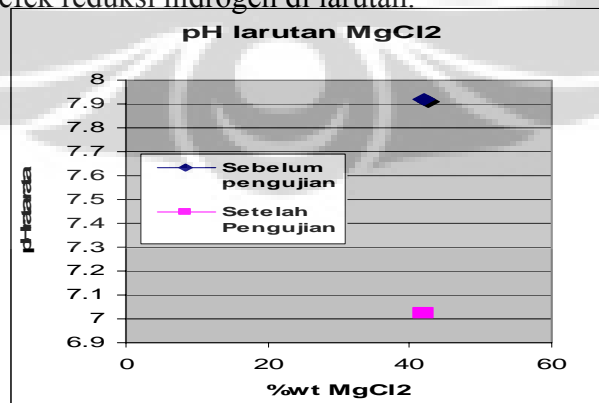
Konsentrasi MgCl ₂ (%wt)	Kation (ppm)					
	Ba	Ca	Ni	Fe	Cr	Mg
42	3.17	13.54	3.197	3.025	0.17	568

Pengujian penentuan pH larutan dilakukan dengan alat uji pH meter. Konsentrasi 42%wt MgCl₂ berkisar 7.92. terlihat pada Tabel 4.3. Rata-rata pH larutan setelah pengujian berkisar 7.025. Nilai pH larutan rata-rata mempunyai kisaran di daerah basa.

Tabel 4.3. Hasil pengujian pH larutan uji

Konsentrasi MgCl ₂ (%wt)	pH larutan MgCl ₂ rata-rata sebelum uji	pH larutan MgCl ₂ rata-rata setelah uji
42	7.92	7.025
Rata-rata		

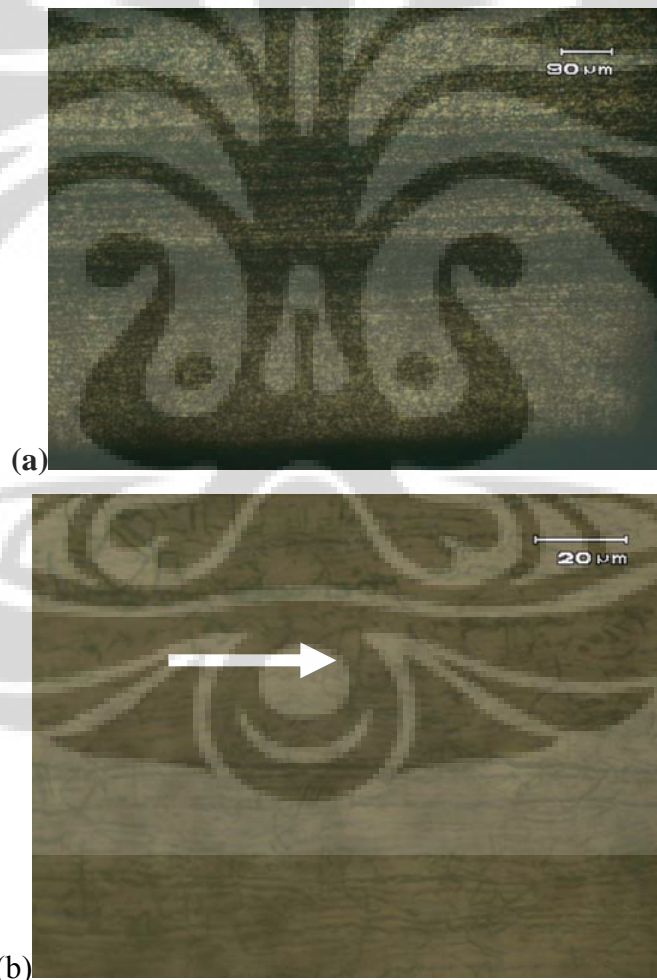
Pada Gambar 4.1 terlihat grafik penurunan pH setelah pengujian *stress corrosion cracking* sehingga dapat memberikan indikasi efek penurunan pH mempengaruhi kondisi material uji. Ini disebabkan sistem ruang tertutup pengujian yang memberikan efek reduksi hidrogen di larutan.



Gambar 4 .1. Penurunan nilai pH larutan 42%wt MgCl₂

4. 2 Hubungan temperatur sensitasi dan sifat mekanik AISI 304

Pembentukan karbida kromium terbentuk pada daerah temperatur 480°C hingga 815°C^[17] pada material baja tahan karat austenitik AISI 304. Proses sensitasi disebabkan adanya pengendapan senyawa krom karbida di batas butir. Material AISI 304 tanpa dilakukan full annealing (solution treatment) suhu 1100°C mempunyai bentuk mikrostruktur butir pipih dan memanjang sesuai arah pengerjaan rol dingin pada Gambar 4.2. Pada Gambar 4.2 (b) terlihat butiran-butiran memanjang dan disisi lain butiran-butiran tidak beraturan karena proses *oriented grain* melalui proses pengerjaan dingin. Pembentukan fasa martensit terjadi saat pengerjaan rol dingin sehingga meningkatkan sifat mekanik bahan^[18].



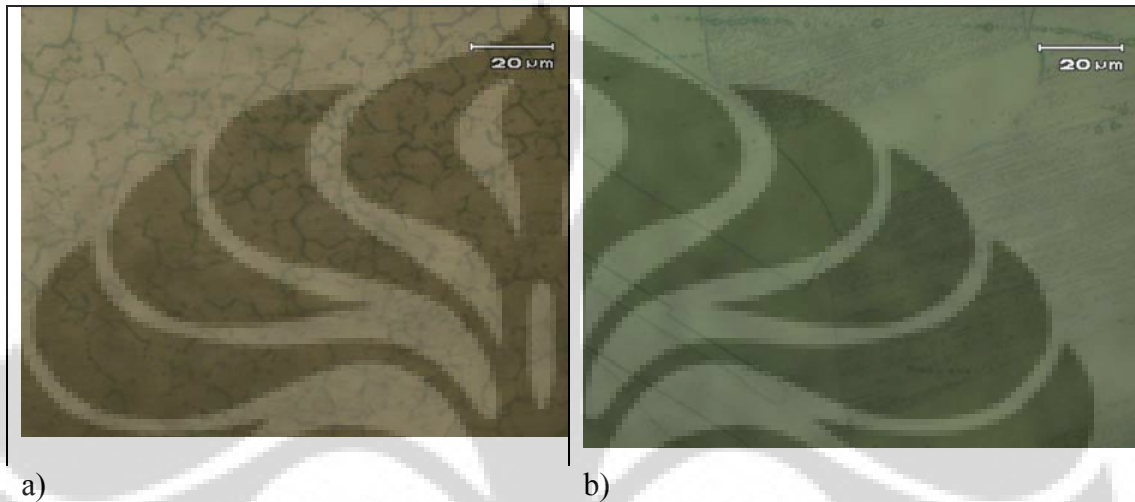
Gambar 4.2. (a)Mikrostruktur AISI 304 tanpa pemanasan anil 1100°C, etsa elektrolit asam oksalat 10%,perbesaran 177x.(b) Mikrostruktur AISI 304 tanpa pemanasan anil 1100°C, etsa elektrolit asam oksalat 10%,perbesaran 177x

Baja tahan karat AISI 304 dilaksanakan perlakuan pemanasan hingga temperatur 1100°C ditahan satu jam kemudian celup cepat di dalam bak air. Perubahan fasa terlihat seluruh sisi mikrostruktunya merupakan fasa austenit. Butiran menjadi besar dengan rata-rata di atas 90 mikron. Fenomena *twinning* terjadi pada beberapa butir. *Twinning* merupakan cikal bakal terbentuknya martensit saat dilakukan pengerjaan dingin terlihat Gambar 4.3.



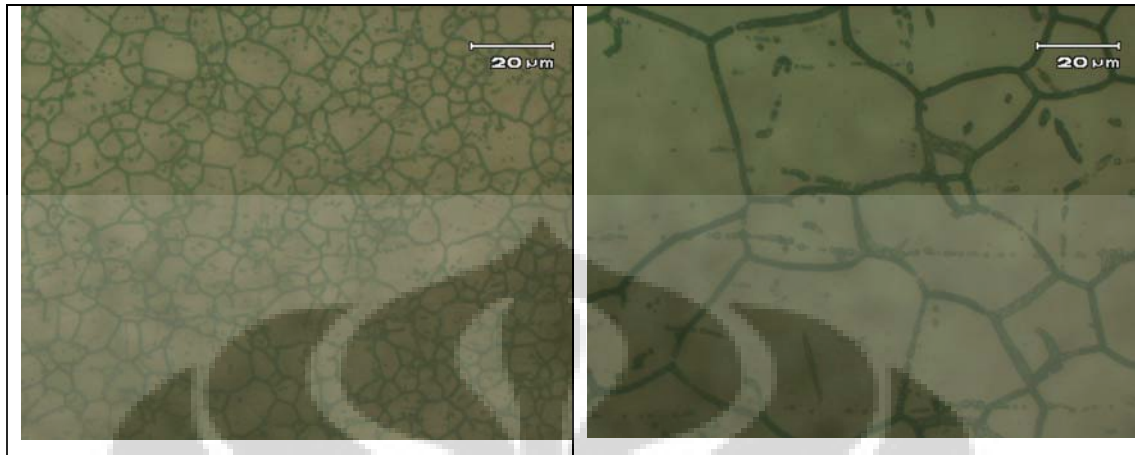
Gambar 4.3. (a) Mikrostruktur AISI 304 pemanasan anil 1100°C, etsa elektrolit asam oksalat 10%, perbesaran 177x. (b) Mikrostruktur AISI 304 pemanasan anil 1100°C, etsa elektrolit asam oksalat 10%, perbesaran 177x

Proses sensitasi dilakukan pada temperatur 600⁰C. Dua perlakuan kondisi dilakukan yaitu tanpa perlakuan solution treatment 1100⁰C kemudian di panaskan kembali hingga 600⁰C dan dengan perlakuan solution treatment kemudian di panaskan kembali hingga 600⁰C



Gambar 4.4. (a) Mikrostruktur AISI 304 tanpa pemanasan anil 1100⁰C, etsa elektrolit asam oksalat 10%, perbesaran 600 x, (b) mikrostruktur AISI 304 pemanasan anil 1100⁰C, etsa elektrolit asam oksalat 10%, perbesaran 600 x

Kondisi tanpa anil 1100⁰C, Pemanasan 600⁰C dan ditahan satu jam kemudian didinginkan ditungku dilakukan dan terlihat pada Gambar 4.4a, Mikrostruktur butiran-butiran terbentuk fasa austenit. Adanya *twinning* masih terlihat. Ukuran butir antara 10-20 mikron. Indikasi keberadaan senyawa krom karbida (Cr₂₃C₆) melalui pengujian ASTM A262 terlihat pada batas butir namun belum terbentuk secara sempurna menghubungkan setiap butir. Kondisi anil 1100⁰C, pemanasan 700⁰C dan ditahan satu jam kemudian didinginkan di tungku dilakukan dan terlihat pada Gambar 4.4b, mikrostruktur butiran-butiran terbentuk fasa austenit. Adanya daerah *twinning* masih terlihat dibutir. Ukuran butir lebih dari 80 mikron. Senyawa krom karbida belum terlihat secara pasti di batas butir. Peningkatan luas butiran –butiran akan memberikan efek dari sifat mekanis bahan lebih rendah dibandingkan ukuran butiran lebih kecil.

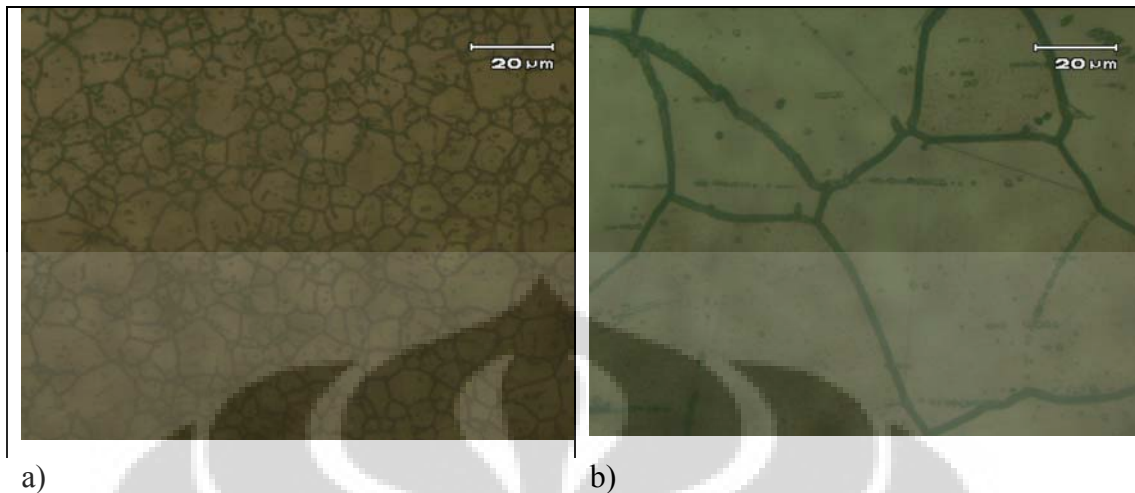


a)

b)

Gambar 4.5. (a) Mikrostruktur AISI 304 tanpa pemanasan anil 1100⁰C, etsa elektrolit asam oksalat 10%, perbesaran 700 x, (b) mikrostruktur AISI 304 pemanasan anil 1100⁰C, etsa elektrolit asam oksalat 10%, perbesaran 700 x

Pemberian temperatur sensitasi 700⁰C memberikan kesempatan karbida krom untuk terbentuk di batas butir dengan mengikat atom-atom krom disekitar butir untuk masuk ke batas butir sehingga saat etsa elektrolit dengan asam oksalat daerah dengan konsentrasi krom lebih kecil dibandingkan butir akan terkorosi terlihat pada Gambar 4.5. Perlakuan material AISI 304 dengan anil 1100⁰C dan dicelup cepat air kemudian di panaskan kembali kembali di daerah sensitasi 800⁰C terbentuk karbida krom dengan butiran yang besar berkisar 80-90 mikron terlihat pada Gambar 4.6. Dibandingkan kondisi material AISI 304 tanpa anil 1100⁰C kemudian dipanaskan hingga temperatur sensitasi 800⁰C, ukuran butir kecil 5-10 mikron terlihat pada Gambar 4.6. Efek mekanis bahan juga berperan di material tersebut selain efek lingkungan larutan uji.



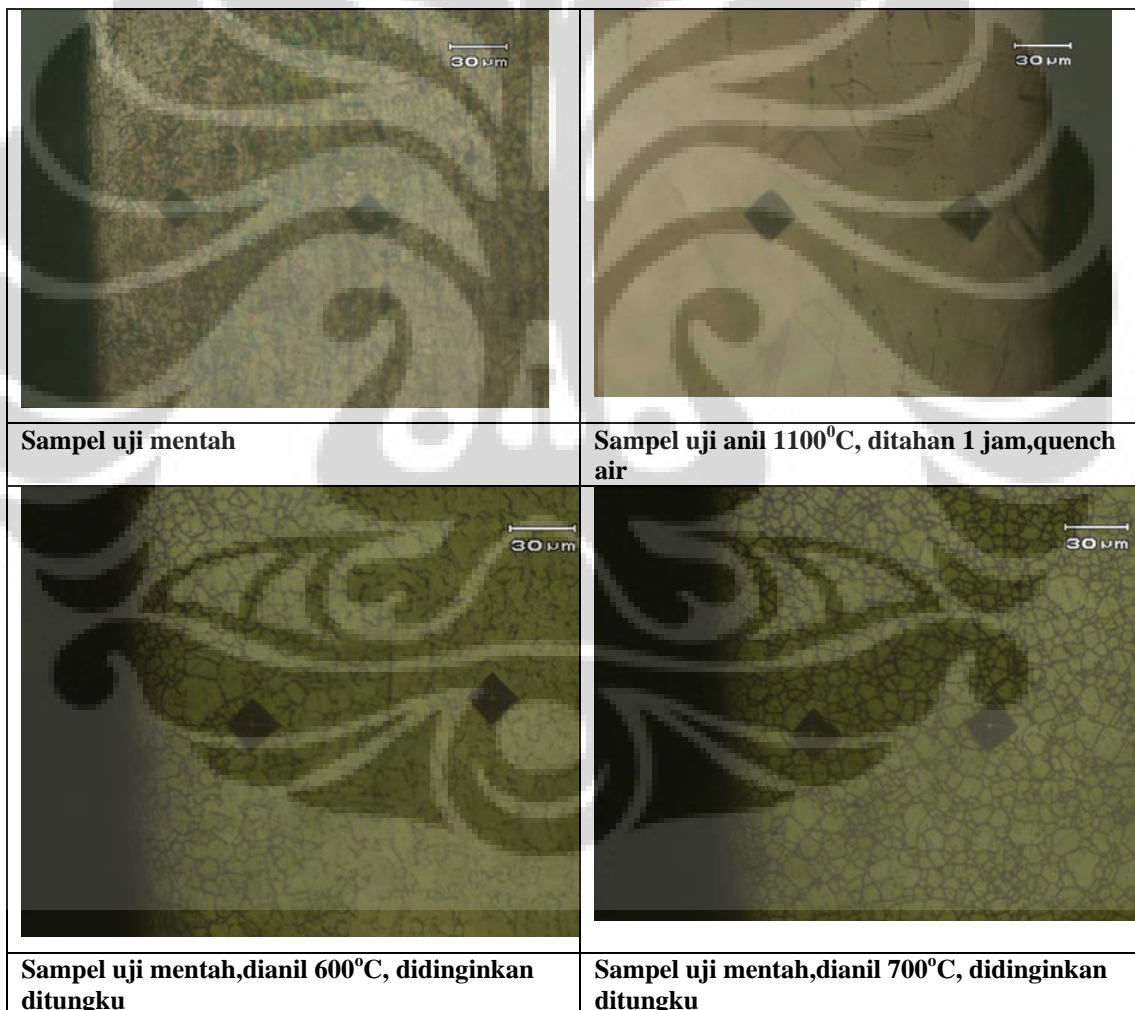
Gambar 4.6. (a)Mikrostruktur AISI 304 tanpa pemanasan anil 1100⁰C, etsa elektrolit asam oksalat 10%,perbesaran 800 x, (b) mikrostruktur AISI 304 pemanasan anil 1100⁰C, etsa elektrolit asam oksalat 10%,perbesaran 800 x

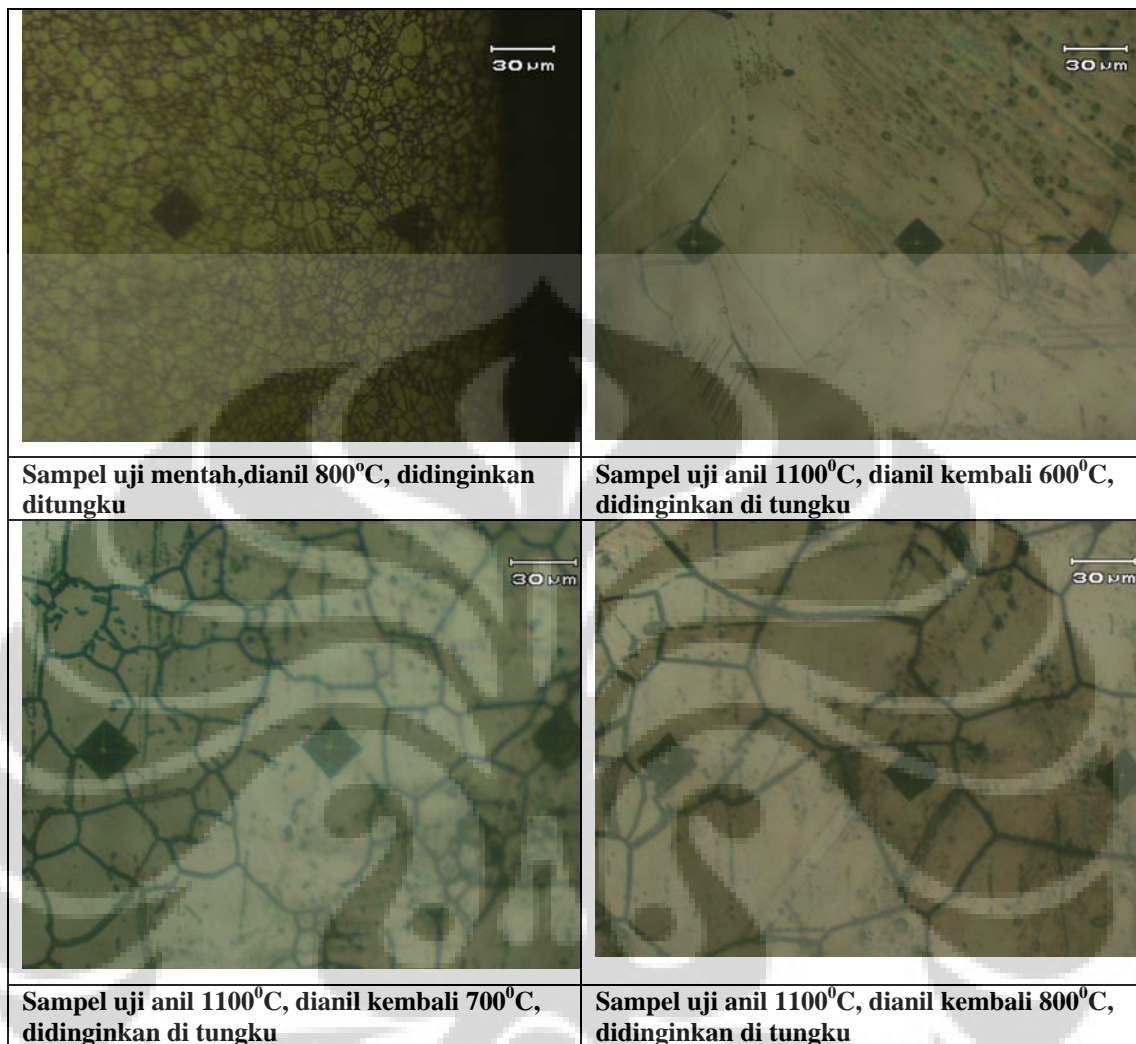
Hubungan sifat mekanis material AISI 304 diwakili dengan sifat kekerasan bahan berbagai kondisi perlakuan bahan dan variasi temperatur sensitasi 600⁰C,700⁰C dan 800⁰C. Pada Tabel 4.4 memperlihatkan berbagai kondisi perlakuan logam. Nilai kekerasan material uji awal tinggi karena merupakan hasil pengerjaan dingin, butir-butir memanjang dan membentuk struktur martensit terlihat pada Gambar 4.7. Sampel dianil 1100⁰C ditahan 1 jam dan dicelup cepat (solution treatment) untuk mengembalikan kebentuk fasa austenit, nilai kekerasan turun 158.3 HV .

Tabel 4.4. Nilai kekerasan vickers material

No	Kondisi	Hv (average hardness Vickers)
1	Sampel Uji hasil pengerjaan dingin *	232.26
2	Sampel uji anil 1100 ⁰ C, quench **	158.3
3	Kondisi *, dipanaskan 600 ⁰ C,dinginkan tungku	209.3
4	Kondisi *, dipanaskan 700 ⁰ C, dinginkan tungku	199.1
5	Kondisi *, dipanaskan 800 ⁰ C, dinginkan tungku	205.33
6	Kondisi **, dipanaskan 600 ⁰ C, dinginkan tungku	219.33
7	Kondisi **, dipanaskan 700 ⁰ C, dinginkan tungku	152.06
8	Kondisi **, dipanaskan 800 ⁰ C, dinginkan tungku	162.72

Kondisi tidak dianil 1100⁰C kemudian disensitasi temperatur 600⁰C hingga 800⁰C mengalami penurunan nilai kekerasan. Namun ada anomali pada temperatur 700⁰C mempunyai nilai kekeraran terendah dibandingkan temperatur 600⁰C dan 800⁰C. Kondisi anil 1100⁰C kemudian disensitasi 600⁰C hingga 800⁰C juga memiliki trend yang sama yaitu pada suhu sensitasi 700⁰C nilai kekerasan terendah dibandingkan suhu 600⁰C dan 800⁰C. Kondisi ini akan mempengaruhi hasil pengujian *stress corrosion cracking* akibat penurunan sifat mekanis di suatu temperatur tertentu.



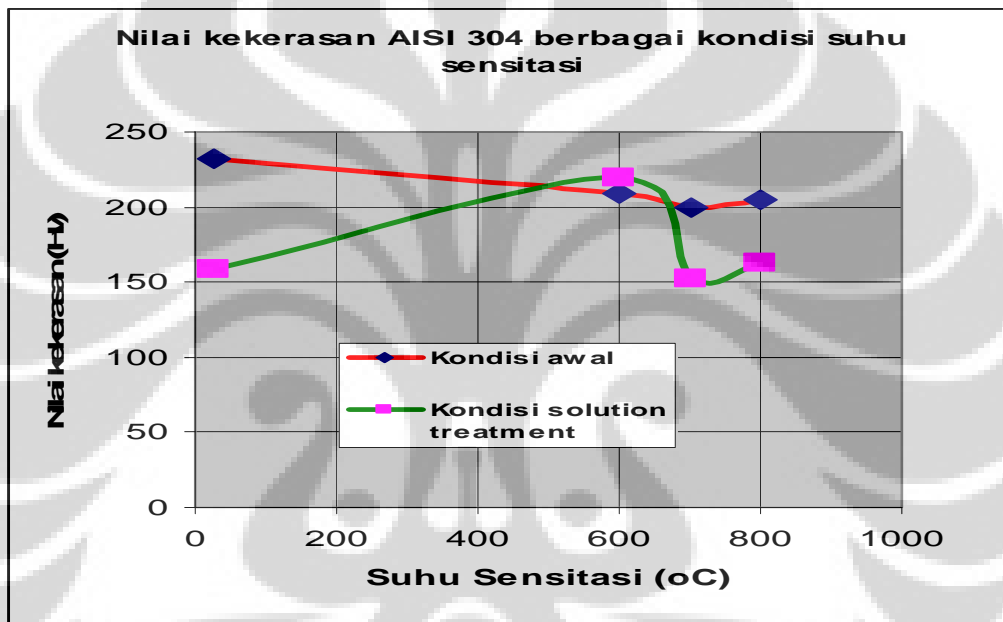


Gambar 4.7. Mikrostruktur AISI 304 berbagai kondisi, etsa asam oksalat, perbesaran 600 x

Pemanasan material AISI 304 hingga temperatur austenisasi 1100⁰C bertujuan untuk membentuk kembali fasa penuh austenisasi dan menghilangkan tegangan sisa akibat deformasi plastis dingin yang terjadi saat proses pengerolan^[21]. Tegangan sisa mempunyai hubungan dengan nilai kekerasan material pada umumnya. Karakterisasi material AISI 304 khususnya nilai kekerasan mengalami suatu perhatian. Pada Gambar 4.8 memperlihatkan adanya trend garis yang menyimpang (anomali). Nilai kekerasan setelah temperatur sensitasi 600⁰C mengalami penurunan dan mulai naik di temperatur 800⁰C. Peristiwa serupa untuk kedua kondisi (anil 1100⁰C dan tanpa anil) sama dengan penurunan di suhu 600⁰C. Pada penelitian sebelumnya yang

dilakukan Ariotka .et .al menyatakan bahwa karbida di batas butir memberikan efek dalam proses deformasi dan difusi di batas butir kemudian kehadiran karbida dapat menghalangi proses sliding batas butir^[22].

Diketahui bahwa AISI 304 mengalami proses sensitasi dengan membentuk karbida krom dan daerah kurang unsur krom didaerah dekat batas butir. Daerah kurang unsur krom dapat sebagai daerah asal retakan saat karbida krom sebagai penghambat pergerakan dislokasi^[24].



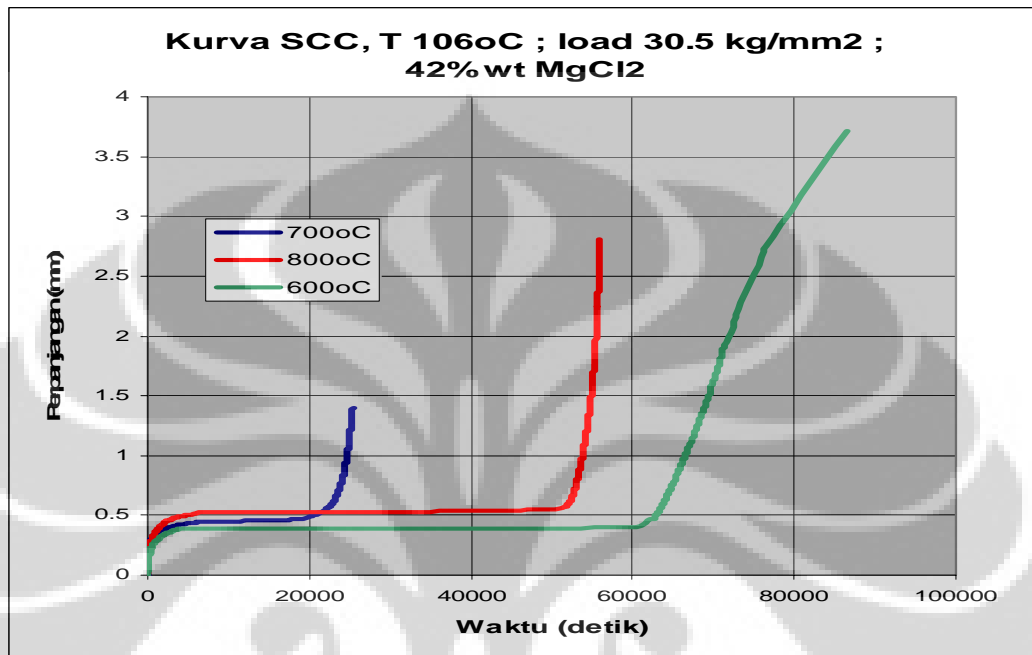
Gambar 4.8 .Nilai kekerasan AISI 304

4.3 Hubungan variasi beban, temperatur dan konsentrasi konstan

4.3.1 Material tanpa Anil 1100⁰C (solution Treatment)

Hubungan variasi beban, temperatur tetap dan konsentrasi tetap sangat ditentukan oleh temperatur sensitasi material AISI 304. Kondisi material juga dipengaruhi oleh perlakuan awal material tersebut. Perlakuan awal dapat dibagi dua yaitu dipanaskan hingga 1100⁰C, ditahan 1 jam kemudian dicelup cepat dan material tidak dipanaskan (cold work). Penelitian terdahulu yang dilakukan Nishimura dengan material AISI 304 konsentrasi 42wt% MgCl₂. Material pada

kondisi tersebut akan mengalami patahan transgranular dan intergranular tergantung dari temperatur operasional larutan.



Gambar 4.9. Kurva SCC Beban 30,5 Kg/mm², suhu 106⁰C

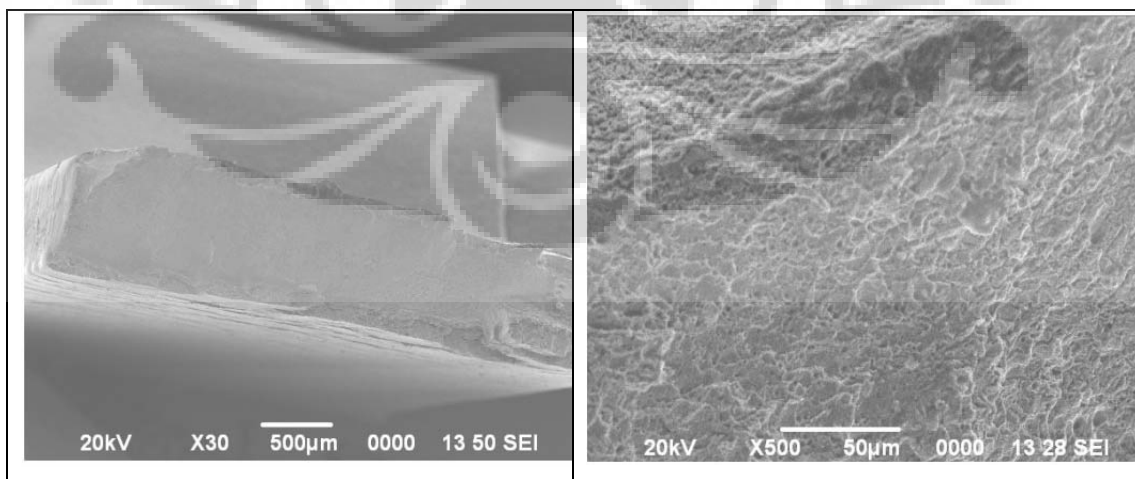
Kurva *Stress Corrosion Cracking* metode beban konstan terlihat pada Gambar 4.9. Beban yang diberikan adalah 30.5 Kg/mm² dengan konsentrasi dan suhu larutan 42%wt MgCl₂ 106⁰C. Waktu patah (t_f) terendah pada temperatur sensitasi 700⁰C berkisar 25450 detik dan waktu patah terlama pada temperatur 600⁰C berkisar 86400 detik. Karakter kekuatan mekanik masih berpengaruh terhadap material pada gambar 4.9. Butiran-butiran belum terselimuti karbida krom sebagai penghambat dislokasi namun butiran-butiran masih mempunyai ruang slip berupa daerah twinning. Pada Temperatur sensitasi 700⁰C pengaruh karbida sebagai penghambat dislokasi mulai ada karena masih ada daerah twinning terdapat di butiran-butiran namun daerah kurang unsur krom (chrom depleted zone) mulai mengalami kelemahan sifat mekanik karena adanya larutan korosif MgCl₂ memberikan efek degradasi dibandingkan daerah tengah butir dengan unsur krom lebih banyak. Pada Tabel 4.5 terlihat di

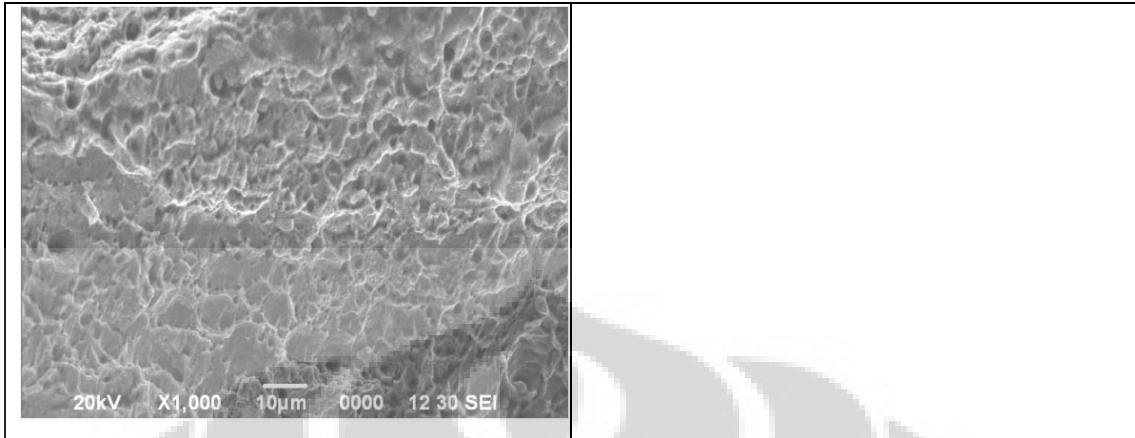
temperatur 700⁰C, laju pemuluran lebih tinggi berkisar 2.10⁻⁶ mm/det dibandingkan suhu 600⁰C dan 800⁰C. Pada temperatur 800⁰C, laju pemuluran semakin kecil berkisar 7.10⁻⁷ mm/det. Menurut Nishimura et.al bahwa jarak untuk sebuah retakan untuk mengalami proses propagasi selama waktu t_{ss} ke t_f menurun dengan semakin meningkatkan tingkat sensitasi. Ini diartikan bahwa t_{ss} menjadi lebih dekat dengan t_f dengan meningkatnya tingkat sensitasi.

Tabel 4.5. Variasi suhu sensitasi dan waktu patah,laju elongasi

No	T sensitasi	iss (mm/s)	tss (s)	tf (s)
1	600	3,00E-08	60428	86400
2	700	2,00E-06	18674	25450
3	800	7,00E-07	51388	55880

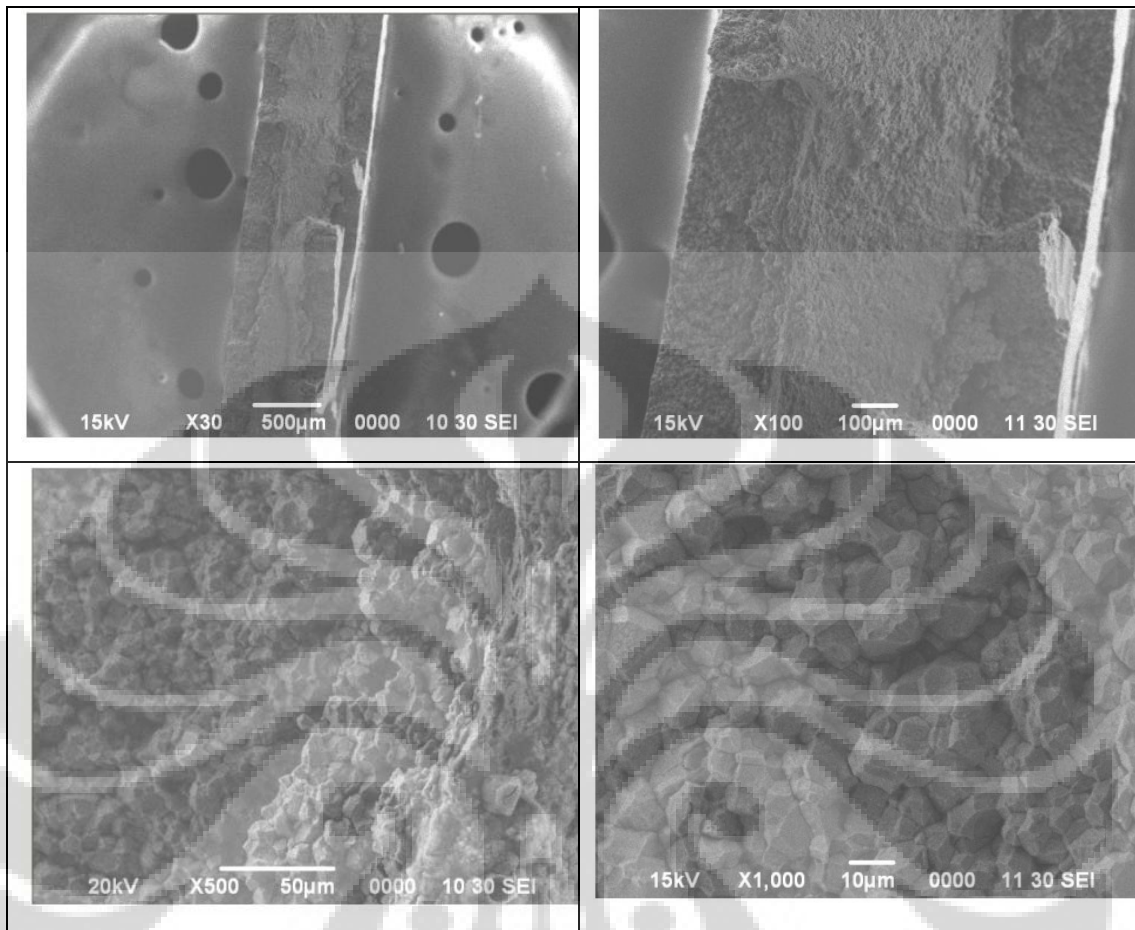
Indikasi tingkat sensitasi meningkat menurut Penelitian sebelumnya yang dilakukan Nishimura telah memberikan bukti penelitian SCC di larutan MgCl₂ bahwa pada temperatur sensitasi 800⁰C mempunyai tingkat sensitasi tinggi dengan selisih tss dan tf adalah 4492 detik dibandingkan temperatur 600⁰C dan 700⁰. Namun waktu patah tercepat adalah suhu sensitasi 700⁰C. Indikator waktu tercepat di suhu sensitasi 700⁰C dengan melihat tingkat sensitasi optimal pada suhu 650-700⁰C, kestabilan fasa α' martensit di suhu 650⁰C, dan kerentanan perapuhan hidrogen akibat fasa martensit.





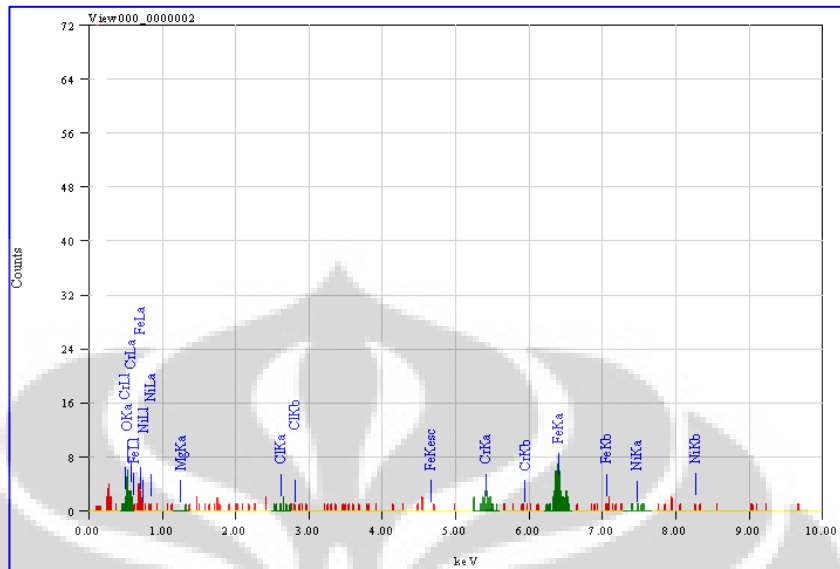
Gambar 4.10, Mikrostruktur AISI 304, Ts 600°C, T 106°C 42 wt%wt MgCl₂

Gambar *Scanning electron microscope* pada bentuk permukaan patahan pada material stainless steel austenitik di dalam larutan panas magnesium klorida telah diselidiki dalam penelitian sebelumnya. *Osama M. Alyousif et.al* menyatakan bahwa bentuk patahan secara agak dominan berbentuk patahan batas butir (Intergranular fracture)^[19]. Ini merupakan ciri dari korosi retak tegang dan banyaknya retakan lewat butir (transgranular) dibandingkan retakan batas butir menurun seiring dengan menurunnya suhu hingga membentuk patahan batas butir secara menyeluruh. Pada Gambar 4.10. Bentuk permukaan patahan menunjukkan bahwa berbentuk transgranular. Permukaan patahan mempunyai lubang-lubang di permukaan material (perbesaran 1000 x). Patahan berjenis ulet dan banyak lubang-lubang (dimples) sepanjang jejak patahan. Patahan ulet terjadi karena ciri proses pengerjaan creep. Pada suhu sensitasi 600°C, jejak karbida krom belum sempurna mengililingi butir sehingga tidak ada halangan terhadap dislokasi terjadi pada material.



Gambar 4.11, Mikrostruktur AISI 304, Ts 700°C, T 106°C 42 wt%wt MgCl₂

Umumnya patahan hasil *creep* material diindikasikan melalui inisiasi retakan pada batas butir atau di antara batas tiga butir. Bentuk-bentuk void bermunculan di daerah batas butir sehingga sifat mekanik material menurun. Permukaan patahan material pada suhu sensitasi 700°C merupakan bentukan patahan intergranular terlihat Gambar 4.11. Dalam daerah creep suhu tinggi, slip batas butir (Grain boundary sliding) memberikan perhatian penting untuk menjelaskan mekanisme patahan intergranular^[24]. Laju slip di daerah batas butir meningkat akan menurunkan sifat ulet material. Pada Gambar 4.11 juga terlihat adanya lubang-lubang diantara dua atau tiga butir. Ini merupakan hasil proses creep terjadi. Kasus intergranular dihubungkan proses teori pecahnya lapisan film oksida dan proses pemulihan lapisan oksida^[25].



Gambar 4.12. Peak-peak unsur di permukaan patahan melalui uji EDS

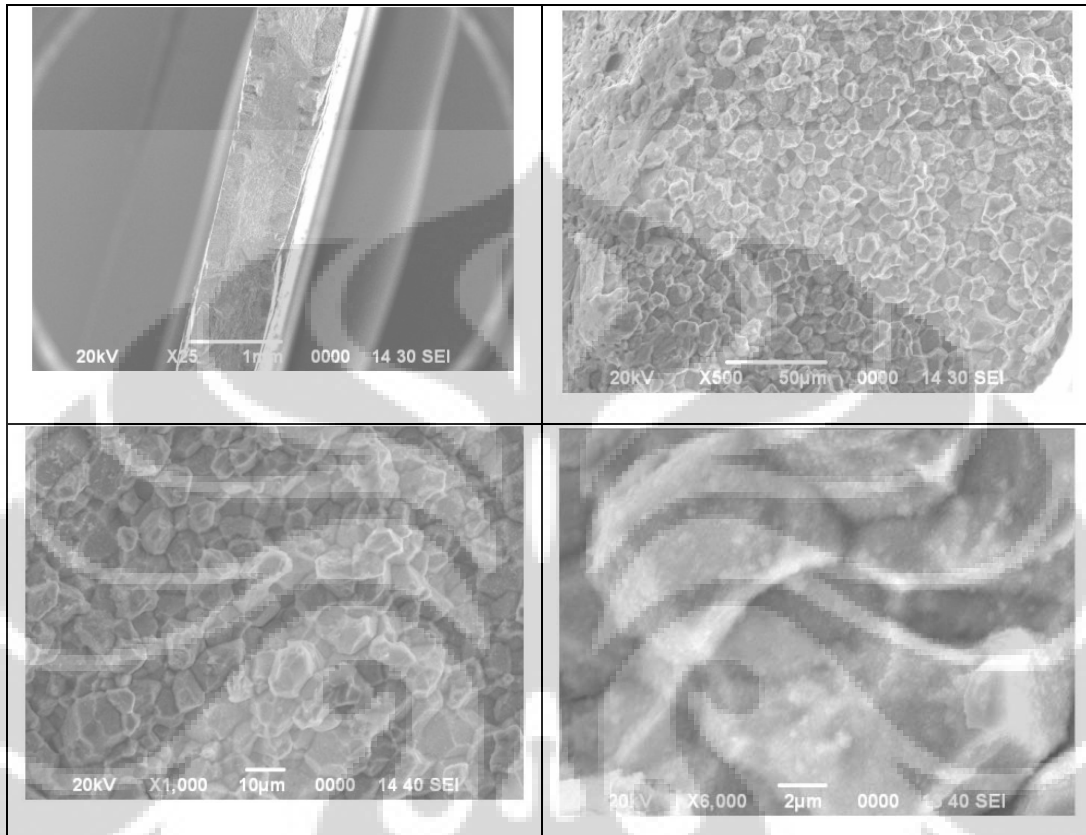
Pembentukan lapisan film oksida pada ujung retakan dapat merupakan hambatan bagi slip batas butir dan dislokasi di saat Karbida krom juga menghambat pergerakan dislokasi di butir-butir. Jika slip batas butir dihambat oleh *interface* antara lapisan film dan batas butir akan membentuk tegangan tambahan (σ_{GBS}). Tegangan luar (σ_{app}) diberikan saat proses uji. Hasil keduanya membentuk akumulasi tegangan $\sigma_{up} = \sigma_{app} + \sigma_{GBS}$.

Tabel 4.6. Unsur di permukaan patahan hasil EDS

No	Unsur	Unsur (%mass)
1	O	15,98
2	Cl	1,08
3	Cr	14,55
4	Fe	61,17
5	Ni	7,13

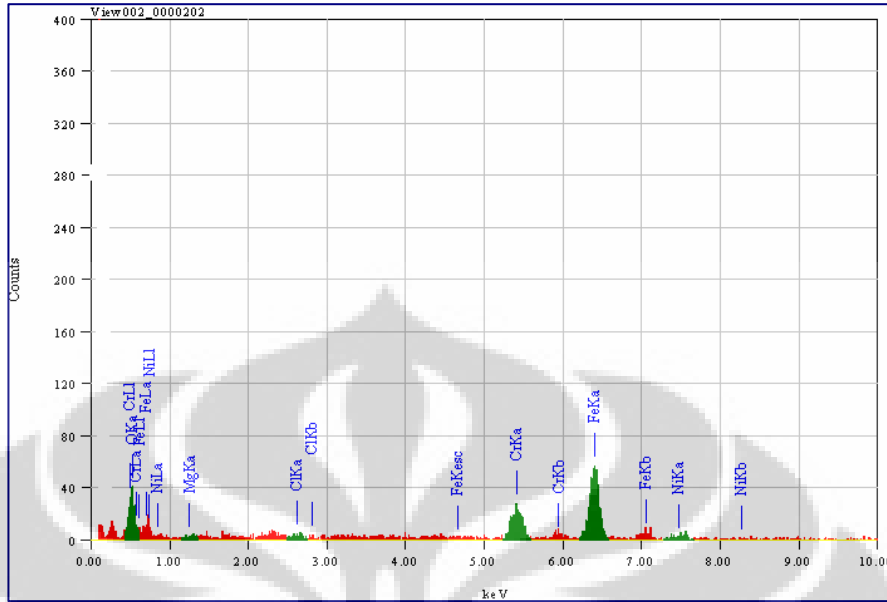
Pada Tabel 4.6 memperlihatkan unsur-unsur utama di permukaan patahan. Unsur Cr, Ni dan O memberikan kontribusi penyebaran di permukaan patahan. Unsur klorida nampak terlihat karena material AISI 304 dicelupkan di lingkungan $MgCl_2$. Pada Gambar 4.12 terlihat kurva intensitas hasil pengujian Energy Dispersive

Spectrometer (EDS) memberikan informasi unsur secara kualitatif keberadaan unsur Fe, Ni, Cr, O dan Cl.



Gambar 4.13, Mikrostruktur AISI 304, Ts 800°C, T 106°C 42 wt%MgCl₂

Gambar 4.13 memperlihatkan bentuk patahan material AISI 304 dengan kondisi tidak diperlakukan "solution treatment" (anil 1100°C) mendominasi dengan bentuk patahan intergranular. Material ini diuji dengan beban statis dengan larutan panas 42wt% MgCl₂ Rata-rata ukuran butir 5 – 10 mikron. Bentuk patahan ini terjadi karena daerah batas butir yang lemah. Selanjutnya proses dekohesi terjadi di permukaan tersebut sebelum proses slip atau *cleavage*. Penyebab terjadinya intergranular dikarenakan jaringan karbida di dalam batas butir^[26].



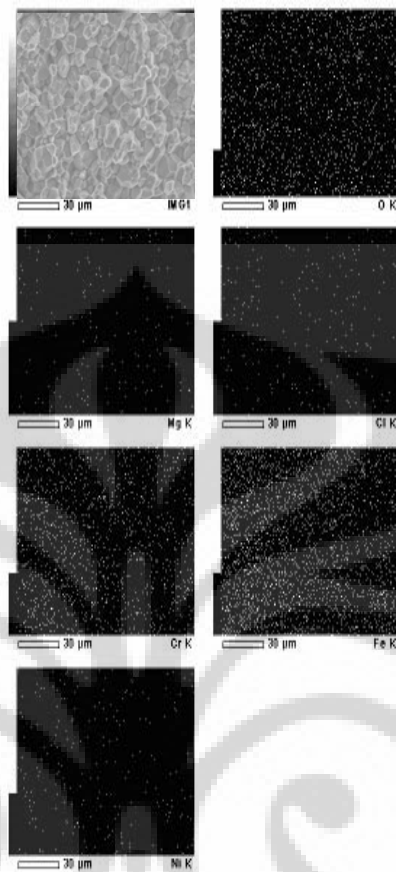
Gambar 4.14. Hasil uji EDS unsur-unsur di permukaan patahan AISI 304 bersuhu sensitasi 800°C

Pada Tabel 4.7 dan Gambar 4.14 terlihat unsur-unsur di permukaan patahan AISI 304 dengan suhu sensitasi 800°C. Unsur-unsur yang terdapat di permukaan adalah Fe, Cr, O, Cl, Ni, dan Mg. Keberadaan ion Cl merupakan indikasi material berada di larutan MgCl₂. Keberadaan Oksigen juga merupakan indikasi keberadaan lapisan film Cr₂O₃ yang rusak akibat retakan patahan.

Tabel 4.7. Unsur –unsur di permukaan patahan AISI 304 bersuhu sensitasi 800°C

No	Unsur	Unsur (%mass)
1	O	18,32
2	Cl	1,13
3	Cr	15,56
4	Fe	62,01
5	Ni	2,88
6	Mg	0,10

Pengujian EDS dengan metode daerah Pemetaan (Mapping Area) memperlihatkan sebaran unsur-unsur di permukaan patahan intergranular terlihat pada Gambar 4.15. Secara kualitatif, sebaran unsur Fe, Cr dan O merata. Unsur minor Cl dan Mg serta Ni juga tersebar namun tidak terdistribusi padat.



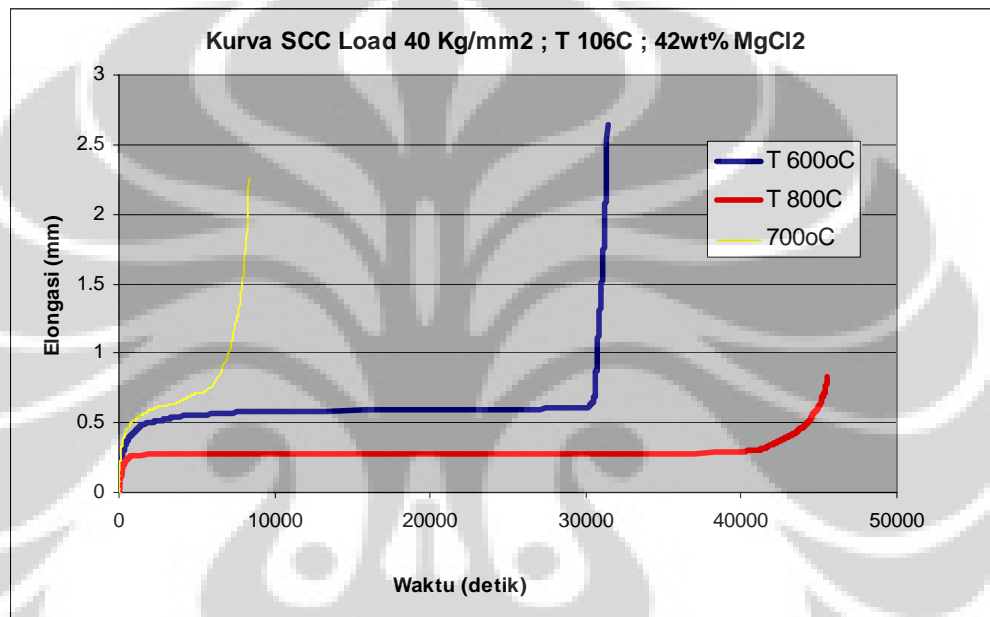
Gambar 4.15. Mapping area patahan AISI 304, suhu sensitasi 800⁰C, 42%wt MgCl₂

Kurva *Stress Corrosion Cracking* metode beban konstan diperlihatkan pada Gambar 4.16 dengan beban 40 Kg/mm², konsentrasi 42%wt MgCl₂, dan suhu 106⁰C. Waktu patah (t_f) terendah pada temperatur sensitasi 700⁰C berkisar 5990 detik dan waktu patah terlama pada temperatur 600⁰C berkisar 30564 detik terlihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8. Variasi suhu sensitasi dan waktu patah, laju elongasi

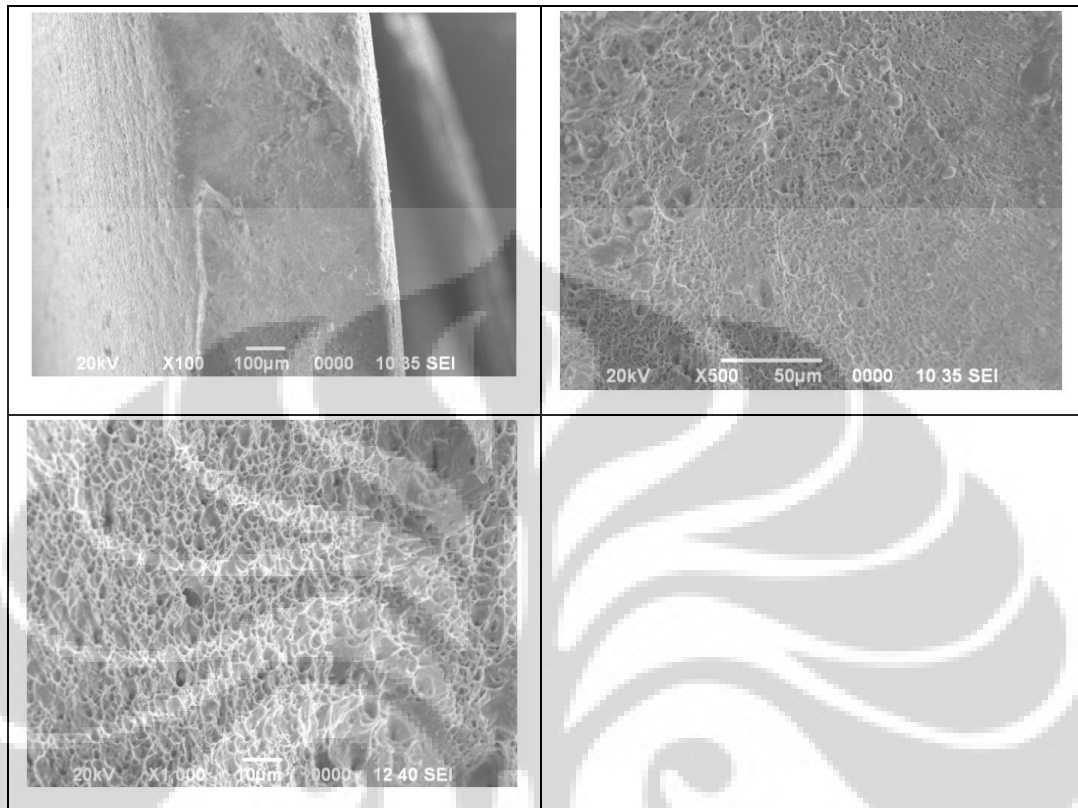
Ts(°C)	t_f (detik)	I_{ss} (mm/detik)	T_{ss}
600	31387	3,00E-07	30564
700	8348	4,00E-05	5990
800	45484	2,00E-07	42198

Karakter kekuatan mekanik masih berpengaruh terhadap material pada Gambar 4.14. Laju pemuluran lebih tinggi berkisar $4 \cdot 10^{-5}$ mm/det dibandingkan suhu 600°C dan 800°C . Pada temperatur 800°C , laju pemuluran semakin kecil berkisar $2 \cdot 10^{-7}$ mm/det. Jarak untuk sebuah retakan untuk mengalami proses propagasi selama waktu t_{ss} ke t_f menurun dengan semakin meningkatkan tingkat sensitasi. Ini diartikan bahwa t_{ss} menjadi lebih dekat dengan t_f dengan meningkatnya tingkat sensitasi.



Gambar 4.16. Kurva SCC, beban 40 kg/mm^2 , berbagai variasi suhu sensitasi, $42\text{wt}\%$ MgCl_2 , suhu larutan 106°C .

Sifat mekanik berperan dalam kontribusi untuk mempercepat waktu patah (t_f) dan laju pemuluran (i_{ss}). Pada kurva SCC terbagi tiga daerah. Daerah pertama merupakan daerah dimana sifat mekanik material berperan, daerah kedua merupakan daerah dimana laju pemuluran mengalami *steady state* kemudian daerah ketiga peran lingkungan korosif berperan. Beban luar (applied stress) dinaikan memberikan efek di dalam kurva SCC tersebut. Pada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Osama Alyousif et.al menyatakan bahwa kerentanan material AISI 304 di larutan 0.82 M HCl terdapat di kisaran 931 K (660°C) dan meningkatnya suhu sensitasi kerentanan SCC berkurang. Pada penelitian AISI 304 di dalam larutan MgCl_2 juga mengalami hal yang sama melalui waktu patah cepat di temperatur kisaran 700°C .



Gambar 4.17. Gambar patahan, beban 40 kg/mm², suhu sensitasi 600⁰C, suhu larutan 106⁰C, 42 wt% MgCl₂

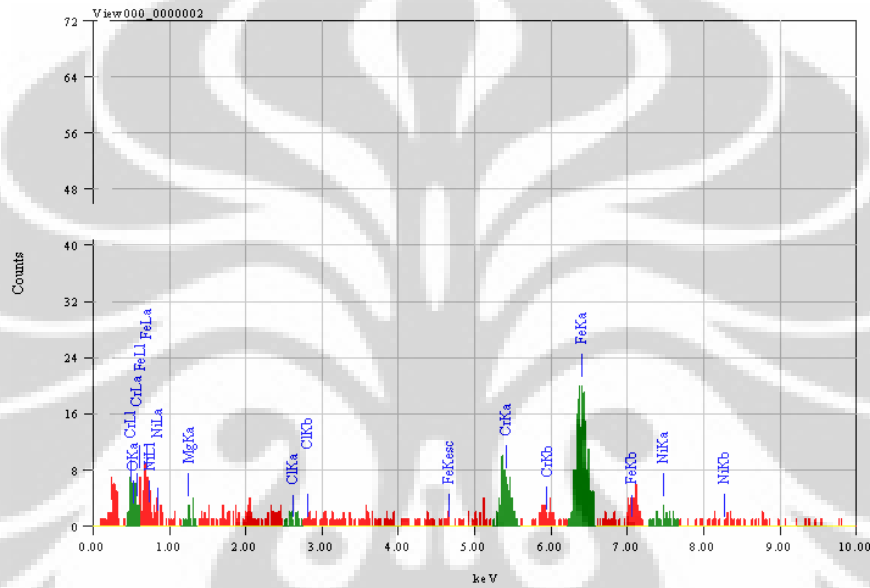
Bentuk patahan merupakan patahan transgranular, arah patahan tersebut menyobek butiran-butiran yang melintas. Adanya semacam lubang-lubang (*dimple*) tersebar di antara sobekan. Lubang-lubang tersebut merupakan kelanjutan dari kumpulan void di batas butir yang berkumpul dan membentuk *dimple* seiring dengan arah tegangan luar (*applied stress*).

Tabel 4.9. Unsur – unsur di permukaan patahn suhu sensitasi 600⁰C

No	Unsur	Unsur (%mass)
1	O	18,32
2	Cl	1,13
3	Cr	15,56
4	Fe	62,01

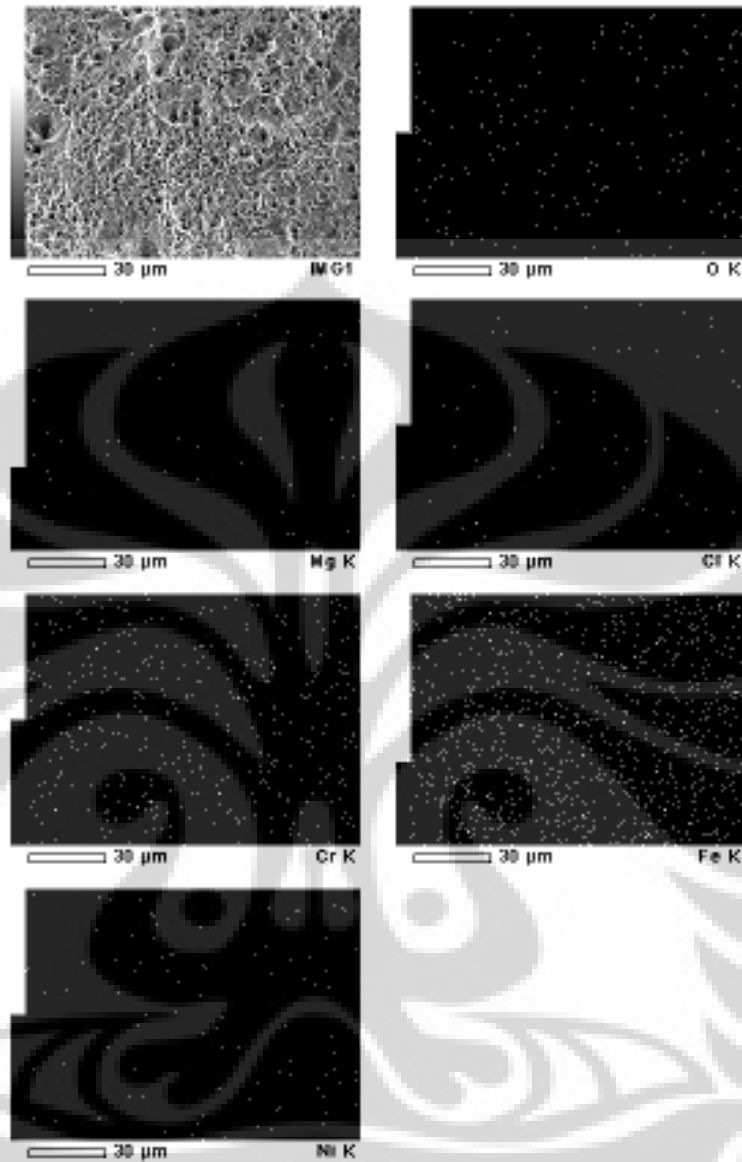
5	Ni	2,88
6	Mg	0,10

Pada Tabel 4.9 terlihat unsur-unsur yang tersebar di permukaan patahan sebagian besar didominasi oleh Oksigen, Krom, Fe, Nikel, Magnesium dan klorida. Unsur Fe, Cr, O, dan Ni mewakili material AISI 304. Unsur Mg dan Cl mewakili larutan korosif $MgCl_2$.



Gambar 4.18 Unsur-unsur yang mewakili permukaan patahan

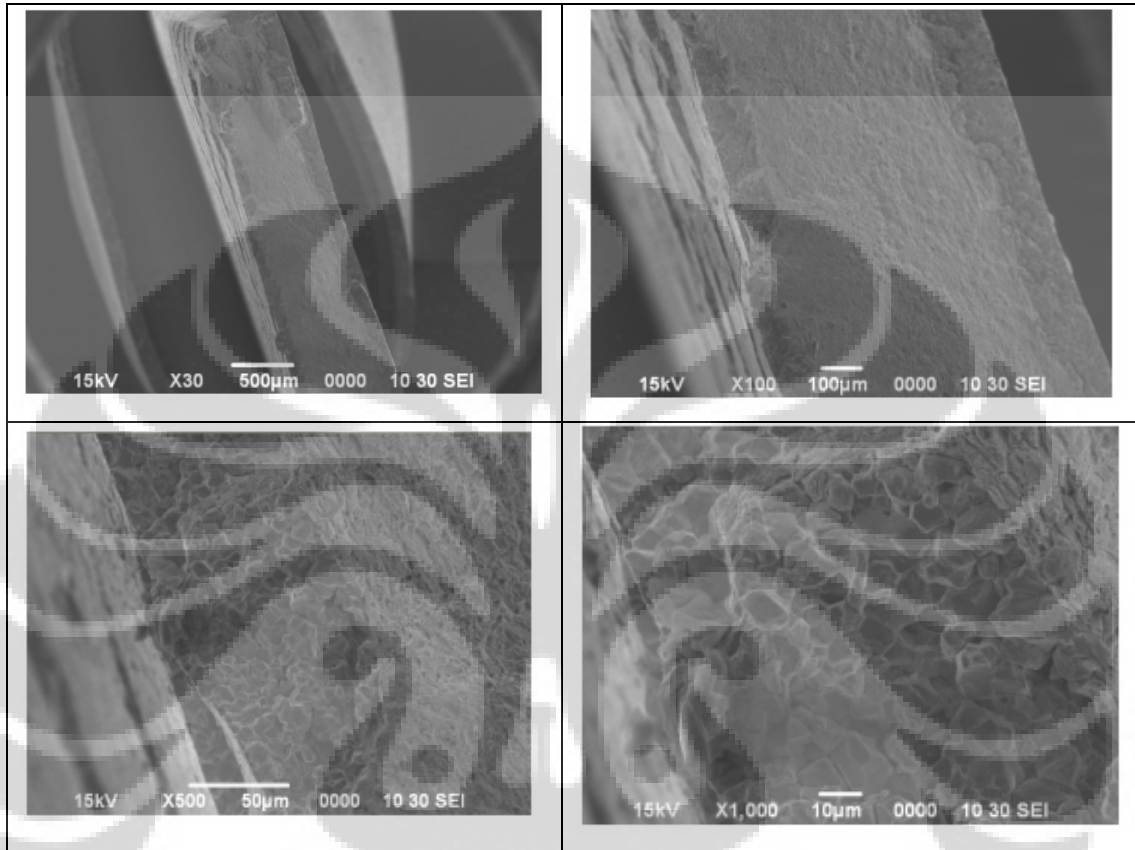
Data-data kualitatif pengujian EDS juga memperlihatkan peak-peak dengan unsur utama Fe, Cr, Ni, O, Mg dan Cl. Metode mapping area dilakukan untuk melihat sebaran patahan transgranular. Pada Gambar 4.19. Sebaran terdistribusi padat pada kation Fe dan Cr. Unsur lain terdistribusi tidak rapat antara lain O, Mg, Ni, dan Cl



Gambar 4.19. Mapping Area patahan AISI 304 bersuhu sensitasi 600⁰C

Patahan permukaan AISI 304 dengan kondisi suhu sensitasi 700⁰C di dalam larutan panas 42 wt% MgCl₂ memiliki topografi dua jenis. Topografi transgranular di tengah patahan dan intergranular di sisi material. Topografi intergranular terjadi di dalam retakan-retakan besar di sisi material. Ini dikarenakan adanya lokasi terlemah di batas butir di karbida krom serta di daerah terdekat batas butir yang kurang unsur

krom, serangan larutan korosif ke dalam daerah tersebut sehingga melarutkan kation dibandingkan ditengah butir yang masih terdapat lapisan krom oksida penuh.



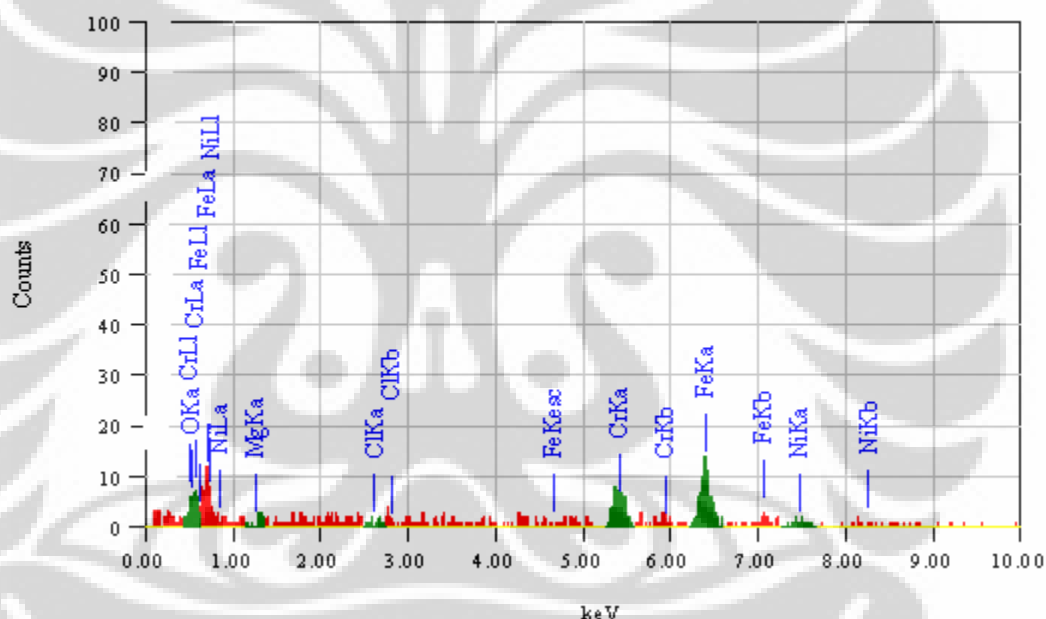
Gambar 4.20. Gambar patahan, beban 40 kg/mm², suhu sensitasi 700⁰C, suhu larutan 106⁰C, 42 wt% MgCl₂

Pada Gambar 4.20 topografi intergranular dengan banyaknya dimple-dimple terjadi di tengah butir. Ini dikarenakan bagian yang terdekat dengan batas butir dimana kurangnya unsur krom (Chrom depleted zone) jauh dari permukaan. Karbida krom di batas butir sebagai penahan dislokasi yang terjadi melalui bidang-bidang slip di butir. Adanya dimple nampak di berbagai sisi merupakan indikasi adanya *void-void* yang menyatu dengan bantuan bidang slip di sekitar *void*.

Tabel 4.10. Unsur –unsur di permukaan patahn suhu sensitasi 700°C

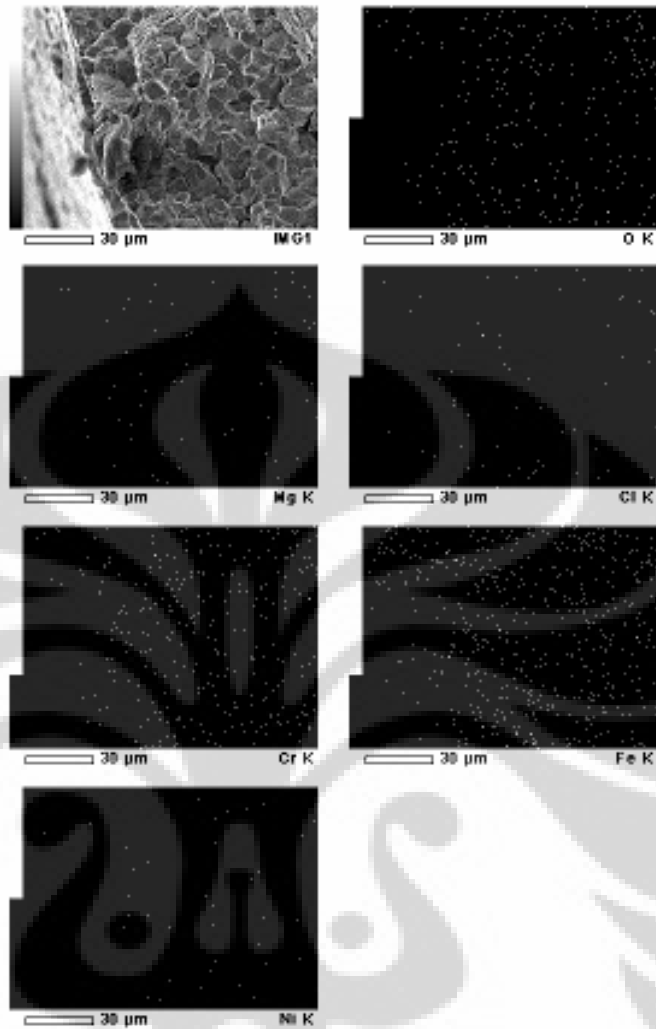
No	Unsur	Unsur (%mass)
1	O	2,81
2	Cr	21,96
3	Fe	69,68
4	Ni	5,55

Pada Tabel 4.10, Unsur-unsur di permukaan patahan umumnya mengandung unsur O,Cr,Fe dan Ni. Unsur Mg dan Cl tidak terdeteksi oleh EDS karena terlalu kecil konsentrasi di permukaan material.



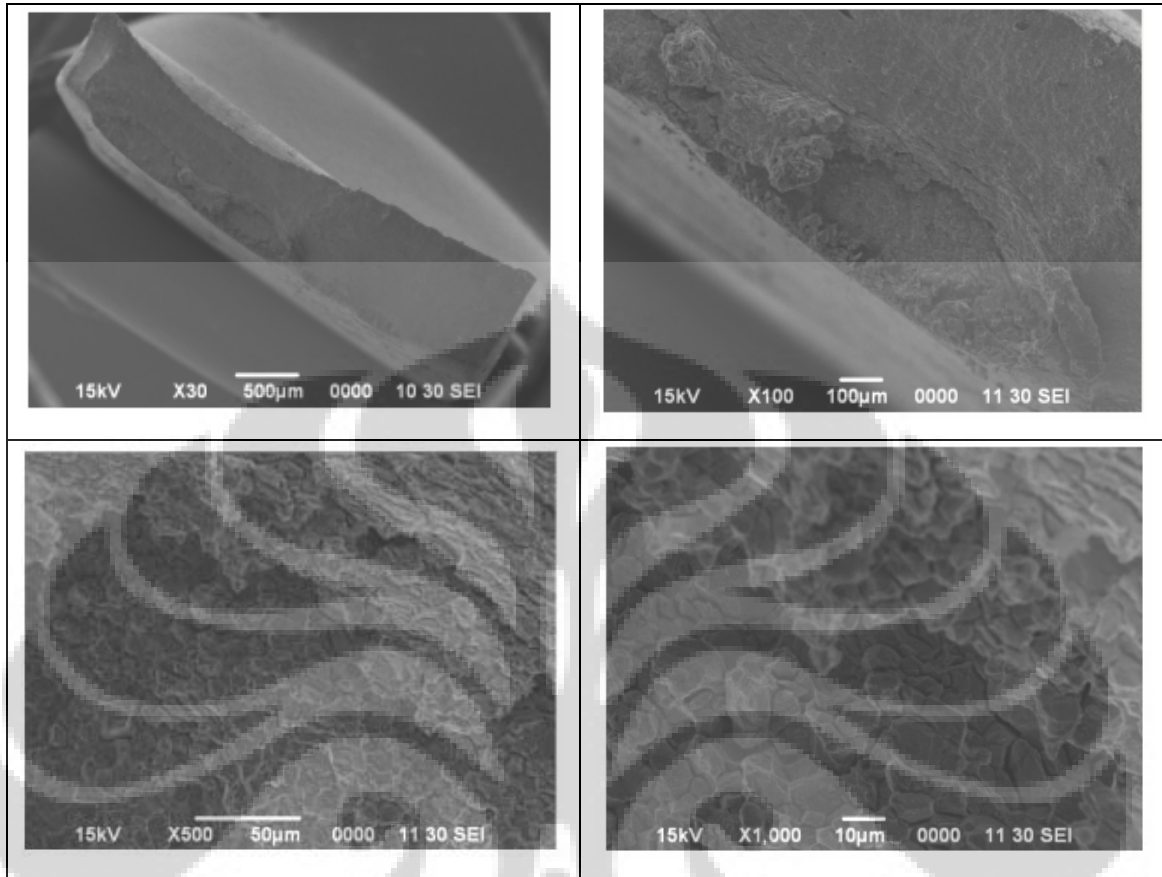
Gambar 4.21. Unsur-unsur di permukaan patahan ,beban 40 kg/mm², suhu sensitasi 700°C, suhu larutan 106°C, 42 wt% MgCl₂

Pada Gambar 4.21 terlihat peak-peak EDS menunjukkan kation Fe,Cr,Ni dan O secara kualitatif terdapat di permukaan patahan sedangkan kation Mg dan Anion Cl sangat kecil konsentrasinya.



Gambar 4.22. Mapping area unsur, beban 40 kg/mm², suhu sensitasi 700⁰C, suhu larutan 106⁰C, 42 wt% MgCl₂

Gambar 4.22 memperlihatkan sebaran unsur-unsur di permukaan patahan intergranular. Unsur-unsur tersebar rapat yaitu Fe, Cr dan O. Unsur Mg, Cl dan Ni tidak terlalu rapat. Unsur Mg dan Cl mewakili keberadaan larutan MgCl₂ di dalam permukaan patahan. Unsur oksigen mewakili keberadaan lapisan oksida krom yang telah rusak akibat retakan dan patahan yang terjadi.



Gambar 4.23. Gambar patahan, beban 40 kg/mm², suhu sensitasi 800⁰C, suhu larutan 106⁰C, 42 wt% MgCl₂

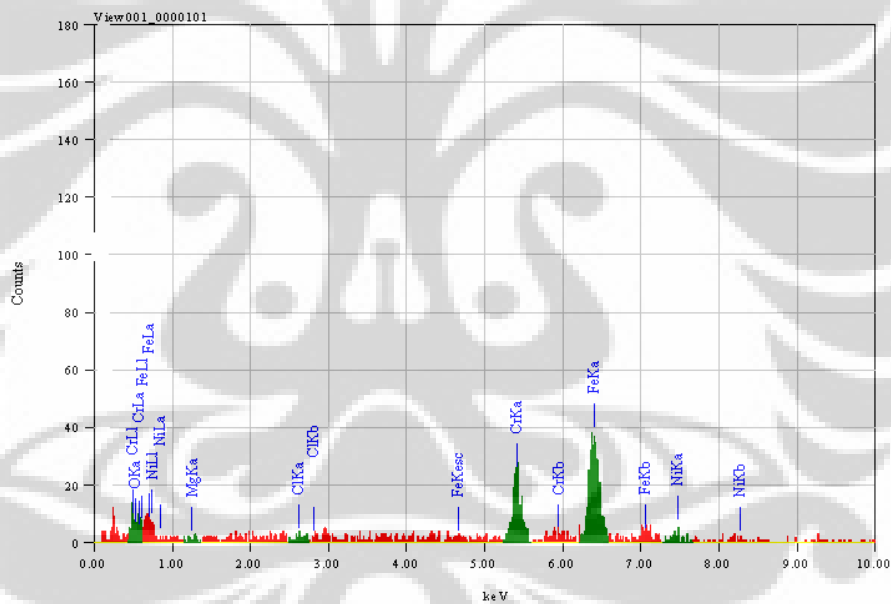
Permukaan patahan AISI 304 dengan kondisi suhu sensitasi 800⁰C dilakukan beban konstan 40 Kg/mm² di dalam larutan panas 106⁰C 42 wt% MgCl₂ mempunyai dua patahan berbeda. Patahan intergranular terjadi di sisi material dan transgranular di tengah material terlihat pada gambar 4.23. Patahan intergranular terjadi karena batas butir yang lemah sehingga saat dislokasi di bidang slip tidak terjadi. Batas butir lemah karena tidak terjadi difusi krom ke batas butir dan krom kurang sehingga sebagai anoda di lingkungan korosif. Kekuatan lemah sehingga retak disepanjang butiran.

Patahan transgranular terjadi di tengah material sehingga larutan tidak sempat menyentuh daerah chrom depleted zone, mekanisme cleavage terjadi dengan membentuk bidang slip serta karbida krom menghambat terjadinya dislokasi.

Tabel 4.11. Unsur –unsur di permukaan patahan suhu sensitasi 800⁰C

No	Unsur	Unsur (%mass)
1	O	1,68
2	Cr	25,71
3	Fe	62,81
4	Ni	8,80
5	Mg	0,32
6	Cl	0,68

Unsur –unsur di permukaan patahan terdeteksi dengan menggunakan EDS antara lain O,Cr,Fe,Ni,Mg dan Cl. Konsentrasi tertinggi Fe berkisar 62,81%mass di Tabel 4.11. Unsur terkecil adalah Mg berkisar 0,32%mass

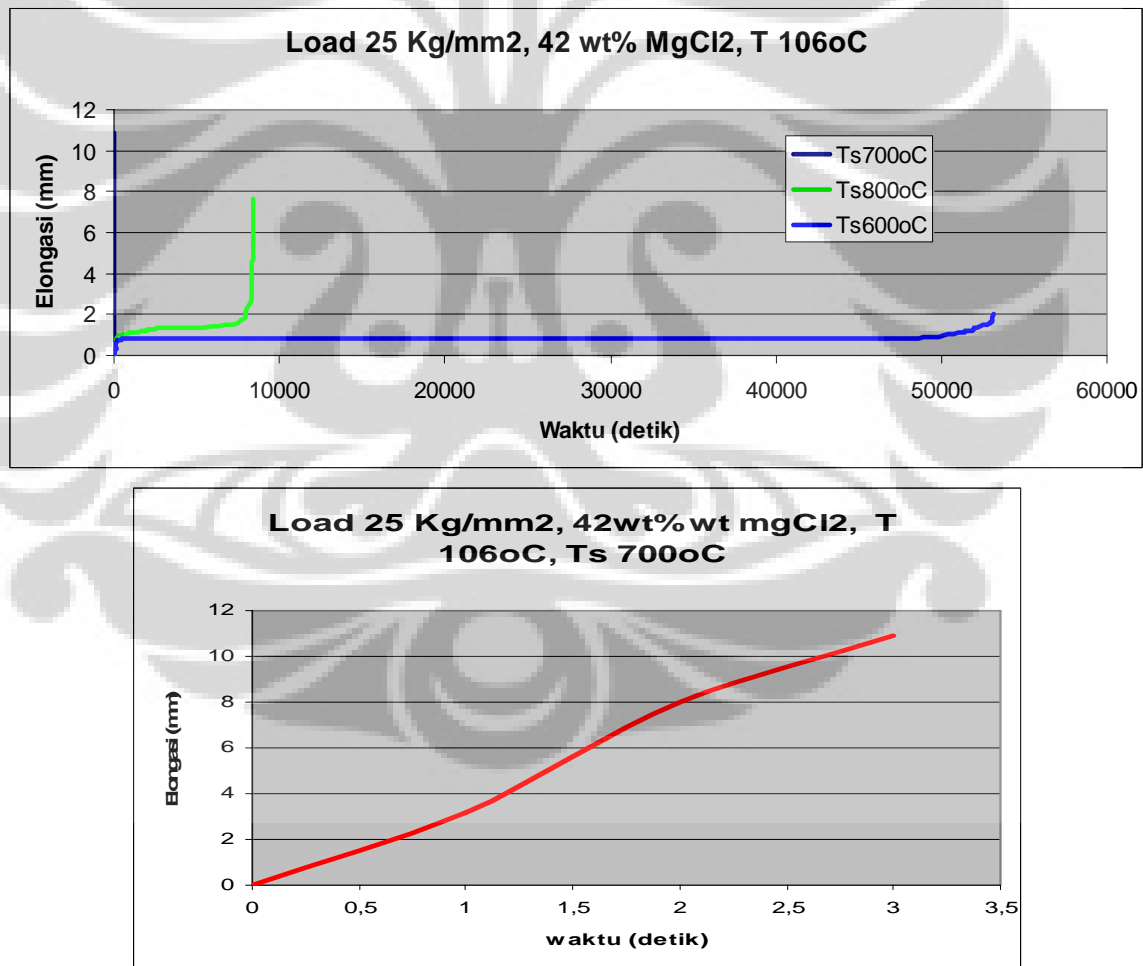


Gambar 4.24. Unsur-unsur di permukaan patahan dengan metode EDS

Gambar 4.24 memperlihatkan intensitas unsur-unsur di permukaan patahan secara kualitatif. Unsur Fe memberikan kontribusi terbesar dan unsur Cl sangat kecil konsentrasinya. Unsur Cl memberikan indikasi keberadaan larutan korosif $MgCl_2$

4.3.2 Material Anil 1100⁰C (solution Treatment)

Hubungan variasi beban, temperatur tetap dan konsentrasi tetap sangat ditentukan oleh temperatur sensitasi material AISI 304. Kondisi material juga dipengaruhi oleh perlakuan awal material tersebut. Perlakuan awal dipanaskan hingga 1100⁰C, ditahan 1 jam kemudian dicelup cepat dan material dipanaskan kembali 600⁰C, 700⁰C dan 800⁰C . Penelitian terdahulu yang dilakukan Nishimura dengan material AISI 304 yang telah di anil 1100⁰C kemudian diuji SCC dengan konsentrasi 42wt% MgCl₂. AISI 304 pada kondisi tersebut akan mengalami patahan transgranular dan intergranular dalam kondisi belum di sensitasi.



Gambar 4.25. Kurva SCC Beban 25 kg/mm², variasi suhu sensitasi, suhu larutan 106⁰C, 42 wt% MgCl₂

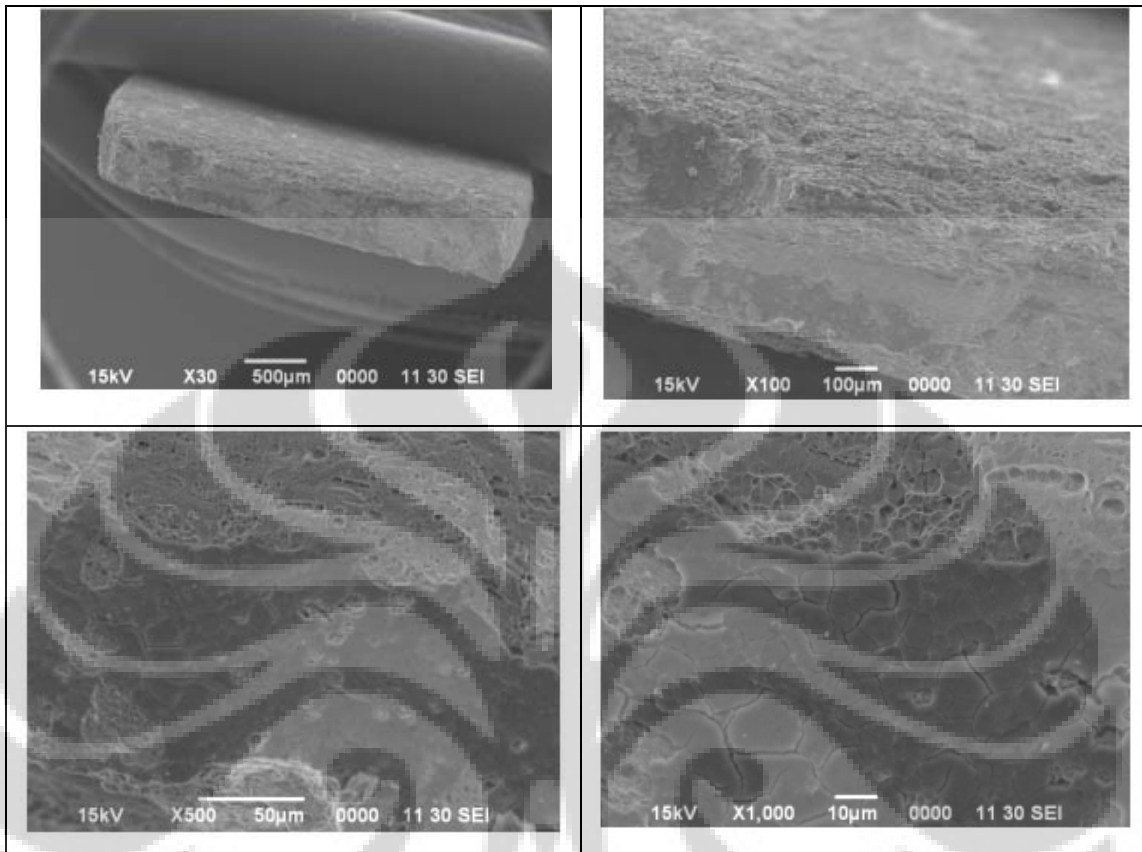
Pengujian variasi beban dilakukan dengan variasi 20 Kg/mm² dan 25 Kg/mm². Ini dikarenakan pada load 30,5 Kg/mm², material AISI 304 yang dianil 1100⁰C diberi kondisi variasi suhu sensitasi 600-800⁰C mengalami putus bebas dan tidak dikatakan katagori creep. Ini dikarenakan telah melampaui tegangan maksimum suatu material.

Pada Gambar 4.25 memperlihatkan kurva SCC material AISI 304. Waktu patah tercepat pada suhu sensitasi 700⁰C berkisar 3 detik sedangkan paling lambat pada suhu sensitasi 600⁰C. Fenomena ini sama dengan kondisi tidak di anil 1100⁰C di suhu sensitasi 700⁰C dimana waktu patah lebih cepat dibandingkan suhu lainnya. Korelasi ini dihubungkan dengan kerentanan SCC berkisar di suhu 931 (660⁰C) di larutan HCl 0,82 M dalam penelitian sebelumnya. Laju pemuluran tercepat di suhu sensitasi 700⁰C berkisar 4,80 mm/detik dan paling lambat di suhu 600⁰C. Material di suhu 700⁰C, karakter kurva mencerminkan peran mekanik sangat menentukan patahnya material sedangkan dua kurva lainnya peran mekanik dan lingkungan korosi berimbang.

Tabel 4.12. Variasi suhu sensitasi dan waktu patah,laju elongasi

Ts(oC)	tf (detik)	Iss (mm/detik)	Tss
600	53128	2,00E-06	48326
700	3	4,80E+00	-
800	8459	5,00E-05	4763

Menurut Nishimura et.al bahwa jarak untuk sebuah retakan untuk mengalami proses propagasi selama waktu t_{ss} ke t_f menurun dengan semakin meningkatkan tingkat sensitasi. Ini diartikan bahwa t_{ss} menjadi lebih dekat dengan t_f dengan meningkatnya tingkat sensitasi. Pada suhu sensitasi 700⁰C selisih waktu patah dan waktu setelah steady state (t_{ss}) sama.sehingga pada jangkauan suhu ini, kerentanan SCC meningkat dibandingkan suhu 600 dan 800⁰C terlihat pada Tabel 4.12.



Gambar 4.26. Gambar patahan, beban 25 kg/mm², suhu sensitasi 600⁰C, suhu larutan 106⁰C, 42 wt% MgCl₂

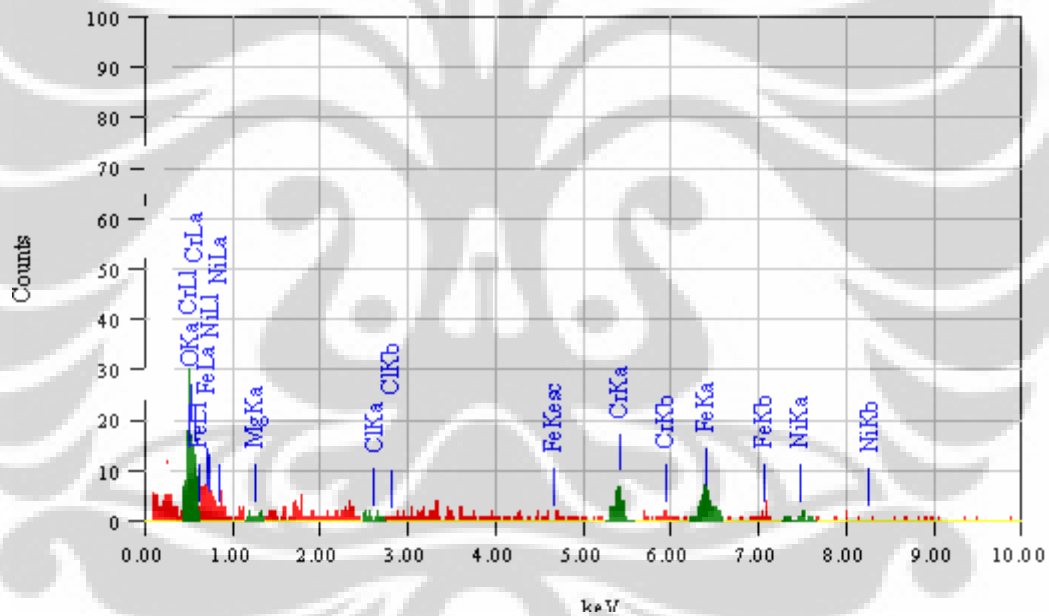
Topografi patahan material AISI 304 dengan perlakuan panas suhu sensitasi 600⁰C di dalam larutan panas 42wt% MgCl₂ terlihat pada Gambar 4.26. Struktur patahan umumnya sebagian terdiri dari intergranular dan transgranular getas. Bagian intergranular terlihat adanya pola-pola batas butir berbentuk bidang datar berwarna abu-abu. Namun bagian berwarna cerah merupakan patah transgranular.

Patah transgranular berwarna cerah membentuk pola pola lubang (dimple) yang selalu bersambung-sambung. Pola-pola patahan ini termasuk jenis equixed Dimple (tension) dan tidak adanya tegangan geser yang terjadi.

Tabel 4.13. Unsur –unsur di permukaan patahan suhu sensitasi 600⁰C

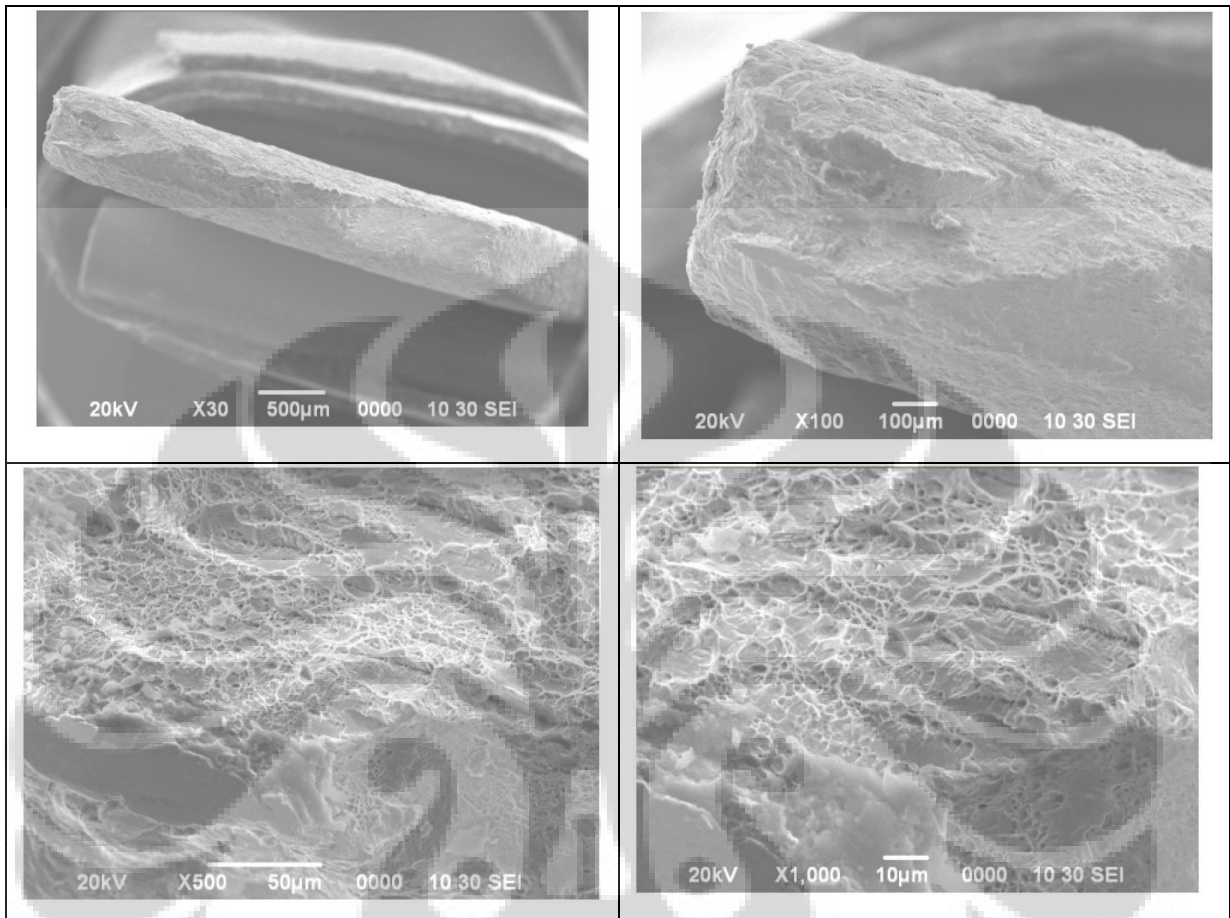
No	Unsur	Unsur (%mass)
1	O	23,22
2	Cr	28,18
3	Fe	48,05
4	Ni	0,55

Pada Tabel 4.13 unsur-unsur terdapat di permukaan patahan material berupa Fe, Cr, Fe dan Ni. Unsur Mg dan Cl mempunyai konsentrasi terendah sehingga tidak dapat terdeteksi oleh EDS. Unsur oksigen terbesar karena adanya lapisan film oksida terdapat dipermukaan yang rusak akibat retakan dan patahan.



Gambar 4.27. Unsur –unsur uji EDS , beban 25 kg/mm², suhu sensitasi 600⁰C, suhu larutan 106⁰C, 42 wt% MgCl₂

Pada Gambar 4.27 terlihat unsur minor Mg dan Cl sangat kecil intensitas secara kualitatif tapi cukup menggambarkan adanya peran klorida yang dapat memperlemah sifat material.



Gambar 4.28. Bentuk patahan , beban 25 kg/mm², suhu sensitasi 700⁰C, suhu larutan 106⁰C, 42 wt% MgCl₂

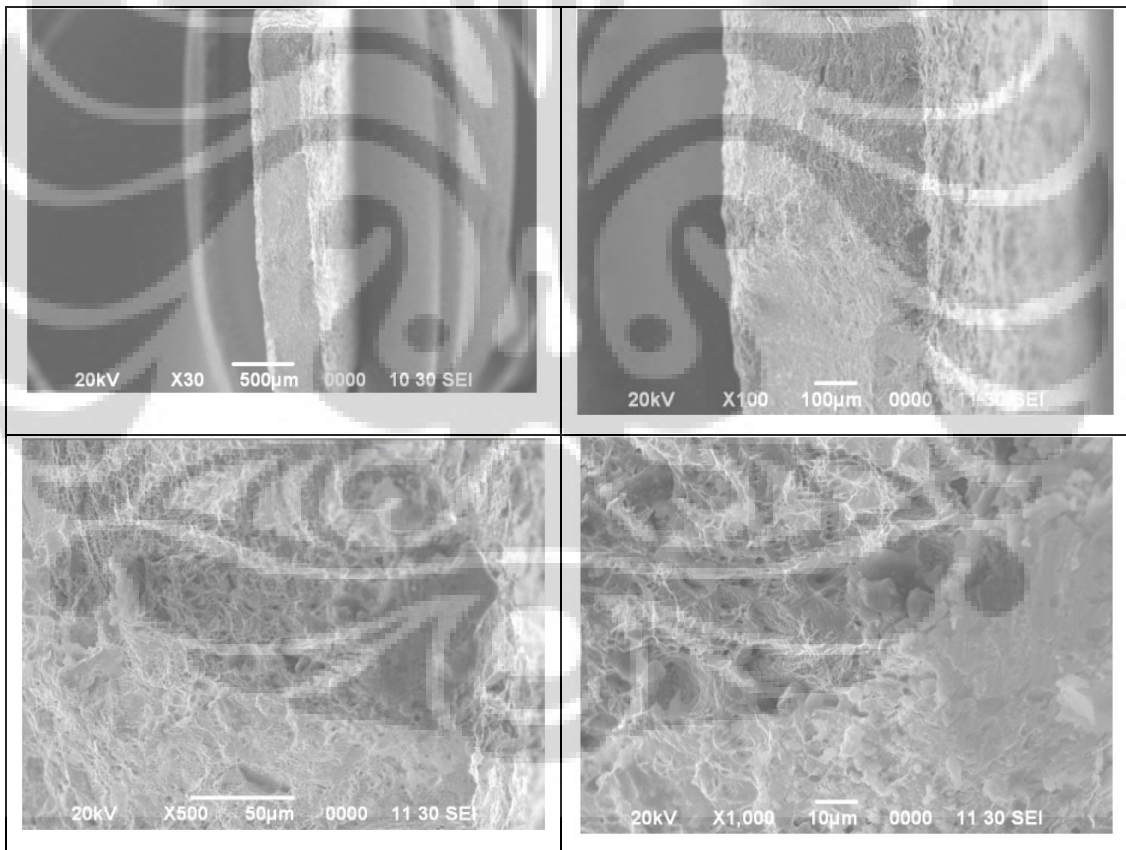
Pada Gambar 4.28 bentuk topografi permukaan patahan material berbentuk transgranular. Struktur ulet terlihat dengan adanya banyak bentuk patahan dengan sudut-sudut patahan berbeda. Peran tegangan geser nampak dengan adanya bentuk struktur dimple yang lonjong mengarah ke arah beban. Adanya dimple (kumpulan void-void) nampak di dalam patahan. Peran sifat mekanik juga mendominasi dengan waktu patah (t_f) hanya 3 detik. Peran lingkungan korosif hampir tidak ada.

Unsur-unsur terdapat di permukaan patahan material berupa Fe, Cr, Fe dan Ni. Unsur Mg dan Cl mempunyai konsentrasi terendah. Unsur oksigen terbesar

karena adanya lapisan film oksida terdapat dipermukaan yang rusak akibat retakan dan patahan.

Tabel 4.14. Unsur – unsur di permukaan patahan suhu sensitasi 700⁰C

No	Unsur	Unsur (%mass)
1	O	1,38
2	Cr	18,06
3	Fe	66,31
4	Ni	12,10
5	Mg	0,81
6	Cl	1,33



Gambar 4.29. Bentuk patahan , beban 25 kg/mm², suhu sensitasi 800⁰C, suhu larutan 106⁰C, 42 wt% MgCl₂

Pada Gambar 4.29 bentuk topografi patahan berbentuk transgranular. Bentuk patahan dimple mendominasi berbagai sudut daerah patahan. Patahan dimple ini berbentuk agak elips menandakan adanya tegangan geser yang terjadi dan tegangan nominal. Lubang-lubang dimple terjadi berbagai daerah patahan adanya daerah-daerah mengandung oksida dan karat terlihat menutupi patahan dimple. Patahan batas butir tidak terjadi pada material ini. Ini dikarenakan butiran-butiran berukuran besar di atas 80 mikron sehingga ruang gerak slip untuk dislokasi semakin luas. Namun tetap dibatasi oleh adanya senyawa kedua karbida korom dibatas butir sebagai penghambat dislokasi. *Void-void* yang terdapat di batas butir juga berperan untuk membentuk patahan *dimple*.

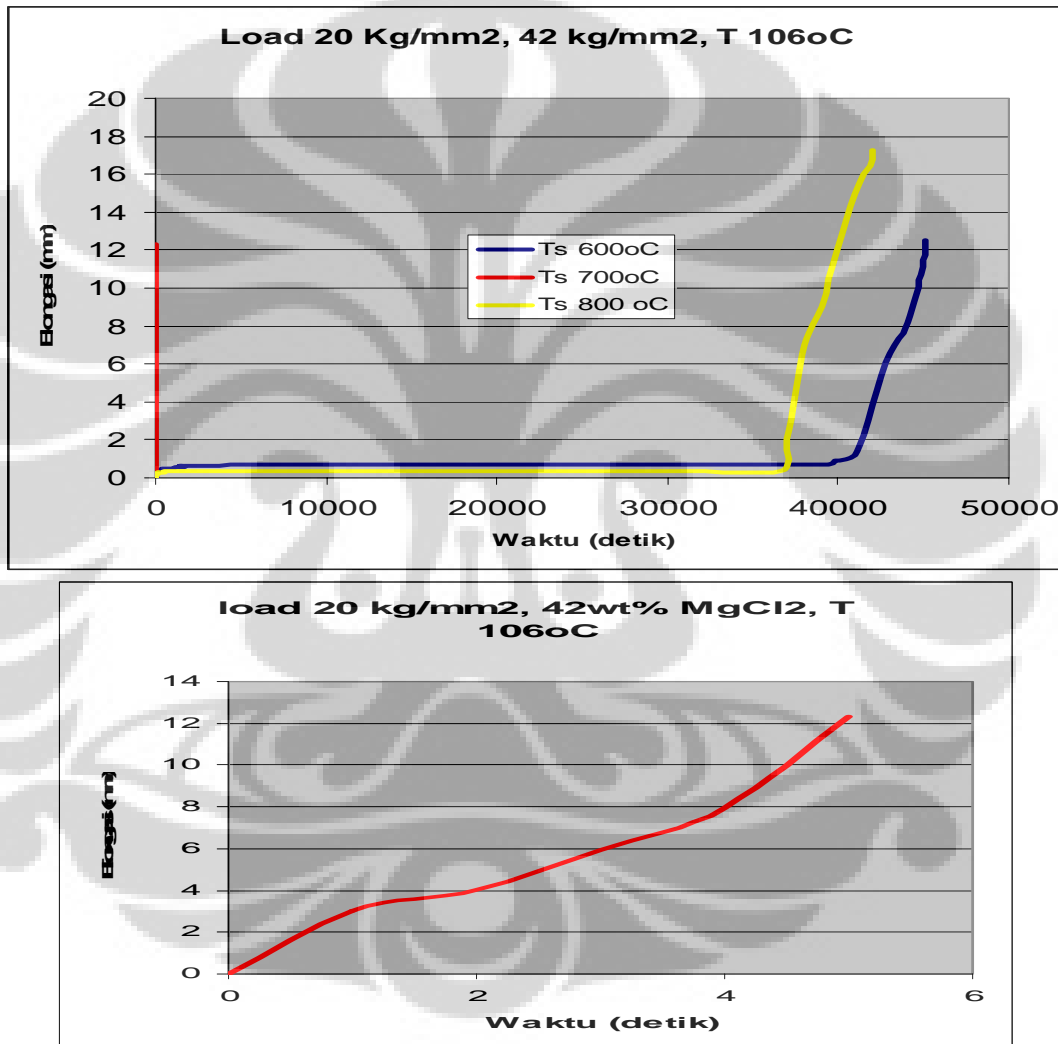
Tabel 4.15. Unsur – unsur di permukaan patahan suhu sensitasi 800⁰C

No	Unsur	Unsur (%mass)
1	O	24,72
2	Cr	15,46
3	Fe	54,55
4	Ni	4
5	Mg	0,18
6	Cl	0,98

Pada Tabel 4.14 unsur-unsur terdapat di permukaan patahan material berupa Fe, Cr, O, Mg, Cl dan Ni. Unsur Mg dan Cl mempunyai konsentrasi terendah. Unsur oksigen terbesar karena adanya lapisan film oksida terdapat dipermukaan yang rusak akibat retakan dan patahan. Unsur Mg dan Cl terdapat di permukaan patah dikarenakan material diuji di larutan panas 42wt% MgCl₂.

Variasi beban statis pengujian SCC adalah 20 Kg/mm² dengan perlakuan suhu sensitasi 600,700, dan 800⁰C. Pada Gambar 4.30 memperlihatkan kurva SCC material AISI 304. Waktu patah tercepat pada suhu sensitasi 700⁰C berkisar 5 detik sedangkan paling lambat pada suhu sensitasi 600⁰C. Fenomena ini sama dengan kondisi tidak di anil 1100⁰C di suhu sensitasi 700⁰C dimana waktu patah lebih cepat dibandingkan suhu lainnya. Korelasi ini dihubungkan dengan kerentanan SCC berkisar di suhu 931

(660⁰C) di larutan HCl 0,82 M dalam penelitian sebelumnya. Laju pemuluran tercepat di suhu sensitasi 700⁰C berkisar 2,25 mm/detik dan paling lambat di suhu 800⁰C berkisar 7.10⁻⁷ mm/detik. Material di suhu 700⁰C, karakter kurva mencerminkan peran mekanik sangat menentukan patahnya material sedangkan dua kurva lainnya peran mekanik dan lingkungan korosi berimbang.



Gambar 4.30. Kurva SCC Beban 20 kg/mm², variasi suhu sensitasi, suhu larutan 106⁰C, 42 wt% MgCl₂

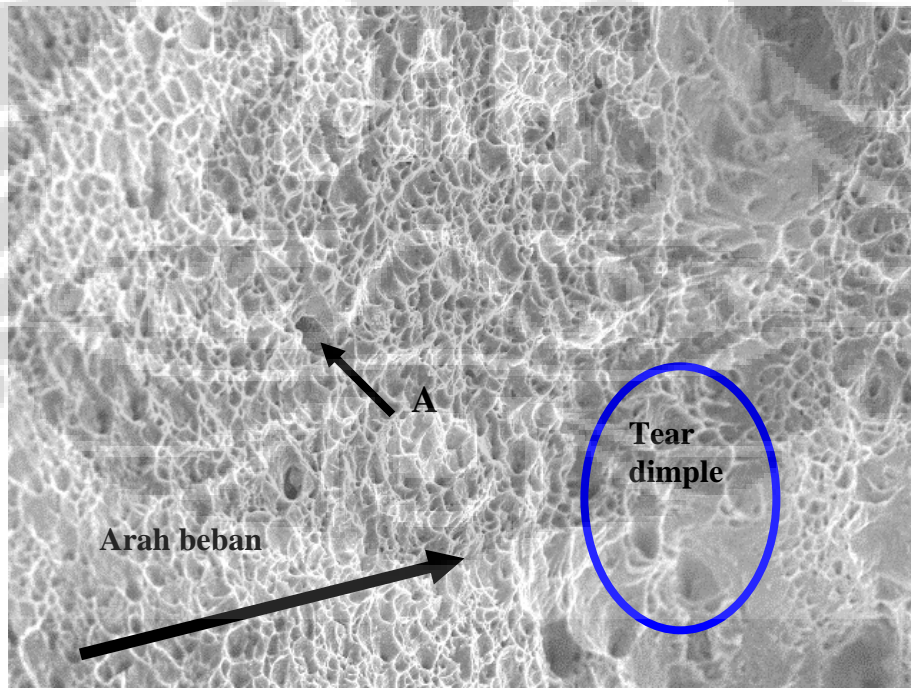
Pada Tabel 4.15 memperlihatkan waktu patah tercepat pada suhu sensitasi 700⁰C berkisar 5 detik sedangkan waktu patah terlama pada suhu sensitasi 600⁰C

berkisar 45103 detik. Laju pemuluran tercepat 2,25 mm/detik pada suhu sensitasi 700⁰C sedangkan terlama 4.10⁻⁷ mm/ detik pada suhu 800⁰C.

Tabel 4.16. Variasi suhu sensitasi dan waktu patah,laju elongasi

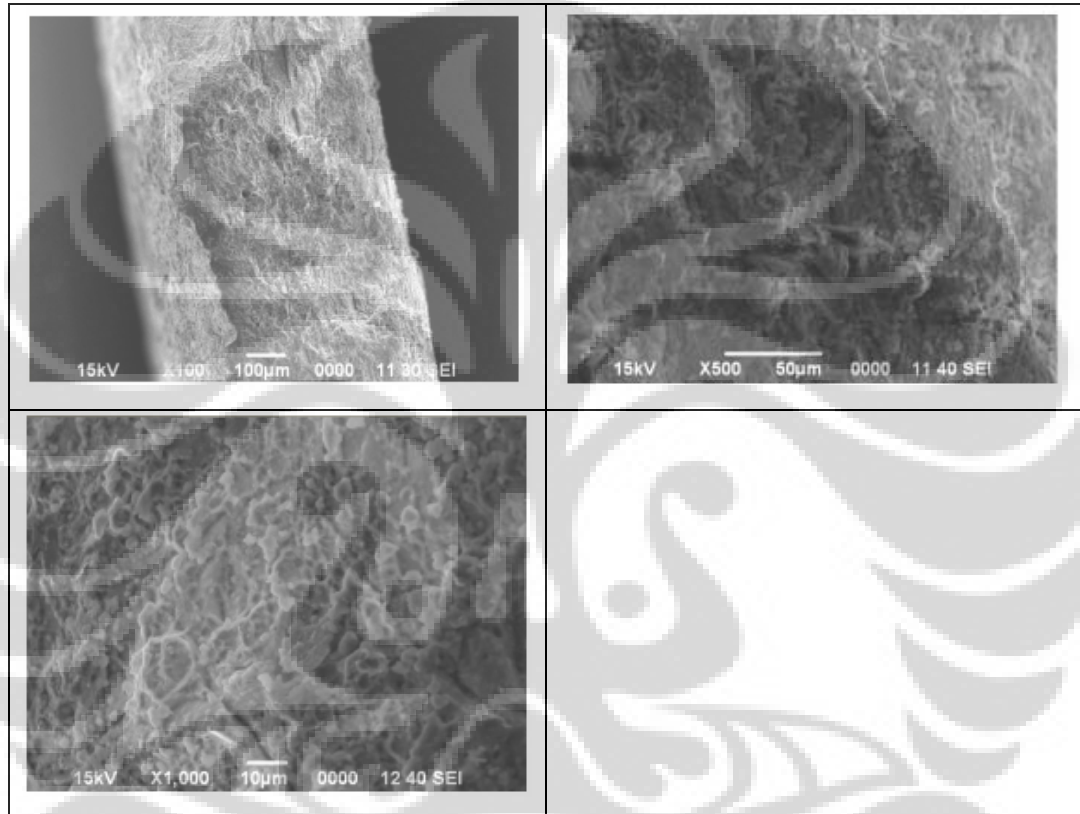
Ts(oC)	tf (detik)	lss (mm/detik)	Tss
600	45103	9,00E-07	39005
700	5	2,25E+00	0
800	42006	4,00E-07	36625

Laju pemuluran tertinggi dan waktu patah tercepat pada suhu sensitasi 700⁰C mengindikasikan peran beban luar secara mekanik lebih mendominasi dibandingkan lingkungan korosif MgCl₂. Pada suhu sensitasi 600⁰C terlihat permukaan patahan terlihat berbentuk transgranular dan banyak dimple-dimple terlihat pada Gambar 4.31.



Gambar 4.31. Bentuk patahan dimple pada material AISI 304 bersuhu sensitasi 600⁰C

Pada Gambar 4.31 tanda panah besar menunjukkan arah pembebanan luar (applied load) dari uji statis SCC. Panah kecil A menunjukkan lubang merupakan dimple-dimple. Bentuk dimple tersebut berjenis Elongated dimple yang merupakan ciri khas tegangan geser. Dimple terjadi dengan bentuk sobekan-sobekan (tear dimple) terjadi saat masuk ke jalur patahan asli.



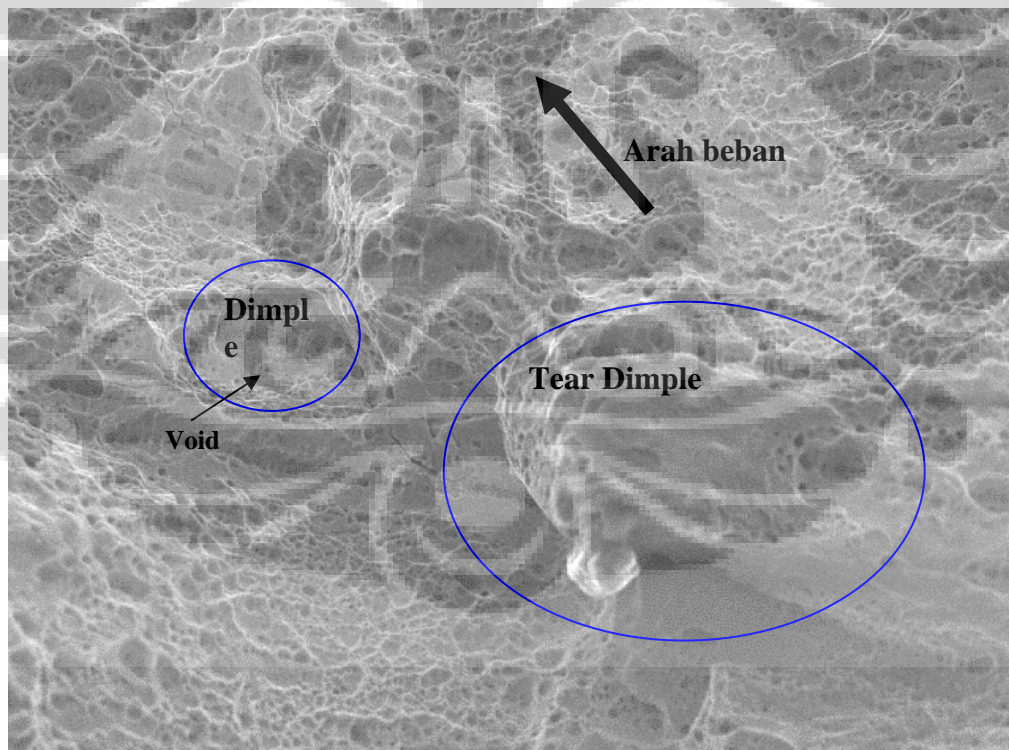
Gambar 4.32. Bentuk patahan pada material AISI 304 bersuhu sensitasi 700⁰C

Pada Gambar 4.32 bentuk patahan merupakan berstruktur transgranular. Struktur patahan dimple terlihat beberapa lubang-lubang kecil namun arah pembebanan tidak kelihatan karena tertutup dengan oksida –oksida dengan bentuk flake-flake tidak merata. Patahan makro 100 X terlihat adanya bukit-bukit besar pada pola patahan. Ini mengindikasikan adanya tegangan geser yang bekerja.

Tabel 4.17. Unsur –unsur di permukaan patahan suhu sensitasi 700⁰C

No	Unsur	Unsur (%mass)
1	O	12,71
2	Cr	11,30
3	Fe	51,30
4	Ni	11,77
5	Mg	10,92
6	Cl	2,18

Pada pengujian EDS terlihat adanya unsur –unsur terlihat berimbang konsentrasinya antara lain O, Cr,Ni, dan Mg. Unsur Cl berkisar 2,18%wt terlihat pada Tabel 4.16. Berimbangnya konsentrasi karena adanya pengotor Mg dan Cl yang menempel di permukaan patahan yang membentuk scale berbentuk serpihan.



Gambar 4.33. Bentuk patahan pada material AISI 304 bersuhu sensitasi 800⁰C

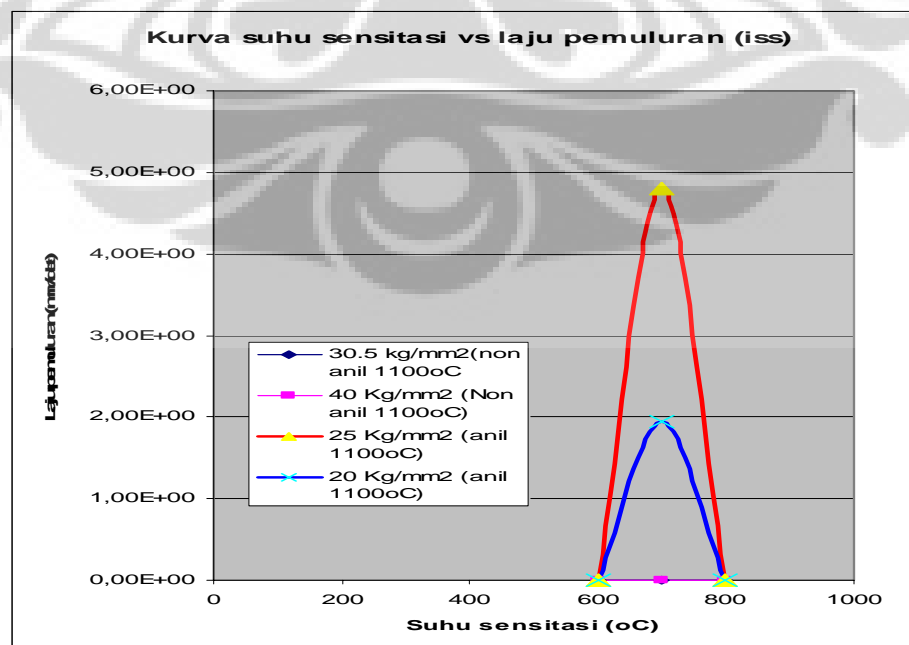
Material AISI 304 dikondisikan dalam temperatur sensitasi 800⁰C dan dicelupkan larutan panas MgCl₂ serta dibebankan secara statis 20 kg/mm². Waktu patah cukup lama 42006 detik dan laju pemuluran 4.10⁻⁷ mm/detik. Pada Gambar 4.33 memperlihatkan adanya banyak patahan berbentuk dimple. Retetan void-void yang memanjang terlihat searah dengan arah beban geser. Bentuk dimple sobekan terlihat pada Gambar tersebut. Pembentukan dimple dari kumpulan void-void terjadi saat kondisi material dengan pembebanan statis 20 Kg/mm² mengalami daerah steady state dimana laju pemuluran sehingga 4.10⁻⁷.

4.4. Hubungan temperatur sensitasi dengan laju pemuluran dan waktu patah

Material AISI 304 dipanaskan menjadi tiga variasi pemanasan sensitasi yaitu 600⁰C, 700⁰C dan 800⁰C. Pada Tabel 4.17 memperlihatkan adanya hubungan antara temperatur sensitasi dan laju pemuluran. Laju pemuluran terjadi melalui perhitungan ekstrapolasi di daerah steady state sehingga menghasilkan garis lurus.

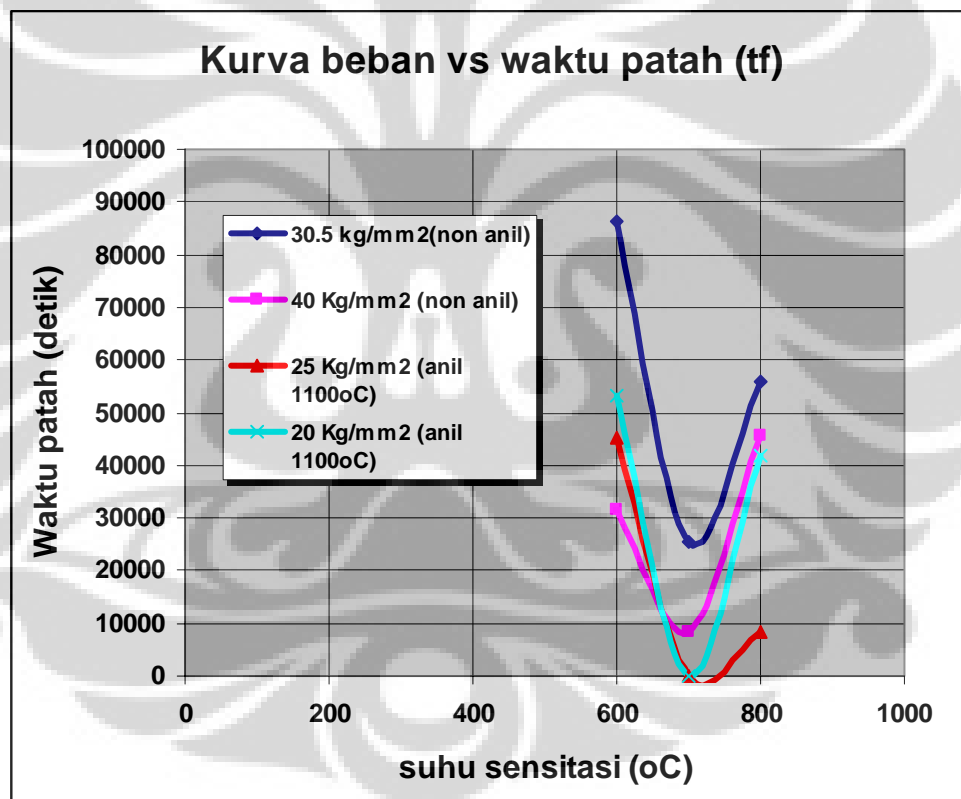
Tabel 4.18. Laju pemuluran pada variasi suhu sensitasi

Kondisi	Laju pemuluran (mm/det) pada variasi temperatur sensitasi		
	600 ⁰ C	700 ⁰ C	800 ⁰ C
30,5 kg/mm ² (non anil 1100 ⁰ C)	3.10 ⁻⁸	2.10 ⁻⁶	7.10 ⁻⁷
40 Kg/mm ² (non anil 1100 ⁰ C)	3.10 ⁻⁷	4.10 ⁻⁵	2.10 ⁻⁷
25 Kg/mm ² (anil 1100 ⁰ C)	2.10 ⁻⁶	4,80	5.10 ⁻⁵
20 Kg/mm ² (anil 1100 ⁰ C)	9.10 ⁻⁷	2,25	4.10 ⁻⁷



Gambar 4.34. Kurva hubungan antara Laju pemuluran dan suhu sensitasi

Laju pemuluran tercepat terjadi pada temperatur 700°C di dua kondisi berbeda yaitu material di anil 1100°C dan tanpa anil. Pada Gambar 4.33 puncak tertinggi laju pemuluran tertinggi pada kondisi di beban 25 Kg/mm^2 anil 1100°C suhu sensitasi 700°C . Bentuk patahannya merupakan trangranular berbentuk *dimple-dimple*. Retakan trangranular disebabkan adanya proses propagasi dari nukleasi retakan-retakan di bidang slip.

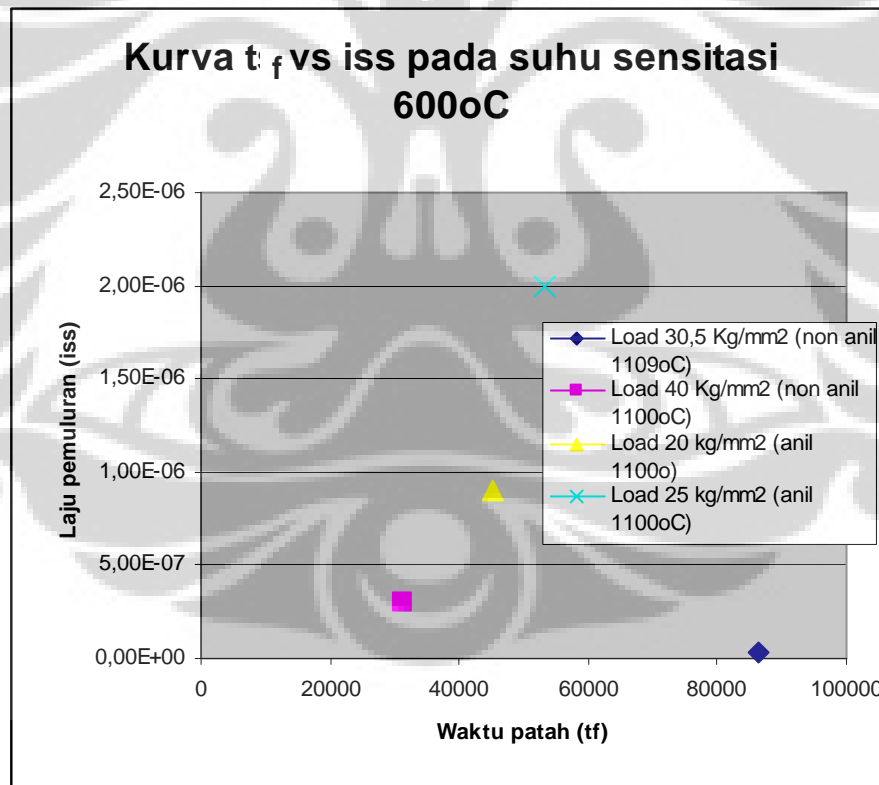


Gambar 4.35. Grafik hubungan antara waktu patah dan suhu sensitasi

Pada Gambar 4.35. memperlihatkan hubungan antara waktu patah dari dua kondisi awal material (anil 1110°C dan non anil) dan temperatur sensitasi memperlihatkan bahwa kerentanan fenomena korosi retak tegang terjadi pada

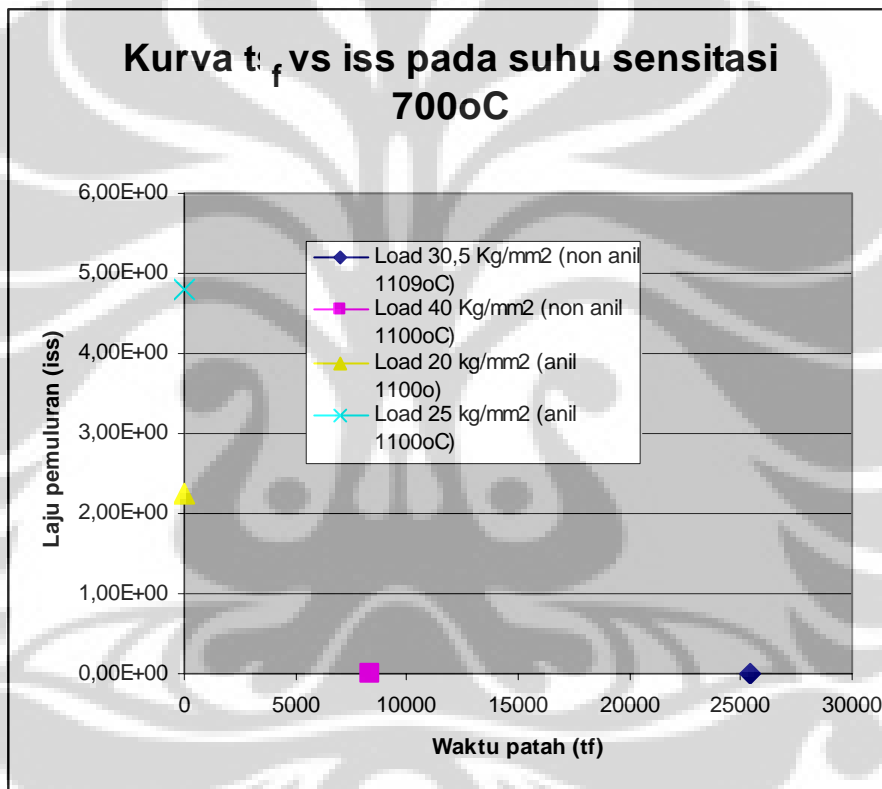
temperatur sensitasi 700°C. R.Nishimura *et.al* menyatakan bahwa kerentanan korosi retak tegang pada suhu sensitasi berkisar 931 K (660°C) di larutan 0,82 M HCl. Fenomena ini sama dengan penelitian S2 kali ini dengan larutan 42wt% MgCl₂. Kerentanan korosi retak tegang menurun saat suhu sensitasi diturunkan kurang dari 700°C atau lebih dari 700°C. Suhu di atas 800°C merupakan batas aman daerah sensitasi. Derajat sensitasi AISI 304 antara 518 -815°C.

Pada temperatur sensitasi 600°C, hubungan antara laju pemuluran dan waktu patah terlihat pada Gambar 4.36. Laju pemuluran tertinggi pada beban 25 kg/mm² di anil 1100°C celsius dan waktu patah di bawah 60.000 detik. Ini dikarenakan jaringan karbida tidak merata di batas butir sehingga dislokasi bisa terus berlangsung. Adanya bidang slip pada bidang *twinning* di butir-butir menyebabkan dislokasi terus berlangsung seiring dengan lingkungan korosif



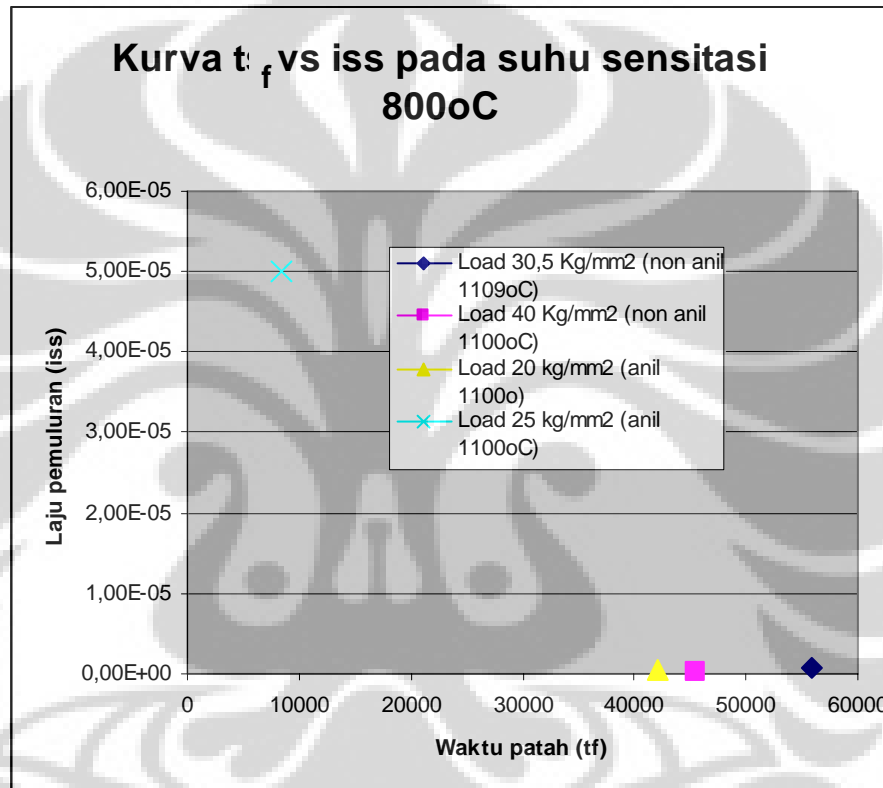
Gambar 4.36. Grafik hubungan antara waktu patah dan suhu sensitasi 600°C

Kerentanan korosi retak terjadi saat temperatur sensitasi 700⁰C terlihat pada laju pemuluran sangat cepat di beban 20 kg/mm² dan 25 kg/mm² dibandingkan laju pemuluran pada beban 30,5 kg/mm² dan 40 kg/mm² pada kondisi awal tidak di anil. Laju pemuluran rendah terjadi karena butiran-butiran yang berukuran kecil, jaringan karbida di batas butir. *Osama Alyouif et.al* menyatakan bahwa retakan intergranular di bawah suhu larutan 408K disebabkan adanya fenomena penggetasan hidrogen di batas butir yang mengandung fasa martensit terlihat pada Gambar 4.37.



Gambar 4.37. Grafik hubungan antara waktu patah dan suhu sensitasi 700⁰C

Pada temperatur sensitasi 800⁰C, hubungan antara laju pemuluran dan waktu patah terlihat pada Gambar 4.38. Laju pemuluran tertinggi pada beban 25 Kg/mm² di anil 1100⁰C celsius dan waktu patah di bawah 10.000 detik. Ini dikarenakan. Adanya bidang slip pada bidang twinning di butir-butir menyebabkan dislokasi terus berlangsung seiring dengan lingkungan korosif. Pada patahan juga berbentuk transgranular karena pergerakan dislokasi pada bidang-bidang slip.



Gambar 4.38. Grafik hubungan antara waktu patah dan suhu sensitasi 700^oC

4.5. Kelarutan kation-kation material AISI 304 ke dalam larutan uji

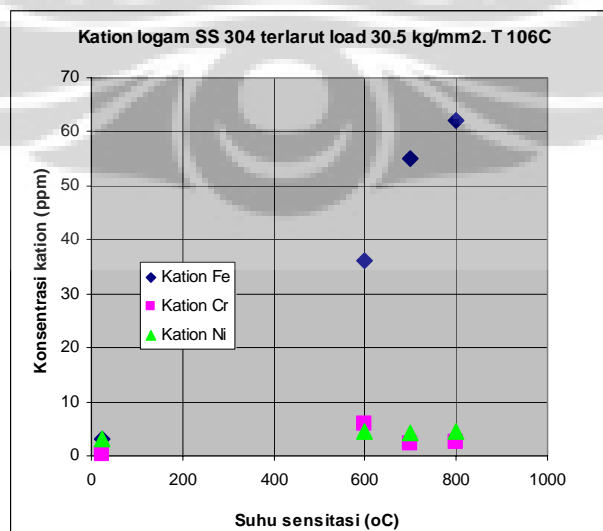
Pada pengujian *Atomic Absorbtion Spectrometer* dilakukan analisa larutan uji sebelum pengujian beban konstan SCC dan sesudah pengujian. Pada Tabel 4.18, Kondisi larutan uji awal, Kation Fe terlarut 3,025 ppm, Cr 0,17 ppm, dan Ni 3,197 ppm. Peningkatan draktis terjadi pada kation Fe di seluruh pengujian.

Prosentase peningkatan antara 484% hingga 2050% kenaikan keberadaan kation Fe di larutan uji dibandingkan larutan awal.

Tabel 4.19. Pengujian AAS terhadap kation-kation terlarut di larutan uji

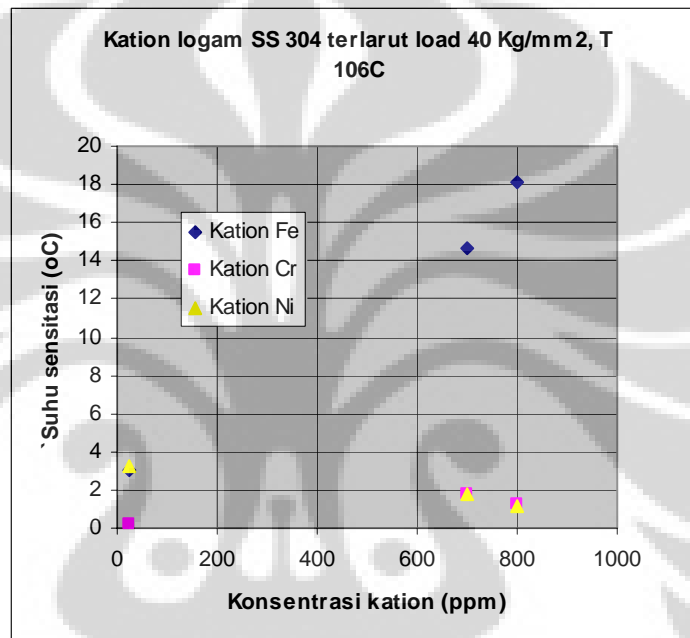
Keterangan	Unsur kation (ppm)						Tlarutan(°C)
	Ca	Ba	Fe	Mg	Cr	Ni	
Sebelum uji	12,74	3,02	3,025	568	0,17	3,197	25
30.5kg/mm,700C	9,2	7,5	55	1890	2,36	4,286	700
30.5Kg/mm,800C	10,1	8,3	62	1978	2,4	4,466	800
30.5kg/mm,600C	12,3	6,9	36,22	1856	6,02	4,52	600
40Kg/mm,700C	8,2	16,3	14,67	1621	1,73	1,82	700
40Kg/mm,800C	1,81	6,3	18,1	1732	1,26	1,18	800

Prosentase peningkatan konsentrasi kation krom di dalam larutan antara 750 hingga 3540%. Prosentase peningkatan konsentrasi kation Nikel di dalam larutan hingga 110%. Proses pelarutan logam material terjadi secara signifikan jika larutan dipanaskan. Secara kinetika peningkatan suhu akan meningkatkan reaksi kimia suatu bahan. Pelarutan kation krom terjadi saat material AISI dilakukan pembebanan statis. Lapisan Cr_2O_3 tidak bisa melakukan pemulihan secara cepat karena selalu pecah akibat pergerakan beban statis. Lapisan oksida krom mengalami degradasi dengan cepat di daerah *chrom depleted zone* dan juga batas butir yang telah tersensitasi (adanya senyawa $Cr_{23}C_6$) sehingga larutan korosif yang mengandung secara simultan menyerang daerah-daerah tersebut. Daerah yang diserang menjadikan sebagai daerah anodik dan di tengah butir dimana lapisan oksida krom tinggi sebagai katodik.



Gambar 4.39. plot hubungan konsentrasi kation

Pada Gambar 4.39 dan 4.40 merupakan hubungan konsentrasi kation dan suhu sensitasi. Pada Gambar 4.39 dan Gambar 4.40 memperlihatkan peningkatan pelepasan kation Fe seiring peningkatan suhu sensitasi. Sedangkan kation Ni dan Cr mengalami penurunan konsentrasi.



Gambar 4.40. plot hubungan konsentrasi kation

Hubungan antara dua variabel tersebut kurang memberikan pengaruh terhadap kelarutan suatu kation yang lepas ke dalam larutan. Pengaruh pelepasan kation ke dalam larutan akan ada jika larutan uji ditingkatkan temperatur kerja dan juga waktu pencelupan.

BAB V

KESIMPULAN

1. Pembentukan karbida (Cr_{23}C_6) AISI 304 terjadi pada temperatur 600°C , 700°C dan 800°C .
2. Jaringan karbida krom terbentuk sempurna pada suhu sensitasi 700°C dibandingkan temperatur 600°C
3. Nilai kekerasan vickers pada kondisi suhu sensitasi 700°C berkisar 152 Hv (kondisi anil 1100°C) dan 199,1 Hv (kondisi tanpa anil 1100°C) lebih kecil dibandingkan nilai kekerasan di suhu sensitasi 600°C dan 800°C .
4. Waktu patah (t_f) pada suhu sensitasi 700°C di semua kondisi beban dan material logam (anil dan
5. Faktor *hidrogen embrittlement* di batas butir akibat adanya martensit membuat tegangan meningkat dan menghambat dislokasi di batas butir.
6. Bentuk patahan pada material tanpa anil 1100°C di dalam larutan panas MgCl_2 berbentuk patah batas butir (intergranular). Patahan pada material anil 1100°C (solution treatment) di dalam larutan panas MgCl_2 berbentuk patahan transgranular.
7. Prosentase pelepasan kation Fe rata-rata setiap pengujian meningkat antara 484% hingga 2050%. Prosentase pelepasan kation rata-rata Cr antara 750 hingga 3540% di dalam larutan uji. Prosentase konsentrasi kation Ni rata-rata tiap uji hingga 110%.
8. Material AISI 304 dengan dua kondisi awal berbeda (anil 1100°C dan tanpa anil) dengan kondisi suhu sensitasi 700°C memiliki kerentanan terjadinya korosi retak tegang (SCC) dibandingkan suhu sensitasi 600°C dan 800°C . Kerentanan terjadinya korosi retak tegang karena nilai derajat sensitasi di daerah temperatur tersebut bernilai tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fontana and Greene, Corrosion Engineering. Mc Graw Hill. Inc, 1978
- [2] Callister . W, Material Science and Engineering, Third Edition
- [3] Shreir and Jarman, Corrosion Vol.1 Metal/Environment Reactions, Butterworth-Heinemann, 2000, hal.40
- [4] ASTM committee, Standard Specification for Heat-Resisting Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels No. A 240/A 240M – 00a, ASTM International,2004, hal.3
- [5] R.H. Jones, Stress-Corrosion Cracking, *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*, Vol 13A, *ASM Handbook*, ASM International, 2003, Hal 346
- [6] Sedriks, John, Corrosion of Stainless Steel, Wiley-Interscience Publication,1979, hal.139
- [7] Marcus and Cudar, Corrosion Mechanism Theory and practice, 1995
- [8] Craig Bruce, Environmentally Induced Cracking, Metals Handbook Corrosion, Vol.13, ASM INTERNATIONAL, Hal. 314
- [9] Nishimura Rokuro, Characterization and perspective of stress corrosion cracking of austenitic stainless steels (type 304 and type 316) in acid solutions using constant load method, *Corrosion Science* 49 (2007), Elsevier, Hal.82
- [10] Telelmen, Evily, Fracture of Structural Materials, John Sons, Inc, New York,1967, Hal.404
- [11] Sundjono, Studi Pengaruh Sodium Kromat Terhadap Korosi Retak Tegang AISI 304 Solutionnized dalam Larutan Asam Klorida, *Majalah Ilmu & Teknologi KOROSI* Vol.10 No.1,1999, Hal. 3

- [12] Ozaki dan Nishida, Boshoku Gijutsu, Corrosion Eng Japan Vol.22 1973, Hal 221
- [13] Nishimura, Stress Corrosion Cracking Failure Prediction of Austenitic Stainless Steel in Acid Solution, Corrosion Science 1990 Vol.46 No.4
- [14] H. Hanninen, T. Hakkarainen, Metallurgical Transactions A 10A (1979) 1196.
- [15] D. Eliezer, D.G. Chakrapani, C.J. Altstetter, E.N. Pugh, Metallurgical Transaction A 10A (1979) 935.
- [16] R.N.Parkins, Met. Rev, Vol.21, 1965. Hal.201
- [17] Alyousif, Nishimura, The effect of test temperature on SCC behavior of austenitic stainless steels in boiling saturated magnesium chloride solution, Corrosion Science 48 (2006)
- [18] R. Nishimura, H. Sulaiman, Stress corrosion cracking of sensitized type 316 austenitic stainless steel in pure sulfuric acid solution, 12th International Corrosion Congress: Corrosion control for low cost reliability (1993) 4325.
- [19] Alyousif, Nishimura, The stress corrosion cracking behavior of austenitic stainless steels in boiling magnesium chloride solutions, Corrosion Science 49 (2007) 3040–3051
- [20] Roberge, Piere R. 2000. Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill, New York. Hal.734
- [21] Mitra Amitava. 2004. Ferromagnetic Properties of Deformation-induced Martensite transformation in AISI 304 Stainless Steel. Metallurgical and Materials Transactions. Hal 1
- [22] Ariotka, Yamada, 2006, Influence of Carbide Precipitation and Rolling Direction on Intergranular Stress Corrosion Cracking of Austenitic stainless steel in Hydrogenated High-Temperature Water. ProQuest Science Journals, Hal.572

- [23] Nishimura, Katim, 2001, Stress corrosion cracking of sensitized type 304 stainless steel in hydrochloride Acid – Predicting Time-To failure and Effect of Sensitizing Temperature, *Corrosion*, ProQuest Science Journals
- [24] Evans, 1984, Mechanism of Creep Fracture, Elsevier Applied Science Publishers
- [25] Champion, 1948, Syimp On Internal Stresses in Metals and Alloys, Institute of Metals.
- [26] Brooks, Charlie R, 1993, Metallurgical Failures Anaysis, Mc Graw-Hill, Hal 157.

