

TUGAS AKHIR – TL184834

**ANALISIS PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP
PERSEBARAN KADAR *CHROMIUM* DAN PEMBENTUKAN
CHROMIUM CARBIDE PADA STAINLESS STEEL 316
DENGAN WAKTU PEMANASAN KONSTAN**

LEON SUTANTO
NRP. 02511840000065

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
NIP. 196203261987011001
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc
NIP. 198205262012121002

Program Studi Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



TUGAS AKHIR – TL184834

ANALISIS PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP PERSEBARAN KADAR *CHROMIUM* DAN PEMBENTUKAN *CHROMIUM CARBIDE* PADA STAINLESS STEEL 316 DENGAN WAKTU PEMANASAN KONSTAN

LEON SUTANTO
NRP. 02511840000065

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
NIP. 196203261987011001
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc
NIP. 198205262012121002

Program Studi Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL184834

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON
CHROMIUM CONTENT DISTRIBUTION AND CHROMIUM
CARBIDE PRECIPITATION ON 316 STAINLESS STEEL
WITH CONSTANT HEATING DURATION**

LEON SUTANTO
NRP. 02511840000065

Advisor
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
NIP. 196203261987011001
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc
NIP. 198205262012121002

Study Program of Materials Engineering
Departement of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP PERSEBARAN KADAR
CHROMIUM DAN PEMBENTUKAN CHROMIUM CARBIDE PADA STAINLESS
STEEL 316 DENGAN WAKTU PEMANASAN KONSTAN**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **LEON SUTANTO**
NRP. 0251184000065

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA




Pembimbing

2. Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc



Ko-Pembimbing

3. Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.



Penguji

4. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.



Penguji



SURABAYA
Juli, 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET

ANALYSIS OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON CHROMIUM CONTENT
DISTRIBUTION AND CHROMIUM CARBIDE PRECIPITATION ON 316
STAINLESS STEEL WITH CONSTANT HEATING DURATION

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree of bachelor of engineering at
Undergraduate Study Program of Materials Engineering
Departement of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **LEON SUTANTO**
NRP. 0251184000065

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA

Advisor

2. Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc

Co-Advisor

3. Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

Examiner

4. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.



Examiner

SURABAYA
July, 2022

(This page is intentionally blank)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/NRP : Leon Sutanto / 02511840000065
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing/NIP : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA / 196203261987011001

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "ANALISIS PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP PERSEBARAN KADAR *CHROMIUM* DAN PEMBENTUKAN *CHROMIUM CARBIDE* PADA STAINLESS STEEL 316 DENGAN WAKTU PEMANASAN KONSTAN" adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 13 Juli 2022

Mengetahui
Dosen Pembimbing

Mahasiswa



(Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA)
NIP. 196203261987011001



(Leon Sutanto)
NRP. 02511840000065

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student/NRP : Leon Sutanto
Departement : Materials and Metallurgical Engineering
Advisor/NIP : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA / 196203261987011001

Hereby declare that the Final Project with the title of "ANALYSIS OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON CHROMIUM CONTENT DISTRIBUTION AND CHROMIUM CARBIDE PRECIPITATION ON 316 STAINLESS STEEL WITH CONSTANT HEATING DURATION" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing..

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, July 13rd 2022

Acknowledged
Advisor



(Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA)
NIP. 196203261987011001

Student



(Leon Sutanto)
NRP. 02511840000065

(This page is intentionally blank)

ANALISIS PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP PERSEBARAN KADAR CHROMIUM DAN PEMBENTUKAN CHROMIUM CARBIDE PADA STAINLESS STEEL 316 DENGAN WAKTU PEMANASAN KONSTAN

Nama Mahasiswa / NRP : Leon Sutanto / 0251184000065
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
Ko-Pembimbing : Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc

Abstrak

Stainless Steel 316 merupakan paduan besi dan karbon dengan tambahan beberapa unsur paduan untuk membuat logam tahan terhadap korosi, sehingga dapat diaplikasikan di pada pipa, *storage tank*, *heat exchanger*, dan *cladding* nuklir. Namun, pengoperasian pada temperatur tinggi dapat menimbulkan proses sensitisasi pada batas butir dan berpotensi menyebabkan korosi batas butir. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh temperatur terhadap persebaran kadar kromium dan pembentukan karbida kromium pada batas butir *stainless steel 316* dengan waktu yang konstan. Metode penelitian ini dilakukan dengan melakukan proses pemanasan pada *stainless steel 316* dengan menggunakan variasi temperatur 400°C, 500°C, dan 600°C dengan waktu pemanasan konstan. Pengujian yang digunakan untuk penelitian ini adalah *Optical Emission Spectroscopy* (OES), mikroskop optik, *Scanning Electron Microscope* (SEM), dan *Energy Dispersive X-Ray* (EDX). Setelah pengujian dilakukan, lalu didapatkan hasil bahwa dengan adanya peningkatan temperatur pemanasan menyebabkan terjadinya pembentukan karbida kromium dibatas butir dan persebaran kromium pada spesimen uji. Pada hasil metalografi, semakin tinggi temperatur maka ketebalan karbida yang terbentuk di batas butir akan semakin meningkat, dimana rata-rata ketebalan karbida terendah didapatkan sebesar 0,68457 µm pada spesimen 400°C 5 jam , rata-rata ketebalan karbida tertinggi sebesar 0,86048 µm pada spesimen 600°C 10 jam. Pada hasil persebaran kadar kromium pada batas butir, nilai kadar kromium terendah berada pada spesimen 500°C 10 jam sebesar 92,81% wtCr, sedangkan persebaran kromium tertinggi berada pada spesimen uji 600°C 10 jam dengan kadar kromium mencapai 96,45% wtCr. Dari pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pembentukan karbida kromium, semakin tinggi temperatur, maka karbida kromium semakin mudah terbentuk dan ketebalan karbida mengalami peningkatan. Selain itu, adanya peningkatan temperatur menyebabkan persebaran kadar kromium dapat terjadi, namun persebaran kromium batas butir fluktuatif akibat stabilitas karbida kromium yang sudah terbentuk sebelum proses pemanasan pada furnace.

Kata Kunci: *karbida kromium, korosi batas butir, persebaran kromium, sensitisasi, stainless steel 316*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON CHROMIUM CONTENT
DISTRIBUTION AND CHROMIUM CARBIDE PRECIPITATION ON 316
STAINLESS STEEL WITH CONSTANT HEATING DURATION**

Student Name / NRP : Leon Sutanto
Departement : Materials and Metallurgical Engineering
Advisor : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
Co-Advisor : Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc

Abstract

316 Stainless Steel is an iron and carbon alloy with the addition of several alloy elements to make the metal resistant to corrosion, so it can be applied in many tools, such as pipes, storage tank, and heat exchanger in various kind of industries like oil and gas, petrochemical, etc. However, operation at high temperatures can give rise to sensitization processes at grain boundaries and potentially cause intergranular corrosion. This study aims to study the influence of temperature on the characteristics of the distribution of chromium levels in the area around the grain boundary with a constant time and the influence of temperature on the formation of chromium carbide in 316 stainless steel grain boundary with a constant time. This research method was carried out by heat treatment on Stainless Steel 316 with temperature variations of 400°C, 500°C, and 600°C with a heating time of 5 and 10 hours. The tests used for this study are Optical Emission Spectroscopy (OES), optical microscope, Scanning Electron Microscopy (SEM), and Energy Dispersive X-Ray (EDX). After the experiment is carried out, the results are obtained that with an increase in heating temperature could cause the formation of chromium carbide to the grain boundaries and chromium distribution in the test specimen. In metallographic results, the higher the temperature, the thickness of the carbide formed at the grain boundary will increase, while the lowest average carbide thickness is numbered at 0.68457 µm in 400°C 5-hour specimens, whereas the highest average carbide thickness is 0.86048 µm in 600°C 10-hour specimens. In the results of the distribution of chromium content at the grain boundary, the lowest chromium content value is in the 500°C 10-hour specimen of 92.81% wtCr, while the highest chromium distribution value is in the 600°C 10-hour test specimen with chromium content reaching 96.45% wtCr. It can be concluded that the higher the temperature, the easier chromium carbide to form and the thickness of the grain boundary increases. In addition, an increase in temperature makes the distribution of chromium content occur. However, the distribution of chromium in grain boundary fluctuates due to the stability of chromium carbide that has been formed before the heating process in the furnace.

Keywords: *316 stainless steel, chromium carbide, chromium distribution, intergranular corrosion, sensitization*

(This page is intentionally blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan kesehatan kepada Penulis, sehingga dapat menyelesaikan penyusunan Proposal Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP PERSEBARAN KADAR CHROMIUM DAN PEMBENTUKAN CHROMIUM CARBIDE PADA STAINLESS STEEL 316 DENGAN WAKTU PEMANASAN KONSTAN”. Adapun laporan ini disusun dan diajukan untuk memenuhi Mata Kuliah Tugas Akhir yang menjadi salah satu syarat kelulusan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember (FTIRS ITS) Surabaya.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan bantuan kepada Penulis, sehingga proposal Tugas Akhir dapat diselesaikan tepat waktu, diantaranya :

1. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS ITS.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA selaku dosen pembimbing 1 Tugas Akhir Penulis yang telah membimbing dengan sabar, memberikan masukan dan saran mengenai proses penelitian yang membangun kepada Penulis.
3. Bapak Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing 2 Tugas Akhir Penulis yang telah membimbing penulisan proposal laporan Tugas Akhir dan memberi masukan dan saran mengenai proses penelitian yang membangun kepada Penulis demi kelancaran pengerjaan Tugas Akhir Penulis.
4. Bapak Dafikin selaku tendik Laboratorium Korosi dan Analisa Kegagalan yang telah membimbing dan menemani Penulis selama proses pengerjaan penelitian di laboratorium, sehingga dapat berjalan lancar dan terhindar dari bahaya.

Penulis menyadari dengan keterbatasan ilmu dan wawasan, laporan ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca proposal Tugas Akhir agar karya berikutnya bisa menjadi lebih baik . Harapan Penulis untuk proposal ini dapat bermanfaat dan digunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 13 Juli 2022
Penulis

Leon Sutanto

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

ABSTRAK	xiii
ABSTRACT	xv
KATA PENGANTAR	xvii
DAFTAR ISI	xix
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Korosi	3
2.2 Korosi Batas Butir	3
2.2.1 Korosi Batas Butir pada <i>Austenitic Stainless Steel</i>	4
2.3 <i>Stainless Steel</i>	6
2.3.1 <i>Austenitic Stainless Steel</i>	7
2.3.2 <i>Stainless Steel 316</i>	8
2.4 Difusi	9
2.4.1 Proses Difusi Karbida Kromium	10
2.5 Morfologi Batas Butir pada <i>Austenitic Stainless Steel</i>	11
2.6 Pengujian	13
2.6.1 Pengujian Komposisi Kimia.....	13
2.6.2 Pengujian Metalografi	14
2.6.3 Pengujian SEM-EDX	15
2.7 Penelitian Terdahulu.....	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1 Diagram Alir.....	19
3.2 Bahan Penelitian	20
3.3 Alat Penelitian	20
3.4 Metode Penelitian	22
3.4.1 Preparasi Spesimen Uji.....	22
3.4.2 Proses Pemanasan Spesimen Uji	23
3.4.3 Proses Pengujian Spesimen Uji	24
3.5 Pengujian	24
3.5.1 Pengujian Komposisi Kimia.....	24
3.5.2 Pengujian Metalografi	24
3.5.3 Pengujian SEM-EDX	24
3.6 Rancangan Penelitian	25
3.7 Jadwal Penelitian	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia	27
4.2 Hasil Pengamatan Pembentukan Karbida Kromium.....	27
4.3 Hasil Persebaran Kadar Kromium pada Batas Butir	33
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1 Kesimpulan.....	43
5.2 Saran	43

DAFTAR PUSTAKA.....	45
LAMPIRAN.....	49
UCAPAN TERIMA KASIH	73
BIODATA PENULIS.....	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Batas butir pada austenitic stainless steel yang terkorosi	4
Gambar 2.2	<i>Chromium depletion</i> pada batas butir	5
Gambar 2.3	Pengaruh kadar karbon terhadap pembentukan karbida kromium	5
Gambar 2.4	Diagram fasa (a) Fe-Cr pada kandungan Ni sebesar 8% (b) Fe-Ni pada kandungan Cr sebesar 18%	7
Gambar 2.5	<i>Vacancy Diffusion</i>	9
Gambar 2.6	<i>Interstitial diffusion</i>	10
Gambar 2.7	Difusi secara substitusi dan interstisial	10
Gambar 2.8	Hasil EDX	11
Gambar 2.9	Morfologi batas butir stainless steel dengan SEM perbesaran 2000x	12
Gambar 2.10	Struktur batas butir (a) <i>Step</i> , (b) <i>Dual</i> , (c) <i>Ditch</i>	12
Gambar 2.11	Morfologi batas butir pada temperatur 650°C selama (a)0, (b)1, (c)3, (d)5, (e)10, dan (f)60 menit	13
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	19
Gambar 3.2	<i>Muffle Furnace</i>	20
Gambar 3.3	Mikroskop Optik OLYMPUS BX-51M	21
Gambar 3.4	Mesin Poles	21
Gambar 3.5	<i>Rectifier</i>	22
Gambar 3.6	(a)Spesimen Uji OES (b) Gambar Teknik Spesimen OES	23
Gambar 3.7	(a)Spesimen Uji Penelitian (b) Gambar Teknik Spesimen Penelitian	23
Gambar 4.1	Mikrostruktur SS 316 Tanpa Perlakuan Perbesaran 50x	28
Gambar 4.2	Metalografi Karbida Kromium pada Temperatur 400°C Perbesaran 50x (a) 5 jam, (b) 10 jam	29
Gambar 4.3	Metalografi Karbida Kromium pada Temperatur 500°C Perbesaran 50x (a) 5 jam, (b) 10 jam	30
Gambar 4.4	Metalografi Karbida Kromium pada Temperatur 600°C Perbesaran 50x (a) 5 jam, (b) 10 jam	31
Gambar 4.5	Grafik Ketebalan Rata-rata Batas Butir pada Tiap Temperatur	32
Gambar 4.6	Hasil SEM Spesimen Uji Tanpa Perlakuan Perbesaran 5000x	33
Gambar 4.7	Profil Kromium Spesimen Tanpa Perlakuan	33
Gambar 4.8	Hasil EDX Spesimen SS 316 Tanpa Perlakuan pada Batas Butir	34
Gambar 4.9	Hasil SEM Spesimen Uji 400°C Perbesaran 5000x (a) 5 jam (b) 10 jam	34
Gambar 4.10	Profil Kromium Spesimen Uji Pada Temperatur 400°C (a) 5 jam (b) 10 jam	35
Gambar 4.11	Hasil EDX Spesimen SS 316 Temperatur 400°C (a) 5 jam, (b) 10 jam	36
Gambar 4.12	Hasil SEM Spesimen Uji 500°C Perbesaran 5000x (a) 5 jam (b) 10 jam	37
Gambar 4.13	Profil Kromium Spesimen Uji Pada Temperatur 500°C (a) 5 jam (b) 10 jam	37
Gambar 4.14	Hasil EDX Spesimen SS 316 Temperatur 500°C (a) 5 jam, (b) 10 jam	38
Gambar 4.15	Hasil SEM Spesimen Uji 600°C Perbesaran 5000x (a) 5 jam (b) 10 jam	39
Gambar 4.16	Profil Kromium Spesimen Uji Pada Temperatur 600°C (a) 5 jam (b) 10 jam	40
Gambar 4.17	Hasil EDX Spesimen SS 316 Temperatur 600°C (a) 5 jam, (b) 10 jam	41
Gambar 4.18	Persebaran Kromium pada <i>Stainless Steel</i> 316 Tiap Temperatur	42

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Pengaruh unsur paduan terhadap Baja Tahan Karat Austenitik.....	7
Tabel 2.2	Komposisi kimia SS 316	8
Tabel 2.3	<i>Mechanical Properties</i> SS 316.....	9
Tabel 2.4	Data Difusivitas Unsur Paduan	11
Tabel 2.5	Rangkuman Penelitian Terdahulu	15
Tabel 3.1	Rancangan Penelitian Tugas Akhir	25
Tabel 3.2	Jadwal Penelitian	25
Tabel 4.1	Perbandingan Komposisi Kimia SS 316 ASTM A-240 dan Hasil OES ..	27
Tabel 4.2	Pembentukan Struktur Mikro Berdasar Standar ASTM A-262.....	29
Tabel 4.3	Persebaran Kadar Kromium di Batas Butir pada Temperatur 400°C	36
Tabel 4.4	Persebaran Kadar Kromium di Batas Butir pada Temperatur 500°C	39
Tabel 4.5	Persebaran Kadar Kromium di Batas Butir pada Temperatur 600°C	41

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja tahan karat atau *stainless steel* merupakan jenis baja yang sering diaplikasikan di kehidupan sehari-hari dan mampu menopang kegiatan produksi. Mengacu pada *International Stainless Steel Forum* (ISSF), laju pertumbuhan produksi baja tahan karat dari tahun 1980 hingga 2019 sebesar 5,8% / tahun, dimana total produksi *stainless steel* di dunia pada tahun 2019 mencapai angka 52.218.000 metric ton² (*International Stainless Steel Forum* (ISSF), 2020). Salah satu tipe *stainless steel* yang umum digunakan adalah *stainless steel* 316. SS 316 merupakan salah satu tipe dari *austenitic stainless steel* merupakan salah satu jenis material yang diaplikasikan pada pipa, *storage tank* pada industri makanan, serta *heat exchanger* di berbagai macam industri, seperti di industri perminyakan, petrokimia, dan lain-lain yang beroperasi di temperatur ruang maupun temperatur tinggi. SS 316 juga dapat di aplikasikan pada *cladding* bahan bakar nuklir pada industri nuklir yang bisa bekerja hingga temperatur 500°C . Banyak faktor yang menyebabkan SS 316 sering dimanfaatkan di dunia industri saat ini, seperti *corrosion resistance* pada lingkungan korosif dan memiliki sifat mekanik yang baik secara keseluruhan (Maula & Anis, 2013).

Namun, pada industri yang khususnya beroperasi pada temperatur tinggi atau sensitisasi (500°C – 800°C), dapat memunculkan permasalahan pada alat yang menggunakan material jenis *stainless steel*, khususnya tipe 316 dengan waktu tahan yang relatif panjang dengan proses pendinginan udara. Hal ini dapat terjadi karena ketika material tersebut dioperasikan pada temperatur sensitisasi, kromium, dan karbon mampu berdifusi ke batas butir dan terjadi pembentukan *chromium carbide*. Presipitasi karbida kromium pada batas butir ini menyebabkan daerah di sekitar batas butir kekurangan unsur kromium, sehingga terbentuk *chromium depleted zone*. Hal tersebut sangat berbahaya dan menyebabkan *stainless steel* menjadi rawan terhadap serangan korosi batas butir. Korosi batas butir (*intergranular corrosion*) adalah degradasi / penurunan kualitas material yang terjadi pada daerah sekitar batas butir tanpa menyebabkan serangan yang besar pada daerah matriks / daerah butir. Sensitisasi pada material *stainless steel* dapat menyebabkan penurunan kualitas material, baik dari segi sifat mekanik material maupun mikrostruktur yang dihasilkan, sehingga hal ini harus dihindari pada pengaplikasiannya di industri yang mengoperasikan proses produksinya pada temperatur tinggi.

Penelitian mengenai proses sensitisasi pada material *stainless steel* 316 pernah dilakukan oleh M.Kartaman pada tahun 2015 mengenai studi sensitisasi pada material *stainless steel* tipe 316 pada lingkungan gas Argon. Variasi temperatur yang digunakan adalah temperatur 350°C – 650°C dengan waktu holding pemanasan 6 jam dan 1000°C dengan waktu tahan 3 jam kemudian didinginkan secara cepat dengan media pendingin berupa air. Kemudian, dilakukan uji korosi dengan media H₂SO₄ 1 N dan uji SEM untuk mengamati morfologi kerusakan yang terjadi pada baja tahan karat tipe 316. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur maka laju korosi pada *stainless steel* 316 akan semakin meningkat (Kartaman et al., 2015). Namun, pada penelitian ini tidak menjelaskan bagaimana persebaran kadar kromium pada daerah batas butir dan lingkungan yang digunakan pada penelitian ini menggunakan gas Argon. Selain itu, penelitian ini lebih berfokus pada laju korosi dengan hasil SEM sebagai bukti apakah terjadi kerusakan pada *stainless steel* 316. Oleh karena itu, diperlukan riset yang lebih lanjut mengenai persebaran kadar kromium pada batas butir dan pembentukan karbida kromium pada *stainless steel* 316.

Temperatur operasi yang tinggi pada *stainless steel* dapat mempengaruhi proses difusi dan pembentukan karbida kromium pada batas butir. Oleh karena itu, perlu dilakukan proses penelitian pada material baja tahan karat austenitik tipe 316 (SS 316) akan diuji pada temperatur

yang tinggi di dalam furnace, khususnya pada temperatur 400°C – 600°C dengan variasi waktu tertentu, sehingga dapat dipelajari pengaruh temperatur terhadap karakteristik persebaran kadar kromium yang terjadi pada batas butir SS 316 pada waktu yang konstan dan pengaruh temperatur pemanasan terhadap pembentukan karbida kromium di batas butir (*grain boundary*) *stainless steel* 316 pada waktu yang konstan.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh temperatur terhadap karakteristik persebaran kadar kromium pada daerah sekitar batas butir dengan waktu konstan dan pengaruh temperatur terhadap pembentukan karbida kromium pada *stainless steel* 316 dengan waktu yang konstan.

1.3 Batasan Masalah

Berikut merupakan batasan masalah pada penelitian ini.

1. Temperatur didalam *furnace* dianggap stabil dan sesuai dengan temperatur yang tercantum di monitor *muffle furnace*
2. Kondisi spesimen *stainless steel* 316 mula-mula dianggap homogen dan tidak mengalami kecacatan.
3. Spesimen *stainless steel* 316 diberikan perlakuan panas di dalam *furnace* dengan lingkungan berupa udara bebas yang tidak terkontrol.
4. Pengaruh lingkungan selama proses pendinginan diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan penelitian ini adalah :

1. Mempelajari dan menganalisa pengaruh temperatur terhadap karakteristik persebaran kadar kromium pada *stainless steel* 316 dengan waktu yang konstan.
2. Mempelajari dan menganalisa pengaruh temperatur terhadap pembentukan karbida kromium pada *stainless steel* 316 pada waktu yang konstan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diberikan dengan adanya penelitian ini adalah dapat menjadi bahan referensi bagi penelitian sejenis dalam pengembangan ilmu di bidang korosi dan analisa kegagalan, serta pengetahuan baru mengenai korosi batas butir (*intergranular corrosion*) pada baja tahan karat austenitik dari segi morfologi dan persebaran kromium pada batas butir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Korosi

Korosi merupakan merupakan proses degradasi material akibat reaksi elektrokimia antara material dengan lingkungan dan menghasilkan senyawa-senyawa yang tidak dikehendaki. Korosi umumnya terjadi di lingkungan korosif, seperti lingkungan air laut, daerah perindustrian, dan lain-lain(Fontana, 1987). Terdapat 4 syarat logam mengalami proses korosi, diantaranya adalah:

1. Anoda

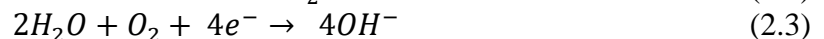
Anoda adalah senyawa yang terkorosi. Anoda yang terdegradasi terjadi dengan melepaskan elektron dari atom-atom logam netral untuk membentuk ion logam yang nantinya bisa tinggal dalam larutan maupun bereaksi membentuk hasil korosi yang tidak larut. Reaksi yang terjadi pada anoda adalah sebagai berikut.



Dengan nilai z merupakan valensi dari logam yang bersangkutan dan umumnya nilai z = 1,2,3

2. Katoda

Katoda merupakan senyawa yang tidak terkorosi dan menerima elektron dari anoda. Reaksi yang terjadi pada katoda pada kondisi asam dan basa secara berurutan adalah sebagai berikut :



3. Elektrolit

Elektrolit adalah larutan yang mampu menghantarkan listrik. Elektrolit yang digunakan dapat berupa larutan asam, basa, dan garam. Larutan elektrolit menjadi elemen penting dalam proses elektrokimia, karena menjadi jalur untuk perantara ionik antara dua reaksi yang terjadi pada logam.

4. Kontak metalik

Pada proses elektrokimia, antara anoda dan katoda perlu ada hubungan listrik agar arus listrik dan elektron dalam sel korosi dapat mengalir (Kelly et al., 2002).

2.2 Korosi Batas Butir

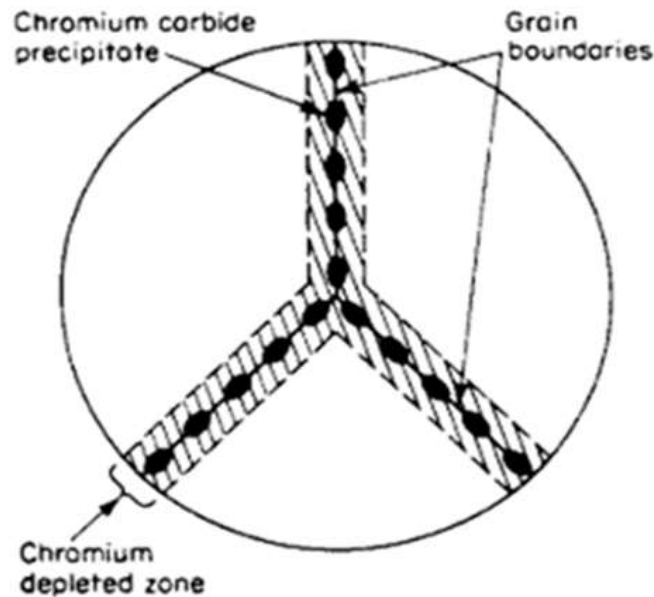
Korosi batas butir atau *intergranular corrosion* merupakan salah satu jenis korosi yang terjadi di sekitar batas butir logam, sedangkan bagian utama pada butir (*matrix*) tidak terserang korosi, karena daerah batas butir yang lebih aktif secara kimiawi. *Intergranular corrosion* dapat dikatakan berbahaya bagi material, karena paduan logam pada bagian dekat batas butir akan berkurang dan mengakibatkan kekuatan material menurun (Fontana, 1987). Korosi batas butir juga termasuk korosi *non-uniform*, dimana terjadi perbedaan potensial antara batas butir dengan elemen yang lain(Avner, 1974). Terdapat berbagai macam faktor penyebab terjadinya korosi batas butir, diantaranya adalah :

1. Segregasi pada elemen atau paduan tertentu, seperti pada paduan aluminium
2. Penyuburan salah satu elemen paduan pada batas butir, seperti pada paduan tembaga
3. Penipisan elemen corrosion resistant pada daerah sekitar batas butir, seperti pada baja tahan karat

Faktor – faktor yang menyebabkan logam mengalami korosi batas butir terjadi akibat *thermal exposure* pada logam, seperti pada proses pengelasan, perlakuan panas, maupun proses *stress relief*. Pada *intergranular corrosion*, batas butir berperan sebagai anoda, sedangkan matriks berperan sebagai katoda(Schweitzer, 2013).

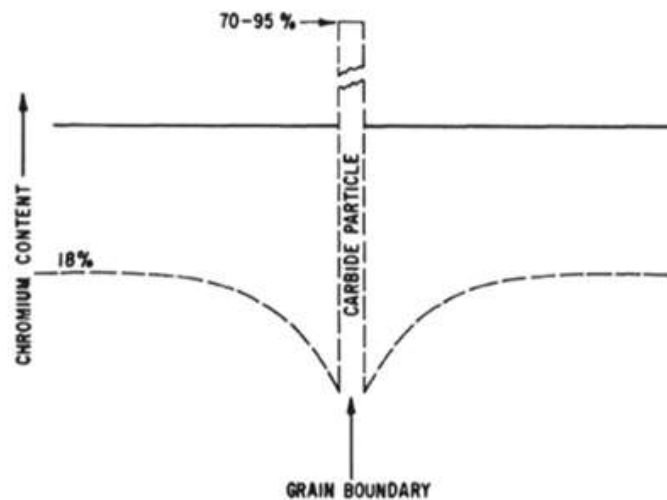
2.2.1 Korosi Batas Butir pada *Austenitic Stainless Steel*

Proses degradasi pada material *austenitic stainless steel* terjadi pada temperatur sensitisasi (500°C - 800°C), dimana pada temperatur sensitisasi *stainless steel* menjadi rawan terhadap korosi. Hal ini dapat terjadi karena kromium yang berada di sekitar batas butir memiliki kecenderungan untuk bereaksi dengan karbon yang berlebih pada batas butir membentuk *chromium carbide* ($Cr_{23}C_6$). Pembentukan karbida kromium di batas butir menyebabkan kandungan kromium yang berada di sekitar batas butir akan berkurang dan terjadi penipisan yang disebut *chromium depleted zone* (Fontana, 1987).



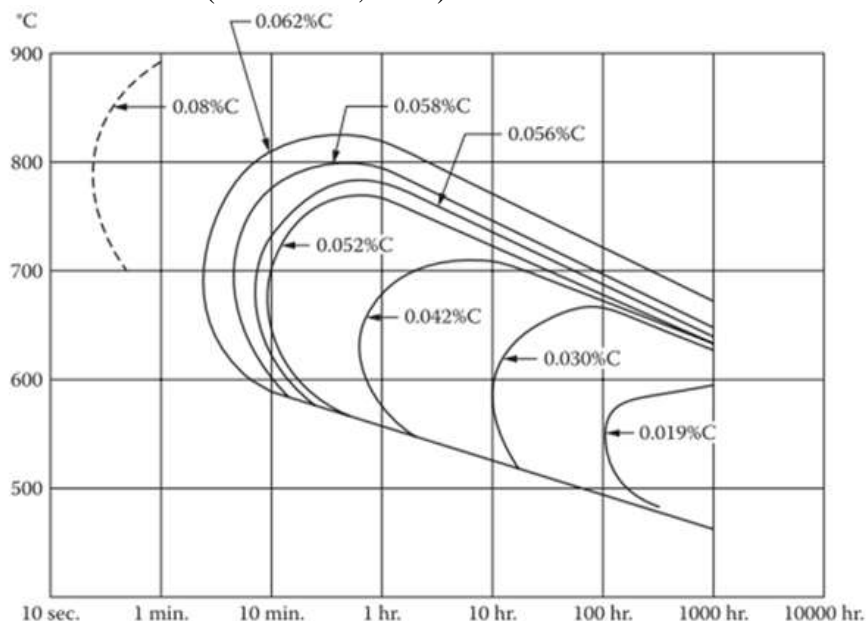
Gambar 2.1 Batas butir pada *austenitic stainless steel* yang terkorosi (Fontana, 1987)

Korosi batas butir pada *austenitic stainless steel* ini terjadi karena proses sensitisasi, dimana terjadi pembentukan karbida kromium pada batas butir. Peristiwa sensitisasi pada material *austenitic stainless steel* terjadi pada temperatur yang tinggi, umumnya pada temperatur operasi alat sekitar 500°C - 800°C, kemudian digunakan dengan waktu yang relatif panjang. Akibatnya, karbon dan kromium dengan mudah membentuk karbida kromium pada batas butir dan menjadikan material tersebut rawan terhadap serangan korosi batas butir. Kandungan elemen kromium pada batas butir dapat mencapai 94% dan menyebabkan daerah di sekitar batas butir mengalami penipisan akibat berkurangnya kandungan kromium, dengan kadar kromium pada daerah disekitar batas butir kurang dari 12% seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2. Selama proses sensitisasi, difusi kromium dari matriks ke daerah yang mengalami penipisan terlalu lambat, sehingga tidak dapat mengisi bagian yang mengalami penipisan kadar kromium. Teori ini berhasil menjelaskan pengaruh perlakuan panas dan pengaruh dari elemen. Teori ini juga menyatakan bahwa laju difusi kromium dapat meningkat pada temperatur diatas 900°C dan menimbulkan peristiwa *self-healing* dari korosi batas butir, dimana pada daerah sekitar batas butir terkandung kadar kromium sebesar 18% (Wilson, 1971). Secara pengamatan *Scanning Transmission Electron Microscopy* (STEM), lebar *chromium depleted zone* ketika sensitisasi diperkirakan berada pada rentang 25 – 200 nm (Kolli, 2020).



Gambar 2.2 *Chromium depletion* pada batas butir (Kolli, 2020)

Chromium depleted zone yang terbentuk disekitar batas butir baja tahan karat austenitik akan menyebabkan ketahanan korosi berkurang. Semakin rendah kandungan kromium, maka *stainless steel* akan semakin rawan terhadap korosi batas butir. Pendinginan yang lambat pada proses *heat treatment* pada temperatur sensitisasi dapat menyebabkan logam mudah mengalami korosi. Pada proses pengelasan, kandungan karbon yang tinggi ketika dilakukan pengoperasian pada temperatur tinggi akan mempercepat proses pembentukan karbida kromium, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3 (Schweitzer, 2013).



Gambar 2.3 Pengaruh kadar karbon terhadap pembentukan karbida kromium (Schweitzer, 2013)

Untuk mencegah pembentukan karbida kromium pada baja tahan karat austenitik, ada beberapa hal yang bisa dikontrol. Diantaranya adalah :

1. *Solution quenching*

Perlakuan panas *solution quenching* bisa menjadi salah satu opsi untuk mencegah pembentukan karbida kromium di batas butir *austenitic stainless steel*. Mekanismenya adalah

material dipanaskan pada temperatur sekitar $1000^{\circ}\text{C} - 1200^{\circ}\text{C}$, kemudian dilakukan proses quenching pada air. Hal ini dapat dilakukan pada material karena di temperatur $1000^{\circ}\text{C} - 1200^{\circ}\text{C}$, karbida kromium terlarut dan mampu menghasilkan paduan yang homogen. Pendinginan cepat (*quenching*) merupakan hal vital yang perlu dilakukan untuk mencegah pembentukan karbida kromium pada batas butir baja tahan karat

2. Penambahan elemen stabilizer / *carbide former*

Penambahan elemen paduan *carbide former* dapat mengurangi kemungkinan terbentuknya karbida kromium. Hal ini terjadi karena elemen tersebut memiliki afinitas yang lebih besar dari kromium, dan nantinya elemen ini jika jumlahnya cukup, maka akan bereaksi dengan karbon yang terdapat di batas butir, sehingga kromium akan tetap terjaga. Elemen-elemen yang umum dijadikan sebagai *carbide former* diantaranya adalah titanium dan niobium (Fontana, 1987).

3. Menurunkan kadar karbon pada *stainless steel*

Mereduksi kadar karbon dapat menjadi salah satu cara untuk mencegah pembentukan karbida kromium di batas butir. Baja tahan karat dengan kadar karbon yang rendah diberikan huruf "L", seperti SS 316L, SS 304L, dan lain-lain (Pyo & Jin, 2018). Tujuan dari menurunkan kadar karbon pada baja tahan karat adalah untuk meningkatkan ketahanan korosi, khususnya pada proses pengelasan. Kandungan karbon *austenitic stainless steel* yang dikategorikan "L" umumnya dibawah 0,03% agar tidak terjadi presipitasi di batas butir pada temperatur sensitis. Banyaknya kandungan karbon pada baja tahan karat austenitik akan memperbesar kemungkinan untuk bereaksi dengan kromium yang ada di sekitar batas butir dan menyebabkan penipisan pada daerah sekitar batas butir, sehingga *corrosion resistance* pada austenitic stainless steel akan menurun. Dengan menurunkan kadar karbon, reaksi antara karbon dan kromium dapat diminimalisir dan ketahanan korosi baja tahan karat dapat terjaga (Atanda et al., 2010).

2.3 *Stainless Steel*

Stainless Steel atau baja tahan karat adalah logam paduan yang memiliki kandungan utama besi dan kromium. Adanya kandungan kromium pada *stainless steel* membuat lebih tahan terhadap serangan korosi, karena dapat membentuk *chromium oxide* maupun *nickel oxide* (pada *stainless steel* yang mengandung nikel) yang tipis, adheren, dan stabil (Avner, 1974). Pemilihan *stainless steel* pada industri didasarkan oleh biaya yang lebih murah dan sifat mekanik yang baik, seperti ketahanan korosi, kekuatan, dan kekerasan. Kromium pada baja tahan karat dapat membantu meningkatkan ketahanan terhadap serangan korosi dengan membentuk lapisan oksida pada permukaan *stainless steel*. Pada *stainless steel* juga terkandung nikel, yang merupakan *austenite former* dan mampu menjaga struktur austenit dengan adanya kandungan kromium yang tinggi (Llewellyn & Hudd, 1998).

Kandungan karbon saja tidak cukup untuk membuat baja tahan karat menjadi baik. Oleh karena itu, dibutuhkan beberapa elemen paduan yang mampu meningkatkan sifat mekanik dari baja, seperti nikel, molibdenum, kromium, dan lain-lain. Tiap elemen paduan memiliki peranan masing-masing, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1 di bawah ini

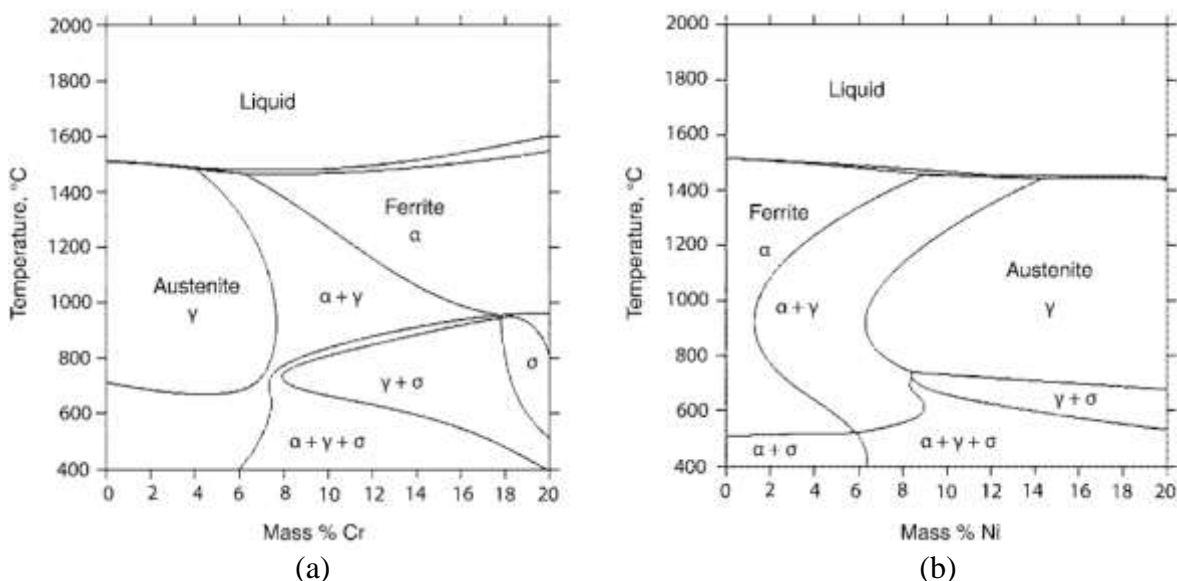
Tabel 2.1 Pengaruh unsur paduan terhadap Baja Tahan Karat Austenitik (Llewellyn & Hudd, 1998)

No	Unsur	Pengaruh
1.	Kromium	Meningkatkan ketahanan korosi
2.	Nikel	Meningkatkan keuletan dan ketangguhan pada temperatur tinggi
3.	Molibdenum	Meningkatkan ketahanan korosi sumuran (<i>pitting corrosion</i>)
4.	Niobium	Unsur pembentuk karbida yang kuat
5.	Silikon	Meningkatkan ketahanan oksidasi, baik pada temperatur tinggi, maupun temperatur rendah.
6.	Sulfur	Meningkatkan <i>machinability</i>
7.	Titanium	Meningkatkan ketahanan korosi dan <i>mechanical properties</i>

Stainless steel memiliki 5, diantaranya adalah *austenitic stainless steel*, *ferritic stainless steel*, *martensitic stainless steel*, *duplex stainless steel*, dan *precipitation hardening stainless steel*.

2.3.1 Austenitic Stainless Steel

Baja tahan karat austenitik merupakan salah satu jenis dari baja tahan karat yang memiliki kadar kromium 18% – 25% , kadar nikel 8% - 20%, dan kadar karbon. *Austenitic stainless steel* memiliki struktur FCC(*Face-centered cubic*) dari nikel yang membuat baja tipe ini tidak mudah mengalami penurunan kekuatan pada temperatur operasi yang tinggi. Nilai dari kandungan nikel dalam baja tahan karat austenitik harus mencukupi untuk bisa mempertahankan struktur austenit tetap stabil pada temperatur kamar, seperti *stainless steel* 18/8 yang mengandung 18% kromium dan 8% nikel (McGuire, 2008). Gambar 2.4 merupakan diagram fasa yang menunjukkan variasi struktur di berbagai rentang komposisi unsur paduan kromium dan nikel.



Gambar 2.4 Diagram fasa (a) Fe-Cr pada kandungan Ni sebesar 8% (b) Fe-Ni pada kandungan Cr sebesar 18% (McGuire, 2008)

Baja jenis ini juga memiliki paduan tambahan seperti molibdenum, titanium, dan niobium, dimana penambahan elemen paduan pada baja tipe ini mampu memperkuat ketahanan material terhadap serangan korosi (Khatak & Raj, 2002). Kromium pada *austenitic stainless steel* memiliki peran yang besar sebagai paduan yang mampu meningkatkan *corrosion resistance* pada material baja tahan karat austenitik dengan membentuk lapisan oksida Cr_2O_3 yang merupakan lapisan pasif.

Secara aspek metalurgi, baja tahan karat austenitik dapat dibuat lunak dengan *yield strength* 200 MPa dan dibuat kuat dengan metode *cold working* yang mampu mencapai *yield strength* hingga 2000 MPa. *Austenitic stainless steel* memiliki sifat non-magnetik, ketahanan korosi yang baik, ketangguhan yang baik, serta memiliki kekuatan yang baik ketika dilakukan *cold-working*. Struktur austenit menyebabkan kekuatan tidak mengalami penurunan yang drastis pada *austenitic stainless steel* pada kondisi operasional temperatur yang tinggi (McGuire, 2008). Baja tahan karat austenitik dapat diaplikasikan pada alat industri seperti *pressure vessels* dan pipa (Ahmad, 2006). Namun, baja tahan karat austenitik memiliki kerawanan terhadap presipitasi karbida kromium pada batas butir yang cukup tinggi, khususnya pada temperatur sensitisasi. Untuk mencegah pembentukan kromium karbida, *austenitic stainless steel* dipanaskan pada temperatur di atas 900°C selama 2 – 4 jam, kemudian pendinginan cepat dengan air. Contoh dari *austenitic stainless steel* adalah tipe 316, 304, 310, dan 321, seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini (Avner, 1974).

2.3.2 *Stainless Steel 316*

Stainless steel 316 (SS 316) merupakan salah satu contoh dari baja tahan karat austenitik. Komposisi kimia SS 316 dapat diketahui pada Tabel 2.2 dibawah ini:

Tabel 2.2 Komposisi kimia SS 316 (Cobb, 1999)

Unsur	C	Mn	Mo	S	P	Si	Cr	Ni	N	Fe
wt%	0.08	2	2-3	0.03	0.045	0.75	16-18	10-14	0.1	Bal

Sesuai yang tertera pada Tabel 2.2, baja tahan karat tipe 316 memiliki kadar kromium dan nikel, sehingga baja tahan karat tipe ini memiliki ketahanan korosi yang baik. Kandungan nikel (Ni) dan mangan (Mn) pada baja tahan karat austenitik berperan sebagai penstabil austenit yang mampu memperluas daerah austenit dan mempersempit daerah ferit, sehingga material menjadi tahan terhadap temperatur tinggi dan memiliki kekuatan yang tinggi. Kadar molibdenum pada *austenitic stainless steel* mampu meningkatkan *corrosion resistance* pada material SS 316, khususnya *pitting corrosion* dan kekuatan pada *austenitic stainless steel* karena perannya sebagai *carbide forming element* yang mampu meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada baja tahan karat austenitik. Selain itu, molibdenum yang terkandung pada *stainless steel 316* berperan sebagai *stabilizer* dengan mampu bereaksi dengan karbida pada temperatur tinggi membentuk molibdenum karbida pada batas butir, sehingga mampu meminimalisir pembentukan karbida kromium pada batas butir (Thelning, 1984). Pengaplikasian *stainless steel 316* di kehidupan sehari-hari cukup beragam, seperti pada *tool equipment* (Avner, 1974) serta *storage tank* pada industri makanan dan *heat exchanger* pada industri manufaktur (Maula & Anis, 2013).

Baja tahan karat austenitik tipe 316 juga sering digunakan karena mechanical properties-nya, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 *Mechanical Properties SS 316*(Cobb, 1999)

Parameter (Satuan)	Nilai
<i>Tensile Strength min</i> (MPa)	517
<i>Yield Strength min</i> (MPa)	207
<i>Elongation min</i> (%)	40
<i>Hardness max</i> (HB)	217

2.4 Difusi

Difusi merupakan peristiwa berpindahnya partikel zat dari bagian yang berkonsentrasi tinggi ke bagian yang berkonsentrasi rendah. Proses difusi dapat dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu :

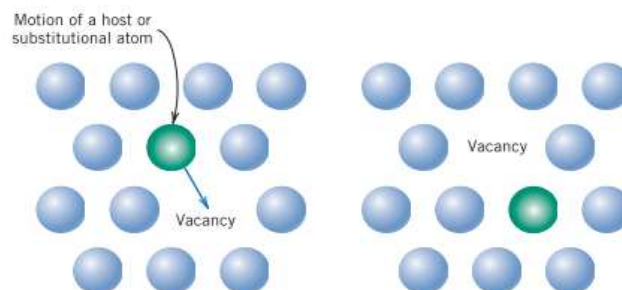
1. Temperatur

Pada saat temperatur bertambah, maka partikel akan mendapat energi yang untuk bergerak. Ketika partikel mendapat energi yang cukup, maka dengan mudah partikel tersebut untuk berpindah dan gerakannya akan semakin cepat dengan meningkatnya temperatur

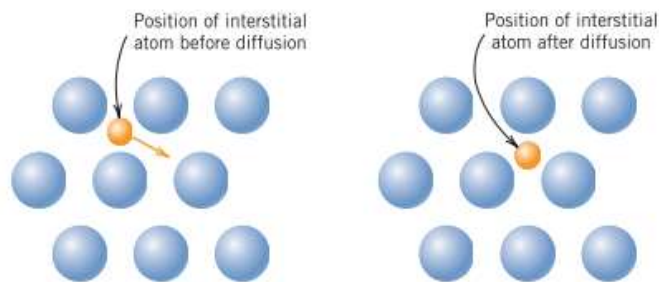
2. *Diffusing species*

Setiap atom memiliki koefisien difusi yang berbeda. Semakin besar nilai koefisien difusi suatu atom, maka proses difusi akan semakin cepat. Energi aktivasi yang tinggi pada atom dapat menyebabkan koefisien difusi menjadi rendah dan proses difusi pada atom berjalan lebih lambat.

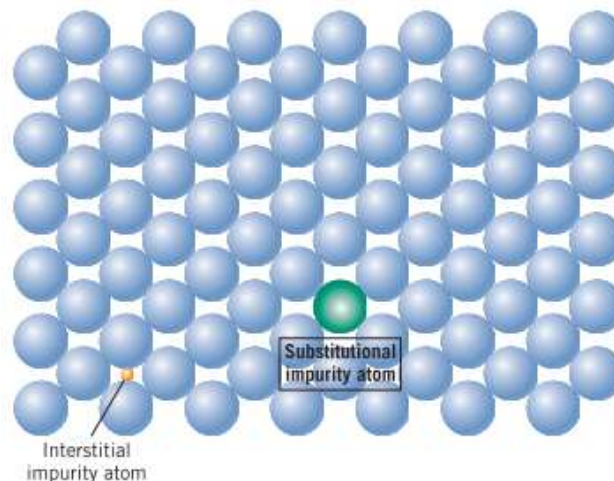
Agar proses difusi pada atom terjadi, terdapat dua syarat yang harus dipenuhi, yaitu terdapat bagian sekitar yang kosong dan atom harus memiliki energi yang cukup untuk memutuskan ikatan dengan atom di sebelahnya dan kemudian menyebabkan *lattice distortion* selama perpindahan. Pada temperatur tertentu, sebagian kecil dari atom mampu melakukan proses difusi dengan energi vibrasi yang dimiliki dan akan semakin meningkat dengan bertambahnya temperatur. Proses difusi bisa terjadi secara interstitial maupun substitusional (*vacancy diffusion*). Difusi secara interstitial melibatkan atom yang bermigrasi dari posisi interstitial ke daerah yang memiliki celah kosong. Pada paduan logam, *interstitial diffusion* memiliki laju yang lebih cepat karena atom interstitial memiliki ukuran yang relatif kecil dan lebih fleksibel. Selain itu, pada *lattice* lebih banyak daerah interstitial dari pada daerah *vacant*, sehingga kemungkinan terjadinya difusi akan lebih besar. *Vacancy diffusion* melibatkan pertukaran atom dari posisi *lattice* normal ke bagian *lattice* yang memiliki kekosongan. Proses difusi ini perlu ada bagian yang kosong, sehingga atom bisa bermigrasi. Selain itu, terdapat juga difusi substitusional, dimana terjadi pergantian antara *impurity atom* dengan *host atom*. Hal yang membedakan antara difusi secara interstitial dengan substitusi adalah pada difusi secara substitusi atom yang menggantikan memiliki ukuran yang sama dengan *host atom*, sedangkan pada difusi interstitial atom baru memiliki ukuran yang lebih kecil dari *host atom*. Difusi pada atom dipengaruhi 4 hal, yaitu ukuran atom, struktur kristal, elektronegativitas, dan valensi (Callister Jr, 2007).



Gambar 2.5 *Vacancy Diffusion* (Callister Jr, 2007)



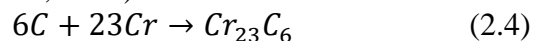
Gambar 2.6 *Interstitial diffusion* (Callister Jr, 2007)



Gambar 2.7 Difusi secara substitusi dan interstisial (Callister Jr, 2007)

2.4.1 Proses Difusi Karbida Kromium

Difusi pada *austenitic stainless steel* terjadi karena adanya proses sensitisasi yang terjadi di batas butir pada temperatur 500°C – 850°C. Akibatnya, dua senyawa, yaitu kromium (Cr) dan karbon (C), akan berdifusi ke batas butir membentuk kromium karbida, sesuai dengan reaksi sebagai berikut (Tedmon Jr et al., 1971).



Kromium karbida yang terbentuk di batas butir akan merubah struktur mikro dari baja tahan karat austenitik dan menjadi rawan terhadap serangan korosi batas butir. Adanya kandungan kromium di batas butir menyebabkan daerah sekitar batas butir mengalami penipisan dan membentuk *chromium depleted zone*. Karbida kromium pada batas butir secara spesifik terbentuk ketika baja didinginkan secara lambat (*annealing process*) dan mengalami proses pengelasan (Matula et al., 2001).

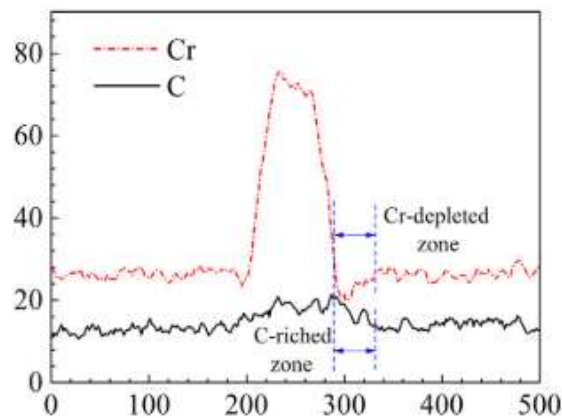
Proses difusi terjadi pada temperatur sensitisasi, dengan kondisi awal terjadi ketika kadar karbon pada material berlebihan. Karbon yang berlebih dalam matriks dan kromium akan berdifusi ke batas butir sebagai tempat untuk terjadi reaksi. Batas butir menjadi tempat untuk atom berdifusi karena memiliki energi dan mobilitas yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan daerah *austenite matrix* (Kolli, Ohlgschläger, et al., 2019). Akibatnya, batas butir dapat kromium yang berada di daerah sekitar batas butir untuk berdifusi ke batas butir dalam bentuk *solid solution* dan bereaksi dengan karbon di batas butir membentuk *chromium carbide*. Karbon yang berlebih pada matriks akan berdifusi ke batas butir secara interstitial karena ukuran atom karbon yang relatif lebih kecil dan memiliki difusivitas yang tinggi, sehingga proses difusi berjalan cepat. Kromium yang berada di sekitar batas butir kemudian ikut berdifusi dari matriks ke batas butir *austenitic stainless steel*, tetapi proses difusinya relatif lebih lama karena ukuran atom yang lebih besar dan difusivitas yang lebih rendah jika dibandingkan dengan karbon.

Proses difusi yang lambat oleh kromium dari matriks menyebabkan bagian yang mengalami penipisan tidak dapat menggantikan jumlah kromium yang berdifusi ke batas butir. Akhirnya, kromium dan karbon bertemu di batas butir dan bereaksi membentuk karbida kromium (Cr_{23}C_6), sehingga menyebabkan kadar kromium pada daerah sekitar *grain boundary* berkurang dibawah 12% wt Cr. Hal ini menyebabkan ketahanan korosi pada baja tahan karat austenitik berkurang, sehingga korosi dapat dengan mudah terjadi berupa *intergranular corrosion* (Fontana, 1987). Pada proses difusi ini, kromium memiliki difusivitas yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan unsur paduan lain yang terdapat pada *stainless steel*, yang dapat ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Data Difusivitas Unsur Paduan(Gale & Totemeier, 2004)

Unsur	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Difusivitas (m^2/s)
Fe	900	1.1×10^{-17}
C	900	5.9×10^{-12}
Cr	900	1×10^{-16}
Mo	900	4.97×10^{-16}
Ni	900	2.45×10^{-17}

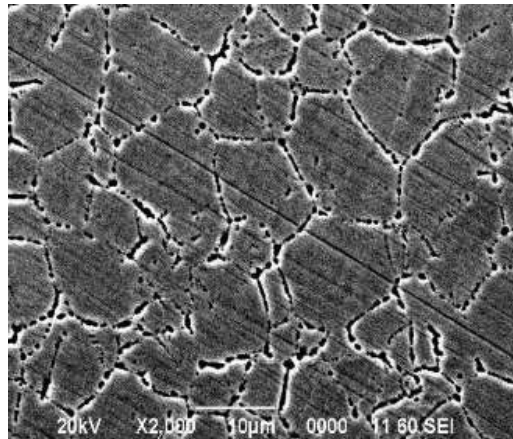
Untuk mengetahui bagaimana persebaran kromium yang berdifusi ke batas butir, dapat digunakan alat EDX (*Energy-dispersive X-Ray Spectroscopy*) dengan *map scanning* maupun *line scanning*. Alat ini nantinya akan mendeteksi keberadaan unsur kromium yang terdapat permukaan baja tahan karat austenitik (Priyotomo & Putrayasa A, 2018).



Gambar 2.8 Hasil EDX (Qian et al., 2016)

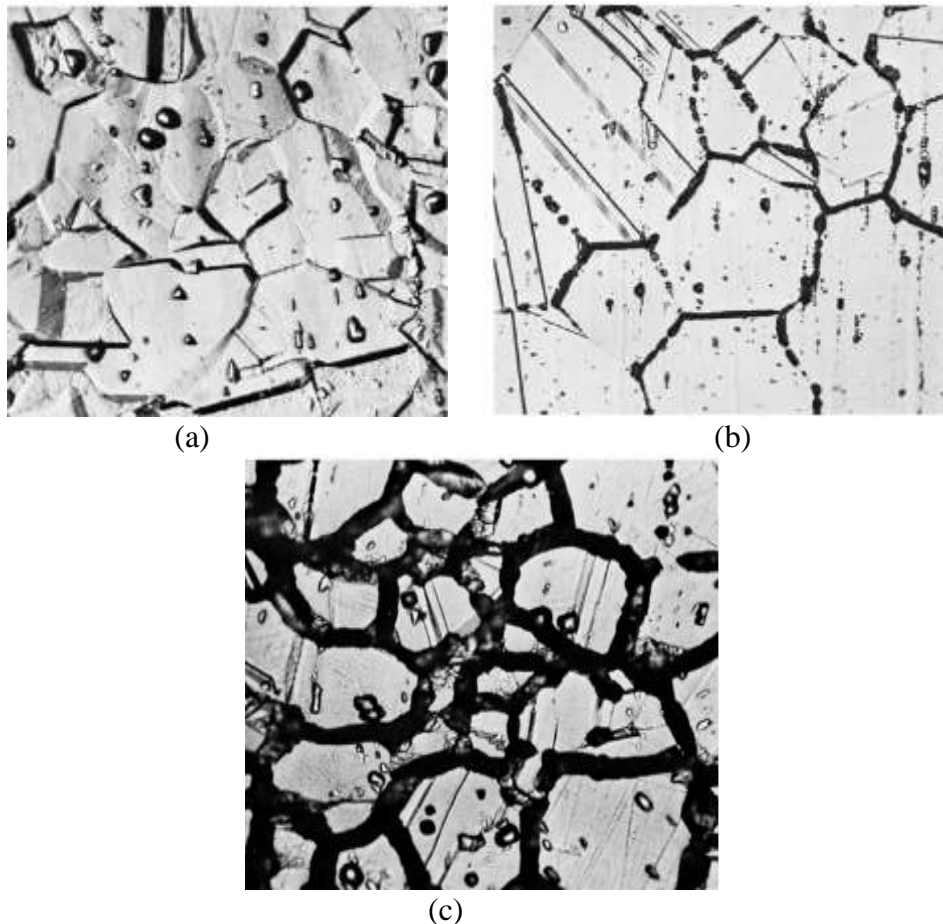
2.5 Morfologi Batas Butir pada *Austenitic Stainless Steel*

Korosi yang terjadi pada batas butir *austenitic stainless steel* terjadi dalam skala mikron maupun nano, sehingga dibutuhkan alat bantu untuk mengetahui bagaimana bentuk presipitasi karbida kromium yang terbentuk di batas butir. Alat yang sering digunakan untuk mengamati morfologi batas butir adalah mikroskop optik, *Scanning Electron Microscope* (SEM), dan *Transmission Electron Microscopy* (TEM).



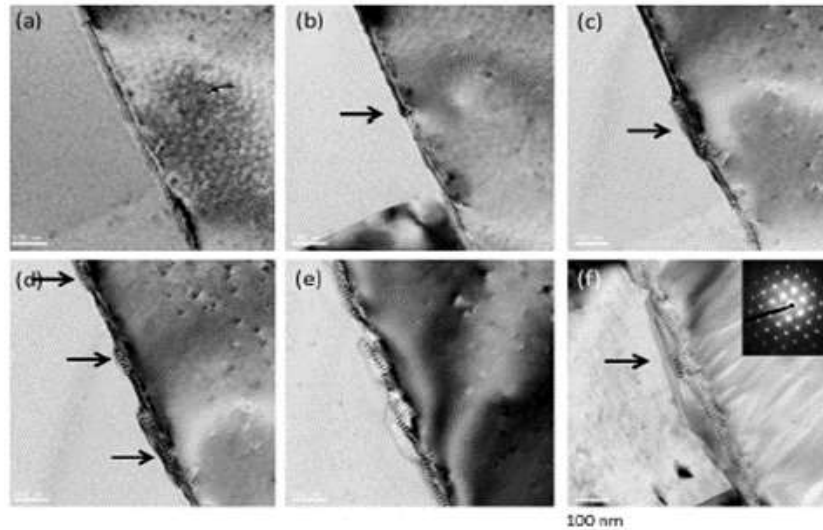
Gambar 2.9 Morfologi batas butir *stainless steel* dengan SEM perbesaran 2000x (Priyotomo & Putrayasa A, 2018)

Untuk mendapatkan hasil struktur mikro dari baja tahan karat austenitik, material perlu dietsa terlebih dahulu menggunakan larutan asam oksalat sesuai dengan standar ASTM A-262 mengenai pendeteksian kerawanan terhadap korosi batas butir di *austenitic stainless steel*. Dari hasil pengamatan visual dengan menggunakan mikroskop optik pada material *austenitic stainless steel*, terdapat tiga jenis struktur yang dapat dihasilkan, diantaranya adalah *step structure*, *dual structure*, dan *ditch structure*, yang ditunjukkan gambar berikut (ASTM International, 2021).



Gambar 2.10 Struktur batas butir (a) *Step*, (b) *Dual*, (c) *Ditch* (ASTM International, 2021)

Dari pengamatan dengan menggunakan TEM, dapat dilihat morfologi batas butir pada temperatur sensitisasi (650°C) dengan variasi waktu 0, 1, 3, 5, 10, dan 60 menit, seperti pada Gambar 2.11



Gambar 2.11 Morfologi batas butir pada temperatur 650°C selama (a) 0, (b) 1, (c) 3, (d) 5, (e) 10, dan (f) 60 menit (Kaneko et al., 2011)

Sebelum dilakukan proses pemanasan, tidak terjadi presipitasi karbida kromium. Namun seiring dengan meningkatnya temperatur, mulai terbentuk presipitasi pada batas butir dalam bentuk yang kecil. Waktu *holding annealing* yang lama dapat mempengaruhi proses presipitasi, dimana semakin lama waktu *annealing* maka presipitasi karbida kromium akan mudah terjadi dan terbentuk juga *chromium depleted zone* pada daerah sekitar batas butir. Dari hasil EDX, ditunjukkan bahwa pada daerah sekitar batas butir mengalami penurunan kadar kromium hingga 10% wt Cr (Kaneko et al., 2011). Presipitasi yang terjadi di batas butir ini muncul karena atom Cr dan C yang ada di sekitar batas butir berdifusi masuk ke batas butir dan menimbulkan kekosongan pada daerah yang kehilangan kromium. Batas butir pada *austenitic stainless steel* merupakan struktur terbuka yang menyebabkan kromium dan karbon mudah untuk berdifusi ke batas butir, sehingga kadar kromium pada batas butir meningkat (Bansal et al., 2014).

2.6 Pengujian

Pada penelitian ini, dilakukan beberapa pengujian, diantaranya pengujian komposisi kimia, pengujian metalografi, dan pengujian *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM-EDX).

2.6.1 Pengujian Komposisi Kimia

Salah satu alat yang dapat digunakan untuk melakukan pengujian komposisi kimia adalah OES (*Optical Emission Spectroscopy*), yang termasuk ke dalam *atomic spectroscopy*. Prinsip dasar alat OES adalah mengeksitasi atom dalam sampel pada temperatur yang tinggi, kemudian menghasilkan pelepasan energi yang nantinya akan ditangkap kembali. Panjang gelombang cahaya yang dihasilkan oleh emisi energi kemudian diukur untuk menentukan konsentrasi unsur yang terdapat pada material yang diuji (Taufiq et al., 2017).

Optical Emission Spectroscopy memiliki banyak jenis, namun yang sering digunakan hingga saat ini adalah *Spark OES* dan *Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy* (ICP-OES). *Spark OES* sering digunakan untuk spesimen logam karena

kecepatan analisis dan akurasi yang baik untuk mengontrol pemrosesan paduan logam. ICP-OES merupakan teknik untuk menganalisa konsentrasi dari unsur metalik di dalam hampir semua tipe material yang digunakan. Spesimen yang digunakan pada ICP-OES berupa padatan yang dilarutkan kedalam *solvent* yang sesuai untuk dianalisa. Teknik analisa menggunakan ICP-OES lebih akurat daripada *Spark OES*, namun jarang digunakan pada dunia industri karena preparasi spesimen uji yang tergolong kurang praktis jika dibandingkan dengan *Spark OES* (Widyastuti et al., 2020).

2.6.2 Pengujian Metalografi

Metalografi merupakan proses pengujian yang bertujuan untuk menganalisa struktur mikroskopis dari spesimen tersebut. Alat yang digunakan untuk pengujian metalografi adalah mikroskop optik. Prinsip kerja dari mikroskop optik adalah sinar dari luar dipantulkan melalui cermin, kemudian dipantulkan oleh lensa yang ada pada mikroskop ke mata pengamat, sehingga dapat memperlihatkan struktur mikro yang terbentuk pada permukaan spesimen uji.

Sebelum mengamati struktur mikroskopis pada mikroskop optik, spesimen perlu dilakukan proses preparasi. Tujuan preparasi pada pengujian metalografi agar permukaan sampel terlihat secara merata, sehingga dapat terlihat jelas struktur mikro spesimen uji dari mikroskop. Berikut merupakan tahap-tahap preparasi spesimen pada proses metalografi

1. *Sectioning*

Sectioning merupakan tahap preparasi spesimen yang bertujuan untuk menentukan bagian mana yang ingin diamati (Widyastuti et al., 2020).

2. *Cutting*

Cutting merupakan proses lanjutan dari *sectioning*. Setelah menentukan bagian spesimen yang ingin diamati, spesimen akan dipotong dengan menggunakan mesin pemotong seperti gerinda. Selama proses *cutting*, terjadi gesekan antara spesimen dengan mesin pemotong yang dapat menimbulkan panas pada daerah yang terkena proses pemotongan. Untuk mencegah hal tersebut, dapat digunakan *coolant* (cairan pendingin) ketika proses *cutting* berlangsung (PACE Technologies, 2010).

3. *Mounting*

Mounting merupakan proses menanamkan spesimen kedalam material *mounting* yang berupa material termoset. Tujuan dari *mounting* yaitu untuk mempermudah handling spesimen ketika ukurannya terlalu kecil.

4. *Grinding*

Grinding merupakan tahap preparasi spesimen uji yang bertujuan untuk meratakan permukaan spesimen dan menghilangkan goresan yang diakibatkan oleh proses pemotongan. Proses *grinding* menggunakan kertas gosok dengan grit yang bertahap dari paling kasar hingga paling halus.

5. *Polishing*

Polishing merupakan tahapan akhir untuk mendapatkan permukaan spesimen uji yang rata dan bebas goresan halus. Proses ini ditandai dengan permukaan yang mengkilau seperti cermin dengan menggunakan pasta, kemudian digosokkan pada media yang halus seperti kan bludru.

6. *Etching*

Etching merupakan proses pengkorosian permukaan spesimen akibat reaksi elektrolisis, dimana larutan etsa akan merusak permukaan spesimen uji. Proses *etching* pada pengujian metalografi bertujuan untuk menunjukkan kontras pada mikrostruktur di permukaan spesimen yang nantinya akan diamati pada mikroskop optik (Widyastuti et al., 2020).

2.6.3 Pengujian SEM-EDX

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah salah satu tipe mikroskop elektron yang digunakan untuk melakukan proses analisa sifat material dengan *scanning* pada permukaan material. Keuntungan penggunaan SEM adalah dapat menghasilkan gambar dengan perbesaran yang tinggi, *depth of field* yang tinggi (banyak partikel yang masuk dalam fokus pada satu waktu), dan resolusi gambar yang baik. Prinsip kerja SEM adalah menembakkan elektron pada permukaan spesimen yang kemudian dipantulkan kembali dan membentuk bayangan yang diterima oleh detektor, sehingga nantinya dapat diamati morfologinya (Callister Jr, 2007).

EDX merupakan alat tambahan pada SEM yang bertujuan untuk mengidentifikasi suatu unsur. Secara prinsip, EDX menganalisa energi dan distribusi intensitas dari sebuah sinar-X. Hasil dari pengujian EDX berupa puncak-puncak yang mewakili suatu unsur yang terkandung yang ingin diketahui (Widyastuti et al., 2020).

2.7 Penelitian Terdahulu

Riset mengenai proses difusi karbida kromium pada material *austenitic stainless steel* pernah dilakukan oleh beberapa orang dengan rincian ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Rangkuman Penelitian Terdahulu

Judul	Penulis (Tahun)	Metode Percobaan	Hasil Penelitian
<i>Perilaku Sensitasi Pada Logam Stainless Steel Seri J4 Akibat Perlakuan Panas</i>	Priyotomo, Gadang & Putrayasa A, I Nyoman Gede (2018)	Material dipanaskan dengan rentang temperatur antara 600 – 900°C dengan <i>holding time</i> satu jam, kemudian pendinginan dengan laju yang lambat di dalam <i>muffle furnace</i> . Pengamatan dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik dan SEM.	Dalam waktu 1 jam, sensitisasi hanya terjadi pada temperatur 700 – 900°C, karena adanya difusi kromium ke batas butir dan membentuk senyawa kromium karbida. Semakin tinggi temperatur, maka proses difusi menjadi lebih cepat dan menyebabkan karbida kromium lebih mudah terbentuk di batas butir dan menurunkan kadar kromium di daerah sekitar batas butir. Presipitasi karbida kromium di batas butir menyebabkan lapisan pasif Cr ₂ O ₃ sulit terbentuk (Priyotomo & Putrayasa A, 2018).
<i>Effects of chloride ions on electrochemical reaction of 316 stainless steel in mixtures of molten nitrate salts</i>	Zhu, M., et al (2020)	Spesimen dipanaskan pada lingkungan garam nitrat dengan tambahan NaCl pada temperatur 450°C selama 150 jam	Pada temperatur tinggi, laju reaksi antara asam dan SS 316 meningkat dan difusi pada matriks meningkat, sehingga dapat mensubstitusi daerah yang kehilangan ion. Hal ini terjadi karena garam nitrat

			<p>memiliki <i>thermal stability</i> yang rendah dan mudah terdekomposisi. Oleh karena itu, energi aktivasi pada butir menurun dan atom Cr dan Ni membentuk lapisan pasif. Adanya ion klorida pada garam nitrat dapat menurunkan ketahanan korosi pada SS 316 karena ion klorida mampu meningkatkan <i>corrosion current density</i> dari 3,02 mA/cm² menjadi 8,76 mA/cm² (Zhu et al., 2020).</p>
<p><i>Influence of Thermal Aging on Metallurgical, Mechanical and Corrosion Performance of Electron Beam Welded 18mm Thick AISI 316</i></p>	<p>Kumar, Arun., et al (2020)</p>	<p>Spesimen diberikan 3 variasi :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Tanpa perlakuan (T₀) 2. <i>Thermal aging</i> 750°C 24 jam, pendinginan udara (T₁) 3. <i>Thermal aging</i> 750°C 300 jam, pendinginan udara (T₂) 	<p>Pada T₁ mulai terbentuk presipitasi kromium karbida pada batas butir dan semakin meningkat pada kondisi T₂. Setelah proses <i>thermal aging</i>, batas butir menjadi rawan terhadap korosi batas butir karena atom Cr berdifusi ke daerah batas butir untuk membentuk karbida kromium (Kumar et al., 2020).</p>
<p>Studi sensitasi baja tahan karat tipe 316 sebagai bahan kelongsong dan struktur <i>fast breeder reactors</i></p>	<p>Kartaman, M., et al (2015)</p>	<p>Material SS 316 diberikan perlakuan panas dengan variasi :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Solution treatment</i> temperatur 1000°C 3 jam dalam lingkungan atmosfer gas Argon, pendinginan cepat dengan media air 2. <i>Solution annealing</i> temperatur 350°C – 650°C selama 6 jam dalam lingkungan atmosfer gas Argon, pendinginan dalam furnace 	<p>Pada material yang mengalami pemanasan temperatur 1000°C 3 jam dengan pendinginan cepat, tidak terbentuk Cr₂₃C₆ karena fasa intermetallik larut pada temperatur tinggi. Laju korosi pada temperatur 350, 450, 550, dan 650 secara berurutan adalah 56,59 mpy, 89,39 mpy, 91,06 mpy, 105,9 mpy, dan 118,37 mpy. Pada pemanasan temperatur 350°C 6 jam, terjadi korosi yang diduga akibat permukaan yang tidak homogen. Pada pemanasan temperatur 450°C 6 jam, tidak terjadi</p>

			<p>korosi karena energi yang diperlukan untuk difusi karbon dan kromium ke batas butir tidak cukup. Pada pemanasan temperatur 550°C dan 650°C 6 jam, terbentuk presipitasi karbida kromium akibat atom karbon dan kromium berdifusi ke batas butir SS 316 (Kartaman et al., 2015).</p>
<p><i>Effects of heat treatment on mechanical properties and sensitization behavior of materials in dissimilar metal weld</i></p>	<p>Kim, Sub., et al (2019)</p>	<p>Menggunakan 2 jenis stainless steel (316 dan 316L) serta SA508 Gr.1, Alloy 82, dan Alloy 182, dengan temperatur pemanasan 600,650, dan 700°C selama 10 jam. Pengujian dengan DL-EPR dan SEM-EDX</p>	<p>Pada SS 316, semakin tinggi temperatur, maka karbida kromium akan semakin mudah terbentuk dan <i>chromium depleted zone</i> semakin melebar. Pada temperatur 600°C selama 10 jam, terbentuk struktur <i>dual structure</i> dengan nilai DOS 5 Pada SS 316L, karbida kromium tidak terbentuk karena kadar karbon yang rendah (Kim et al., 2019)</p>
<p><i>CO₂ corrosion behavior of sensitized 304 and 316 austenitic stainless steels in 3.5 wt.% NaCl solution and presence of H₂S</i></p>	<p>Javidi, Mehmedi., et al (2020)</p>	<p>Material SS 304 dan 316 diberikan perlakuan <i>solution treatment</i> pada temperatur 1050°C selama 2 jam diikuti <i>quenching</i> di media air. Kemudian dipanaskan pada temperatur 675°C selama 2 jam di lingkungan CO₂ jenuh dengan 3,5% NaCl dan H₂S. Pengujian menggunakan tes DL-EPR, SEM, dan mikroskop optik</p>	<p>SS 304 dan 316 yang tersensitisasi memiliki nilai DOS yang tinggi (23,01 untuk SS 304 dan 16,2 untuk SS 316). Pengamatan dengan mikroskop optik menunjukkan pembentukan karbida kromium pada batas butir SS 304 dan 316 dengan membentuk <i>ditch structure</i>. Adanya kandungan H₂S dapat memperburuk korosi pada <i>stainless steel</i> dengan membentuk <i>pit</i> yang diamati dengan SEM. Pit yang terbentuk nantinya akan menjadi korosi sumuran (<i>pitting</i></p>

corrosion) (Javidi et al., 2020).

Excellent corrosion resistance of 316 stainless steel in purified NaCl-MgCl₂ eutectic salt at high temperatur

Guo, Lili., et al (2020)

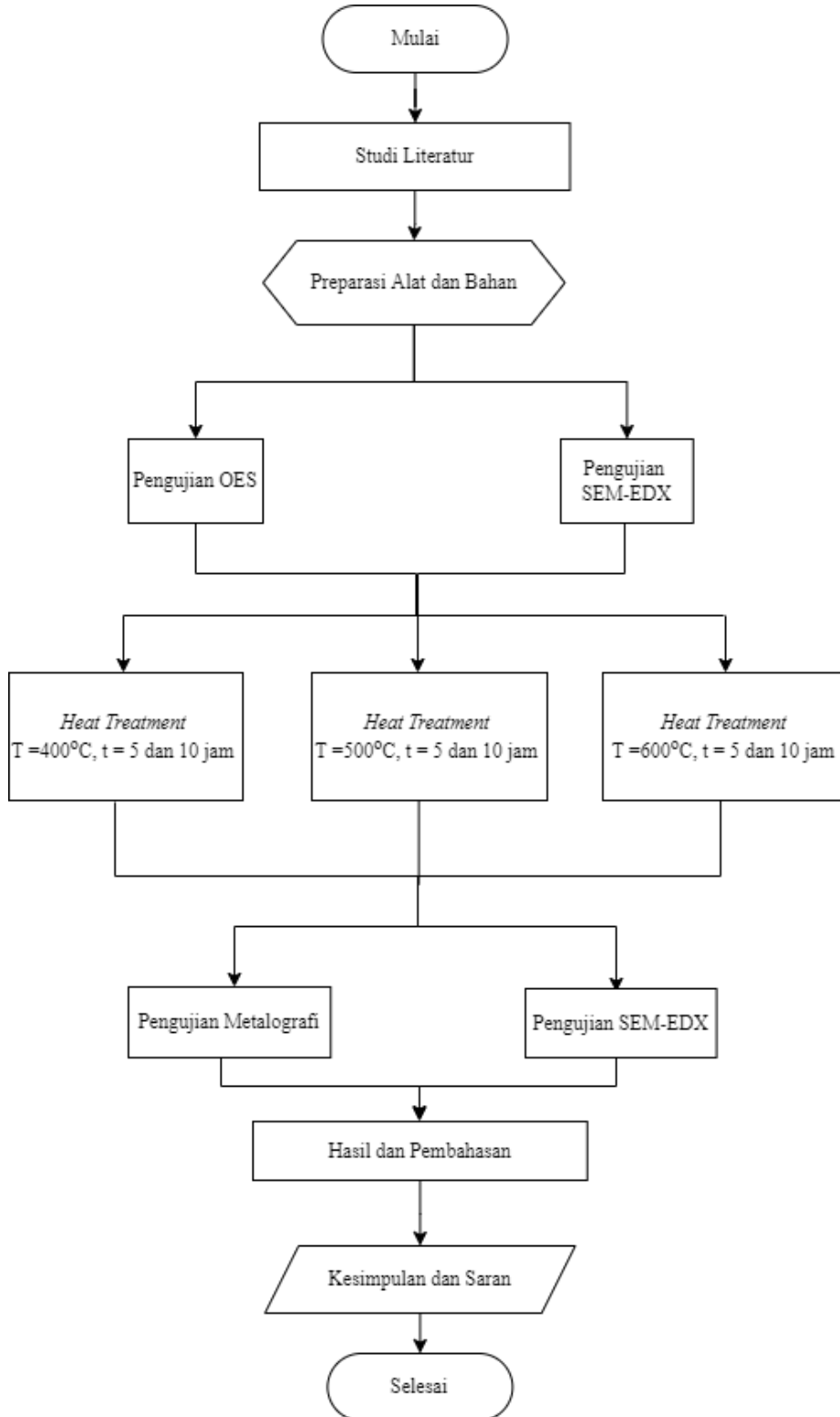
Spesimen diberi perlakuan panas dengan variasi temperatur 500,600, dan 700°C selama 240 jam pada larutan NaCl-MgCl₂ murni dengan atmosfer gas Argon(Ar), kemudian spesimen diamati dengan SEM

Semakin tinggi temperatur, resiko korosi batas butir akan semakin tinggi dengan membentuk *chromium depleted zone* dengan lebar lebih dari 60µm, karena kromium memiliki energi yang cukup untuk berdifusi ke batas butir (Guo et al., 2020).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Diagram alir proses penelitian ditunjukkan pada gambar di bawah.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. *Stainless steel 316*
Baja tahan karat austenitik 316 merupakan bahan baku utama yang digunakan selama proses penelitian ini.
2. Kertas Ampelas
Kertas ampelas pada penelitian ini digunakan pada proses metalografi untuk meratakan dan menghaluskan permukaan spesimen SS 316 setelah proses pemanasan.
3. Pasta Poles
Pasta poles digunakan untuk menghaluskan permukaan material spesimen SS 316 hingga mengkilap dan dapat mencegah spesimen uji dari korosi.
4. Kristal Asam Oksalat
Kristal asam oksalat ($H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$) digunakan sebagai bahan pembuat larutan etsa pada pengujian metalografi. Larutan etsa asam oksalat berfungsi untuk mengkorosi bagian batas butir dari spesimen sehingga struktur mikro dari spesimen dapat terlihat dengan jelas.
5. Aquades
Aquades pada penelitian ini digunakan sebagai pelarut dari asam oksalat.
6. Larutan Alkohol 95%
Larutan alkohol 95% digunakan untuk membilas spesimen setelah dilakukan proses *electro-etching* untuk mencegah terjadinya kristalisasi dari asam oksalat pada permukaan spesimen.

3.3 Alat Penelitian

Alat yang diperlukan untuk melakukan penelitian adalah sebagai berikut.

Alat yang diperlukan selama proses penelitian adalah sebagai berikut :

1. Gerinda
Gerinda merupakan alat yang digunakan untuk memotong spesimen sesuai dengan dimensi yang sudah ditentukan
2. *Muffle Furnace*
Muffle furnace dengan merk THERMOLYNE yang diproduksi oleh ThermoFisher Scientific merupakan alat yang dilakukan untuk melakukan proses heat treatment pada spesimen uji sesuai dengan variasi temperatur dan variasi waktu yang telah ditentukan.



Gambar 3.2 *Muffle Furnace* (Dokumentasi Pribadi, 2022)

3. *Optical Emission Spectroscopy* (OES)
OES yang digunakan adalah merk Foundry Master Pro yang dibuat di Jerman dengan nomor seri 44P0070. OES merupakan alat yang dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia dari spesimen uji yang digunakan untuk proses penelitian.
4. Mikroskop Optik
Mikroskop optik yang digunakan adalah merk Olympus BX-51M. Alat ini digunakan untuk mengamati pembentukan karbida kromium pada batas butir spesimen uji yang digunakan.



Gambar 3.3 Mikroskop Optik OLYMPUS BX-51M (Dokumentasi Pribadi, 2022)

5. SEM-EDX
SEM-EDX dengan merk HITACHI FLEXSEM 100 merupakan alat yang digunakan untuk mempelajari persebaran kadar kromium dan mempelajari pembentukan karbida kromium dari spesimen uji *stainless steel* tipe 316.
6. Mesin Poles
Mesin poles pada penelitian ini digunakan untuk melakukan proses *grinding* dan *polishing* pada permukaan spesimen uji agar rata dan bisa digunakan untuk proses metalografi dan uji SEM-EDX.



Gambar 3.4 Mesin Poles (Dokumentasi Pribadi, 2022)

7. Pencapit

Pencapit pada penelitian ini digunakan untuk mengeluarkan spesimen uji *stainless steel* 316 setelah mengalami perlakuan panas pada *muffle furnace* untuk didinginkan di udara luar.

8. Timbangan digital

Timbangan digital pada penelitian ini digunakan untuk mengukur massa dari kristal asam oksalat yang digunakan sebagai larutan etsa.

9. Gelas Beker 1000 ml

Gelas beker 1000 ml pada penelitian ini digunakan sebagai wadah penampung larutan etsa yaitu larutan asam oksalat.

10. *Rectifier*

Rectifier pada penelitian ini digunakan sebagai penyearah arus listrik pada proses etsa.



Gambar 3.5 *Rectifier* (Dokumentasi Pribadi, 2022)

11. Katoda

Katoda pada penelitian ini digunakan sebagai kutub negatif pada proses etsa. Katode yang digunakan adalah lempengan tipis *stainless steel* dengan luas penampang 2 cm².

12. Kabel Listrik

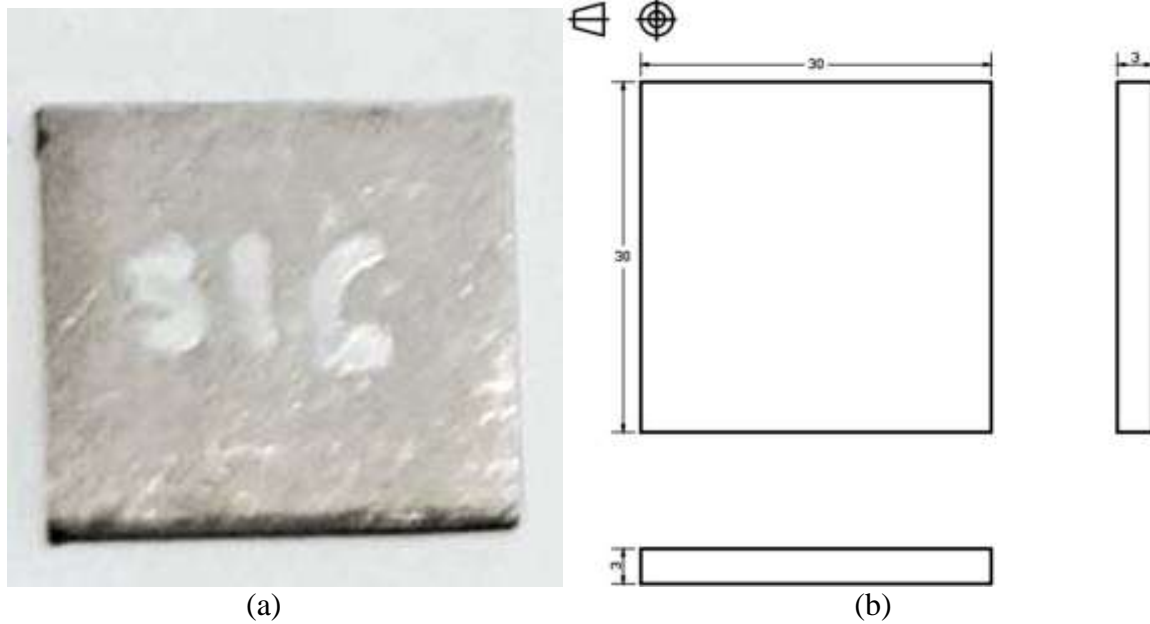
Kabel listrik pada penelitian ini digunakan sebagai penghubung energi listrik antara spesimen, multimeter, *variable resistor*, *rectifier*, dan katode ketika proses etsa berlangsung.

3.4 Metode Penelitian

Metode / langkah-langkah penelitian yang dilakukan untuk penelitian adalah sebagai berikut.

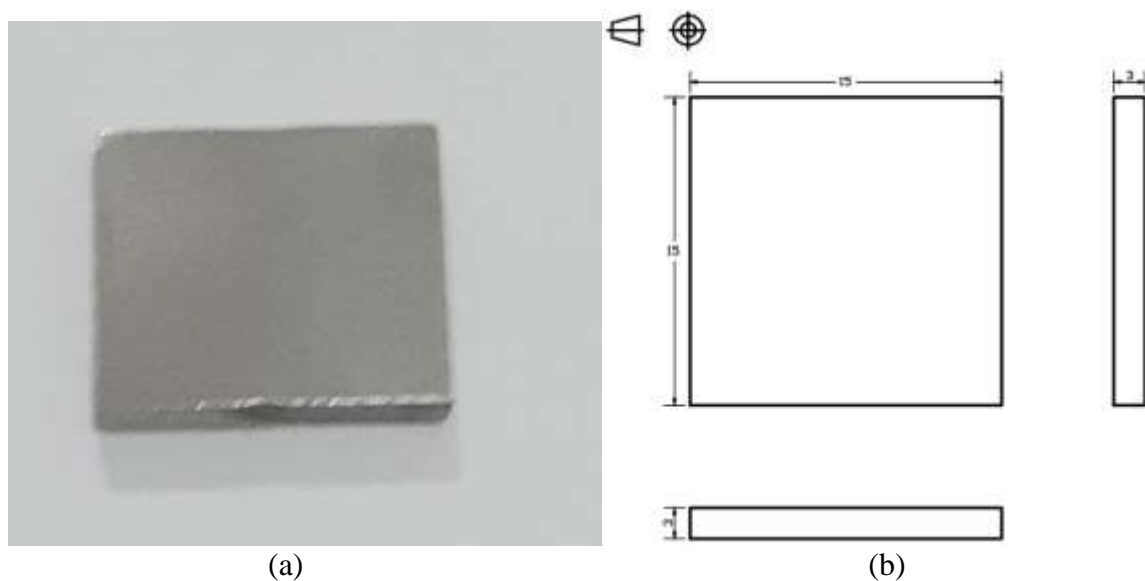
3.4.1 Preparasi Spesimen Uji

1. Spesimen yang akan diuji komposisi kimia dengan ketebalan 3 mm dilakukan proses *cutting* dengan dimensi 30x30 mm dengan menggunakan gerinda, seperti pada Gambar 3.6



Gambar 3.6 (a)Spesimen Uji OES (Dokumentasi Pribadi, 2022) (b) Gambar Teknik Spesimen OES

2. Spesimen yang akan dilakukan proses *heat treatment* dengan ketebalan 3 mm dilakukan proses *cutting* dengan dimensi 15x15 mm dengan menggunakan gerinda seperti pada Gambar 3.7



Gambar 3.7 (a)Spesimen Uji Penelitian (Dokumentasi Pribadi, 2022) (b) Gambar Teknik Spesimen Penelitian

3.4.2 Proses Pemanasan Spesimen Uji

1. Spesimen awal tanpa proses *heat treatment* diamati terlebih dahulu dengan menggunakan SEM-EDX
2. *Muffle furnace* dinyalakan dan diatur sesuai parameter temperatur yang telah ditentukan (400°C, 500°C, dan 600°C)
3. Spesimen dimasukkan ke dalam *muffle furnace* dengan waktu *holding* yang telah ditentukan (5 dan 10 jam).

4. Spesimen dikeluarkan dari *muffle furnace* dengan menggunakan tongkat setelah mencapai waktu *holding* yang telah ditentukan dan didinginkan di udara luar.

3.4.3 Proses Pengujian Spesimen Uji

1. Spesimen diampelas dan dipoles hingga permukaan rata dan mengkilap.
2. Gelas beker diisi dengan aquades sebanyak 900 ml.
3. Kristal asam oksalat ditimbang menggunakan timbangan digital hingga didapat kristal asam oksalat seberat 100 gram.
4. 100 gram asam oksalat dimasukkan ke dalam gelas beker berisi aquades.
5. Larutan kemudian diaduk hingga seluruh kristal larut dalam aquades.
6. Spesimen, *rectifier* dan kabel listrik dirangkai.
7. *Rectifier* dinyalakan dan diatur pada tegangan 10V
8. Spesimen dan katoda dicelupkan ke dalam larutan etsa asam oksalat.
9. Arus diatur hingga didapatkan arus yang mengalir sebesar 1 A, dimana besarnya arus dilihat dari hasil bacaan *rectifier*.
10. Proses etsa dilakukan selama 90 detik.
11. Setelah proses etsa selesai, katoda dan spesimen uji yang berperan sebagai anoda dikeluarkan dari larutan.
12. Spesimen dibilas dengan air dan dilanjutkan dengan larutan alkohol 95%, lalu dikeringkan.
13. Spesimen diamati pada mikroskop optik untuk pengamatan visual.
14. Spesimen dilanjutkan dengan diuji pada alat SEM-EDX untuk mengamati pembentukan karbida kromium dan persebaran kadar kromium.
15. Data hasil pengujian metalografi dan SEM-EDX diolah.

3.5 Pengujian

Terdapat 3 pengujian yang dilakukan pada penelitian ini, diantaranya adalah :

3.5.1 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia pada penelitian ini menggunakan alat *Optical Emission Spectroscopy* (OES). OES pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui komposisi kimia pada material *stainless steel* 316 yang merupakan bahan baku utama pada penelitian ini. Metode pengujian komposisi kimia pada penelitian ini menggunakan standar ASTM E1086-14. Pengujian OES dilakukan di Laboratorium Uji Bahan Politeknik Perkapalan Negri Surabaya.

3.5.2 Pengujian Metalografi

Proses metalografi pada penelitian ini menggunakan standar dari ASTM A262 *Practice-A*, dimana proses etsa dilakukan secara *electro-etching* dengan menggunakan larutan etsa berupa asam oksalat ($H_2C_2O_4$). Proses metalografi ini bertujuan untuk melihat secara visual keberadaan *intergranular corrosion* pada spesimen uji SS 316 yang mengalami proses heat treatment pada furnace, yang nantinya akan diamati dengan menggunakan mikroskop optik untuk proses pengamatan visual. Pengujian metalografi dilakukan di Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS.

3.5.3 Pengujian SEM-EDX

Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan untuk menganalisis persebaran kadar kromium yang terbentuk pada spesimen uji *stainless steel* 316 setelah dilakukan proses pemanasan pada *muffle furnace*, sedangkan EDX (*Energy-dispersive X-Ray Spectroscopy*) pada penelitian ini dilakukan untuk menganalisa persebaran kadar kromium pada

spesimen uji *stainless steel* 316. Pengujian dilakukan di Ruang *Scanning Electron Microscope* Lantai 2 Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS.

3.6 Rancangan Penelitian

Berikut merupakan rancangan penelitian analisa pengaruh temperatur terhadap persebaran kadar kromium dan pembentuka *chromium carbide* pada *stainless steel* 316 pada waktu yang konstan.

Tabel 3.1 Rancangan Penelitian Tugas Akhir

Material	Temperatur (°C)	Waktu (jam)	OES	Metalografi	SEM-EDX
<i>Stainless steel</i> 316	0	-	✓	✓	✓
	400	5	-	✓	✓
		10	-	✓	✓
	500	5	-	✓	✓
		10	-	✓	✓
	600	5	-	✓	✓
		10	-	✓	✓

3.7 Jadwal Penelitian

Penelitian mengenai analisa pengaruh temperatur terhadap persebaran kadar kromium dan pembentukan *chromium carbide* pada *stainless steel* 316 pada waktu pemanasan konstan dijadwalkan sesuai pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Jadwal Penelitian

Kegiatan	Bulan																
	Maret				April				Mei				Juni				
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Studi Literatur	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Bimbingan	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Preparasi Alat dan Bahan	■	■															
Uji Komposisi Kimia		■	■														
Pemanasan Spesimen Uji				■	■												
Metalografi						■	■	■									
Uji SEM-EDX								■	■	■	■	■					
Penyusunan Laporan Akhir								■	■	■	■	■	■	■	■	■	

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Spesimen uji stainless steel 316 yang dipotong dengan dimensi 30x30 mm diuji pada alat *Optical Emission Spectroscopy* (OES) untuk mengetahui *chemical composition* dari spesimen uji yang digunakan untuk penelitian ini. Berikut merupakan hasil pengujian komposisi kimia pada material stainless steel yang dilakukan di Laboratorium Uji Bahan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya dan perbandingan dengan standar pada ASTM A-240 mengenai spesifikasi standar komposisi kimia untuk plat stainless steel yang diaplikasikan secara umum.

Tabel 4.1 Perbandingan Komposisi Kimia SS 316 ASTM A-240 dan Hasil OES

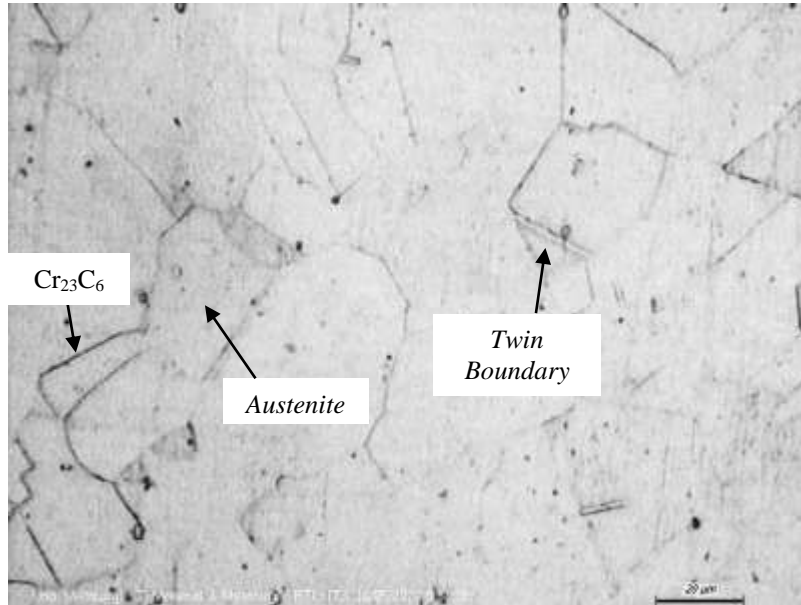
Unsur	ASTM A-240 (ASTM International, 2004)	Hasil OES
C	0.08% max	0.0326%
Cr	16 – 18%	16.9%
Ni	10 – 14%	10.3%
Mn	2 % max	1.35%
Mo	2 – 3%	2.05%
P	0.045% max	0.0368%
S	0.03% max	0.0087%
Si	0.75% max	0.381%
N	0.1% max	0.0822%
Fe	<i>Balance</i>	<i>Balance</i>

Berdasarkan pada Tabel 4.1 diatas mengenai perbandingan komposisi kimia OES dengan standar ASTM A-240, dapat ditunjukkan bahwa komposisi kimia spesimen uji SS 316 sesuai dengan range persentase unsur dari ASTM A-240, dimana kandungan kromium pada spesimen uji berada pada range 16 – 18% yang merupakan standar umum. Kandungan karbon spesimen uji SS 316 adalah 0.0326%, dimana nilai kadar karbon tidak kurang dari 0.03 wt%C dan tidak melebihi batas maksimal sebesar 0.08 wt%C. Selain itu, kandungan nikel yang berperan sebagai *austenite stabilizer* memiliki nilai yang berada didalam range standar ASTM A-240, dimana nilai kadar nikel pada spesimen uji sebesar 10,3%, sedangkan berdasarkan standard ASTM A-240 berada pada range 10 – 14%. Kandungan unsur molibdenum dari spesimen uji baja tahan karat tipe 316 hasil pengujian komposisi kimia dengan OES juga memenuhi spesifikasi dari ASTM A-240, dimana nilai komposisi molibdenum pada spesimen uji sebesar 2,05%, sedangkan komposisi standar untuk molibdenum pada spesimen *stainless steel* 316 berada pada range sekitar 2 – 3%. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa komposisi kimia hasil pengujian OES (*Optical Emission Spectroscopy*) telah sesuai dengan standar umum komposisi kimia SS 316 *sheet* dari ASTM A-240.

4.2 Hasil Pengamatan Pembentukan Karbida Kromium

Spesimen uji setelah dipanaskan di dalam *muffle furnace*, kemudian dilakukan proses *grinding* dengan menggunakan mesin poles dan amplas *grit* 100 hingga 2000 dan *polishing* dengan menggunakan kain bludru yang diberikan autosol. Setelah *polishing* selesai, dilakukan proses etsa dengan metode *electro-etching* menggunakan *rectifier*, dimana spesimen yang akan diamati merupakan anoda (disambungkan ke kutub positif dengan kabel), material *stainless steel* 316 yang masih tersisa dari proses *cutting* adalah katoda (disambungkan ke kutub negatif

dengan kabel). Larutan yang digunakan pada proses *electro-etching* adalah larutan asam oksalat 100 ml, tegangan 9V, arus 1.9 A. Proses etsa dilakukan selama 90 detik. Setelah itu, spesimen dibersihkan dengan alkohol dan diamati pada mikroskop optik. Berikut merupakan hasil metalografi spesimen *stainless steel* 316 tanpa perlakuan dan spesimen yang telah diberikan perlakuan panas.



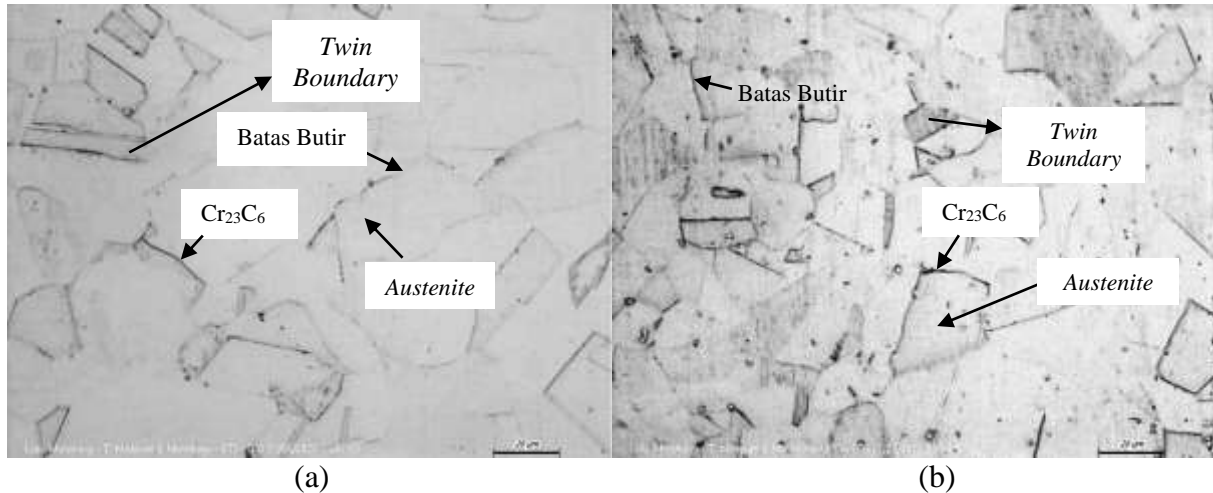
Gambar 4.1 Mikrostruktur SS 316 Tanpa Perlakuan Perbesaran 50x

Berdasarkan pada Gambar 4.1, didapat bahwa pada spesimen *stainless steel* 316 tanpa perlakuan yang didapatkan untuk pengujian terbentuk sedikit fasa karbida kromium (Cr_{23}C_6) pada batas butir, serta terbentuk fasa austenit. Secara umum, spesimen *stainless steel* 316 tidak terbentuk karbida kromium dibatas butir ketika tidak diberikan perlakuan panas. Namun, terdapat kemungkinan bahwa spesimen *stainless steel* 316 yang didapatkan telah diberikan perlakuan *annealing* pada proses manufaktur sebelum digunakan sebagai bahan penelitian (Zatkalíková et al., 2020), sehingga spesimen tanpa perlakuan terbentuk karbida kromium pada batas butir spesimen uji. Proses *annealing* yang terjadi pada spesimen uji sebelum diberikan perlakuan panas menyebabkan kromium mendapatkan waktu yang cukup untuk berdifusi menuju batas butir dan menyebabkan proses sensitisasi pada *grain boundary* spesimen uji *stainless steel* 316. Pada spesimen uji SS 316 tanpa perlakuan dapat diukur ketebalan karbida yang terdapat pada batas butir, dimana ketebalan yang terbentuk pada batas butir spesimen uji *stainless steel* 316 tanpa perlakuan sebesar $0,67122 \mu\text{m}$. Selain itu, pada struktur mikro *stainless steel* 316 tanpa perlakuan terbentuk *twinning* pada batas butir spesimen uji *stainless steel* 316. *Twinning* yang terbentuk pada struktur mikro spesimen *stainless steel* 316 tanpa perlakuan terjadi karena proses deformasi, seperti proses *rolling* logam pada proses manufaktur industri. Proses *rolling* yang terjadi selama proses manufaktur akan menyebabkan struktur batas butir berubah pada spesimen uji *stainless steel* 316 (Wang et al., 2017).

Spesimen uji kemudian dipanaskan ke dalam *muffle furnace* dengan variasi temperatur yang digunakan adalah 400°C , 500°C , 600°C dengan variasi waktu pemanasan spesimen uji 5 dan 10 jam. Berikut merupakan tabel pembentukan struktur mikro berdasarkan standar ASTM A-262 dan gambar hasil metalografi pembentukan karbida kromium spesimen uji *stainless steel* 316 yang diberikan perlakuan panas pada *muffle furnace* dengan variasi temperatur 400°C , 500°C , 600°C dengan menggunakan waktu pemanasan 5 dan 10 jam.

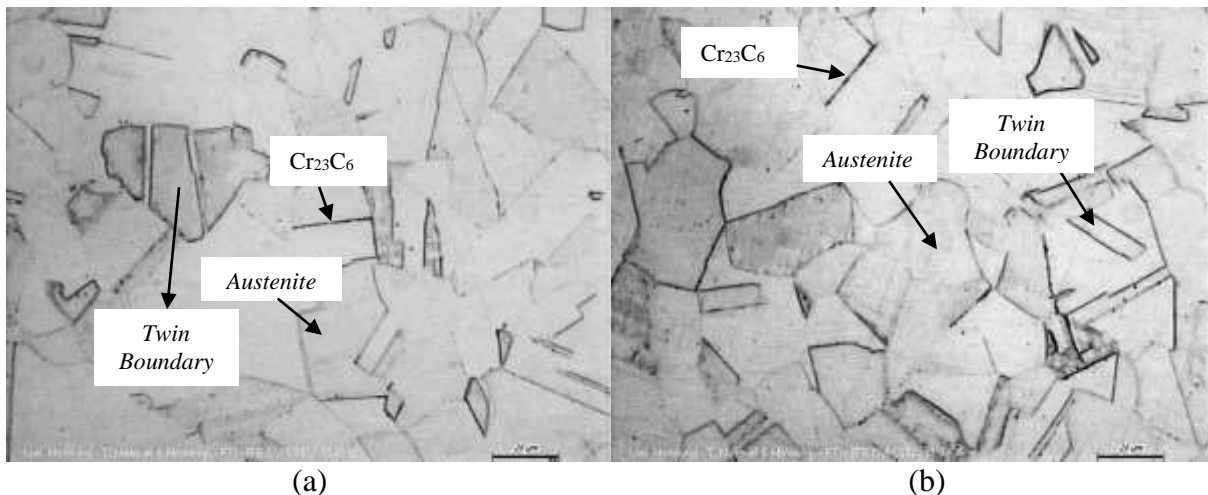
Tabel 4.2 Pembentukan Struktur Mikro Berdasarkan Standar ASTM A-262

Temperatur	Waktu	Jenis Struktur
400°C	5 jam	Step Structure
	10 jam	Step Structure
500°C	5 jam	Step Structure
	10 jam	Dual Structure
600°C	5 jam	Step Structure
	10 jam	Dual Structure



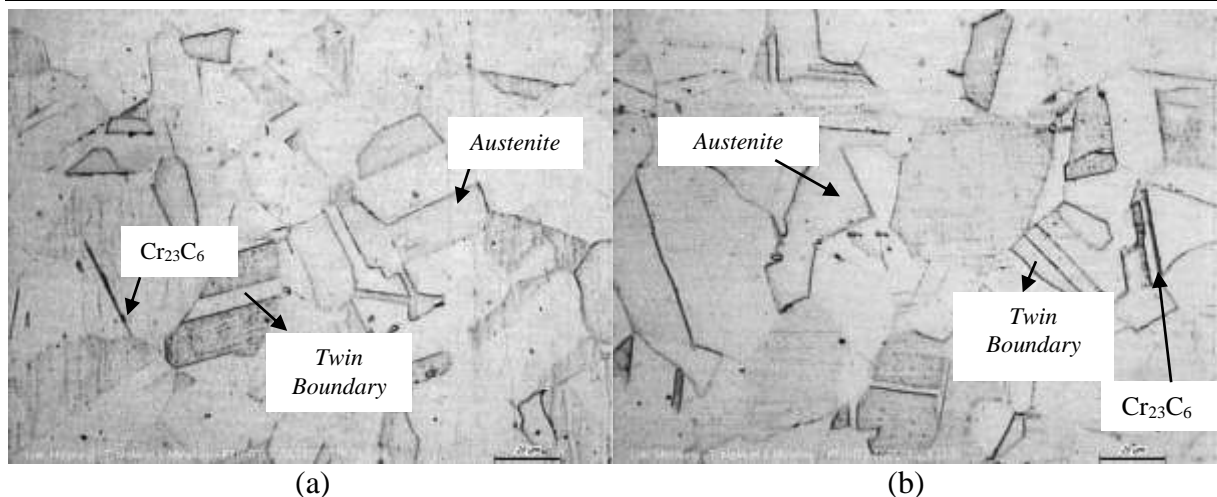
Gambar 4.2 Metalografi Karbida Kromium pada Temperatur 400°C Perbesaran 50x (a) 5 jam, (b) 10 jam

Pada temperatur 400°C dengan variasi 5 dan 10 jam, tidak menunjukkan adanya proses sensitisasi, dimana karbida kromium hampir tidak terbentuk di batas butir spesimen uji *stainless steel* 316. Struktur batas butir yang terbentuk di batas butir pada temperatur 400°C dengan variasi waktu pemanasan 5 dan 10 jam berdasarkan standar ASTM A-262A berupa *step structure* seperti pada Tabel 4.2, dimana di batas butir tidak terdapat presipitasi karbida kromium di batas butir spesimen uji SS 316 yang dapat dilihat pada Gambar 4.2. Karbida kromium yang terbentuk pada kondisi ini sudah ada dari awal spesimen didapatkan, dimana pembentukan karbida kromiumnya tidak menyeluruh, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Karbida kromium tidak terbentuk karena berdasarkan pada diagram *Time-Temperatur-Sensitization* pada Gambar 2.3, dibutuhkan waktu yang lebih lama untuk kromium bergerak ke batas butir pada temperatur 400°C. Selain itu, pada temperatur dibawah sensitisasi (<500°C), difusi kromium dari *austenite matrix* menuju batas butir lambat dan membutuhkan energi yang tinggi, sehingga hal tersebut menyebabkan karbida kromium tidak terbentuk di batas butir spesimen uji (Kherrouba et al., 2021). Dari hasil perhitungan dengan menggunakan *ImageJ*, didapat nilai rata-rata ketebalan batas butir yang terbentuk seperti Gambar 4.2 sebesar 0,68457 µm untuk 5 jam dan 0,71769 µm untuk 10 jam. Pada gambar spesimen uji *stainless steel* 316 yang dipanaskan dengan temperatur 400°C dengan variasi 5 dan 10 jam juga terbentuk struktur butir *twin boundary* pada spesimen uji akibat proses deformasi seperti pada proses *rolling* dari kegiatan produksi manufaktur yang terjadi sebelum adanya proses pemanasan pada *muffle furnace*.



Gambar 4.3 Metalografi Karbida Kromium pada Temperatur 500°C Perbesaran 50x (a) 5 jam, (b) 10 jam

Pada Gambar 4.3 spesimen uji *stainless steel* 316 pada temperatur 500°C dengan variasi 5 dan 10 jam, karbida kromium sedikit terbentuk di batas butir spesimen uji *stainless steel* 316. Pada waktu 5 jam, karbida kromium sudah sedikit terbentuk, namun secara distribusi tidak merata di seluruh batas butir spesimen uji. Berdasarkan pada standar ASTM A-262A, struktur yang terbentuk pada temperatur 500°C dengan variasi waktu pemanasan 5 jam adalah *step structure*, karena ada beberapa bagian yang masih belum terjadi presipitasi karbida kromium dibatas butir. Sedangkan pada spesimen uji yang dipanaskan dengan waktu 10 jam, pembentukan karbida kromium mulai terjadi di sekitar batas butir spesimen uji. Struktur yang terbentuk adalah *dual structure*, dimana pembentukan karbida kromium sudah mulai rata di batas butir *stainless steel* 316, seperti ditunjukkan pada Tabel 4.2. Karbida kromium terbentuk pada temperatur ini karena pada temperatur 500°C sudah mencapai temperatur sensitisasi, dan semakin lama waktu sensitisasi, maka pembentukan karbida kromium semakin mudah terjadi dan merata di batas butir spesimen uji. Ketika spesimen dipanaskan pada temperatur sensitisasi, proses difusi karbon dan kromium dapat terjadi, dimana kedua unsur tersebut mendapatkan energi yang cukup untuk bergerak secara *vacancy* dan *interstitial* dari butir menuju batas butir untuk bereaksi membentuk karbida kromium (Cr_{23}C_6) (Farkas, 2021). Nilai rata-rata ketebalan batas butir yang terbentuk pada temperatur 500°C dengan variasi waktu 5 dan 10 jam secara berurutan adalah $0,75716\ \mu\text{m}$ dan $0,79946\ \mu\text{m}$. Ketebalan yang terbentuk masih tipis karena *holding time* yang singkat. Pada temperatur 500°C juga masih terbentuk struktur *twinning* pada spesimen uji karena memiliki *thermal stability* yang tinggi hingga temperatur 800°C pada *stainless steel* 316, sehingga *twin austenite* masih tetap terbentuk pada spesimen temperatur 500°C dengan waktu pemanasan 5 jam dan 10 jam (Wang et al., 2017).

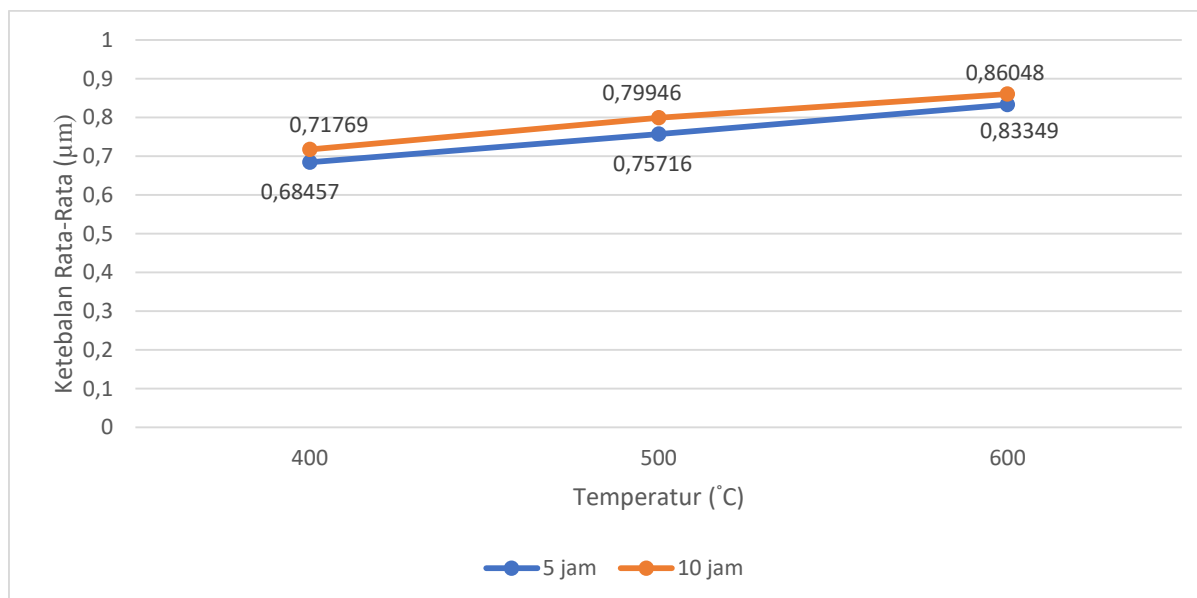


Gambar 4.4 Metalografi Karbida Kromium pada Temperatur $600^{\circ}C$ Perbesaran 50x (a) 5 jam, (b) 10 jam

Pada temperatur $600^{\circ}C$ dengan variasi 5 dan 10 jam, karbida kromium terbentuk di batas butir spesimen uji *stainless steel* 316. Berdasar pada standar ASTM A-262A, struktur yang dihasilkan pada spesimen yang dipanaskan dengan variasi 5 jam adalah struktur *step*, karena pembentukan karbida kromium masih sedikit dan tidak merata, sedangkan pada 10 jam membentuk struktur *dual*, karena karbida kromium yang terbentuk mulai menebal dan menyebar di seluruh bagian batas butir spesimen uji. Pembentukan karbida kromium pada batas butir dengan variasi waktu 5 jam memiliki ketebalan rata-rata sebesar $0,83349 \mu m$, sedangkan ketebalan batas butir rata-rata dengan variasi 10 jam sebesar $0,86048 \mu m$. Pada temperatur $600^{\circ}C$ dengan waktu tahan 10 jam, ketebalannya lebih tinggi karena sesuai pada Gambar 2.3 mengenai grafik temperatur-waktu sensitisasi baja tahan karat austenitik, sudah mencapai waktu minimum untuk pembentukan karbida kromium di batas butir. Pada temperatur $600^{\circ}C$ laju difusi pada kromium juga mengalami peningkatan, sehingga lebih mudah terbentuk karbida kromium di batas butir. Selain itu, pada temperatur $600^{\circ}C$ juga masih terbentuk struktur *twin* pada butir spesimen uji *stainless steel* 316, karena *thermal stability* dari *twin austenite* yang tinggi dan perlu dipanaskan pada temperatur yang lebih tinggi hingga $800^{\circ}C$ untuk menghilangkan struktur *twin austenite* pada butir *austenitic stainless steel* (Wang et al., 2017).

Dari hasil pengujian metalografi diatas, temperatur memiliki pengaruh terhadap pembentukan karbida kromium pada spesimen uji *stainless steel* 316, dimana semakin meningkat temperatur pemanasan pada *muffle furnace*, semakin mudah untuk karbida kromium terbentuk di batas butir *stainless steel* 316 dan nilai ketebalan kromium karbida akan semakin meningkat. Hal ini dapat terjadi karena semakin meningkat temperatur, difusi interstitial pada karbon akan semakin meningkat menuju batas butir dan bereaksi dengan kromium yang berdifusi secara perlahan akibat laju difusi yang lambat jika dibandingkan dengan karbon (Gajjar et al., 2022). Umumnya rata-rata ketebalan batas butir dapat mencapai $1,3 \mu m$ pada *stainless steel* 316 (Ren & Ernst, 2020). Hal ini dapat terjadi karena kandungan karbon yang rendah pada spesimen uji, yaitu sebesar $0,0326 \text{ wt}\% C$, sedangkan kandungan baja tahan karat tipe 316 berdasarkan pada jurnal berada pada perkiraan $0,05 - 0,06 \text{ \% wt}C$. Kandungan karbon pada penelitian ini memiliki peran dalam pembentukan karbida kromium pada batas butir, karena kadar karbon yang rendah pada spesimen uji akan menghambat pembentukan karbida kromium spesimen uji dengan menaikkan temperatur minimum pembentukan karbida kromium pada grafik *Time-Temperatur-Sensitization* (TTS) seperti pada Gambar 2.3, sehingga karbida kromium sulit terbentuk dibatas butir dan membutuhkan waktu yang lebih panjang untuk pembentukan *chromium carbide* pada batas butir (Kolli, Javaheri, et al., 2019). Selain itu, kadar

karbon yang rendah pada spesimen uji menyebabkan karbida kromium semakin sulit untuk terbentuk karena secara jumlah atom tidak cukup untuk bereaksi dengan kromium yang berdifusi dari *austenite grain* ke batas butir dengan laju yang lebih lambat (Pardo et al., 2007). Berikut merupakan grafik rata-rata ketebalan batas butir pada temperatur 400°C, 500°C, 600°C dengan menggunakan waktu pemanasan 5 dan 10 jam.

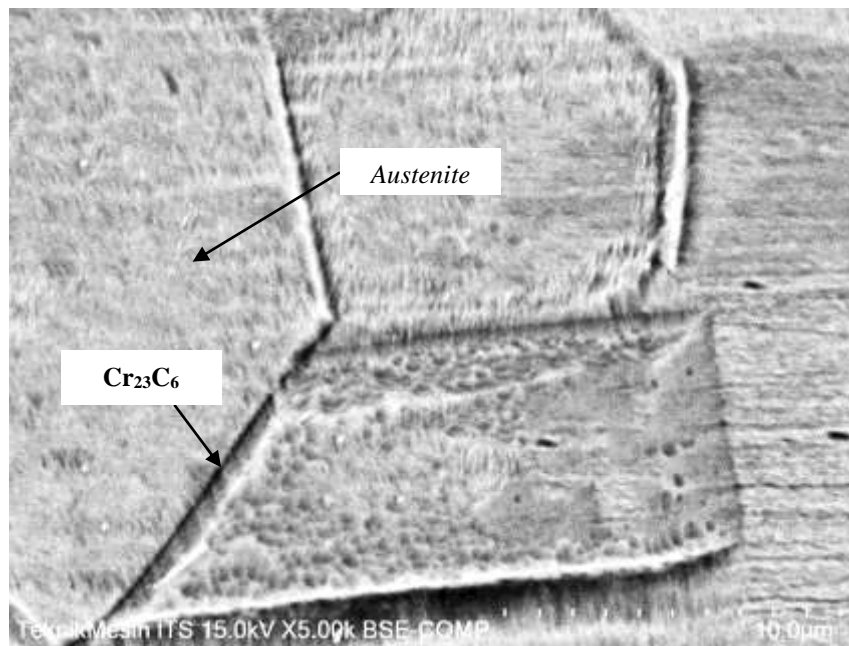


Gambar 4.5 Grafik Ketebalan Rata-rata Batas Butir pada Tiap Temperatur

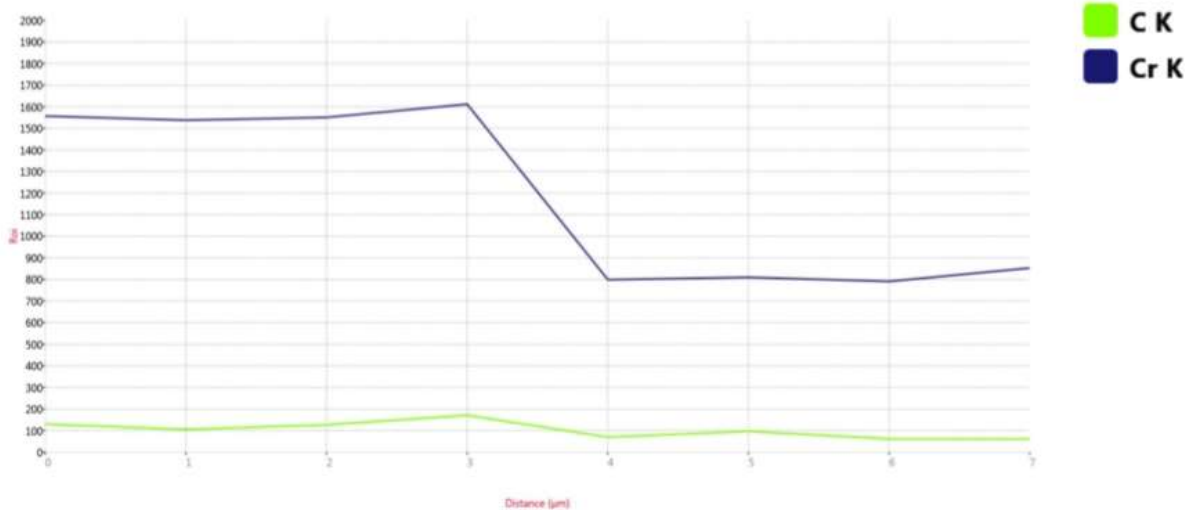
Dari Gambar 4.5, juga dapat diketahui bahwa terjadi peningkatan nilai ketebalan karbida kromium terhadap temperatur dan waktu tahan pemanasan dalam *furnace*. Penebalan karbida kromium juga akan bergantung pada energi aktivasi yang merupakan energi minimum yang diperlukan suatu unsur untuk bergerak dari satu tempat ke tempat lain. Ketika energi pada kromium berada dibawah energi aktivasi, maka kromium akan semakin sulit untuk berdifusi ke batas butir dan difusivitas kromium akan menurun, dan juga sebaliknya. Energi aktivasi yang didapatkan pada temperatur 400 – 600°C adalah sebesar 304,400482 kJ/mol. Nilai energi aktivasi hasil perhitungan didapatkan dengan mengukur perubahan massa pada tiap jam di setiap temperatur pemanasan. Berdasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh Kherrouba, nilai energi aktivasi pada spesimen uji *stainless steel* 316 adalah ± 243 kJ/mol pada temperatur 750°C – 1200°C (Kherrouba et al., 2021). Nilai hasil perhitungan berbeda dengan teori yang telah dilakukan akibat *range* temperatur pada teori yang berbeda. Selain itu, kandungan karbon yang rendah pada spesimen uji dapat menyebabkan nilai energi aktivasi meningkat, karena ketika karbon yang berdifusi ke batas butir sedikit, maka semakin rendah pula energi yang mampu diberikan ke kromium untuk bergerak ke batas butir, sehingga nilai energi aktivasi meningkat (Eaton-Mckay et al., 2021). Berdasarkan hasil perhitungan, nilai difusivitas kromium pada temperatur 400°C, 500°C, 600°C secara berurutan adalah $1,8893 \times 10^{-29}$ m²/s, $2,1519 \times 10^{-26}$ m²/s, $4,8875 \times 10^{-24}$ m²/s. Adanya peningkatan pada temperatur pemanasan akan menyebabkan kromium semakin mudah untuk bergerak ke batas butir, karena kromium akan mendapatkan energi yang untuk berdifusi secara *vacancy* ke *grain boundary* dan meningkatkan difusivitas kromium ketika mengalami kenaikan temperatur, sehingga ketebalan batas butir akan bertambah (Ping et al., 2017).

4.3 Hasil Persebaran Kadar Kromium pada Batas Butir

Setelah dilakukan pengujian metalografi pada spesimen uji *stainless steel* 316, dilakukan pengujian SEM-EDX yang bertujuan untuk mengamati distribusi persebara kadar kromium pada batas butir *stainless steel* 316. Pengujian dilakukan di Laboratorium *Scanning Electron Microscope* Teknik Mesin FTIRS ITS. Berikut merupakan hasil pengujian SEM-EDX pada *stainless steel* 316 tanpa perlakuan dan proses pemanasan pada temperatur temperatur 400°C, 500°C, 600°C dengan menggunakan waktu pemanasan 5 dan 10 jam.



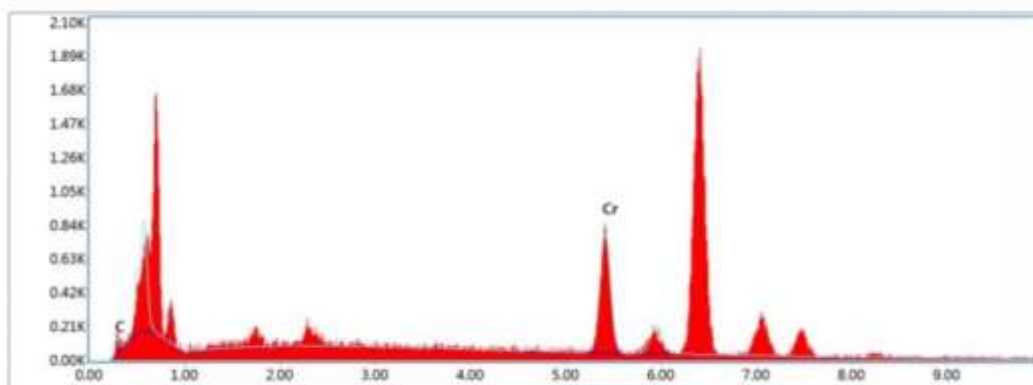
Gambar 4.6 Hasil SEM Spesimen Uji Tanpa Perlakuan Perbesaran 5000x



Gambar 4.7 Profil Kromium Spesimen Tanpa Perlakuan

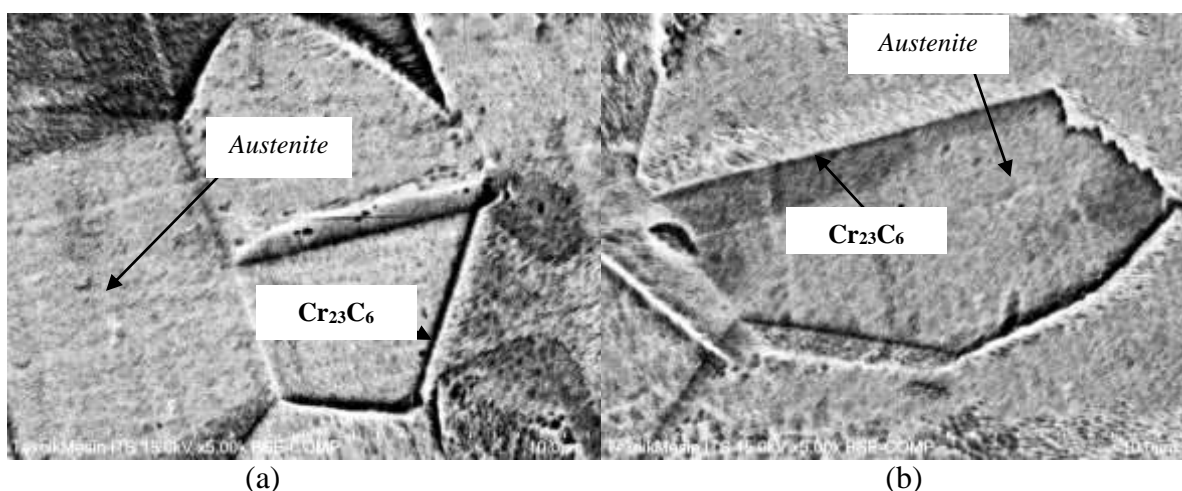
Dari hasil profil kromium yang didapat dari hasil SEM pada spesimen tanpa perlakuan seperti Gambar 4.7, dapat dilihat terdapat peningkatan intensitas kromium menuju batas butir dengan terbentuknya karbida kromium yang dapat dilihat pada Gambar 4.6. Setelah peningkatan pada intensitas kromium, terjadi penurunan intensitas kromium pada profil persebaran kromium pada spesimen uji. Penurunan ini menunjukkan adanya pembentukan *chromium depleted zone* pada daerah sekitar batas butir. Kromium yang berada di daerah sekitar

batas butir sudah bergerak menuju batas butir dan bereaksi dengan karbon membentuk karbida kromium, sehingga terjadi peningkatan intensitas kromium pada daerah batas butir dan penurunan intensitas kromium yang berada pada daerah sekitar batas butir (Qian et al., 2016).

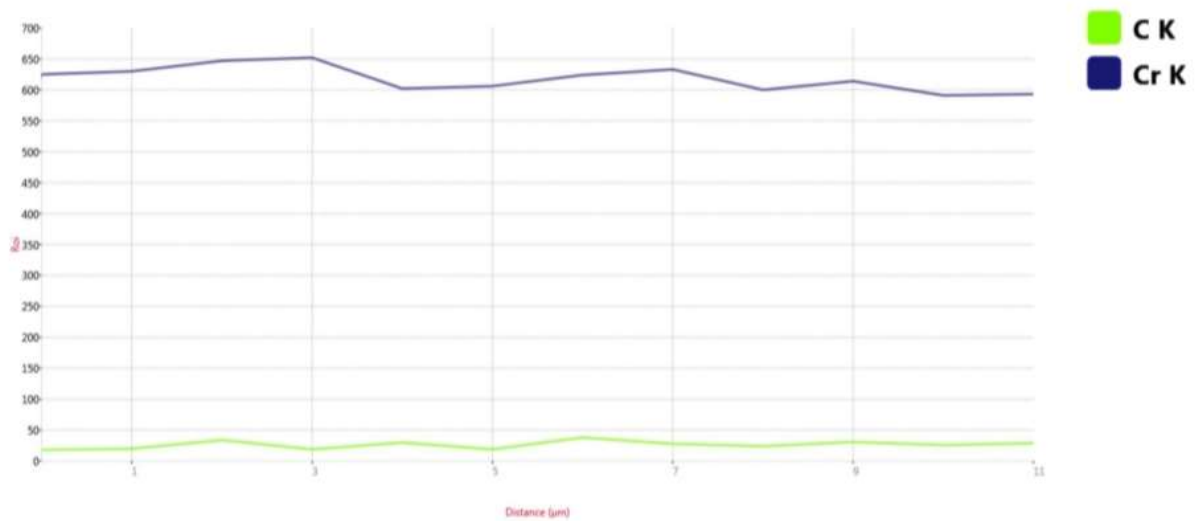


Gambar 4.8 Hasil EDX Spesimen SS 316 Tanpa Perlakuan pada Batas Butir

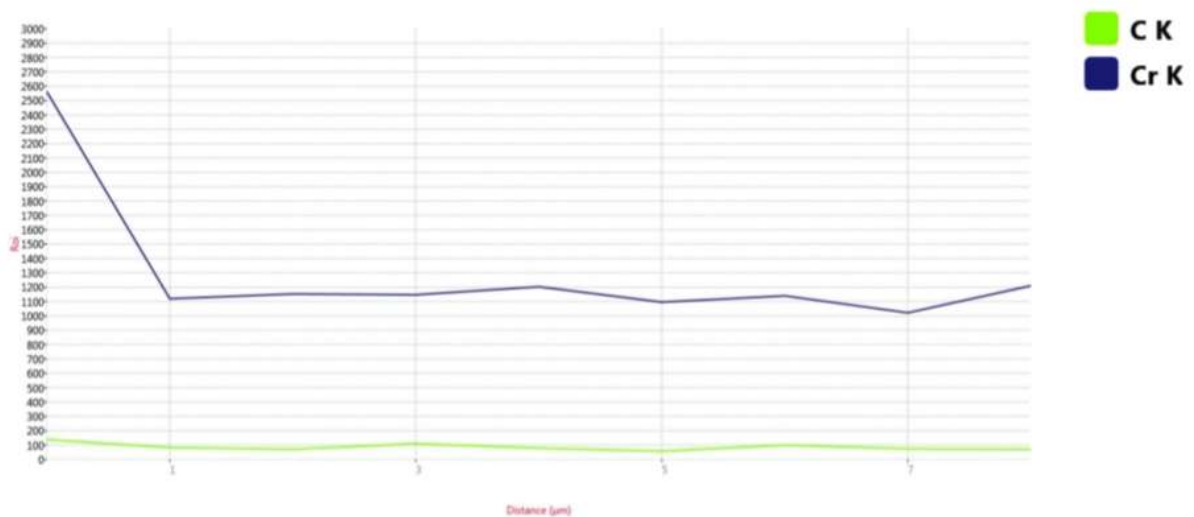
Dari hasil Gambar 4.8 mengenai persebaran kromium di batas butir, didapat nilai persen massa kromium sebesar 93,86% wtCr. Hal ini membuktikan sudah terbentuk karbida kromium di batas butir spesimen uji sebelum diberikan perlakuan panas dengan variasi temperatur. Hal ini dapat terjadi karena terdapat kemungkinan bahwa spesimen uji telah mendapatkan perlakuan panas pada proses manufaktur, seperti proses pendinginan dengan laju lambat. Pendinginan yang lambat akan memberikan waktu untuk kromium berdifusi ke batas butir secara *vacancy* untuk bereaksi dengan karbon membentuk karbida kromium di batas butir spesimen uji *stainless steel 316* (Zatkalíková et al., 2020). Untuk mencegah persebaran kromium yang tinggi pada spesimen uji, perlu dilakukan *austenitizing* pada temperatur lebih dari 1000°C dengan waktu tahan 1 – 3 jam, kemudian didinginkan secara cepat. Hal ini dapat dilakukan karena pada temperatur ini karbida kromium akan terlarut dan mengalami proses desensitisasi. Pendinginan secara cepat pada spesimen uji baja tahan karat tipe 316 mampu menghambat pertumbuhan karbida kromium pada batas butir yang dapat terjadi ketika mengalami pendinginan dengan laju yang lambat.



Gambar 4.9 Hasil SEM Spesimen Uji 400°C Perbesaran 5000x (a) 5 jam (b) 10 jam



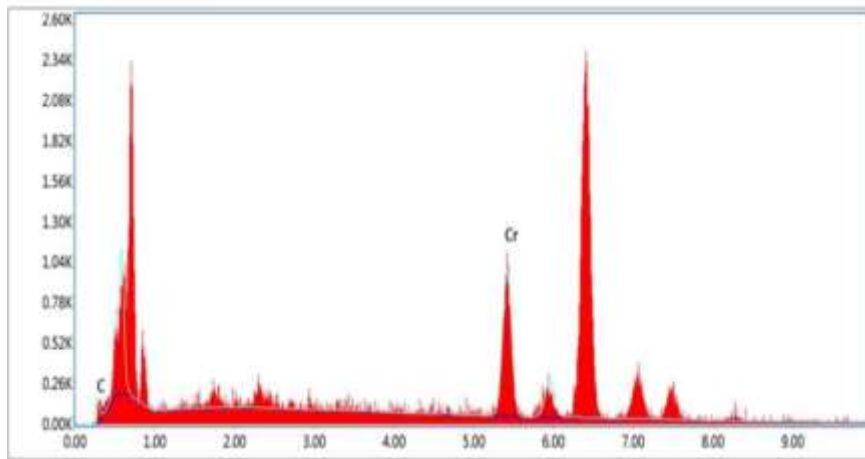
(a)



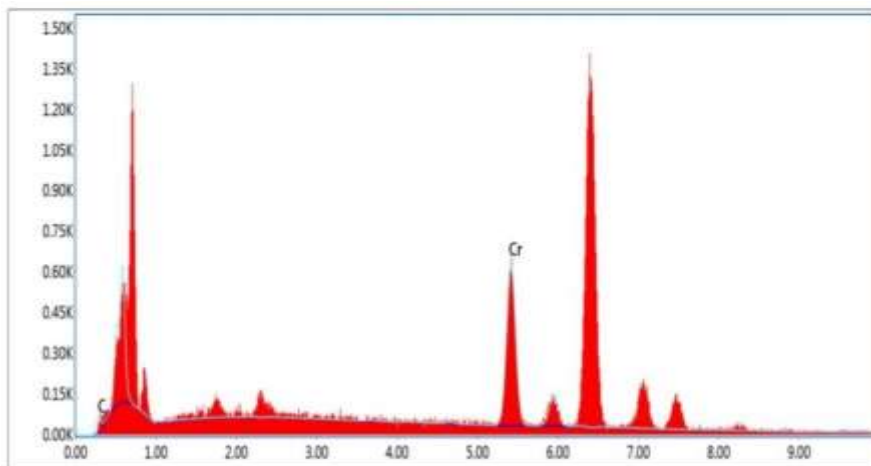
(b)

Gambar 4.10 Profil Kromium Spesimen Uji Pada Temperatur 400°C (a) 5 jam (b) 10 jam

Pada Gambar 4.10 (a), intensitas kromium relatif stabil pada range 600 – 650. Hal ini menunjukkan bahwa belum ada peningkatan laju difusi yang tinggi pada kromium, sehingga intensitas kromium yang dihasilkan dari line scan stabil. Pada Gambar 4.10 (b), Terdapat penurunan pada intensitas kromium di sekitar batas butir, kemudian intensitas mulai stabil kembali. Hal ini dapat terjadi karena proses difusi yang telah terjadi pada kromium di sekitar batas butir, dimana kromium mendapatkan waktu yang cukup untuk mendapatkan energi dan akhirnya mampu berdifusi secara *vacancy* menuju batas butir spesimen uji pada spesimen uji baja tahan karat dan bereaksi dengan karbon pada batas butir membentuk karbida kromium di batas butir (Qian et al., 2016). Penurunan intensitas kromium pada temperatur 400°C yang terbentuk ini juga dapat terjadi karena energi aktivasi yang tinggi pada grain, sehingga tidak dapat menutupi daerah yang intensitas kromium rendah / *chromium depleted zone* yang telah terbentuk sebelum adanya perlakuan panas pada spesimen (Ben Rhouma et al., 2017).



(a)



(b)

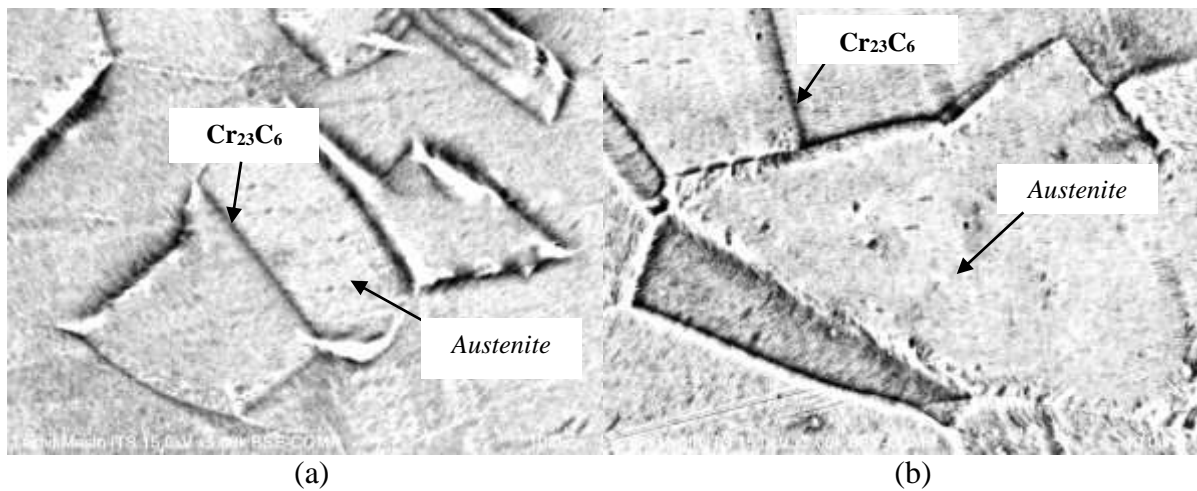
Gambar 4.11 Hasil EDX Spesimen SS 316 Temperatur 400°C (a) 5 jam, (b) 10 jam

Tabel 4.3 Persebaran Kadar Kromium di Batas Butir pada Temperatur 400°C

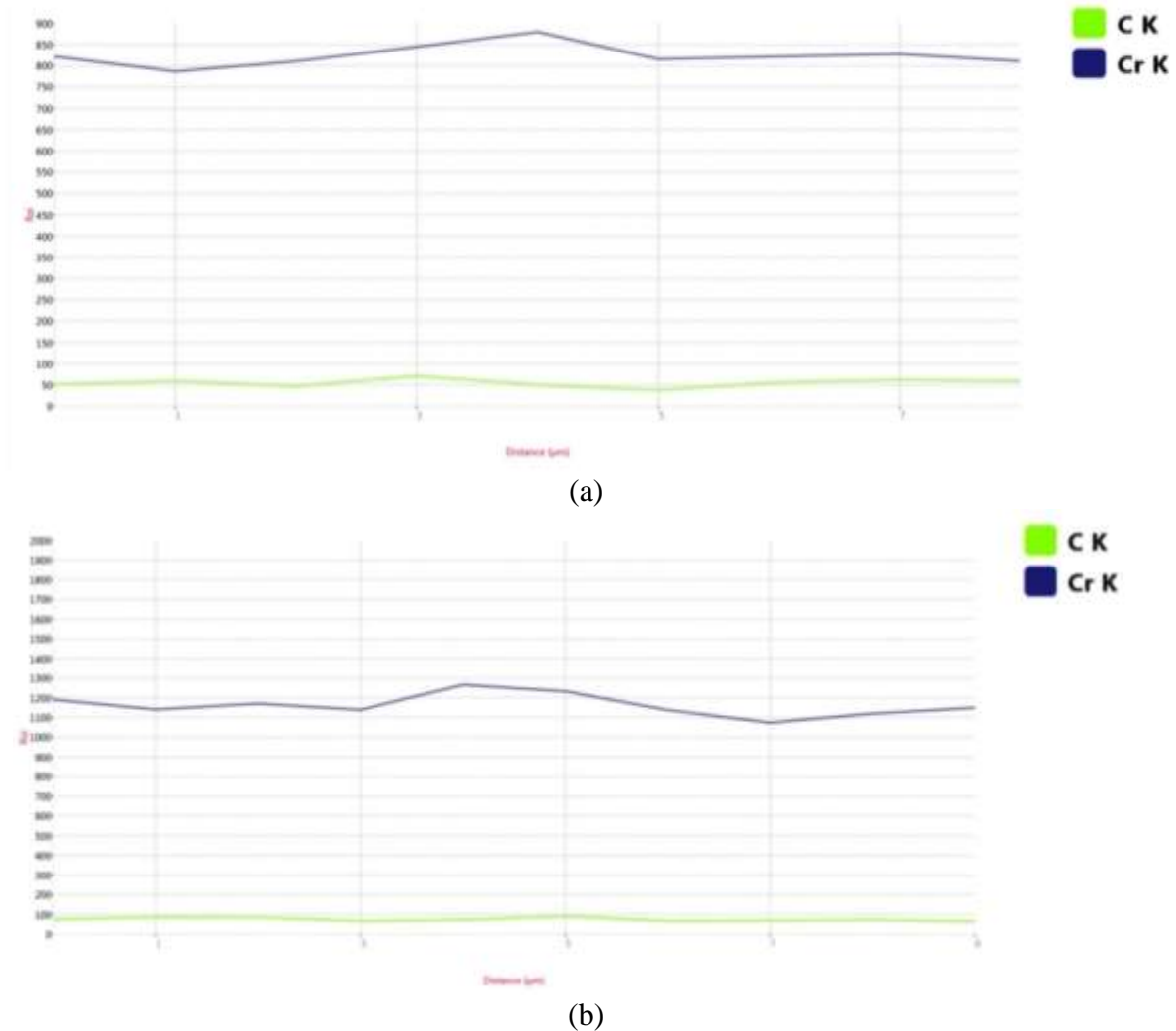
Waktu	% <i>Weight Chromium</i>
5 Jam	95,66%
10 Jam	93,07%

Pada temperatur 400°C variasi waktu 5 jam (Gambar 4.11 (a)), persen kadar kromium yang terkandung adalah sebesar 95,66% wtCr, sedangkan pada spesimen 400°C variasi waktu 10 jam (Gambar 4.11 (b)) mengandung kromium sebesar 93,07% wtCr, seperti yang tertera pada Tabel 4.3. Persebaran kadar kromium yang terdapat pada spesimen uji *stainless steel* 316 pada 400°C dengan variasi waktu holding 5 jam dan 10 jam ini di kategorikan tinggi, khususnya temperatur 400°C yang masih berada pada *range* temperatur dibawah sensitisasi. Namun, peningkatan kandungan kromium yang terdapat pada batas butir dapat terjadi karena pembentukan karbida kromium yang telah terbentuk sebelum adanya proses pemanasan yang dilakukan untuk penelitian, sehingga kadar kromium yang terdeteksi pada uji EDX pada batas butir tinggi. Selain itu, terdapat kemungkinan bahwa fenomena persebaran ini dapat terjadi akibat proses *cold work* pada proses manufaktur. Proses *cold working* pada temperatur kamar mampu meningkatkan energi yang tertahan di dalam material. Karena energi yang tertahan di dalam material tinggi, maka energi yang didapatkan kromium setelah diberikan perlakuan panas akan meningkat akibat energi yang tertahan dari proses *cold work* dan akhirnya menurunkan energi

minimum yang dibutuhkan untuk kromium berdifusi dan karbon bereaksi membentuk *chromium carbide* di batas butir (Kain et al., 2004).



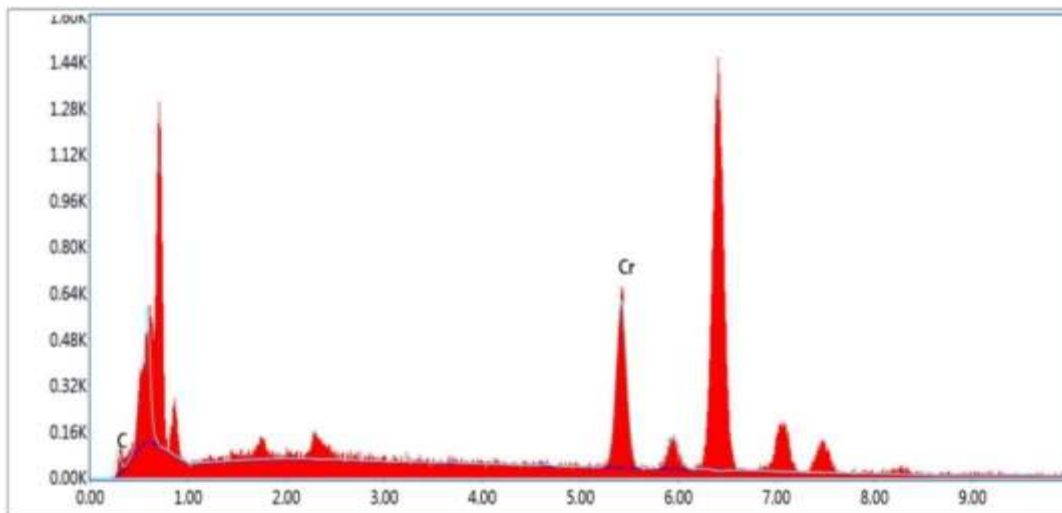
Gambar 4.12 Hasil SEM Spesimen Uji 500°C Perbesaran 5000x (a) 5 jam (b) 10 jam



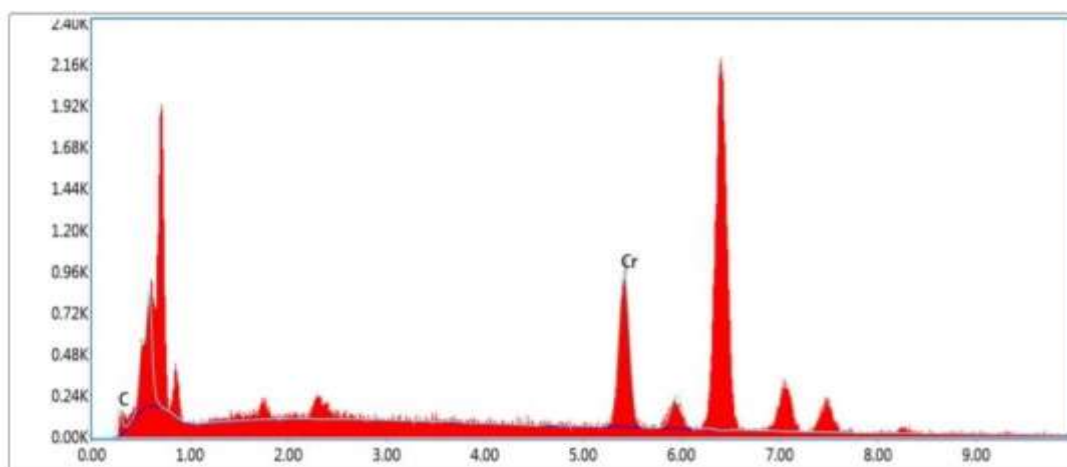
Gambar 4.13 Profil Kromium Spesimen Uji Pada Temperatur 500°C (a) 5 jam (b) 10 jam

Dari hasil profil kromium pada temperatur 500°C pada waktu pemanasan 5 jam dan 10 jam seperti pada Gambar 4.13, dapat dilihat bahwa terdapat peningkatan intensitas kromium di

batas butir spesimen uji, dimana intensitas kromium pada temperatur 500°C dengan waktu 5 jam meningkat hingga 850, sedangkan nilai intensitas kromium pada temperatur 500°C dengan waktu 10 jam mencapai angka 1300. Pada temperatur 500°C sudah mencapai temperatur sensitisasi dan peningkatan laju difusi kromium dari butir menuju batas butir spesimen uji, sehingga intensitas kromium pada spesimen uji *stainless steel* 316 mengalami peningkatan di batas butir. Intensitas yang meningkat pada batas butir di temperatur 500°C juga menunjukkan bahwa kromium telah terakumulasi ke batas butir spesimen uji akibat proses difusi dari daerah sekitar batas butir menuju batas butir. Semakin banyak kromium yang terakumulasi pada batas butir spesimen uji, maka kemungkinan spesimen uji untuk membentuk karbida kromium di batas butir akan semakin meningkat dan menyebabkan korosi batas butir semakin mudah untuk terjadi (He et al., 2021). Selain itu, mobilitas di batas butir yang tinggi pada temperatur 500°C menyebabkan proses difusi menjadi lebih mudah karena difusi karbon yang telah terjadi di batas butir dan meningkatkan energi yang digunakan untuk memikat kromium berdifusi menuju batas butir. Hal inilah yang menyebabkan intensitas kromium di batas butir mengalami peningkatan dan memiliki tendensi untuk bereaksi dengan karbon membentuk *chromium carbide* (Ren & Ernst, 2020).



(a)



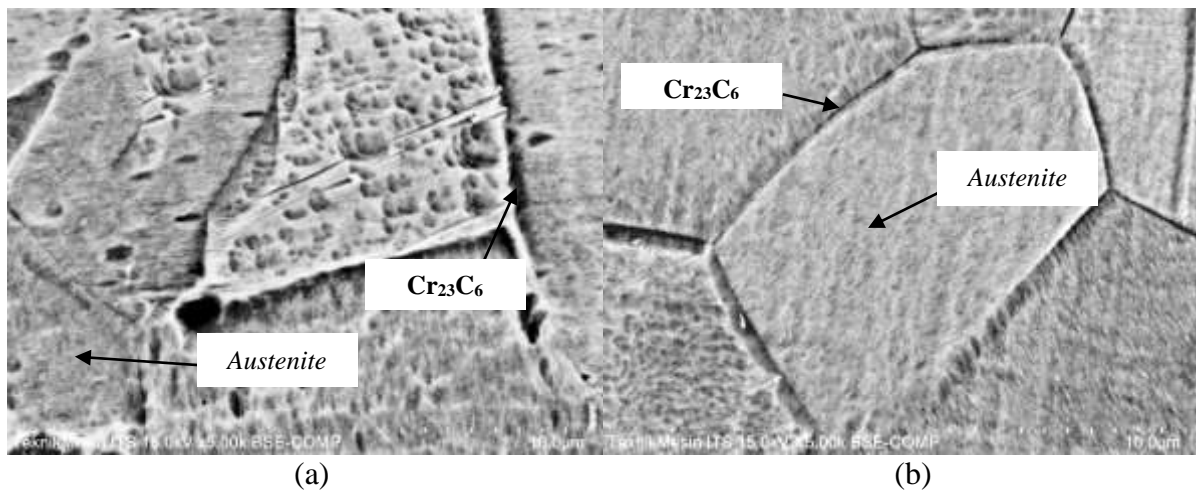
(b)

Gambar 4.14 Hasil EDX Spesimen SS 316 Temperatur 500°C (a) 5 jam, (b) 10 jam

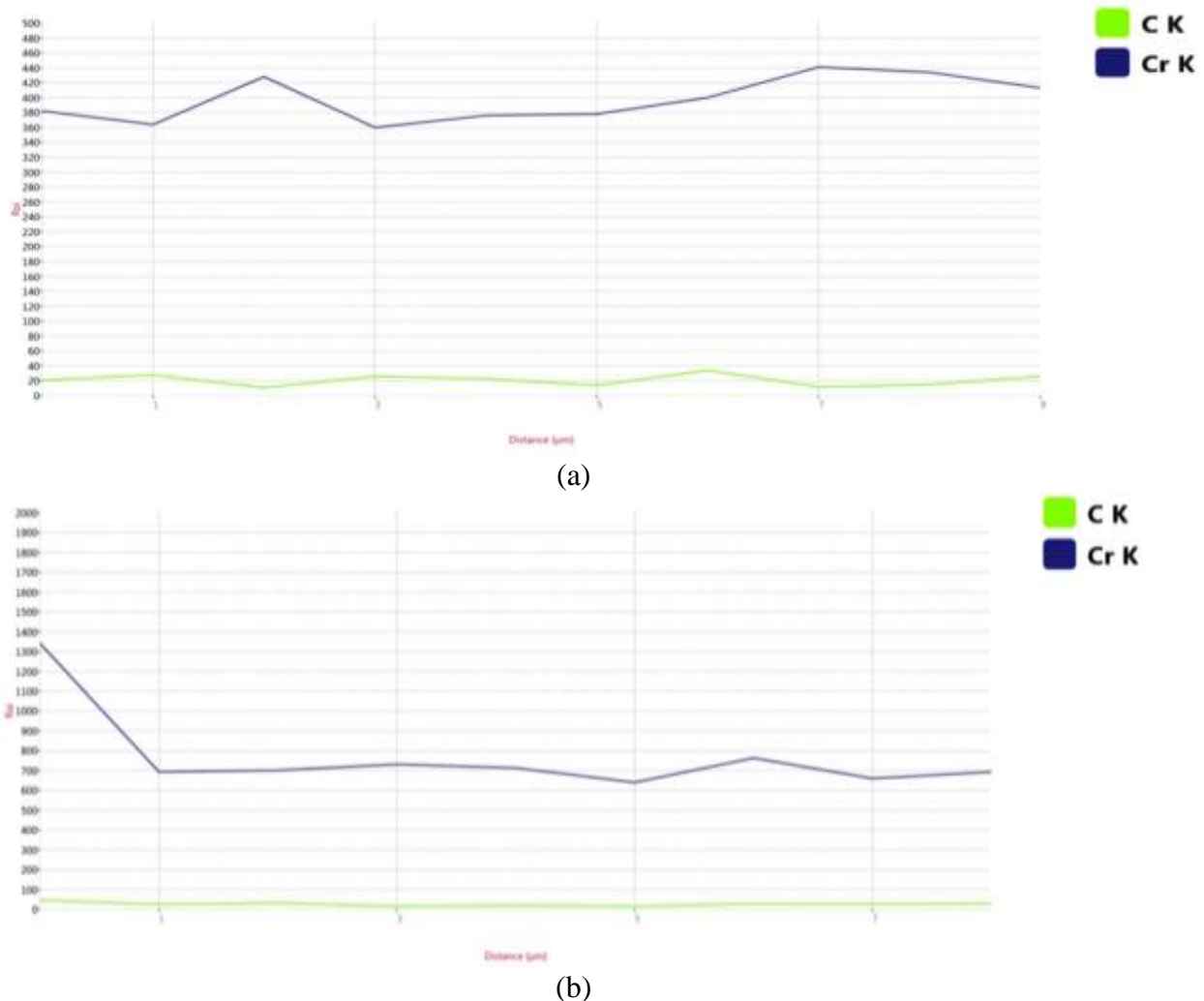
Tabel 4.4 Persebaran Kadar Kromium di Batas Butir pada Temperatur 500°C

Waktu	% <i>Weight Chromium</i>
5 Jam	93,13%
10 Jam	92,81%

Dari hasil EDX pada Gambar 4.14, didapat nilai kadar kromium pada temperatur 500°C dengan variasi waktu pemanasan 5 jam dan 10 jam secara berurutan sebesar 93,13% wtCr dan 92,81% wtCr, seperti yang tertera pada Tabel 4.4. Persebaran kadar kromium pada temperatur 500°C dengan variasi waktu pemanasan 5 jam dan 10 jam dapat dikategorikan tinggi, karena temperatur 500°C merupakan temperatur awal sensitisasi. Selain itu, pada temperatur sensitisasi (500°C – 850°C), laju difusi mengalami peningkatan dan menimbulkan penipisan kromium yang berada pada daerah sekitar batas butir spesimen uji *stainless steel* 316. Temperatur pemanasan pada temperatur sensitisasi mampu mempermudah proses difusi pada kromium karena energi pada batas butir yang berperan sebagai jalur difusi meningkat, sehingga persebaran unsur kromium akan menjadi lebih mudah dan menyebabkan kromium karbida semakin mudah terbentuk di batas butir (Chen et al., 2017). Terdapat kemungkinan juga bahwa persebaran kromium yang tinggi terjadi juga karena proses *cold working*. Dengan adanya *cold working* sebelum diberikan perlakuan panas pada *furnace*, maka kromium akan mendapatkan energi lebih dari jumlah energi yang tertahan pada material dan semakin mudah bereaksi dengan karbon (Kain et al., 2004).

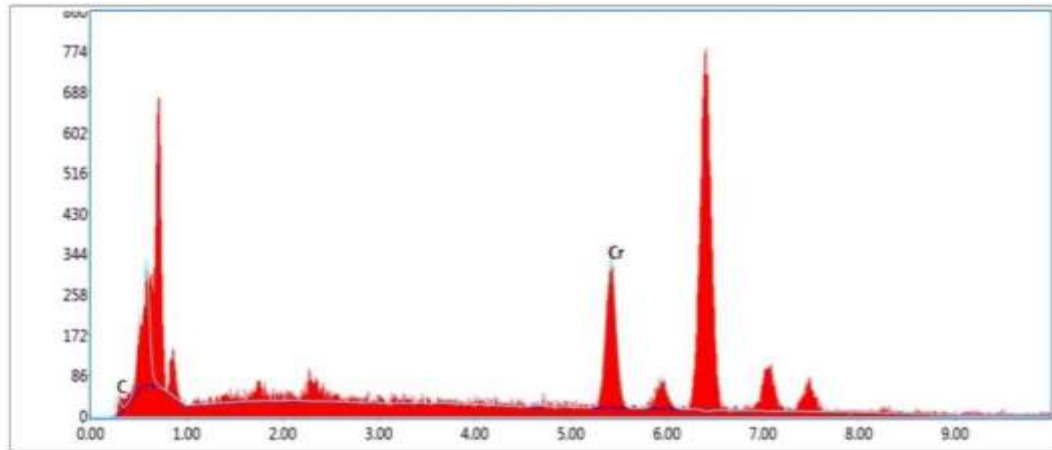


Gambar 4.15 Hasil SEM Spesimen Uji 600°C Perbesaran 5000x (a) 5 jam (b) 10 jam

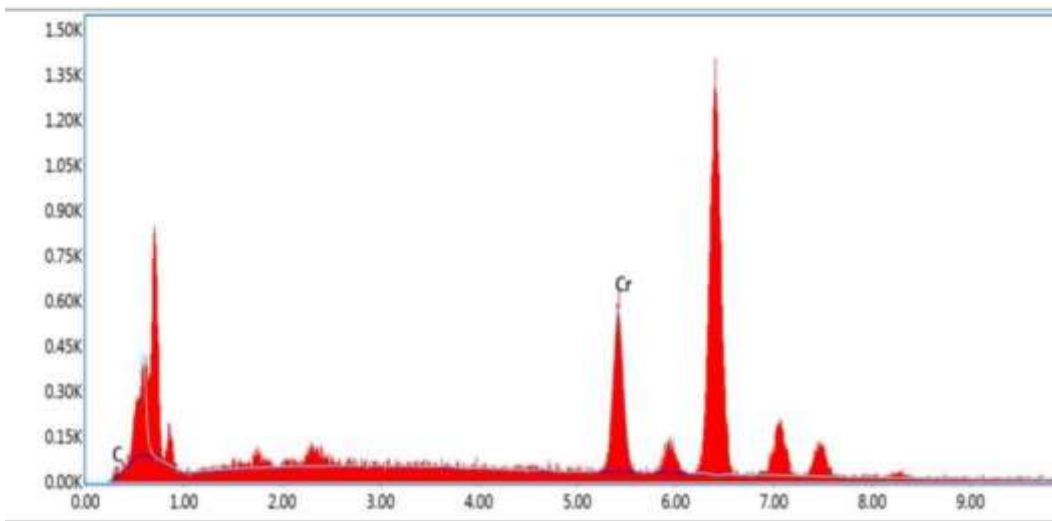


Gambar 4.16 Profil Kromium Spesimen Uji Pada Temperatur 600°C (a) 5 jam (b) 10 jam

Dari hasil profil kromium pada temperatur 600°C dengan waktu pemanasan 5 jam pada Gambar 4.12 (a), dapat dilihat bahwa terdapat peningkatan intensitas kromium pada daerah sekitar batas butir. Hal ini dapat terjadi karena terbentuknya presipitasi intragranular di daerah sekitar batas butir. Presipitat intragranular terjadi pada temperatur sensitisasi dengan pendinginan yang lambat, dimana distribusi karbon terlarut didalam butir dan mengikat kromium untuk bereaksi membentuk presipitat karbida yang ada di dalam butir (Rajesh Kannan et al., 2018). Oleh karena itu, intensitas kromium mengalami peningkatan. Tren kembali meningkat pada batas butir yang menunjukkan difusi kromium ke batas butir telah terjadi. Hal ini menunjukkan pada temperatur 600°C kromium terdifusi ke batas butir spesimen uji. Sedangkan pada spesimen uji *stainless steel* 316 temperatur 600°C dengan variasi waktu pemanasan 10 jam, terjadi penurunan intensitas kromium di daerah sekitar batas butir. Hal ini terjadi karena pada temperatur 600°C , mobilitas kromium mengalami peningkatan dan kromium mendapatkan energi yang cukup untuk berdifusi menuju batas butir. Difusi yang cepat pada kromium menyebabkan terbentuknya *chromium depleted zone* dan menurunkan ketahanan spesimen terhadap korosi (Huh et al., 2019).



(a)



(b)

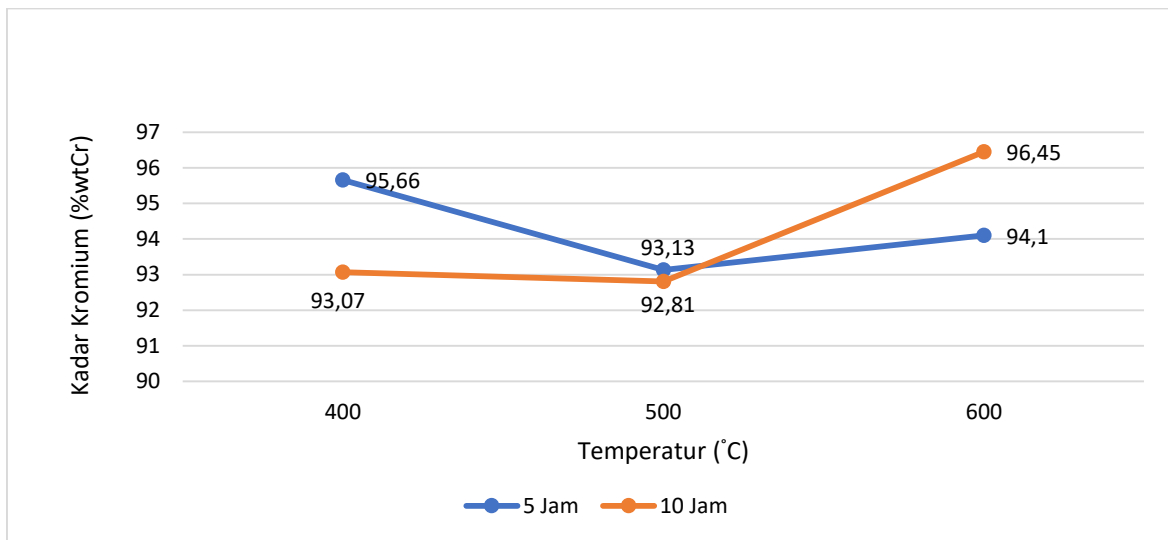
Gambar 4.17 Hasil EDX Spesimen SS 316 Temperatur 600°C (a) 5 jam, (b) 10 jam

Tabel 4.5 Persebaran Kadar Kromium di Batas Butir pada Temperatur 600°C

Waktu	%Kromium
5 Jam	94,1%
10 Jam	96,45%

Dari Gambar 4.9, didapatkan nilai kadar kromium yang terkandung sesuai pada Tabel 4.5 sebesar 94,1% wtCr dan 96,45% wtCr pada waktu pemanasan 5 jam dan 10 jam di temperatur 600°C. Distribusi kadar kromium mengalami peningkatan pada temperatur 600°C karena laju difusi kromium di batas butir akan meningkat dan nantinya akan mempermudah pembentukan karbida kromium di batas butir. Hal ini dapat terjadi karena energi pada batas butir mengalami peningkatan, sehingga akan memikat kromium untuk berdifusi menuju batas butir spesimen uji *stainless steel* 316 dan bereaksi dengan karbon. Semakin lama waktu yang diberikan, maka kadar kromium akan semakin membesar dan akan semakin mudah untuk kromium berdifusi secara *vacancy* ke batas butir dan bereaksi membentuk karbida kromium ($Cr_{23}C_6$) (Naghizadeh & Mirzadeh, 2016). Pada temperatur 600°C, kromium yang sudah mulai mendapatkan energi untuk berdifusi ke batas butir, sehingga kadar kromium akan meningkat di batas butir dan menurun di daerah sekitar batas butir dengan membentuk *chromium depleted zone* (Qian et al., 2016). Berikut merupakan grafik persebaran kromium di batas butir pada baja tahan karat tipe

316 dengan variasi temperatur 400°C, 500°C, 600°C dengan variasi waktu pemanasan spesimen uji 5 dan 10 jam.



Gambar 4.18 Persebaran Kromium pada *Stainless Steel* 316 Tiap Temperatur

Dari hasil pengujian EDX mengenai grafik persebaran kromium pada batas butir spesimen uji, dapat dinyatakan bahwa pengaruh temperatur terhadap persebaran kromium adalah fluktuatif, dimana persebaran kromium pada spesimen uji *stainless steel* 316 pada temperatur 500°C variasi waktu 5 dan 10 jam mengalami penurunan jika dibandingkan dengan persebaran kromium pada temperatur 400°C dengan variasi waktu 5 jam dan 10 jam, kemudian meningkat pada temperatur 600°C dengan variasi waktu pemanasan yang sama, yaitu 5 jam dan 10 jam. Fenomena pada penelitian ini dapat terjadi karena stabilitas pada *chromium carbide* yang sudah terbentuk di batas butir sebelum diberikan perlakuan panas. Karbida kromium yang terbentuk pada batas butir dapat stabil hingga temperatur 850°C. Stabilitas pada kromium karbida yang telah terbentuk sebelumnya menyebabkan laju difusi pada kromium menjadi rendah dari *austenite grain* menuju batas butir pada spesimen uji *stainless steel* 316, sehingga persebaran kromium akan menjadi rendah ketika diberikan perlakuan panas dengan variasi temperatur dan waktu tertentu (Li et al., 2021). Pada temperatur 400°C dengan variasi waktu 5 jam dan 10 jam, persebaran kromium memiliki nilai yang tinggi daripada spesimen 500°C 5 jam dan 10 jam muncul sebagai akibat dari proses *cold work* yang dilakukan pada proses manufaktur. Adanya perlakuan *cold work* pada spesimen uji menyebabkan nukleasi karbida pada butir terhambat. Nukleasi karbida pada butir yang terhambat pada *stainless steel* menyebabkan aktivitas karbon mengalami peningkatan dan meningkatkan energi pada batas butir karena karbon yang berdifusi ke batas butir. Akibatnya, batas butir akan memikat kromium yang berada disekitar batas butir dan kromium akan mendapatkan energi untuk bergerak, sehingga waktu yang dibutuhkan untuk kromium berdifusi semakin menurun dan menyebabkan laju difusi kromium ke batas butir spesimen uji *stainless steel* 316 akan meningkat (Gajjar et al., 2022). Ketika spesimen hasil *cold work* mendapatkan proses pemanasan, energi akan semakin meningkat pada batas butir, sehingga kromium akan mendapat energi untuk berdifusi dari *grain* ke batas butir dan mampu bereaksi dengan karbon membentuk karbida kromium pada temperatur 400°C (Shukla et al., 2019).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Adanya peningkatan temperatur dari variasi temperatur yang digunakan (400°C, 500°C, dan 600°C) dengan variasi waktu 5 jam dan 10 jam pada spesimen uji *stainless steel* 316 menyebabkan pembentukan karbida kromium semakin tinggi dengan ketebalan batas butir yang bertambah seiring bertambahnya temperatur.
2. Variasi temperatur pemanasan yang diberikan pada spesimen uji *stainless steel* 316 terhadap persebaran kadar kromium pada spesimen uji *stainless steel* 316 fluktuatif, dimana persebaran kromium pada batas butir spesimen uji *stainless steel* 316 pada temperatur 500°C variasi waktu tahan pemanasan 5 dan 10 jam mengalami penurunan dibandingkan dengan persebaran kromium pada temperatur 400°C dengan variasi waktu 5 jam dan 10 jam, kemudian meningkat pada temperatur 600°C pada variasi waktu pemanasan 5 jam dan 10 jam.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk proses penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Melakukan uji *Degree of Sensitization* (DOS) untuk mendapatkan data mengenai derajat sensitisasi pada spesimen uji dan menganalisa apakah telah terjadi korosi batas butir pada temperatur uji yang digunakan pada proses penelitian.
2. Melakukan proses pemanasan pada temperatur 900°C – 1200°C dan *quenching* terlebih dahulu untuk menghilangkan karbida kromium yang sebelumnya terbentuk akibat perlakuan panas pada proses manufaktur.
3. Memperkecil ukuran spesimen uji untuk mempermudah dalam pengujian SEM-EDX.
4. Melakukan penambahan variasi waktu pemanasan, khususnya pada temperatur dibawah sensitisasi untuk mengetahui pembentukan karbida kromium dan distribusi kromium di bawah temperatur sensitisasi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, Z. (2006). *Principle of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Butterworth-Heinemann.
- ASTM International. (2004). ASTM A240: Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications. *ASTM International*, 1, 12.
- ASTM International. (2021). Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels (A262-15). *ASTM International*, 01(Reapproved), 1–17. <https://doi.org/10.1520/A0262-15>.
- Atanda, P., Fatudimu, A., & Oluwole, O. (2010). Sensitisation Study of Normalized 316L Stainless Steel. 9(1), 13–23.
- Avner, S. H. (1974). Introduction to Physical Metallurgy. In *McGraw Hill Book Company*.
- Bansal, A., Sharma, A. K., Kumar, P., & Das, S. (2014). Characterization of bulk stainless steel joints developed through microwave hybrid heating. *Materials Characterization*, 91, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.02.005>
- Ben Rhouma, A., Amadou, T., Sidhom, H., & Braham, C. (2017). Correlation between microstructure and intergranular corrosion behavior of low delta-ferrite content AISI 316L aged in the range 550–700 °C. *Journal of Alloys and Compounds*, 708, 871–886. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.273>
- Callister Jr, W. . (2007). Material Science and Engineering : An Introduction. In *John Wiley & Sons*.
- Chen, C. X., Liu, M. Y., Liu, B. X., Yin, F. X., Dong, Y. C., Zhang, X., Zhang, F. Y., & Zhang, Y. G. (2017). Tensile shear sample design and interfacial shear strength of stainless steel clad plate. *Fusion Engineering and Design*, 125, 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.05.136>
- Cobb, H. M. (1999). Steel Products Manual: Stainless Steels. In *Iron & Steel Society*.
- Eaton-Mckay, J., Yan, K., Zhong, X., Callaghan, M. D., & Jimenez-Melero, E. (2021). Oxidation and carburization behaviour of two type 316H stainless steel casts in simulated AGR gas environment at 550 and 600 °C. *Journal of Nuclear Materials*, 552, 152999. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.152999>
- Farkas, D. (2021). Varying Diffusion Kinetics Along Random Grain Boundaries in a Model Austenitic Stainless Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 52(3), 1117–1126. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06151-6>
- Fontana, M. G. (1987). Corrosion Engineering. In *McGraw Hill Book Company*.
- Gajjar, P. K., Khatri, B. C., Siddhpura, A. M., & Siddhpura, M. A. (2022). Sensitization and Desensitization (Healing) in Austenitic Stainless Steel: A Critical Review. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 1, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02439-8>
- Gale, W. ., & Totemeier, T. . (2004). Diffusion in Metals. In *Smithells Metals Reference Book 8th Edition* (pp. 409–512). [https://doi.org/10.1016/S0081-1947\(08\)60034-X](https://doi.org/10.1016/S0081-1947(08)60034-X)
- Guo, L., Liu, Q., Yin, H., Pan, T. J., & Tang, Z. (2020). Excellent corrosion resistance of 316 stainless steel in purified NaCl-MgCl₂ eutectic salt at high temperature. *Corrosion Science*, 166(August 2019), 108473. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108473>
- He, H., Tian, W., Li, J., Shi, K., Sun, M., & Li, J. (2021). Failure Analysis and Finite Element Simulation on Service Conditions of SUS304 Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(8), 5987–5999. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05744-x>
- Huh, C., An, S., Kim, M., & Kim, C. (2019). Effect of corrosion characteristics on long-term

- aging of austenitic 304 steel. *Applied Sciences*, 9(24). <https://doi.org/10.3390/app9245557>
- International Stainless Steel Forum (ISSF). (2020). *Stainless Steel in Figures 2020*. https://www.worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Figures_2021_English_public_version.pdf
- Javidi, M., Haghshenas, S. M. S., & Shariat, M. H. (2020). CO₂ corrosion behavior of sensitized 304 and 316 austenitic stainless steels in 3.5 wt.% NaCl solution and presence of H₂S. *Corrosion Science*, 163(July), 108230. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108230>
- Kain, V., Chandra, K., Adhe, K. N., & De, P. K. (2004). Effect of cold work on low-temperature sensitization behaviour of austenitic stainless steels. *Journal of Nuclear Materials*, 334(2–3), 115–132. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.05.008>
- Kaneko, K., Fukunaga, T., Yamada, K., Nakada, N., Kikuchi, M., Saghi, Z., Barnard, J. S., & Midgley, P. A. (2011). Formation of M₂₃C₆-type precipitates and chromium-depleted zones in austenite stainless steel. *Scripta Materialia*, 65(6), 509–512. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2011.06.010>
- Kartaman, M., Kriswarini, R., & Anggraini, D. (2015). Studi sensitasi baja tahan karat tipe 316 sebagai bahan kelongsong dan struktur fast breeder reactors. *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, 11(1), 27–37.
- Kelly, R. G., Scully, J. R., Shoesmith, D., & Buchheit, R. G. (2002). Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering. In *Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering* (Issue January).
- Khatak, H. S., & Raj, B. (2002). Corrosion of Austenitic Stainless Steels: Mechanism, Mitigation, and Monitoring. In *Woodhead Publishing Limited*.
- Kherrouba, N., Mehdi, B., Kouba, R., Badji, R., Dekik, C. A., & Tounsi, Y. T. (2021). Experimental study and simulation of the σ phase precipitation in the stabilized 316Ti austenitic stainless steel. *Materials Chemistry and Physics*, 266, 124547. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124574>
- Kim, H. S., Shin, J., Kong, B. S., Hong, S., Oh, S., Hong, J. D., Jang, C., & Lee, S. (2019). Effects of heat treatment on mechanical properties and sensitization behavior of materials in dissimilar metal weld. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 172(February), 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.03.009>
- Kolli, S. (2020). *Sensitization in austenitic stainless steels : quantitative prediction considering multicomponent thermodynamic and mass balance effects*.
- Kolli, S., Javaheri, V., Kömi, J., & Porter, D. (2019). On the role of grain size and carbon content on the sensitization and desensitization behavior of 301 austenitic stainless steel. *Metals*, 9(11), 1–15. <https://doi.org/10.3390/met9111193>
- Kolli, S., Ohligschläger, T., Kömi, J., & Porter, D. (2019). Sensitization and Self-healing in Austenitic Stainless Steel: Quantitative prediction considering carbide nucleation and growth. *ISIJ International*, 59(11), 2090–2097. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-264>
- Kumar, A., Singh, B., & Sandhu, S. S. (2020). Influence of Thermal Aging on Metallurgical, Mechanical and Corrosion Performance of Electron Beam Welded 18mm Thick AISI 316. *Fusion Engineering and Design*, 161, 112092. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112092>
- Li, X., Chang, L., Liu, C., Leng, B., Ye, X., Han, F., & Yang, X. (2021). Effect of thermal aging on corrosion behavior of type 316H stainless steel in molten chloride salt. *Corrosion Science*, 191(June), 109784. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109784>
- Llewellyn, D. ., & Hudd, R. . (1998). *Steels : Metallurgy and Application* (Vol. 3).
- Matula, M., Hyspecka, L., Svoboda, M., Vodarek, V., Dagbert, C., Galland, J., Stonawska, Z., & Tuma, L. (2001). Intergranular corrosion of AISI 316L steel. *Materials*

- Characterization*, 46(2–3), 203–210. [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(01\)00125-5](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(01)00125-5)
- Maula, F., & Anis, M. (2013). *Studi Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan Solution Treatment terhadap Mikrostruktur dan Kekerasan Hasil Pengelasan Baja Tahan Karat AISI 316 dengan Metode GTAW. 1*, 1–18.
- McGuire, M. F. (2008). *Stainless Steels for Design Engineers*. In *Stainless Steels for Design Engineers*. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.ssde.9781627082860>
- Naghizadeh, M., & Mirzadeh, H. (2016). Elucidating the Effect of Alloying Elements on the Behavior of Austenitic Stainless Steels at Elevated Temperatures. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 47(12), 5698–5703. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3764-4>
- PACE Technologies. (2010). *Metallographic Handbook*.
- Pardo, A., Merino, M. C., Coy, A. E., Viejo, F., Carboneras, M., & Arrabal, R. (2007). Influence of Ti, C and N concentration on the intergranular corrosion behaviour of AISI 316Ti and 321 stainless steels. *Acta Materialia*, 55(7), 2239–2251. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.11.021>
- Ping, S. B., Xie, F., Wang, R. K., Zheng, Z. J., & Gao, Y. (2017). Diffusion Kinetics of Chromium in a Novel Super304H Stainless Steel. *High Temperature Materials and Processes*, 36(2), 175–181. <https://doi.org/10.1515/htmp-2015-0227>
- Priyotomo, G., & Putrayasa A, I. N. G. (2018). Perilaku Sensitasi Pada Logam Stainless Steel Seri J4 Akibat Perlakuan Panas. *Widyariset*, 4(2), 123. <https://doi.org/10.14203/widyariset.4.2.2018.123-132>
- Pyo, K. H., & Jin, K. D. (2018). *Intergranular Corrosion of Stainless Alloys*. 17(4), 183–192.
- Qian, J., Chen, C., Yu, H., Liu, F., Yang, H., & Zhang, Z. (2016). The influence and the mechanism of the precipitate/austenite interfacial C-enrichment on the intergranular corrosion sensitivity in 310 S stainless steel. *Corrosion Science*, 111, 352–361. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.05.021>
- Rajesh Kannan, P., Muthupandi, V., Devakumaran, K., Sridivya, C., & Arthi, E. (2018). Effect of grain size on self-healing behaviour of sensitized S304HCu stainless steel. *Materials Chemistry and Physics*, 207, 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.12.012>
- Ren, Z., & Ernst, F. (2020). High-temperature phase transformations in AISI 316 stainless steel infused with concentrated interstitial carbon. *Journal of Alloys and Compounds*, 819, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153000>
- Schweitzer, P. A. (2013). *Fundamentals of Corrosion-Mechanisms, Causes, and Preventative Methods*. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Shukla, S., Patil, A. P., & Bansod, A. (2019). Effect of thermal aging on IGC of cold worked Cr-Mn austenitic stainless steel. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 66(6), 757–767. <https://doi.org/10.1108/ACMM-01-2019-2053>
- Taufiq, A., Hutagaol, R. P., & Pramono, U. (2017). Metode Alternatif Analisis Sulfur Dalam Solar Dengan Alat Icp-Oes Optima 5300 Perkin Elmer. *Jurnal Sains Natural*, 1(1), 26. <https://doi.org/10.31938/jsn.v1i1.9>
- Tedmon Jr, C. ., Vermilyea, D. ., & Rosolowski, J. . (1971). Intergranular corrosion of austenitic stainless steel. *Electrochemical Science*, 118(2), 192–201. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.229-231.14>
- Thelning, K.-E. (1984). *Steel and its Heat Treatment*. In *Butterworth-Heinemann*.
- Wang, S. J., Jozaghi, T., Karaman, I., Arroyave, R., & Chumlyakov, Y. I. (2017). Hierarchical evolution and thermal stability of microstructure with deformation twins in 316 stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, 694, 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.073>

- Widyastuti, Ardhyanta, H., Purwaningsih, H., & Quluq, R. M. (2020). *Karakterisasi Material Bagian I : Komposisi, Topografi, dan Sifat Mekanik*.
- Wilson, F. G. (1971). Mechanism of intergranular corrosion of austenitic stainless steels - literature review. *British Corrosion Journal*, 6(3), 1–9. <https://doi.org/10.1179/000705971798323874>
- Zatkalíková, V., Markovičová, L., Uhrčík, M., & Hanusová, P. (2020). Susceptibility to the intergranular attack in austenitic stainless steels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 726(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/726/1/012017>
- Zhu, M., Zeng, S., Sharif, A., Cao, B., Zhang, H., & Wang, M. (2020). Effects of chloride ions on electrochemical reaction of 316 stainless steel in mixtures of molten nitrate salts. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 51(8), 1161–1169. <https://doi.org/10.1002/mawe.201900016>

LAMPIRAN

a. Hasil Pengujian OES Spesimen Uji SS 316



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
 POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
 UNIT LAYANAN BISNIS, JASA DAN PRODUKSI
 Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS, Sukolilo - Surabaya 60111
 TELP. (031) 5947186 - 5994444 FAX. (031) 5994444
 Laman : www.ppns.ac.id

LAMPIRAN HASIL PENGUJIAN
 ATTACHMENT OF THE TEST RESULT

Nomor Number	: 0387 /PL19/BJP/2022
-----------------	-----------------------

No. SPK. 55-III/PL19/BJP/2022

F.08-LUB-PPNS

CHEMICAL COMPOSITION TEST									
Identification	COMPOSITION (%)								
	Element	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
316	Value	68.1	0.0326	0.381	1.35	0.0368	0.0087	16.9	2.05
	Element	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
	Value	10.3	0.0051	0.204	0.304	0.0056	0.0070	0.0763	0.0774
	Element	Pb	Sn	B	Ca	N	Se	Sb	Ta
	Value	0.0042	0.0140	0.0034	0.0023	0.0822	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0046

Surabaya, March 29, 2022

Examined by:	Verified by
M. H. A. R. P. H.	Hendri G. S. K.

<p><i>Keterangan / Notes :</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Dilarang memperbanyak sertifikat ini dengan tujuan apapun tanpa izin resmi dari PPNS <i>It is forbidden to copy this certificate for any purpose without permission from PPNS</i> 2. Hasil pengujian ini tidak untuk dipamerkan dan hanya berlaku untuk material yang disajikan dalam pengujian ini <i>This testing report is not for public consumption, it is only valid for tested material above</i>

Halaman
2 dari 2



**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY RESULT

No. SPK : 55-III/PL19/BJP/2022 Penandaan : 316
 Pelanggan : Bpk. Leon Sutanto - T. Material Material : Stainless steel plate
 Proyek : - Dimensi : 30x26x3mm
 Kepala Lab. : Hendri Budi K., S.ST., M.T. Heat No. : -
 Program : FE_300 Keterangan : -

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	68.1	0.0359	0.386	1.35	0.0372	0.0085	17.0	2.02
2	68.0	0.0308	0.372	1.39	0.0360	0.0092	16.9	2.03
3	68.1	0.0312	0.384	1.32	0.0371	0.0085	16.7	2.09
Ave	68.1	0.0326	0.381	1.35	0.0368	0.0087	16.9	2.05
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	10.1	0.0050	0.203	0.293	0.0124	0.0052	0.0775	0.0765
2	10.3	0.0048	0.204	0.311	< 0.0010	0.0081	0.0739	0.0752
3	10.4	0.0056	0.203	0.309	0.0044	0.0078	0.0776	0.0804
Ave	10.3	0.0051	0.204	0.304	0.0056	0.0070	0.0763	0.0774
	Pb	Sn	B	Ca	N	Se	Sb	Ta
1	0.0045	0.0146	0.0032	0.0028	0.115	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0046
2	0.0037	0.0154	0.0033	0.0020	0.0497	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0046
3	0.0044	0.0121	0.0036	0.0020	0.0813	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0046
Ave	0.0042	0.0140	0.0034	0.0023	0.0822	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0046

Surabaya, 3/29/2022

Diuji oleh: Muharror

Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo Surabaya (Indonesia)
Tel. : +62 31 5999444 Fax: +62 31 5999444

b. Perhitungan Energi Aktivasi dan *Diffusion coefficient* :

1. Menghitung luas total spesimen uji (S)

$$S = (2 \times 15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}) + (4 \times 15 \times 3 \text{ mm}) = 630 \text{ mm}^2 = 0,00063 \text{ m}^2$$

2. Melakukan pemanasan pada temperatur 400°C, 500°C, 600°C dengan variasi waktu 1, 3, 5, 7, dan 10 jam

Temperatur 400°C

mo	m	Δm (gr)	Δm (kg)	t (second)	$\Delta m / s$	$\ln (\Delta m/s)$	$\ln t$
5,2210	5,2213	0,0003	0,0000003	3600	0,0004762	-7,64969262	8,18869
4,4009	4,4013	0,0004	0,0000004	10800	0,0006349	-7,36201055	9,2873
4,7393	4,7389	0,0004	0,0000004	18000	0,0006349	-7,36201055	9,79813
4,7989	4,7984	0,0005	0,0000005	25200	0,0007937	-7,138867	10,1346
5,0143	5,0138	0,0005	0,0000005	36000	0,0007937	-7,138867	10,4913

Temperatur 500°C

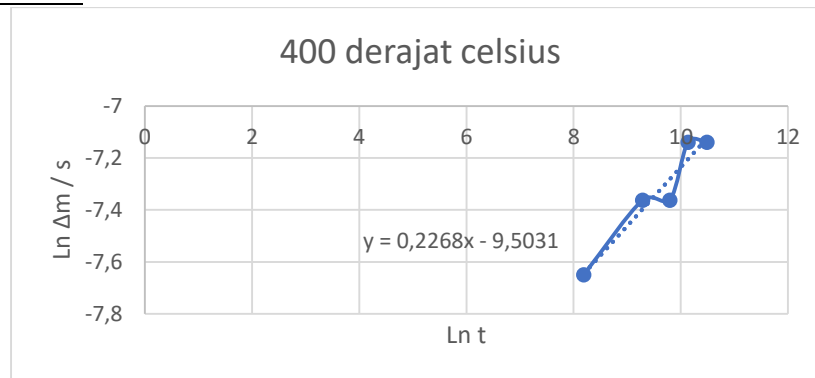
mo	m	Δm (gr)	Δm (kg)	t (second)	$\Delta m / s$	$\ln (\Delta m/s)$	$\ln t$
4,9240	4,9234	0,0006	0,00000060	3600	0,0009524	-6,95654544	8,18869
5,3909	5,3901	0,0008	0,00000080	10800	0,0012698	-6,66886337	9,2873
4,8602	4,8593	0,0009	0,00000090	18000	0,0014286	-6,55108034	9,79813
5,5286	5,5275	0,0011	0,00000110	25200	0,001746	-6,35040964	10,1346
4,6444	4,6431	0,0013	0,00000130	36000	0,0020635	-6,18335555	10,4913

Temperatur 600°C

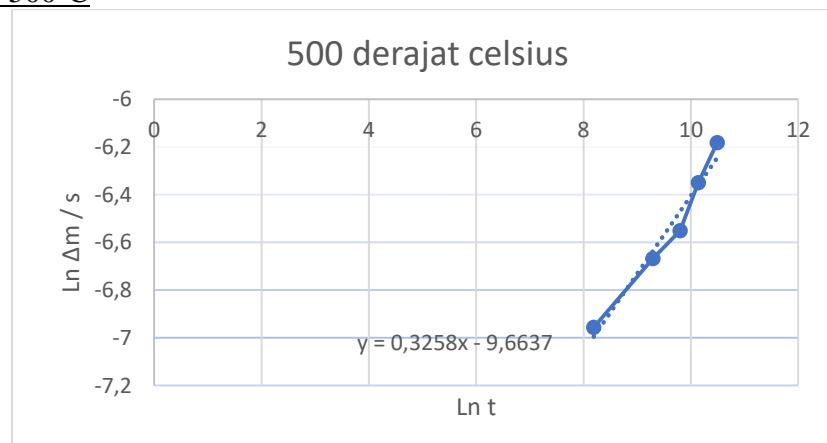
mo	m	Δm (gr)	Δm (kg)	t (second)	$\Delta m / s$	$\ln (\Delta m/s)$	$\ln t$
5,2790	5,2783	0,0008	0,0000008	3600	0,0012698	-6,66886337	8,18869
4,7329	4,732	0,0009	0,0000009	10800	0,0014286	-6,55108034	9,2873
4,2641	4,2629	0,0012	0,0000012	18000	0,0019048	-6,26339826	9,79813
4,7328	4,7314	0,0014	0,0000014	25200	0,0022222	-6,10924758	10,1346
5,7512	5,7496	0,0016	0,0000016	36000	0,0025397	-5,97571619	10,4913

3. Membuat grafik $\ln \Delta m/s$ (sumbu y) terhadap $\ln t$ (sumbu x)

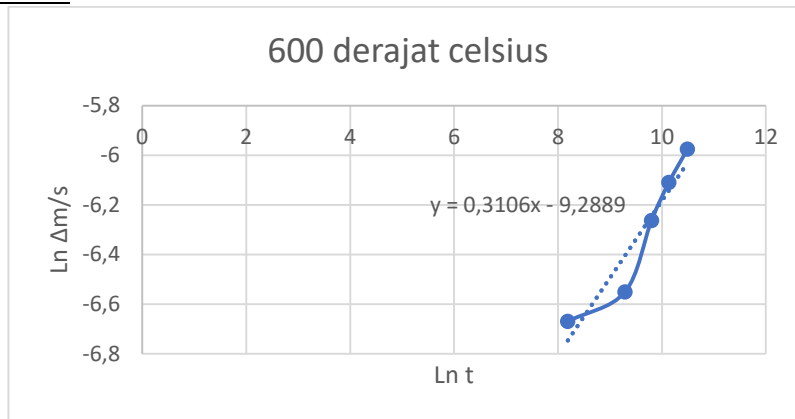
Temperatur 400°C



Temperatur 500°C



Temperatur 600°C



4. Mencari nilai gradien (m) dari grafik

$$\left(\frac{\Delta m}{S}\right)^n = k \cdot t$$

$$\ln \frac{\Delta m}{S} = \frac{1}{n} \ln t + \frac{1}{n} \ln k$$

$$y = mx + C$$

Temperatur 400°C

$$Y = 0,2268x - 9,5031$$

$$m = 1 / n$$

$$0,2268 = 1 / n$$

$$n = 4,40917$$

Temperatur 500°C

$$Y = 0,3258x - 9,6637$$

$$m = 1 / n$$

$$0,3258 = 1 / n$$

$$n = 3,06937$$

Temperatur 600°C

$$Y = 0,3106x - 9,2889$$

$$m = 1 / n$$

$$0,3106 = 1 / n$$

$$n = 3,21958$$

5. Mencari nilai ln k dari persamaan

Temperatur 400°C

$$C = 1/n \times \ln k$$

$$\ln k = -9,5031 \times 4,40917 = -41,900794$$

Temperatur 500°C

$$C = 1/n \times \ln k$$

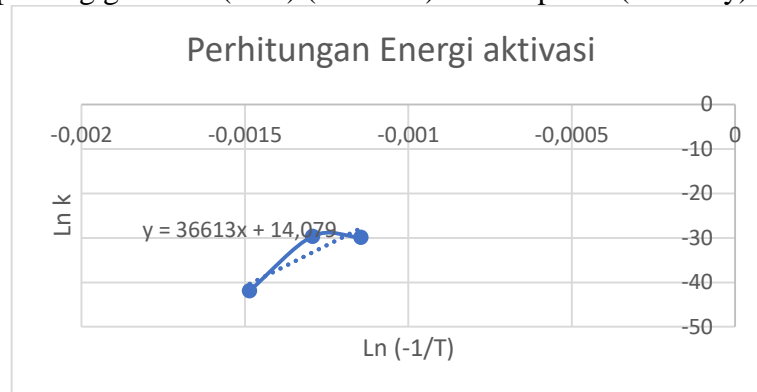
$$\ln k = -9,6637 \times 3,06937 = -29,661449$$

Temperatur 600°C

$$C = 1/n \times \ln k$$

$$\ln k = -9,2889 \times 3,21958 = -29,90631$$

6. Melakukan plotting grafik $\ln(-1/T)$ (sumbu x) terhadap $\ln k$ (sumbu y)



7. Menghitung energi aktivasi

$$k = k_0 \cdot e^{\frac{-E_a}{R \cdot T}}$$

$$\ln k = \frac{-1}{T} \cdot \frac{E_a}{R} + \ln k_0$$

$$y = mx + C$$

$$m = E_a / R$$

$$36613 = E_a / 8,314 \times 10^{-3}$$

$$E_a = 304,400482 \text{ kJ/mol}$$

8. Menghitung difusivitas kromium

$$D = D_0 \cdot e^{\frac{-E_a}{R \cdot T}}$$

$$D_0 = 8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$R = 8,314 \text{ J/K.mol}$$

Temperatur 400°C

$$D = 8 \times 10^{-6} \cdot e^{\frac{-304,400482 \times 10^3}{8,314 \times (400+273)}}$$

$$D = 1,8893 \times 10^{-29} \text{ m}^2/\text{s}$$

Temperatur 500°C

$$D = 8 \times 10^{-6} \cdot e^{\frac{-304,400482 \times 10^3}{8,314 \times (500+273)}}$$

$$D = 2,1519 \times 10^{-26} \text{ m}^2/\text{s}$$

Temperatur 600°C

$$D = 8 \times 10^{-6} \cdot e^{\frac{-304,400482 \times 10^3}{8,314 \times (600+273)}}$$

$$D = 4,8875 \times 10^{-24} \text{ m}^2/\text{s}$$

Ketebalan Karbida Spesimen Uji Stainless Steel 316 (satuan μm)

Tanpa Perlakuan

No	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	1,83E-04	102.500	79.000	143.833	-45.000	0,582
2	2,44E-04	118.764	78.694	160.500	-45.000	0,6984
3	2,44E-04	122.271	78.667	177.250	80.538	0,751
4	2,44E-04	114.333	79.667	173.000	71.565	0,7808
5	3,05E-04	59.525	27.000	124.000	56.310	0,8903
6	1,83E-04	94.833	58.500	149.000	26.565	0,5521
7	2,44E-04	121.750	87.000	188.000	0.000	0,7407
8	2,44E-04	109.234	79.222	147.938	45.000	0,6984
9	1,83E-04	139.861	107.667	174.750	45.000	0,582
10	1,83E-04	143.172	116.703	190.312	45.000	0,4365

Length = ketebalan karbida

$$L_{rata-rata} = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_{10}}{10}$$

$$L_{rata-rata} = \frac{0,582 + 0,6984 + 0,751 + 0,7808 + 0,8903 + 0,5521 + 0,7407 + 0,6984 + 0,582 + 0,4365}{10}$$

$$L_{rata-rata} = 0,67122 \mu\text{m}$$

400°C – 5 jam

No	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	2,38E-04	85.556	60.111	113.000	45.000	0,6899
2	2,38E-04	71.833	49.000	103.000	-90.000	0,6098
3	2,97E-04	75.400	52.000	113.000	90.000	0,9756
4	2,38E-04	87.667	64.500	121.500	36.870	0,6098
5	2,97E-04	141.797	104.562	184.000	45.000	0,8623
6	2,38E-04	98.889	77.889	121.500	-26.565	0,6817
7	1,79E-04	111.667	93.625	138.500	45.000	0,5174
8	2,38E-04	115.479	89.833	153.250	-30.964	0,7111
9	1,79E-04	135.646	124.000	144.500	-45.000	0,5174
10	2,38E-04	147.188	127.083	170.750	0.000	0,6707

$$L_{rata-rata} = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_{10}}{10}$$

$$L_{rata-rata} = \frac{0,6899 + 0,6098 + 0,9756 + 0,6098 + 0,8623 + 0,6817 + 0,5174 + 0,7111 + 0,5174 + 0,6707}{10}$$

$$L_{rata-rata} = 0,68457 \mu\text{m}$$

400°C – 10 jam

No	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	2,50E-04	98.056	70.444	132.417	0.000	0,75
2	2,50E-04	58.556	23.222	94.000	68.199	0,6731
3	2,50E-04	106.995	74.333	165.750	0.000	0,6875
4	1,88E-04	128.167	106.000	140.000	60.255	0,5039
5	2,50E-04	46.500	2.000	103.000	-90.000	0,75
6	2,50E-04	86.992	43.000	163.833	60.255	0,6719
7	2,50E-04	118.285	82.269	175.667	0.000	0,8333
8	2,50E-04	126.708	86.667	164.250	17.103	0,8501
9	2,50E-04	91.444	54.111	126.500	-45.000	0,7071
10	2,50E-04	106.375	65.500	159.000	-90.000	0,75

$$L_{rata-rata} = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_{10}}{10}$$

$$L_{rata-rata} = \frac{0,75 + 0,6731 + 0,6875 + 0,5039 + 0,75 + 0,6719 + 0,8333 + 0,8501 + 0,7071 + 0,75}{10}$$

$$L_{rata-rata} = 0,71769 \mu\text{m}$$

500°C – 5 jam

No	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	2,94E-04	101.241	56.688	159.000	45.000	0,8571
2	2,35E-04	81.875	50.083	124.750	-9.462	0,7373
3	2,35E-04	77.750	50.000	126.000	0.000	0,7273
4	2,35E-04	82.188	34.000	148.000	-90.000	0,7273
5	2,35E-04	86.833	37.333	149.000	-80.538	0,7373
6	1,76E-04	92.823	48.219	135.250	66.038	0,5969
7	2,94E-04	86.700	55.125	139.500	0.000	0,9091
8	2,94E-04	74.581	48.562	128.750	0.000	0,8485
9	2,35E-04	84.278	52.472	136.750	34.992	0,7398
10	2,35E-04	95.469	73.833	125.000	-37.875	0,691

$$L_{rata-rata} = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_{10}}{10}$$

$$L_{rata-rata} = \frac{0,8571 + 0,7373 + 0,7273 + 0,7273 + 0,7373 + 0,5969 + 0,9091 + 0,8485 + 0,7398 + 0,691}{10}$$

$$L_{rata-rata} = 0,75716 \mu\text{m}$$

500°C – 10 jam

No	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	2,44E-04	78.208	34.667	124.000	-68.199	0,6648
2	3,66E-04	52.349	2.683	179.611	0.000	1
3	3,66E-04	40.733	4.600	117.000	11.310	1
4	2,44E-04	73.750	33.000	132.000	0.000	0,7407
5	2,44E-04	55.590	32.722	91.750	45.000	0,6984
6	2,44E-04	76.451	22.333	160.083	0.000	0,823
7	2,44E-04	61.458	16.889	152.000	-38.660	0,7905
8	2,44E-04	94.625	72.333	132.500	-30.964	0,7199
9	2,44E-04	34.333	7.333	89.000	-18.435	0,7808
10	2,44E-04	62.532	13.426	137.694	-57.995	0,7765

$$L_{rata-rata} = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_{10}}{10}$$

$$L_{rata-rata} = \frac{0,6648 + 1 + 1 + 0,7407 + 0,6984 + 0,823 + 0,7905 + 0,7199 + 0,7808 + 0,7765}{10}$$

$$L_{rata-rata} = 0,79946 \mu\text{m}$$

600°C – 5 jam

No	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	3,66E-04	46.790	20.372	92.722	21.801	1
2	3,05E-04	90.667	26.667	164.333	-79.695	0,9202
3	2,44E-04	87.056	29.174	144.938	-68.962	0,8598
4	2,44E-04	41.819	15.806	98.333	-83.660	0,7453
5	2,44E-04	83.650	28.975	176.750	-57.995	0,7765
6	3,05E-04	54.294	28.333	117.556	48.814	0,8749
7	2,44E-04	56.483	19.340	130.375	26.565	0,7592
8	3,66E-04	47.583	10.250	97.750	-90.000	1
9	2,44E-04	80.021	37.312	140.438	-60.945	0,6355
10	2,44E-04	109.141	54.000	173.250	-75.964	0,7635

$$L_{rata-rata} = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_{10}}{10}$$

$$L_{rata-rata} = \frac{1 + 0,9202 + 0,8598 + 0,7453 + 0,7765 + 0,8749 + 0,7592 + 1 + 0,6355 + 0,7635}{10}$$

$$L_{rata-rata} = 0,83349 \mu\text{m}$$

600°C – 10 jam

No	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	3,57E-04	55.500	12.000	117.500	-32.005	1
2	2,97E-04	84.088	28.750	155.250	0.000	0,8537
3	2,97E-04	90.250	47.250	169.500	-63.435	1
4	2,97E-04	123.825	73.250	204.000	-33.690	0,8794
5	2,97E-04	85.134	48.917	139.333	-23.199	0,9288
6	2,38E-04	98.069	54.889	146.722	-93.814	0,6111
7	2,38E-04	106.708	64.556	141.833	-3.180	0,7328
8	2,97E-04	38.128	6.358	122.889	-56.310	1
9	2,38E-04	86.500	51.000	119.000	26.565	0,8181
10	2,38E-04	71.826	27.472	116.000	38.660	0,7809

$$L_{rata-rata} = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_{10}}{10}$$

$$L_{rata-rata} = \frac{1 + 0,8537 + 1 + 0,8794 + 0,9288 + 0,6111 + 0,7328 + 1 + 0,8181 + 0,7809}{10}$$

$$L_{rata-rata} = 0,86048 \mu\text{m}$$

Hasil Pengujian EDX

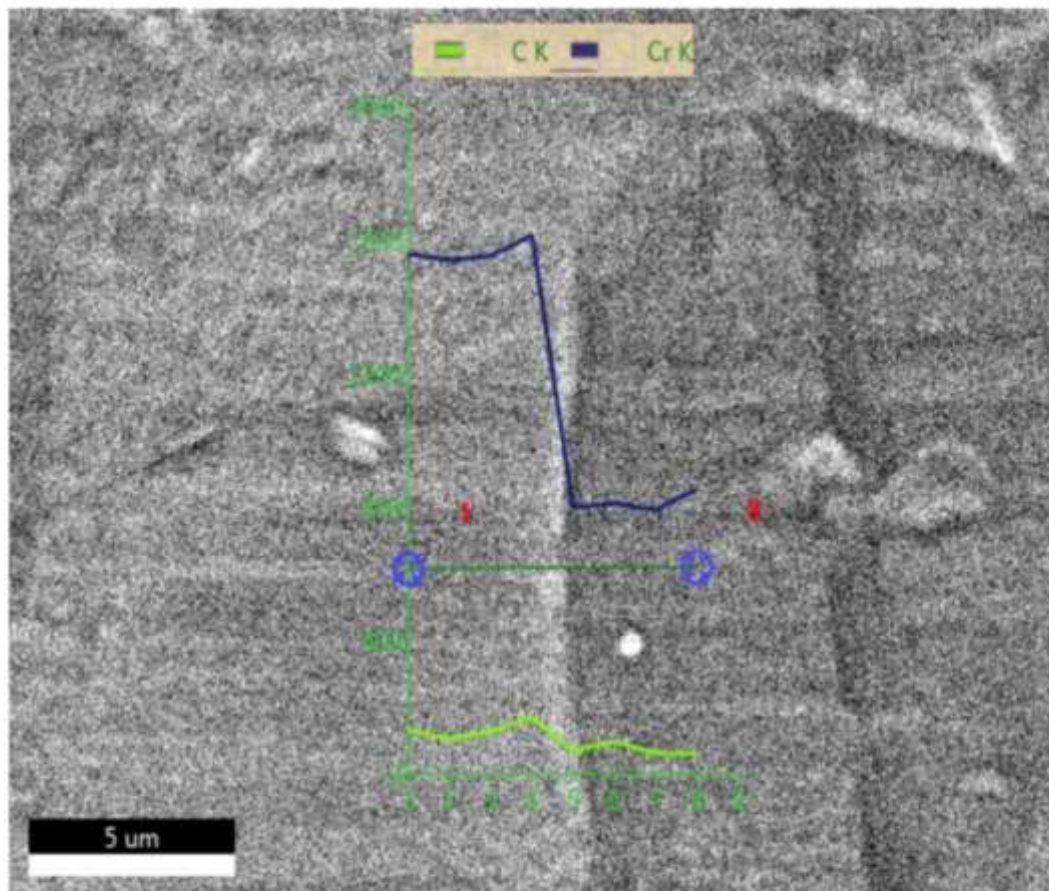
EDAX APEX

Page 1

28062022

Author: Teknik Mesin ITS
Creation: 06/28/2022 4:19:54 PM
Sample Name: 316 TP

Area 1

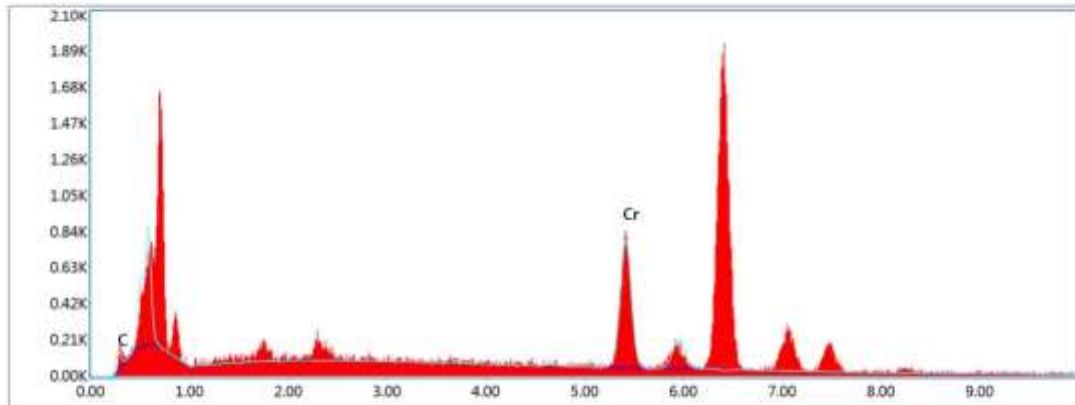


EDAX APEX

Page 3

LineScan 1

kV: 15 Mag: 5000 Takeoff: 25.8 Live Time(s): 45.1 Amp Time(µs): 3.84 Resolution (eV) 133.8



Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.
C K	6.14	22.06	14.17
Cr K	93.86	77.94	227.76

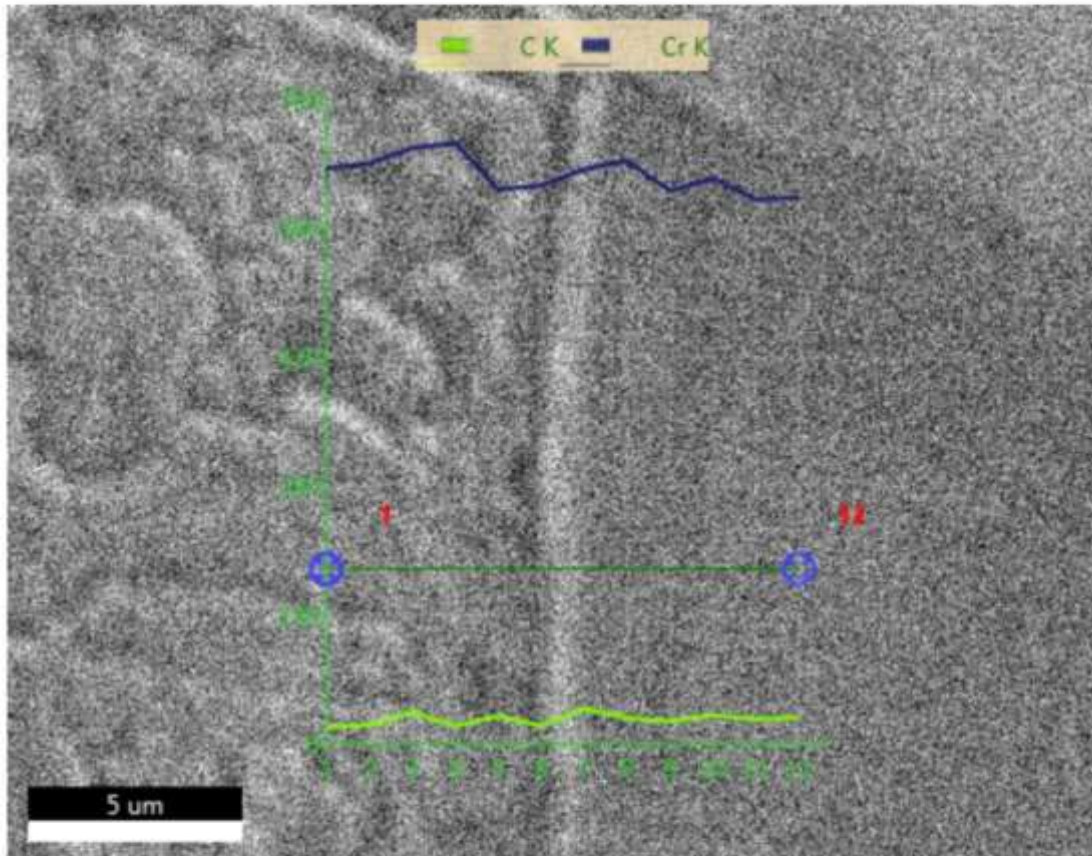
EDAX APEX

Page 1

28062022

Author: Teknik Mesin ITS
Creation: 06/28/2022 4:22:53 PM
Sample Name: 316-400-5h

Area 1

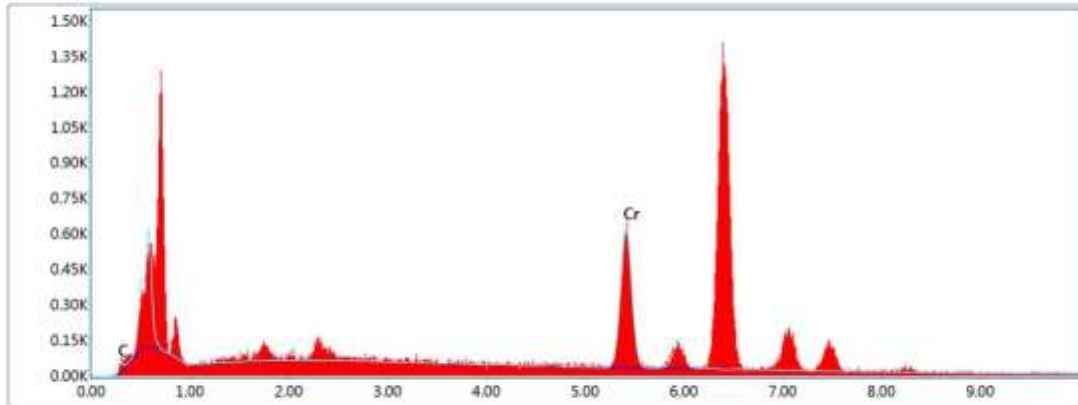


EDAX APEX

Page 3

LineScan 1

kV: 15 Mag: 5000 Takeoff: 25.8 Live Time(s): 48.5 Amp Time(µs): 3.84 Resolution (eV): 133.8



Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.
C K	4.34	16.41	7.12
Cr K	95.66	83.59	167.49

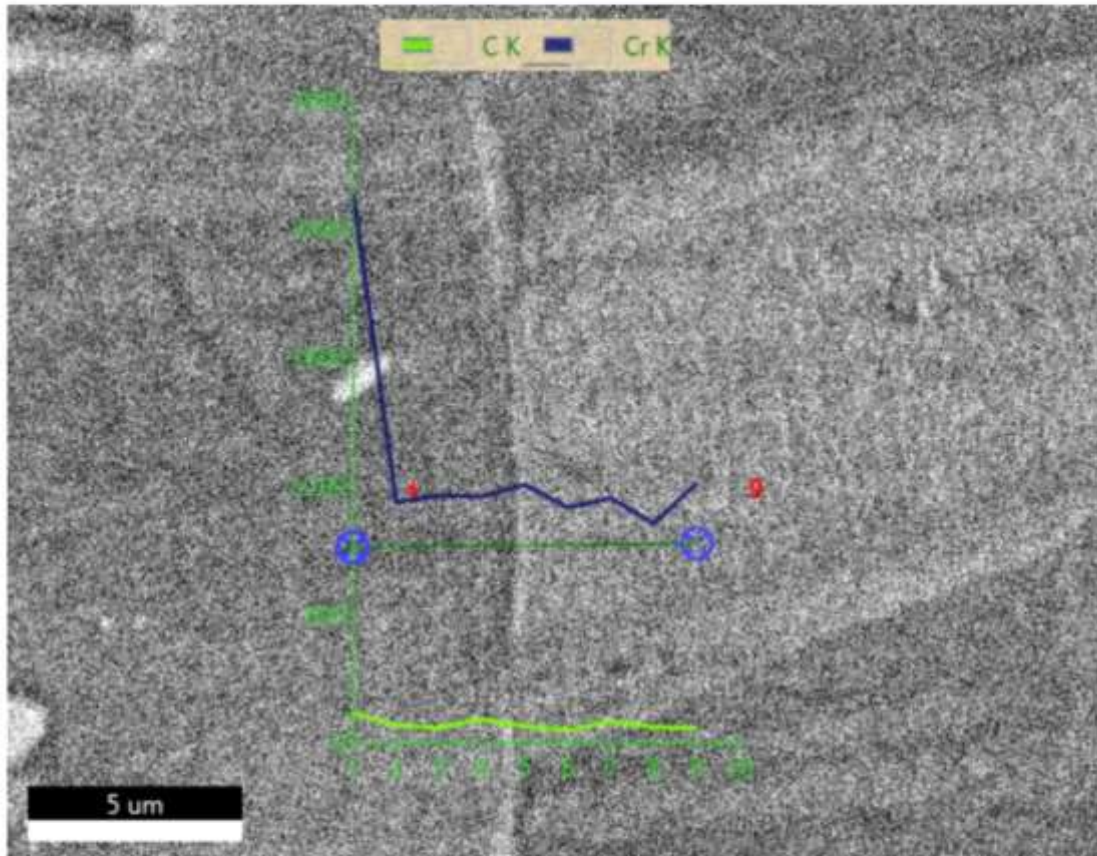
EDAX APEX

Page 1

28062022

Author: Teknik Mesin ITS
Creation: 06/28/2022 4:25:56 PM
Sample Name: 316-400-10h

Area 1

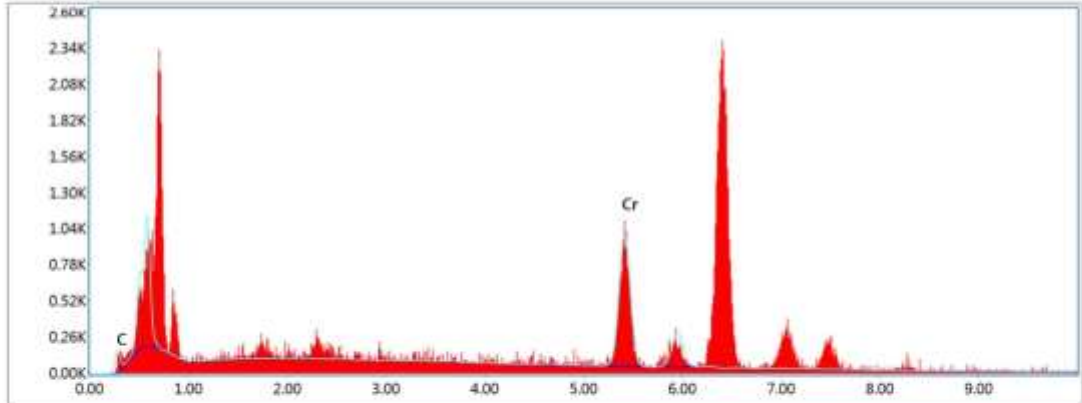


EDAX APEX

Page 3

LineScan 1

kV: 15 Mag: 5000 Takeoff: 25.8 Live Time(s): 63.7 Amp Time(µs): 3.84 Resolution(eV): 133.6



Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.
C K	6.93	24.39	14.49
Cr K	93.07	75.61	203.14

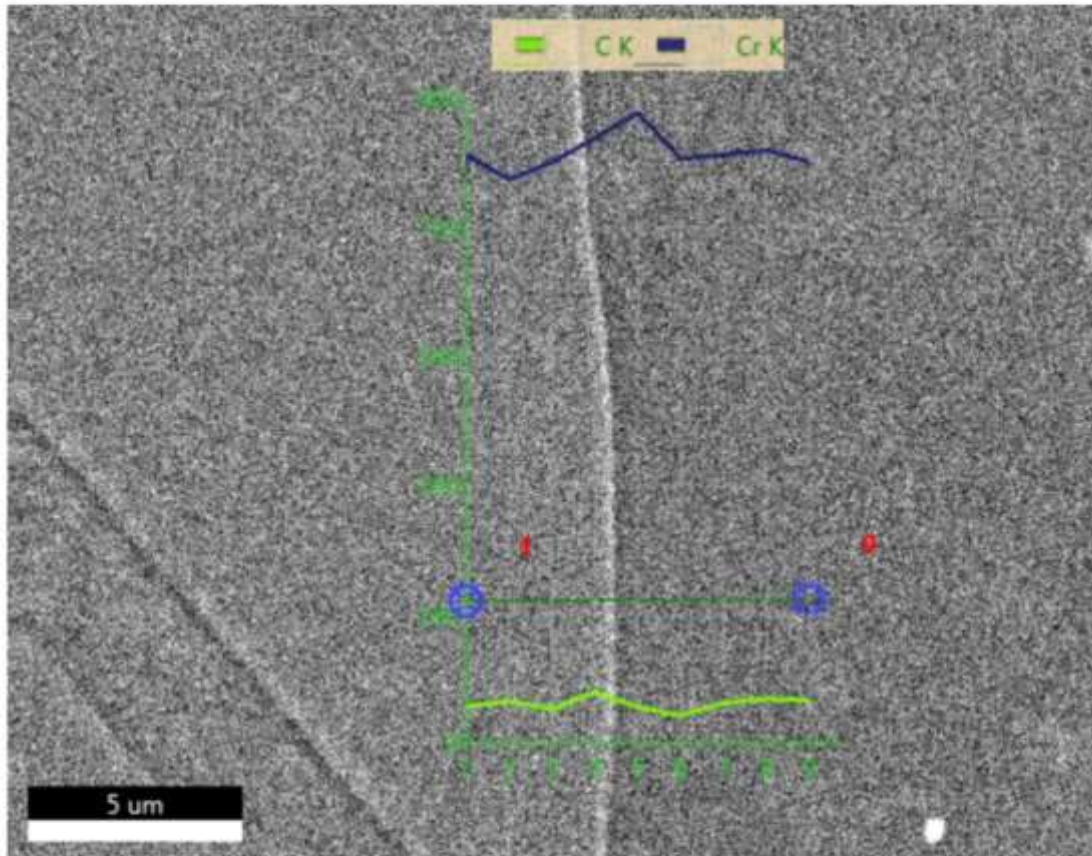
EDAX APEX

Page 1

28062022

Author: Teknik Mesin ITS
Creation: 06/28/2022 4:29:56 PM
Sample Name: 316-500-5h

Area 1

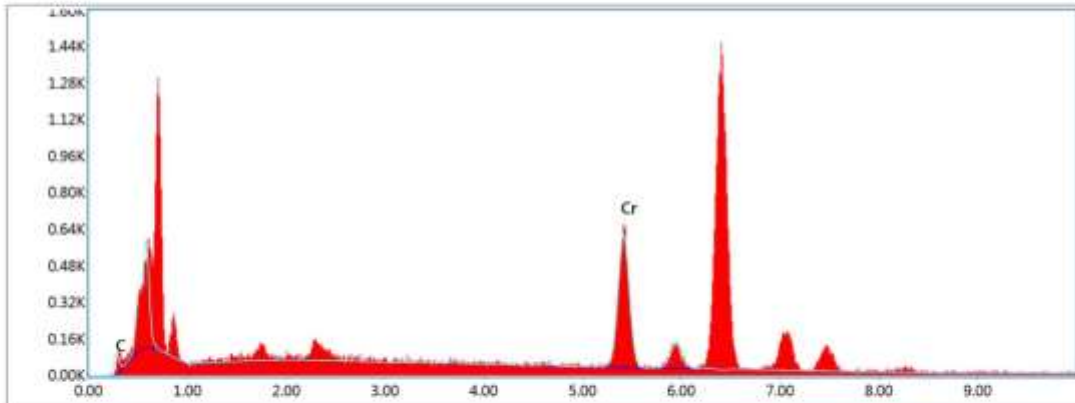


EDAX APEX

Page 3

LineScan 2

kV: 15 Mag: 5000 Takeoff: 25.8 Live Time(s): 46.4 Amp Time(µs): 3.84 Resolution (eV): 133.6



Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.
CK	6.87	24.21	12.17
CrK	93.13	75.79	172.39

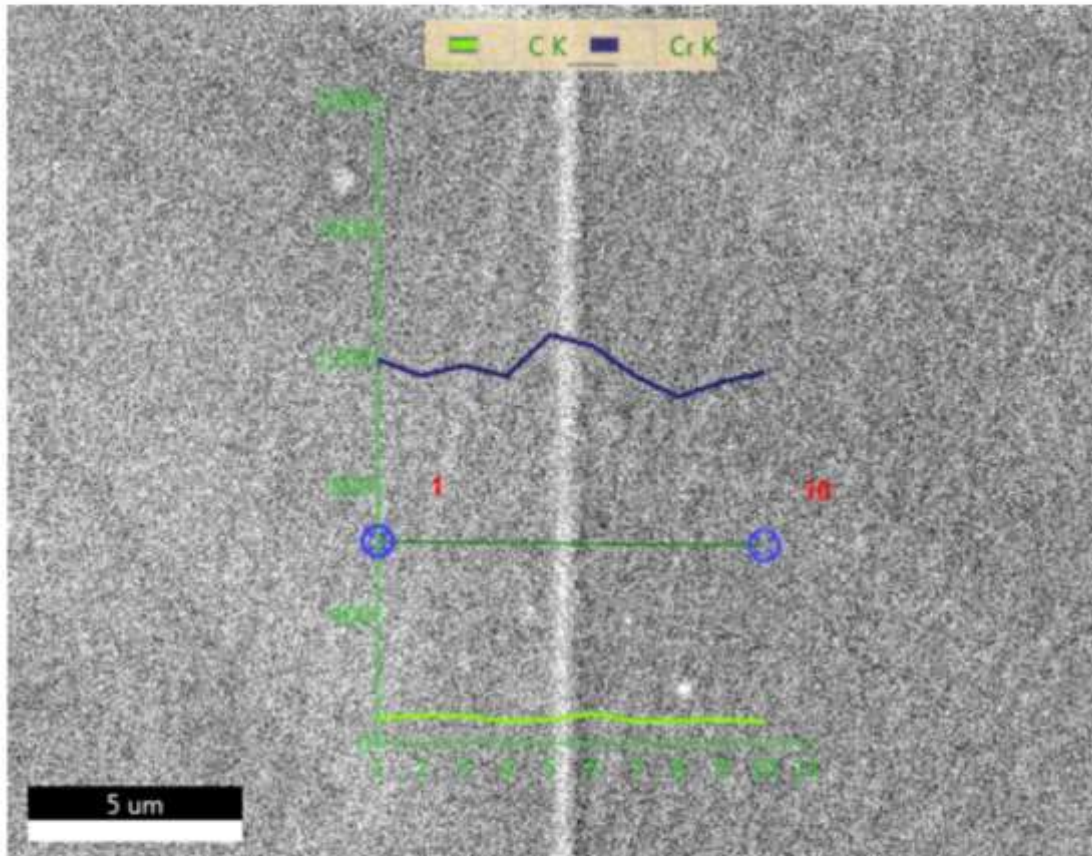
EDAX APEX

Page 1

28062022

Author: Teknik Mesin ITS
Creation: 06/28/2022 4:32:50 PM
Sample Name: 316-500-10h

Area 1

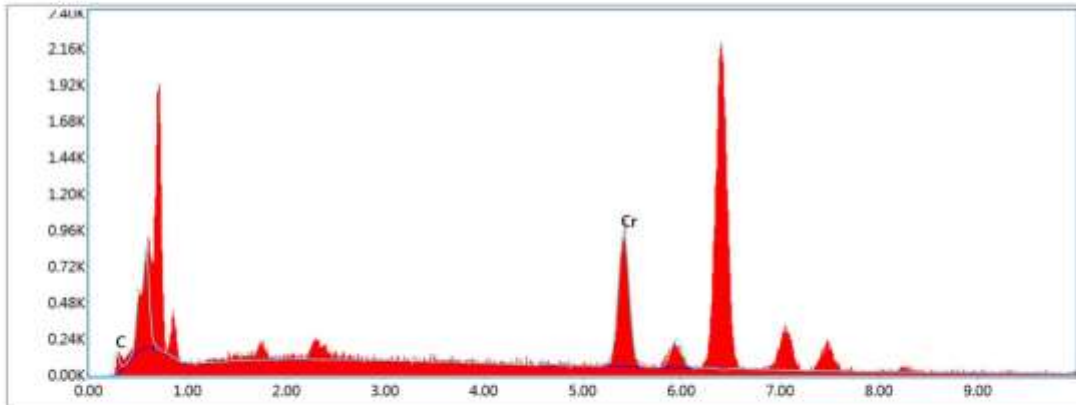


EDAX APEX

Page 3

LineScan 1

kV: 15 Mag: 5000 Takeoff: 25.8 Live Time(s): 73 Amp Time(µs): 3.84 Resolution (eV): 133.8



Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.
CK	7.19	25.11	12.68
CrK	92.81	74.89	170.67

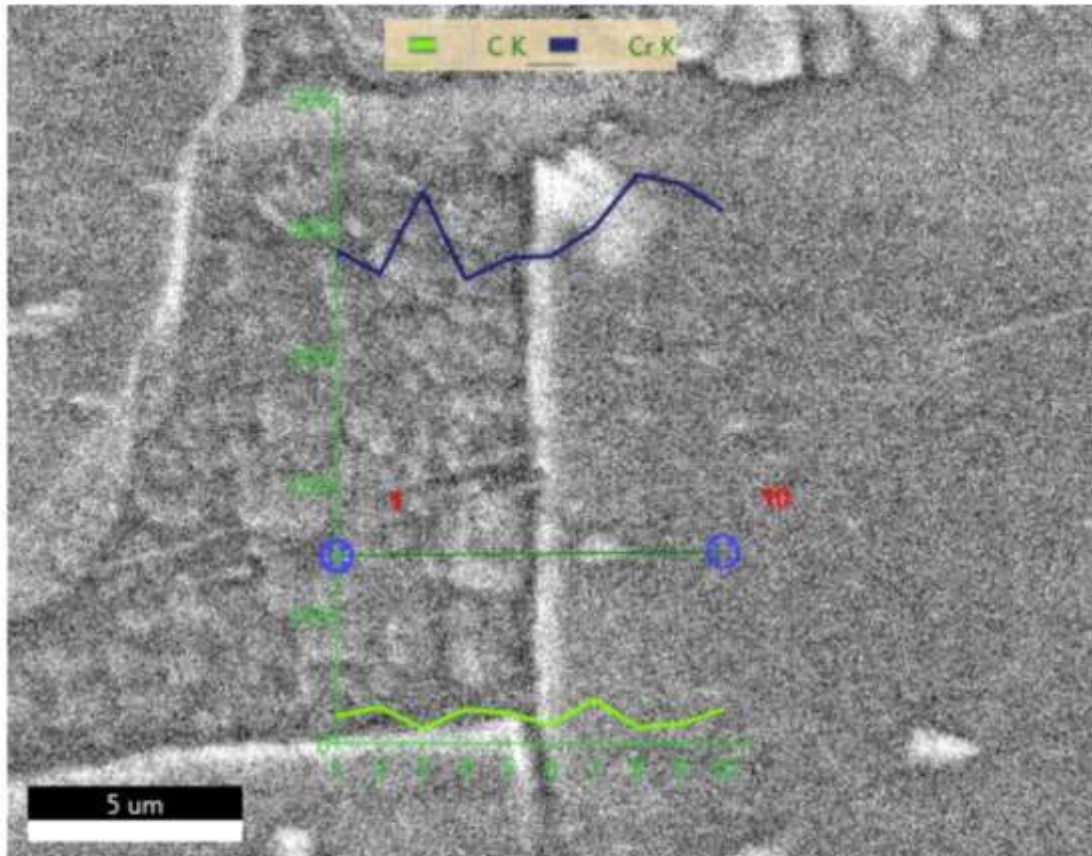
EDAX APEX

Page 1

28062022

Author: Teknik Mesin ITS
Creation: 06/28/2022 4:13:44 PM
Sample Name: 316-600-5h

Area 1

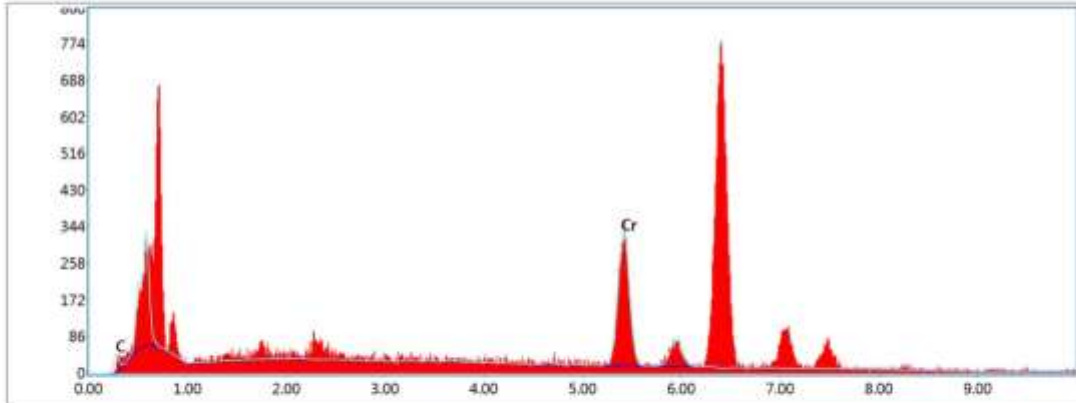


EDAX APEX

Page 3

LineScan 1

kV: 15 Mag: 5000 Takeoff: 25.8 Live Time(s): 20.4 Amp Time(µs): 3.84 Resolution (eV): 133.8



Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.
CK	5.9	21.35	9.83
CrK	94.1	78.65	105.14

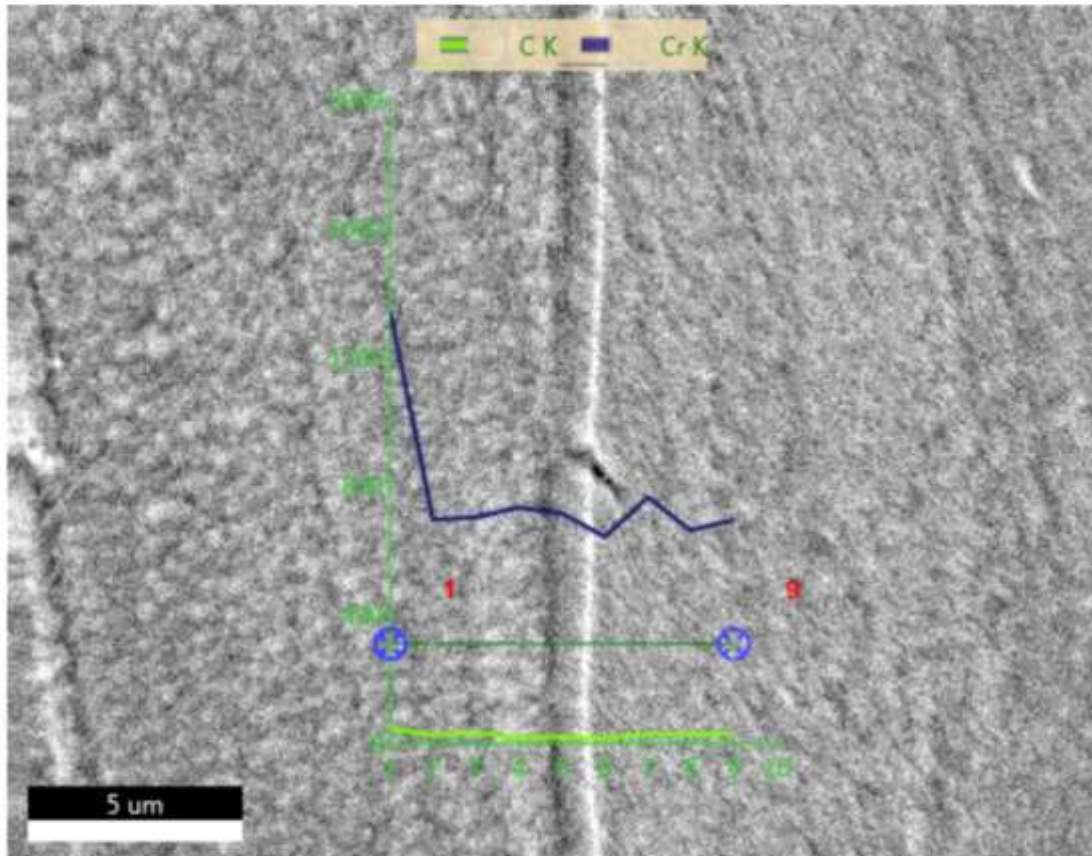
EDAX APEX

Page 1

28062022

Author: Teknik Mesin ITS
Creation: 06/28/2022 4:58:01 PM
Sample Name: 316-600-10h

Area 1

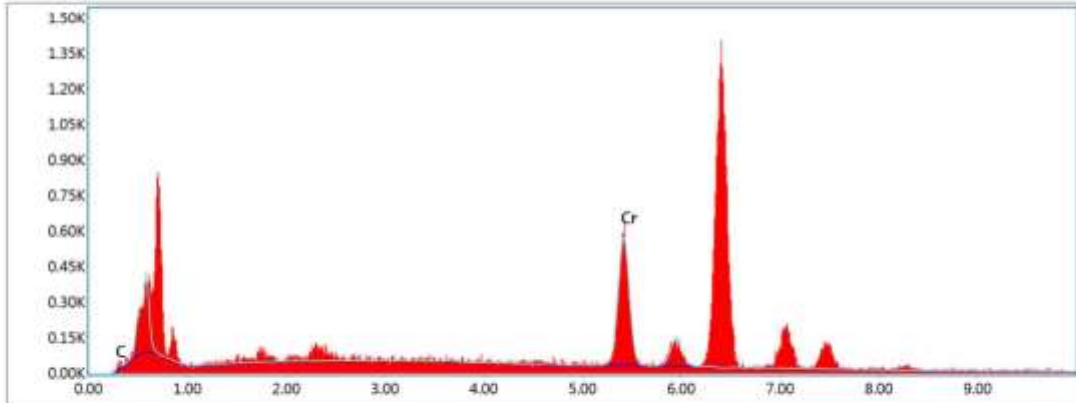


EDAX APEX

Page 3

LineScan 1

kV: 15 Mag: 5000 Takeoff: 25.8 Live Time(s): 61 Amp Time(µs): 3.84 Resolution (eV): 133.6



Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.
C K	3.55	13.73	3.19
Cr K	96.45	86.27	122.53

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam mengerjakan laporan penelitian tugas akhir ini, Penulis juga mendapat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, Penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah mendukung dan membantu. Diantaranya :

1. Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat, ilmu, dan kekuatan sehingga penulis mampu menjalankan proses penelitian Tugas Akhir dengan baik dari awal sampai akhir.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA selaku dosen pembimbing I Tugas Akhir yang telah membimbing dengan sabar, membantu memberikan masukan dan saran mengenai penelitian yang membangun kepada penulis dalam proses pengerjaan Tugas Akhir.
3. Bapak Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing II Tugas Akhir yang telah membimbing dengan sabar, memberikan motivasi dan membantu memberikan masukan dan saran mengenai penelitian yang membangun kepada penulis dalam proses pengerjaan Tugas Akhir.
4. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS.
5. Bapak Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc selaku dosen wali yang telah membimbing selama masa perkuliahan 4 tahun di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
6. Papa, mama, dan kakak yang telah mendukung selama pengerjaan Tugas Akhir secara moral dan finansial, sehingga laporan Tugas Akhir dapat terselesaikan.
7. Farhan Alif Maulana selaku partner Tugas Akhir penulis yang telah memberikan semangat dan motivasi, serta *sharing* ilmu selama pengerjaan Tugas Akhir, sehingga Tugas Akhir dapat terselesaikan dengan baik dan maksimal.
8. TA KTT (Mischell, Alvin, Gilang, Farhan) yang sudah *sharing* ilmu, saling membantu satu sama lain ketika menghadapi kendala dalam pengujian yang penuh dengan suka duka, drama, serta bertukar tawa dalam proses pengerjaan Tugas Akhir.
9. Pak Dafikin dan Cak Asman yang membantu dalam proses running muffle furnace dan metalografi dengan mesin poles
10. KMK ITS, KWU BEM FTIRS SIGMA (KURAMA) DAN OKTAN (POKEMON) yang telah memberikan pengalaman manajemen organisasi dan kenangan indah selama perkuliahan, serta semangat kepada penulis selama proses Tugas Akhir
11. Keluarga besar MT20 yang selalu memberikan semangat untuk angkatan selama 4 tahun ini.
12. Serta seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu

Semoga penelitian ini dapat memberikan dampak yang positif dan kemanfaatan bagi pembaca dan semua yang membutuhkan.

Surabaya, 25 Juli 2022

Leon Sutanto

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis dengan nama Leon Sutanto lahir di Kediri, 28 Maret 2000. Penulis menempuh pendidikan formal dimulai dari Riwayat pendidikan dimulai dari SD Katolik Santa Clara Surabaya pada tahun 2006 dan lulus pada tahun 2012. Lalu melanjutkan sekolah di SMP Katolik Santa Clara Surabaya dimulai tahun 2012 dan lulus pada tahun 2015. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMA Katolik St.Louis 1 Surabaya pada tahun 2015 dan lulus pada tahun 2018. Lalu menempuh perkuliahan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya di Departemen Teknik Material dan Metalurgi pada tahun 2018 hingga saat ini. Selama berkuliah, penulis aktif mengikuti organisasi di Keluarga Mahasiswa Katolik ITS sebagai staff eksternal dan BEM FTIRS ITS sebagai staff kewirausahaan pada tahun kedua perkuliahan. Penulis aktif sebagai Kepala Biro Usaha Mandiri Departemen Kewirausahaan BEM FTIRS ITS pada tahun ketiga perkuliahan. Dalam bidang akademik, penulis mengikuti Kerja Praktik pada posisi Operation and Engineering Intern di PT. Pertamina Geothermal Energy pada tahun 2021. Untuk menyelesaikan studi S1, penulis melakukan penelitian di bidang studi Korosi dan Analisa Kegagalan dengan Tugas Akhir berjudul “Analisis Pengaruh Temperatur Terhadap Persebaran Kadar Chromium dan Pembentukan *Chromium Carbide* pada Stainless Steel 316 dengan Waktu Pemanasan Konstan”. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email : leonsutanto21@yahoo.co.id, no.HP : 083832546585

(Halaman ini sengaja dikosongkan)