



Tugas Akhir - TL141584

PENGARUH VARIASI TEGANGAN DAN SIKLUS PERENDAMAN TERHADAP KERENTANAN KOROSI RETAK TEGANG PADA AISI 304 DI LINGKUNGAN *SIMULATED OCEAN*

**ANUGRAH FIRSADIN
NRP. 02511440000018**

**Dosen Pembimbing
Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.**

**Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018**



Tugas Akhir - TL141584

**PENGARUH VARIASI TEGANGAN DAN SIKLUS
PERENDAMAN TERHADAP KERENTANAN KOROSI
RETAK TEGANG PADA AISI 304 DI LINGKUNGAN
*SIMULATED OCEAN***

ANUGRAH FIRSADIN
NRP. 0251144000018

Dosen Pembimbing
Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.

Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



Tugas Akhir - TL141584

**EFFECT OF STRESS AND IMMERSION METHOD IN
SUSCEPTIBILITY STRESSCORROSION CRACKING ON
AISI 304 IN SIMULATED OCEAN ENVIRONMENT**

ANUGRAH FIRSADIN
NRP. 02511440000018

Advisor
Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.

Materials Engineering Department
Faculty of Industrial Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**PENGARUH VARIASI TEGANGAN DAN SIKLUS
PERENDAMAN TERHADAP KERENTANAN KOROSI
RETAK TEGANG PADA AISI 304 DI LINGKUNGAN
*SIMULATED OCEAN***

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Material

Pada

Bidang Studi Korosi dan Kegagalan Material
Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Anugrah Firsadin
NRP. 0251144000018

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Budi Agung K, S.T., M.Sc (Pembimbing 1)
2. Tubagus Noor R, S.T., M.Sc (Pembimbing 2)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**PENGARUH VARIASI TEGANGAN DAN SIKLUS
PERENDAMAN TERHADAP KERENTANAN KOROSI
RETAK TEGANG PADA AISI 304 DI LINGKUNGAN
*SIMULATED OCEAN***

Nama : Anugrah Firsadin
NRP : 0251144000018
Jurusan : Departemen Teknik Material
Pembimbing : Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.

Abstrak

Baja tahan karat austenitik banyak dipakai pada konstruksi di lingkungan yang korosif, seperti pada lingkungan laut. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisa *stress corrosion cracking* (SCC) yang terjadi pada lingkungan air laut dengan menggunakan material baja tahan karat tipe AISI 304 dan menggunakan larutan elektrolit NaCl 3,5% dengan memberikan variasi pembebanan dan variasi siklus perendaman. Pengujian korosi retak tegang pada penelitian ini menggunakan metode U-Bend dengan periode pengujian selama 14 hari. Pengujian dilakukan dengan kondisi elektrolit pada temperatur 50°C. Untuk menganalisa perilaku korosi dan kerentanan korosi retak tegang pada baja tahan karat AISI 304, dilakukan serangkaian pengujian uji spectrometer, uji tarik, uji penetrasi, uji makro visual, uji metalografi, uji SEM/EDX dan uji microhardness. Pada hasil pengujian terlihat adanya *pitting* pada semua spesimen dan retak terjadi pada pembebanan 0.8 σ_y . Dari pengujian dan analisa yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa pada lingkungan air laut, baja AISI 304 mengalami *pitting*. *Pitting* bertambah pada siklus perendaman siklik. Variasi tegangan juga mempengaruhi jumlah *pitting* dan mengaktifkan korosi retak tegang.

Kata Kunci : baja tahan karat austenitik, korosi retak tegang, natrium klorida metode perendaman., variasi pembebanan.

EFFECT OF STRESS AND IMMERSION METHOD IN SUSCEPTIBILITY STRESSCORROSION CRACKING ON AISI 304 IN SIMULATED OCEAN ENVIRONMENT

Name : Anugrah Firsadin
NRP : 0251144000018
Department : Material Engineering Department
Advisor : Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.

Abstract

Austenitic stainless steels are widely used in construction in corrosive environments, such as the marine environment. Therefore, this study was conducted to analyze the stress corrosion cracking (SCC) occurring in the marine environment using AISI 304 stainless steel material and using a 3.5% NaCl electrolyte solution by varying the stress and variation of the immersion cycle. Corrosion test in this research using U-Bend method and tested for 14 days. The test was carried out under electrolyte conditions at a temperature of 50 ° C. To analyze the corrosion behavior and susceptibility stress of cracked corrosion on AISI 304 stainless steel, a series of test were tested ,spectrometer test, tensile test, penetrant test, macro visual test, metallographic test, SEM / EDX test and microhardness test. In the test results showed the pitting occurred on all specimens and cracks occurred at the loading of 0.8 σ_y . And it can be concluded that in the seawater environment, AISI 304 steel undergoes pitting. Pitting increases in the cyclic immersion cycle. Stress variations also affect the number of pitting and stress corrosion cracking.

Keywords : austenitic stainless steel, stress corrosion cracking, sodium chloride, variation of stress, immersion method

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr.Wb.

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan nikmat, anugerah, serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir pada jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang berjudul:

“PENGARUH VARIASI TEGANGAN DAN SIKLUS PERENDAMAN TERHADAP KERENTANAN KOROSI RETAK TEGANG PADA AISI 304 DI LINGKUNGAN *SIMULATED OCEAN*”

Tugas Akhir ini disusun untuk melengkapi sebagian syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, Tugas Akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberi dukungan, bimbingan, dan kesempatan kepada penulis hingga tugas akhir ini dapat diselesaikan.

1. Allah SWT karena dengan rahmat dan kuasa-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan baik dan tepat waktu.
2. Orang tua dan keluarga penulis, yang telah memberikan doa dan dukungannya.
3. Bapak Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis yang telah memberikan ilmu, bimbingan dan arahan kepada penulis.
4. Bapak Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc. selaku dosen co pembimbing tugas akhir penulis yang telah memberikan arahan saat menulis Tugas akhir ini.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**PENGARUH VARIASI TEGANGAN DAN SIKLUS
PERENDAMAN TERHADAP KERENTANAN KOROSI
RETAK TEGANG PADA AISI 304 DI LINGKUNGAN
*SIMULATED OCEAN***

Nama : Anugrah Firsadin
NRP : 0251144000018
Jurusan : Departemen Teknik Material
Pembimbing : Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.

Abstrak

Baja tahan karat austenitik banyak dipakai pada konstruksi di lingkungan yang korosif, seperti pada lingkungan laut. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisa *stress corrosion cracking* (SCC) yang terjadi pada lingkungan air laut dengan menggunakan material baja tahan karat tipe AISI 304 dan menggunakan larutan elektrolit NaCl 3,5% dengan memberikan variasi pembebanan dan variasi siklus perendaman. Pengujian korosi retak tegang pada penelitian ini menggunakan metode U-Bend dengan periode pengujian selama 14 hari. Pengujian dilakukan dengan kondisi elektrolit pada temperatur 50°C. Untuk menganalisa perilaku korosi dan kerentanan korosi retak tegang pada baja tahan karat AISI 304, dilakukan serangkaian pengujian uji spectrometer, uji tarik, uji penetran, uji makro visual, uji metalografi, uji SEM/EDX dan uji microhardness. Pada hasil pengujian terlihat adanya *pitting* pada semua spesimen dan retak terjadi pada pembebanan $0.8 \sigma_y$. Dari pengujian dan analisa yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa pada lingkungan air laut, baja AISI 304 mengalami *pitting*. *Pitting* bertambah pada siklus perendaman siklik. Variasi tegangan juga mempengaruhi jumlah *pitting* dan mengakibatkan korosi retak tegang.

Kata Kunci : baja tahan karat austenitik, korosi retak tegang, natrium klorida metode perendaman., variasi pembebanan.

EFFECT OF STRESS AND IMMERSION METHOD IN SUSCEPTIBILITY STRESSCORROSION CRACKING ON AISI 304 IN SIMULATED OCEAN ENVIRONMENT

Name : Anugrah Firsadin
NRP : 0251144000018
Department : Material Engineering Department
Advisor : Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc.
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.

Abstract

Austenitic stainless steels are widely used in construction in corrosive environments, such as the marine environment. Therefore, this study was conducted to analyze the stress corrosion cracking (SCC) occurring in the marine environment using AISI 304 stainless steel material and using a 3.5% NaCl electrolyte solution by varying the stress and variation of the immersion cycle. Corrosion test in this research using U-Bend method and tested for 14 days. The test was carried out under electrolyte conditions at a temperature of 50 ° C. To analyze the corrosion behavior and susceptibility stress of cracked corrosion on AISI 304 stainless steel, a series of test were tested ,spectrometer test, tensile test, penetrant test, macro visual test, metallographic test, SEM / EDX test and microhardness test. In the test results showed the pitting occurred on all specimens and cracks occurred at the loading of 0.8 σ_y . And it can be concluded that in the seawater environment, AISI 304 steel undergoes pitting. Pitting increases in the cyclic immersion cycle. Stress variations also affect the number of pitting and stress corrosion cracking.

Keywords : austenitic stainless steel, stress corrosion cracking, sodium chloride, variation of stress, immersion method

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr.Wb.

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan nikmat, anugerah, serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir pada jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang berjudul:

“PENGARUH VARIASI TEGANGAN DAN SIKLUS PERENDAMAN TERHADAP KERENTANAN KOROSI RETAK TEGANG PADA AISI 304 DI LINGKUNGAN *SIMULATED OCEAN*”

Tugas Akhir ini disusun untuk melengkapi sebagian syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, Tugas Akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberi dukungan, bimbingan, dan kesempatan kepada penulis hingga tugas akhir ini dapat diselesaikan.

1. Allah SWT karena dengan rahmat dan kuasa-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan baik dan tepat waktu.
2. Orang tua dan keluarga penulis, yang telah memberikan doa dan dukungannya.
3. Bapak Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis yang telah memberikan ilmu, bimbingan dan arahan kepada penulis.
4. Bapak Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc. selaku dosen co pembimbing tugas akhir penulis yang telah memberikan arahan saat menulis Tugas akhir ini.

5. Ibu Diah Susanti, S.T, M.T, PhD. dan Bapak Fakhreza Abdul, S.T., M.T. selaku dosen penguji penulis.
6. Bapak Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng. selaku Ketua Jurusan pada Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.
7. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si, PhD. Selaku Dosen Wali penulis pada Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.
8. Saudara Ridho Ma'ruf Quluq sebagai rekan kerja penulis dalam menyelesaikan tugas akhir
9. Dosen dan karyawan yang telah membantu penulis untuk menyelesaikan perkuliahan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
10. Teman-teman angkatan 2014 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
11. Dan seluruh pihak yang telah memberikan partisipasi atas penulisan tugas akhir ini.

Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang membaca. Penulis juga menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan Tugas Akhir ini, sehingga penulis sangat menerima kritik dan saran dari para pembaca yang dapat membangun demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Surabaya, Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Baja Tahan Karat.....	5
2.2 Korosi.....	8
2.3 Korosi Retak Tegang.....	9
2.4 Korosi Retak Tegang Klorida	12
2.5 Mekanisme Korosi Retak Tegang klorida.....	12
2.6 Faktor yang Mempengaruhi CLSCC.....	13
2.7 Morfologi SCC pada Baja Tahan Karat Austenitik.....	14
2.8 Metode Pengujian SCC.....	15
2.9 Metode Pengujian Menggunakan U-Bend.....	15
2.10 Kondisi Lingkungan Untuk Pengujian Korosi di Daerah Laut.....	17
2.11 Pitting Resistance Equivalent Number.....	18
2.12 Critical Pitting Temperature.....	19
2.13 Korosi Sumuran	20
2.14 Penelitian Sebelumnya	21
BAB III METODELOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram alir penelitian	33
3.2 Metode perancangan	34

3.3	Alat-alat penelitian	35
3.4	Bahan Penelitian	35
3.5	Prosedur Penelitian	36
3.6	Tabel Eksperimen/Pengujian	50
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN		
4.1	Hasil	53
4.1.1	Hasil pengujian spektrometri	53
4.1.2	Hasil pengujian tarik	55
4.1.3	Pengujian Immersi	57
4.1.4	Pengujian <i>Dye Penetrant Testing</i>	58
4.1.5	Pengujian Makro visual dan metalografi	63
4.1.6	Pengujian SEM/EDX	72
4.1.7	Pengujian <i>Microhardness</i>	76
4.2	Pembahasan	77
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	81
5.2	Saran	81
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Penyebab <i>premature fracture</i> disebabkan korosi pada komponen struktur.....	10
Gambar 2.2 Retakan transgranular pada baja tahan karat austenitic.....	14
Gambar 2.3 Retakan intergranular pada baja tahan karat austenitic.....	15
Gambar 2.4 Macam-macam pengaturan pada metode U-bend...	16
Gambar 2.5 Gambar pengujian SCC pada lingkungan Laut.....	17
Gambar 2.6 Pengaruh konsentrasi Cl ⁻ dengan temperatur dalam berbagai material baja tahan karat austenitic dan dupleks.....	19
Gambar 2.7 Pertumbuhan retakan baja tahan karat 316 pada larutan NaCl 3,5% dan 9,35%.....	22
Gambar 2.8 Gambar retak pada permukaan AISI 316 pada konsentrasi 3,5% pada temperatur kamar dengan perbesaran 1000x.....	22
Gambar 2.9 Pengujian bent beam dengan variasi tegangan 30%, 40%, dan 50% dari tegangan luluh.....	23
Gambar 2.10 Gambar hasil pengujian penetran pada spesimen...	24
Gambar 2.11 Pitting yang terjadi pada SS 304 dengan pembesaran 500X	25
Gambar 2.12 Grafik pengaruh tegangan terhadap jumlah korosi pitting yang terjadi.....	25
Gambar 2.13 Gambar pengamatan penampang melintang dengan perbesaran 50x pada a. 30% b. 40% c. 50% <i>yield stress</i>	26
Gambar 2.14 Gambar dari baja tahan karat AISI 304 Setelah pengujian.....	27
Gambar 2.15 Gambar retak pada spesimen dengan pengujian selama 16 minggu dan temperatur 43°C (a dan b) retak pada 304 (c dan d)	

	retak pada 304L.....	28
Gambar 2.16	gambar penampang dengan pembebanan 0.6 yield stress pada media air laut dengan temperatur 27°C selama 8 bulan.....	29
Gambar 2.17	gambar penampang pada temperature 45°C selama 1 bulan.....	29
Gambar 2.18	gambar pitting pada permukaan pada temperature 30°C selama 1 bulan.....	30
Gambar 2.19	gambar pengaruh tegangan terhadap critical chloride concentration dalam kerusakan lapisan pasif.....	31
Gambar 3.1	diagram alir penelitian.....	34
Gambar 3.2	alat spectrometer PT. Timur Megah Steel	37
Gambar 3.3	spesimen dan dimensi uji tarik.....	37
Gambar 3.4	spesimen uji tarik.....	34
Gambar 3.5	proses pengujian uji tarik pada laboratorium metalurgi departemen teknik material dan metalurgi.....	39
Gambar 3.6	gambar bentuk benda uji untuk <i>U-bend test</i>	41
Gambar 3.7	gambar spesimen dengan metode U-bend	42
Gambar 3.8	gambar alat untuk pengujian immersion test	43
Gambar 3.9	skema rangkaian untuk elektroetsa.....	44
Gambar 3.10	proses elektroetsa dengan larutan asam oksalat 10%	44
Gambar 3.11	gambar tabung penetrant, cleaner, dan developer.....	45
Gambar 3.12	ilustrasi titik pengamatan untuk pengujian makro visual.....	46
Gambar 3.13	mikroskop stereo zeiss stemi DV4.....	47
Gambar 3.14	daerah pengamatan bagian penampang dari spesimen	48
Gambar 3.15	Mikroskop Trinokular Olympus BX51M.....	48
Gambar 3.16	alat pengujian SEM/EDX FEI inspect S50.....	49
Gambar 3.17	peralatan microhardness WILSON 402MVD.....	50
Gambar 4.1 a.	gambar spesimen SS 304 sebelum	

	pengujian spektrometri b. gambar spsimen SS 304 setelah pengujian spektrometri.....	53
Gambar 4.2	spesimen uji tarik setelah pengujian.....	56
Gambar 4.3	Ilustrasi pengamatan mikro visual pada permukaan	63
Gambar 4.4	gambar <i>pitting</i> pada pengamatan mikro visual pada permukaan atas spesimen tercelup penuh dengan pembesaran 32x pada a.tanpa pembebanan b.0.5 c. 0.6 d. 0.7 dan e. 0.8 σ_y	64
Gambar 4.5	gambar <i>pitting</i> pada pengamatan mikro visual pada permukaan atas spesimen dengan metode siklik dengan pembesaran 32x pada a.0 b.0.5 c. 0.6 d. 0.7 e. 0.8 σ_y	65
Gambar 4.6	pengamatan metalografi pada penampang Spesimen.....	67
Gambar 4.7	gambar <i>pitting</i> pada penampang spesimen tercelup penuh dengan pembesaran 1000x pada a.0 b.0.5 c. 0.6 d. 0.7 σ_y	68
Gambar 4.8	gambar <i>pitting</i> dan retak pada pengujian metalografi pada penampang spesimen tercelup penuh dengan pembesaran 1000x pada 0.8 σ_y	69
Gambar 4.9	gambar panjang retak hasil pengamatan metalografi dengan pembesaran 1000x dengan pembebanan 0.8 σ_y	69
Gambar 4.10	gambar <i>pitting</i> pada pengujian metalografi pada penampang spesimen dengan metode siklik dengan pembesaran 1000x pada a.tanpa pembebanan b.0.5 c. 0.6 d. 0.7 σ_y	70
Gambar 4.11	gambar hasil pengamatan metalografi dengan pembesaran 1000x dengan pembebanan 0.8 σ_y gambar a. adalah pola patahan dan b. adalah panjang retakan.....	71
Gambar 4.12	gambar SEM pada penampang spesimen dengan pembesaran 15.000x a. metode pencelupan	

	penuh b. metode siklik.....	72
Gambar 4.13	titik pengujian EDX spesimen tercelup penuh	73
Gambar 4.14	titik pengujian EDX spesimen dengan metode siklik	74
gambar 4.15	Gambar untuk lokasi pengujian microhardness....	76

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Tabel besarnya regangan elastis benda uji berdasarkan presentase yield stress.....	40
Tabel 3.2 Tabel perhitungan dimensi spesimen	40
Tabel 3.3 Tabel dimensi spesimen	41
Tabel 3.4 Tabel dimensi ukuran dari variasi pembebanan	41
Tabel 3.5 Tabel eksperimen	50
Tabel 3.6 Tabel rancangan eksperimen.....	51
Tabel 3.7 Tabel rencana jadwal penelitian.....	52
Tabel 4.1 Tabel hasil pengujian <i>optical emission spectrometer</i> (OES)	54
Tabel 4.2 Tabel perbandingan komposisi material SS 304 berdasarkan ASTM A240 dengan hasil uji <i>optical emission spectrometer</i> (OES).....	55
Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Tarik.....	57
Tabel 4.4 Perbandingan data hasil uji tarik dengan literature.....	57
Tabel 4.5 Tabel hasil uji penetran spesimen tercelup penuh	58
Tabel 4.6 Tabel hasil uji penetran spesimen metode siklik.....	61
Tabel 4.7 Tabel perbandingan jumlah pitting pada area 2x2 cm ² pada permukaan atas spesimen.....	66
Tabel 4.8 Tabel hasil pengujian EDX.....	74
Tabel 4.9 Tabel nilai microhardness untuk setiap posisi.....	76

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Stress corrosion cracking (SCC) terjadi apabila material mengalami pembebanan tegangan tarik konstan yang relatif kecil dan terpapar pada lingkungan/media yang korosif. Retakan pada *stress corrosion cracking* dapat berupa transgranular atau intergranular cracking yang dapat diamati dengan mikroskop optik atau dengan mikroskop lainnya. Retakan yang terjadi bergantung dari jenis material, lingkungannya, dan tegangan yang diberikan pada material tersebut. *Stress corrosion cracking* (SCC) terjadi pada berbagai jenis material. *Stress corrosion cracking* (SCC) juga dapat menyerang pada baja paduan yang banyak dikenal memiliki ketahanan korosi yang baik yaitu stainless steel.

Stainless steel merupakan baja paduan yang memiliki kandungan Cr minimal 10,5%, *stainless steel*. Sifat tahan korosi pada *stainless steel* diperoleh dari lapisan oksida yang sangat stabil yang melekat pada permukaan dan melindungi baja terhadap lingkungan yang korosif. Menurut strukturnya *stainless steel* dapat dibagi menjadi 3, yaitu baja tahan karat martensitik, baja tahan karat ferritik, dan baja tahan karat austenitik. Baja tahan karat austenitik memiliki sifat tahan korosi yang paling baik dibanding dengan baja tahan karat yang lainnya. Baja tahan austenitik memiliki kadar krom dan nikel tidak kurang dari 23%. Selain itu, baja tahan karat austenitik memiliki nilai ketangguhan yang baik dan toleran terhadap temperatur tinggi (Suherman, 1999).

Dengan memiliki sifat-sifat diatas. Baja tahan karat austenitik banyak dipakai pada konstruksi di lingkungan-lingkungan yang korosif, salah satunya pada konstruksi pengeboran lepas pantai, pada industri perkapalan, dan pada infrastruktur bangunan di lingkungan laut. Lingkungan laut merupakan lingkungan yang kompleks dan korosif. Baja tahan karat Austenitik banyak digunakan untuk konstruksi komponen



pembangkit tenaga nuklir dan komponen konstruksi industri kimia dan konstruksi laut karena kombinasi sifat mekanik, kemampuan las dan ketahanan terhadap korosi. (Elsariti & Haftirman, 2013)

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui dan mempelajari *stress corrosion cracking* (SCC) yang terjadi pada lingkungan air laut dengan menggunakan material baja tahan karat tipe 304 dan menggunakan larutan elektrolit NaCl 3,5% (simulasi lingkungan air laut) dengan variasi pembebanan dan variasi siklus perendaman.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana perilaku korosi pada baja tahan karat AISI 304 akibat pengaruh variasi tegangan dan siklus perendaman pada lingkungan NaCl 3,5%
2. Bagaimana kecenderungan terbentuknya *Stress Corrosion Cracking* (SCC) yang terjadi pada baja tahan karat AISI 304 akibat pengaruh variasi tegangan dan siklus perendaman pada lingkungan NaCl 3,5%

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kemudahan dalam analisa permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan, yaitu :

1. Material yang digunakan dianggap homogen.
2. Kondisi awal permukaan dianggap homogen dan bebas terhadap cacat.
3. Pengaruh temperatur terhadap material selama proses pemotongan diabaikan.
4. Tidak adanya perlakuan panas pada material yang digunakan.
5. Nilai temperatur, volume , dan tekanan dianggap konstan selama pengujian.



1.4 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan permasalahan yang telah disebutkan diatas, maka tujuan penelitian ini antara lain :

1. Menganalisa perilaku korosi pada baja tahan karat AISI 304 akibat pengaruh variasi tegangan dan pengaruh siklus perendaman pada lingkungan NaCl 3,5%
2. Menganalisa kecenderungan terbentuknya *Stress Corrosion Cracking* (SCC) yang terjadi pada baja tahan karat AISI 304 akibat pengaruh variasi tegangan dan pengaruh siklus perendaman pada lingkungan NaCl 3,5%

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran tentang *stress corrosion cracking* pada baja tahan karat tipe 304 pada simulasi lingkungan air laut apabila dilakukan pembangunan konstruksi atau infrastruktur yang menggunakan baja tahan karat tipe 304 pada lingkungan air laut, dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam merancang konstruksi dan pembebanan maksimal agar terhindar dari *stress corrosion cracking*.

**LAPORAN TUGAS AKHIR
DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL**



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja Tahan Karat

Baja Tahan Karat 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. (Priyotomo, 2008)

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 katagori. Lima katagori tersebut yaitu : (committee, 2004)



a. 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, silicon, tungsten dan vanadium ditambah untuk memperbaiki proses temper setelah proses pengerasan. Sedikit kandungan nikel meningkatkan ketahanan korosi dan ketangguhan.

b. 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, silicon, 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.

c. 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

LAPORAN TUGAS AKHIR DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL



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 austenitik 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.

Baja austenitik ini mempunyai struktur kubus satuan bidang (face center cubic) dan merupakan baja dengan ketahanan korosi tinggi. Komposisi unsur – unsur pepaduan 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. Kadar kromium cukup tinggi membentuk lapisan Cr_2O_3 yang protektif untuk meningkatkan ketahanan korosi. Komposisi karbon rendah untuk meminimalisasi sensitasi akibat proses pengelasan.

d. 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.

e. Baja stainless pengerasan endapan

Jenis baja ini merupakan paduan unsure utama kromium-nikel yang mengandung unsur precipitation-hardening antara lain tembaga, aluminium, atau titanium. Baja ini berstruktur austenitic atau martensitik dalam kondisi anil. Kondisi baja berfasa austenitic dalam keadaan anil dapat diubah menjadi fasa martensit melalui perlakuan panas. Kekuatan material melalui pengerasan endapan pada struktur martensit.

2.2 Korosi

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. Jumlah logam dan paduannya merupakan fungsi dari lingkungan sehingga saling mempengaruhi kedua parameter tersebut antara lain lingkungan air tawar, air laut, tanah, air laut . (Greene, 1978). 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 . 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.

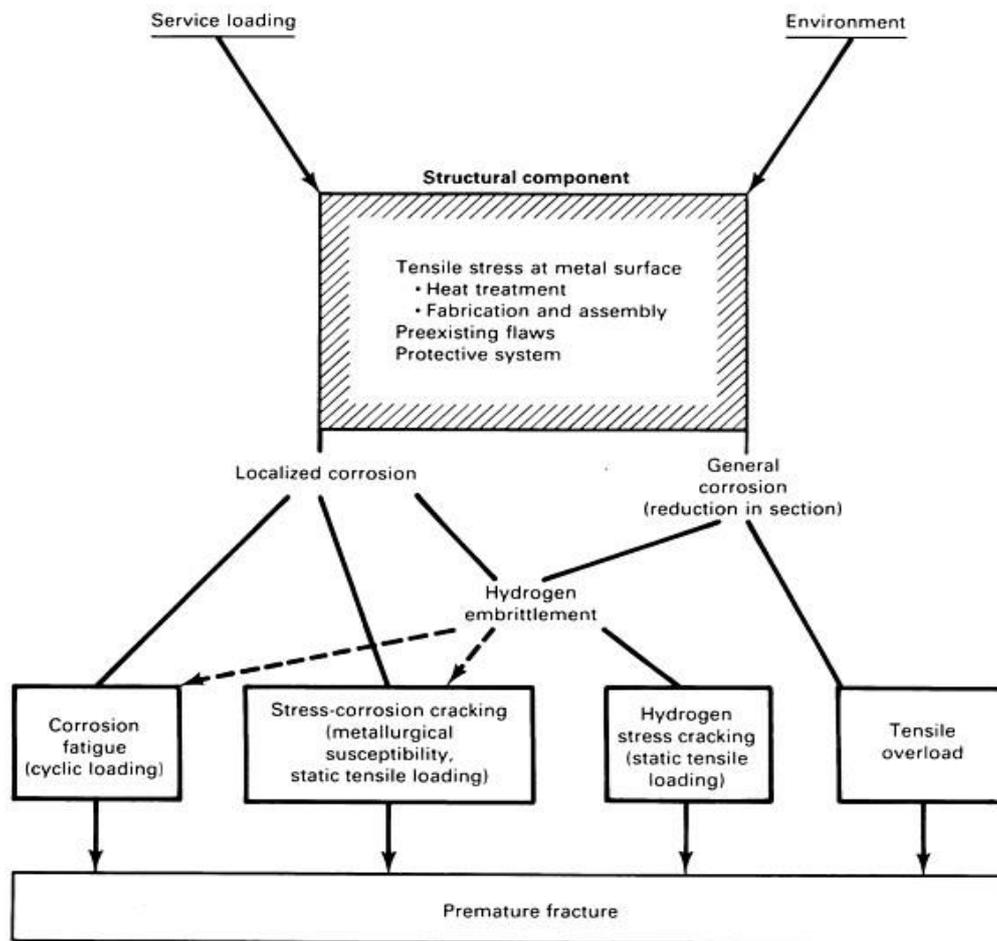
2.3 Korosi Retak Tegang (*Stress Corrosion Cracking*)

Korosi retak tegang merupakan suatu kegagalan material yang terjadi akibat kombinasi antara lingkungan dan beban yang dapat menyebabkan penyebaran retak. Korosi retak tegang dapat juga diartikan sebagai suatu kegagalan operasional pada material yang terjadi oleh lingkungan secara perlahan-lahan yang disebabkan perambatan retak. Perambatan retak merupakan hasil kombinasi dan interaksi 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. 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



Gambar 2. 1 Penyebab *premature fracture* disebabkan korosi pada komponen struktur (ASM, 1990)

Faktor lingkungan memberikan pengaruh yang berbeda pada masing-masing material. Faktor-faktor terjadinya perambatan retak yaitu : (Cudar, 1995)

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.

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.

4. Faktor metalurgis

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



2.4 Korosi Retak Tegang Klorida (*Chloride Stress Corrosion Cracking*)

Korosi retak tegang merupakan proses kegagalan tidak spontan. Korosi retak tegang pada baja stainless austenitik dipengaruhi oleh fungsi tegangan luar, temperatur sensitasi, potensial dan lingkungan (pH, konsentrasi anion, jenis anion, inhibitor dan temperature) dengan menggunakan beban konstan.

Korosi retak tegang klorida merupakan jenis korosi retak tegang yang diakibatkan adanya lingkungan klorida, komposisi material dan struktur. Serangan lokal 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 retak transgranular dengan retakan mengikuti bidang slip pada kisi austenit. 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.

2.5 Mekanisme Korosi Retak Tegang Klorida (*Chloride Stress Corrosion Cracking*)

Mekanisme CLSCC melibatkan kombinasi elektrokimia logam yang larut di area yang sangat terlokalisasi, yaitu di dasar lubang atau celah. (Parrott, 2011)

Resistensi korosi yang tinggi dari baja tahan karat austenitik di sebagian besar lingkungan atmosfer dan berair disebabkan oleh pasivasi oleh lapisan tipis (~ 2nm) oksida kromium. Lingkungan basah dan lembab yang mengandung ion klorida dapat menyebabkan korosi pitting dan korosi celah



pada komponen baja tahan karat austenitik. Komponen di bawah tegangan terapan atau tegangan sisa dapat mengalami korosi retak tegang pada kondisi ini. Pitting hanyalah pemecahan lapisan oksida kromium yang diikuti oleh korosi lokal yang menghasilkan lubang.

Kerentanan baja tahan karat austenitik terhadap CLSCC bergantung pada berbagai variabel lingkungan yang meliputi konsentrasi klorida, suhu dan pH. Variabel lain meliputi, misalnya tingkat tegangan, permukaan akhir dan kondisi metalurgi baja.

2.6 Faktor yang Mempengaruhi Korosi Retak Tegang Klorida

Berbagai faktor lingkungan telah diidentifikasi yang dapat mempengaruhi pengembangan CLSCC yang meliputi kandungan klorida, suhu, pH dan kontak dengan logam yang berbeda. Faktor-faktor yang mempengaruhi CLSCC, seperti (Parrott, 2011) :

- Suhu, pH, kadar klorida, tingkat oksigen dan kelembaban
- Efek potensial elektroda, misalnya kopling galvanik dan proteksi katodik.
- Tegangan terapan atau residual
- Paduan dan pengotor pada baja
- Sensitasi
- Kondisi yang berulang (*cyclic condition*)

2.7 Morfologi patahan SCC pada Baja Tahan Karat Austenitik

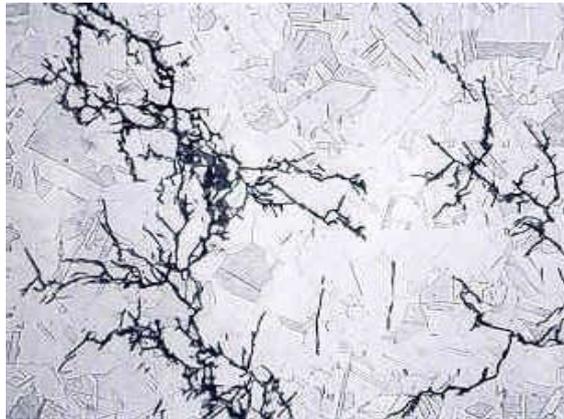
Bentuk patahan korosi retak tegang secara makroskopis pada umumnya termasuk kedalam jenis perpatahan getas. Yang mana memiliki ciri perpatahan yang rata, sedikit atau bahkan tidak terjadi deformasi plastis. Namun apabila perpatahan yang terjadi diamati dengan perbesaran



yang lebih besar dengan kata lain dalam skala mikro, maka akan terlihat beberapa jenis perpatahan, diantaranya :

1. Transgranular

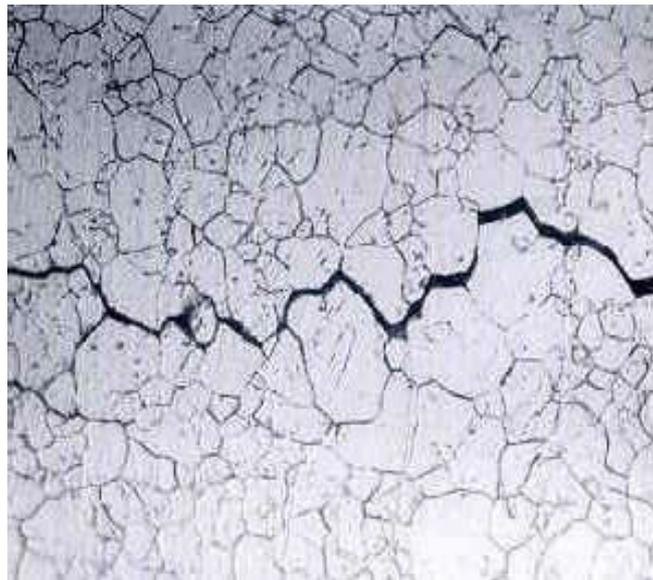
Perpatahan ini terjadi dengan mekanisme membelah butir. Umumnya terjadi pada *Yield Strength* rendah, 600-1200 MPa.



Gambar 2.2 Retakan transgranular pada baja tahan karat austenitic (Bulloch, 2004)

2. Intergranular

Perpatahan ini terjadi disepanjang batas butir. Umumnya terjadi pada *Yield Strength* tinggi, > 1400 MPa. Terjadi pada high pH SCC.



Gambar 2.3 Retakan intergranular pada baja tahan karat austenitic (Bulloch, 2004)



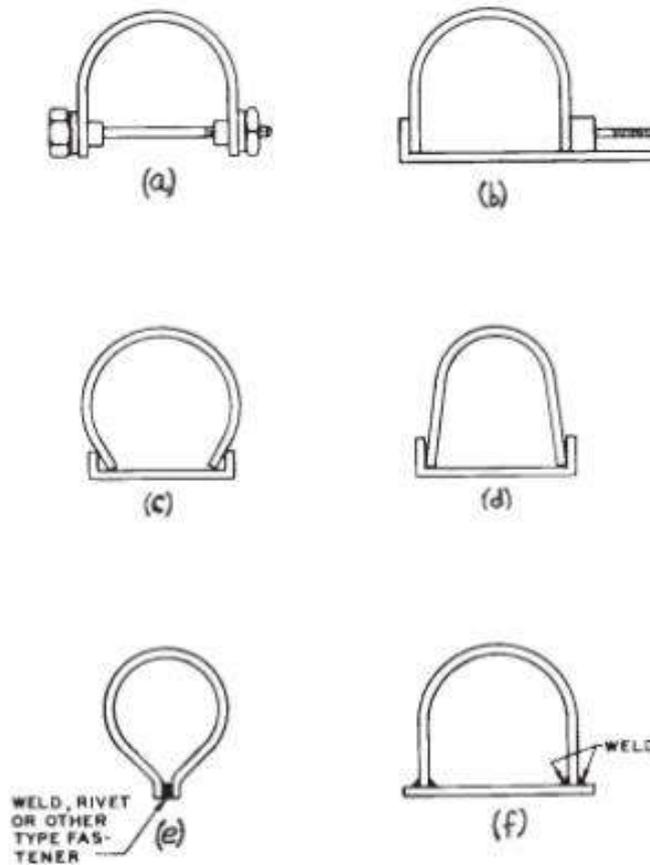
2.8 Metode Pengujian Stress Corrosion Cracking (SCC)

Pengujian korosi retak tegang dilakukan pada benda yang diberikan tegangan dan diaplikasikan pada lingkungan yang korosif. Tegangan yang diberikan dapat berupa tegangan Tarik atau berupa tekukan/bending. Adapun metode pengujian pada korosi retak tegang ini, antara lain : (Koch, 2001)

1. U-Bend
2. C-Ring
3. Bent Beam
4. Tensile

2.9 Metode Pengujian Korosi Retak Tegang Menggunakan *U-Bend*

(Koch, 2001) *U-bend* adalah salah satu metode dari *bent beam* untuk melihat fenomena korosi retak tegang dengan tegangan berada dalam batas elastis maupun plastis. Menurut ASTM G30 benda uji ditekuk hingga 180° di sekitar radius yang telah ditentukan dan dipertahankan dalam kondisi regangan konstan selama uji korosi retak tegang. Prinsip tegangan pada *U-bend* adalah melingkar. Tegangan ini tidak seragam karena (a) terdapat gradien tegangan melalui ketebalan benda uji mulai dari tegangan tarik maksimal pada permukaan luar hingga tegangan kompresi maksimal pada permukaan dalam, (b) tegangan bervariasi dari nol pada akhir benda uji hingga maksimal pada bagian tengah tekukan, (c) tegangan mungkin bervariasi di sepanjang lebar benda uji.



Gambar 2.4 Macam-macam pengaturan pada metode U-bend
(Koch, 2001)

Regangan total (ϵ) pada permukaan bagian luar benda uji dapat didikuti dengan persamaan sebagai berikut:

$$\epsilon = T/2R \text{ saat } T \ll R \quad (2.1)$$

$$R = T/2\epsilon$$

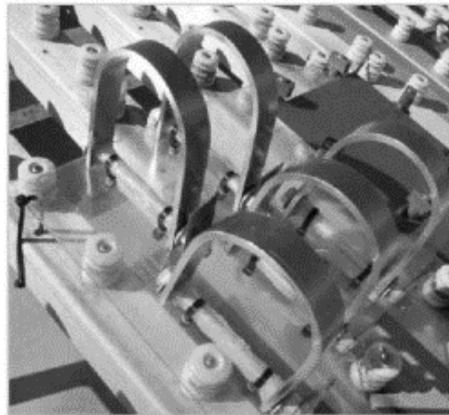
Dimana:

R adalah radius dari lengkungan, dan T adalah tebal dari material yang digunakan

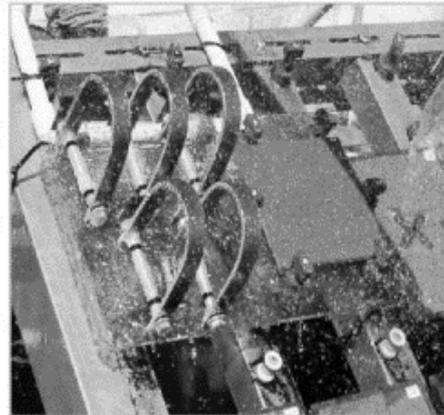


2.10 Kondisi Lingkungan untuk Pengujian Korosi di Daerah Laut

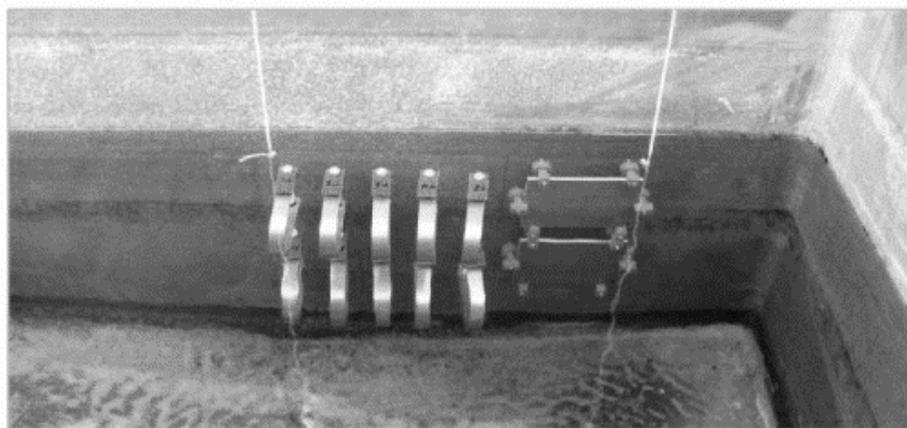
Pengujian untuk lingkungan laut memiliki berbagai kondisi, yaitu : (Bovard, 2004)



Atmospheric Exposure



Seawater Spray/Splash



Full Immersion/Tidal

Gambar 2.5 Gambar pengujian SCC pada lingkungan laut (Bovard, 2004)

1. Atmosfir pantai
 - Spesimen diekpos pada daerah pesisir dan spesimen ditaruh pada rak yang berorientasi. Dan rak tersebut diposisikan 150 kaki dari garis pantai, dan tetap pada lokasi itu sepanjang durasi pemaparan



2. Atmosfir ombak
 - Uji menggunakan siklus 1 jam yang mencakup periode paparan air laut 10 menit spesimen dicelupkan, diikuti dengan periode pengeringan 50 menit. Siklus ini diulang 24 jam sehari selama waktu pemaparan. Durasi bolak-balik paparan pencelupan dan pengeringan air laut serupa dengan pengujian laboratorium ASTM G44.
3. Pencelupan penuh
 - Pengujian ini bertujuan untuk meniru aplikasi dari material di laut dalam jangka waktu yang lama.
4. Pasang surut air laut
 - Kondisi pasang surut terjadi bila material terkena periode bolak-balik perendaman dan pengeringan. Kondisi ini dipenuhi dengan merendam spesimen dalam air laut yang terus-menerus diisi ulang selama 6 jam, diikuti oleh tambahan 6 jam saat spesimen dibiarkan mengering.

2.11 *Pitting Resistance Equivalent Number (PREN)*

(Jessen, 2011) Jika kita tetap berpegang pada elemen paduan yang berguna, Cr, Mo dan N, banyak eksperimen telah menunjukkan bahwa ketahanan baja terhadap inisiasi korosi pitting dapat diperkirakan dengan "Pitting Resistance Equivalent", yang disebut "PREN". PREN dihitung sesuai rumus di bawah ini, dan, sebagai aturan, semakin tinggi PREN, semakin tinggi resistansi terhadap korosi pitting. Dua nilai baja dengan PREN yang sama dapat diharapkan dapat melakukan hal yang sama baiknya terhadap korosi pitting.

$$\mathbf{PREN = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 16 \times \%N} \quad (2.2)$$

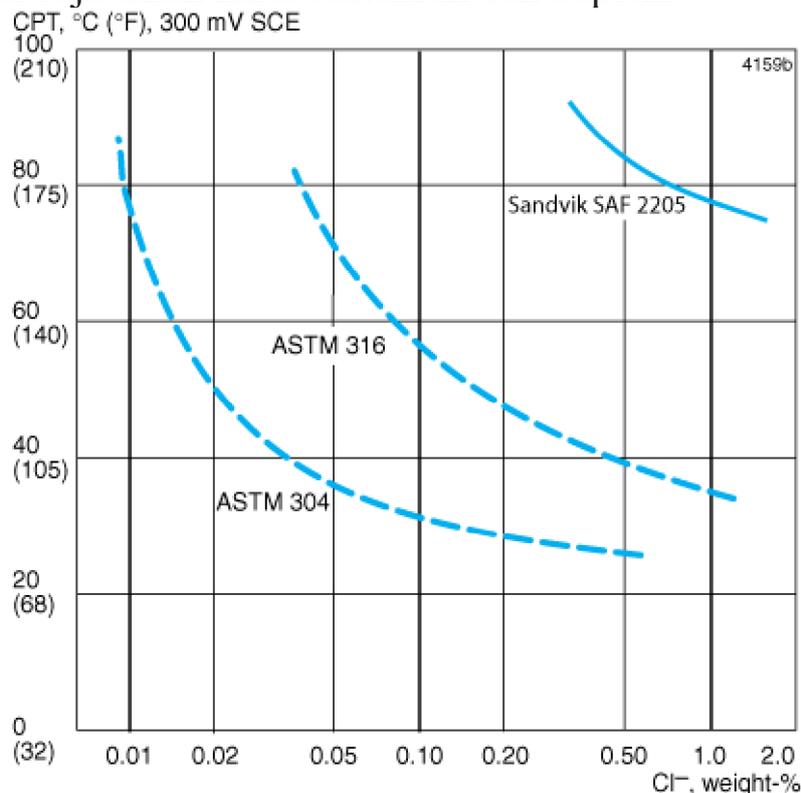
Harap dicatat bahwa molibdenum (Mo) bekerja dengan faktor 3,3 dan karena itu 3,3 kali lebih baik dari pada jumlah kromium (Cr) yang serupa. Dengan faktor 16, nitrogen bahkan lebih baik lagi, namun ini hanya berperan dalam baja



tahan karat dupleks dan austenit Melalui PREN, mungkin untuk menentukan ketahanan baja tahan karat tertentu terhadap inisiasi korosi pitting, dan bahkan memungkinkan untuk membuat daftar tabel nilai baja yang berbeda bersamaan dengan PREN mereka.

2.12 Critical Pitting Temperature (CPT)

CPT adalah temperatur minimum stainless steel mulai mengalami pitting. Pemakaian material yang rentan terhadap pitting juga harus memperhatikan CPT ini selain nilai PREN nya. Pada **Gambar 2.6** dibawah ini menjelaskan tentang pengaruh konsentrasi Cl^- dengan temperatur dalam berbagai material baja tahan karat austenitik dan dupleks.



Gambar 2.6 Pengaruh konsentrasi Cl^- dengan temperatur dalam berbagai material baja tahan karat austenitik dan dupleks. (Sandvik steel)



2.13 Korosi Sumuran

Prinsip dari *pitting corrosion*

(Ma, 2012) Korosi pitting adalah proses reduksi oksidasi, yang terjadi di dalam lapisan dalam pada permukaan logam yang dilapisi dengan film pasif.

Reaksi anodik di dalam lubang:



Elektron yang diberikan oleh anoda mengalir ke katoda dimana mereka diberikan dalam reaksi katodik:



Sebagai hasil dari reaksi ini elektrolit yang tertutup di pit memperoleh muatan listrik positif yang kontras dengan elektrolit yang mengelilingi lubang, yang menjadi bermuatan negatif.

Lubang bermuatan positif menarik ion negatif klorin Cl^- - meningkatkan keasaman elektrolit sesuai dengan reaksi:



pH elektrolit di dalam pit menurun dari 6 menjadi 2-3, yang menyebabkan percepatan proses korosi lebih lanjut. besar rasio antara daerah anoda dan katoda membuat kenaikan laju korosi. Produk korosi ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) terbentuk di sekitar lubang yang menghasilkan pemisahan elektrolit lebih jauh.

Tahapan *pitting corrosion*

Korosi pitting diperlakukan sebagai proses kerusakan stokastik bergantung waktu yang ditandai oleh pertumbuhan pit eksponensial atau logaritmik.

a. Inisiasi lubang

Lubang awal dapat terbentuk di permukaan yang ditutupi oleh film oksida pasif sebagai akibat dari hal berikut:

Kerusakan mekanis film pasif disebabkan oleh goresan. Partikel pada fase kedua muncul di permukaan logam. Partikel-partikel ini yang mengendap sepanjang batas butir dapat berfungsi sebagai anoda lokal yang menyebabkan korosi



galvanik lokal dan pembentukan lubang awal. Tekanan lokal dalam bentuk dislokasi yang muncul di permukaan bisa menjadi anoda dan lubang awal. Lingkungan non-homogen dapat melarutkan film pasif di lokasi tertentu dimana bentuk lubang awal terbentuk.

b. Pertumbuhan pitting

Dengan adanya ion klorida, lubang akan tumbuh secara autokatalitik.

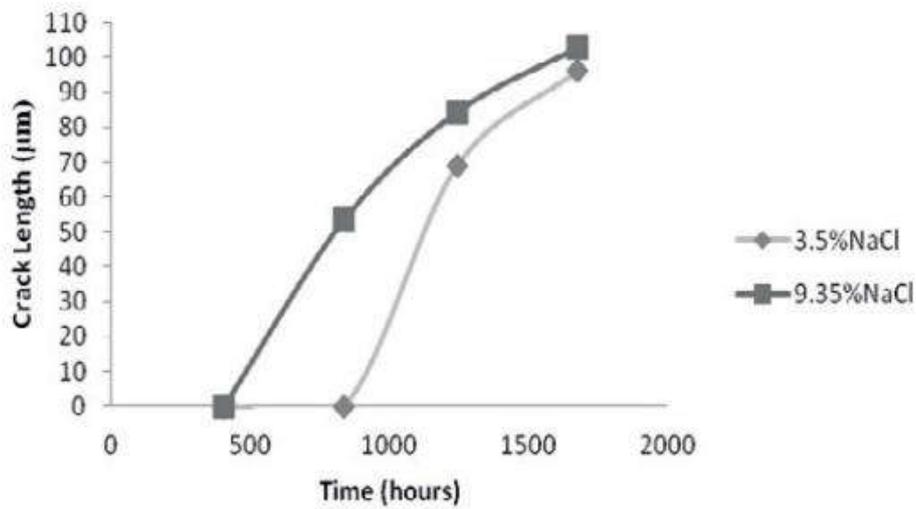
c. Transisi dari pitting ke nukleasi retak.

Tahap ketiga adalah transisi dari pertumbuhan pit ke nukleasi retak, dimana efek mekanis seperti faktor intensitas tegangan ikut berperan. Nukleasi retak korosi pada dasarnya adalah persaingan antara proses pertumbuhan pit dan pertumbuhan retak. Dua kriteria digunakan untuk menggambarkan proses transisi.

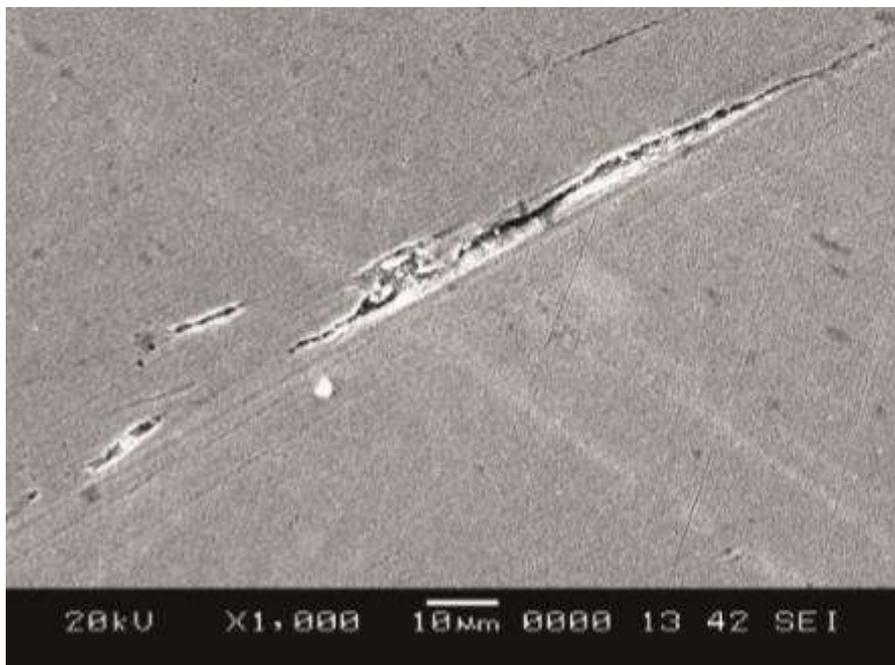
2.14 Penelitian Sebelumnya

A. SCC dilingkungan NaCl

(Elsariti, 2012) meneliti tentang stress corrosion cracking pada baja tahan karat AISI 316 pada media NaCl dengan variasi konsentrasi 3,5% dan 9,35% pada temperature kamar dengan pembebanan $0.9 \sigma_y$. Retakan terlihat pada periode pengujian di 404 jam untuk 3,5% NaCl dan 838 jam untuk 9,35% NaCl pada **Gambar 2.7**, dan gambar retak yang terjadi dapat dilihat pada **Gambar 2.8**



Gambar 2.7 Pertumbuhan retakan baja tahan karat 316 pada larutan NaCl 3,5% dan 9,35% (Elsariti, 2012)



Gambar 2.8 Gambar retak pada permukaan AISI 316 pada konsentrasi 3,5% pada temperatur kamar dengan perbesaran 1000x (Elsariti, 2012)



B. Stress Corrosion Cracking 304 pada Lingkungan NaCl

(sitorus, 2012) Pada pengaplikasiannya material ini banyak mengalami kegagalan SCC dalam lingkungan NaCl. Pengaruh tegangan terhadap kerentanan korosi retak tegang SS 304 dalam Lingkungan NaCl dilakukan dengan metode *bent beam* dengan variasi tegangan 30%, 40%, dan 50% dari tegangan luluh (*yield stress*).



Gambar 2.9 Pengujian bent beam dengan variasi tegangan 30%, 40%, dan 50% dari tegangan luluh (*yield stress*). (sitorus, 2012)

Pengujian dilakukan dengan *salt spray* selama 4 minggu dan dilakukan *dye penetrant test* **Gambar 2.10** untuk melihat keberadaan retak. Pengamatan mikrostruktur dilakukan untuk verifikasi hasil pengujian *dye penetrant test*.

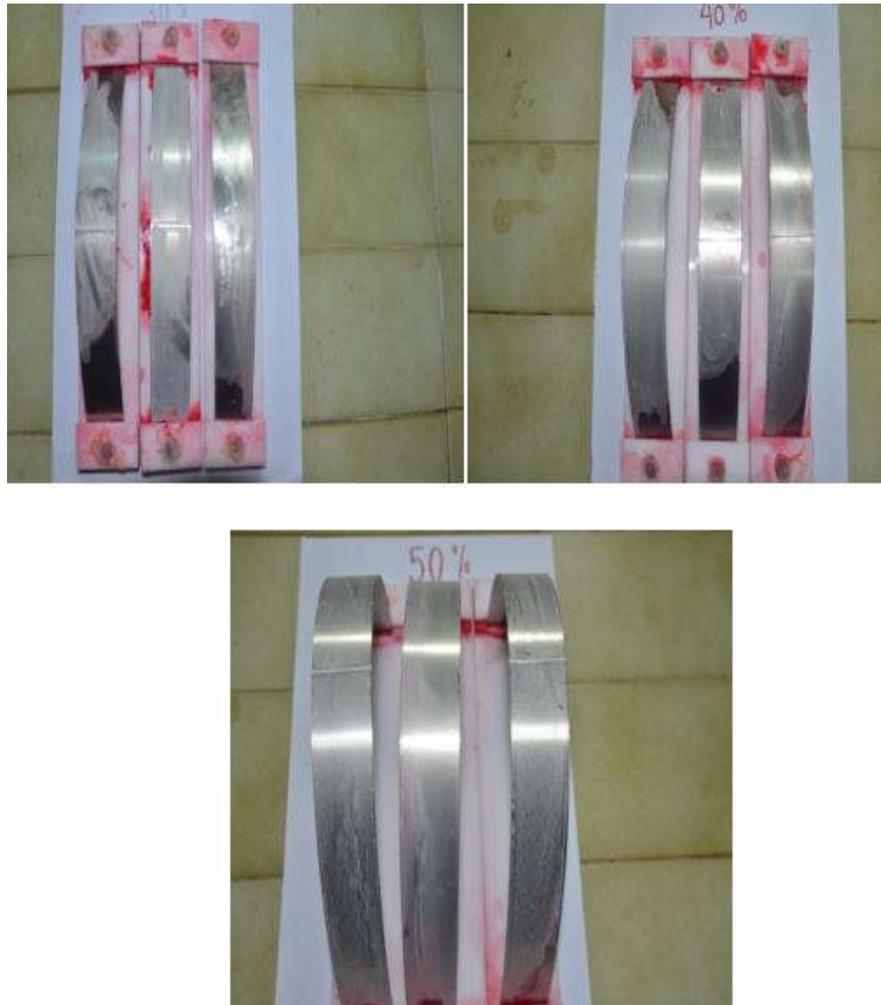
Pada pengujian makro visual **Gambar 2.11** di permukaan atas spesimen terlihat adanya *pitting*, dan pengamatan pada penampang spesimen terlihat adanya *pitting* namun tidak terlihat adanya retak.

Retak tidak terjadi pada setiap aplikasi tegangan. Namun, kerentanan terhadap korosi retak tegang ditentukan

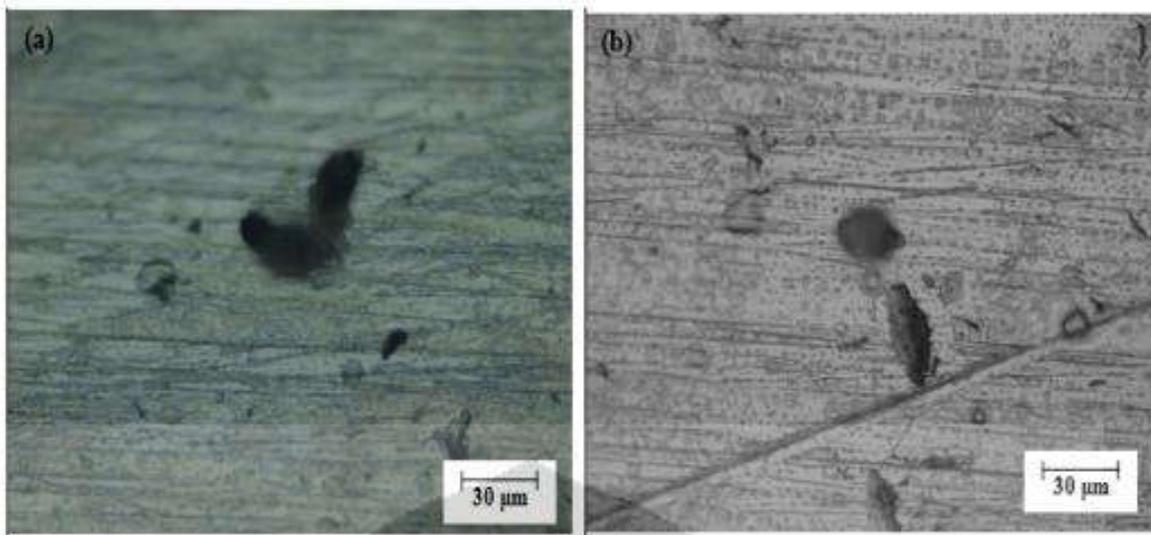
LAPORAN TUGAS AKHIR DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL



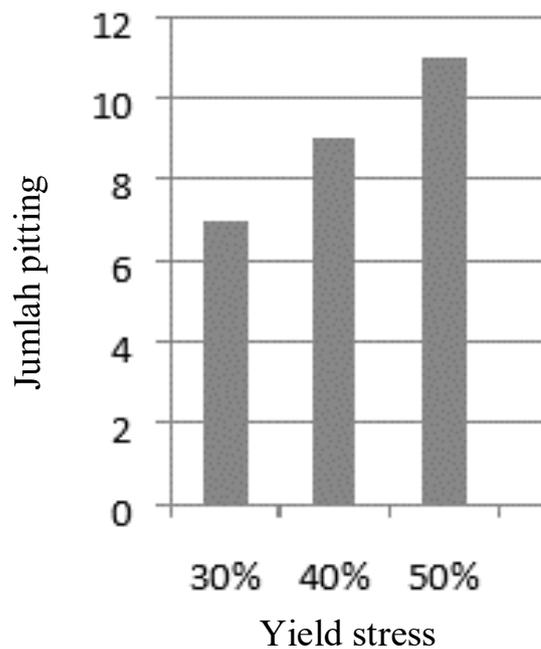
dengan densitas *pitting* pada setiap tegangan aplikasi. Semakin besar tegangan aplikasi maka densitas *pitting* semakin meningkat dan kerentanan terhadap korosi retak tegang juga semakin meningkat. Korosi yang terjadi pada SS 304 adalah *pitting corrosion*.



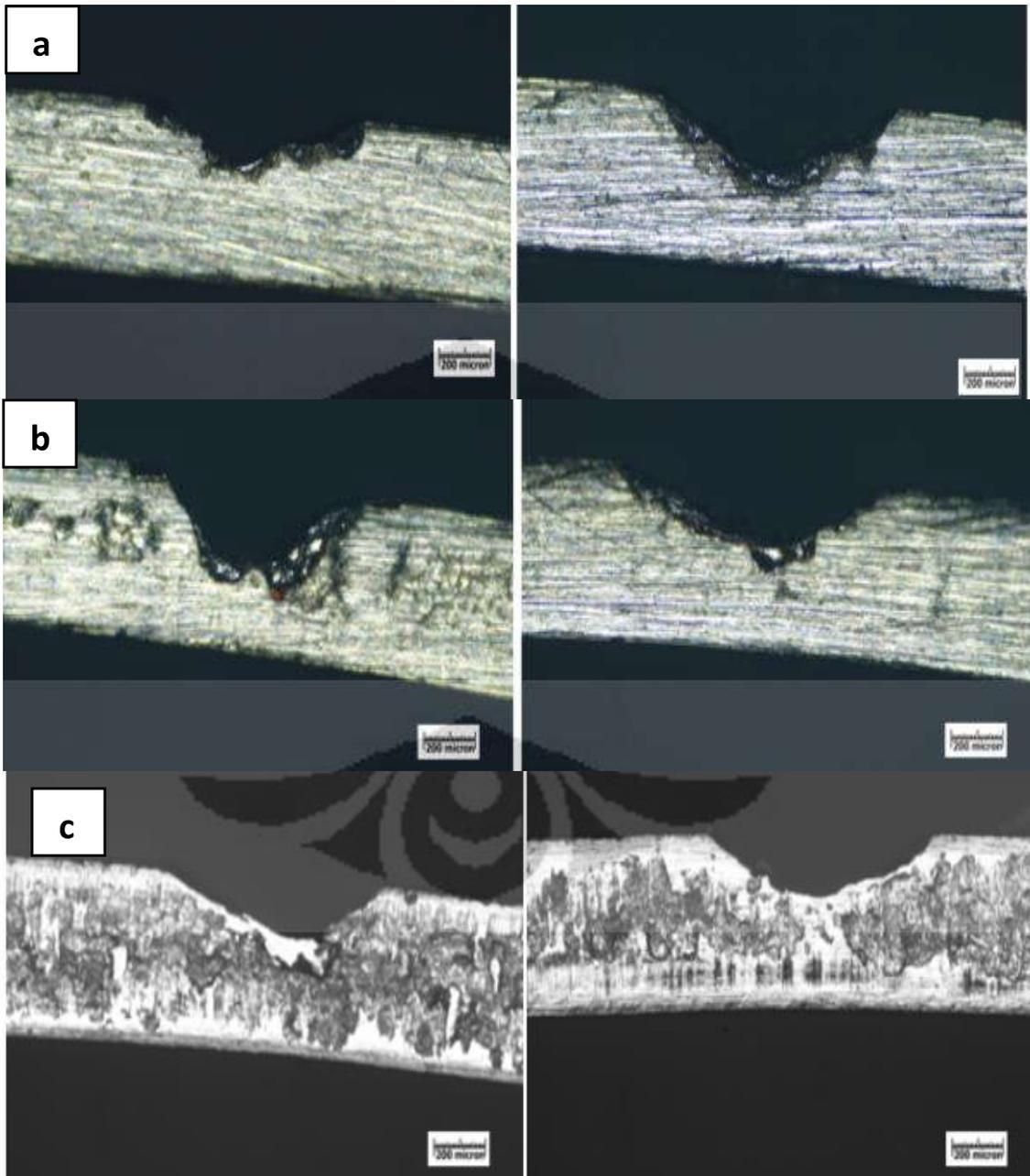
Gambar 2.10 Gambar hasil pengujian penetran pada spesimen (sitorus, 2012)



Gambar 2.11 pitting yang terjadi pada SS 304 dengan pembesaran 500X (sitorus, 2012)



Gambar 2.12 Grafik pengaruh tegangan terhadap jumlah korosi pitting yang terjadi (sitorus, 2012)



Gambar 2.13 Gambar pengamatan penampang melintang dengan perbesaran 50x pada a. 30% b. 40% c. 50% *yield stress* (SITORUS, 2012)

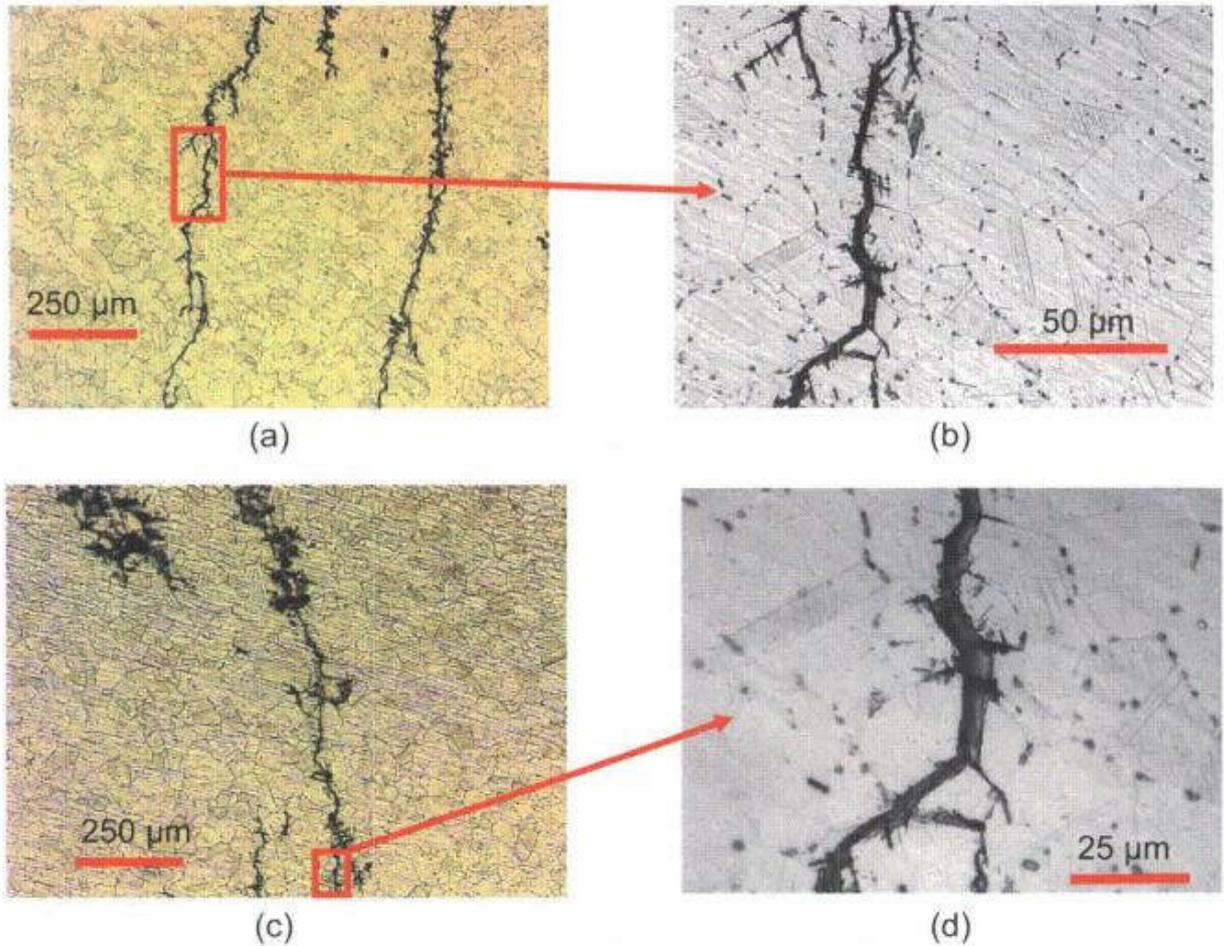


C. Stress Corrosion Cracking 304,304L dan 316L di Lingkungan air laut pada Temperatur 43°C

Penelitian dari (Caseres & Mintz, 2010) membandingkan perilaku korosi dari baja tahan karat 304, 304L, dan 316L pada lingkungan air laut dengan temperatur 43°C selama 4 minggu dengan metode U-Bend. Dari hasil pengamatan, pada material 304 dan 304L mengalami retak dengan panjang 3 μm . Dan pada material 316L tidak mengalami retak pada eksaminasi visual. Setelah itu, pengujian diperpanjang sampai 16 minggu. Setelah waktu pengujian diperpanjang ditemukan adanya retak yang dapat dilihat pada **Gambar 2.15**



Gambar 2.14 Gambar dari baja tahan karat AISI 304 setelah pengujian selama 16 minggu. (Caseres & Mintz, 2010)

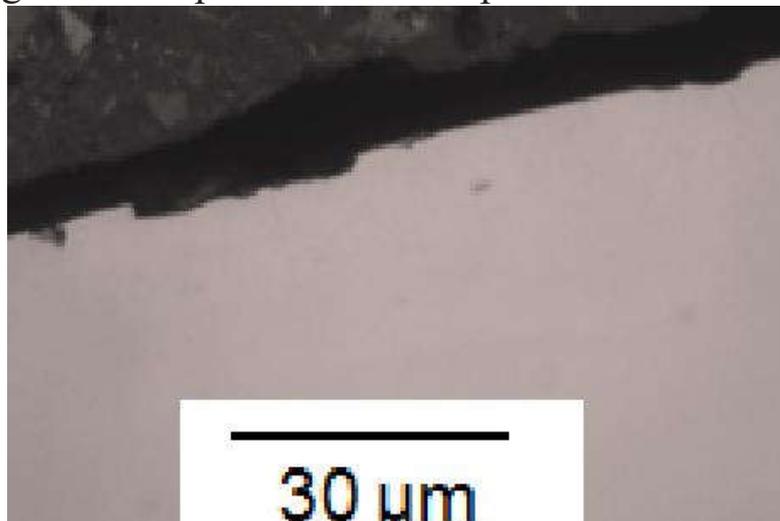


Gambar 2.15 Gambar retak pada spesimen dengan pengujian selama 16 minggu dan temperatur 43°C (a dan b) retak pada 304 (c dan d) retak pada 304L (Caseres & Mintz, 2010)

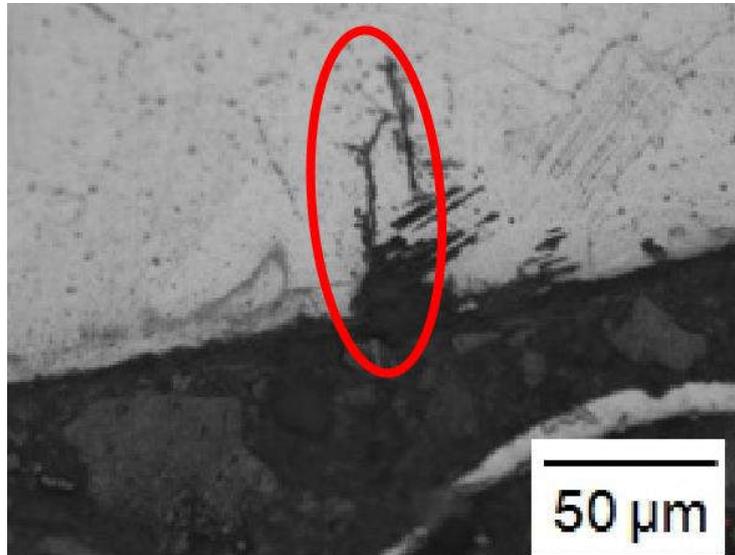


D. Stress Corrosion Cracking 304 dan 304L pada Lingkungan yang Mengandung Klorida

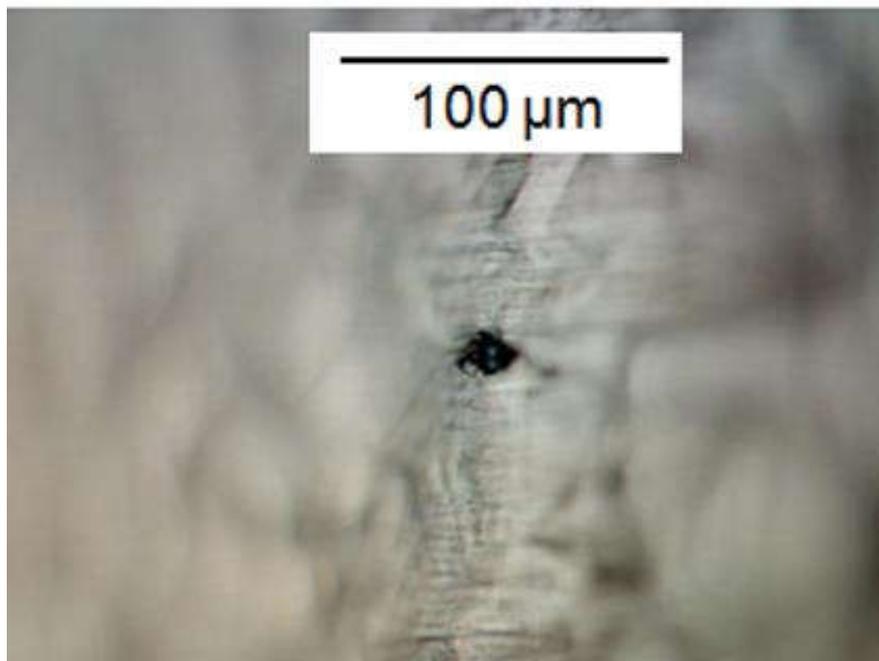
Faktor temperatur memiliki peran penting untuk terjadinya korosi retak tegang, pada **Gambar 2.16** tidak ditemukan adanya retak pada pengamatan penampang spesimen, meskipun pengujian dilakukan selama 8 bulan dengan pembebanan 2.4 yield stress . Sedangkan pada **Gambar 2.17** terlihat adanya retak pada penampang spesimen, dan pengujian dilakukan selama 1 bulan dengan temperatur 45°C . Dan pada **Gambar 2.18** merupakan pitting yang terjadi pada pengamatan di permukaan atas spesimen.



Gambar 2.16 Gambar penampang dengan pembebanan 2.4 yield stress pada media air laut dengan temperatur 27°C selama 8 bulan (He, 2014)



Gambar 2.17 Gambar penampang pada temperature 45°C selama 1 bulan (He, 2014)

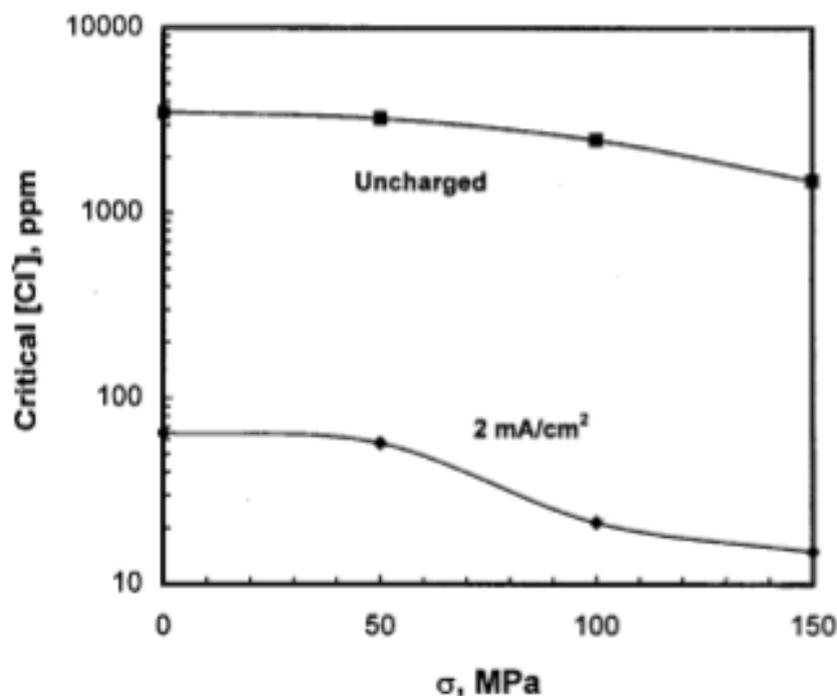


Gambar 2.18 Gambar pitting pada permukaan pada temperature 30°C selama 1 bulan (He, 2014)



E. Pengaruh Tegangan terhadap Berkembangnya Pitting

Pada penelitian dari (Yang, 2001) , pada material baja tahan karat AISI 304 diberikan beban dan tanpa beban untuk mengetahui pengaruh beban terhadap *critical chloride concentration*. Bertambahnya tegangan menurunkan *critical chloride concentration*. *critical chloride concentration* adalah konsentrasi klorida yang dibutuhkan untuk merusak lapisan pasif. Sehingga bertambahnya tegangan dapat meningkatnya kerentanan terhadap *pitting* .



Gambar 2.19 gambar pengaruh tegangan terhadap critical chloride concentration dalam perusakan lapisan pasif (Yang, 2001)

menurut (Tanahashi, 1999) berdasarkan analisa termodinamika kompresi dapat menurunkan laju difusi, dan tegangan tarik dan tekukan dapat meningkatkan laju difusi. Dan pada penelitian dari (Mankowski, 1957) pada baja tahan karat AISI 304 yang diberi pembebanan membuat migrasi ion Cl^- pada permukaan material lebih cepat.



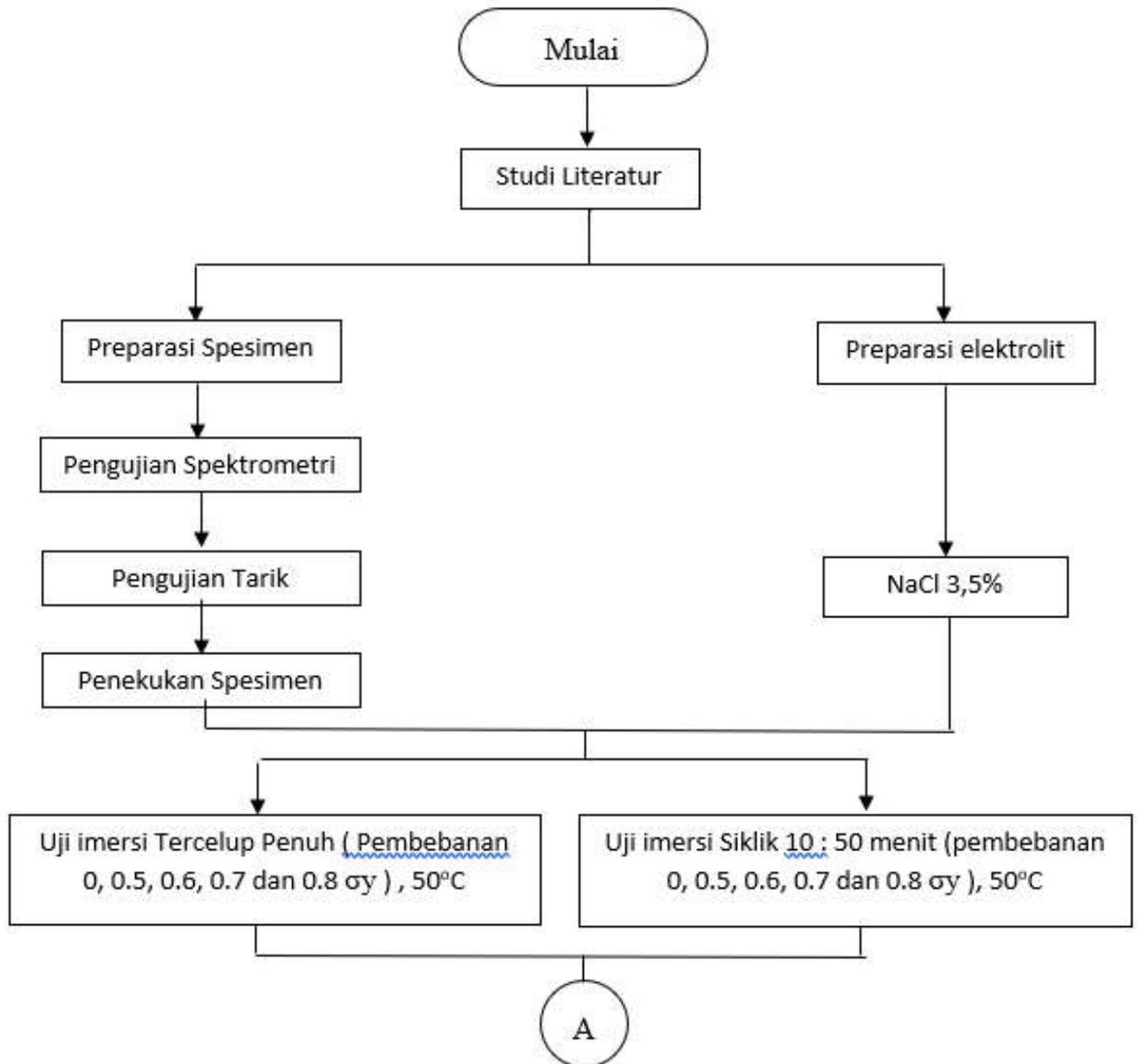
F. Pengaruh Siklus Perendaman terhadap *Pitting Corrosion*

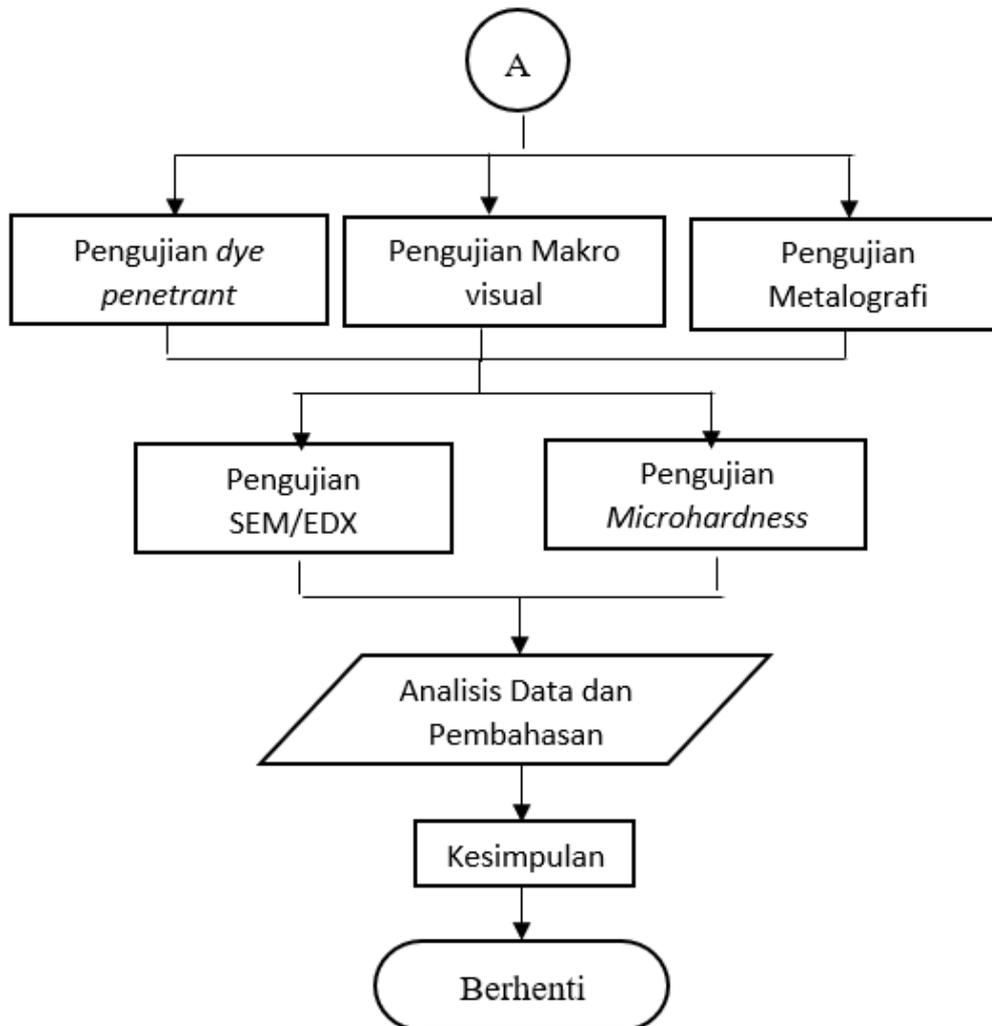
Berdasarkan (Xiuming, 2015) menganalisa pengaruh perilaku korosi sumuran pada baja AISI 4135 di lingkungan ombak air laut. Adanya alternasi basah dan kering (simulasi ombak air laut) yang terjadi pada spesimen membuat persediaan O_2 yang melimpah yang membuat pitting corrosion semakin mudah berkembang. Bertambahnya oksigen pada lingkungan dapat menambah proses hidrolisis oksigen dan air, dari reaksi hidrolisis tersebut menghasilkan OH^- yang berikatan dengan Fe^{2+}/Fe^{3+} yang tertarik ke permukaan benda karena adanya ion klorida.



BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Metode Perancangan

Metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur mengacu pada buku-buku, jurnal-jurnal dan penelitian-penelitian sebelumnya yang mempelajari mengenai korosi retak tegang, khususnya penelitian yang menggunakan elektrolit NaCl, korosi pada air laut dan pembebanan.



2. Eksperimen

Metode ini dilakukan dengan pengujian sesuai dengan prosedur dan standar yang ada. Adapun pengujian yang diperlukan dalam penelitian ini adalah pengujian penetran , makro visual, SEM, dan EDX.

3.3 Alat-alat Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain :

1. Gelas beaker Pyrex 1L
2. Gelas ukur pyrex
3. Spatula
4. Mesin potong
5. Kayu
6. Chamber plastik
7. Benang bol
8. Kertas amplas (grade 80, 120, 240, 480, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000)
9. Penggaris
10. Timbangan digital Toledo meter
11. Kamera
12. Mesin uji spektrometri
13. Mikroskop Stereo
14. Mesin uji SEM/EDX
15. Rangkaian percobaan immerse
16. Mesin uji microhardness
17. Termometer
18. Baterai 9V
19. Kabel

3.4 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja tahan karat AISI 304 dengan tebal 0.6 mm. Benda uji tersebut didesain sesuai dengan pengujian defleksi



dengan metode *U-Bend* dimana masing-masing variasi pembebanan memiliki dimensi panjang yang berbeda tergantung dengan variasi pembebanannya.

2. Larutan Elektrolit
larutan elektrolit yang digunakan adalah NaCl dengan konsentrasi 3,5%
3. Aquades
Aquades atau air suling digunakan untuk mengencerkan larutan elektrolit.
4. Larutan etsa
Larutan etsa yang digunakan adalah $H_2C_2O_4$ 10% (asam oksalat) untuk memperlihatkan batas butir dari baja AISI 304

3.5 Prosedur Penelitian

A. Pengujian Spektrometri

Pengujian spektrometri bertujuan untuk mengetahui persentase komposisi kimia yang terkandung dalam benda uji. Pada penelitian ini pengujian spektrometri dilakukan di Laboratorium PT. Timur Megah Steel – Gresik. *Optical Emission Spectrometer (OES)* adalah salah satu teknik spektroskopi yang meneliti panjang gelombang foton yang dipancarkan oleh atom atau molekul selama transisi dari keadaan tereksitasi ke keadaan energi yang lebih rendah. Setiap elemen memancarkan karakteristik panjang gelombangnya tersendiri sesuai dengan struktur elektronnya. Dengan mengamati panjang gelombang tersebut, komposisi unsur dari sebuah material dapat ditentukan. Adapun prosedur pengujian spektrometri adalah :

1. Meratakan permukaan benda uji dengan menggunakan gerinda perata jika permukaan belum rata.
2. Memasang benda uji pada ruang penembakan
3. Mendapatkan data komposisi unsur benda uji

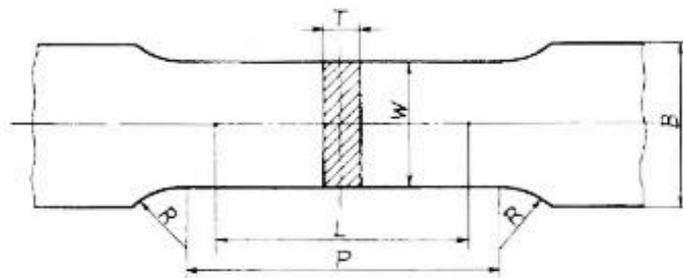


Gambar 3.2 Alat spectrometer PT. Timur Megah Steel.

Pengujian spektrometri dilakukan 3 kali pada 3 titik yang berbeda.

B. Preparasi Spesimen Uji Tarik

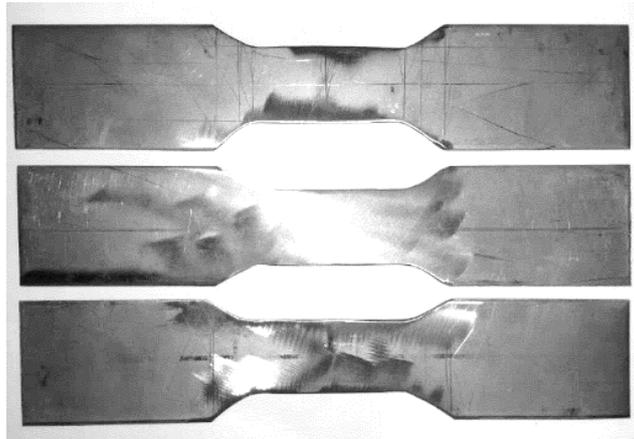
Pengujian tarik dilakukan untuk mendapatkan nilai tegangan yang digunakan untuk variasi pembebanan. Preparasi sampel uji Tarik dilakukan dengan memotong sampel berdasarkan standar JIS Z 2201. Pengujian tarik dilakukan di Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material dan Metalurgi. Adapun dimensi dari spesimen uji tarik pada gambar berikut



Unit : mm

Width W	Gauge length L	Parallel length P	Radius of fillet R	Thickness T
25	50	60 approx.	15 min.	Thickness of material

Gambar 3.3 Dimensi spesimen uji tarik (E008, 2003)



Gambar 3.4 Spesimen uji tarik

Setelah proses pemotongan sesuai dimensi, meratakan permukaan sampel agar tidak terdapat konsentrasi tegangan pada daerah yang tidak rata adapun. Adapun langkah-langkah pengujian seperti berikut :

1. Menyiapkan benda uji tarik yang sesuai dengan gambar 3.1
2. Meratakan spesimen dari adanya takikan untuk menghindari konsentrasi tegangan.
3. Melakukan pengujian tarik pada masing-masing benda uji.
4. Menganalisa hasil kurva $P-\Delta l$



Gambar 3.5 Alat uji tarik

C. Perhitungan Dimensi Spesimen

Pada penelitian ini, dimensi spesimen uji merupakan fungsi tegangan terhadap kerentanan korosi retak tegang. Oleh karena itu, tegangan divariasikan untuk mengetahui kerentanannya. Variasi tegangan yang diaplikasikan pada penelitian ini adalah tanpa pembebanan/0, 0.5, 0.6, 0.7, dan 0.8 *yield stress*. Untuk mendapatkan tegangan aplikasi ini, dilakukan perhitungan untuk menentukan dimensi sampel pengujian.

**LAPORAN TUGAS AKHIR
DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL**



Langkah pertama adalah menghitung nilai dari 0.5, 0.6, 0.7 dan 0.8 dari *yield stress*. Setelah didapatkan nilai dari setiap tegangan maka, dicari nilai regangan (*strain*) dari setiap variasi tegangan pada tabel 4.5. menunjukkan hasil perhitungan regangan dari setiap variasi tegangan.

Tabel 3.1 Tabel besarnya regangan elastis benda uji berdasarkan presentase *yield stress*

yield stress	Tegangan (MPa)	Regangan
0.5	157.58	0.00959
0.6	189.09	0.01151
0.7	220.61	0.01343
0.8	252.12	0.01535

Setelah mendapatkan nilai regangan dari setiap variasi persen *yield stress*, langkah yang dilakukan selanjutnya adalah menentukan radius dari tekukan dengan rumus sebagai berikut :

$$\varepsilon = T/2R \quad (2.1)$$

$$R = T/2\varepsilon$$

Dengan T adalah tebal spesimen, R adalah radius dari tekukan, dan ε adalah regangan. Setelah melakukan perhitungan didapatkan radius tekukan untuk masing-masing pembebanan pada tabel berikut :

Tabel 3.2 Tabel perhitungan dimensi spesimen

Pembebanan (σ_y)	regangan (ε)	Tebal spesimen (mm)	Radius (mm)	Panjang tekukan (mm)
0.5	0.00959	0.6	31.28	98.21
0.6	0.01151	0.6	26.05	81.80
0.7	0.01343	0.6	22.34	70.15
0.8	0.01535	0.6	19.54	61.35

D. Preparasi Spesimen

Benda uji yang dilakukan pada percobaan ini adalah baja tahan karat AISI 304 dengan ketebalan 0,6 mm. adapun langkah-langkah preparasinya seperti berikut :

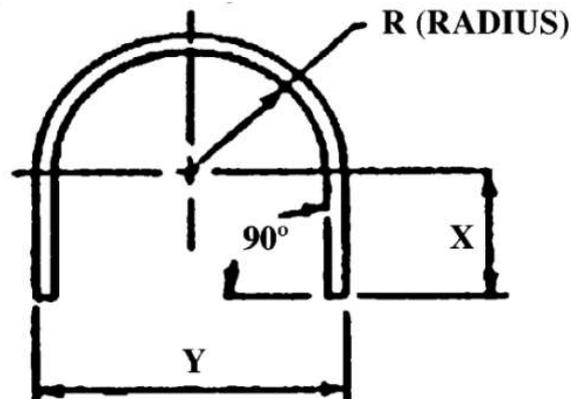


1. Benda uji dipotong menjadi ukuran-ukuran sesuai dengan perhitungan dimensi panjang spesimen sehingga diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 3.3 Tabel dimensi spesimen

Yield Stress	dimensi
0	12 x 3 x 0,06 cm
0,5	19.8 x 3 x 0,06 cm
0,6	18.2 x 3 x 0,06 cm
0,7	17,01 x 3 x 0,06 cm
0,8	16,13 x 3 x 0,06 cm

2. Kemudian pada masing-masing permukaan diratakan dengan amplas.
3. Setelah itu menekuk benda sesuai dengan radius pada tiap variasi tegangan. Dengan dimensi seperti berikut :



Gambar 3.6 Gambar bentuk benda uji untuk *U-bend test*

Tabel 3.4 tabel dimensi ukuran dari variasi pembebanan

Pembebanan	R (mm)	X (mm)	Y (mm)
0.5	31.28	50	62.56
0.6	26.05	50	52.10
0.7	22.34	50	44.68
0.8	19.54	50	39.08



Setelah membentuk spesimen sesuai dengan dimensi diatas, didapatkan benda uji seperti pada gambar berikut :



Gambar 3.7 Gambar spesimen dengan metode U-bend

E. Preparasi Larutan Elektrolit

Pada penelitian ini, larutan elektrolit yang digunakan adalah larutan NaCl 3,5% sebanyak 5000 ml. langkah-langkah pembuatan larutan NaCl 3,5% 5000 ml adalah sebagai berikut :

1. Timbang garam NaCl sebanyak 175 gram dengan menggunakan timbangan digital
2. Tuangkan garam NaCl ke dalam gelas beaker
3. Isi gelas beaker dengan aquades sampai volume 5000 ml
4. Aduk larutan garam NaCl agar didapatkan larutan yang homogen dan garam NaCl dapat larut dengan sempurna
5. Larutan siap untuk digunakan.

F. Proses Pengujian *Immersion*

Setelah preparasi spesimen dan preparasi elektrolit selesai, maka dimulai proses pengujian. Pada penelitian ini menggunakan *immersion test* dengan dua kondisi, yang pertama spesimen dalam kondisi tercelup penuh dan yang kedua *immersion test* berdasarkan ASTM G44 dimana



spesimen dalam kondisi tercelup 10 menit dan spesimen dalam kondisi kering 50 menit yang menggunakan alat seperti gambar dibawah. Pengujian *immersion* dilakukan pada larutan NaCl 3,5% dengan kondisi temperatur 50°C yang dikondisikan dengan sensor temperature dan *dimmer*.



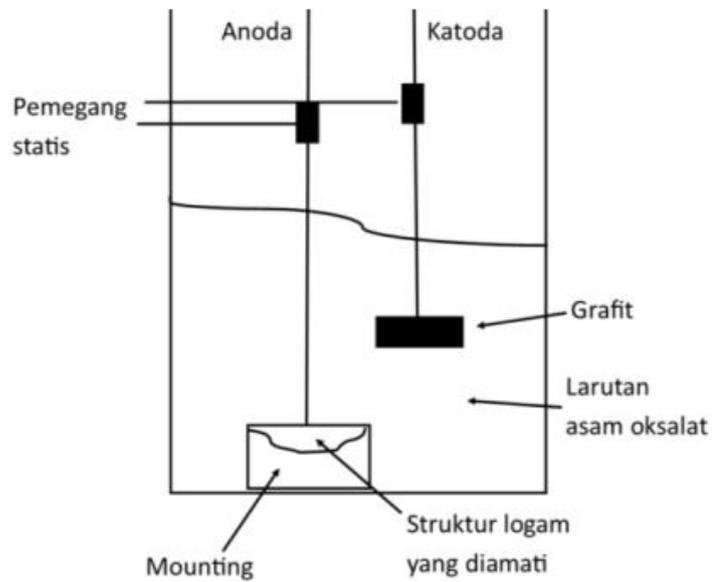
Gambar 3.8 Gambar alat untuk pengujian immersion test Pengujian berlangsung selama 14 hari atau 2 minggu.

G. Preparasi Larutan Etsa dan Proses Pengetsaan.

Pada penelitian ini, menggunakan etsa asam oksalat 10% sebanyak 500 ml. langkah-langkah pembuatan larutan asam oksalat 10% 500 ml adalah sebagai berikut :

1. Timbang asam oksalat sebanyak 50 gram dengan menggunakan timbangan digital
2. Tuangkan asam oksalat kedalam gelas beaker
3. Isi gelas beaker dengan aquades sampai 500 ml
4. Tambahkan aquades dan aduk hingga asam oksalat larut dengan sempurna.
5. Larutan etsa siap untuk digunakan.

Proses etsa dilakukan secara elektrolitik dengan menggunakan lembaran platinum sebagai katoda dan spesimen anoda ditempatkan dalam gelas ukur, penggunaan catu daya potensial +9V dan lamanya proses elektrolisi selama 1 menit.



Gambar 3.9 Skema rangkaian untuk elektroetsa



Gambar 3.10 Proses elektroetsa dengan larutan asam oksalat 10%



H. Pengujian penetran (Liquid Penetrant Testing)

Uji penetran termasuk metode uji tanpa rusak yang mampu menentukan lokasi cacat seperti *laps*, *folds*, *cracks* dan *porosity* yang terbuka di permukaan suatu material atau komponen. Langkah – langkah yang harus dilakukan dalam uji penetran adalah sebagai berikut:

1. Preparasi permukaan benda uji (*pre-cleaning*)
2. Aplikasi *liquid penetrant*
3. Pembersihan *penetrant* yang berlebihan dan pengeringan
4. Pemberian *developer*
5. Evaluasi dan *post cleaning*



Gambar 3.11 Gambar tabung penetrant, cleaner, dan developer

I. Pengujian Makro Visual dan Mikro Visual

- **Pengujian Makro Visual**

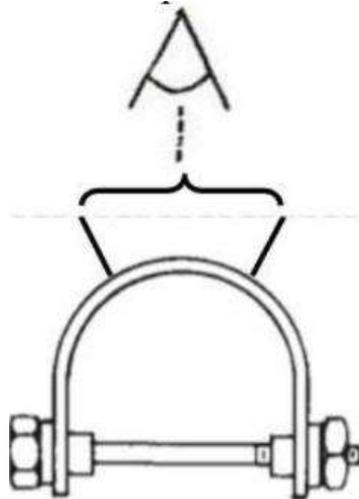
Pengujian makro visual ini dilakukan untuk mengetahui morfologi permukaan spesimen yang telah dilakukan pembebanan dalam larutan elektrolit, Pengamatan ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop stereo Zeiss Stemi

LAPORAN TUGAS AKHIR DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL



DV4 di Laboratorium Metalurgi Teknik Material ITS Surabaya. Tujuan dari dilakukan pengamatan makro ini adalah untuk mengetahui morfologi korosi dari benda uji pada bagian permukaan. Adapun bagian permukaan benda uji adalah bagian tengah atau bagian tekukan dari benda uji dimana tegangan terbesar. Adapun tahapan pengujian makro visual adalah sebagai berikut:

1. Benda uji hasil pengujian immerse dipotong sesuai daerah pengamatan seperti pada gambar berikut :



Gambar 3.12 Ilustrasi titik pengamatan untuk pengujian makro visual

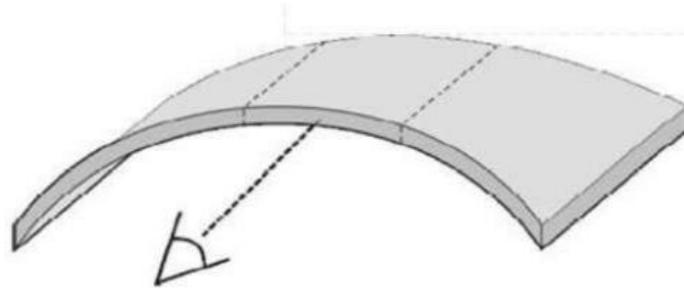
2. Permukaan benda uji diamati dibawah mikroskop stereo dengan perbesaran 32x untuk semua permukaan spesimen.
3. Mendokumentasikan hasil pengamatan makro visual.



Gambar 3.13 Mikroskop stereo zeiss stemi DV4

- **Pengujian Mikro Visual**

Pengujian mikro visual dilakukan untuk mengetahui kondisi penampang spesimen bagian atas apakah ada pitting atau retak pada spesimen tersebut. Pengujian mikrovisual dilakukan dengan menggunakan mikroskop trinokular Olympus BX51M di Laboratorium Metalurgi Teknik Material ITS Surabaya. Sebelum melakukan pengujian material dimounting dengan resin dan setelah itu di amplas dari grade 80 sampai 2000. Sebelum pengamatan dilakukan elektroetsa dengan asam oksalat 10%. Pengamatan dilakukan dengan pembesaran 500x dan 1000x



Gambar 3.14 Daerah pengamatan bagian penampang dari spesimen



Gambar 3.15 Mikroskop Trinokular Olympus BX51M

J. Pengujian Scanning Electron Microscopy (SEM) /EDX

Pengujian menggunakan SEM/EDX menggunakan instrument Scanning Electron Microscopy (SEM) dengan tujuan mengetahui morfologi permukaan korosi dan retakan serta unsur yang terbentuk di daerah korosi dan retakan. Pengujian dilakukan dengan FEI Inspect S50 di Teknik Material dan Metalurgi ITS Surabaya.

Adapun tahapan melakukan uji SEM-EDX adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan benda uji yang telah dilakukan uji imersi
2. Benda uji diletakkan pada holder agar pengamatan SEM EDX sesuai yang diinginkan



3. *scanning* pada benda uji sehingga didapatkan morfologi dan unsur pada spesimen uji
4. Data tampil pada komputer berupa gambar dan grafik yang menyatakan unsur
5. Pengambilan data



Gambar 3.16 Alat pengujian SEM/EDX FEI inspect S50

K. Pengujian *Microhardness*

pengujian microhardness dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan pada material awal, daerah retak, daerah didekat retak, dan daerah jauh dengan retak, pengujian dilakukan dengan microhardness WILSON 302MVD di Laboratorium Metalurgi Teknik Material dan Metalurgi ITS Surabaya.



Gambar 3.17 Peralatan microhardness WILSON 402MVD

3.6 Tabel Eksperimen/Pengujian

Berikut adalah tabel pengujian dan data yang didapat dari pengujian tersebut

Tabel 3.5 tabel eksperimen

No.	Pengujian	Data Yang Didapat
1.	Pengujian tarik	- Yield strength - Modulus elastisitas
2.	Pengujian spektrometri	- Komposisi kimia dari suatu material

**LAPORAN TUGAS AKHIR
DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL**



3.	Pengujian penetrant	- Mengetahui ada tidaknya crack pada permukaan spesimen
4.	Pengujian makro visual dan metalografi	- Gambar strukturmikro spesimen - Morfologi dari spesimen yang diuji
5.	Pengujian SEM/EDX	- mengetahui topografi permukaan - unsur yang ada pada setiap bagian pitting dan retakan
6.	<i>Microhardness</i>	- Mengetahui nilai kekerasan pada daerah retak, disekitar retak, dan jauh dari retak.

Tabel 3.6 Tabel rancangan eksperimen

Siklus Perendaman	Tegangan yang diberikan	Nilai kekerasan (microhardness)	Ada tidaknya retakan (penetrant testing, mikroskop)	Jenis korosi yang terjadi (mikroskop optik)	Unsur yang ada (SEM/EDX)	Observasi Retakan (SEM)
<i>Full immersion</i>	0 yield					
	0,5 yield					
	0,6 yield					
	0,7 yield					
	0,8 yield					
<i>Siklik immersion (10:50)</i>	0 yield					
	0,5 yield					
	0,6 yield					
	0,7 yield					
	0,8 yield					

**LAPORAN TUGAS AKHIR
DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL**



Tabel 3.7 Tabel jadwal penelitian

<u>Rencana kegiatan</u>	<u>Minggu ke-</u>													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<u>Studi literatur</u>	■	■	■											
<u>Preparasi alat, dan bahan</u>				■	■	■								
<u>Proses pengujian</u>							■	■	■					
<u>Analisis hasil dan pembahasan</u>									■	■	■			
<u>Pembuatan laporan</u>											■	■	■	■



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

Dari penelitian yang telah dilaksanakan, maka didapatkan sejumlah data, berupa foto, gambar, dan data numerik yang meliputi nilai komposisi material, nilai pengujian Tarik, hasil *penetrant testing*, foto morfologi spesimen.

4.1.1 Hasil Pengujian Spektrometri

Komposisi unsur spesimen dideteksi menggunakan instrumen *optical emission spectrometer* (OES).



Gambar 4.1 a. Gambar spesimen SS 304 sebelum pengujian spektrometri b. Gambar spesimen SS 304 setelah pengujian spektrometri

LAPORAN TUGAS AKHIR
DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL



Dan setelah pengujian spektrometri didapatkan data dengan hasil pada tabel berikut :

Tabel 4.1 Tabel hasil pengujian *optical emission spectrometer* (OES)

Unsur	Sampel Uji ke 1 (%)	Sampel Uji ke 2 (%)	Sampel Uji ke 3 (%)	Rata-rata (%)
Cr	18.400	18.600	18.600	18.500
Ni	8.470	8.670	8.530	8.560
Mo	0.0478	0.045	0.043	0.045
N	-	0.456	0.512	0.484
C	0.065	0.056	0.052	0.058
Si	0.566	0.568	0.562	0.565
Mn	1.180	1.190	1.160	1.176
P	0.052	0.049	0.050	0.051
S	0.003	0.004	0.009	0.005
Al	0.008	0.007	0.008	0.008
Co	0.185	0.186	0.181	0.184
Cu	0.032	0.033	0.033	0.033
Nb	0.028	0.031	0.033	0.031
Ti	0.002	0.002	0.002	0.002
V	0.073	0.076	0.077	0.075
W	0.017	0.013	0.015	0.015
Pb	0.010	0.010	0.011	0.010
Sn	0.006	0.007	0.005	0.006
Fe	71.800	71.000	71.100	71.300



Tabel 4.2 Tabel perbandingan komposisi material SS 304 berdasarkan ASTM A240 dengan hasil uji *optical emission spectrometer* (OES)

Unsur	ASTM A240 (%)	Sampel Uji Stainless Steel 304
Cr	18-20	18.500
Ni	8-10.5	8.560
C	Max 0.08	0.057
Si	Max 0.75	0.565
Mn	Max 2.00	1.176
Mo	-	0.045
Al	Max 0.063	0.008
Co	-	0.184
Cu	-	0.033
Nb	-	0.030
Ti	-	0.002
V	-	0.075
W	-	0.015
Pb	-	0.010
Sn	-	0.006

dari tabel diatas dapat diketahui bahwa sampel uji stainless steel AISI 304, memiliki kadar karbon 0.0577%, kadar Cr sebesar 17.5% , nikel sebesar 8.56% dan kadar molibdenum sebesar 0.0452%. dari hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa komposisi unsur spesimen uji stainless steel AISI 304 sesuai dengan ASTM A240. Sehingga dapat disimpulkan bahwa material uji tersebut telah memenuhi standar yang terdapat pada ASTM.



4.1.2 Hasil Pengujian Tarik

Sebelum dilakukan pengujian tarik, sampel dilakukan preparasi sesuai dengan standar JIS Z 2201. Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik seperti, yield stress, UTS, dan modulus elastisitas.



Gambar 3.2 Spesimen uji tarik sebelum pengujian



Gambar 4.2 Spesimen uji tarik setelah pengujian



Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Tarik

Pengujian ke-	Yield Strength (MPa)	UTS (MPa)
1	313.4	679
2	314.2	681
3	317.9	685.5
<i>Rata-rata</i>	<i>315.17</i>	<i>681.83</i>

Berikut ini adalah tabel perbandingan antara sifat mekanis hasil pengujian tarik dengan sifat mekanis berdasarkan literatur yang diperoleh dari ASM material.

Tabel 4.4 Perbandingan data hasil uji tarik dengan literatur

Data	Yield Stress (MPa)	UTS (MPa)
Pengujian(aktual)	315.17	681.83
Literatur	290	621

Data uji tarik digunakan untuk menentukan tegangan aplikasi yang diberikan pada spesimen. Berdasarkan pada tabel 4.4 , perbedaan nilai antara pengujian dan literatur tidak terlalu signifikan. Dan untuk pengujian ini digunakan data aktual. Karena data tersebut mewakili sifat mekanis yang diuji.

4.1.3 Pengujian Immersi

Pengujian immersi pada penelitian ini ada dua, yaitu tercelup penuh dan siklik dengan durasi waktu spesimen tercelup selama 10 menit dan durasi spesimen terangkat/atau tidak tercelup selama 50 menit. Pengujian immersi ini dilakukan dengan durasi 14 hari. Pengujian ini berada pada kondisi lingkungan terbuka, dengan temperatur elektrolit yaitu NaCl 3,5% pada temperatur 50°C.



4.1.4 Pengujian *Dye Penetrant Testing*

Penetrant testing dilakukan untuk mengetahui kondisi permukaan spesimen apakah terjadi retak atau tidak. Spesimen mengalami pencelupan pada NaCl 3,5% selama 14 hari. Dan hasil penetrant testing dapat dilihat pada gambar berikut

A. Hasil *Dye Penetrant Testing* untuk spesimen yang tercelup penuh

Tabel 4.5 Tabel hasil uji penetran spesimen tercelup penuh

Pembebanan (σ)	Spesimen	keterangan
0		tidak ditemukan retak pada permukaan melalui penetrant testing.

**LAPORAN TUGAS AKHIR
DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL**



0.5		tidak ditemukan retak pada permukaan.
0.6		tidak ditemukan retak melalui penetrant testing

**LAPORAN TUGAS AKHIR
DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL**



0.7		tidak ditemukan retak pada permukaan spesimen.
0.8		juga tidak ditemukan retak pada permukaan dengan penetrant testing



B. Hasil *Dye Penetrant Testing* untuk spesimen yang mengalami immerse 10:50

Tabel 4.6 Tabel hasil uji penetran spesimen metode siklik

Pembebanan (σ)	spesimen	keterangan
0		Setelah dilakukan uji penetran, pada spesimen tanpa pembebanan tidak terlihat adanya retak pada permukaan spesimen.
0.5		Pada spesimen dengan pembebanan 0.5 σ , juga tidak ditemukan adanya retak pada permukaan.

**LAPORAN TUGAS AKHIR
DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL**



0.6		Spesimen dengan pembebanan 0.6σ , pada permukaan tidak ditemukan adanya retak pada permukaan.
0.7		Spesimen dengan pembebanan 0.7σ , tidak terlihat adanya retak pada permukaan.



0.8		Pada spesimen dengan pemberian beban 0.8σ , juga tidak terlihat adanya retak pada permukaan spesimen.
-----	--	---

Dari pengujian penetran untuk semua variasi metode pencelupan dan variasi tegangan tidak terlihat adanya pitting atau retak pada permukaan atas spesimen.

4.1.5 Pengujian Makro Visual dan Metalografi

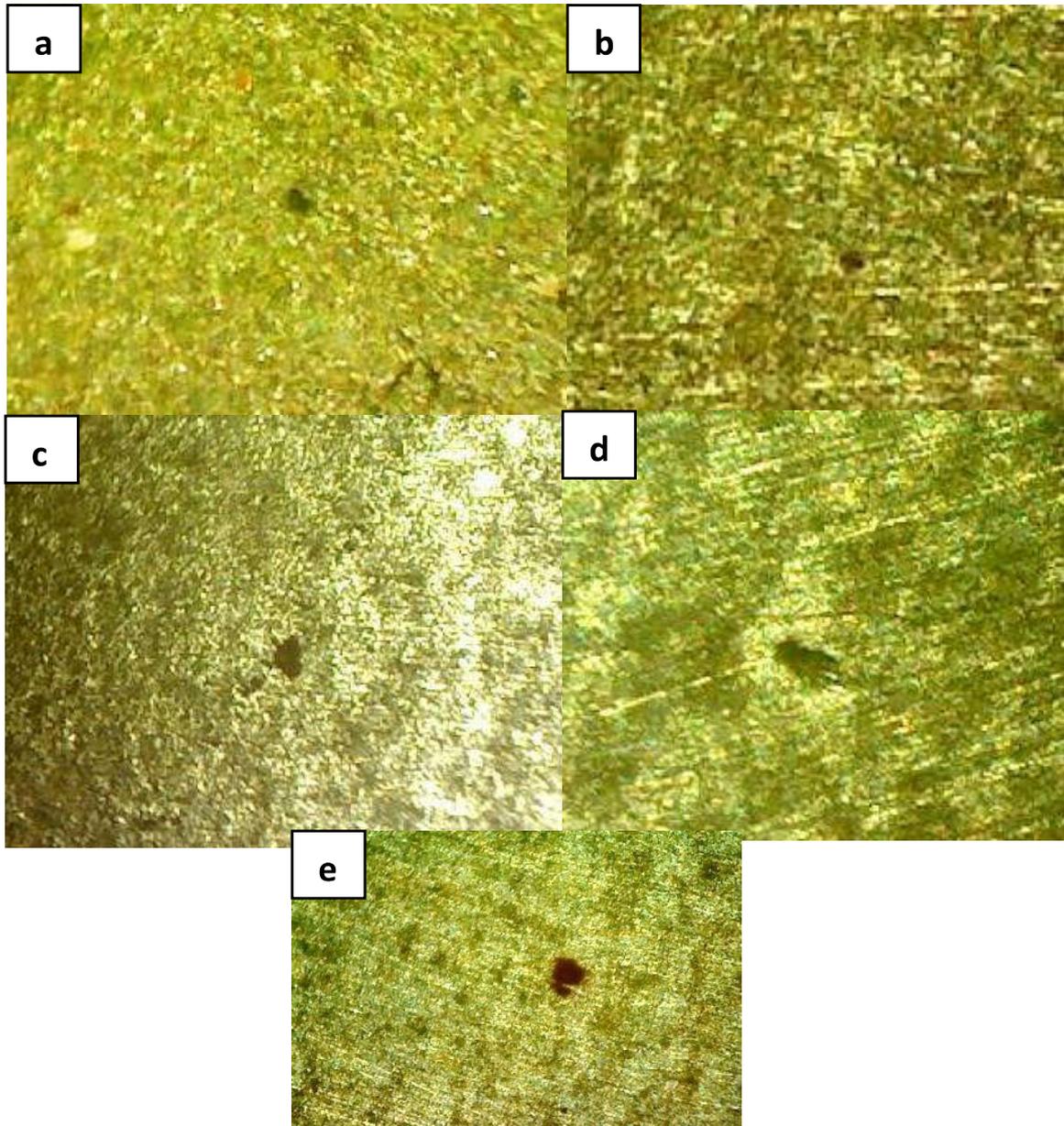
Pengujian makro visual dan metalografi dilakukan untuk mengetahui mikrostruktur pada permukaan sampel dan pada penampang melintang.

A. Pengujian makro visual pada permukaan sampel

Pengujian makro visual pada permukaan sampel dilakukan pada permukaan luar dari spesimen



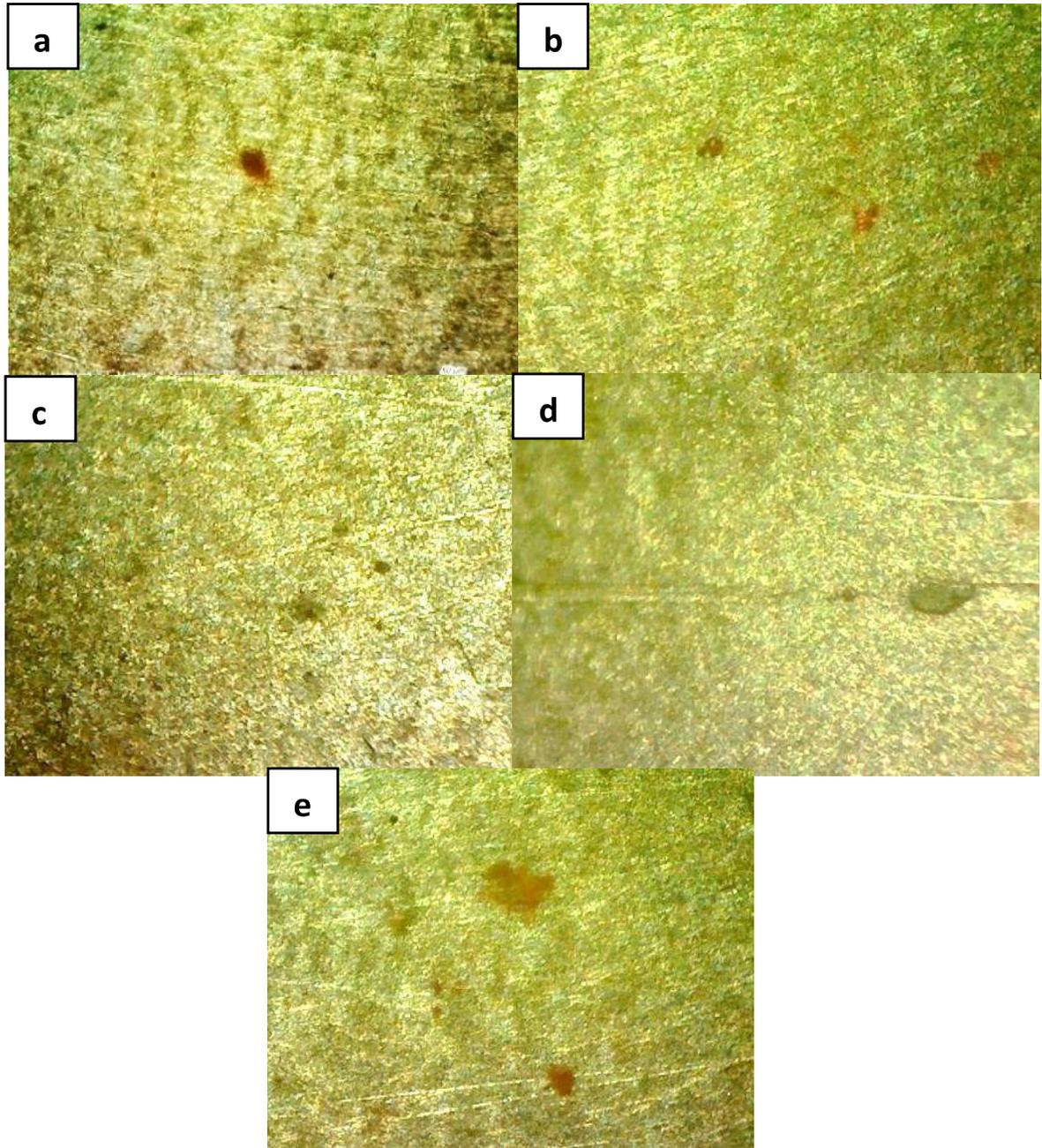
A. pengujian pada permukaan luar sampel yang tercelup penuh



Gambar 4.3 Gambar *pitting* pada pengamatan mikro visual pada permukaan atas spesimen tercelup penuh dengan pembesaran 32x pada a.tanpa pembebanan b.0.5 c. 0.6 d. 0.7 dan e. 0.8 σ_y



B. Pengujian pada permukaan luar sampel dengan metode siklik



Gambar 4.4 Gambar *pitting* pada pengamatan mikro visual pada permukaan atas spesimen dengan metode siklik dengan pembesaran 32x pada a.tanpa pembebanan b.0.5 c. 0.6 d. 0.7 dan e. 0.8 σ_y

LAPORAN TUGAS AKHIR

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL



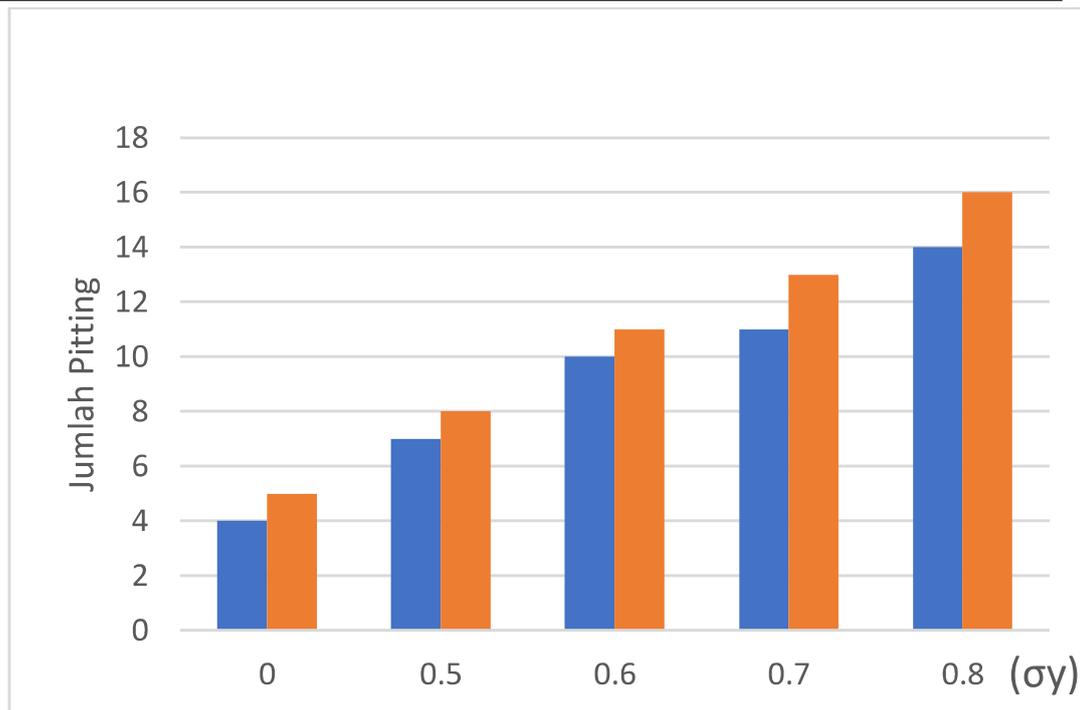
Dari pengujian makroskopik menggunakan mikroskop stereo diatas , pada semua spesimen mengalami *pitting corrosion*.meskipun baja tahan karat merupakan baja yang tahan karat. Namun baja tahan karat rentan terhadap korosi lokal. Apabila adanya unsur klor yang hadir pada lingkungan, ini dapat memecah film pasif secara lokal dan mencegah reformasi film baru. Hal ini yang menyebabkan korosi lokal yaitu *pitting corrosion* atau *crevice corrosion*.

D. Pengaruh Metode Pencelupan terhadap kerentanan *Pitting Corrosion* dan Korosi Retak Tegang

Dari pengamatan makro visual pada permukaan atas spesimen jumlah pitting pada spesimen dengan metode siklik lebih banyak dibandingkan dengan metode pencelupan penuh. Analisa jumlah pitting dilakukan pada area pengamatan 2x2 cm² pada permukaan atas.

Tabel 4.7 Tabel perbandingan jumlah pitting pada area 2x2 cm² pada permukaan atas spesimen.

Pembebanan (σ)	Jumlah Pitting	
	Tercelup Penuh	Siklik
0	4	5
0.5	7	8
0.6	10	11
0.7	11	13
0.8	14	16



Gambar 4.5 Grafik perbandingan jumlah pitting antara metode pencelupan, tercelup penuh dan siklik pada variasi tegangan.

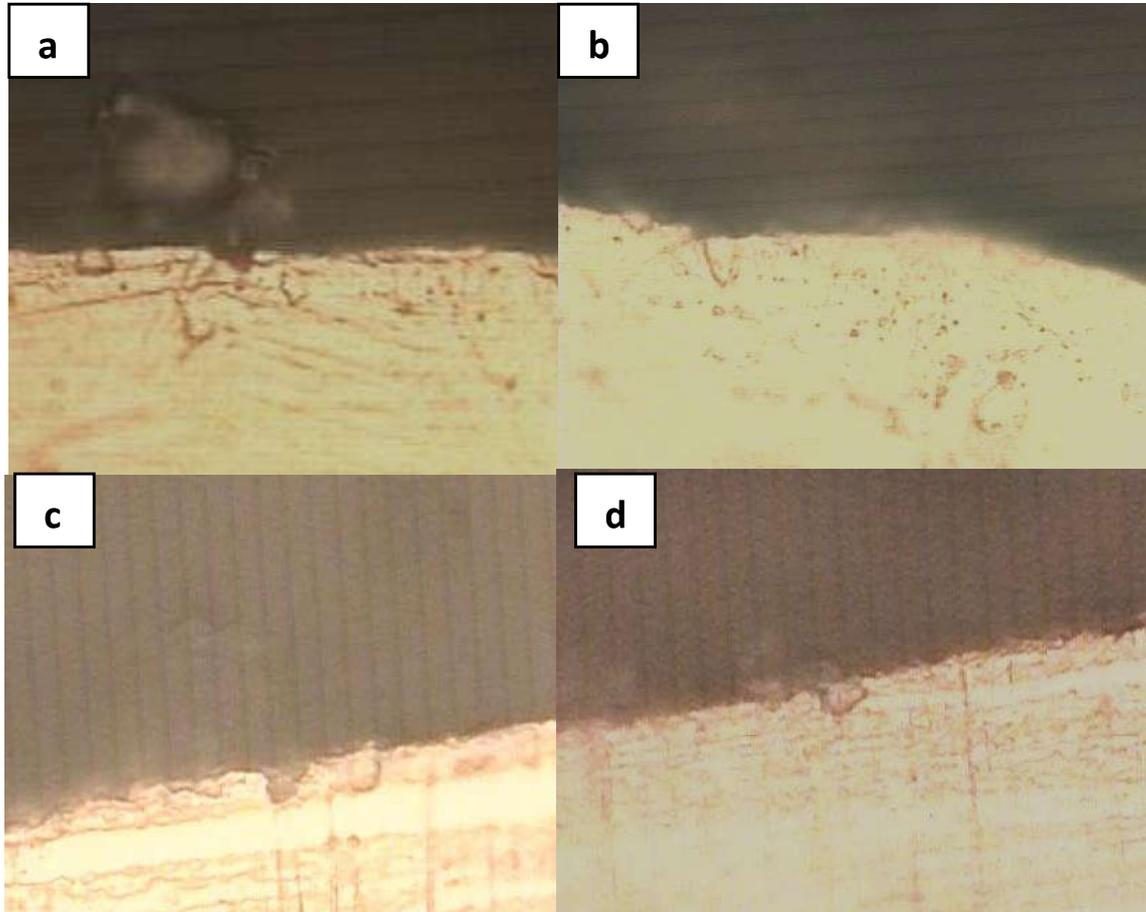
Pada pengamatan makro visual di permukaan atas spesimen jumlah pitting pada metode siklik memiliki jumlah pitting yang lebih banyak daripada metode pencelupan penuh. adanya alternasi basah / kering yang terjadi pada spesimen membuat persediaan O_2 yang melimpah yang membuat pitting corrosion semakin mudah berkembang (Xiuming, 2015). Dari kondisi tersebut dengan metode siklik dapat menyebabkan perkembangan *pitting corrosion* lebih cepat.

B. Pengujian Metalografi pada Penampang Spesimen

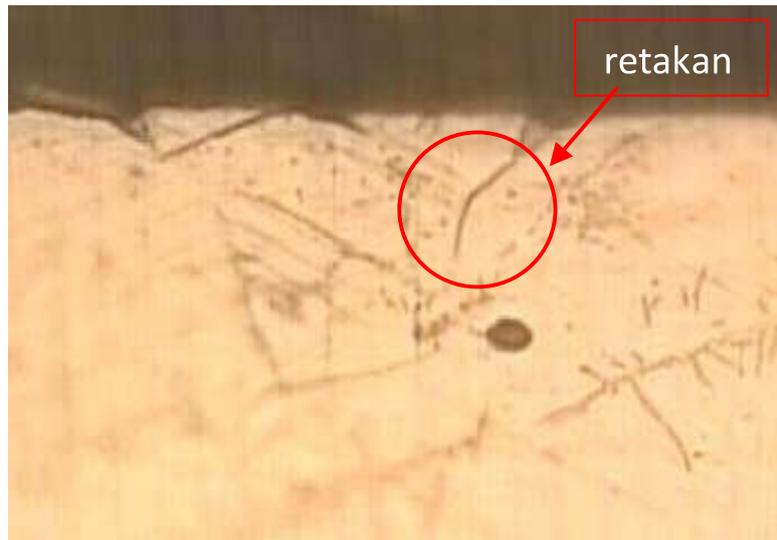
Setelah pengujian makroskopik pada permukaan spesimen, dilakukan pengujian metalografi pada penampang spesimen dengan menggunakan mikroskop trinocular Olympus BX51. Dengan hasil pengamatan pada deskripsi berikut.



A. Pengujian metalografi pada penampang sampel yang tercelup penuh

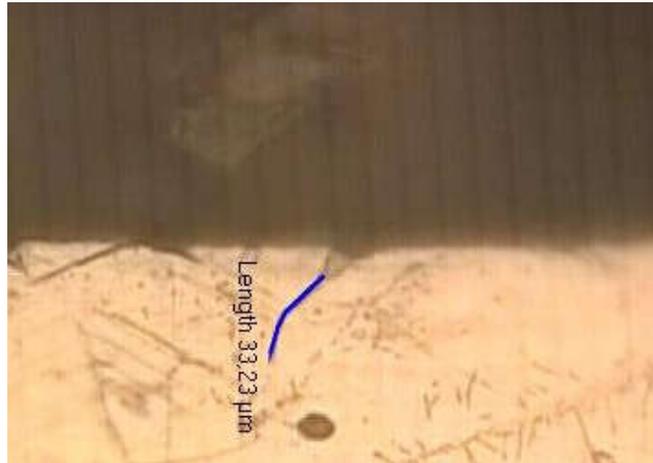


Gambar 4.6 Gambar *pitting* pada pengujian metalografi pada penampang spesimen tercelup penuh dengan pembesaran 1000x pada a. tanpa pembebanan b. 0.5 c. 0.6 d. $0.7 \sigma_y$



Gambar 4.7 Gambar *pitting* dan retak pada pengujian metalografi pada penampang spesimen tercelup penuh dengan pembesaran 1000x pada $0.8 \sigma_y$

Dari **gambar 4.6** dan **gambar 4.7** diatas, didapatkan data dan gambar dari pengamatan metalografi. Pada semua variasi pembebanan didapatkan adanya *pitting corrosion* pada spesimen. Pada variasi pembebanan 0, 0.5, 0.6, dan 0.7 σ_y tidak ditemukan adanya retak ataupun penjalaran retak sedangkan pada pembebanan 0.8 σ_y ditemukan adanya *pitting corrosion* dan ada retak pada ujung pitting.

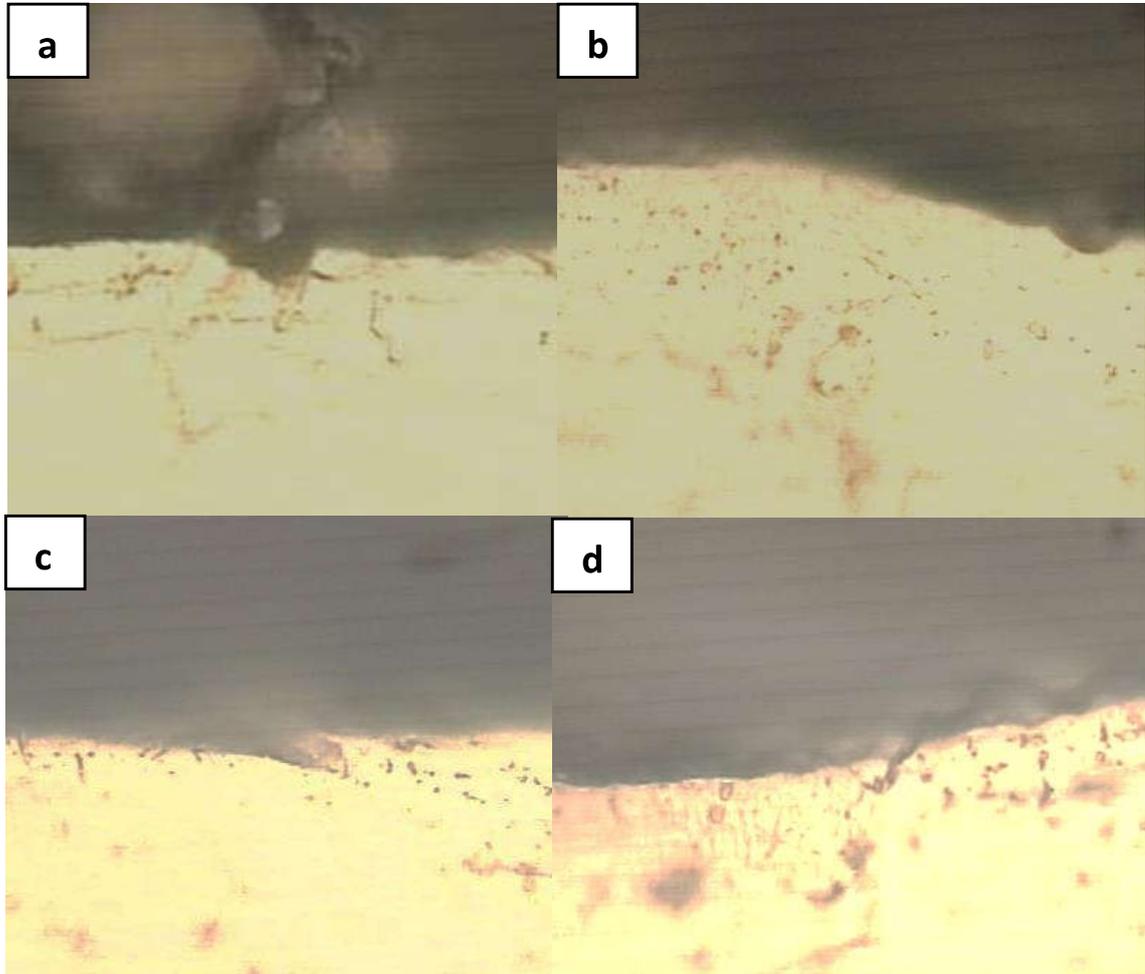


Gambar 4.8 Gambar panjang retak hasil pengamatan metalografi dengan pembesaran 1000x dengan pembebanan $0.8 \sigma_y$

Pada **gambar 4.7** dan **gambar 4.8** terlihat adanya pitting corrosion dan adanya retakan pada spesimen dengan pembebanan $0.8 \sigma_y$ dan dengan panjang retakan 33,23 mikrometer.

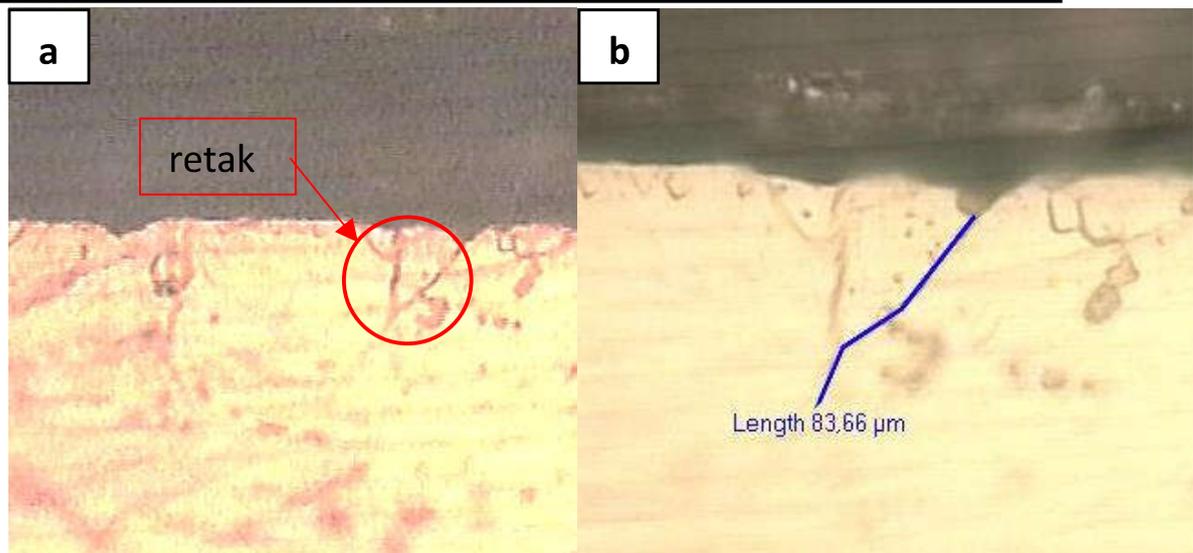


B. Pengujian metalografi pada penampang sampel dengan metode siklik



Gambar 4.9 gambar *pitting* pada pengujian metalografi pada penampang spesimen dengan metode siklik dengan pembesaran 1000x pada a.0 b.0.5 c. 0.6 d. 0.7 σ_y

Dari gambar diatas, hasil dari metalografi pada penampang spesimen pada semua variasi pembebanan terlihat adanya *pitting corrosion* . pada variasi pembebanan 0, 0.5, 0.6, dan 0.7 σ_y tidak ditemukan adanya retak ataupun penjalaran retak



Gambar 4.10 Gambar hasil pengamatan metalografi dengan pembesaran 1000x dengan pembebanan $0.8 \sigma_y$ gambar a. adalah pola patahan dan b. adalah panjang retakan.

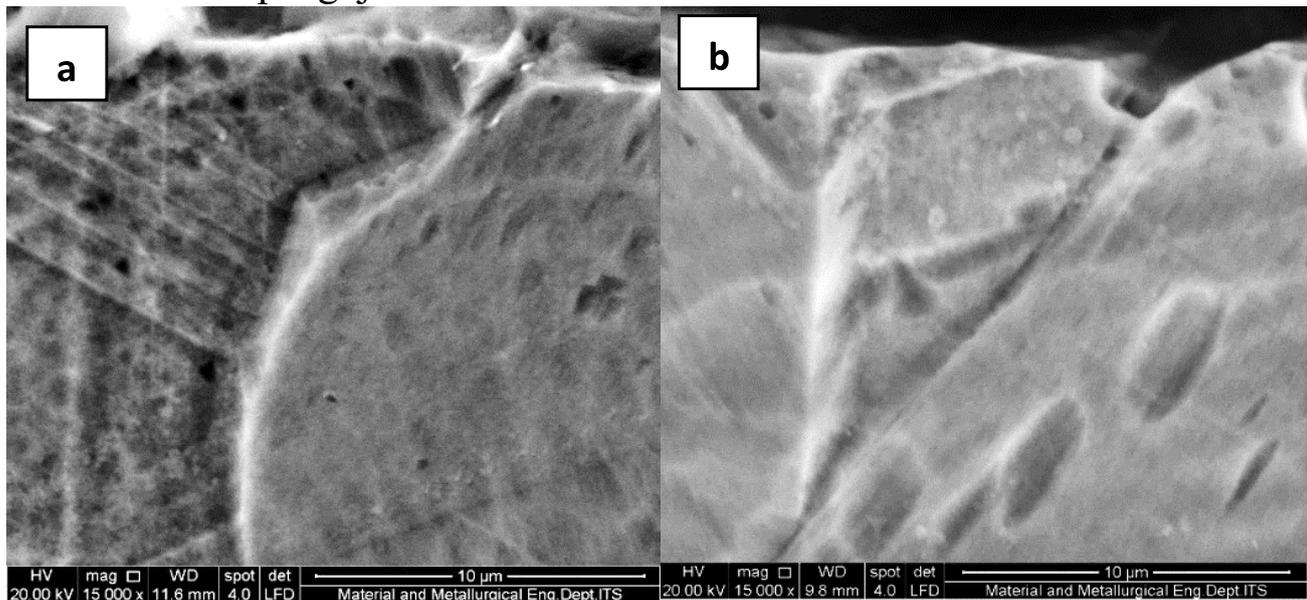
Pada gambar diatas terlihat adanya pitting dan retakan pada spesimen dengan pembebanan $0.8 \sigma_y$, pada gambar a.. terlihat bahwa terlihat adanya pitting pada permukaan, karena spesimen diberikan beban sehingga terjadi konsentrasi tegangan pada ujung pitting. Karena pembebanan melebihi tegangan kritis dari spesimen sehingga menyebabkan adanya perambatan retak pada spesimen.pada gambar b. panjang retakan 83,66 mikrometer.



4.1.6 Pengujian SEM/EDX

Pengujian SEM untuk memperjelas dan memastikan dari pitting dan retak yang didapat dari pengujian dengan mikroskop. Dan pengujian EDX untuk menentukan distribusi unsur Cl⁻ pada daerah pitting, daerah antara pitting dan retakan, dan daerah retakan.

A. Hasil pengujian SEM



Gambar 4.11 Gambar SEM pada penampang spesimen $0.8 \sigma_y$ dengan pembesaran 15.000x **a.** metode pencelupan penuh **b.** metode siklik.

Dari gambar diatas terlihat adanya pitting dan retak pada spesimen dengan pembebanan $0.8 \sigma_y$ dengan metode tercelup penuh dan siklik

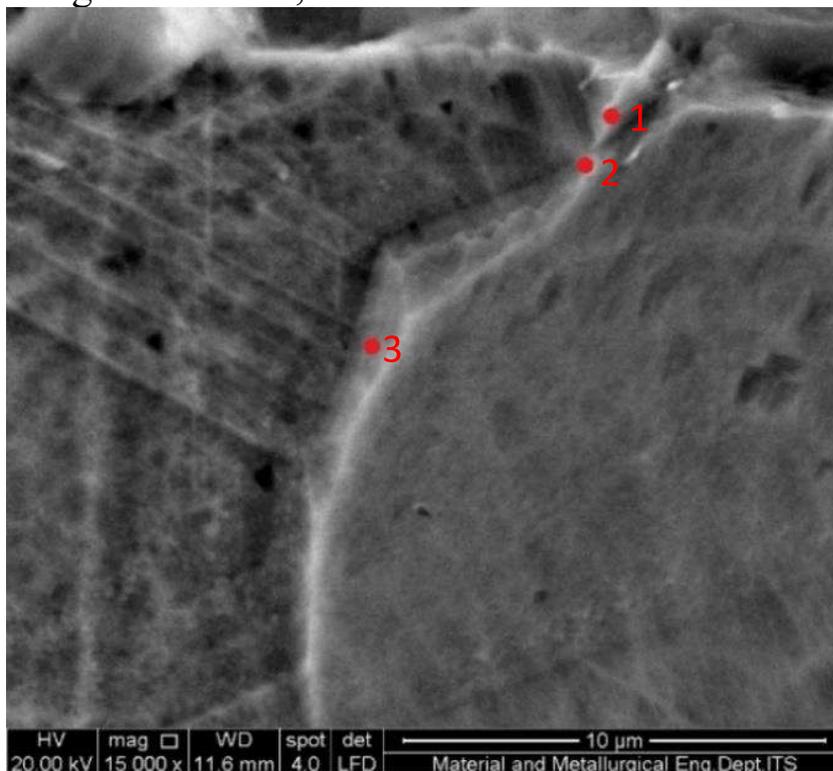


B. Hasil pengujian EDX

Pengujian EDX dilakukan untuk mengetahui unsur yang ada pada setiap bagian pitting dan retakan.

- Untuk spesimen $0.8 \sigma_y$ dengan metode pencelupan penuh.

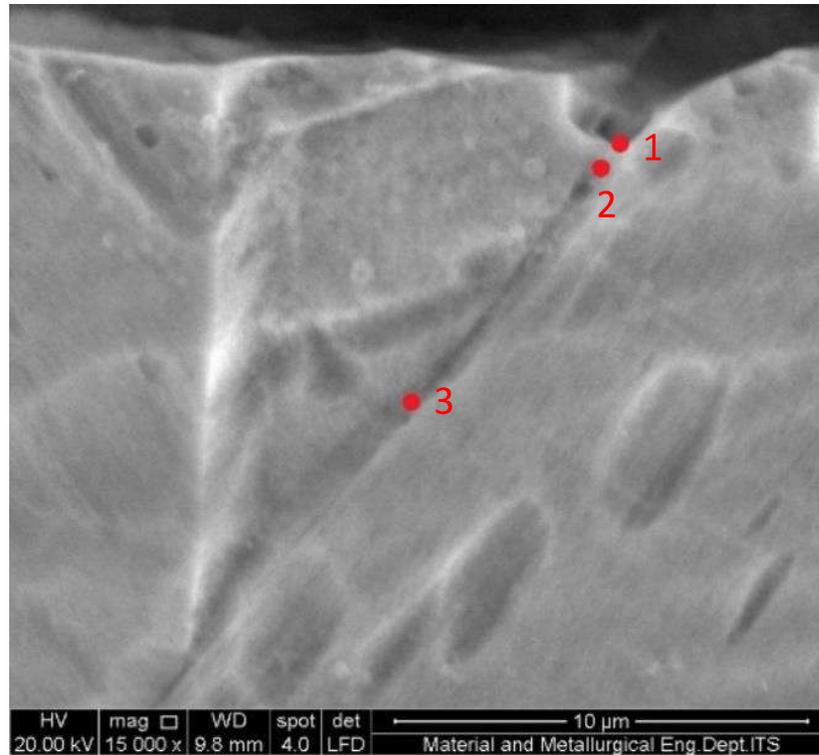
Pengujian EDX dilakukan di tiga bagian, daerah pitting, daerah antara pitting dan retakan, dan daerah retakan.



Gambar 4.12 Titik pengujian EDX spesimen tercelup penuh



- Untuk spesimen 0.8 σ_y dengan metode pencelupan siklik



Gambar 4.13 titik pengujian EDX spesimen dengan metode siklik

Tabel 4.8 Tabel komposisi unsur Cl pada hasil pengujian EDX

Daerah (nomor)	Tercelup Penuh, Wt% Cl	Siklik, Wt% Cl
Daerah <i>pitting</i> (1)	0.55	0.39
Perbatasan antara <i>pitting</i> dan retak (2)	0.32	0.21
Daerah retak (3)	0.11	0.13

Dari kedua pengujian EDX pada metode pencelupan penuh dan pencelupan siklik, kandungan Cl mengalami penurunan dari daerah *pitting*, daerah perbatasan antara *pitting* dan retak dengan daerah retakan.



4.1.7 Pengujian *Microhardness*

Pengujian *microhardness* dilakukan untuk mendapatkan nilai kekerasan di daerah retakan, didekat retakan dan jauh dari retakan.

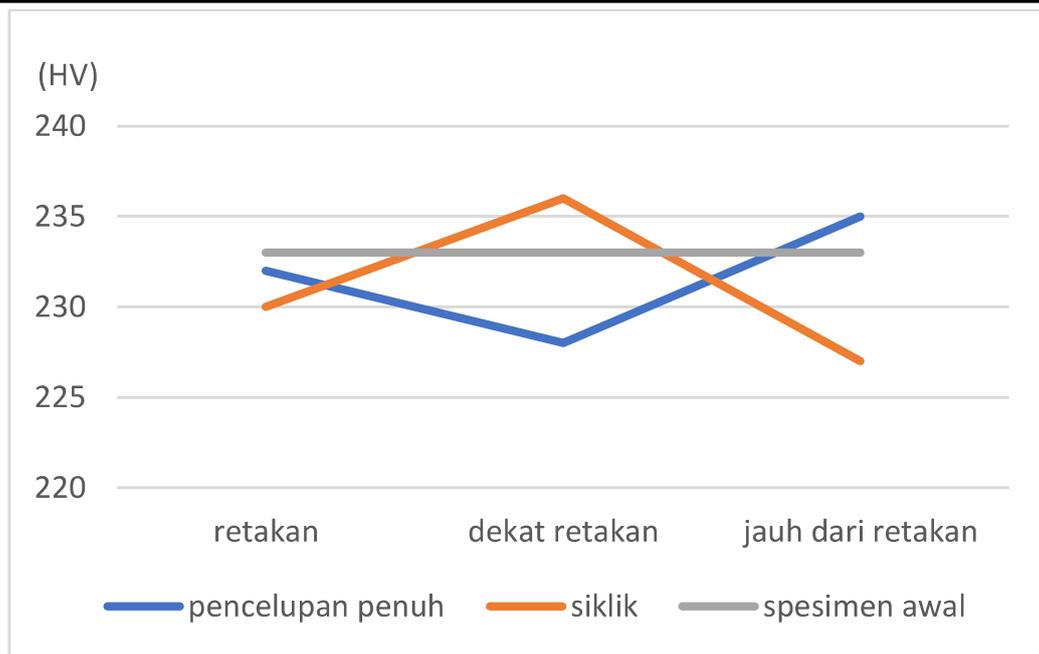


Gambar 4.14 Gambar untuk lokasi pengujian *microhardness*
a. pencelupan penuh b. siklik

dari pengujian *hardness* tersebut didapat nilai kekerasan sebagai berikut :

Tabel 4.9 Tabel nilai *microhardness* untuk setiap posisi

Spesimen	Posisi (nomor)	Kekerasan (HV)
Pencelupan penuh	Retakan (1)	232
	Dekat retakan (2)	228
	Jauh dari retakan (3)	235
siklik	Retakan (1)	230
	Dekat retakan (2)	236
	Jauh dari retakan (3)	227



Gambar 4.15 Grafik perbandingan nilai kekerasan dari tiap metode pencelupan.

Dari hasil pengujian kekerasan diatas nilai kekerasan dari tiap daerah dan pada semua siklus perendaman terlihat tidak adanya perbedaan yang terlalu signifikan jika dibandingkan dengan kekerasan dari material awal.

4.2 Pembahasan

Penelitian ini memvariasikan tegangan dan metode pencelupan. Tegangan yang digunakan yaitu 0,0.5 ,0.6, 0.7,0.8 σ_y dan metode pencelupan tercelup penuh dan siklik. Pengujian dilakukan pada media 3,5% NaCl pada temperatur 50°C selama 14 minggu. Untuk baja tahan austenitik, indikator apakah baja tahan karat tersebut rentan terhadap pitting bisa dihitung dengan persamaan PREN. Dari perhitungan PREN tersebut dengan data komposisi spesimen baja tahan karat AISI 304 yang telah didapat pada pengujian spektrometri, dengan komposisi unsur Cr sebesar 18.5% , Mo sebesar 0.0452% , dan N sebesar 0.484%, didapatkan perhitungan sebagai berikut :

$$\text{PREN} = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 16 \times \%N \quad (2.2)$$

LAPORAN TUGAS AKHIR DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL



$$\text{PREN} = (18.5) + (3.3 \times 0.0452) + (16 \times 0.484) = 25$$

Dari perhitungan diatas didapat nilai PREN dari baja tahan karat AISI 304 adalah 25. Sedangkan menurut NACE MR 0175 nilai minimum untuk material baja tahan karat austenitik yang sesuai pada aplikasi air laut yaitu sekitar 32-35. Sehingga dengan nilai PREN 25, baja tahan karat austenitik rawan terjadi *pitting corrosion* pada lingkungan air laut.

Selain itu, salah satu parameter yang penting pada terjadinya *pitting corrosion* adalah pengaruh temperatur. Temperatur minimum material mengalami korosi sumuran disebut dengan *Critical pitting temperature* (CPT). Konsentrasi ion Cl^- mempengaruhi nilai CPT dari material baja tahan karat. Menurut sandvik steel pada kondisi lingkungan air laut material baja tahan karat AISI 304 memiliki critical pitting temperatur pada temperatur 18°C . dan pada percobaan ini kondisi lingkungan dikondisikan pada temperatur 50°C , karena menurut penelitian dari (He, 2014) temperatur 27°C hanya terjadi *pitting* meskipun pembebanan yang diberikan sampai 2.4 yield stress dan waktu pengujian selama 8 bulan. Dan penelitian dari (Caseres & Mintz, 2010) pengujian dilakukan pada temperatur 43°C selama 4 minggu retak terlihat dengan panjang $3 \mu\text{m}$. Sehingga dengan meningkatnya temperatur, kerentanan terhadap korosi retak tegang meningkat juga. Pada hasil pengamatan metalografi pada semua variasi pembebanan dan variasi siklus perendaman terlihat adanya *pitting* pada permukaan material, hal ini dikarenakan temperatur yang bekerja pada percobaan melebihi nilai CPT untuk material baja tahan karat AISI 304.

Dan pada pengamatan visual pada **tabel 4.7** pada permukaan atas spesimen terlihat seiring bertambah tegangan jumlah *pitting* bertambah. Menurut (Yang, 2001) seiring bertambahnya tegangan, jumlah *pitting* bertambah. Hal ini terjadi karena menurut (Tanahashi, 1999) berdasarkan analisa termodinamika tegangan tarik dan tekukan membuat membesarnya rongga pada lapisan pasif Cr_2O_3 . Membesarnya

LAPORAN TUGAS AKHIR DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL



rongga pada lapisan pasif Cr_2O_3 membuat migrasi ion Cl^- pada permukaan material lebih cepat menurut penelitian dari (Mankowski, 1957) pada baja tahan karat AISI 304 yang diberi pembebanan.

Pada pengamatan makro visual di permukaan atas spesimen jumlah pitting pada metode siklik memiliki jumlah pitting yang lebih banyak daripada metode pencelupan penuh. Pada metode pencelupan penuh jumlah pitting dari variasi tegangan 0,0.5 ,0.6,0.7,0.8 σ_y berjumlah 4,7,10,11, 14 . dan pada metode pencelupan siklik dari variasi tegangan 0,0.5 ,0.6, 0.7,0.8 σ_y berjumlah 5,8,11,13 dan 16. Menurut (Xiuming, 2015) adanya alternasi basah dan kering yang terjadi pada spesimen membuat persediaan O_2 yang melimpah yang membuat pitting corrosion semakin mudah berkembang. Pada saat tercelup ion Cl^- masuk kedalam lapisan pasif Cr_2O_3 yang berikatan dengan $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ dan membentuk senyawa korosi yang menumpuk pada permukaan benda. Hal tersebut berlangsung terus menerus sehingga lapisan pasif Cr_2O_3 tidak bisa terbentuk kembali sehingga pada bagian tersebut tidak terlindungi. Pada saat kondisi kering, spesimen berada pada lingkungan udara. Di udara kandungan O_2 lebih banyak daripada dikondisi tercelup. Adanya O_2 ini akan bereaksi dengan bagian yang tidak terproteksi (di bagian inisiasi *pitting*). Bertambahnya oksigen pada lingkungan dapat menambah proses hidrolisis oksigen dan air , dari reaksi hidrolisis tersebut menghasilkan OH^- yang berikatan dengan $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ yang tertarik ke permukaan benda karena adanya ion klorida. Dan saat spesimen tercelup kembali ion klorida akan merusak lapisan pasif Cr_2O_3 kembali, sehingga menyebabkan berkembangnya jumlah *pitting* yang ada pada spesimen AISI 304. setelah mengamati permukaan atas spesimen, yaitu melakukan pengamatan pada penampang dari tiap spesimen. Hasil metalografi untuk spesimen dengan metode pencelupan penuh dengan pembebanan 0,0.5 ,0.6, 0.7 σ_y terlihat adanya pitting pada kondisi melintang dari spesimen dan pada



pembebanan 80% yield stress ditemukan adanya pitting dan pada ujung retakan terdapat adanya retakan dengan panjang 33,23 mikrometer. Pada spesimen dengan metode siklik dengan pengamatan metalografi pada penampang spesimen untuk spesimen dengan pembebanan 0,0.5 ,0.6, 0.7 σ_y terlihat adanya pitting dan pada pembebanan 0.8 σ_y terlihat adanya pitting dan adanya retak pada ujung pitting dengan panjang 83,66 mikrometer. Setelah itu melakukan pengujian EDX untuk mengetahui kandungan Cl pada daerah pitting, daerah perbatasan antara pitting dan retak , dan pada daerah retak. Dari **gambar 4.12** dan **tabel 4.8** Pada spesimen yang tercelup penuh pada daerah pitting kandungan Cl sebesar 0.55% , pada daerah perbatasan antara pitting dan retak sebesar 0.32% dan pada daerah retak kandungan Cl sebesar 0.11%. pada **gambar 4.13** dan untuk spesimen dengan metode siklik kandungan Cl pada daerah pitting sebesar 0.39% , pada daerah perbatasan pitting dan retak kandungan Cl sebesar 0.21% , dan pada daerah retak kandungan Cl nya sebesar 0.13%. Dari hasil pengujian EDX tersebut terlihat bahwa kandungan Cl dari daerah pitting, daerah perbatasan pitting dan retak, dan pada daerah retak mengalami penurunan.

Setelah itu, melakukan microhardness pada daerah retakan, pada daerah dekat dengan retakan , dan daerah yang jauh dari retakan. Dari hasil pengujian microhardness pada **tabel 4.9** di tiga daerah tidak ada perbedaan nilai yang signifikan antara daerah retak, daerah dekat dengan retakan dan daerah yang jauh dari retakan.

Retak ditemukan pada pembebanan 0.8 σ_y pada kedua metode pencelupan. menurut (Ma, 2012) transisi dari pitting ke nukleasi retak dipengaruhi oleh *stress intensity factor* . Penjalaran retak terjadi apabila beban yang diberikan telah melebihi pembebanan kritis yang bisa diterima oleh material. Berdasarkan pengujian tarik, AISI 304 memiliki reduksi luasan 44% . berdasarkan (Medraj, 2002) material dikatakan ulet apabila mengalami reduksi luasan lebih atau sama dengan 25%.

LAPORAN TUGAS AKHIR DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL



Sehingga dapat dikatakan bahwa baja tahan karat AISI 304 bersifat ulet. Material yang bersifat ulet memiliki deformasi elastis yang besar sehingga ketika diberi beban ikatan antar atomnya tidak mudah putus . Oleh karena itu retak terjadi hanya pada spesimen dengan pembebanan $0.8 \sigma_y$.

Sehingga, pada lingkungan yang mengandung NaCl baja tahan karat AISI 304 mengalami *pitting corrosion*. *Pitting* bertambah pada siklus perendaman siklik.

Variasi tegangan juga mempengaruhi jumlah *pitting* dan mengakibatkan korosi retak tegang. Retak terjadi pada pembebanan $0.8 \sigma_y$, karena SS 304 merupakan material yang ulet. Material yang bersifat ulet memiliki deformasi elastis yang besar sehingga ketika diberi beban ikatan antar atomnya tidak mudah putus.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa yang telah dilakukan maka dapat ditarik beberapa kesimpulan dari penelitian ini :

1. Pada lingkungan yang mengandung NaCl baja tahan karat AISI 304 mengalami *pitting corrosion*. Jumlah *pitting* bertambah seiring dengan bertambahnya tegangan. Dengan adanya tegangan membuat rongga pada lapisan pasif Cr_2O_3 membesar sehingga mempermudah Cl^- untuk berdifusi kedalam lapisan pasif dan menyebabkan korosi *pitting*. Dan pada metode siklik, jumlah *pitting* bertambah karena bertambahnya O_2 pada lingkungan saat spesimen terangkat kepermukaan yang mempercepat berkembangnya *pitting*.
2. Selain *pitting* ditemukan retakan yang terjadi pada pembebanan $0.8 \sigma_y$ pada kedua parameter, retak terjadi pada $0.8 \sigma_y$ karena SS 304 material yang ulet. Material yang bersifat ulet memiliki deformasi elastis yang besar sehingga ketika diberi beban ikatan antar atomnya tidak mudah putus.

V.2 Saran

Saran dan rekomendasi yang dapat diberikan oleh penulis untuk penelitian selanjutnya mengenai pengaruh tegangan dan metode pencelupan terhadap kerentanan korosi retak tegang yaitu:

1. Perlu dilakukan penelitian yang lebih lama untuk lebih mengetahui lebih jelas adanya retak dan perambatan retak yang terjadi.
2. Penelitian selanjutnya juga perlu dilakukan pada temperatur aplikasi yang lebih tinggi sehingga retak dapat ditemukan dengan waktu yang lebih singkat.

**LAPORAN TUGAS AKHIR
DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL**



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



DAFTAR PUSTAKA

- Aini, N., 2016. *Perilaku Korosi Baja AISI 1021 dan AISI 304 di Berbagai Lingkungan Asam..* s.l.:ITS Surabaya.
- ASM, 1990. *Corrosion of Stainless Steel. VOL 13 ed.* s.l.:ASM handbook.
- Bovard, F., 2004. development of Test Specimens for Evaluating SCC Behavior of Marine Aluminum Alloys and Assessment of the Severity of Various Marine Exposure Conditions. p. 4.
- Bulloch, J., 2004. some effect of yield strength on stress corrosion cracking behaviour of low alloy steels in aqueous environments at ambient temperatures. *engineering failure analysis*, Volume 11, pp. 834-856.
- Caseres, L. & Mintz, T., 2010. Atmospheric Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Welded and Unwelded 304, 304L, and 316L Austenitic Stainless Steels Commonly Used for Dry Cask Storage Containers Exposed to Marine Environments. *Office of Nuclear Regulatory Research*.
- Committee, A., 2004. Standard Specification for Heat-Resisting Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure. *ASTM International*, p. 3.
- Cudar, M. a., 1995. *Corrosion Mechanism Theory and practice.* s.l.:s.n.
- E008, A., 2003. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic materials.* united states: s.n.
-



-
- Elsariti, S. M., 2012. Behaviour of Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels in Sodium Chloride Solutions.. *Malaysian Technical Universities Conference on Engineering & Technology 2012*, pp. 650-654.
- Elsariti, S. M. & Haftirman, 2013. Behaviour of Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels in Sodium Chloride Solutions. *Malaysian Technical Universities Conference on Engineering & Technology 2012*, p. 2.
- Greene, F. a., 1978. *Corrosion Engineering*. s.l.:Mc Graw Hill. Inc.
- He, X., 2014. Assessment of Stress Corrosion Cracking Susceptibility for Austenitic Stainless Steels Exposed to Atmospheric Chloride and Non-Chloride Salts.
- Jessen, C. Q., 2011. stainless steel and corrosion. Volume chapter 6, p. 5.
- Koch, G. H., 2001. Tests for Stress-Corrosion. *Advanced Materials & Process*.
- Kothari, n.d. stress corrosion failure of 304 type stainless steel pipe in seawater environment. *AFR*, Volume 4.
- Leckie, F. A., 2009. *strength and stiffness of engineering system*. s.l.:s.n.
- Ma, F.-Y., 2012. Corrosive Effects of Chlorides on Metals. pp. 141-144.
- Mankowski, J., 1957. corrosion science. p. 493.
-

LAPORAN TUGAS AKHIR
DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL



-
- Medraj, 2002. *Mechanical Lecture*. Montreal.:Concordia University.
- Parrott, R., 2011. *Chloride stress corrosion cracking in austenitic stainless steel*. 1st ed. London: Crown.
- Priyotomo, G., 2008. Korosi Retak Tegang Material Stainless Steel AISI 304 di Lingkungan $MgCl_2$.
- Q. Yang, J., 2000. Effects of hydrogen and tensile stress on the breakdown of passive films on type 304 stainless steel. *Electrochimica Acta*, p. 851–859.
- Revie, R. W., 2008. *Corrosion and Corrosion Control 4th Edition*. Canada: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION.
- Sitorus, A. J., 2012. Pengaruh Tegangan Terhadap Kerentanan Korosi Retak Tegang SS304 Dalam Lingkungan NaCl dengan Metode Bent Beam.
- Suherman, W., 1999. *Ilmu Logam II*. Surabaya: ITS.
- Sulistijono, 1999. *Diktat Kuliah Korosi*. Surabaya: s.n.
- Tanahashi, 1999. material in electronics 10. p. 359.
- Xiuming, Y., 2015. Study on the Temperature Dependence of Pitting Behaviour of AISI 4135 Steel in Marine Splash Zone. *The Electrochemical Society of Japan*, p. 547.
- Yang, Q., 2001. Effects of hydrogen and tensile stress on the breakdown of passive films on type 304 stainless steel. *Electrochimica Acta* , p. 856.
-

**LAPORAN TUGAS AKHIR
DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL**

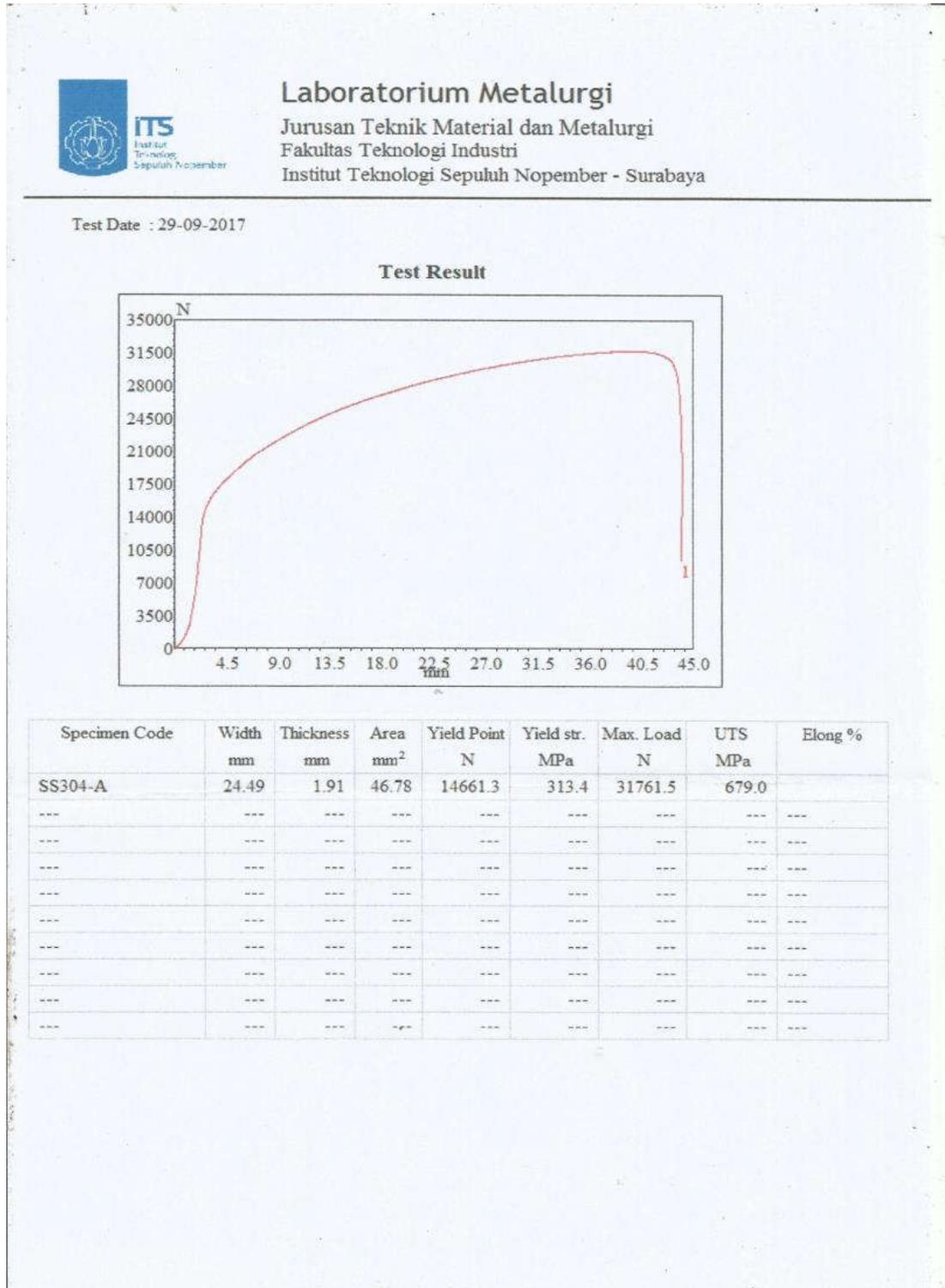


LAPORAN TUGAS AKHIR DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL



LAMPIRAN

1. Lampiran hasil pengujian tarik untuk 3 spesimen uji tarik



89

LAPORAN TUGAS AKHIR

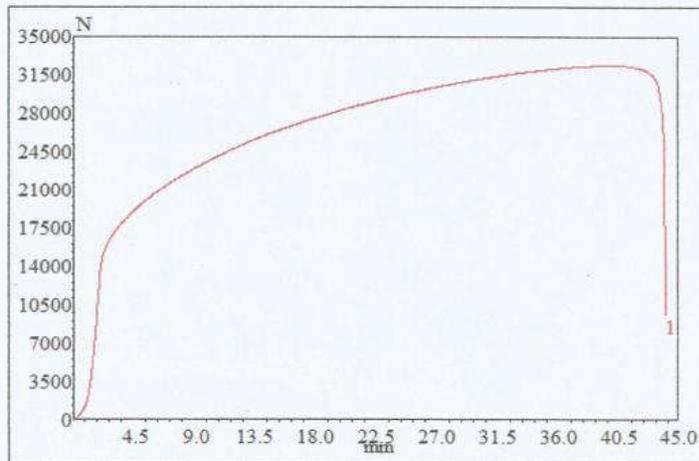
DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL



Laboratorium Metalurgi
 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
 Fakultas Teknologi Industri
 Institut Teknologi Sepuluh Nopember - Surabaya

Test Date : 29-09-2017

Test Result



Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm ²	Yield Point N	Yield str. MPa	Max. Load N	UTS MPa	Elong %
SS304-B	25.06	1.90	47.61	14958.9	314.2	32422.9	681.0	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---

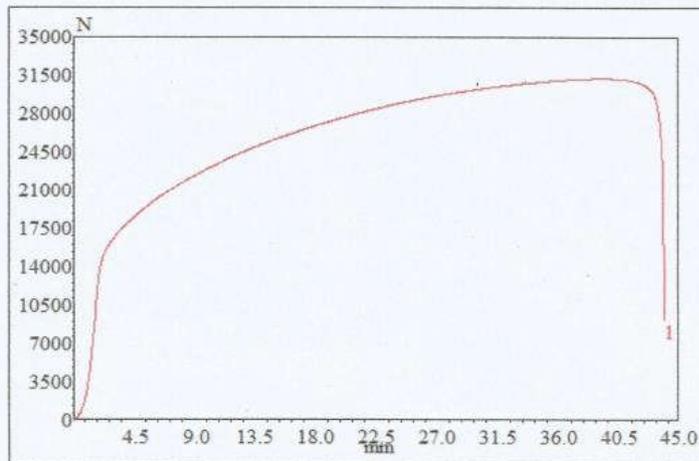
LAPORAN TUGAS AKHIR DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL



Laboratorium Metalurgi
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember - Surabaya

Test Date : 29-09-2017

Test Result



Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm ²	Yield Point N	Yield str. MPa	Max. Load N	UTS MPa	Elong %
SS304-C	24.25	1.88	45.59	14494.7	317.9	31250.7	685.5	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---



2. Gambar spesimen setelah pengujian tarik





**LAPORAN TUGAS AKHIR
DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL**



BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Anugrah Firsadin yang merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis lahir di Gresik pada tanggal 14 Juli 1996. Penulis menyelesaikan Pendidikan formalnya di SD Muhammadiyah 1 Gresik selama 6 tahun, dan melanjutkan di SMP Negeri 1 Gresik selama 3 tahun, dan di SMA Negeri 1 Gresik selama 3 tahun. Penulis melanjutkan studi S1 nya di Teknik material dan metalurgi FTI ITS pada tahun 2014.

Selain menjadi mahasiswa. Penulis aktif berorganisasi. Pada tahun kedua penulis aktif di LDJ ASH-Haabul Kahfi sebagai staff dana dan usaha, dan di BSO KWU HMMT FTI ITS sebagai staff divisi produksi. Pada tahun ketiga penulis aktif di LDJ ASH-Haabul Kahfi sebagai wakil kepala Departemen Kaderisasi, dan di NACE SC-ITS sebagai wakil kepala Departemen Fundraising, dan di BSO KWU HMMT FTI ITS sebagai wakil direktur. Dan pada tahun keempat penulis aktif sebagai asisten laboratorium di laboratorium korosi dan analisa kegagalan. Penulis melaksanakan kerja praktek di PT. PJB UP Gresik dan PT. Pertamina MOR V. selain itu penulis mendapatkan sertifikasi corrosion engineer level 1 INDOCOR. Penulis juga tercatat sebagai member dari NACE international dan member nasional INDOCOR.

Alamat email penulis yang bisa dihubungi adalah anugrah948@gmail.com.