

TUGAS AKHIR – TL184834

**STUDI PENGARUH WAKTU PEMANASAN SENSITISASI
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK
STAINLESS STEEL 316 PADA TEMPERATUR 600°C**

GILANG SATRIYA WICAKSANA
NRP. 0251184000051

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

**STUDI PENGARUH WAKTU PEMANASAN SENSITISASI
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK
STAINLESS STEEL 316 PADA TEMPERATUR 600°C**

GILANG SATRIYA WICAKSANA
NRP. 0251184000051

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

**STUDY OF THE EFFECT OF SENSITIZATION TIME ON
MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF
STAINLESS STEEL 316 AT THE TEMPERATURE OF 600°C**

GILANG Satriya Wicaksana
NRP. 0251184000051

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

(This page is intentionally blank)

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI PENGARUH WAKTU PEMANASAN SENSITISASI TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK *STAINLESS STEEL 316* PADA TEMPERATUR 600°C

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 : **GILANG SATRIYA WICAKSANA**
NRP. 0251184000051

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA.

Pembimbing

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

Ko-Pembimbing

3. Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.

Penguji

4. Azzah Dyah Pramata S.T., M.T., M.Eng., Ph.D .

Penguji



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET

STUDY OF THE EFFECT OF SENSITIZATION TIME ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF STAINLESS STEEL 316 AT TEMPERATURE OF 600°C

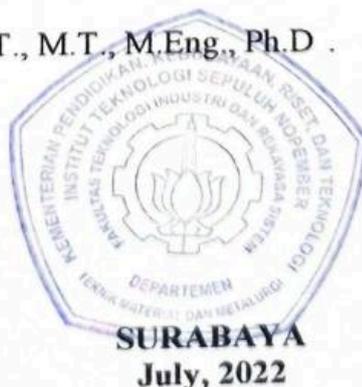
FINAL PROJECT

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 : **GILANG SATRIYA WICAKSANA**
NRP. 0251184000051

Approved by Final Project Examiner Team :

- | | | |
|--|--|------------|
| 1. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA. |  | Advisor |
| 2. Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc. |  | Co-Advisor |
| 3. Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. |  | Examiner |
| 4. Azzah Dyah Pramata S.T., M.T., M.Eng., Ph.D . |  | Examiner |



(This page is intentionally blank)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

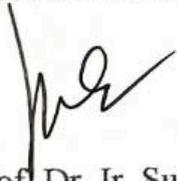
Nama mahasiswa/NRP : Gilang Satriya Wicaksana/0251184000051
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS
Dosen Pembimbing/NIP : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA / 196203261987011001

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "STUDI PENGARUH WAKTU PEMANASAN SENSITISASI TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK *STAINLESS STEEL* 316 PADA TEMPERATUR 600°C" 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, 14 Juli 2022

Mengetahui
Dosen Pembimbing



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

Mahasiswa



(Gilang Satriya Wicaksana)
NRP. 0251184000051

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

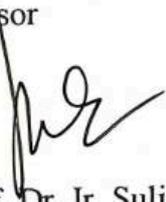
Name of student/NRP : Gilang Satriya Wicaksana/0251184000051
Departement : Materials and Metallurgical Engineering FTIRS
Advisor/NIP : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA / 196203261987011001

Hereby declare that the Final Project with the title of "STUDY OF THE EFFECT OF SENSITIZATION TIME ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF STAINLESS STEEL 316 AT TEMPERATURE OF 600°C" 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 14th 2022

Acknowledged
Advisor



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

Student



(Gilang Satriya Wicaksana)
NRP. 0251184000051

(This page is intentionally blank)

STUDI PENGARUH WAKTU PEMANASAN SENSITISASI TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK STAINLESS STEEL 316 PADA TEMPERATUR 600°C

Nama Mahasiswa / NRP : Gilang Satriya Wicaksana / 0251184000051
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
Ko -Pembimbing : Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc

Abstrak

Austenitik stainless steel telah banyak diaplikasikan karena memiliki sifat mekanik yang baik, tahan korosi, dan kemampuannya untuk beroperasi di temperatur tinggi. Akan tetapi, jika material ini terekspos pada temperatur kritis yang berkisar antara 450°C sampai 850°C, akan terjadi sensitisasi yang ditandai dengan adanya presipitasi karbida di batas butir. Presipitasi karbida menjadi penyebab timbulnya chromium-depleted zone pada mikrostruktur serta dapat mempengaruhi sifat mekanik dari material tersebut. Austenitic stainless steel 316 telah dipilih sebagai material uji pada penelitian ini. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis pengaruh waktu pemanasan sensitisasi terhadap struktur mikro dan sifat mekanik stainless steel 316 pada temperatur 600°C. Sampel dipanaskan sampai temperatur 600°C lalu ditahan dengan variasi waktu 3, 5, dan 7 jam kemudian didinginkan secara lambat di udara. Perubahan struktur mikro akibat perlakuan panas diamati dengan menggunakan mikroskop optik sedangkan perubahan sifat mekanik dianalisis dengan melakukan pengujian mekanik seperti pengujian tarik dan kekerasan pada tiap sampel. Hasil pengamatan metalografi menunjukkan adanya perubahan struktur sebagai pengaruh dari waktu pemanasan sensitisasi yang diberikan pada sampel stainless steel 316 dimana ditemukan struktur step pada sampel tanpa perlakuan dan sampel yang diberikan waktu sensitisasi 3 jam serta struktur dual pada sampel dengan waktu sensitisasi 5 jam dan 7 jam. Pengujian mekanik menunjukkan bahwa terdapat perubahan nilai kekuatan, kekerasan, dan keuletan pada masing-masing sampel seiring dengan lamanya waktu sensitisasi. Nilai kekuatan tarik dari spesimen stainless steel 316 meningkat pada variasi waktu sensitisasi 3 jam dan 5 jam yaitu secara berturut-turut adalah sebesar 581.045 MPa, 604.72 MPa serta menurun pada waktu sensitisasi 7 jam yaitu sebesar 573.875 MPa. Nilai elongasi menurun pada variasi waktu sensitisasi 3 jam, 5 jam yaitu secara berturut-turut sebesar 44.22%, dan 43.95% serta meningkat pada waktu sensitisasi 7 jam yaitu sebesar 47.53%. Tingkat kekerasan sampel mengalami peningkatan dari sampel tanpa perlakuan dengan nilai 208.8 HV menjadi 224.7 HV pada waktu sensitisasi 7 jam.

Kata Kunci: *Stainless Steel, sensitisasi, presipitasi karbida, sifat mekanik, mikrostruktur*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STUDY OF THE EFFECT OF SENSITIZATION TIME ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF STAINLESS STEEL 316 AT TEMPERATURE OF 600°C

Student Name / NRP : Gilang Satriya Wicaksana / 0251184000051
Departement : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
Advisor : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
Co-Advisor : Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc

Abstract

Austenitic stainless steels have been widely applied because of their good mechanical properties, corrosion resistance, and ability to operate at high temperatures. However, if this material is exposed to critical temperatures ranging from 450°C to 850 °C, sensitization will occur which is indicated by the presence of carbide precipitation at the grain boundaries. Carbide precipitation is the cause of the chromium-depleted zone in the microstructure and can affect the mechanical properties of the material. Austenitic stainless steel 316 has been selected as the test material in this study. This research was conducted with the aim of analyzing the effect of sensitization time on the microstructure and mechanical properties of stainless steel 316 at a temperature of 600°C. The sample was heated to a temperature of 600°C and then held for 3, 5, and 7 hours and then slowly cooled in air. Changes in microstructure due to heat treatment were observed using an optical microscope while changes in mechanical properties were analyzed by performing mechanical tests such as tensile and hardness tests on each sample. The results of metallographic observations showed that there was a change in structure as a result of the sensitization heating time given to the 316 stainless steel sample where a step structure was found in the as-received sample and the sample was given a sensitization time of 3 hours and a dual structure in the sample with a sensitization time of 5 hours and 7 hours. Mechanical testing showed that there was a change in the value of strength, hardness, and ductility in each sample along with the length of sensitization time. The tensile strength value of sample increased at 3 hours and 5 hours sensitization time variations, which were 581,045 MPa and 604.72 MPa and decreased at 7 hours sensitization time, which was 573,875 MPa. The elongation value decreased in the variation of the sensitization time of 3 hours, 5 hours, which was 44.22%, and 43.95%, respectively, and increased at 7 hours of sensitization, which was 47.53%. The hardness level of the sample increased from the as-received sample with a value of 208.8 HV to 224.7 HV at a sensitization time of 7 hours.

Keywords: *Stainless steel, sensitization, carbide precipitation, mechanical properties, microstructure*

(This page is intentionally blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan kesehatan kepada Penulis, sehingga dapat menyelesaikan penyusunan Laporan Tugas Akhir dengan judul “STUDI PENGARUH WAKTU PEMANASAN SENSITISASI TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK STAINLESS STEEL 316 PADA TEMPERATUR 600°C”. 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 laporan 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 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 laporan Tugas Akhir agar karya berikutnya bisa menjadi lebih baik. Harapan Penulis untuk laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat dan digunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 14 Juli 2022
Penulis

Gilang Satriya Wicaksana

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
APPROVAL SHEET.....	vii
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ix
STATEMENT OF ORIGINALITY.....	xi
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 Baja Tahan Karat (<i>Stainless Steel</i>).....	3
2.1.1 <i>Austenitic Stainless Steel</i>	5
2.1.2 <i>Stainless Steel 316</i>	7
2.2 Sensitasi pada <i>Austenitic Stainless Steel</i>	8
2.3 Korosi.....	9
2.3.1 Korosi Batas Butir.....	9
2.4 Pengujian.....	12
2.4.1 Pengujian Komposisi Kimia.....	12
2.4.2 Pengujian Metalografi.....	12
2.4.3 Pengujian Tarik.....	13
2.4.4 Pengujian Kekerasan.....	14
2.5 Penelitian Sebelumnya.....	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	19
3.2 Bahan Penelitian.....	19
3.3 Alat Penelitian.....	20
3.4 Metode Penelitian.....	23
3.4.1 Prosedur Preparasi Spesimen.....	23
3.4.2 Prosedur Pembuatan Larutan Etsa.....	24
3.4.3 Proses Perlakuan Panas.....	24
3.4.4 Prosedur Metalografi.....	24
3.5 Pengujian.....	24
3.5.1 Proses Pengujian Komposisi Kimia.....	24
3.5.2 Proses Pengujian Metalografi.....	24
3.5.3 Proses Pengujian Tarik.....	25
3.5.4 Proses Pengujian Kekerasan.....	25
3.6 Rancangan Penelitian.....	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1 Komposisi Kimia <i>Stainless Steel 316</i>	27
4.2 Hasil Pengujian Metalografi.....	28

4.3 Hasil Pengujian Mekanik.....	32
4.3.1 Hasil Pengujian Tarik.....	33
4.3.2 Hasil Pengujian Kekerasan	36
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	39
5.1 Kesimpulan	39
5.2 Saran.....	39
DAFTAR PUSTAKA.....	41
LAMPIRAN.....	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Struktur Mikro <i>Austenitic Stainless Steel</i>	5
Gambar 2.2	Diagram Fasa Pseudobinary Paduan Fe-18%Cr-8%Ni terhadap Variasi Kandungan Karbon	6
Gambar 2.3	Kurva Tegangan-Regangan Baja Tahan Karat	7
Gambar 2.4	C Curve Yang Menunjukkan Presipitasi Kromium Karbida terhadap Variasi Kandungan Karbon <i>Austenitic Stainless Steel</i> Dengan 18%Cr Dan 8%Ni.....	9
Gambar 2.5	(a) Presipitasi Karbida pada <i>Austenitic Stainles Steel</i> yang Tersensitasi, (b) Potongan Melintang Korosi Batas Butir pada Baja.....	10
Gambar 2.6	Klasifikasi Mikrostruktur Tersensitasi Berdasarkan ASTM A262: (a) <i>Step</i> , (b) <i>Dual</i> , (c) <i>Ditch</i> dengan Perbesaran 500x	11
Gambar 2.7	Kurva Tegangan-Regangan Hasil Uji Tarik.....	13
Gambar 2.8	Skema Uji Kekerasan Vickers.....	15
Gambar 2.9	Mikrostruktur Spesimen Tersensitasi pada Temperatur 700°C dengan Interval Waktu (a) 15 Menit, (b) 30 Menit, (c) 60 Menit, (d) 300 Menit, (e) 600 Menit.	17
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	19
Gambar 3.2	<i>Muffle Furnace</i>	20
Gambar 3.3	Mesin Uji Tarik	21
Gambar 3.4	Alat Uji Kekerasan <i>Micro-Vickers</i>	21
Gambar 3.5	Mikroskop Optik	22
Gambar 3.6	Mesin <i>Grinding</i> Dan <i>Polishing</i>	22
Gambar 3.7	<i>Rectifier</i>	23
Gambar 3.8	Standar Spesimen Uji Tarik.....	23
Gambar 4.1	Struktur Mikro <i>Stainless Steel</i> 316 Tanpa Perlakuan Dengan Perbesaran 200x	28
Gambar 4.2	Struktur Mikro <i>Stainless Steel</i> 316 Dengan Variasi Waktu Sensitisasi (a) 3 Jam, (b) 5 Jam, (c) 7 Jam Pada Perbesaran 200x	29
Gambar 4.3	Struktur Mikro <i>Stainless Steel</i> 316 Dengan Variasi Waktu Sensitisasi (a) 3 Jam, (b) 5 Jam, (c) 7 Jam Pada Perbesaran 500x	31
Gambar 4.4	Grafik Perubahan Rata-Rata Ketebalan Batas Butir terhadap Waktu Pemanasan	32
Gambar 4.5	Grafik Perubahan Kekuatan Spesimen Uji terhadap Variasi Waktu Sensitisasi Berdsarkan Hasil Uji Tarik.....	34
Gambar 4.6	Grafik Perubahan Keuletan Spesimen Hasil Pengujian Tarik.....	35
Gambar 4.7	Grafik Perubahan Nilai Kekerasan Spesimen Hasil Pengujian Kekerasan	37

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Unsur <i>Stainless Steel</i> 316	7
Tabel 2.2 Sifat Mekanik <i>Stainless Steel</i> 316.....	8
Tabel 2.3 Penelitian Sebelumnya.....	15
Tabel 3.1 Dimensi Standar Spesimen Uji Tarik	23
Tabel 3.2 Rancangan Penelitian.....	25
Tabel 3.3 Jadwal Penelitian	26
Tabel 4.1 Perbandingan Komposisi Kimia <i>Stainless Steel</i> 316 ASTM A-240 dan Hasil Uji OES	27
Tabel 4.2 Identifikasi Mikrostruktur Spesimen Hasil Perlakuan Panas Berdasarkan ASTM A262 <i>Practice A</i>	30
Tabel 4.3 Ketebalan Daerah Batas Butir dengan Variasi Waktu Sensitisasi.....	32
Tabel 4.4 <i>Ultimate Tensile Strength</i> dan <i>Yield Strength</i> Spesimen Hasil Uji Tarik.....	33
Tabel 4.5 Keuletan Spesimen Hasil Uji Tarik	35
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Kekerasan	36

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sukses teknologi terus bergerak seiring dengan berjalannya waktu. Implementasi teknologi saat ini didukung secara proporsional oleh pertumbuhan industri. Berkembangnya sektor industri berhubungan erat dengan kepentingan manusia yang semakin kompleks dan pemenuhan kebutuhan manusia tersebut selalu menjadi tantangan bagi para pelaku industri. Inovasi-inovasi kerap dilakukan dan dapat diinisiasi dengan kemajuan material. Material yang digunakan pada industri direkayasa sedemikian mungkin agar tepat digunakan pada aplikasinya. Salah satu material yang menjadi komponen paling penting di industri adalah baja. Sebelum diaplikasikan, baja dimodifikasi terlebih dahulu menggunakan berbagai perlakuan dengan tujuan agar baja tersebut memiliki karakteristik material yang diinginkan seperti kekuatan, keuletan, ketangguhan, sifat tahan aus, sifat tahan korosi, dan sebagainya.

Baja merupakan logam paduan yang mengandung besi (Fe) sebagai unsur dasar dan karbon (C) sebagai unsur paduan utamanya. Karbon yang terkandung di dalam baja dapat berkisar antara 0,2 % sampai 2,1 % berat berdasarkan tingkatannya. Unsur paduan selain karbon biasanya juga dapat ditambahkan pada baja antara lain adalah mangan (Mn), krom (Cr), Vanadium(V), dan Tungsten (W) (Arifin et al., 2017). Contoh jenis baja yang banyak digunakan di dunia adalah *stainless steel*. Berdasarkan data dari *International Stainless Steel Forum (ISSF)*, laju pertumbuhan majemuk produksi baja tahan karat dari tahun 1980 sampai 2019 adalah sebesar 5,8 % pertahun dimana tercatat total produksi baja tahan karat di dunia pada tahun 2019 mencapai 52,218,000 metric ton (*Stainless Steel in Figures 2020*, 2020). Baja tahan karat yang paling umum digunakan adalah baja tahan karat dengan seri 200 dan 300. Komposisi yang biasanya ditemukan pada baja tahan karat seri 300 adalah 18% kromium dan 8% Nikel. Adanya kandungan krom yang tinggi pada baja tahan karat austenitik tersebut menjadikan baja tersebut memiliki kemampuan tahan korosi yang baik akibat terbentuknya film protektif pada permukaan baja sedangkan adanya nikel pada *stainless steel* tersebut dapat memberikan sifat penstabil austenit sehingga dapat lebih mudah dibentuk dan dilakukan proses manufaktur.

Baja tahan karat austenitik banyak diaplikasikan di industri karena kekuatannya, ketahanan korosi, kemampuan kerja mekanik, serta konduktivitas listrik dan termal yang sangat baik. Salah satu diantaranya adalah *stainless steel* 316 yang secara praktis digunakan pada bidang farmasi, petrokimia, pengeboran lepas pantai, marine shipping, desalinasi air, dan sebagainya (Ait Albrimi et al., 2011). Akhir-akhir ini terdapat aplikasi *stainless steel* 316 pada temperatur tinggi yaitu pada sistem perpipaan di *Consentrated Solar Power (CSP) Plant* yang beroperasi pada temperatur 290-600°C (Trent et al., 2016). Di sisi lain, paparan temperatur tinggi pada *stainless steel* dapat mendorong adanya fenomena sensitasi. Sensitasi merupakan fenomena pada baja tahan karat austenitik yang terjadi saat terpapar pada temperatur tinggi yang berkisar antara 450 hingga 870°C (Zakiyya & Drastiawati, 2016). Fenomena ini ditandai dengan terbentuknya senyawa karbida pada area batas butir yang mengakibatkan area yang berada di sekitar batas butir menjadi kekurangan krom (Cr). Area ini kemudian menjadi sangat rentan terhadap serangan korosi berupa korosi batas butir.

Berbagai penelitian mengenai sensitasi baja tahan karat pada temperatur tinggi telah dilakukan. Ho-Sub Kim pada tahun 2019 dalam penelitiannya mengenai pengelasan AISI 316 dengan baja paduan rendah, menyatakan bahwa terdapat penurunan sifat mekanik di daerah HAZ *stainless steel* 316 seiring naiknya temperatur sensitasi (Kim et al., 2019). Agbokwor pada tahun 2019 dalam penelitiannya mengenai pengaruh waktu sensitasi pada *stainless steel* 316 di temperatur 750°C, menyatakan bahwa terdapat penurunan nilai kekerasan seiring lamanya waktu tahan (Agbokwor & Neife, 2019). Kocsisova pada tahun 2014 dalam penelitiannya

mengenai studi pengaruh sensitasi terhadap batas butir *stainless steel* 316, menyatakan bahwa terdapat perubahan mikrostruktur pada batas butir akibat terbentuknya presipitasi karbida seiring lamanya waktu sensitasi (Kocsisová et al., 2014).

Perubahan mikrostruktur pada saat sensitasi membawa pengaruh yang signifikan terhadap degradasi sifat mekanik dari baja tahan karat (Kumar, 2014). Berkurangnya sifat mekanik baja tahan karat pada temperatur tinggi tersebut tentunya dapat menimbulkan banyak kerugian terutama saat diaplikasikan pada industri. Berdasarkan uraian permasalahan di atas, perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui perilaku mekanik dari *stainless steel* 316 saat berada pada temperatur 600°C dengan variasi waktu agar nantinya diharapkan dapat menjadi meningkatkan performa aplikasi baja tahan karat.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh dari waktu pemanasan sensitasi terhadap struktur mikro dan sifat mekanik dari *stainless steel* 316 yang dipanaskan pada temperatur 600°C

1.3 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil akhir yang baik dan sesuai dengan yang diinginkan serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Stainless Steel* 316 yang digunakan untuk penelitian dianggap homogen dan bebas cacat
2. Pengotor yang terdapat pada *stainless steel* 316 dan bahan kimia lainnya diabaikan.
3. Temperatur sensitasi pada *furnace* dianggap konstan.
4. Pengaruh lingkungan selama proses perlakuan panas diabaikan

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menganalisis pengaruh waktu pemanasan sensitasi terhadap struktur mikro dari *stainless steel* 316 pada temperatur 600°C
2. Menganalisis pengaruh waktu pemanasan sensitasi terhadap sifat mekanik *stainless steel* 316 pada temperatur 600°C

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah

1. Memperbanyak wawasan mengenai bidang keilmuan teknik material dan metalurgi bagi penulis sendiri, masyarakat umum.
2. Menjadi pertimbangan dalam pengaplikasian *stainless steel* 316 saat dioperasikan pada temperatur tinggi
3. Menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja Tahan Karat (*Stainless Steel*)

Stainless steel adalah paduan besi (Fe) dengan penambahan kromium (Cr) berkisar antara 10 sampai 20% sebagai unsur paduan utama yang memberikan sifat tahan korosi dengan adanya proteksi terhadap oksidasi permukaan. Tingkat ketahanan korosi dari baja tahan karat diketahui mencapai 200 kali lebih tinggi dibandingkan dengan baja karbon pada umumnya. Unsur paduan lain seperti Nikel (Ni), Molibdenum (Mo), dan Titanium (Ti) yang ditambahkan pada baja tahan karat bertujuan untuk memperoleh karakteristik tertentu dimana unsur-unsur tambahan tersebut nantinya akan mempengaruhi perubahan mikrostruktur, sifat mekanik dan sifat tahan korosi (Corradi et al., 2018).

Baja tahan karat biasanya diaplikasikan pada industri konsumen, industri migas, industri proses kimia, dan industri makanan. Jenis baja tahan karat yang paling sering digunakan adalah baja tahan karat austenitik yang mengandung 18wt%Cr dan 8wt%Ni yang mencakup 50% dari total produksi baja tahan karat dalam lingkup global. Terdapat berbagai macam bentuk geometris dari baja tahan karat yang diperoleh dari hasil fabrikasi antara lain adalah *hot* atau *cold rolled coil, rods, bars, wires, tubes, ingot, lempengan, bloom, billet* dan sebagainya (Outokumpu, 2013). Permintaan baja tahan karat di dunia terus mengalami peningkatan secara signifikan dari tahun ke tahun karena memiliki berbagai kombinasi sifat unggul jika dibandingkan dengan baja jenis lain di beragam aplikasi. Karakteristik baja tahan karat tersebut mencakup kemampuannya untuk tahan terhadap korosi di berbagai jenis lingkungan, sifat mekanik yang baik di rentang temperatur yang sangat luas, dan ketahanannya terhadap oksidasi dan terdeformasi pada temperatur tinggi (Cobb, 1999).

Kandungan unsur paduan pada baja tahan karat memberikan sifat-sifat khusus yang berbeda-beda. Berikut adalah beberapa unsur yang terdapat pada baja tahan karat dan pengaruhnya terhadap karakteristik dari baja tahan karat yang dihasilkan (Outokumpu, 2013).

1. Kromium (Cr)

Kromium merupakan unsur yang membuat baja tahan karat memiliki kemampuan tahan korosi dimana dan akan meningkat seiring dengan banyaknya jumlah kromium yang terkandung di dalam baja tersebut. Kromium juga meningkatkan sifat tahan oksidasi temperatur tinggi dan berperan dalam pembentukan mikrostruktur ferritik.

2. Nikel (Ni)

Nikel mendorong terbentuknya mikrostruktur austenit pada baja tahan karat. Kandungan nikel dapat meningkatkan keuletan dan ketangguhan dari baja tersebut serta mengurangi laju korosi pada kondisi aktif sehingga memberikan keuntungan pada baja tahan karat terhadap lingkungan asam.

3. Molibdenum (Mo)

Molibdenum dapat meningkatkan kemampuan untuk tahan terhadap serangan korosi merata ataupun korosi lokal serta meningkatkan sifat mekanik dan menjadi pembentuk mikrostruktur ferritik dari baja. Akan tetapi, molibdenum dapat meningkatkan kemungkinan pembentukan fasa sekunder pada baja tahan karat austenitik.

4. Tembaga (Cu)

Tembaga yang ditambahkan pada baja tahan karat meningkatkan kemampuan *machineability* dan *formability*, tahan korosi di kondisi asam, dan mendorong pembentukan mikrostruktur austenit.

5. Mangan (Mn)

Mangan memiliki kemampuan sebagai penstabil austenit pada temperatur rendah, dan penstabil ferit pada temperatur tinggi. Di samping itu, mangan juga dapat memperbaiki *hot*

ductility pada baja tahan karat. Mangan dapat meningkatkan kelarutan nitrogen untuk memperoleh kandungan nitrogen yang tinggi pada duplex dan *austenitic stainless steels*. Mangan sebagai pembentuk austenit juga dapat menggantikan sebagian kandungan nikel pada *stainless steel*.

6. Silikon (Si)

Silikon memberikan sifat tahan korosi di temperatur rendah ataupun tinggi serta meningkatkan kekuatan dan mendorong pembentukan mikrostruktur ferit.

7. Karbon (C)

Karbon merupakan pembentuk austenit yang kuat dan karbon dapat meningkatkan sifat mekanik pada baja tahan karat namun di sisi lain, karbon juga menjadi penyebab korosi batas butir akibat terjadinya pembentukan karbida pada baja tahan karat.

8. Nitrogen (N)

Nitrogen merupakan pembentuk austenit yang kuat dan dapat meningkatkan kekuatan mekanik serta sifat tahan korosi lokal pada baja tahan karat terutama saat dikombinasikan dengan molibdenum.

9. Titanium (Ti)

Titanium merupakan pembentuk ferit dan karbida yang kuat. Pada *austenitic stainless steels* dengan kadar karbon yang tinggi, titanium dapat ditambahkan untuk meningkatkan ketahanan baja terhadap korosi batas butir tetapi juga meningkatkan sifat mekanik pada temperatur tinggi.

10. Niobium (Nb)

Niobium merupakan pembentuk ferit dan karbida yang kuat. Pada *austenitic stainless steels*, niobium dapat ditambahkan untuk memperbaiki ketahanan baja terhadap korosi batas butir tetapi juga meningkatkan sifat mekanik pada temperatur tinggi.

11. Alumunium (Al)

Pada baja tahan karat, alumunium ditambahkan dengan tujuan untuk meningkatkan sifat tahan terhadap oksidasi jika ditambahkan pada jumlah yang besar.

12. Kobalt (Co)

Kobalt digunakan sebagai elemen paduan pada *martensitic stainless steels* dimana dapat meningkatkan kekerasan dan ketahanan temper, terutama pada temperatur tinggi

13. Vanadium (V)

Vanadium dapat membentuk karbida dan nitrida pada temperatur rendah, membentuk mikrostruktur feritik dan meningkatkan ketangguhan. Vanadium hanya digunakan pada *hardenable stainless steels*.

14. Tungsten (W)

Tungsten bertindak sebagai pengotor (*impurities*) pada sebagian besar *stainless steels* walaupun beberapa grade tertentu seperti *superduplex grade 4501* ditambahkan tungsten untuk memperbaiki ketahanan korosi pit.

15. Sulfur (S)

Sulfur ditambahkan pada *stainless steels* tertentu yaitu *free-machining grades* untuk meningkatkan *machineability*. Sulfur dalam jumlah yang sedikit dapat ditambahkan untuk mengurangi *work hardening* untuk memperbaiki *formability* serta meningkatkan *weldability* baja.

16. Cerium (Ce)

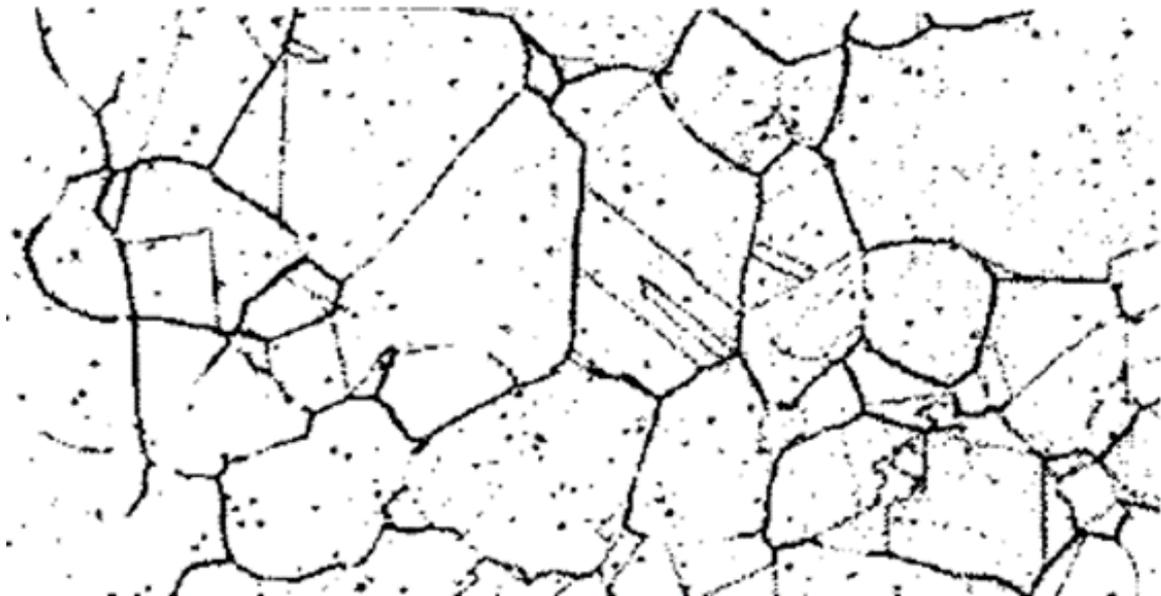
Cerium termasuk ke dalam logam tanah jarang yang ditambahkan dalam jumlah yang sedikit pada beberapa jenis baja tahan karat untuk meningkatkan sifat tahan temperatur tinggi.

Selain jenis baja tahan karat austenitik, terdapat tiga jenis lain dari baja tahan karat yang diklasifikasikan berdasarkan struktur kristalnya yaitu *ferritic stainless steel*, *martensitic*

stainless steel, precipitation hardening stainless steel, dan duplex stainless steel (Umartono, 2012)

2.1.1 *Austenitic Stainless Steel*

Baja tahan karat tipe austenitik mengandung kromium antara 16-28 wt% dan beberapa unsur penstabil austenit seperti nikel, mangan, dan karbon agar terbentuk mikrostruktur austenit pada temperatur kamar. Baja tahan karat austenit dianggap sebagai paduan terner Fe-Cr-Ni. Jenis baja tahan karat ini adalah yang paling sering digunakan karena sifatnya yang tahan korosi, mudah dibentuk, dan mudah dilakukan pengelasan. Baja tahan karat ini memiliki struktur kristal FCC (*Face-Centered Cubic*) sehingga dapat menghasilkan beberapa karakteristik seperti keuletan dan ketangguhan yang tinggi, serta sifatnya yang tahan terhadap perubahan ketangguhan pada temperatur kriogenik. Di samping itu, strukturnya yang berupa FCC membuat baja ini tepat digunakan pada temperatur yang tinggi, khususnya diatas 550°C karena tidak mengalami penurunan kekuatan secepat struktur baja berbasis besi lainnya (Gharehbaghi, 2012).

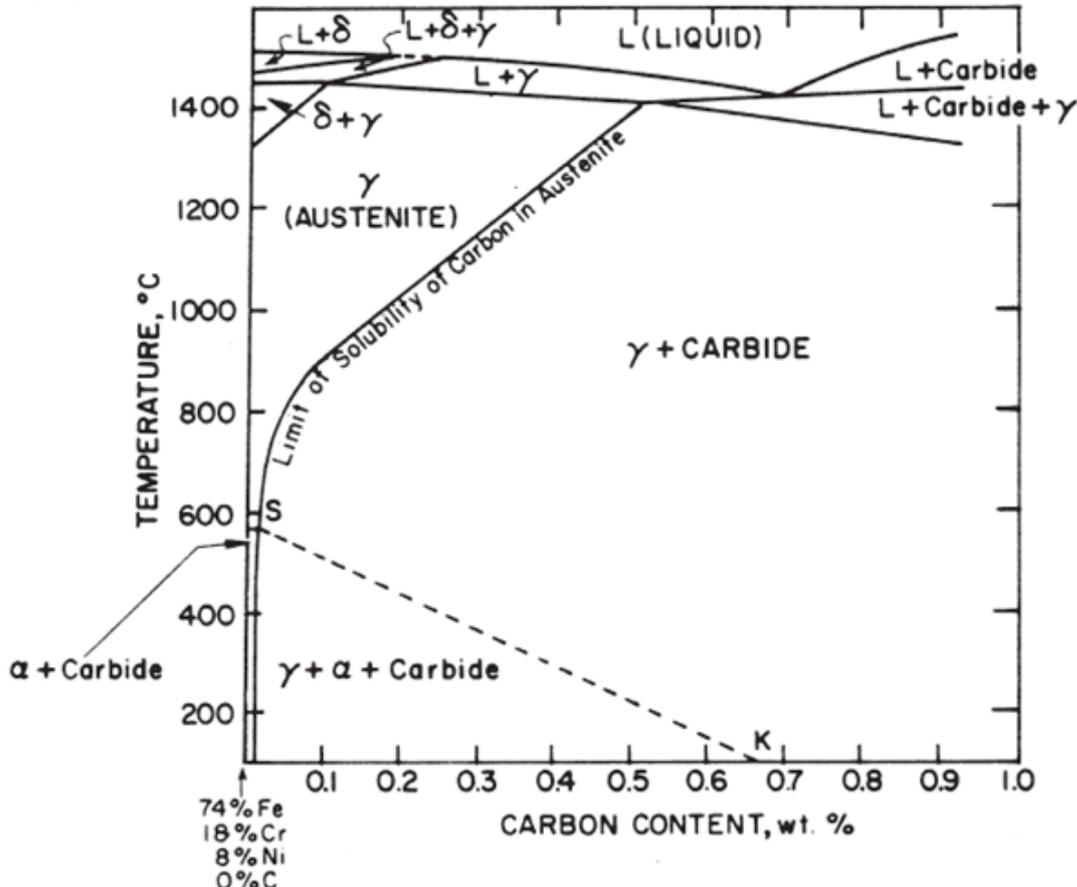


Gambar 2.1 Struktur Mikro Austenitic *Stainless Steel*(Cobb, 1999).

Struktur mikro baja tahan karat austenitik dapat dilihat pada Gambar 2.1. Baja tahan karat austenitik memiliki ketahanan korosi yang baik di berbagai lingkungan, zat kimia, ataupun gas industri. Selain itu, baja ini memiliki ketahanan pada temperatur tinggi mencapai 2000°F (1095°C). Resistansi baja paduan austenitik terhadap korosi atau oksidasi di lingkungan tertentu bergantung pada kandungan unsur paduannya. Kekuatan yang baik pada temperatur tinggi menjadikan baja ini digunakan secara luas untuk aplikasi temperatur tinggi. Di samping itu, pada temperatur yang relatif rendah, baja tahan karat ini juga sering dipilih karena tidak menjadi getas jika dibandingkan dengan baja jenis lain (Cobb, 1999). Film pasif oksida pada permukaan yang terbentuk pada *austenitic stainless steel* ini dipengaruhi oleh komposisi paduan, temperatur, rentang waktu pasivasi dan paparan lingkungan aplikasi. Ketebalan lapisan oksida pada permukaan baja ini dapat mencapai 1-4 nm (Fajardo et al., 2010).

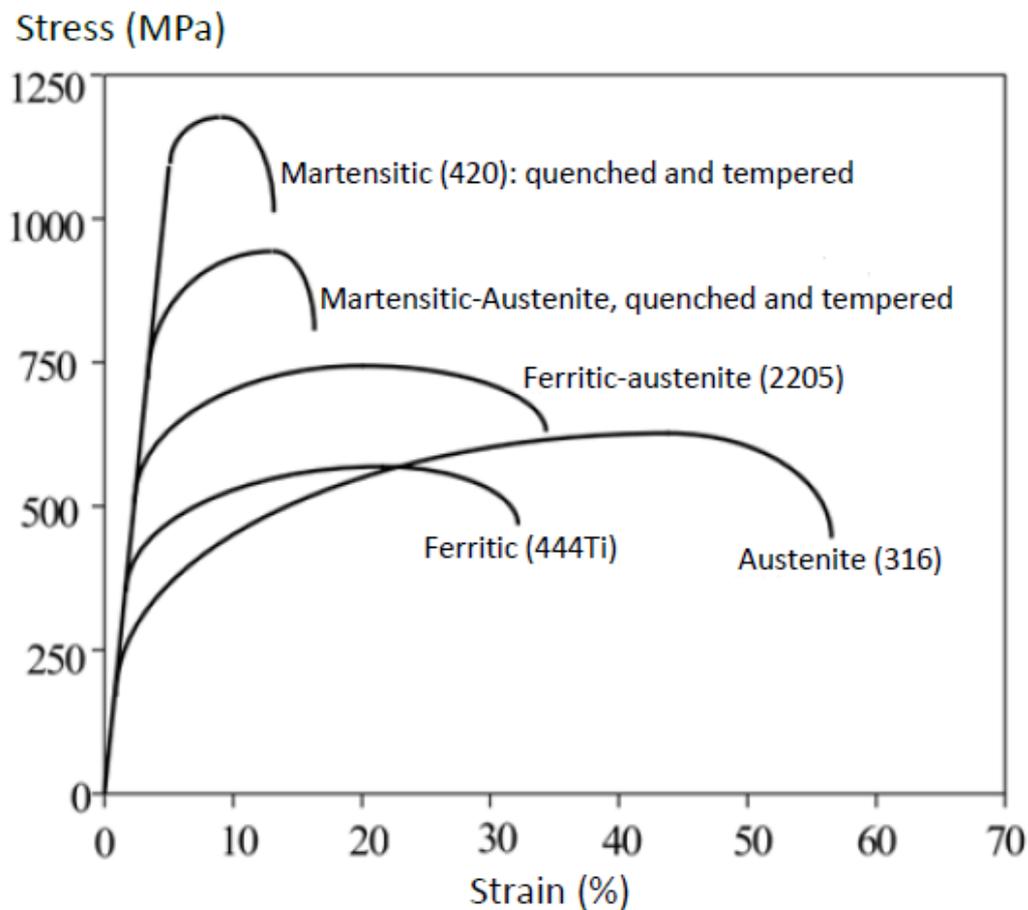
Baja tahan karat austenitik memiliki struktur austenit yang stabil pada temperatur kamar, non-magnetik, dan tidak dapat diberikan perlakuan panas dengan *quenching* dan *tempering*. Jenis perlakuan panas yang dapat diberikan pada baja tahan karat ini adalah dengan *stress-relieving, re-crystallisation annealing, bright annealing, stabilizing annealing, dan nitriding*. Pemanasan pada temperatur anil yang tepat merupakan hal yang tepat karena presipitasi karbida

dapat terjadi selama pemanasan. Pada baja ini, temperatur terjadinya presipitasi karbida berkisar antara 425°C sampai 900°C. Dengan begitu, baja ini perlu dipanaskan jauh di atas temperatur tersebut dan didinginkan secara cepat untuk memastikan karbida terlarut tetap berada pada larutan (Hawkins, 1989). Gambar 2.2 berikut merupakan diagram fasa dari *austenitic stainless steel*.



Gambar 2.2 Diagram Fasa Pseudobinary Paduan Fe-18%Cr-8%Ni terhadap Variasi Kandungan Karbon (Sinha, 2003).

Baja tahan karat austenitik memiliki keuletan dan ketangguhan yang baik pada temperatur rendah sehingga cocok digunakan pada aplikasi kriogenik. Di samping itu, pada temperatur rendah, baja ini juga mengalami peningkatan kekuatan tarik. Pada temperatur yang tinggi, *Ultimate Tensile Strength (UTS)* dan *Yield Strength* mengalami penurunan. *Yield strength* yang rendah pada baja tahan karat dapat diatasi dengan perlakuan termodinamik seperti pengerasan dengan hidrogen dan *precipitation hardening*. *Weldability* dari baja ini sangat baik dimana pada hasil lasan tidak terjadi perubahan ke martensit saat pendinginan udara sehingga memiliki sifat mekanik seperti kondisi awal (Khatak & Raj, 2002). Sifat mekanik dari baja tahan karat bergantung dari jenis seri dan bentuk produknya (*sheet* tipis, plat tebal, *billet*, ataupun bar). Pada baja tahan karat austenitik, kekuatan yield nya berkisar antara 30000 atau 35000 psi sampai 90000 atau 100000 psi pada saat mencapai *ultimate strength* setelah total elongasi 40 - 60% (Schweitzer, 2003). Kurva tegangan-regangan baja tahan karat austenitik dapat dilihat pada Gambar 2.3 sebagai berikut.



Gambar 2.3 Kurva Tegangan-Regangan Baja Tahan Karat (Mukahiwa, 2016)

2.1.2 *Stainless Steel 316*

Baja tahan karat AISI 316 merupakan salah satu jenis baja tahan karat austenitik yang banyak digunakan dalam trim eksterior kelautan, perpipaan pada industri dan material tabung pemanas dan dapat menjadi material reaktor *fast-breed* komersil. Pada aplikasinya di bidang teknik, baja tahan karat austenitik 316 menunjukkan sifat tahan korosi batas butir yang baik terhadap berbagai zat kimia, larutan garam, dan asam serta kandungan molibdenumnya dapat meningkatkan kemampuannya untuk digunakan di lingkungan air laut (Sergio et al., 2014). Komposisi unsur *Stainless Steel 316* dapat dilihat pada Tabel 2.1 sebagai berikut

Tabel 2.1 Komposisi Unsur *Stainless Steel 316* (American Society for Testing and Materials, 2004)

Komposisi <i>Stainless Steel 316</i> (wt%)								
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N
0,08	2,0	0,045	0,03	0,75	16,0- 18,0	10,0- 14,0	2,0-3,0	0,10

Sifat mekanik dari *stainless steel 316* berdasarkan standar spesifikasi ASTM A240 dapat dilihat pada Tabel 2.2 sebagai berikut

Tabel 2.2 Sifat Mekanik *Stainless Steel* 316 (American Society for Testing and Materials, 2004)

Sifat Mekanik	SS 316
Kekuatan Tarik minimum	515 MPa
<i>Yield Strength</i> minimum	205 Mpa
Elongasi 2"	40%
Kekerasan Brinell maksimum	217 HBW
Kekerasan Rockwell	95 HRB

2.2 Sensitasi pada *Austenitic Stainless Steel*

Sensitisasi merupakan proses nukleasi, pengendapan, dan penipisan kromium karbida pada/sepanjang batas butir. Pembentukan kromium karbida menyebabkan penipisan krom pada/sepanjang batas butir, yang dapat memicu korosi sumuran, korosi batas butir, dan retak *stress corrosion cracking* pada batas butir (Srinivasan, 2021). Sensitisasi mengacu pada kerusakan ketahanan korosi karena penipisan krom oleh pembentukan, pertumbuhan, dan pengendapan partikel karbida kaya kromium di batas butir di mana baja terpapar temperatur sekitar 450°C hingga 850°C. Biasanya, kromium karbida berupa $M_{23}C_6$ yang diperkaya kromium, di mana M mewakili kromium (Cr) dan sejumlah kecil Fe. Dalam kisaran temperatur sensitisasi, atom karbon berdifusi secara cepat menuju batas butir, dimana selanjutnya akan bergabung dengan krom untuk membentuk kromium karbida. Karena pengendapan kromium karbida pada batas butir, daerah yang berdekatan dengan batas butir mengalami penipisan kromium. Daerah tersebut akan menjadi bersifat anodik terhadap butiran lainnya sehingga lebih rentan terkena serangan pada media korosif, menghasilkan korosi antarbutir (Gupta, R. K., et al, 2017).

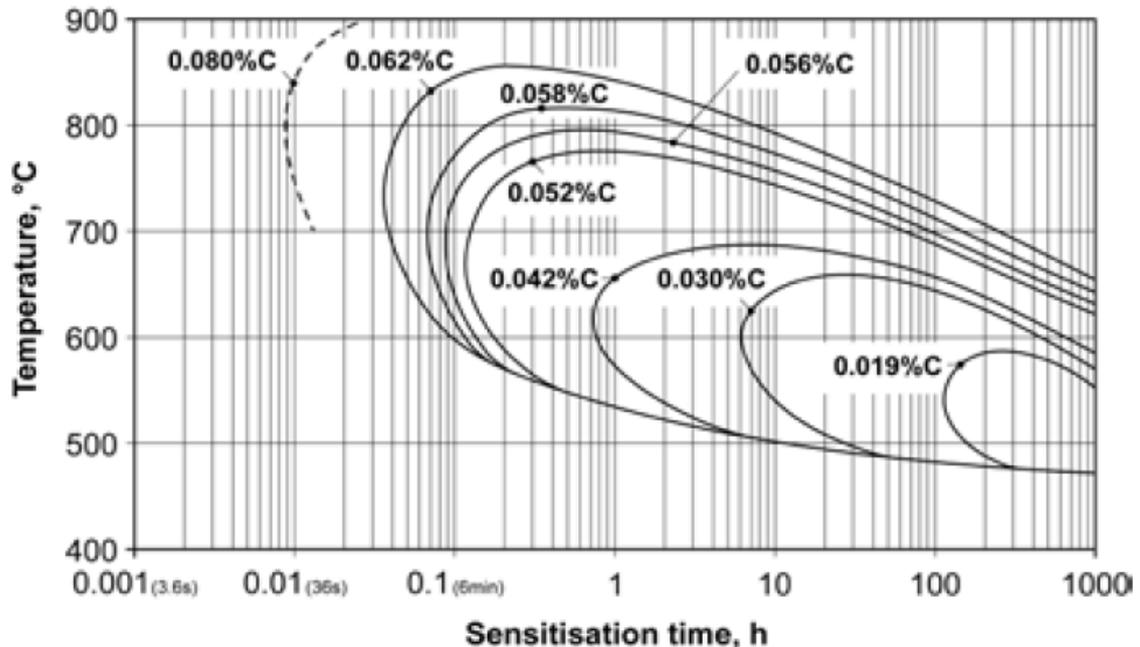
Proses presipitasi pada *austenitic stainless steels* didasarkan pada berkurangnya batas kelarutan unsur paduan pada austenit pada saat didinginkan secara lambat. Presipitasi dapat menjadi faktor dominan terhadap sifat mekanik pada temperatur tinggi. Saat paduan di – *aged* pada saat digunakan, unsur lewat jenuh berdifusi dan bereaksi membentuk endapan. Karbon dan nitrogen adalah elemen interstisial dan terdapat di hampir semua grade *austenitic stainless steels*. Karbon dan nitrogen memiliki afinitas yang tinggi sebagai unsur pembentuk karbida/nitrida seperti juga Ti, Nb, V, dan Cr. Presipitat karbida $Cr_{23}C_6$ merupakan yang paling sering ditemukan di *austenitic stainless steels*. Karbon memiliki tingkat kejenuhan yang rendah pada austenit dan afinitas yang tinggi terhadap kromium. Beberapa elemen paduan dapat mempengaruhi presipitasi karbida $M_{23}C_6$. Unsur-unsur seperti molibdenum dan nikel dapat meningkatkan presipitasi karbida tersebut dengan mengurangi kelarutan karbon dalam austenit, tidak seperti nitrogen, yang meningkatkan kelarutan karbon dan dengan itu mengurangi presipitasi $M_{23}C_6$ (Gharehbaghi, 2012).

Terbentuknya *chromium depleted zone* pada fenomena sensitisasi merupakan akibat dari nukleasi dan pertumbuhan karbida kromium di batas butir dan adanya perbedaan difusifitas dari karbon dan kromium di matriks austenit. Hal ini terjadi pada kondisi temperatur dan perlakuan dimana karbida kromium stabil secara termodinamik dan difusifitas kromium telah cukup untuk terjadinya nukleasi dan pertumbuhan karbida kromium. Kandungan kromium pada karbida kromium dapat mencapai 95wt% dan pada *bulk* dapat mencapai 18%. Selama mengalami fenomena sensitasi, difusi kromium pada matriks menuju daerah yang mengalami pengurangan kromium akibat pembentukan karbida kromium lebih lambat jika dibandingkan dengan pembentukan karbida kromium itu sendiri. Proses ini akan berlangsung secara terus menerus sampai kandungan kromium pada material turun dibawah 12wt% yang menyebabkan material

ini dapat terkorosi di permukaannya(Kolli, 2020). Reaksi pembentukan dari karbida kromium adalah sebagai berikut



Konsep mengenai fenomena sensitasi pada baja tahan karat tipe austenitik dapat direpresentasikan dengan menggunakan diagram isothermal yang menunjukkan temperatur minimum presipitasi karbida sebagai berikut



Gambar 2.4 C Curve Yang Menunjukkan Presipitasi Kromium Karbida Terhadap Variasi Kandungan Karbon *Austenitic Stainless Steel* Dengan 18%Cr Dan 8%Ni(Boniardi et al., 2014).

Dari diagram Gambar 2.4 tersebut dapat diketahui bahwa waktu yang dibutuhkan dalam fenomena sensitasi bergantung pada paparan temperatur dan jumlah kandungan karbon pada paduan. Selain itu, kurva tersebut juga menunjukkan bahwa pengurangan kandungan karbon pada paduan merupakan salah satu solusi terhadap fenomena sensitasi. Sebagai hasilnya, waktu yang dibutuhkan pada proses inkubasi dan pembentukan karbida kromium menjadi jauh lebih lama(Boniardi et al., 2014).

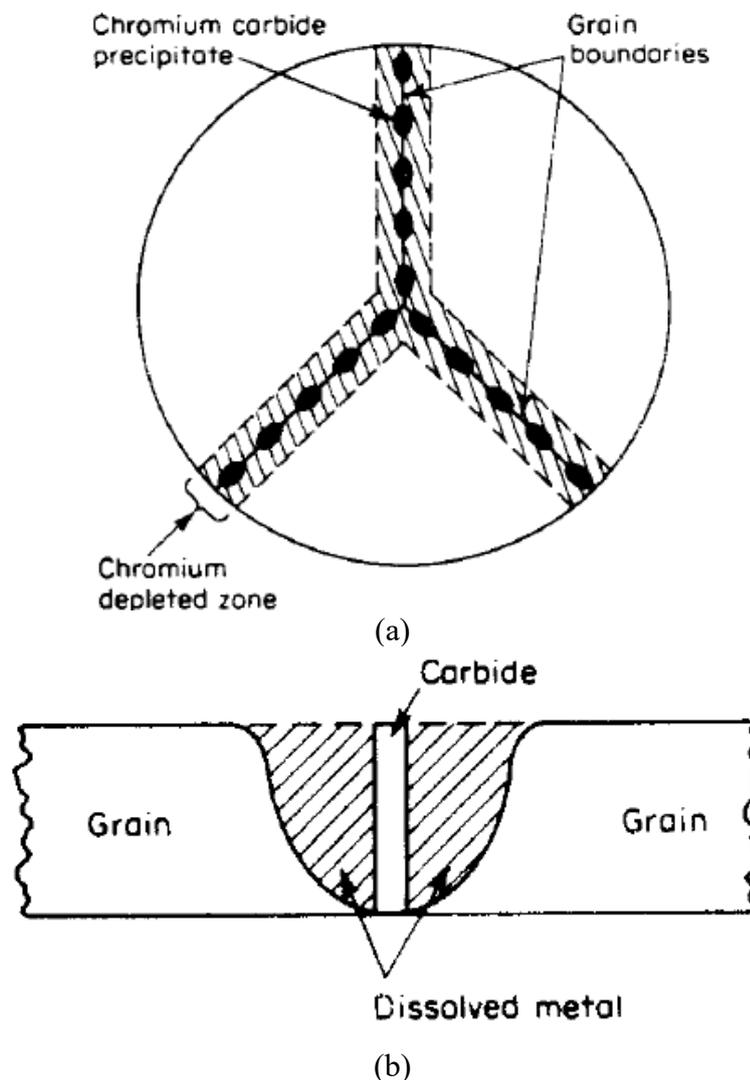
2.3 Korosi

Korosi merupakan hasil interaksi antara logam dengan lingkungannya yang berujung pada kerusakan material tersebut secara bertahap. Besar kecilnya korosi bergantung pada tingkat sensitivitas suatu logam atau paduan terhadap lingkungan tertentu. Terdapat berbagai kerugian yang dapat ditimbulkan dari terjadinya korosi yaitu kerugian secara ekonomi, terkurasnya sumber daya, dan adanya kegagalan yang dialami oleh komponen ataupun perlengkapan. Korosi memberikan pengaruh terhadap kegunaan logam yang mencakup impermeabilitas, kekuatan mekanik, keutuhan dimensi, sifat fisis, kontaminasi, dan kerusakan komponen (Ahmad, 2006).

2.3.1 Korosi Batas Butir

Korosi batas butir termasuk ke dalam serangan korosi lokal di berbagai sistem paduan pada saat laju korosi di daerah batas butir lebih besar daripada laju korosi di dalam butirnya. Korosi batas butir adalah serangan korosi yang sangat khas terjadi pada baja tahan karat

austenitik. Korosi lokal ini termasuk serangan yang cukup berbahaya karena serangan pada permukaan material ini terkadang diabaikan walaupun fenomena ini dapat menyebabkan terlepasnya butir dan berujung pada menurunnya sifat mekanik dari material. Kerentanan baja tahan karat austenitik terhadap korosi batas butir berkaitan erat dengan eksposisinya pada kisaran temperatur 500 – 800 °C atau yang disebut juga dengan temperatur kritis dan dengan pendinginan lambat di udara yang mendorong adanya pengendapan $M_{23}C_6$ kaya kromium karbida pada batas butir. Pengendapan kromium karbida mengkonsumsi elemen paduan utama yaitu kromium di daerah sepanjang batas butir dan hal ini menyebabkan adanya zona yang anodik terhadap butir lain yang tidak terpengaruh. Jika kandungan krom di dekat batas butir turun di bawah batas kepasifan (11,5 wt. %), baja menjadi peka dan rentan terhadap korosi batas butir di lingkungan agresif (Zatkalíková et al., 2020). Presipitasi karbida kromium pada *austenitic stainless steel* dapat dilihat pada Gambar 2.5 sebagai berikut.

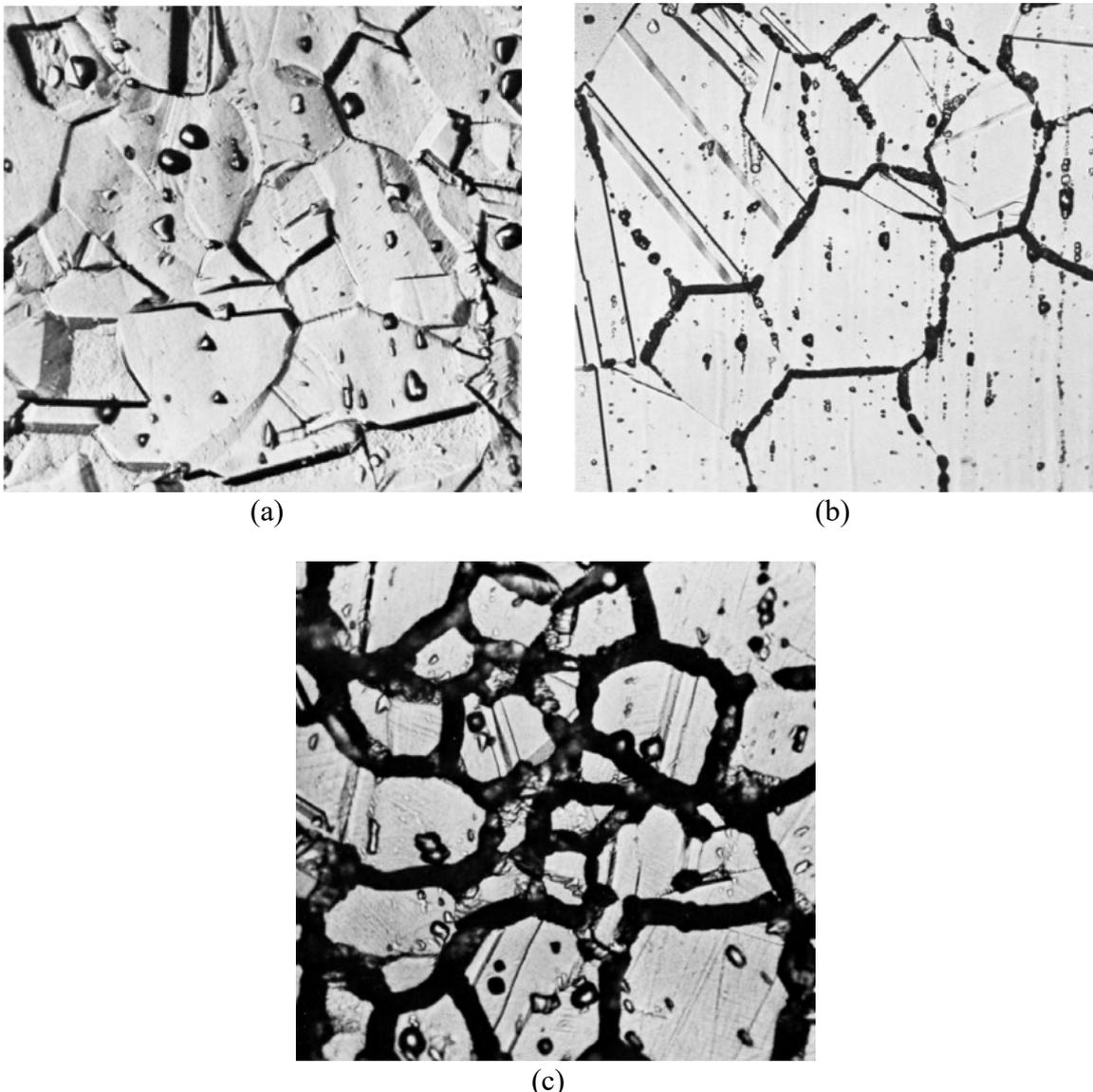


Gambar 2.5 (a) Presipitasi Karbida pada *Austenitic Stainless Steel* yang Tersensitasi, (B) Potongan Melintang Korosi Batas Butir Pada Baja (Fontana, 1987).

Korosi batas butir bergantung pada besarnya sensitasi dan tingkat keagresifan lingkungan operasi materialnya. Salah satu lingkungan spesifik yang berkaitan erat dengan serangan korosi batas butir ini adalah lingkungan asam yang terdiri dari zat pengoksidasi seperti asam fosfat dan asam sulfat yang mengandung ion besi ataupun tembaga, asam nitrat, dan asam organik

panas seperti asam asetat dan asam format. Air laut ataupun air yang memiliki kandungan klorida yang tinggi dapat menyebabkan timbulnya pit yang parah pada bagian yang tersensitasi. Di samping itu, sensitasi juga dapat terjadi saat logam digunakan pada aplikasi yang menggunakan pemanasan di kisaran temperatur kritis dalam waktu yang lama. Sensitasi dapat diatasi dengan penambahan unsur paduan titanium dan niobium. Penambahan kedua unsur tersebut sebanyak lima atau sepuluh kali kandungan karbon dapat mendorong karbon untuk terpresipitasi sebagai karbida titanium atau karbida niobium yang mana presipitasi karbida tersebut tidak akan mengurangi kandungan kromium pada batas butir (Schweitzer, 2010).

Berdasarkan ASTM A262, terdapat tiga jenis mikrostruktur yang dihasilkan pada saat proses etsa untuk menguji tingkat kerentanan baja tahan karat austenitik terhadap korosi batas butir yaitu sebagai berikut (ASTM A262, 2021)



Gambar 2.6 Klasifikasi Mikrostruktur Tersensitasi Berdasarkan ASTM A262: (A) *Step*, (B) *Dual*, (C) *Ditch* dengan Perbesaran 500x (ASTM A262, 2021)

Berdasarkan Gambar 2.6 di atas, diketahui bahwa pada struktur *step*, tidak ditemukan adanya *ditch* pada batas butir. Pada struktur *dual*, terdapat beberapa struktur *step* dan *ditch* pada batas butir namun tidak ada satupun butir yang dikelilingi seutuhnya oleh *ditch*. Pada struktur

ditch, terdapat minimal satu butir yang dikelilingi secara utuh oleh *ditch* (ASTM A262). Menurut studi Bansod tahun 2016, seiring dengan penambahan lama waktu *thermal-ageing*, mikrostruktur baja tahan karat austenitik dapat mengalami perubahan dari *step* ke *dual* dan dari *dual* ke *ditch*. Di samping itu, juga terdapat peningkatan area zona yang mengalami penipisan kromium sepanjang matriks butir dengan meningkatnya lama waktu *thermal-ageing* (Bansod et al., 2016).

2.4 Pengujian

Pada penelitian ini, beberapa pengujian yang dilakukan adalah diantaranya pengujian komposisi kimia menggunakan *Optical Emission Spectrometry (OES)*, pengujian struktur mikro menggunakan metalografi, dan pengujian sifat mekanik material dengan uji tarik dan uji kekerasan.

2.4.1 Pengujian Komposisi Kimia

Salah satu alat yang dapat digunakan untuk melakukan pengujian komposisi kimia adalah OES (*Optical Emission Spectroscopy*). *Optical Emission Spectrometry (OES)* merupakan salah satu alat karakterisasi yang banyak digunakan untuk mendeteksi logam dan beberapa material nonlogam khususnya di tingkat konstituen. Spektrometer emisi terdiri atas sampel, *counter electrode*, sarana eksitasi, prisma atau *grating monochromator*, sistem deteksi *photomultiplier*, mikroprosesor atau komputer untuk pemrosesan data, koreksi interferensi, dan tampilan data. Prinsip kerja dari alat ini adalah dengan adanya pancaran radiasi elektromagnetik di spektrum tampak dan ultraviolet dari atom dan ion-ion setelah terjadinya eksitasi elektron saat diberikan energi listrik. Berikut adalah skema kerja dari spektrometer emisi. Energi listrik diberikan diantara sepasang elektroda dimana salah satunya berisi sampel uji. Radiasi yang dipancarkan akan disebarkan oleh prisma atau monokromator kisi untuk selanjutnya dideteksi oleh *photomultiplier* (Fifield F.W. & Kealey, D, 2000).

2.4.2 Pengujian Metalografi

Metalografi merupakan studi struktur mikroskopis dari suatu logam atau paduan dengan menggunakan metalograf optik, mikroskop elektron, atau peralatan analisis permukaan material lainnya. Dengan menganalisis mikrostruktur, kegunaan dan keandalan suatu material dapat diidentifikasi. Oleh karena itu, pengujian metalografi banyak digunakan pada inovasi material, inspeksi, produksi, manufaktur, dan analisa kegagalan. Jenis-jenis analisis yang dapat dilakukan dari pengujian mikrostruktur atau metalografi mencakup ukuran butir, porositas, fasa, pertumbuhan dendrit, retak, cacat, korosi inklusi dan sebagainya. Pada logam, ukuran butir dapat dianggap sebagai analisa metalografis yang paling signifikan karena berkaitan erat dengan sifat mekanik dari suatu material (Zipperian, 2011).

Terdapat beberapa langkah preparasi spesimen yang dibutuhkan sebelum melakukan uji metalografi diantaranya adalah sebagai berikut (Scott & Schwab, n.d., 2019)

1. *Sampling*

Tahap awal dari preparasi spesimen yang akan diuji secara metalografis adalah dengan pengambilan sampel berupa sebagian kecil dari material uji dengan dimensi tertentu yang dapat mewakili keseluruhan spesimen.

2. *Mounting*

Untuk melakukan preparasi pada spesimen yang berukuran kecil, perlu dilakukan proses *mounting* agar lebih mudah di-handle yaitu dengan menggunakan bahan *mounting* seperti wax atau paduan dengan titik lebur yang rendah.

3. *Grinding dan Polishing*

Proses *grinding* dilakukan dengan tujuan untuk menghilangkan kekasaran permukaan spesimen menggunakan material abrasif halus secara progresif. Setelah dilakukan *grinding*, spesimen sebaiknya dibersihkan untuk menghilangkan sisa-sisa proses *grinding* untuk

mencegah adanya kontaminasi. Proses polishing dilakukan setelah grinding untuk memperhalus spesimen menggunakan polishing agent. Setelah di-polish, permukaan spesimen harus dibersihkan dengan hati-hati menggunakan alkohol untuk kemudian dikeringkan.

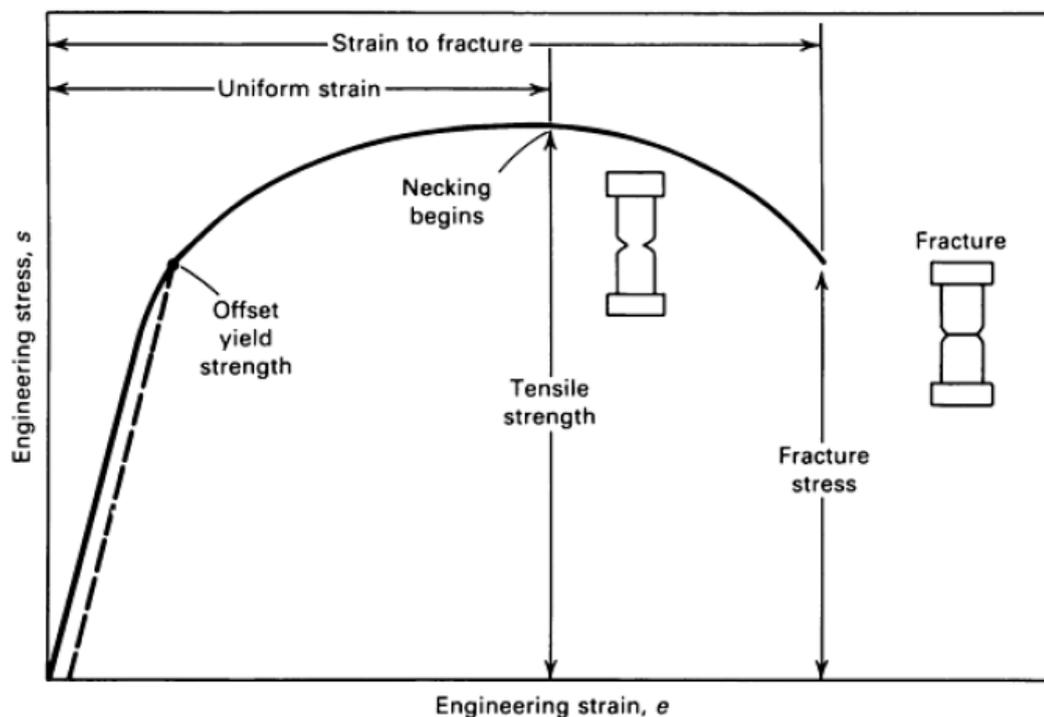
4. Etching

Proses *etching* dilakukan dengan memberikan serangan korosif selektif pada permukaan spesimen dengan tujuan untuk mengekspos secara kontras mikrostruktur dari spesimen. Proses etching menggunakan larutan kimia tertentu (larutan etsa) yang nantinya akan bereaksi terhadap fasa-fasa spesifik pada mikrostruktur spesimen.

2.4.3 Pengujian Tarik

Sifat mekanik dari suatu logam biasanya dapat ditentukan dari pengujian tarik (*tensile*). Uji Tarik merupakan uji mekanis dimana suatu spesimen diberikan beban tertentu kemudian dilakukan pengukuran terhadap perpanjangan spesimen tersebut akibat pembebanan (Zorgani, 2010). Pada pengujian ini, logam dalam bentuk batang lurus ataupun strip dicengkram di kedua ujungnya yang biasanya diperbesar ukurannya menjadi seperti berbentuk *shoulders* untuk memperkuat kemudian ditarik secara axial sambil ditingkatkan kekuatan tariknya. Bagian *shoulders* tersebut akan melancip secara perlahan dari cengkraman menuju ke bagian tengah dari batang uji yang disebut dengan *gauge length* dimana elongasi tarik diukur dengan menggunakan *extensometer* ataupun pengukur regangan. Pengukuran dilakukan terhadap kenaikan elongasi pada *gauge length* yang dihasilkan dari penambahan beban tarik total secara berturut-turut (Cottrell, 1995).

Setelah dilakukan pengujian tarik, hasil yang diperoleh adalah berupa kurva tegangan-regangan sebagai berikut.



Gambar 2.7 Kurva Tegangan-Regangan Hasil Uji Tarik (ASM International, 1999)

Kurva tegangan-regangan seperti pada Gambar 2.7 terbentuk berdasarkan pengukuran elongasi akibat beban yang diberikan pada spesimen uji. Bentuk dan ukuran besarnya kurva tegangan regangan pada logam bergantung pada komposisi, perlakuan panas, deformasi plastis, laju regangan, temperatur, kondisi tegangan pada saat pengujian dilakukan. Parameter-

parameter yang digunakan untuk menjelaskan kurva tegangan-regangan adalah kekuatan tarik dan kekuatan *yield* sebagai indikasi kekuatan serta persentase elongasi dan reduksi luas sebagai indikasi keuletan (ASM International, 1999).

Pada material yang ulet (sebagian besar baja), hubungan antara tegangan dan regangan adalah linier sampai mencapai titik *yield*. Garis linier dari kurva adalah deformasi elastis (*Modulus Young*). Setelah titik *yield*, kurva biasanya sedikit menurun pada saat deformasi berlanjut serta tegangan meningkat karena adanya *work hardening* hingga mencapai *ultimate strength (UTS)*. Sampai titik ini, luas penampang benda uji mengecil secara merata. Setelah titik ini, luas penampang pada tengah spesimen akan meruncing (*Necking*). Akhirnya, bagian *neck* akan menjadi tidak stabil dan spesimen akan patah. Pada material yang getas, tidak terdapat titik *yield* dan tidak mengalami strain harden sehingga nantinya *ultimate strength* dan *breaking strength* berada di titik yang sama (tanpa *necking*). Biasanya material getas tidak mengalami deformasi plastis melainkan akan patah pada saat deformasinya elastis. Kurva tegangan-regangan dari material getas biasanya akan linear (Zorgani, 2010).

Pada uji tarik terdapat beberapa istilah yang perlu dipertimbangkan yaitu sebagai berikut (Zorgani, 2010)

1. *Yield Strength*

adalah tegangan dimana regangan material berubah dari deformasi elastis menjadi deformasi elastis dan menyebabkan material tersebut terdeformasi secara permanen. Pada material getas, cukup sulit untuk menentukan titik *yield* sehingga *proof stress* dapat menjadi pertimbangan.

2. *Ultimate Tensile Strength (UTS)*

Merupakan tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh material uji ketika diberikan tegangan, tekanan, ataupun *shearing*. *Ultimate tensile strength* adalah titik tegangan maksimum pada kurva tegangan-regangan.

3. Penentuan tingkat keuletan

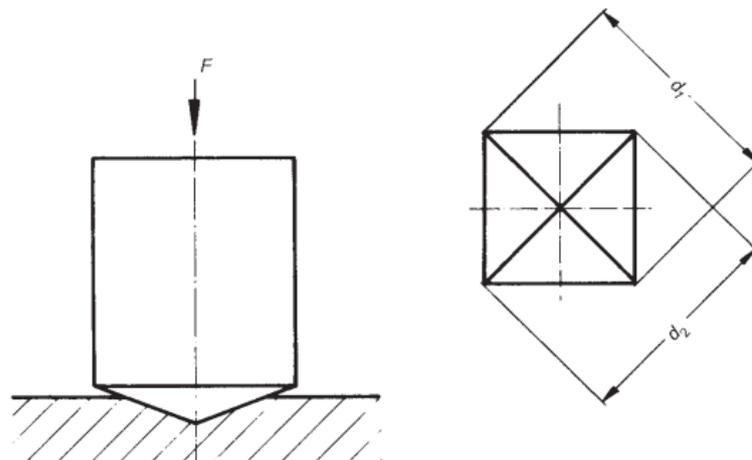
Keuletan material merupakan ukuran sejauh mana suatu material akan terdeformasi sebelum patah. Keuletan dapat menjadi indikasi seberapa jelas kerusakan berlebih yang terlihat pada suatu komponen sebelum komponen tersebut patah. Tingkat keuletan biasanya dapat diukur dengan melihat perubahan panjang dan pengurangan luas spesimen pada saat mengalami patah. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut

$$\text{Elongasi (\%)} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \dots \dots \dots (2.1)$$

2.4.4 Pengujian Kekerasan

Kekerasan dapat didefinisikan sebagai ketahanan suatu permukaan material terhadap abrasi. Pada pengujian ini, permukaan material ditusuk pada titik tertentu dengan beban yang terus ditingkatkan sampai pada permukaan material tersebut dapat dilihat adanya goresan yang terbentuk. Skala Moh digunakan untuk menentukan tingkat kekerasan dari suatu material dimana material disusun berdasarkan urutan tingkat kekerasan dengan tingkat kekerasan tertinggi adalah intan yang memiliki skala kekerasan bernilai 10 (Higgins, 1993)

Metode Vickers merupakan metode uji kekerasan yang cocok digunakan untuk semua logam. *Indentor* yang digunakan pada metode ini berupa intan yang berbentuk piramid (beralas persegi) dengan sudut antar muka berlawanan sebesar 136°. Gambar 2.8 berikut merupakan skema pengukuran kekerasan Vickers.



Gambar 2.8 Skema uji kekerasan vickers(International, 2011)

Besarnya nilai kekerasan Vickers merupakan hasil bagi beban uji (F) dan luas permukaan lekukan dari sisa indentasi (A). Berdasarkan gambar 2.8 di atas, dengan menggunakan sudut muka yang berlawanan sebesar 136° dan nilai d_1 dan d_2 indenter diperoleh rumus untuk menentukan nilai kekerasan yaitu sebagai berikut (ASM International, 2011).

$$HV = \frac{0,1891 F}{d^2} \dots\dots\dots(2.2)$$

2.5 Penelitian Sebelumnya

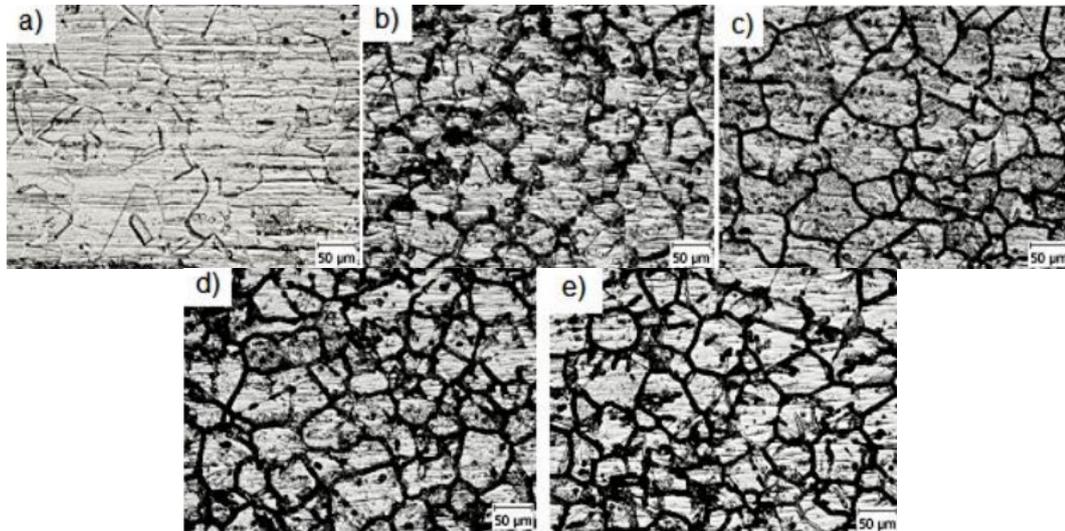
Adapun penelitian terdahulu terkait dengan pengaruh sensitisasi terhadap struktur mikro dan sifat mekanik *stainless steel* disajikan pada Tabel 2.3. Sedangkan dokumentasi hasil dari beberapa penelitian disajikan pada Gambar 2.9

Tabel 2.3 Penelitian Sebelumnya

Material	Perlakuan	Hasil	Referensi
SS316	Pengelasan dengan plat SA508 Gr.1a. Perlakuan panas pada temperatur 600°C , 650°C dan 700°C dengan waktu tahan selama 10 jam	Terjadi penurunan <i>yield strength</i> dan persentase elongasi seiring dengan meningkatnya temperatur perlakuan panas sementara pada analisa <i>ultimate tensile strength</i> (UTS), spesimen as-welded memiliki (UTS) yang lebih kecil jika dibandingkan dengan spesimen yang diberikan perlakuan panas pada 600°C . Penurunan UTS kemudian dilanjutkan pada spesimen dengan perlakuan panas pada 650°C dan 700°C . Menurut uji metalografi diperoleh bahwa pada setiap daerah HAZ terbentuk struktur <i>dual</i>	(Kim et al., 2019)
SS316	Pemanasan spesimen sampai 750°C dan diberikan waktu tahan dengan interval waktu 30	Spesimen yang tidak diberikan perlakuan memiliki nilai kekerasan sebesar 205 HV dan kekuatan tarik sebesar 611 (MPa). Setelah diberikan perlakuan panas yang dapat menyebabkan terjadinya sensitasi	(Agbokwor & Neife, 2019)

	menit, 60 menit, 180 menit, 300 menit, dan 600 menit dilanjutkan pendinginan secara cepat dengan air	pada spesimen, terjadi penurunan nilai kekerasan dan kekuatan tarik seiring dengan lamanya waktu tahan dimana spesimen yang diberikan waktu tahan 600 menit mengalami penurunan kekerasan dan kekuatan tarik secara berturut-turut menjadi sebesar 172 HV dan 531 MPa	
SS316	<i>Solution annealing</i> pada 1100°C selama 1 jam lalu didinginkan dengan air. Kemudian diberikan perlakuan panas pada 650°C dan 700°C dengan waktu tahan 15, 30, 60, 300, dan 600 menit.	Spesimen dengan waktu tahan 15 menit terbentuk struktur <i>step</i> dan pada spesimen dengan waktu tahan 30 menit terbentuk struktur dual. Pada spesimen dengan waktu tahan 60 menit, 300 menit dan 600 menit, sensitisasi ditandai dengan adanya presipitasi yang lebih intensif pada batas butir	(Kocsisová et al., 2014)
SS316	Perlakuan panas pada 450, 675, dan 800 °C selama 1 jam serta pengelasan GTAW	Spesimen yang mengalami perlakuan panas pada 675 °C dan 800°C memiliki kecenderungan lebih besar terhadap sensitisasi	(Kartaman A et al., 2020)
SS316	Di-anil di 1200°C selama 1,2,3 jam lalu di-sensitasi pada 700°C selama 24 jam	Pengendapan kromium karbida membentuk adanya daerah yang kekurangan krom dan mempengaruhi derajat sensitisasi dan ketahanan korosi sumuran SS 316	(Kiahosseini et al., 2018)
AISI SS316L	Pengujian pengelasan GTAW terhadap SS316L dengan temperatur 500-680 °C	Setelah pengelasan, mikrostruktur di daerah HAZ menunjukkan terjadinya penebalan karbida akibat terdifusinya kromium ke batas butir	(Nugroho, 2017)
SS316	Perlakuan panas pada 500-750 °C dengan variasi waktu 30 menit, 1 jam, 3 jam, 5 jam, dan 10 jam	Bertambahnya daerah kekurangan kromium seiring meningkatnya lama waktu sensitisasi	(Okpala et al., 2016)

AISI SS316L	Simulasi <i>Post Weld Heat Treatment</i> pada temperatur 600, 650, dan 700 °C	Ketahanan korosi yang berkurang pada fasa ferit akibat terbentuknya kromium karbida dan fasa metalik pada saat perlakuan panas menjadi penyebab meningkatnya derajat sensitasi	(Lee et al., 2014)
----------------	---	---	-----------------------



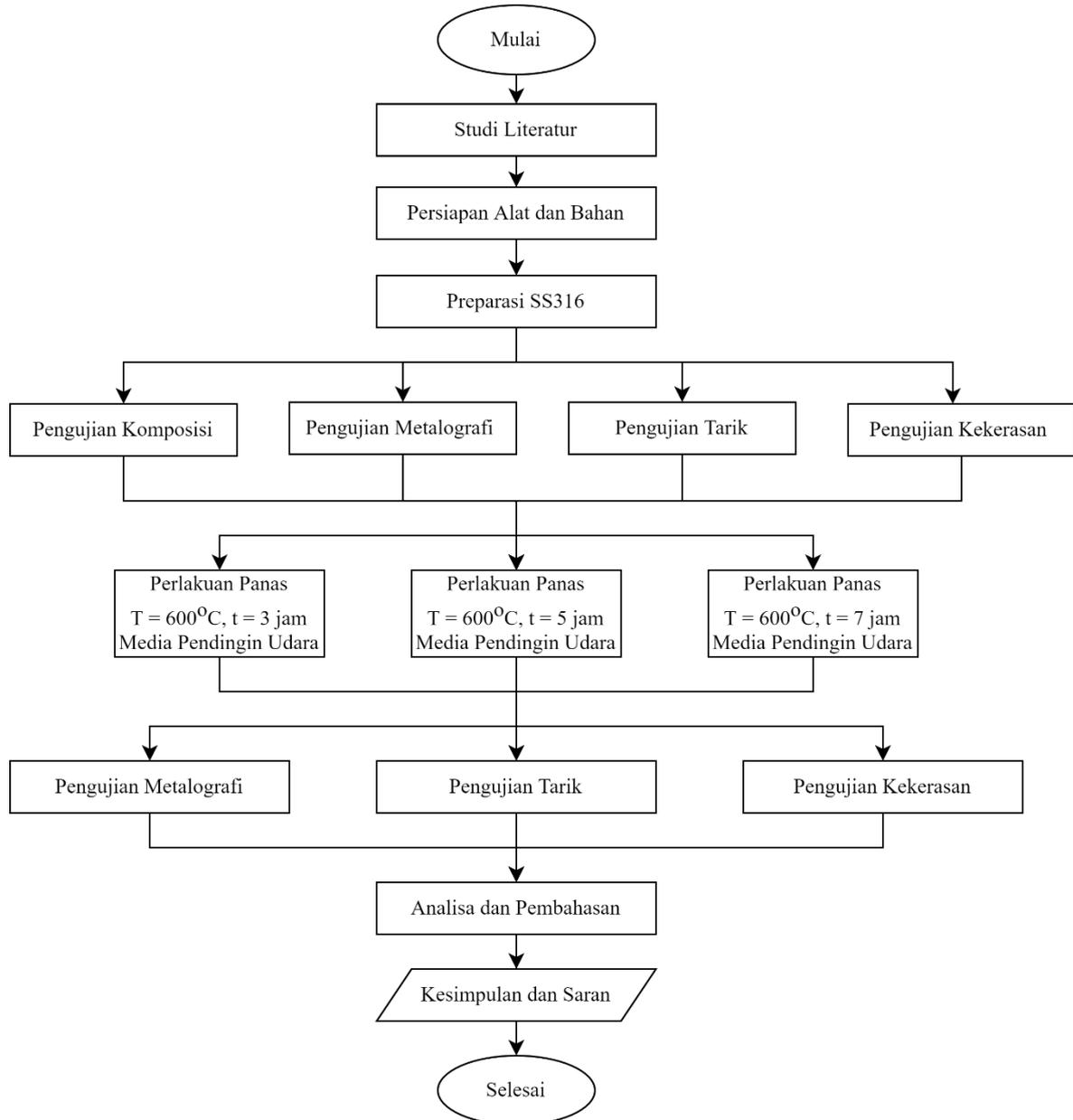
Gambar 2.9 Mikrostruktur Spesimen Tersensitasi pada Temperatur 700°C Dengan Interval Waktu (A) 15 Menit, (B) 30 Menit, (C) 60 Menit, (D) 300 Menit, (E) 600 Menit (Kocsisová et al., 2014).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 3.1 sebagai berikut



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut

1. *Stainless Steel type 316*
Stainless steel type 316 (SS316) pada penelitian ini digunakan sebagai spesimen uji.
2. *Asam Oksalat*

Asam oksalat ($H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$) digunakan sebagai larutan etsa pada pengujian metalografi. Penggunaan asam oksalat berfungsi untuk mengkorosi bagian batas butir dari spesimen

sehingga struktur mikro dari spesimen dapat terlihat dengan jelas.

3. *Aquades*

Aquades digunakan sebagai pelarut pada pembuatan larutan etsa untuk pengujian metalografi spesimen.

4. *Larutan Alkohol 95%*

Larutan alkohol 95% digunakan pada spesimen setelah proses etsa dilakukan untuk mencegah adanya kristalisasi asam oksalat pada permukaan spesimen uji.

5. Kertas Ampelas

Kertas ampelas pada penelitian ini digunakan pada preparasi spesimen untuk uji metalografi untuk meratakan dan menghaluskan permukaan spesimen *Stainless Steel* 316 setelah proses pemanasan.

6. Pasta Poles

Pasta poles digunakan untuk menghaluskan permukaan material spesimen *Stainless Steel* 316 hingga mengkilap dan dapat mencegah spesimen uji dari korosi.

3.3 Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Gerinda Tangan

Gerinda tangan digunakan untuk proses pemotongan pada saat preparasi spesimen

2. *Optical Emission Spectrometry* (OES)

Alat uji OES digunakan untuk menganalisis komposisi unsur yang terkandung pada *stainless steel* 316. Pengujian ini dilakukan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS) Surabaya

3. *Muffle Furnace*

Muffle furnace seperti pada Gambar 3.2 berikut digunakan untuk melakukan proses perlakuan panas dengan memanaskan spesimen sampai temperatur 600°C dengan variasi waktu sensitisasi 3, 5 dan 7 jam. Pada penelitian ini, *muffle furnace* yang digunakan terdapat di Laboratorium Korosi dan Kegagalan Material Departemen Teknik Material ITS



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

4. Mesin Uji Tarik

Mesin uji tarik pada Gambar 3.3 ini digunakan untuk melakukan uji tarik sehingga diketahui sifat mekanik dari *stainless steel* 316 dengan atau tanpa perlakuan panas berdasarkan kurva tegangan-regangan yang terbentuk. Pengujian tarik ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material ITS



Gambar 3.3 Mesin Uji Tarik (Dokumentasi Pribadi, 2022)

5. Alat Uji Kekerasan *Micro-Vickers*

Alat uji kekerasan WILSON 402MVD pada Gambar 3.4 ini digunakan untuk mengetahui tingkat kekerasan spesimen dengan atau yang tidak diberikan perlakuan panas. Pengujian kekerasan menggunakan metode Vickers dan dilakukan di Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS



Gambar 3.4 Alat Uji Kekerasan *Micro-Vickers* (Dokumentasi pribadi, 2022)

6. Mikroskop Optik

Mikroskop optik OLYMPUS BX-51M digunakan untuk menganalisis struktur mikro spesimen *stainless steel 316*. Pada penelitian ini digunakan mikroskop optik yang terdapat di Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS



Gambar 3.5 Mikroskop Optik OLYMPUS BX-51M (Dokumentasi pribadi, 2022)

7. Mesin *Grinding* dan *Polishing*

Alat ini digunakan untuk melakukan proses *grinding* dan *polishing* pada spesimen sebelum melakukan uji metalografi. Mesin ini terdapat di Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS



Gambar 3.6 Mesin *Grinding* dan *Polishing* (Dokumentasi pribadi, 2022)

8. Gelas Ukur

Gelas ukur digunakan untuk mengukur volume bahan pembuatan larutan etsa sebelum melakukan uji metalografi. Alat ini tersedia di Laboratorium Korosi dan Kegagalan Material Departemen Teknik Material ITS

9. Gelas Beker

Gelas beker digunakan sebagai wadah penampung untuk mencampur bahan-bahan larutan etsa. Alat ini tersedia di Laboratorium Korosi dan Kegagalan Material Departemen Teknik Material ITS

10. *Stopwatch*

Stopwatch digunakan untuk melakukan pengukuran durasi waktu sensitisasi spesimen dimana pada penelitian ini diterapkan variasi waktu pemanasan sensitisasi yaitu 3, 5, dan 7 jam.

11. *Rectifier*

Rectifier berfungsi sebagai penyearah arus listrik yang digunakan untuk memberikan arus listrik merata pada saat uji metalografi pada permukaan spesimen.



Gambar 3.7 Rectifier (Dokumentasi pribadi, 2022)

12. Timbangan Digital

Timbangan digital digunakan untuk mengukur massa kristal asam oksalat yang digunakan sebagai larutan etsa

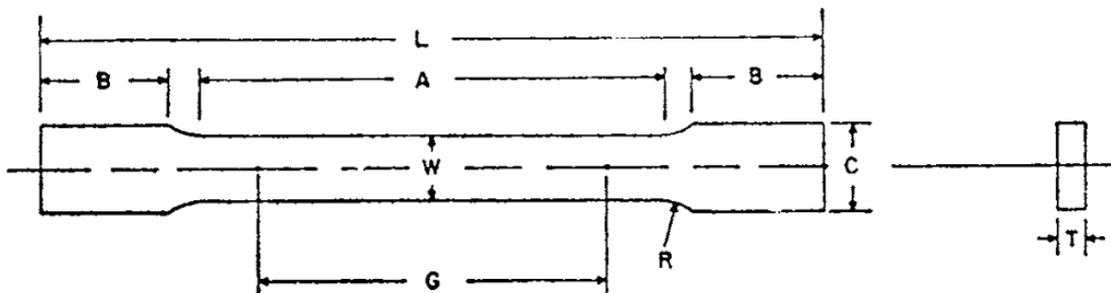
3.4 Metode Penelitian

Adapun Prosedur proses penelitian yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.4.1 Prosedur Preparasi Spesimen

Berikut ini adalah prosedur yang dilakukan pada proses preparasi spesimen *stainless steel* 316

1. Spesimen disiapkan
2. Spesimen dipotong menggunakan gerinda tangan dengan dimensi 15x15 mm² untuk pengujian metalografi, dan pengujian kekerasan. Sedangkan, untuk uji tarik, spesimen di-*machining* dengan dimensi yang disesuaikan dengan standar ASTM E8 sebagai berikut



Gambar 3.8 Standar Spesimen Uji Tarik

Tabel 3.1 Dimensi Standar Spesimen Uji Tarik

Keterangan	Dimensi
G – Gauge length	50 ± 0,1 mm
W – Lebar	12.5 ± 0,2 mm
T – Ketebalan	3 mm
R – Radius <i>Fillet</i>	12.5 mm
L – Panjang total	200 mm
A – Panjang <i>Reduction Section</i>	57 mm
B – Panjang bagian <i>grip</i>	50 mm
C – Lebar bagian <i>grip</i>	20 mm

3.4.2 Prosedur Pembuatan Larutan Etsa

Berikut adalah prosedur yang dilakukan pada pembuatan larutan etsa

1. Asam oksalat dan aquades disiapkan
2. Asam oksalat dalam bentuk kristal ditimbang hingga diperoleh massa sebanyak 100 gram
3. 100gram asam oksalat dimasukkan ke dalam gelas beker berisi akuades sebanyak 900ml
4. Larutan diaduk hingga seluruh kristal asam oksalat larut di dalam akuades

3.4.3 Proses Perlakuan Panas

Berikut adalah prosedur yang dilakukan pada proses perlakuan panas spesimen

1. Spesimen disiapkan
2. *Muffle furnace* disiapkan untuk perlakuan panas
3. Spesimen dimasukkan ke dalam *furnace* kemudian dipanaskan sampai temperatur 600°C kemudian ditahan selama 3 jam
4. Spesimen dikeluarkan dari *furnace* kemudia didinginkan secara lambat dengan media pendingin udara
5. Langkah 1 – 4 diulangi dengan menggunakan waktu tahan yang berbeda yaitu 5 jam dan 7 jam

3.4.4 Prosedur Metalografi

Berikut adalah prosedur yang dilakukan pada proses metalografi spesimen

1. Spesimen diampelas dan dipoles hingga permukaannya rata dan mengkilap
2. Spesimen, *rectifier*, dan katoda *stainless steel* disambungkan secara elektrik
3. Rectifier dinyalakan dan diatur pada tegangan 15V
4. Spesimen dan katoda dicelupkan ke dalam larutan etsa asam oksalat
5. Arus dari *rectifier* diatur hingga didapatkan arus yang mengalir sebesar 1 A. Besarnya arus dilihat dari hasil bacaan pada *rectifier*
6. Proses etsa dilakukan selama 90 detik
7. Setelah 90 detik tercapai, katode dan spesimen dikeluarkan dari larutan

3.5 Pengujian

Pada penelitian ini terdapat empat pengujian yang dilakukan yaitu antara lain pengujian komposisi menggunakan pengujian *Optical Emission Spectrometry (OES)*, pengujian tarik untuk mengetahui kekuatan dari spesimen, pengujian metalografi untuk mengetahui struktur mikro dari spesimen uji dan pengujian kekerasan untuk mengetahui tingkat kekerasan spesimen *stainless steel 316*

3.5.1 Proses Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi dilakukan dengan menggunakan *Optical Emission Spectrometry (OES)* dengan tujuan untuk memperoleh kandungan unsur-unsur yang terdapat pada spesimen uji. Jenis yang digunakan pada pengujian ini adalah *Spark OES* dimana material uji diberikan energi listrik sehingga terjadi eksitasi elektron yang menyebabkan adanya pancaran radiasi elektromagnetik pada atom ataupun ion-ion penyusun. Sebelum dilakukan pengujian komposisi OES, pada spesimen dilakukan preparasi terlebih dahulu sehingga permukaannya halus dan siap untuk diujikan.

3.5.2 Proses Pengujian Metalografi

Untuk menganalisis struktur mikro spesimen dengan atau tanpa perlakuan panas dilakukan pengujian metalografi. Pada penelitian ini, proses metalografi dilakukan berdasarkan standar ASTM A262 *Practice-A* untuk menguji korosi batas butir pada baja tahan karat austenitik.

3.5.3 Proses Pengujian Tarik

Pada penelitian ini, pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan material uji. Pengujian dilakukan dengan meletakkan spesimen pada cekam alat uji tarik, kemudian mesin dihidupkan untuk memulai pengujian lalu dimatikan saat material uji mengalami patah. Dari pengujian ini, diperoleh kurva tegangan regangan yang dapat mendeskripsikan kekuatan spesimen uji. Dimensi spesimen yang digunakan pada pengujian ini ditentukan berdasarkan standar ASTM E8 dengan tipe *sheet* dan dimensi *gauge length* sebesar 50 mm. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material ITS

3.5.4 Proses Pengujian Kekerasan

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian kekerasan untuk menguji kekerasan *stainless steel* 316 dengan atau tanpa perlakuan panas. Pengujian kekerasan ini menggunakan metode Vickers berdasarkan standar ASTM E384. Sebelum dilakukan pengujian, spesimen dipreparasi terlebih dahulu dengan *grinding dan polishing* hingga permukaannya halus. Pengujian dilakukan dengan melakukan indentasi dengan *indentor* berbahan intan berbentuk piramid menggunakan pembebangan sebesar 100gf dan waktu indentasi 10 detik. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Material ITS.

3.6 Rancangan Penelitian

Adapun rancangan dari penelitian yang akan dilakukan pada masing-masing spesimen adalah sebagai berikut

Tabel 3.2 Rancangan Penelitian

Kode Spesimen	Temperatur Pemanasan (°C)	Waktu Sensitisasi (Jam)	Media Pendingin	Pengujian			
				OES	Metalografi	Tensile	Kekerasan
SSWT	-	-	-	✓	✓	✓	✓
SST3		3		-	✓	✓	✓
SST5	600	5	Udara	-	✓	✓	✓
SST7		7		-	✓	✓	✓

Adapun jadwal pada penelitian ini adalah sebagai berikut

Tabel 3.3 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	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Asistensi	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Penyusunan Proposal	■	■														
Persiapan Alat dan Bahan		■	■	■												
Pengujian Komposisi				■	■											
Perlakuan Panas						■	■	■	■							
Pengujian Metalografi								■	■	■	■	■				
Pengujian Tarik								■	■	■	■	■				
Pengujian Kekerasan								■	■	■	■	■				
Penyusunan Laporan Akhir								■	■	■	■	■	■	■	■	■

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Komposisi Kimia *Stainless Steel 316*

Spesimen uji *stainless steel 316* telah dilakukan pengujian komposisi untuk mengetahui unsur-unsur yang terkandung di dalamnya. Pengujian komposisi dilakukan menggunakan *Optical Emmision Spectroscopy* (OES) di Laboratorium Uji Bahan, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS), Surabaya dengan standar uji ASTM E1086-14. Pengujian komposisi ini dilakukan sebanyak tiga kali untuk kemudian ditentukan nilai rata-rata dari ketiga data tersebut pada tiap unsur yang terkandung. Hasil pengujian komposisi dibandingkan dengan literatur terkait untuk mengidentifikasi dan mengkonfirmasi jenis material yang digunakan pada penelitian. Berikut merupakan tabel perbandingan antara hasil pengujian komposisi yang telah dilakukan dengan spesifikasi standar *stainless steel* yang terdapat pada ASTM A-240.

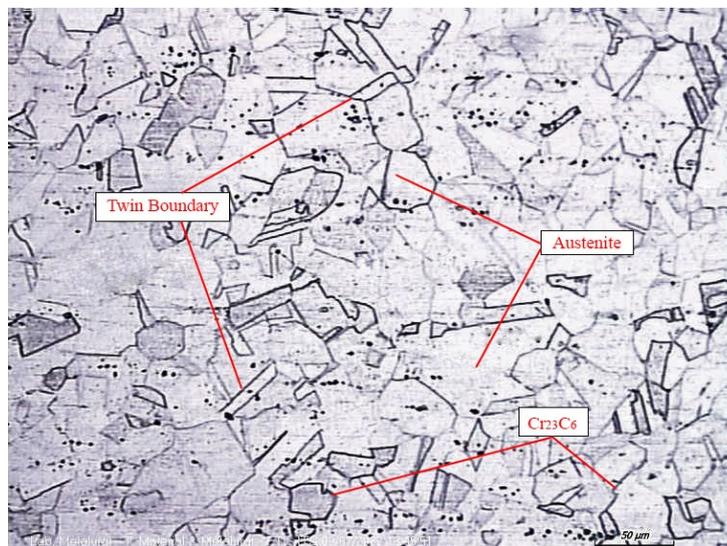
Tabel 4.1 Perbandingan Komposisi Kimia *Stainless Steel 316* ASTM A-240 dan Hasil Uji OES

Unsur	Hasil Uji Komposisi	Referensi (ASTM A-240)
Karbon (C)	0.0326%	0.08% max
Kromium(Cr)	16.9%	16 – 18%
Nikel (Ni)	10.3%	10 – 14%
Mangan (Mn)	1.35%	2 % max
Molibdenum (Mo)	2.05%	2 – 3%
Fosfor (P)	0.0368%	0.045% max
Sulfur (S)	0.0087%	0.03% max
Silikon (Si)	0.381%	0.75% max
Nitrogen (N)	0.0822%	0.1% max
Besi (Fe)	<i>Balance</i>	<i>Balance</i>

Berdasarkan Tabel 4.1 di atas, dapat diketahui bahwa hasil komposisi yang diperoleh dari pengujian menggunakan *Optical Emmision Spectroscopy* (OES) sudah sesuai dengan komposisi kimia *stainless steel 316* yang terdapat pada standar ASTM A-240. Hal tersebut ditunjukkan dengan keberadaan unsur paduan utama dari *stainess steel 316* yaitu adanya kadar kromium (Cr), nikel (Ni), dan Molibdenum (Mo) secara berturut-turut sebesar 16,9%, 10,3%, dan 2,05% yang berada di rentang spesifikasi ASTM A-240 yaitu secara berturut-turut sebesar 16-18wt% Cr, 10-14wt% Ni, dan 2,0-3,0wt% Mo. Selain itu, kandungan karbon dari hasil uji OES yaitu sebesar 0,0326wt% berada di bawah batas maksimal yaitu maksimum 0,08wt% dan berada di atas standar komposisi karbon *stainless steel 316L* yaitu kurang dari atau sama dengan 0,03%. Unsur-unsur paduan lain yang ditemukan pada spesimen uji seperti mangan (Mn), Fosfor (P), Sulfur (S), Silikon (Si), dan Nitorgen(N) yang memiliki persentase berat secara berturut-turut yaitu 1,35wt%Mn, 0,0368wt%P, 0,0087wt%S, 0,381wt%Si, dan 0,0822wt%N juga telah berada di dalam rentang komposisi standar spesifikasi *stainless steel 316* pada ASTM A-240 yaitu secara berturut-turut sebesar 2wt% maksimum untuk mangan (Mn), 0,045wt% untuk fosfor(P), 0,03wt% maksimum untuk sulfur (S), 0,075wt% maksimum untuk silikon(Si), dan 0,1wt% maksimum untuk nitrogen(N). Oleh karena itu, dapat diketahui bahwa spesimen uji yang digunakan pada penelitian ini merupakan *stainless steel 316* karena telah memenuhi standar komposisi kimia yang sesuai dengan ASTM A-240 (American Society for Testing and Materials, 2004).

4.2 Hasil Pengujian Metalografi

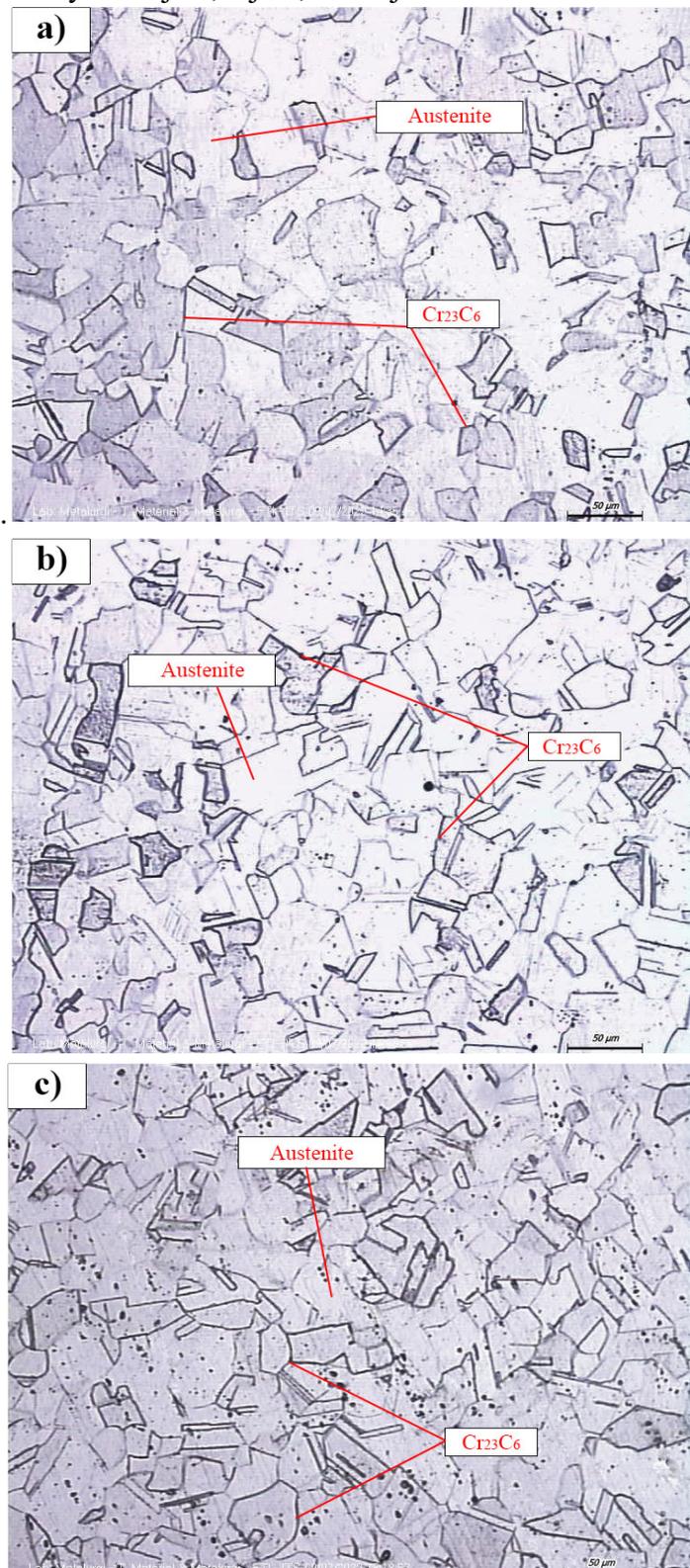
Pengujian metalografi dilakukan pada spesimen tanpa perlakuan serta spesimen dengan variasi waktu sensitisasi selama 3 jam, 5 jam, dan 7 jam pada saat perlakuan panas dengan temperatur 600°C. Sebelum dilakukan uji metalografi, spesimen dipreparasi terlebih dahulu dengan menyiapkan sampel *stainless steel* 316 berdimensi 15 x 15 mm dan ketebalan 3 mm dan dilakukan proses *grinding* menggunakan mesin polish dan kertas ampelas grade 80 sampai 2000 yang kemudian dipoles menggunakan kain bludru yang diberi pasta *autosol*. Setelah itu, pada sampel dilakukan proses etsa menggunakan larutan etsa khusus sesuai dengan ASTM A262 yaitu larutan asam oklasat 10%. Proses etsa dilakukan secara *electro-etching* dengan tegangan sebesar 9 Volt dan arus sebesar 1,5 Ampere selama 90 detik. Spesimen yang telah dietsa lalu dibilas dengan alkohol. Setelah melakukan preparasi spesimen dan proses etsa, pengujian metalografi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui struktur mikro yang terdapat pada spesimen uji. Pengujian metalografi dilakukan di Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur menggunakan alat Metallurgical Microscope OLYMPUS BX51M-RF. Pengujian metalografi diawali terlebih dahulu pada spesimen *stainless steel* 316 tanpa perlakuan untuk mengidentifikasi fasa yang terdapat pada mikrostruktur spesimen seperti sebagai berikut.



Gambar 4.1 Struktur Mikro *Stainless Steel* 316 Tanpa Perlakuan dengan Perbesaran 200x

Berdasarkan gambar 4.1 tersebut, diketahui bahwa spesimen tersebut terdiri dari fasa γ yang berwarna putih terang dan sedikit karbida kromium pada batas butirnya. Hal ini sesuai dengan literatur dari Hawkins tahun 1989 yang mengatakan bahwa pada baja tahan karat austenitik memiliki mikrostruktur austenit yang stabil sampai temperatur kamar. Pada spesimen tanpa perlakuan ini, sudah ditemukan adanya presipitasi karbida kromium yang dapat disebabkan karena perlakuan yang diberikan kepada spesimen ini. Untuk menghilangkan presipitat karbida kromium ini dapat dilakukan pemanasan di temperatur anil terlebih dahulu kemudian dilakukan pendinginan cepat untuk memastikan karbida terlarut tetap berada pada larutan (Hawkins, 1989). Selain itu, pada spesimen tanpa perlakuan ini juga ditemukan adanya peristiwa *twinning* yang terjadi yang ditandai dengan terbentuknya *twin boundary* pada mikrostruktur. *Twinning* yang ditemukan pada mikrostruktur baja tahan karat austenitik dapat disebabkan karena proses manufaktur yang diberikan. *Twinning* dapat terjadi pada saat *austenitic stainless steel* mengalami deformasi plastis. Saat tingkat reduksi pada proses *cold rolling* ditingkatkan, *twin* dapat terbentuk pada butir austenit (Xu et al., 2018). Pengujian metalografi pada spesimen yang diberikan perlakuan panas dengan variasi waktu sensitisasi

dilakukan dengan tujuan untuk mengamati perubahan struktur mikro yang terjadi. Berikut adalah hasil metalografi *stainless steel* 316 setelah dipanaskan pada temperatur 600°C dengan variasi waktu sensitisasi yaitu 3 jam, 5 jam, dan 7 jam.



Gambar 4.2 Struktur Mikro *Stainless Steel* 316 dengan Variasi Waktu Sensitisasi (a) 3 jam, (b) 5 jam, (c) 7 jam pada perbesaran 200x

Tabel 4.2 Identifikasi Mikrostruktur Spesimen Hasil Perlakuan Panas Berdasarkan ASTM A262 Practice A

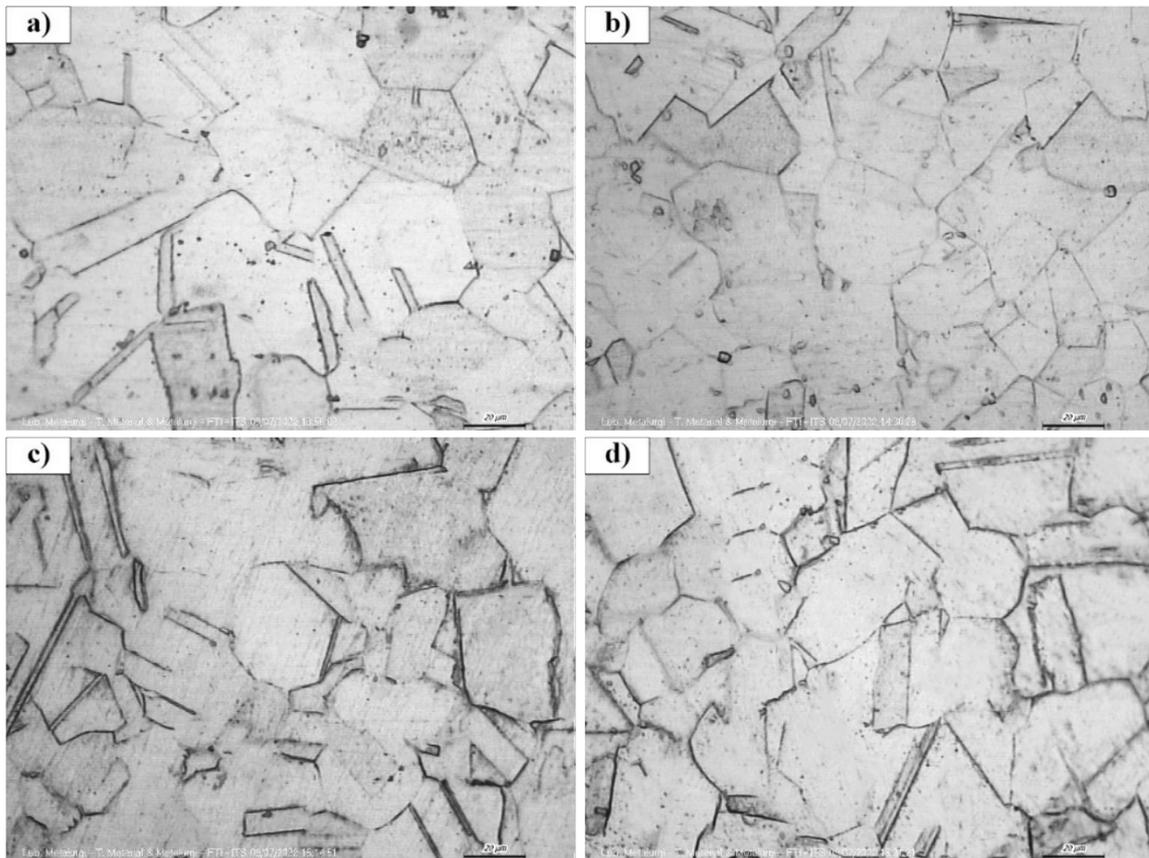
No.	Kode Spesimen	Temperatur (°C)	Waktu Sensitisasi (jam)	Media Pendingin	Jenis Struktur
1.	SSWT	-	0		<i>Step structure</i>
2.	SST3		3	Udara	<i>Step structure</i>
3.	SST5	600	5		<i>Dual structure</i>
4.	SST7		7		<i>Dual Structure</i>

Berdasarkan standar ASTM A262 Practice A, terdapat tiga jenis mikrostruktur yang dapat terbentuk pada *austenitic stainless steel* yang memacu pada kerentanannya untuk mengalami korosi batas butir yaitu struktur *step*, *dual*, dan *ditch*. Struktur *step* ditandai dengan sangat sedikitnya batas butir yang mengalami korosi dan batas butir yang mengalami korosi tidak sampai mengelilingi butir-butir yang ada pada sampel. Pada struktur *dual*, terdapat beberapa butir yang sudah dikelilingi sepenuhnya oleh batas butir yang mengalami korosi dan ada beberapa butir lainnya yang belum sepenuhnya dikelilingi oleh batas butir yang terkorosi. Sedangkan, pada struktur *ditch*, seluruh butir yang terdapat pada mikrostruktur sampel telah dikelilingi sepenuhnya oleh batas butir yang mengalami korosi (ASTM A262, 2021). Gambar 4.2 di atas menunjukkan adanya perbedaan mikrostruktur yang diamati pada setiap spesimen yang diberikan perlakuan panas yang berbeda. Pada sampel tanpa perlakuan, struktur yang teridentifikasi adalah struktur *step* dimana tidak ada butir yang dikelilingi sepenuhnya oleh batas butir yang terkorosi. Sampel dengan waktu sensitisasi 3 jam juga diketahui memiliki struktur *step* yang tidak jauh berbeda dengan spesimen tanpa perlakuan. Pada sampel dengan waktu sensitisasi 5 jam dan 7 jam struktur yang dihasilkan adalah struktur *dual* dimana terdapat beberapa butir yang telah dikelilingi sepenuhnya oleh batas butir yang mengalami korosi. Hal tersebut menunjukkan bahwa sensitasi yang terjadi pada sampel 5 jam dan 7 jam, lebih banyak jika dibandingkan dengan sampel dengan waktu sensitisasi 3 jam. Kondisi sampel yang memiliki sensitasi lebih banyak menandakan adanya pengaruh pembentukan presipitasi karbida pada batas butir di mikrostruktur. Prepitasi karbida yang terjadi pada batas butir dapat menjadi faktor hilangnya kandungan kromium di sekitar batas butir sehingga batas butir tersebut lebih rentan terhadap korosi dan akan terlihat lebih tebal setelah dilakukan proses etsa.

Adanya perubahan mikrostruktur dari struktur *step*, ke *dual* dan/atau *ditch* yang ditemukan *austenitic stainless steel* pada rentang sensitasi sebagai pengaruh dari *thermal ageing* ini sesuai dengan literatur Bansod tahun 2016 yang mengidentifikasi bahwa pada saat dipaparkan pada temperatur sensitasi, peningkatan lamanya waktu *thermal ageing* dapat menyebabkan meningkatnya zona kekurangan kromium dan mendorong transformasi struktur *step* ke *dual* ataupun *dual* ke *ditch* (Bansod et al., 2016). Dari hasil tersebut, dapat diketahui adanya perbedaan mikrostruktur spesimen uji dengan variasi perlakuan waktu sensitisasi yang berbeda yaitu 0 jam, 3 jam, 5 jam, dan 7 jam khususnya pada batas butir. Pada spesimen tanpa perlakuan, terlihat adanya karbida pada butir dengan jumlah yang paling sedikit jika dibandingkan dengan spesimen yang mengalami perlakuan sensitasi. Pada spesimen dengan variasi waktu sensitisasi 3 jam dan 5 jam, terlihat bahwa karbida yang terdapat pada batas butir menjadi lebih banyak, namun perbedaan jumlah karbida yang ditemukan pada spesimen dengan variasi 3 jam dan 5 jam tersebut relatif tidak jauh berbeda. Pada spesimen dengan variasi waktu paling lama yaitu 7 jam, terlihat bahwa karbida yang terbentuk pada batas butir lebih banyak jika dibandingkan dengan spesimen uji lainnya. Dari hasil pengamatan ini, dapat diketahui bahwa jumlah karbida yang terbentuk batas butir akan meningkat seiring dengan lamanya waktu spesimen mengalami sensitasi. Pada saat proses sensitasi atom karbon akan berdifusi

secara cepat menuju batas butir yang kemudian akan bergabung dengan unsur kromium untuk membentuk karbida kromium (Gupta, R. K., et al, 2017).

Untuk mengetahui perbedaan ketebalan batas butir akibat dari peningkatan jumlah presipitasi karbida yang terbentuk pada batas butir, dilakukan pengamatan mikrostruktur pada setiap spesimen dengan perlakuan yang berbeda menggunakan perbesaran 500x seperti sebagai berikut.



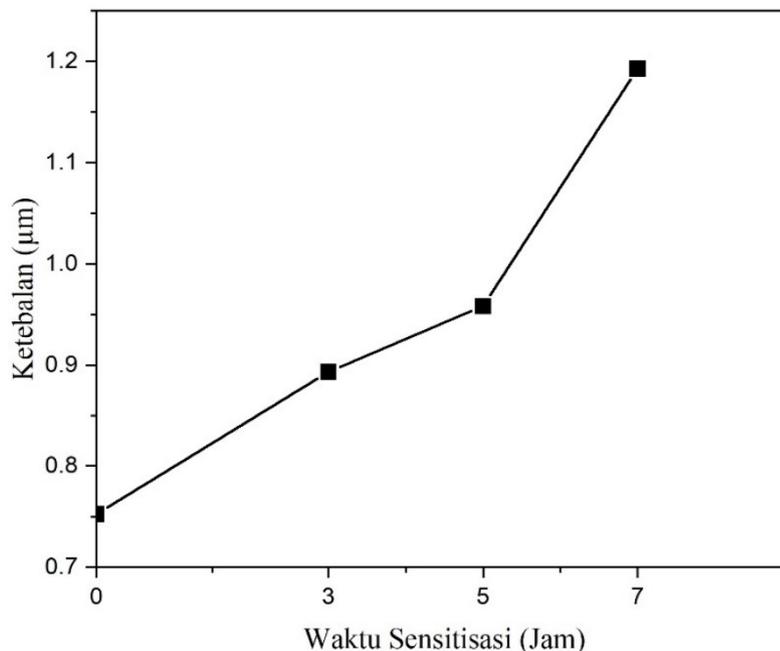
Gambar 4.3 Struktur Mikro *Stainless Steel* 316 dengan Variasi Waktu Sensitisasi (a) 3 jam, (b) 5 jam, (c) 7 jam pada perbesaran 500x

Berdasarkan Gambar 4.3 tersebut, dapat diamati bahwa pada spesimen tanpa perlakuan dan spesimen dengan waktu sensitisasi 3 jam memiliki batas butir yang lebih tipis jika dibandingkan dengan spesimen yang diberikan perlakuan panas dengan waktu sensitisasi 5 jam dan 7 jam. Hal tersebut dapat disebabkan karena karbida kromium yang terbentuk di batas butir dapat membuat batas butir menjadi terlihat lebih tebal. Batas butir yang mengalami presipitasi karbida kromium akibat sensitasi, akan mengalami peningkatan daerah yang kekurangan kromium (*Cr-depleted zone*) di sekitarnya. Penentuan tingkat ketebalan dari batas butir secara kuantitatif, dilakukan dengan menghitung ketebalan batas butir dengan menggunakan *software ImageJ*. Pada perhitungan ketebalan batas butir, ditentukan terlebih dahulu sepuluh batas butir secara acak yang terdapat pada gambar struktur mikro untuk kemudian dihitung rata-rata ketebalan batas butirnya. Hasil dari perhitungan ketebalan batas butir dari tiap spesimen adalah sebagai berikut

Tabel 4.3 Ketebalan Daerah Batas Butir dengan Variasi Waktu Sensitisasi

No.	Kode Spesimen	Mikrostruktur berdasarkan ASTM A262 Practice A	Rata-rata Ketebalan Batas Butir (μm)
1.	SSWT	<i>Step structure</i>	0.75253
2.	SST3	<i>Step structure</i>	0.89315
3.	SST5	<i>Dual structure</i>	0.95836
4.	SST7	<i>Dual Structure</i>	1.19289

Dari Tabel 4.3 tersebut, hubungan antara ketebalan batas butir yang terbentuk dengan lamanya waktu sensitisasi, diinterpretasikan kemudian dengan menggunakan plot grafik sebagai berikut.



Gambar 4.4 Grafik Perubahan Rata-Rata Ketebalan Daerah Batas Butir terhadap Waktu Sensitisasi

Berdasarkan Gambar 4.4 di atas, diketahui bahwa terdapat perubahan ukuran ketebalan batas butir seiring dengan lamanya waktu sensitisasi. Spesimen yang tidak diberikan perlakuan memiliki rata-rata ketebalan batas butir $0.75\mu\text{m}$. Kemudian spesimen dengan waktu sensitisasi 3 jam, 5 jam dan 7 jam secara berturut-turut memiliki nilai rata-rata ketebalan batas butir sebesar $0,89\mu\text{m}$, $0,95\mu\text{m}$, dan $1.19\mu\text{m}$. Dari hasil tersebut, diketahui bahwa semakin lama waktu sensitisasi yang diberikan, maka semakin tebal batas butir yang terdapat di struktur mikro spesimen. Bertambahnya zona yang kekurangan kromium (*Cr-depleted zone*) di sekitar batas butir seiring dengan lamanya waktu sensitisasi ini didukung oleh literatur Sourmail tahun 2003 yang mengatakan bahwa terbentuknya zona yang kekurangan kromium ini terjadi seiring dengan pertumbuhan karbida (Sourmail et al., 2003).

4.3 Hasil Pengujian Mekanik

Pada penelitian ini, dilakukan dua jenis pengujian yaitu berupa pengujian tarik dan pengujian kekerasan. Pengujian mekanik ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui sifat

mekanik dari sampel *stainless steel* 316 yang diberikan perlakuan panas pada temperatur 600°C dengan variasi waktu sensitisasi 0 jam, 3 jam, 5 jam, dan 7 jam.

4.3.1 Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat mekanik berupa kekuatan dan keuletan dari spesimen sebelum dan setelah diberikan perlakuan. Pengujian tarik pada penelitian ini dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) di Laboratorium Metalurgi Manufaktur, Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS serta Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan Kapal, Departemen Teknik Perkapalan ITS dengan maksimal pembebanan sebesar 20 ton. Sebelum diuji, sampel dipreparasi terlebih dahulu sehingga memiliki dimensi spesimen yang sesuai dengan standar ASTM E8 tipe *sheet* dengan ketebalan spesimen sebesar 3 mm. Pada setiap variasi perlakuan, dilakukan pengujian tarik sebanyak dua kali pada spesimen uji untuk kemudian ditentukan nilai rata-rata dari tiap pengujian. Berikut adalah hasil yang diperoleh dari pengujian tarik pada setiap sampel uji.

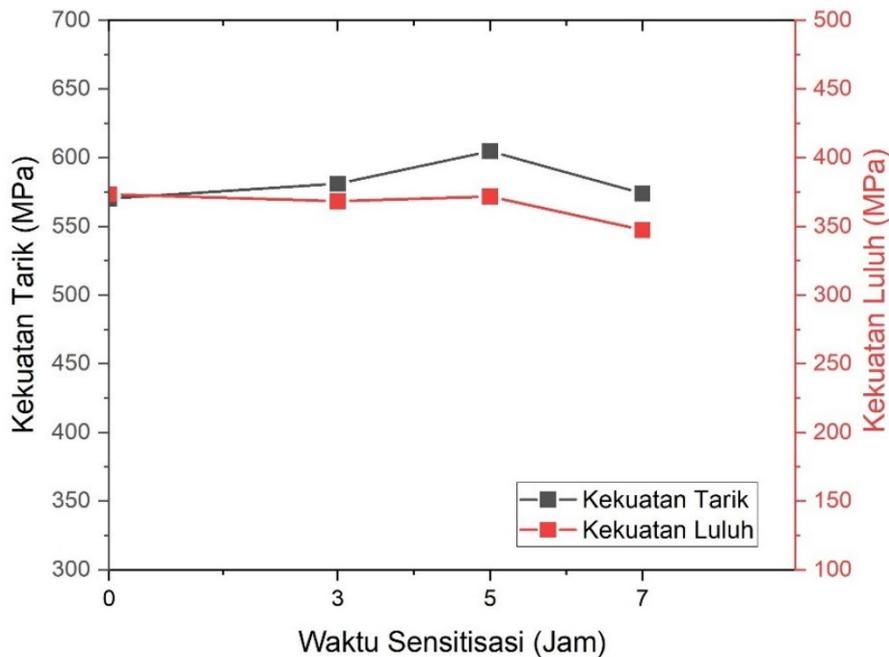
4.3.1.1 Kekuatan

Kekuatan dari spesimen uji diidentifikasi dengan mengetahui *Ultimate Tensile Strength* (UTS) dan *Yield Strength* dari hasil pengujian tarik dari masing-masing spesimen. Berikut adalah hasil pengujian kekuatan dari spesimen uji.

Tabel 4.4 *Ultimate Tensile Strength* dan *Yield Strength* Spesimen Hasil Uji Tarik

No.	Kode Spesimen	Temperatur (°C)	Waktu Sensitisasi (Jam)	UTS (MPa)	Yield Strength (Mpa)
1	SSWT	-	0	570.295	373.364
2	SST3		3	581.045	368.195
3	SST5	600	5	604.72	371.725
4	SST7		7	573.875	347.28

Berdasarkan Tabel 4.4 tersebut, diketahui bahwa nilai kekuatan tarik yang diperoleh dari hasil pengujian telah memenuhi standar kekuatan tarik dan kekuatan minimum *stainless steel* 316 menurut ASTM A240 yaitu secara berturut-turut sebesar 515 MPa dan 205 MPa. Perubahan nilai dari kekuatan tarik akibat perlakuan panas dengan variasi waktu sensitisasi diinterpretasikan dengan grafik pada Gambar 4.4 sebagai berikut



Gambar 4.5 Grafik Perubahan Kekuatan Spesimen Uji terhadap Variasi Waktu Sensitisasi Berdasarkan Hasil Uji Tarik

Berdasarkan Gambar 4.5 tersebut, diketahui bahwa terjadi perubahan nilai kekuatan tarik yang dipengaruhi oleh variasi waktu sensitisasi. Nilai kekuatan paling kecil ditemukan pada spesimen yang tidak diberikan perlakuan panas yaitu sebesar 570,295MPa. Pada waktu sensitisasi 3 jam dan 5 jam terjadi kenaikan pada nilai kekuatan tarik jika dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan yaitu secara berturut-turut sebesar 581,045MPa dan 604,72MPa dimana spesimen uji dengan variasi waktu sensitisasi 5 jam memiliki nilai tensile strength paling besar diantara semua spesimen uji. Setelah itu, pada variasi waktu pemanasan 7 jam, terjadi penurunan nilai *tensile strength* menjadi sebesar 573,875MPa. Berdasarkan Gambar 4.5 di atas juga diketahui bahwa terjadi perubahan nilai kekuatan luluh yang dipengaruhi oleh variasi waktu sensitisasi. Nilai kekuatan luluh paling kecil ditemukan pada spesimen dengan variasi waktu sensitisasi paling lama yaitu 7 jam dengan nilai *yield strength* sebesar 347,28MPa. Spesimen dengan kekuatan luluh paling tinggi ditemukan pada spesimen tanpa perlakuan yaitu sebesar 373,364MPa. Saat diberikan perlakuan dengan waktu sensitisasi 3 jam, nilai kekuatan luluh spesimen mengalami penurunan menjadi sebesar 368,195 MPa serta pada variasi waktu sensitisasi 5 jam, terjadi kenaikan yaitu menjadi sebesar 371,725 MPa.

Kekuatan dari spesimen uji *stainless steel* 316 mengalami peningkatan pada saat dipanaskan pada temperatur 600°C dari waktu sensitisasi 0 jam sampai 5 jam dan kemudian turun pada saat waktu sensitisasi 7 jam. Peningkatan kekuatan pada spesimen uji tersebut dipengaruhi oleh fenomena sensitasi yang dialami oleh spesimen pada saat dipanaskan sampai temperatur 600°C. Pada saat material mengalami sensitasi, akan terjadi pembentukan presipitat kromium karbida ($Cr_{23}C_6$) di batas butir. Perubahan kekuatan dari spesimen akibat perlakuan panas dengan variasi waktu sensitisasi tersebut dapat dipengaruhi oleh presipitasi karbida kromium yang disebabkan karena fenomena sensitasi. Menurut literatur Tukur tahun 2014, peningkatan kekuatan dari spesimen jika dibandingkan yang tidak diberi perlakuan dapat diakibatkan karena karbida kromium di batas butir. Karbida yang terbentuk di batas butir dapat menghalangi terjadinya pergerakan dislokasi sehingga meningkatkan tegangan luluh. Di sisi lain, pada variasi sensitisasi diketahui terjadi penurunan dimana berkurangnya nilai kekuatan

pada saat diberikan perlakuan sensitasi paling lama ini dapat disebabkan karena pembentukan karbida yang kaya akan kromium dapat mengurangi unsur penguat larutan padat di matriks austenit (Tukur et al., 2014). Menurut penelitian yang dilakukan oleh Kim pada tahun 2019, saat waktu *aging* meningkat, material dapat menjadi lebih lunak seiring dengan karbida yang semakin kasar. Dislokasi yang terjadi pada saat material diberikan beban akan lebih mudah melewati karbida yang kasar dibandingkan dengan yang halus (Jung & Kim, 2019).

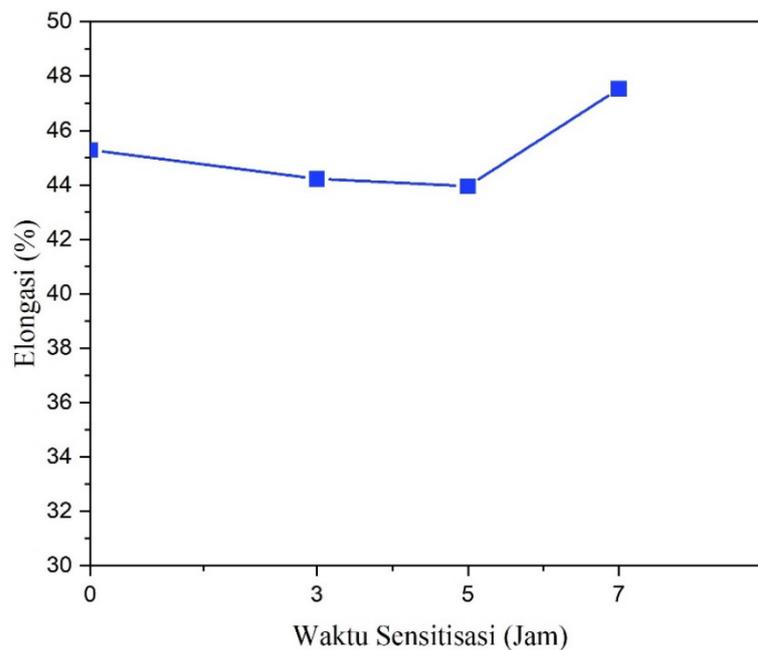
4.3.1.2 Keuletan

Keuletan dari spesimen uji diidentifikasi dengan mengetahui persentase elongasi dari hasil pengujian tarik masing-masing spesimen. Berikut adalah hasil pengujian keuletan dari spesimen uji.

Tabel 4.5 Keuletan Spesimen Hasil Uji Tarik

No.	Kode Spesimen	Temperatur (°C)	Waktu Sensitisasi (Jam)	Elongasi (%)
1	SSWT	-	0	45.285
2	SST3		3	44.225
3	SST5	600	5	43.955
4	SST7		7	47.535

Berdasarkan Tabel 4.5 tersebut, diketahui bahwa nilai keuletan yang diperoleh dari hasil pengujian telah memenuhi standar elongasi minimum *stainless steel* 316 menurut ASTM A240 yaitu sebesar 40%. Perubahan nilai dari elongasi akibat perlakuan panas dengan variasi waktu sensitasi diinterpretasikan dengan grafik pada Gambar 4.3 sebagai berikut



Gambar 4.6 Grafik Perubahan Keuletan Spesimen Hasil Pengujian Tarik

Berdasarkan Gambar 4.6 di atas, dapat diketahui bahwa terdapat perubahan keuletan berupa persentase elongasi sebagai pengaruh dari pemberian perlakuan panas dengan waktu sensitasi tertentu. Pada spesimen tanpa perlakuan, persentase elongasinya sebesar 45,285% sedangkan pada waktu sensitasi 3 jam dan 5 jam secara berturut-turut adalah sebesar 43,955% sehingga

terjadi penurunan persentase elongasi dari spesimen tanpa perlakuan sampai spesimen dengan waktu sensitisasi selama 5 jam. Setelah waktu sensitisasi selama 5 jam, perlakuan panas dengan waktu sensitisasi 7 jam menunjukkan kenaikan yaitu menjadi sebesar 47,535%. Hasil yang berbeda ditunjukkan pada spesimen dengan variasi waktu sensitisasi 7 jam yang mengalami peningkatan keuletan. Penurunan keuletan pada hasil uji ini dapat disebabkan karena pada saat spesimen yang tersensitisasi diberikan pembebanan tarik, maka presipitasi yang terbentuk pada proses sensitisasi dapat berpotensi menjadi tempat terjadinya *debonding* dan inisiasi *void*. Semakin lamanya waktu *aging*, meningkatnya persentase presipitat dapat menyebabkan peningkatan fraksi *void* dimana peningkatan densitas *void* dapat menjadi penyebab berkurangnya tingkat keuletan (Ghosh et al., 2009). Hasil keuletan dari hasil pengujian menunjukkan tren yang berbanding terbalik dengan hasil kekuatan. Hal ini sesuai dengan literatur Nelson pada tahun 1999 yang mengatakan bahwa pada umumnya keuletan akan berkurang seiring dengan peningkatan kekuatan (Nelson et al., 1999)

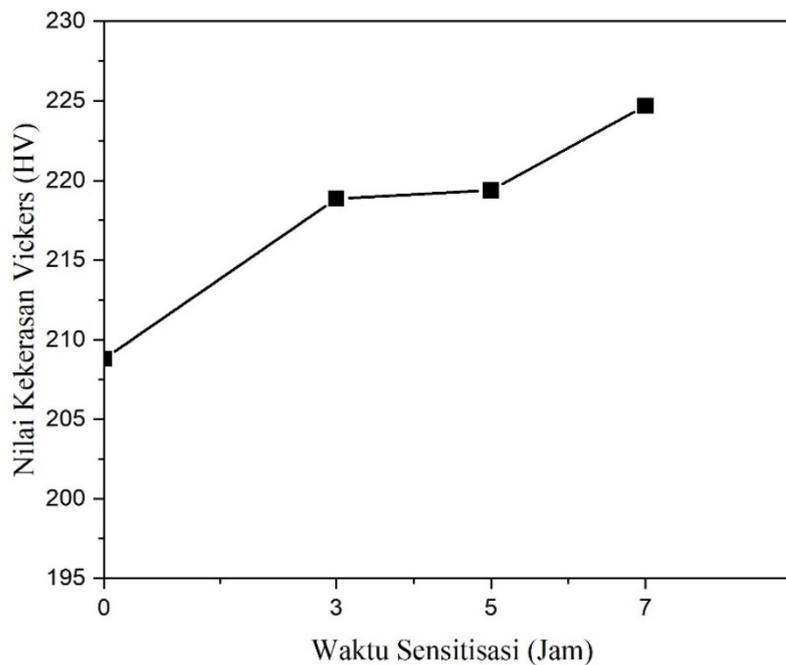
4.3.2 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui perubahan tingkat kekerasan dari spesimen sebelum dan setelah diberikan perlakuan. Pengujian kekerasan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Alat Uji Kekerasan *Micro-Vickers* di Laboratorium Metalurgi Manufaktur, Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Sebelum diuji, sampel dipreparasi terlebih dahulu dengan melakukan proses *grinding* menggunakan kertas abrasif sampai grit 2000 dan kemudian melakukan *polishing*. Pembebanan yang diberikan pada pengujian kekerasan ini adalah sebesar 100 gf dengan waktu indentasi selama 10 detik, Spesimen untuk pengujian kekerasan pada penelitian ini memiliki ketebalan 3 mm. Pada setiap variasi perlakuan, dilakukan pengujian kekerasan di lima titik pada spesimen uji untuk kemudian ditentukan nilai rata-rata dari tiap pengujian. Berikut adalah hasil yang diperoleh dari pengujian kekerasan pada setiap sampel uji.

Tabel 4.6 Hasil pengujian kekerasan

Kode Spesimen	Nilai Kekerasan (HV)					Rata-rata
	1	2	3	4	5	
SSWT	196	203	211.2	215.6	214.6	208.8
SST3	218.8	215.9	216.9	220.9	221.8	218.86
SST5	231.7	220.2	227	217.9	200.1	219.38
SST7	229.5	221.6	230.6	224.8	217	224.7

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan, nilai kekerasan spesimen *stainless steel* 316 yang tidak diberikan perlakuan telah memenuhi standar kekerasan menurut ASTM A240 yaitu sebesar 217 HBW yang jika dikonversikan menjadi 222 HV maksimum. Hasil pada Tabel 4.6 tersebut, diinterpretasikan dalam bentuk grafik seperti sebagai berikut



Gambar 4.7 Grafik Perubahan Nilai Kekerasan Spesimen Hasil Pengujian Kekerasan

Berdasarkan Gambar 4.7 di atas, nilai kekerasan dari spesimen uji mengalami perubahan dari setiap variasi perlakuan waktu sensitisasi. Pada spesimen tanpa perlakuan, nilai kekerasannya adalah sebesar 208,08 HV. Spesimen yang mengalami perlakuan panas dengan waktu sensitisasi 3 jam mengalami kenaikan menjadi sebesar 218,86 HV dimana nilai kekerasan tersebut cukup naik secara signifikan jika dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan. Selanjutnya, nilai kekerasan mengalami sedikit kenaikan pada saat dipanaskan dengan waktu sensitisasi 5 jam yaitu sebesar 219,38 HV. Pada spesimen dengan variasi waktu sensitisasi 7 jam, terlihat bahwa kenaikan nilai kekerasan terus melanjutkan peningkatan yang cukup signifikan yaitu menjadi sebesar 224,7 HV. Adanya kenaikan nilai kekerasan yang meningkat dari spesimen dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan, disebabkan karena terdapat pembentukan karbida kromium sebagai akibat dari peristiwa sensitasi yang dialami oleh material. Karbida yang terbentuk di batas butir dapat menyebabkan material tersebut mengalami kenaikan tingkat kekerasan. Berdasarkan literatur Tukur tahun 2014, peningkatan kekuatan yang terjadi pada material yang tersensitasi dapat disebabkan karena adanya pembentukan karbida pada batas butir yang dapat mengurangi pergerakan dislokasi dan *defect* yang terjadi di kisi kristal (Tukur et al., 2014). Berdasarkan literatur Ghosh pada tahun 2009, naik atau turunnya tingkat kekerasan pada saat fenomena sensitisasi dapat disebabkan oleh dua faktor, yaitu (1) difusi Cr, C, dan N dari butir ke batas butir yang menyebabkan berkurangnya unsur penguat larutan padat yang terdapat pada matriks sehingga membuat material menjadi lunak dan menurun tingkat kekerasannya serta (2) presipitasi yang terjadi pada batas butir dengan hubungannya terhadap dislokasi yang dapat meningkatkan kekuatan matriks sehingga meningkatkan tingkat kekerasannya (Ghosh et al., 2009).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Terjadi perubahan mikrostruktur yang terjadi dari setiap perlakuan panas yang diberikan. Struktur *step* ditemukan pada spesimen tanpa perlakuan dan spesimen dengan waktu sensitisasi 3 jam sedangkan struktur *dual* ditemukan pada spesimen dengan variasi waktu sensitisasi 5 jam, dan 7 jam. Perubahan struktur mikro tersebut disebabkan karena semakin lamanya waktu sensitisasi, maka *chromium depleted zone* di sekitar batas butir akan meningkat
2. Sifat mekanik *stainless steel* 316 mengalami perubahan seiring dengan lamanya waktu sensitisasi. Kekuatan spesimen mengalami kenaikan dengan waktu sensitisasi 3 jam dan 5 jam namun turun pada waktu sensitisasi 7 jam. Keuletan spesimen menunjukkan hasil yang berbanding terbalik dengan kekuatan. Kekerasan spesimen meningkat semakin lamanya waktu sensitisasi. Perubahan sifat mekanik yang dialami oleh spesimen dipengaruhi oleh adanya pembentukan karbida kromium pada spesimen saat diberikan perlakuan panas dalam rentang temperatur sensitasi

5.2 Saran

Pada penelitian ini, saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut

1. Sebelum diberikan perlakuan panas pada temperatur sensitasi, sebaiknya perlu dilakukan proses perlakuan panas *solution annealing* pada temperatur 900°C – 1200°C terlebih dahulu dengan tujuan untuk melarutkan karbida kromium yang mungkin terbentuk pada saat proses manufaktur material
2. Melakukan penambahan iterasi dan jenis pengujian mekanik spesimen uji, agar dapat menganalisa sifat mekanik lain dari material yang dapat dipengaruhi oleh waktu sensitisasi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM A262, A. S. (2021). Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels. *ASTM International, West Conshohocken, PS, 01*(Reapproved), 1–17. <https://doi.org/10.1520/A0262-15>.
- Agbokwor, S. E., & Neife, S. I. (2019). *Investigation of the Effects of Soaking Time on the Properties of Stainless Steel*. 3(3), 47–52. <https://doi.org/10.11648/j.ajmme.20190303.11>
- Ahmad, Z. (2006). *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control* (1st ed.). Elsevier.
- Ait Albrimi, Y., Eddib, A., Douch, J., Berghoute, Y., Hamdani, M., & Souto, R. M. (2011). Electrochemical behaviour of AISI 316 austenitic stainless steel in acidic media containing chloride ions. *International Journal of Electrochemical Science*, 6(10), 4614–4627.
- American Society for Testing and Materials. (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, I*, 12.
- Arifin, J., Purwanto, H., & Syafa'at, I. (2017). Pengaruh Jenis Elektroda Terhadap Sifat Mekanik Hasil Pengelasan Smaw Baja Astm a36. *Jurnal Momentum UNWAHAS*, 13(1), 114517. <https://doi.org/10.36499/jim.v13i1.1756>
- Bansod, A. V., Patil, A. P., Moon, A. P., & Khobragade, N. N. (2016). Intergranular Corrosion Behavior of Low-Nickel and 304 Austenitic Stainless Steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(9), 3615–3626. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2221-2>
- Boniardi, M., Casaroli, A., & Dipartimento Di Meccanica, P. di M. (2014). Stainless steels Gruppo Lucefin Research & Development. *Lucefin*, 10–20. http://www.fafe.com/files/pdf/libri_articoli/en/2_Stainless_steels.pdf
- Cobb, H. M. (1999). Steel Products Manual: Stainless Steels. In *Iron & Steel Society* (p. 116). The Iron & Steel Society.
- Corradi, M., Di Schino, A., Borri, A., & Rufini, R. (2018). A review of the use of stainless steel for masonry repair and reinforcement. *Construction and Building Materials*, 181, 335–346. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.034>
- Cottrell, S. A. (1995). *An Introduction to Metallurgy* (II). The Institute of Materials.
- Edition, F., Fifield, F. W., & Kealey, D. (2000). *Principles and Practice of Analytical Chemistry* (V). Blackwell Science Ltd.
- Fajardo, S., Bastidas, D. M., Ryan, M. P., Criado, M., McPhail, D. S., & Bastidas, J. M. (2010). Low-nickel stainless steel passive film in simulated concrete pore solution: A SIMS study. *Applied Surface Science*, 256(21), 6139–6143. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.03.140>
- Fontana, M. G. (1987). *Corrosion Engineering* (pp. 1–576). McGraw-Hill Book Inc.
- Gharehbaghi, A. (2012). *Precipitation Study in a High Temperature Austenitic Stainless Steel using Low Voltage Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*. *March*, 1–87.
- Ghosh, S., Kain, V., Ray, A., Roy, H., Sivaprasad, S., Tarafder, S., & Ray, K. K. (2009). Deterioration in fracture toughness of 304LN austenitic stainless steel due to sensitization. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 40(12), 2938–2949. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-0023-y>
- Gupta, R. K., Sunil Kumar, B., Sundar, R., Ram Sankar, P., Ganesh, P., Kaul, R., ... Singh, B. (2017). Enhancement of intergranular corrosion resistance of type 304 stainless steel through laser shock peening. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 52, 220–225.
- Hawkins, D. N. (1989). Heat treatment of steels. In *Steel Times* (Vol. 217, Issue 5).

- <https://doi.org/10.1201/9781439895238-10>
- HIGGINS, R. A. (1993). *APPLIED PHYSICAL METALLURGY* (6th ed.). J W Arrowsmith Ltd. International, ASM. (1999). *ASM Metals HandBook Volume 8 Mechanical Testing and Evaluation* (Vol. 8). International, ASM. (2011). *Hardness Testing*. ASM International.
- Jung, K.-H., & Kim, S.-J. (2019). Influence of Sensitization on Mechanical Properties of AISI 304 Stainless Steel under High-Temperature. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 19(7), 4265–4269. <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16270>
- Kartaman A, M., Nurlaily, E., Putri, A. S. D., Sihotang, J. C., & Kundari, N. A. (2020). Corrosion analysis of post-heat treatment and post-weld SS316 with electrokinetic reactivation and cyclic polarization method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1436(1), 012104. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012104>
- Khatak, H. S., & Raj, B. (2002). Corrosion of Austenitic Stainless Steels. In *Corrosion of Austenitic Stainless Steels*. <https://doi.org/10.1533/9780857094018>
- Kiahosseini, S. R., Mohammadi Baygi, S. J., Khalaj, G., Khoshakhlagh, A., & Samadipour, R. (2018). A Study on Structural, Corrosion, and Sensitization Behavior of Ultrafine and Coarse Grain 316 Stainless Steel Processed by Multiaxial Forging and Heat Treatment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(1), 271–281. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-3095-7>
- 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(August 2018), 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.03.009>
- Kocsisová, E., Dománková, M., Slatkovský, I., & Sahul, M. (2014). Study of the Sensitization on the Grain Boundary in Austenitic Stainless Steel Aisi 316. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, 22(341), 131–136. <https://doi.org/10.2478/rput-2014-0019>
- Kumar, S. (2014). *Hardness , Tensile And Wear Behaviour of A Nonconventional Austenitic Stainless Steel Upon Sensitization* *Hardness , Tensile And Wear Behaviour of A Nonconventional Austenitic Stainless Steel Upon Sensitization*. 1–69.
- Lee, J., Jang, C., & Lee, K. S. (2014). *Evaluation of the Sensitization of 316L Stainless Steels After the Post Weld Heat Treatment*. 28–30. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:46050878
- Mukahiwa, K. (2016). *MICROSTRUCTURAL CHARACTERISATION OF TYPE 316 AUSTENITIC STAINLESS STEELS: IMPLICATIONS FOR CORROSION FATIGUE BEHAVIOUR IN PWR PRIMARY COOLANT* A thesis submitted to the University of Manchester for the degree of Doctor of.
- Nelson, G. L., Manbeck, H. B., & Meador, N. F. (1999). Structural Steel Design. In *Light Agricultural and Industrial Structures*. CRC Press LLC. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0411-2_8
- Nugroho, G. (2017). *Pengelasan Gtaw Terhadap Kerentanan Korosi Batas Butir Baja Aisi 316L*. *Industri, Fakultas Teknologi*. http://repository.its.ac.id/2884/1/2114105025-Undergraduate_Theses.pdf
- Okpala, A. N., Christian, A., & Amula, E. (2016). *Effect of Sensitization on The Corrosion of Austenitic Stainless Steel in Fresh Water*. 13(6), 133–137. <https://doi.org/10.9790/1684-130602133137>
- Outokumpu. (2013). *Handbook of Stainless Steel*. 1–89. <http://www.outokumpu.com/sitecollectiondocuments/outokumpu-stainless-steel-handbook.pdf>

- Satish Kolli. (2020). *Sensitization in austenitic stainless steels : quantitative prediction considering multicomponent thermodynamic and mass balance effects*.
- Schweitzer, P. A. (2003). *METALLIC MATERIALS*. Marcel Dekker, Inc.
- Schweitzer, P. A. (2010). *Fundamentals of Corrosion*. CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC.
- Scott, D., & Schwab, R. (n.d.). *Metallography in Archaeology and Art*. Springer US.
- Sergio, M., Lima, F. De, & Sankaré, S. (2014). Microstructure and mechanical behavior of laser additive manufactured AISI 316 stainless steel stringers. *JOURNAL OF MATERIALS&DESIGN*, 55, 526–532. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.10.016>
- Sinha, A. K. (2003). PHYSICAL METALLURGY HANDBOOK. In *Applied Welding Engineering*. McGraw-Hill Companies, Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-391916-8.00003-0>
- Sourmail, T., Too, C. H., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2003). Sensitisation and evolution of chromium-depleted zones in Fe-Cr-Ni-C systems. *ISIJ International*, 43(11), 1814–1820. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.1814>
- Srinivasan, N. (2021). Sensitization of Austenitic Stainless Steels : Current Developments , Trends , and Future Directions. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s13632-021-00724-y>
- Stainless Steel in Figures 2020*. (2020). https://www.worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Figures_2021_English_public_version.pdf
- Trent, M. C., Goods, S. H., & Bradshaw, R. W. (2016). Comparison of corrosion performance of grade 316 and grade 347H stainless steels in molten nitrate salt. *AIP Conference Proceedings*, 1734(May 2016). <https://doi.org/10.1063/1.4949258>
- Tukur, S. ., Dambatta, M. ., Ahmed, A., & Mu'az, N. . (2014). Effect of Heat Treatment Temperature on Mechanical Properties of the AISI 304 Stainless Steel. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(2), 9516–9520.
- Umartono, A. S. (2012). *Pengaruh Pengerjaan Dingin (Cold Working) Pada Baja Tahan Karat Jenis Austenitik (Austenitic Stainless Steel) Type 304*. 01, 65–85. <http://journal.unigres.ac.id/index.php/WahanaTeknik/article/viewFile/516/391>
- Xu, D., Wan, X., Yu, J., Xu, G., & Li, G. (2018). Effect of cold deformation on microstructures and mechanical properties of austenitic stainless steel. *Metals*, 8(7), 1–14. <https://doi.org/10.3390/met8070522>
- Zakiyya, H., & Drastiawati, N. S. (2016). *EVALUASI SENSITASI PADA BAJA TAHAN KARAT 316 MENGGUNAKAN ALAT UJI KEMAMPUKERASAN TYPE JOMINY* Keywords : *Abstract : 15*(September), 52–55.
- Zatkalíková, V., Markovicová, L., Uhrčík, M., & Hanusová, P. (2020). Susceptibility to the intergranular attack in austenitic stainless steels Susceptibility to the intergranular attack in austenitic stainless steels. *Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/726/1/012017>
- Zipperian, D. C. (2011). *Metallographic Handbook*. PACE Technologies.
- Zorgani, M. E. M. M. (2010). *Procedure for selecting appropriate steels for machine design*. April, 2008–2009.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

1. Hasil Pengujian OES



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

LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 REPORT ON THE TEST RESULT

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

PELANGGAN / Customer			
1.	Nama <i>Name</i>	: LEON SUTANTO T. MATERIAL ITS	
2.	Alamat <i>Address</i>	: Kampus ITS Sukolilo, Surabaya	
BENDA UJI / Test Specimen			
1.	Tanggal Diterima <i>Date of Received</i>	: March 28, 2022	
2.	Spesimen Uji <i>Test Specimen</i>	: Stainless Steel Plate	
3.	Identifikasi Material <i>Identification of Material</i>	: 316	
4.	Proses Las /Posisi Las/Juru Las <i>Weld Process/Position/Welder</i>	: -	
5.	Proyek <i>Project</i>	: -	
PENGUJIAN / Testing			
1.	Tanggal Pengujian <i>Date of Testing</i>	: March 29, 2022	
2.	Lokasi Pengujian <i>Location of Testing</i>	: Laboratorium Uji Bahan PPNS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya	
3.	Jenis Pengujian <i>Type of Testing</i>	: Chemical Analysis	
4.	Kondisi Lingkungan <i>Environmental Condition</i>	: Suhu 27°C	
5.	Metode uji <i>Test Method</i>	: ASTM E1086-14	
ALAT / Equipment			
1.	Nama <i>Name</i>	: OES Foundry Master Pro	-
2.	Tipe/Model <i>Type/Model</i>	: Foundry Master Pro	-
3.	Kapasitas <i>Capacity</i>	: All Material / Global	-
4.	Merek/Buatan <i>Manufacturer</i>	: Oxford, Germany	-
5.	Nomor Seri <i>Serial Number</i>	: 44P0070	-
6.	Nilai Ketidak pastian <i>Number of uncertainty</i>	: -	-
7.	Keterelusuran <i>Traceability</i>	: LK-022-IDN	-
HASIL PENGUJIAN / Result of Testing		: (Terlampir) (Attached)	
DITERBITKAN TANGGAL / Date of Issue		: March 31, 2022	

Kalab. Uji Bahan
Head of DT & NDT Laboratory

Hendri Budi Kumyano, SST., MT
NIP. 199003072019031010

Keterangan / Notes :

1. Dilarang memperbanyak sertifikat ini dengan tujuan apapun tanpa ijin resmi dari PPNS
It is forbidden to copy this certificate for any purpose without permission from PPNS
2. Hasil pengujian ini tidak untuk dikonsumsi dan hanya berlaku untuk material yang diujikan dalam pengujian ini
This testing report is not for public consumption, it is only valid for tested material above

Halaman
1 dari 2



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 : 0387 /PL19/BJP/2022
Number

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. A.	Hendri Budi K.

Keterangan / Notes :

- Dilarang memperbanyak sertifikat ini dengan tujuan apapun tanpa ijin resmi dari PPNS
It is forbidden to copy this certificate for any purpose without permission from PPNS
- Hasil pengujian ini tidak untuk diumumkan dan hanya berlaku untuk material yang diujikan dalam pengujian ini
This testing report is not for public consumption, it is only valid for tested material above

Halaman
2 dari 2



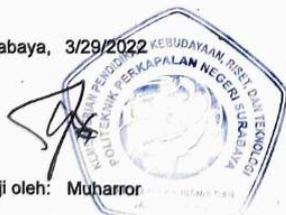
**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM UJI BAHAN**

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

2. Hasil Pengujian Tensile

Pengukuran Spesimen Uji Tarik



Spesimen Hasil Uji Tarik



Hasil Pengujian Tarik Spesimen SSWT

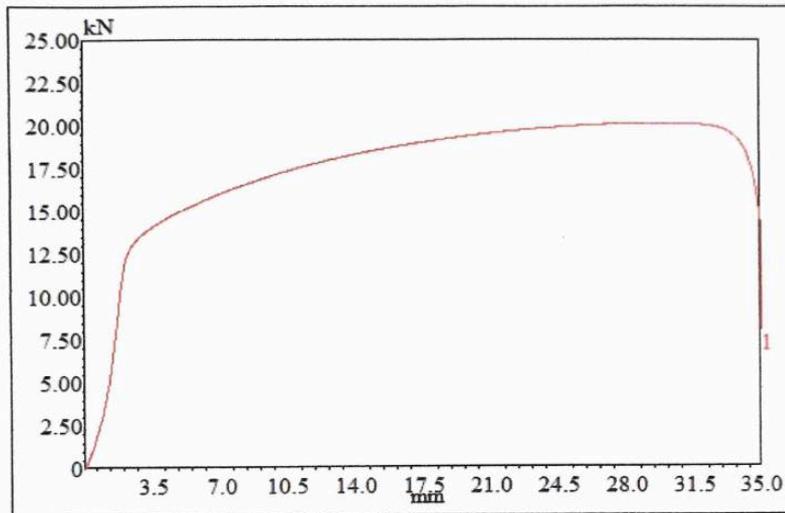


Laboratorium Metalurgi Manufaktur

Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember - Surabaya

Test Date : 23-05-2022

Test Result



Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm ²	Yield Point kN	Yield str. N/mm ²	Max. Load kN	UTS N/mm ²	Elong. %
316-0	12.73	2.86	36.41	12.91	355	20.14	553	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Hasil Pengujian Tarik SST5

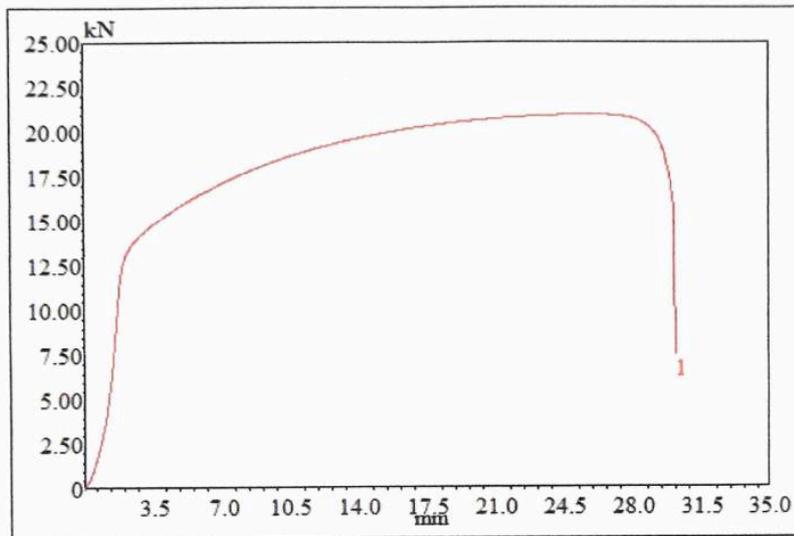


Laboratorium Metalurgi Manufaktur

Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember - Surabaya

Test Date : 23-05-2022

Test Result



Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm ²	Yield Point kN	Yield str. N/mm ²	Max. Load kN	UTS N/mm ²	Elong. %
316-5	12.55	2.82	35.39	13.28	375	20.97	593	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Hasil Pengujian Tarik SST7

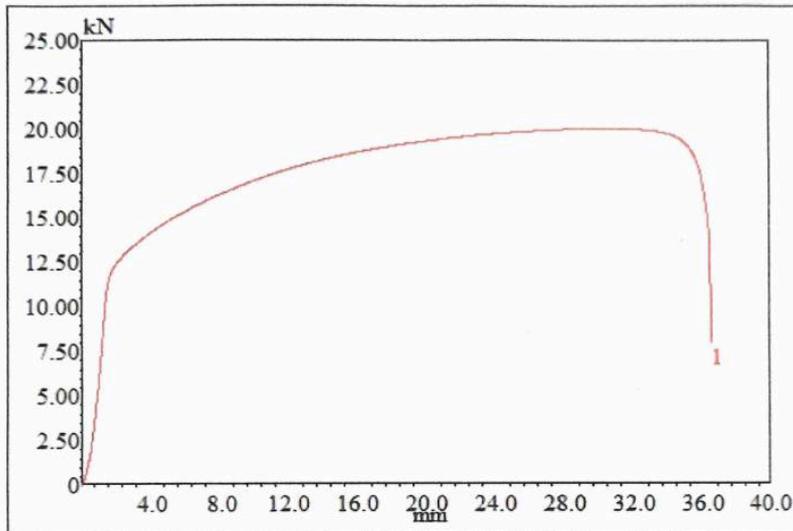


Laboratorium Metalurgi Manufaktur

Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember - Surabaya

Test Date : 23-05-2022

Test Result



Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm ²	Yield Point kN	Yield str. N/mm ²	Max. Load kN	UTS N/mm ²	Elong. %
316-7	12.47	2.90	36.16	11.81	327	20.02	554	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---

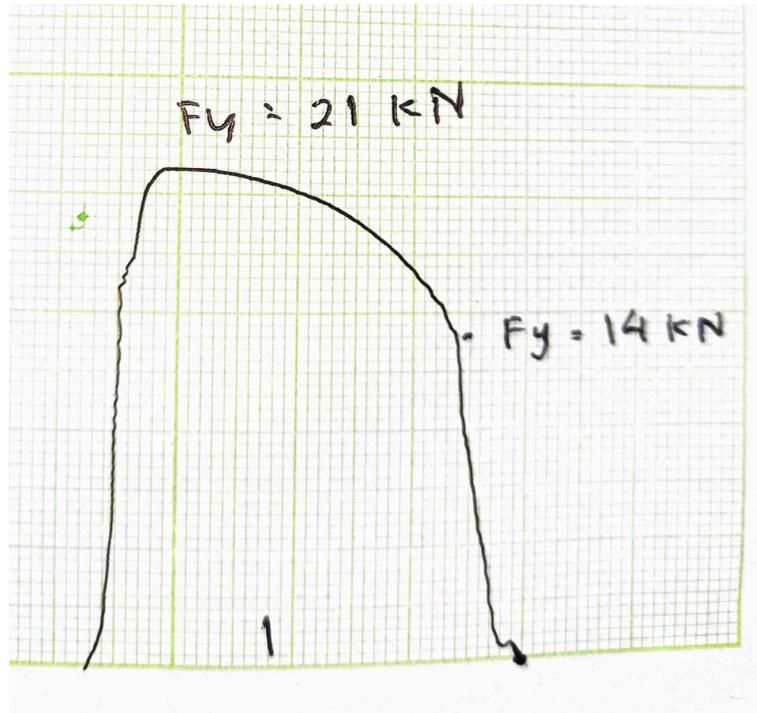


LABORATORIUM KONSTRUKSI DAN KEKUATAN KAPAL
DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
Gedung W – Lantai 1, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
Telp./Fax. 031 599 4933, Email: labkonjtp@gmail.com

REPORT ON TEST RESULT NO. : /IT2.4.1.1/PM.05.02/20

DATE : 21 Juni 2022
ORDER FROM :
TEST STANDARD : ASTM E8
MATERIAL SPECS. : Stainless Steel 316
PROJECT : Tugas Akhir

1. TENSION TEST										
NO	CODE MATERIAL	SPECIFICATION SAMPLE				TENSILE TEST RESULTS				REMARK
		WIDTH (mm)	THICK (mm)	DIA. (mm)	CSA (mm ²)	YIELD STRESS (MPa)	ULTIMATE STRESS (MPa)	ELONGATION (%)	REDUCT. of AREA (%)	
1	316A	12.54	2.85		35.339	390.79	587.59	42.98	74.26	
2	316B	12.55	2.85		35.368	405.36	608.09	42.98	65.39	
3	316C	12.38	2.85		35.283	368.45	609.36	44.8	62.73	
4	316D	12.41	2.85		35.368	367.56	593.75	45.18	65.67	
NO	F. YIELD		F. ULTIMATE		Lo	L1	D1 / Wd.1	Th.1	A1	
	KN	N	KN	N						
1	14	14000	21	21000	50	71.49	8.44	1.09	9.199	
2	14.5	14500	21.75	21750	50	71.24	8.48	1.46	12.381	
3	13	13000	21.5	21500	50	72.40	8.38	1.57	13.15	
4	13	13000	21	21000	50	72.59	8.49	1.43	12.1407	
Witnessed by :						The Laboratory Of Ships Strength And Construction FT. Kelautan ITS				
1.										
2.										
3.										
4.										
5.										



Contoh Perhitungan Yield Strength, Ultimate Tensile Strength dan Persentase Elongasi pada spesimen Stainless Steel 316 tanpa perlakuan

Beban Luluh (F_y) : 14 kN

Beban Maksimum (F_u) : 21 kN

Sehingga dapat dihitung nilai yield strength, ultimate strength, dan persentase elongasi sebagai berikut.

a. σ_y (Yield Strength)

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0} \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_y = \frac{14}{35,739} \times 1000 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_y = 391,728 \text{ MPa}$$

b. σ_u (Ultimate Strength)

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0} \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_u = \frac{21}{35,739} \times 1000 \text{ N/mm}^2$$

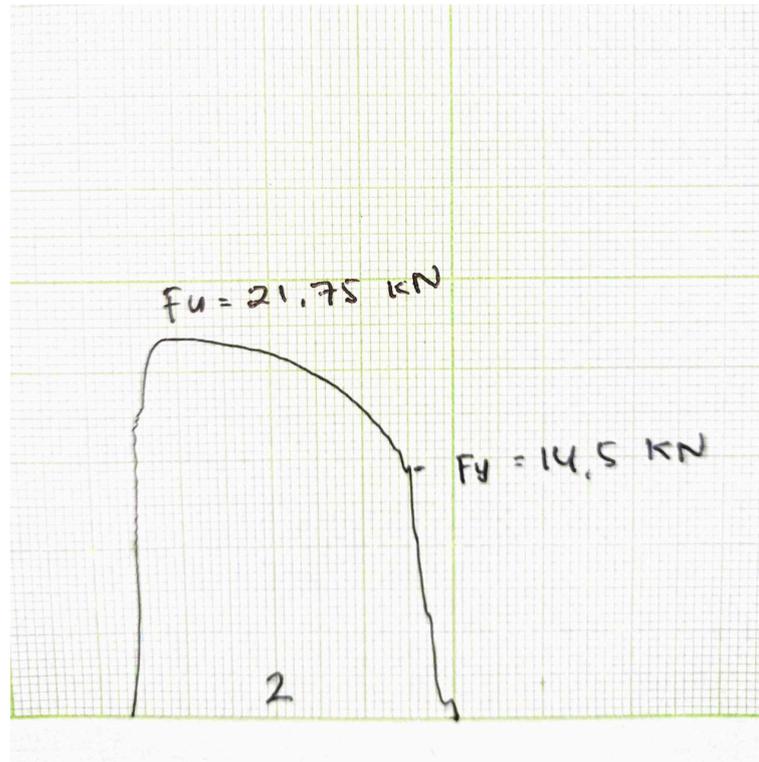
$$\sigma_u = 587,593 \text{ MPa}$$

c. % Keuletan

$$\% = \frac{l_f - l_0}{l_0} \%$$

$$\% = \frac{71,49 - 50}{50} \times 100\%$$

$$\% = 42.98 \%$$



Contoh Perhitungan Yield Strength, Ultimate Tensile Strength dan Persentase Elongasi pada spesimen Stainless Steel 316 dengan waktu sensitisasi 3 jam

Beban Luluh (F_y) : 14,5 kN

Beban Maksimum (F_u) : 21,75 kN

Sehingga dapat dihitung nilai yield strength, ultimate strength, dan persentase elongasi sebagai berikut.

a. σ_y (Yield Strength)

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0} \text{ N/mm}$$

$$\sigma_y = \frac{14,5}{35,768} \times 1000 \text{ N/mm}$$

$$\sigma_y = 405,390 \text{ MPa}$$

b. σ_u (Ultimate Strength)

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0} \text{ N/mm}$$

$$\sigma_u = \frac{21,75}{35,768} \times 1000 \text{ N/mm}$$

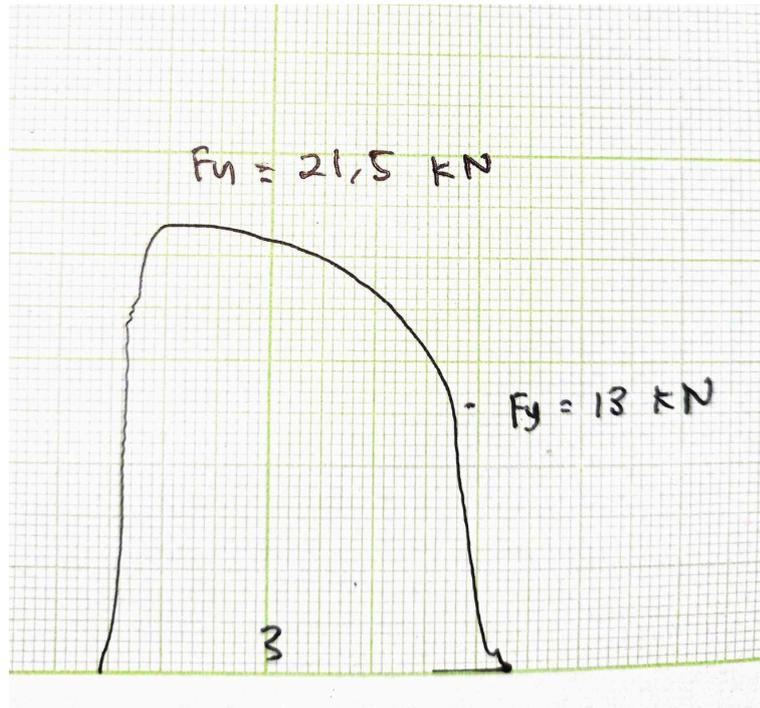
$$\sigma_u = 608,085 \text{ MPa}$$

c. % Keuletan

$$\% = \frac{l_f - l_0}{l_0} \%$$

$$\% = \frac{71,24 - 50}{50} \times 100\%$$

$$\% = 42,48 \%$$



Contoh Perhitungan Yield Strength, Ultimate Tensile Strength dan Persentase Elongasi pada spesimen Stainless Steel 316 dengan waktu sensitisasi 5 jam

Beban Luluh (F_y) : 13 kN

Beban Maksimum (F_u) : 21,5 kN

Sehingga dapat dihitung nilai yield strength, ultimate strength, dan persentase elongasi sebagai berikut.

a. σ_y (Yield Strength)

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0} \text{ N/mm}$$

$$\sigma_y = \frac{13}{35,283} \times 1000 \text{ N/mm}$$

$$\sigma_y = 368,449 \text{ MPa}$$

b. σ_u (Ultimate Strength)

$$\sigma_y = \frac{F_u}{A_0} \text{ N/mm}$$

$$\sigma_y = \frac{21,75}{35,283} \times 1000 \text{ N/mm}$$

$$\sigma_y = 616,444 \text{ MPa}$$

c. % Keuletan

$$\% = \frac{l_f - l_0}{l_0} \%$$

$$\% = \frac{72,40 - 50}{50} \times 100\%$$

$$\% = 44,8 \%$$



Contoh Perhitungan Yield Strength, Ultimate Tensile Strength dan Persentase Elongasi pada spesimen Stainless Steel 316 dengan waktu sensitisasi 5 jam

Beban Luluh (F_y) : 13 kN

Beban Maksimum (F_u) : 21 kN

Sehingga dapat dihitung nilai yield strength, ultimate strength, dan persentase elongasi sebagai berikut.

1. σ_y (Yield Strength)

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0} \text{ N/mm}$$

$$\sigma_y = \frac{13}{35,368} \times 1000 \text{ N/mm}$$

$$\sigma_y = 367,563 \text{ MPa}$$

2. σ_u (Ultimate Strength)

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0} \text{ N/mm}$$

$$\sigma_u = \frac{21}{35,368} \times 1000 \text{ N/mm}$$

$$\sigma_u = 593,757 \text{ MPa}$$

3. % Keuletan

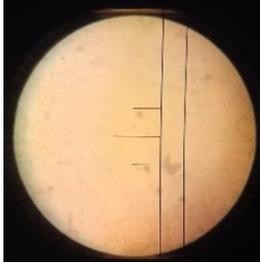
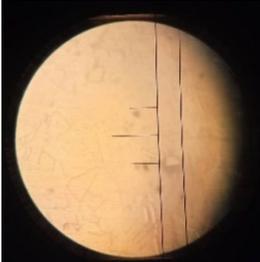
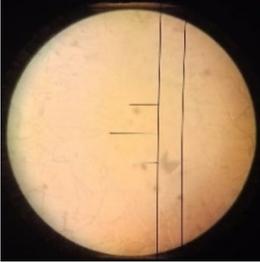
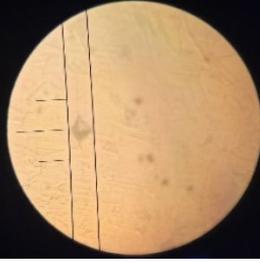
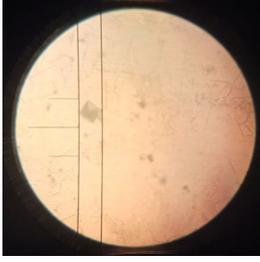
$$\% = \frac{l_f - l_0}{l_0} \%$$

$$\% = \frac{72,59 - 50}{50} \times 100\%$$

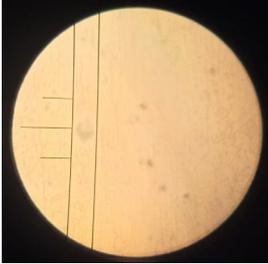
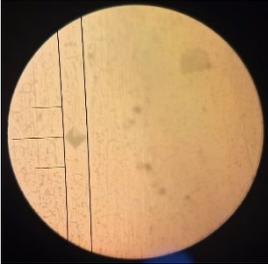
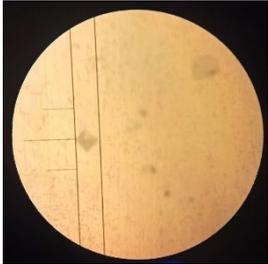
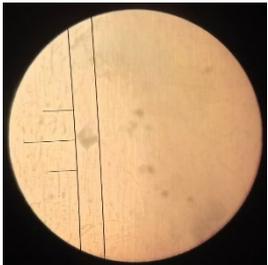
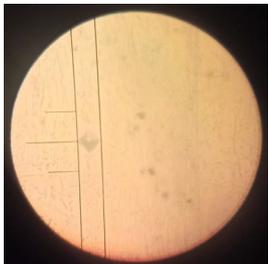
$$\% = 45,18 \%$$

3. Hasil Pengujian Kekerasan

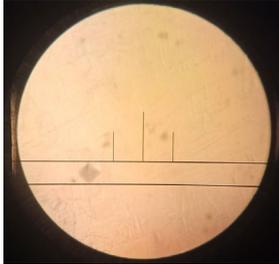
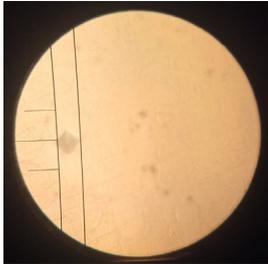
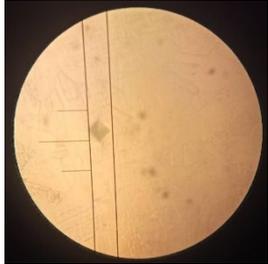
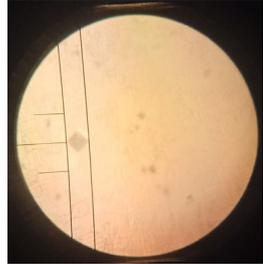
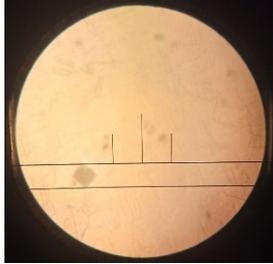
Hasil Indentasi dan Pengukuran Nilai Kekerasan SS 316 Tanpa Perlakuan

No.	Hasil Indentasi	Hasil Pengukuran
1		
2		
3		
4		
5		

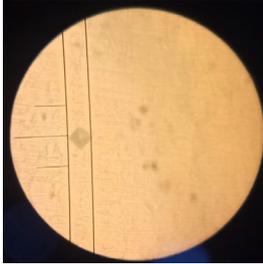
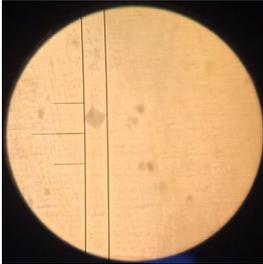
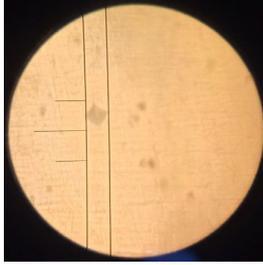
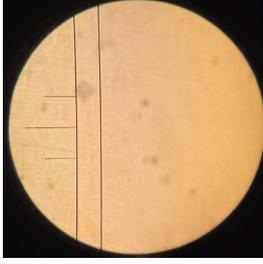
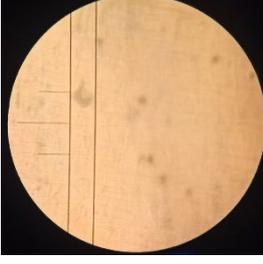
Hasil Indentasi dan Pengukuran Nilai Kekerasan SS 316 dengan
Perlakuan panas waktu sensitisasi 3 jam

No.	Hasil Indentasi	Hasil Pengukuran
1		 <p>218.8 HV0.1 CONVERSION: 218.8 HV(H) D1: 27.41 μm T. FORCE(mN) : 980 D2: 30.32 μm DWELL(s) : 10 LIMITS ↑ 0.0 ↓ 0.0 NO:01 X:218.8 S.DEV:0.0 R:0.0</p>
2		 <p>215.9 HV0.1 CONVERSION: 215.9 HV(H) D1: 29.35 μm T. FORCE(mN) : 980 D2: 29.26 μm DWELL(s) : 10 LIMITS ↑ 0.0 ↓ 0.0 NO:02 X:217.3 S.DEV:1.4 R:2.9</p>
3		 <p>216.9 HV0.1 CONVERSION: 216.9 HV(H) D1: 23.63 μm T. FORCE(mN) : 980 D2: 23.85 μm DWELL(s) : 10 LIMITS ↑ 0.0 ↓ 0.0 NO:03 X:217.2 S.DEV:1.2 R:2.9</p>
4		 <p>220.9 HV0.1 CONVERSION: 220.9 HV(H) D1: 29.01 μm T. FORCE(mN) : 980 D2: 28.94 μm DWELL(s) : 10 LIMITS ↑ 0.0 ↓ 0.0 NO:04 X:218.1 S.DEV:1.9 R:5.0</p>
5		 <p>221.8 HV0.1 CONVERSION: 221.8 HV(H) D1: 29.05 μm T. FORCE(mN) : 980 D2: 28.78 μm DWELL(s) : 10 LIMITS ↑ 0.0 ↓ 0.0 NO:05 X:218.8 S.DEV:2.2 R:5.9</p>

Hasil Indentasi dan Pengukuran Nilai Kekerasan SS 316 dengan
Perlakuan panas waktu sensitisasi 5 jam

No.	Hasil Indentasi	Hasil Pengukuran
1		 <p>231.7 HV0.1 CONVERSION: 231.7 HV(H) D1: 28.1 μm T. FORCE(mN) : 980 D2: 28.58 μm DWELL(s) : 10 LIMITS ↑0.0 ↓0.0 NO:01 X:231.7 S.DEV:0.0 R:0.0</p>
2		 <p>220.2 HV0.1 CONVERSION: 220.2 HV(H) D1: 29.06 μm T. FORCE(mN) : 980 D2: 28.98 μm DWELL(s) : 10 LIMITS ↑0.0 ↓0.0 NO:02 X:226.0 S.DEV:5.7 R:11.5</p>
3		 <p>227.0 HV0.1 CONVERSION: 227.0 HV(H) D1: 28.55 μm T. FORCE(mN) : 980 D2: 28.55 μm DWELL(s) : 10 LIMITS ↑0.0 ↓0.0 NO:03 X:226.3 S.DEV:4.7 R:11.5</p>
4		 <p>217.9 HV0.1 CONVERSION: 217.9 HV(H) D1: 29.26 μm T. FORCE(mN) : 980 D2: 29.09 μm DWELL(s) : 10 LIMITS ↑0.0 ↓0.0 NO:04 X:224.2 S.DEV:5.4 R:13.8</p>
5		 <p>200.1 HV0.1 CONVERSION: 200.1 HV(H) D1: 30.58 μm T. FORCE(mN) : 980 D2: 30.30 μm DWELL(s) : 10 LIMITS ↑0.0 ↓0.0 NO:05 X:219.3 S.DEV:10.8 R:11.6</p>

Hasil Indentasi dan Pengukuran Nilai Kekerasan SS 316 dengan
Perlakuan panas waktu sensitisasi 7 jam

No.	Hasil Indentasi	Hasil Pengukuran
1		
2		
3		
4		
5		

4. Perhitungan Ketebalan Batas Butir

Ketebalan batas butir dari masing-masing spesimen ditentukan dengan mengambil 10 titik secara acak dan kemudian ditentukan nilai rata-rata ketebalannya seperti sebagai berikut

Pengulangan	Ketebalan Batas Butir (μm)			
	SSWT	SST3	SST5	SST7
1	0.8003	1.075	1.056	1.044
2	0.5622	0.6504	1.016	0.9899
3	0.8203	0.9273	0.9307	1.8935
4	0.7927	0.7137	0.8032	0.9943
5	0.9641	0.934	1.024	1.022
6	0.7443	0.965	0.988	0.9888
7	0.9385	1.022	0.844	1.056
8	0.6814	0.9761	1.072	1.024
9	0.4692	0.8209	0.9387	0.9744
10	0.7523	0.8471	0.911	1.942
Rata-Rata	0.75253	0.89315	0.95836	1.19289

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. Allah SWT, 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. Ayah, Alm Ibu, Galih, Galang, serta Keluarga besar yang telah mendukung selama pengerjaan Tugas Akhir secara moral dan finansial, sehingga laporan Tugas Akhir dapat terselesaikan.
7. Alvin dan Mischell 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. Kelompok TA KTT Letsgo (Mischell, Alvin, Leon, 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. Pink Dragon yang telah memberikan banyak pengalaman berharga selama perkuliahan, serta semangat kepada penulis selama proses Tugas Akhir
11. Fantastic Four (Gilang, Juki, Zain, Nafis) yang telah menemani dan memberikan support kepada penulis dalam kehidupan perantauan.
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, 14 Juli 2022

Gilang Satriya Wicaksana

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis dengan nama Gilang Satriya Wicaksana lahir di Kebumen, 30 Agustus 1999. Penulis menempuh pendidikan formal dimulai dari Riwayat pendidikan dimulai dari SDIT Gema Nurani Bekasi pada tahun 2005 dan lulus pada tahun 2011. Lalu melanjutkan sekolah di SMPN 5 Kota Bekasi dimulai tahun 2011 dan lulus pada tahun 2014. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMAN 1 Kota Bekasi pada tahun 2014 dan lulus pada tahun 2017. 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 Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (HMMT FTIRS ITS) sebagai staf ahli Departemen Keprofesian dan Keilmiahan serta sebagai Koordinator Asisten Laboratorium Korosi dan Kegagalan Material. Dalam bidang akademik, penulis mengikuti Kerja Praktik pada posisi di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) pada tahun 2021. Untuk menyelesaikan studi S1, penulis melakukan penelitian di bidang studi Korosi dan Analisa Kegagalan dengan Tugas Akhir berjudul “*Studi Pengaruh Waktu Pemanasan Sensitisasi terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Stainless Steel 316 pada Temperatur 600°C*”. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email : satriawgilang@gmail.com, no.HP : 082213980545

(Halaman ini sengaja dikosongkan)