

**PENGARUH HEAT TREATMENT DAN VARIASI PENDINGINAN
TERHADAP KOROSI BATAS BUTIR PADA BAJA
STAINLESS STEEL 316**

**SKRIPSI
TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



MUHAMMAD ARIEF HIDAYAT
NIM. 165060201111043

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG

2020





LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH *HEAT TREATMENT* DAN VARIASI PENDINGINAN TERHADAP KOROSI BATAS BUTIR PADA BAJA *STAINLESS* *STEEL 316*

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



MUHAMMAD ARIEF HIDAYAT

NIM. 165060201111043

Skripsi telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing pada
tanggal 24 Juli 2020

Dosen Pembimbing I

Dr. Femiana Gapsari Madhi Fitri, ST., MT.
NIP. 19820704 200812 2 002

Dosen Pembimbing II

Francisca Gayuh Utami Dewi, ST., MT.
NIP. 2011038209192001



Mengetahui,
Ketua Program Studi Sarjana

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, Pasal 25 ayat 2 dan Pasal 70).

Malang, 24 Juli 2020

Mahasiswa,



Muhammad Arief Hidayat

NIM. 165060201111043



UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 037/JUN10.F07.12.21/PP/2020

Sertifikat ini diberikan kepada :

MUHAMMAD ARIEF HIDAYAT

Dengan Judul Skripsi :

**PENGARUH HEAT TREATMENT DAN VARIASI PENDINGINAN TERHADAP
KOROSI BATAS BUTIR PADA BAJA STAINLESS STEEL 316**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal **11 AUG 2021**



Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D
NIP. 19670518 199412 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

Dr. Eng Mega Nur Sasongko, ST, MT
NIP. 19740930 200012 1 001

JUDUL SKRIPSI:

Pengaruh *Heat Treatment* dan Variasi Pendinginan Terhadap Korosi Batas Butir Pada Baja *Stainless Steel* 316

Nama Mahasiswa : Muhammad Arief Hidayat

NIM : 1656060201111043

Program Studi : Teknik Mesin

Konsentrasi : Teknik Manufaktur

KOMISI PEMBIMBING:

Dosen Pembimbing 1 : Dr. Femiana Gapsari M.F., ST., MT.

Dosen Pembimbing 2 : Fransisca Gayuh Utami Dewi, ST., MT.

TIM DOSEN PENGUJI:

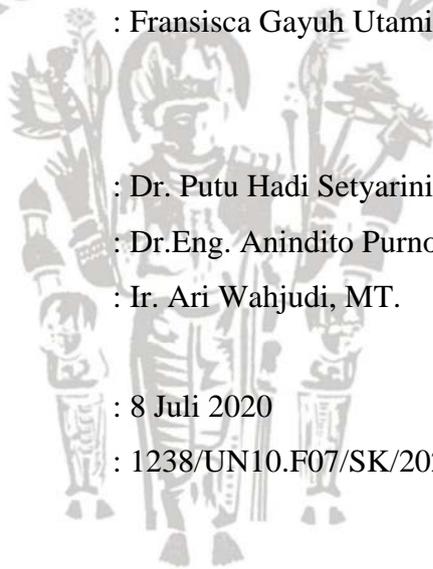
Dosen Penguji 1 : Dr. Putu Hadi Setyarini, ST., MT.

Dosen Penguji 2 : Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST., MT. Eng.

Dosen Penguji 3 : Ir. Ari Wahjudi, MT.

Tanggal Ujian : 8 Juli 2020

SK Penguji : 1238/UN10.F07/SK/2020







*Untuk Papa, Mama, dan Kakak-kakak Tercinta,
Terimakasih dari hati yang paling dalam,
Atas limpahan kasih sayang, materi dan memberikan semangat
yang sangat berarti dalam hidup saya*



DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| KATA PENGANTAR | i |
| DAFTAR ISI | iii |
| DAFTAR TABEL | v |
| DAFTAR GAMBAR | vii |
| DAFTAR LAMPIRAN | ix |
| RINGKASAN | xi |
| SUMMARY | xiii |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Batasan Masalah | 3 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.5 Manfaat Penelitian | 3 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1 Penelitian Sebelumnya | 5 |
| 2.2 <i>Stainless Steel</i> | 7 |
| 2.2.1 Macam-macam <i>Stainless Steel</i> | 8 |
| 2.3 <i>Stainless Steel</i> 316 | 9 |
| 2.4 Perlakuan Panas | 9 |
| 2.4.1 <i>Quenching</i> | 10 |
| 2.4.2 Media <i>Quenching</i> | 11 |
| 2.5 Definisi Korosi | 12 |
| 2.5.1 Klasifikasi Korosi | 13 |
| 2.6 Korosi Batas Butir (<i>Intergranular Corrosion</i>) | 16 |
| 2.7 Uji Metalografi | 18 |
| 2.7.1 Langkah-langkah Pengujian Metalografi | 18 |
| 2.8 <i>Hardness Test</i> (Kekerasan) | 20 |
| 2.9 Uji SEM-EDS | 21 |
| 2.10 Hipotesis | 21 |
| BAB III METODE PENELITIAN | 23 |
| 3.1 Metode Penelitian | 23 |
| 3.2 Tempat dan Waktu Penelitian | 23 |
| 3.3 Variabel Penelitian | 24 |



| | | |
|---|---|-----------|
| 3.4 | Alat dan Bahan Penelitian | 24 |
| 3.4.1 | Alat Penelitian | 24 |
| 3.4.2 | Bahan-bahan Penelitian | 30 |
| 3.5 | Dimensi Benda Kerja..... | 31 |
| 3.6 | Skema Penelitian..... | 32 |
| 3.6.1 | Skema <i>Heat Treatment</i> | 32 |
| 3.6.2 | Skema Pengujian..... | 33 |
| 3.7 | Prosedur Penelitian | 33 |
| 3.7.1 | Prosedur <i>Heat Treatment</i> | 33 |
| 3.7.2 | Prosedur Pengujian Kekerasan | 34 |
| 3.7.3 | Pengujian Mikrostruktur | 34 |
| 3.7.4 | Prosedur SEM-EDX | 34 |
| 3.7.5 | Pengujian Elektrokimia/Uji Korosi | 34 |
| 3.8 | Diagram Alir Penelitian | 35 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN..... | | 37 |
| 4.1 | Hasil Penelitian | 37 |
| 4.1.1 | Gambar Hasil Foto Mikrostruktur pada <i>Stainless Steel 316</i> | 37 |
| 4.1.2 | Analisis Gambar Hasil Foto Mikro Spesimen <i>Stainless Steel 316</i> | 38 |
| 4.2 | Data Hasil Kekerasan pada Spesimen <i>Stainless Steel 316</i> | 41 |
| 4.2.1 | Grafik Pengaruh Media Pendinginan terhadap Kekerasan..... | 44 |
| 4.3 | Data Hasil Pengujian SEM-EDS | 45 |
| 4.3.1 | Analisis Pengamatan pada Uji SEM-EDS..... | 46 |
| 4.4 | Data Hasil Pengujian Laju Korosi terhadap Variasi <i>Heat Treatment</i> | 46 |
| BAB V PENUTUP..... | | 49 |
| 5.1 | Kesimpulan | 49 |
| 5.2 | Saran | 49 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | | |
| LAMPIRAN..... | | |

DAFTAR TABEL

| No. | Judul | Halaman |
|-----------|--|---------|
| Tabel 3.1 | Komposisi Kimia <i>Stainless Steel</i> 316 | 30 |
| Tabel 4.1 | Hasil Uji Kekerasan <i>Stainless Steel</i> 316 | 41 |
| Tabel 4.2 | Hasil Pengujian Laju Korosi | 47 |





Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

| No. | Judul | Halaman |
|-------------|--|---------|
| Gambar 2.1 | Proses Pengkorosian Logam..... | 13 |
| Gambar 2.2 | Korosi Seragam Pada Pipa <i>Ballast</i> | 13 |
| Gambar 2.3 | <i>Intergranular Corrosion</i> | 14 |
| Gambar 2.4 | <i>Pitting Corrosion</i> | 14 |
| Gambar 2.5 | <i>Stress Corrosion Cracking</i> | 15 |
| Gambar 2.6 | <i>Errosion Corrosion</i> | 15 |
| Gambar 2.7 | <i>Galvanic Corrosion</i> | 16 |
| Gambar 2.8 | <i>Crivice Corrosion</i> | 16 |
| Gambar 2.9 | Presipitasi Karbida..... | 17 |
| Gambar 2.10 | Korosi Batas Butir Pada <i>Stainless Steel</i> Tersensitisasi..... | 18 |
| Gambar 2.11 | Pengujian <i>Rockwell Hardness</i> | 21 |
| Gambar 3.1 | <i>Powerhacksaw</i> | 24 |
| Gambar 3.2 | <i>Furnace</i> | 25 |
| Gambar 3.3 | <i>Centrifugal Sand Paper Machine</i> | 26 |
| Gambar 3.4 | Kertas Gosok..... | 26 |
| Gambar 3.5 | <i>Metal Polish</i> | 26 |
| Gambar 3.6 | Mikroskop Logam..... | 27 |
| Gambar 3.7 | Kamera..... | 27 |
| Gambar 3.8 | Alat Penguji Kekerasan..... | 28 |
| Gambar 3.9 | FE-SEM Quanta FEG 650 | 28 |
| Gambar 3.10 | Gelas Ukur | 29 |
| Gambar 3.11 | Pengujian Korosi | 29 |
| Gambar 3.12 | <i>Stainless Steel</i> 316..... | 30 |
| Gambar 3.13 | Oli | 30 |
| Gambar 3.14 | Air Es | 30 |
| Gambar 3.15 | NaCl 3,5% | 31 |
| Gambar 3.16 | Dimensi Benda Kerja (<i>Stainless Steel</i> 316)..... | 31 |
| Gambar 3.17 | Proses <i>Heat Treatment</i> | 32 |
| Gambar 3.18 | Skema Pengujian..... | 33 |
| Gambar 3.19 | Diagram Alir Penelitian | 35 |
| Gambar 4.1 | Foto Mikro Spesimen Tanpa Perlakuan..... | 37 |

Gambar 4.2 Foto Mikro Spesimen A, B dan C 37

Gambar 4.3 Foto Mikro Spesimen D, E dan F 38

Gambar 4.4 Persentase Pengendapan Krom Karbida Spesimen TP, A, B dan C 39

Gambar 4.5 Persentase Pengendapan Krom Karbida Spesimen D, E, F 40

Gambar 4.6 Pengaruh Media Pendinginan terhadap Kekerasan 44

Gambar 4.7 Foto uji SEM-EDS Spesimen TP, A, F 45

Gambar 4.8 Kurva Polarisasi Potensiodinamik 47



DAFTAR LAMPIRAN

| No. | Judul | Halaman |
|------------|-------------------------------|---------|
| Lampiran 1 | Data Hasil Uji Kekerasan..... | 53 |
| Lampiran 2 | Data Hasil Uji SEM-EDS | 55 |





Halaman ini sengaja dikosongkan

RINGKASAN

Muhammad Arief Hidayat, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juli 2020, Pengaruh *Heat Treatment* dan Variasi Pendinginan terhadap Korosi Batas Butir pada Baja *Stainless Steel 316*, Dosen Pembimbing: Dr. Femiana Gapsari Madhi Fitri, ST., MT. dan Fransisca Gayuh Utami Dewi ST., MT.

Korosi merupakan proses perusakan permukaan logam yang disebabkan oleh terjadinya reaksi kimia (reaksi elektrokimia) pada permukaan logam. Pada hakikatnya korosi adalah reaksi dimana logam dioksidasi sebagai akibat dari serangan kimia oleh lingkungan seperti uap air dan oksigen di atmosfer. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh *heat treatment* dan variasi pendinginan terhadap korosi batas butir pada baja *stainless steel 316*. Variasi media pendinginan setelah proses perlakuan panas mempengaruhi sifat mekanik suatu logam. Material akan semakin keras disaat dilakukan pendinginan cepat. Semakin keras material menyebabkan jumlah presipitasi karbida semakin sedikit. Semakin banyak presipitasi karbida pada batas butir menyebabkan menurunnya ketahanan korosi suatu material. Ketahanan korosi rendah menyebabkan laju korosi yang tinggi.

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental. Pengujian ini dilakukan dengan variasi media pendinginan air es, oli, dan tungku. Variasi temperatur dan waktu *holding* T1:1000°C *holding* 1 jam, dan T1:1000°C *holding* 1 jam, T2:450°C *holding* 2 jam. *Stainless steel 316* dengan dimensi 40mm x 10mm x 5mm.

Hasil penelitian ini menunjukkan hasil pengamatan mikrostruktur menunjukkan bahwa sampel yang mengalami *heat treatment* lebih lama berada pada temperatur sensitasi yaitu pada selang suhu (450°C - 870°C), ternyata korosi batas butir teramati sangat jelas. Sedangkan pada sampel yang tidak terlalu lama berada pada temperatur sensitasi korosi batas butir masih teramati tetapi tidak terlalu jelas. Dan nilai kekerasan material yang didapat berbanding terbalik dengan persentase korosi batas butirnya. Hasil dari pengujian laju korosi nilai terendah terdapat pada spesimen A yaitu 0.11269mm/year dan yang tertinggi pada spesimen F yaitu 0.42135mm/year.

Kata Kunci: *Heat Treatment, Media Pendinginan, Korosi Batas Butir, Stainless Steel 316*



Halaman ini sengaja dikosongkan

SUMMARY

Muhammad Arief Hidayat, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, July 2020, *The Influences of Heat Treatment and Cooling Variation on Intergranular Corrosion in Stainless Steel 316*, Advisor Lecturer: Dr. Femiana Gapsari M.F. ST., MT. dan Fransisca Gayuh Utami Dewi ST., MT.

Corrosion is a process of damaging metal surfaces caused by chemical reactions (electrochemical reactions) on metal surfaces. In essence, corrosion is a reaction in which metals are oxidized as a result of chemical attacks by the environment such as water vapor and oxygen in the atmosphere. This study was conducted to determine the effect of heat treatment and cooling variations on grain boundary corrosion in stainless steel 316. Variation of the cooling media after the heat treatment process affects the mechanical properties of a metal. The material will get harder when cooling down quickly. The harder the material causes the less amount of carbide precipitation. The more carbide precipitation at the grain boundary causes the corrosion resistance of a material to decrease. Low corrosion resistance causes a high corrosion rate.

This research was conducted by an experimental method. This test is carried out with a variety of cooling media ice water, oil, and furnace. Variations in temperature and holding time T1: 1000°C holding 1 hour, and T1: 1000°C holding 1 hour, T2: 450°C holding 2 hours. 316 stainless steel with dimensions of 40 mm x 10 mm x 5 mm.

The results of this study showed that the results of microstructure observations showed that the samples that underwent longer heat treatment were at their sensational temperature at the temperature interval (450°C - 870°C), apparently the grain boundary corrosion was observed very clearly. Whereas in samples not too long in the corrosion sensitivity temperature grain boundaries are still observed but not very clear. And the hardness value of the material obtained is inversely proportional to the percentage of grain corrosion. The results of the lowest corrosion rate test are found in specimen A which is 0,11269 mm/year and the highest in specimen F is 0,42135 mm / year.

Keywords: Heat Treatment, Cooling Variatioons, Intergranular Corrosion, Stainless Steel 316



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, baja tahan karat merupakan paduan logam yang mempunyai posisi unik sebagai bahan struktur untuk keperluan diberbagai industri. Seri baja tahan karat sudah dikembangkan sejak lama dan sudah mendunia pemakaiannya karena baja tahan karat mempunyai sifat fisik, kimia, mekanik dan teknologi yang memenuhi berbagai keperluan industri sebagai bahan struktur karena relatif mempunyai sifat yang lebih baik bila dibandingkan dengan paduan lainnya. Salah satu seri baja tahan karat berdasarkan fasa penyusunnya adalah baja tahan karat seri austenit. Baja tahan karat seri austenit mempunyai komposisi kimia untuk krom berkisar 16 – 20 persen dan nikel berkisar 8 – 12 persen serta unsur pepadu yang lain seperti Ti, Mn, Mo telah digunakan secara luas diberbagai industri. Penggunaan baja tahan karat di industri nuklir cukup banyak pemakaiannya baik di sirkuit primer maupun sirkuit sekunder pada reaktor berpendingin air ringan (*light water reactor/PWR*). Pada sirkuit primer baja tahan karat jenis austenit SS 316 banyak digunakan untuk bahan struktur *steam dryer*, bejana, sistem pipa, inti reaktor dan pompa reaktor. Sedangkan di sirkuit sekunder baja tahan karat SS 316 banyak digunakan untuk pipa *preheater* dan pipa *condenser* yang pengoperasiannya sangat berpotensi untuk terjadinya korosi. (Prajitno dan Setiawan, 2019)

Stainless steel terbagi menjadi 3 tipe, yaitu austenitik, feritik dan martensitik. *Stainless steel* 316 termasuk kedalam tipe austenitik. Bila *stainless steel* tipe austenitik mengalami perlakuan panas dan mengalami pendinginan lambat dari temperatur tinggi antara 800°C sampai 500°C maka dapat terjadi presipitasi karbida krom pada batas butirnya. Presipitasi karbida krom mengakibatkan batas butir kekurangan krom sehingga sifat tahan korosi dapat berkurang. Laju korosi suatu material dipengaruhi bahan pengkorosif yang bereaksi dengan material tersebut. Pada dasarnya material akan mengalami korosi bila bereaksi dengan air H₂O dan Udara O₂ (Soewefy dan Prasetyawan, 2017). *Stainless steel* 316 adalah baja tahan karat austenitik yang banyak digunakan pada aplikasi temperatur tinggi. Baja ini memiliki kadar karbon yang cukup tinggi yaitu 0,25%. (Zakiyya dan Drastiawati, 2016)

Korosi merupakan proses perusakan permukaan logam yang disebabkan oleh terjadinya reaksi kimia (reaksi elektrokimia) pada permukaan logam. Pada hakikatnya



korosi adalah reaksi dimana logam dioksidasi sebagai akibat dari serangan kimia oleh lingkungan seperti uap air dan oksigen di atmosfer. Korosi merupakan reaksi redoks antara suatu logam dengan berbagai zat di lingkungannya yang menghasilkan senyawa-senyawa yang tak dikehendaki. Dalam bahasa sehari-hari, korosi disebut perkaratan. Contoh korosi yang paling lazim adalah perkaratan besi. Pada peristiwa korosi, logam mengalami oksidasi, sedangkan oksigen (udara) mengalami reduksi. Karat logam umumnya adalah berupa oksida dan karbonat. Rumus kimia karat besi adalah $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, suatu zat padat yang berwarna coklatmerah. (Wahyuningsih dkk, 2017). Korosi juga sering disebut sebagai proses perkaratan suatu logam, yang mengakibatkan berat logam berkurang, yang lama-kelamaan logam tersebut terurai dari paduannya. Perlu diketahui secara bertahap karakteristik dari korosi dari bahan – bahan yang digunakan dalam industri untuk menentukan kemungkinan terbesar dari kontrol korosi dan strategi pencegahannya (Oluwole, et al, 2013).

Korosi merupakan bahaya nasional yang nyata yang tingkat kerugiannya lebih besar dari segala bencana alam yang pernah dialami (Widharto, 2004). Penyebab korosi secara umum ada 2 macam yaitu korosi kimia dan korosi elektrolit. Berkaratnya besi dan baja disebabkan kedua hal di atas yaitu terjadinya proses reaksi antara besi atau baja dengan oksigen yang terdapat dalam atmosfer membentuk lapisan oksida pada permukaan logam (Amanto, 2006).

Korosi batas butir adalah terdapatnya presipitasi karbida Cr pada batas butir, yang menyebabkan daerah tersebut kekurangan Cr di dekatnya, dari daerah tersebut korosi dimulai. Dalam keadaan tertentu karbida Cr sendiri kena korosi. Karbida Cr berpresipitasi pada daerah temperatur $(500-900)^\circ\text{C}$, dan pada $(600-800)^\circ\text{C}$ nilai presipitasi paling tinggi. (Budianto dkk, 2009)

Salah satu cara untuk meningkatkan nilai kekerasan lapisan pada *stainless steel* 316 dilakukan proses perlakuan panas dengan beberapa variasi temperatur pemanasan. Dari hasil tersebut diketahui pengaruh *heat treatment* pada nilai kekerasan lapisan serta mendapatkan nilai kekerasan yang optimum untuk aplikasi pada pipa boiler (Martides dkk, 2019). Sedangkan untuk mengurangi tingkat kerusakan akibat korosi batas butir (*intergranular*) yaitu dengan melakukan pendinginan cepat (*quenching*) pada material yang terpapar temperatur sensitasi. Namun perlakuan *quenching* tidak dapat menghindari sensitasi pada material-material tebal, khususnya pada area bagian tengah material. Dengan menganalisa kecepatan pendinginan telah ditemukan bahwa sensitasi pada material yang diberi perlakuan *quenching* lebih cepat terjadi pada rentang temperatur $800-900^\circ\text{C}$

dibanding dengan material yang dipanaskan pada temperatur 1000°C. Material yang dipanaskan pada *range* temperatur sensitasi lebih rendah membutuhkan laju pendinginan yang lebih cepat untuk menghindari terjadinya sensitasi. Maka untuk membantu deteksi terjadinya sensitasi pada baja tahan karat austenitik, proses *heat treatment* dilakukan untuk mengetahui perubahan mikrostruktur yang terjadi dan juga hasilnya akan bervariasi. (Zakiyya dan Drastiawati, 2016)

Untuk mengetahui pengaruh pemberian perlakuan panas (*Heat Treatment*) pada material terkait terhadap korosi, dilakukan penelitian tentang pengaruh perlakuan panas dan variasi pendinginan terhadap korosi batas butir pada *stainless steel* 316.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, rumusan masalah dari penelitian, ini adalah bagaimana pengaruh *heat treatment* dengan variasi media pendinginan terhadap korosi batas butir pada *stainless steel* 316.

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terarah, maka dalam pelaksanaannya perlu ada batasan-batasan masalah sebagai berikut.

1. Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah *stainless steel* 316.
2. Hal yang diamati dalam penelitian ini adalah korosi batas butir tanpa membahas jenis korosi lainnya.
3. Faktor-faktor lain yang mempengaruhi korosi dianggap konstan dalam setiap pengujian.
4. Faktor-faktor lain yang mempengaruhi proses *heat treatment* dianggap konstan dalam setiap pengujian.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui pengaruh *heat treatment* dengan variasi media pendinginan terhadap korosi batas butir pada *stainless steel* 316.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Dapat memberikan solusi baru dalam menanggulangi permasalahan korosi, terutama yang terjadi pada sistem pipa dan pompa reaktor.

Menjadi referensi untuk mengembangkan penelitian lebih lanjut dibidang korosi maupun korosi batas butir yang nantinya akan dilakukan.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Ajiriyanto dkk (2008) meneliti tentang pengaruh perlakuan panas terhadap ketahanan korosi batas butir baja tahan karat tipe 316. Didapatkan hasil Perlakuan panas *normalizing* dan *solution annealing* pada bahan SS 316 berpengaruh terhadap laju korosi. Pada rentang suhu 550 – 650 bahan SS 316 telah mengalami sensitasi dan rentan terhadap serangan korosi batas butir. Pada proses *solution annealing* semakin tinggi suhu maka semakin tinggi pula laju korosinya. Perlakuan panas pada rentang suhu 550 dan 650°C menghasilkan laju korosi paling besar dengan jenis korosi yaitu korosi batas butir. Laju korosi perlakuan *solution annealing* pada suhu 550 dan 650°C menghasilkan laju korosi lebih kecil dibandingkan dengan perlakuan *normalizing* pada suhu yang sama, dengan perbedaan laju korosi sebesar 35,82 *mpy* untuk suhu 550°C dan 24,97 *mpy* untuk suhu 650°C. Proses pelarutan atau *solution treatment* pada suhu 1000°C selama 3 jam dan di *quenching*, mampu membuat bahan SS 316 lebih stabil dan mampu mencegah terbentuknya senyawa kromium karbida di batas butir apabila bahan tersebut dipanaskan kembali pada suhu tinggi. Oleh karena itu, pada aplikasi suhu tinggi atau pada proses pengelasan perlu dilakukan perlakuan pelarutan supaya bahan SS 316 lebih tahan terhadap serangan korosi batas butir.

Penelitian tentang pengaruh perlakuan panas terhadap struktur mikro dan ketahanan korosi baja tahan karat martensitik 13Cr-1Mo yang dilakukan (Prifiharni dkk, 2016), didapatkan hasil Perubahan suhu austenitisasi dan suhu *temper* dapat merubah struktur mikro dan ketahanan korosi baja tahan karat ini. Secara umum struktur mikro yang terbentuk dari perlakuan panas yang diberikan mengandung martensit yang berbentuk bilah (*lath martensit*), karbida logam, dan austenit sisa. Peningkatan suhu *temper* dapat meningkatkan ketahanan korosi hingga pada suhu *temper* 650°C. Peningkatan ketahanan korosi pada baja tahan karat martensitik 13Cr-1Mo ini diakibatkan oleh munculnya karbida $M_{23}C_6$ di dalam *tempered martensite*.

Dipenelitian lainnya (Sumaraw, 2010) meneliti tentang pengaruh *heat treatment* terhadap struktur mikro dan kekerasan baja CrMoV dengan media *Quenching* yang berbeda. Didapatkan hasil baja CrMoV ini dapat ditingkatkan nilai kekerasannya menjadi

2,3 kali lipat dari kekerasan awal dengan nilai kekerasan sebesar 278,42 HV, perlakuan panas *hardening*, dan perbandingan celup di air mengakibatkan nilai kekerasan naik menjadi sebesar 909,84 HV. Peningkatan nilai kekerasan ini (dengan media pendinginan air) diakibatkan karena terbentuknya struktur martensit yang ditandai dengan banyaknya garis-garis halus menyerupai jarum yang merupakan ciri-ciri dari struktur martensit dengan latar belakang terang. Baja CrMoV ini termasuk dalam kelompok baja hiper eutektoid, karena kandungan karbon 1,4% lebih besar dari 0,8%.

Pengaruh variasi temperatur pada proses *heat treatment* baja S45C dengan beberapa media pendinginan terhadap kekerasan dan struktur mikro. Didapatkan hasil uji kekerasan dengan media pendingin udara disuhu 750 dan 950 mengalami penurunan kekerasan, media pendingin solar di suhu 750 mengalami peningkatan kekerasan, tetapi media pendingin solar disuhu 950 mengalami penurunan kekerasan. Pengaruh media pendingin udara di suhu 750 pada struktur mikro terlihat terbentuknya struktur *fine perlite*, yang dibuktikan dengan menurunnya nilai kekerasan, dan pada media pendingin udara di suhu 950 juga mengalami penurunan akibat terbentuknya struktur *fine perlite*, *fine perlite* memiliki nilai kekerasan yang lebih rendah dibandingkan dengan *coarse perlite*. Pengaruh media pendingin solar di suhu 750 mengakibatkan terbentuknya struktur perlit lebih banyak dari ferit, dan pada media pendingin solar di suhu 950 terbentuk struktur martensit, dan austenit sisa. Kekerasan yang paling tinggi terjadi pada media pendingin solar di suhu 750 dengan nilai kekerasan rata-rata dari 3 spesimen yaitu: 335 VHN, 431 VHN dan 359 VHN, penelitian ini dilakukan oleh (Agung, 2017).

Budianto dkk (2009) meneliti tentang pengamatan struktur mikro pada korosi batas butir dari material baja tahan karat austenitik setelah mengalami proses pemanasan. Didapatkan hasil dari pengamatan gambar struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan SEM diketahui bahwa sampel yang mengalami perlakuan panas di bawah temperatur sensitisasi yaitu pada suhu 400°C, ternyata korosi antar butir tidak teramati. Dari pengamatan gambar struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan SEM diketahui bahwa sampel yang mengalami perlakuan panas pada temperatur sensitisasi yaitu pada suhu 500°C s/d 900°C, ternyata korosi antar butir teramati dengan jelas. Dari pengamatan gambar struktur mikro menggunakan mikroskop optik sampel yang mengalami perlakuan panas di atas temperatur sensitisasi yaitu pada suhu 950°C, ternyata antar butir masih teramati tetapi tidak sejelas sampel yang mengalami perlakuan panas pada temperatur sensitisasi. Dari pengamatan menggunakan EDS diketahui bahwa sampel yang mengalami perlakuan panas dengan suhu 900°C waktu penahanan 3 jam dibandingkan dengan sampel

yang mengalami perlakuan panas dengan suhu 900°C waktu penahanan 3½ jam komposisi unsur karbon (C) dan krom (Cr) pada batas butir mengalami penurunan yaitu dari 0,61% massa menjadi 0,47% massa untuk karbon (C) dan untuk khrom (Cr) dari 18,37% massa menjadi 17,76% massa.

2.2 Stainless Steel

Stainless steel adalah kelompok baja paduan tinggi yang memiliki ketahanan korosi yang baik. Unsur paduan utama dalam *stainless steel* adalah kromium. Kromium dalam paduan yang membentuk lapisan oksida tipis, oksida tersebut tahan dalam atmosfer pengoksidasi yang melindungi permukaan dari korosi. Nikel adalah paduan lainnya yang digunakan dalam *stainless steel* tertentu untuk meningkatkan perlindungan korosi. Karbon digunakan untuk memperkuat dan meningkatkan kekerasan logam. Namun, meningkatkan kandungan karbon memiliki efek mengurangi perlindungan terhadap korosi karena bentuk karbida krom mengurangi jumlah Cr bebas (Groover, 2010). Material *stainless steel* pengaplikasiannya banyak digunakan dalam sistem pipa dan pompa reaktor disebabkan oleh kekuatannya yang tinggi, tahan terhadap korosi dan cenderung memiliki harga yang murah (Prajitno dan Setiawan, 2019).

Karakteristik *stainless steel* diantaranya:

1. Persen krom (Cr) yang tinggi

Kandungan *Chromium* yang terkandung pada *stainless steel* biasanya diatas 15%. Pelindung yang paling utama terhadap gejala yang ditimbulkan secara alamiah oleh kondisi lingkungan sekitar adalah kandungan unsur *Chromium* ini.

2. Kekuatan dan kekerasan yang tinggi

Stainless steel bila dibandingkan dengan baja ringan cenderung mempunyai kekuatan tarik yang lebih tinggi. *Stainless steel duplex* memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan *stainless steel austenitic*. Kekuatan tarik yang paling tinggi pada martensit (431) dengan nilai presipitasi (17,4 pH). Nilai ini mempunyai nilai kekuatan dua kali lebih besar dari jenis 316 maupun 304, yang merupakan *stainless steel* paling sering dipakai.

3. Tahan korosi

Proses galvanize diperlukan oleh logam lain agar dapat terlindungi dari terjadinya korosi, akan tetapi *stainless steel* memiliki sifat alamiah untuk tahan terhadap terjadinya korosi tanpa menggunakan metode pabrikasi. Sifat tahan korosi yang dimiliki *stainless steel* didapatkan dari unsur *Chromium* yang tinggi yang terdapat

didalamnya. Pada permukaan *stainless steel* mempunyai lapisan oksidasi yang sangat stabil sehingga mengakibatkan *stainless steel* tahan terhadap pengaruh yang diberi oleh oksigen. Lapisan oksida yang erdapat di permukaan *stainless steel* memiliki sifat *self healing* (penyembuh diri) yang akan tetap utuh walaupun permukaan dari *stainless steel* ini dirusak ataupun dipotong.

4. *Low Maintenance and Durable*

Semua peralatan yang dibuat menggunakan material *stainless steel* tidak memerlukan perawatan yang rumit. *Stainless steel* memiliki karakteristik yaitu tahan terhadap korosi yang tentunya membuat material ini memiliki umur yang lebih panjang dan tidak mudah rusak yang diakibatkan oleh oksidasi.

2.2.1 Macam-Macam *Stainless Steel*

Stainless steel dapat dibagi menjadi empat kelompok, yaitu:

1. Ferritik *Stainless Steel*

Tipe ferritik *Stainless Steel* (4xx), terdiri dari 10,5-30% Cr dengan penambahan Mn, Si, selain itu juga sering kali ditambahkan Mo, Ni, Al, Ti, atau Nb untuk sifat khusus yang diinginkan. *Stainless Steel* tipe ini tidak dapat dinaikkan kekerasannya dengan perlakuan panas. Temperatur transisi dari getas ke ulet lebih tinggi dibandingkan dengan temperature kamar. Kekuatan luluh pada *Ferrite Stainless Steel* sekitar 275 – 415 MPa (40-60 ksi). *Stainless Steel* tipe ini sering digunakan karena memiliki sifat ulet, ketahanan korosi pada medium cairan, oksidasi pada temperatur tinggi, ketahanan pada korosi sumuran dan *cracking corrosion*, dan harganya lebih murah dibandingkan *austenitic Stainless Steels*. Berdasarkan standar, *ferrite Stainless Steel* memiliki tipe 405, 409, 429, 430, 430F, 430F-Se, 434, 436, 439, 444, dan 446.

2. Baja tahan karat martensitik

Stainless steel martensitik (4xx) tipe ini memiliki kandungan 11,5–18% Cr, 0,08–1,20% C, dan elemen paduan lainnya yang kurang dari 2-3%. *Stainless steel* ini dapat dikeraskan dan di-*tempering* hingga mendapatkan kekuatan luluh sebesar 550-1900 MPa. Seri martensit juga memungkinkan untuk dilakukan proses pemanasan setelah melalui proses *anealling*, *tempering*, atau perlakuan peningkatan kekerasan (*hardened*).

3. *Austenitic Stainless Steel*

Stainless steel tipe ini umumnya terdiri dari paduan 16 – 26% Cr, 0,75 – 19,0% Mn, 1 – 40% Ni, 0,03 – 0,35% C, dan kandungan N sebagai penstabil austenite pada

temperatur ruang dan kenaikan temperature tertentu. Pada seri 2xx (Cr-Mn-Ni) baja mengandung N, 5,5–15,5% Mn, dan mencapai 6% Ni. Sedangkan pada seri 3xx (Cr-Ni) mengandung kadar Ni yang cukup banyak dan Mn yang mencapai 2%. Mo, Cu, dan Si yang ditambahkan untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi. Ti dan Nb untuk menurunkan sensitifitas terhadap *intergranular corrosion* (korosi pada batas butir). Proses perlakuan panas pada *austenitic stainless steel* tidak dapat menaikkan kekerasan akan tetapi dapat dilakukan melalui pengerjaan pendingin. Pemanasan yang dilakukan pada temperatur 427 – 871°C menyebabkan kromium membentuk endapan batas butir sehingga berpengaruh pada ketahanan korosi.

4. *Precipitation Hardening Steel*

Tipe ini merupakan paduan yang memiliki kekuatan tinggi dengan sifat keuletan dan ketahanan korosi yang bagus yang diperoleh dari proses perlakuan panas untuk mendapatkan struktur martensit dan perlakuan pada temperatur yang rendah. Adapun elemen paduannya adalah Mo, Cu, Al, Ti, Nb, dan N. Baja tahan karat ini diklasifikasikan berdasarkan tipe *martensitic*, tipe *semi-austenitic*, dan tipe *austenitic*

2.3 *Stainless Steel 316*

Baja tipe 316 ini adalah baja tahan karat austenitik kromium-nikel yang mengandung molybdenum, yang merupakan baja yang memiliki ketahanan karat yang cukup baik, khususnya ketahanan terhadap korosi lubang yang biasanya terjadi akibat adanya kontaminasi dengan larutan klorida. Tipe 316 ini didesain untuk meminimalisasi terjadinya pengendapan karbida selama proses pemanasan.

Pada umumnya *stainless steel* jenis ini digunakan pada, industri kelautan, industri pengolahan makanan, industri pipa air, industri farmasi dan kesehatan, kontruksi bangunan dan peralatan rumah tangga. Tipe *stainless steel 316* ini juga merupakan salah satu tipe *stainless steel* yang dipakai pada pompa reaktor

2.4 **Perlakuan Panas**

Proses perlakuan panas adalah kombinasi dari operasi pemanasan dan pendinginan dengan kecepatan tertentu yang dilakukan terhadap logam / paduan dalam keadaan padat, sebagai salah satu upaya untuk memperoleh sifat-sifat tertentu. Proses perlakuan panas pada dasarnya terdapat beberapa tahapan, dimulai dengan pemanasan sampai ke temperatur tertentu, lalu diikuti dengan penahanan selama beberapa saat, baru kemudian dilakukan pendinginan dengan kecepatan tertentu. Melalui perlakuan panas yang tepat,

tegangannya dapat dihilangkan, besar butir diperbesar atau diperkecil, ketangguhan dapat ditingkatkan atau dapat dihasilkan suatu permukaan yang keras di sekeliling inti yang ulet (Sidiq dkk, 2016).

Proses *heat treatment* merupakan salah satu proses yang penting dalam pembuatan bagian-bagian mesin dan perkakas. Proses *heat treatment* dapat diterapkan pada baja karbon selain untuk mengeraskan baja juga dipergunakan untuk memperbaiki sifat kekerasan suatu material.

Menurut Sumaraw (2010) dalam proses perlakuan panas ada beberapa faktor yang menentukan dan mempengaruhi, yaitu:

a. Temperatur Pemanasan

Pemberian panas sampai temperatur yang telah ditentukan pada proses perlakuan panas sampai mencapai temperatur transformasi dilakukan. Besarnya temperatur penahanan yang digunakan untuk mencapai daerah transformasi tertentu berpengaruh terhadap penyebaran *ferrite* dan *cementite*. Untuk mendapatkan penyebaran *ferrite* dan *cementite* yang baik, pemanasan dilakukan secara perlahan, sehingga transformasi berjalan linier bersama naiknya temperatur yang timbul pada baja.

b. Waktu Penahanan (*Holding*)

Holding dilakukan setelah temperatur pemanasan telah mencapai temperatur yang diinginkan. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan bentuk struktur kristal yang sempurna pada temperatur transformasi sehingga waktu tahan digunakan sesuai dengan kebutuhan pengujian serta disesuaikan dengan material yang akan diuji.

c. Kecepatan Pendinginan

Kecepatan pendinginan berpengaruh terhadap hasil transformasi dan sifat mekanik. Untuk mengetahui struktur yang terjadi apabila baja didinginkan dari temperatur austenit dengan kecepatan pendinginan tertentu. Kecepatan pendinginan yang lebih tinggi akan lebih cepat terjadinya kelarutan karbida. Dengan demikian perlu diperhatikan proses pendinginan yang akan dilakukan serta media pendinginan yang akan dipakai.

2.4.1 *Quenching*

Proses *quenching* adalah proses *heat transfer* (perpindahan panas) dengan laju yang sangat cepat. Pada perlakuan *quenching* terjadi percepatan pendinginan dari temperatur akhir perlakuan dan mengalami perubahan dari austenite menjadi bainite dan martensite untuk menghasilkan kekuatan dan kekerasan yang tinggi. Pengerasan maksimum yang

dapat dicapai baja yang di-*quench* hampir sepenuhnya ditentukan oleh konsentrasi karbon dan kecepatan pendinginan yang sama atau lebih tinggi dengan kecepatan pendinginan kritis untuk paduan tersebut (Pramono, 2011).

2.4.2 Media *Quenching*

Proses *quenching* dilakukan pendinginan secara cepat dengan menggunakan media udara, air sumur, oli dan larutan garam. Kemampuan suatu jenis media dalam mendinginkan spesimen bisa berbeda-beda, perbedaan kemampuan media pendingin disebabkan oleh temperatur, kekentalan, kadar larutan dan bahan dasar media pendingin. Semakin cepat logam didinginkan maka akan semakin keras sifat logam itu. Karbon yang dihasilkan dari pendinginan cepat lebih banyak dari pendinginan lambat. Hal ini disebabkan karena atom karbon tidak sempat berdifusi keluar, terjebak dalam struktur kristal dan membentuk struktur tetragonal yang ruang kosong antar atomnya kecil, sehingga kekerasannya meningkat. Media pendingin yang digunakan untuk mendinginkan baja bermacam-macam (Handoyo, 2015).

Berbagai bahan pendingin yang digunakan dalam proses perlakuan panas antara lain:

1. Air

Pendinginan dengan menggunakan air akan memberikan daya pendinginan yang cepat. Biasanya ke dalam air tersebut dilarutkan garam dapur sebagai usaha mempercepat turunnya temperatur benda kerja dan mengakibatkan bahan menjadi keras. Air memiliki karakteristik yang khas yang tidak dimiliki oleh senyawa kimia yang lain. Karakteristik tersebut adalah sebagai berikut (Dugan, 1972; Hutchinson, 1975; Miller, 1992). Pada kisaran suhu yang sesuai bagi kehidupan, yakni 0°C (32°F) – 100°C, air berwujud cair. Suhu 0°C merupakan titik beku (*freezing point*) dan suhu 100°C merupakan titik didih (*boiling point*) air. Perubahan suhu air berlangsung lambat sehingga air memiliki sifat sebagai penyimpan panas yang sangat baik. Sifat ini memungkinkan air tidak menjadi panas atau dingin dalam seketika. Air memerlukan panas yang tinggi dalam proses penguapan. Penguapan (evaporasi) adalah proses perubahan air menjadi uap air. Proses ini memerlukan energi panas dalam jumlah yang besar. Oleh karena itu dalam penelitian ini digunakan air dalam proses pendinginan setelah proses *Heat Treatment* karena dapat mendinginkan logam yang telah dipanaskan secara cepat.

2. Minyak atau oli

Minyak yang digunakan sebagai fluida pendingin dalam perlakuan panas benda kerja yang diolah terlebih dahulu. Selain minyak yang khusus digunakan sebagai bahan pendingin pada proses perlakuan panas, dapat juga digunakan oli, minyak bakar atau solar. Derajat kekentalan (*viscosity*) berpengaruh pada *Severity of Quench*. Minyak mineral banyak dipilih karena kapasitas pendinginannya cukup baik. Pada umumnya minyak memiliki kapasitas pendinginan tertinggi sekitar temperatur 600°C, dan agak rendah pada temperatur pembentukan martensit. Laju pendinginan minyak bisa dinaikkan dengan tiga cara yaitu dengan agitasi, memanaskan minyak pada temperatur diatas temperatur kamar dan mengemulsikan air (*water soluble*). Jenis minyak mineral yang sering dipakai untuk aplikasi quenching pada industry yaitu oli khusus, *oil quench*.

3. Udara

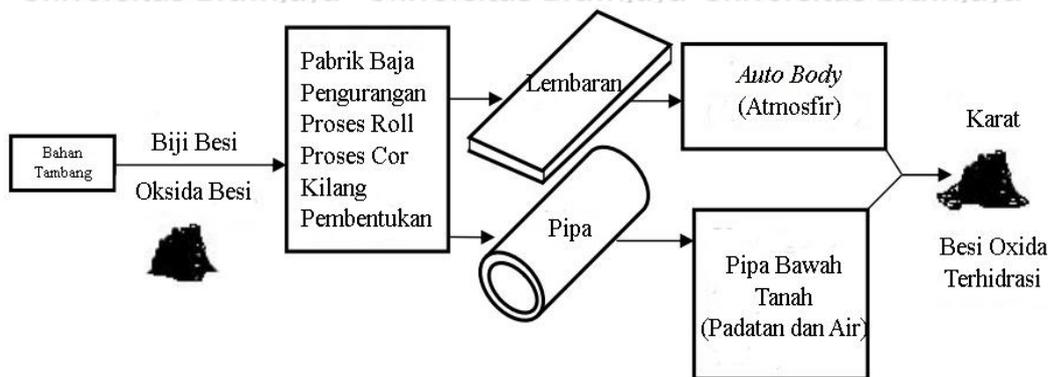
Pendinginan udara dilakukan untuk perlakuan panas yang membutuhkan pendinginan lambat. Untuk keperluan tersebut udara yang disirkulasikan ke dalam ruangan pendingin dibuat dengan kecepatan yang rendah. Udara sebagai pendingin akan memberikan kesempatan kepada logam untuk membentuk kristal-kristal dan kemungkinan mengikat unsur-unsur lain dari udara. Adapun pendinginan pada udara terbuka akan memberikan oksidasi oksigen terhadap proses pendinginan.

2.5 Definisi Korosi

Korosi merupakan degradasi dari suatu material akibat interaksi dengan lingkungan melalui proses elektrokimia. Pada saat suatu logam di ekspos ke lingkungannya, maka akan terjadi interaksi diantara keduanya (Rochim S., 2005). Timbulnya korosi ini akan sangat merugikan karena dapat menimbulkan kerusakan, penurunan penampilan, ongkos *maintenance* membesar, kontaminasi produk, serta keamanan berkurang. Korosi yang biasa terjadi di lapangan memiliki berbagai macam jenis antara lain: *galvanic*, *uniform*, *crevice*, *pitting*, *intergranular*, *selective leaching*, *erosion corrosion*, *stress corrosion cracking*. Faktor-faktor yang harus ada dalam korosi antara lain: anoda, katoda, konduktor, dan elektrolit (Sumarji, 2011). Adapun definisi lain dari korosi adalah interaksi antara material, biasanya logam, dan lingkungannya yang mengakibatkan kerusakan material, dan lingkungan. (Grosman, 2010).

Korosi dapat berjalan secara lambat maupun cepat tergantung material bahan, temperatur, lingkungan dan lainnya. Material korosi yang sering disinggung adalah korosi

pada logam. Ilustrasi pada proses terjadinya korosi pada material logam dapat dilihat pada Gambar 2.1 dimana besi yang dibentuk sesuai kegunaannya dapat terkorosi akibat lingkungan yang dihadapi pada aplikasinya.



Gambar 2.1 Proses pengkorosian logam
Sumber: Fontana (1987:5)

2.5.1 Klasifikasi Korosi

Tipe-tipe korosi umumnya diklasifikasikan sebagai berikut:

1. *Uniform Corrosion* (Korosi Seragam)

Merupakan korosi yang terjadi secara bersamaan dan menyeluruh pada permukaan logam. Terbentuknya pengikisan permukaan logam secara merata sehingga ketebalan logam berkurang atau menjadi lebih tipis dan akhirnya rusak. Lingkungan yang menyebabkan korosi ini adalah uap air, kelembapan, pH, dan lainnya. Korosi ini terjadi pada keseluruhan permukaan logam yang berkontak dengan lingkungan dengan intensitas yang sama. Menyebabkan kehilangan berat paling besar dibandingkan dengan jenis korosi yang lain, cenderung menyebabkan kerusakan prematur atau kerusakan yang tidak terprediksi. Biasanya terjadi pada peralatan-peralatan terbuka, misalnya permukaan luar pipa.



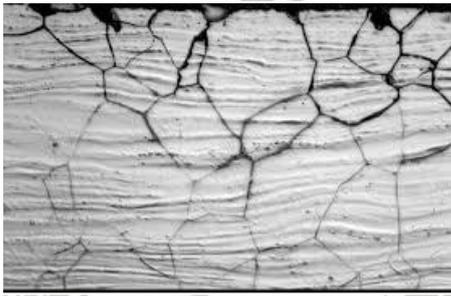
Gambar 2.2 Korosi seragam pada pipa ballast
Sumber: Utomo (2009)

2. *Intergranular Corrosion* (Korosi Batas Butir)

Korosi *intergranular* dalam Gambar 2.3 disebabkan oleh kotoran pada batas butir, penyuburan dari salah satu elemen paduan, atau menipisnya salah satu elemen-elemen

ini didaerah batas butir. Sejumlah kecil zat besi di aluminium, dimana kelarutan dari zat besi rendah, telah terbukti terpisah di batas butir dan menyebabkan korosi *intergranular*.

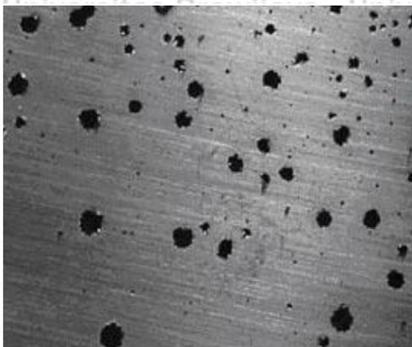
Pada prinsipnya, setiap logam yang memiliki kandungan logam antara dan logam senyawa pada batas-batas butirnya maka akan mengalami *intergranular corrosion*. Dimana logam antara adalah unsur-unsur yang terbentuk dari atom-atom logam dan mempunyai rumus kimia yang mudah dikenali unsur ini bersifat anoda atau katoda terhadap logam, sedangkan logam senyawa yaitu bahan yang terbentuk dari logam dan unsur-unsur bukan logam seperti hidrogen, karbon, silikon, nitrogen dan oksigen.



Gambar 2.3 *Intergranular corrosion*
Sumber: Utomo (2009)

3. *Pitting Corrosion* (Korosi Sumuran)

Gambar 2.4 merupakan korosi yang berbentuk lubang-lubang pada permukaan yang tidak merata karena hancurnya film dari proteksi logam yang disebabkan laju korosi yang berbeda antara satu tempat dengan tempat lainnya pada permukaan logam tersebut. Korosi ini biasanya disebabkan oleh klorida atau ion yang mengandung klorin. Biasanya terlihat seperti permukaan yang kasar. Korosi ini termasuk yang berbahaya karena lubang yang susah terdeteksi karena ukurannya yang kecil dan area lubang-lubang tersebut tertutup oleh produk korosi. Salah satu penyebab korosi sumuran ini adalah komposisi logam yang tidak homogen dan biasanya terjadi pada baja dan aluminium karena logam yang dapat membentuk lapisan pasif.



Gambar 2.4 *Pitting corrosion*
Sumber: Utomo (2009)

4. *Stress Corrosion Cracking (SCC)*

Gambar 2.5 merupakan korosi yang berbentuk retak-retak yang tidak mudah terlihat, terbentuk dipermukaan logam dan berusaha merembet kedalam. Korosi jenis ini disebabkan oleh tegangan (*stress*) dan lingkungan korosif secara bersama-sama sehingga struktur logam melemah.



Gambar 2.5 *Stress corrosion cracking*
Sumber: Utomo (2009)

5. *Errosion Corrosion (Korosi Erosi)*

Gambar 2.6 merupakan korosi yang terjadi karena tercegahnya pembentukan film pelindung yang disebabkan oleh kecepahan fluida yang memiliki kandungan material abrasif. Sangat banyak ditemukan pada pipa-pipa minyak/gas. Pengaruh lain yang dapat menyebabkan korosi erosi antara lain adalah pengausan, abrasi, dan gesekan. Logam yang terkena korosi erosi akan menimbulkan bagian-bagian yang kasar dan tajam. Korosi erosi ini dicirikan dengan lubang bulat, bergelombang dan lembah dan biasanya menunjukkan pola arah. Logam yang rentan terkena korosi erosi ini adalah tembaga dan timah, dikarenakan logam yang lunak dan tela rusak atau aus. Penyebab korosi ini meliputi gas, lautan air, sistem organik, dan logam cair.



Gambar 2.6 *Errosion corrosion*
Sumber: Utomo (2009)

6. Galvanic Corrosion (Korosi Galvanik)

Merupakan korosi yang terjadi karena terdapat dua logam yang memiliki potensial elektrokimia berbeda yang berada berdekatan. Yang akan menyebabkan logam yang lebih anodik terkorosi dan sedangkan yang lebih katodik akan terlindungi.



Gambar 2.7 Galvanic corrosion

Sumber: Utomo (2009)

Prinsip korosi galvanik sama dengan prinsip elektrokimia yaitu terdapat elektroda, elektrolit, dan arus listrik. Logam yang kurang tahan korosi akan menjadi anodik dan yang lebih tahan akan menjadi katodik. Biasanya katoda sangat sedikit berkarat atau bahkan tidak sama sekali. Sebagian besar aplikasi rekayasa paduan material menggunakan pasangan galvanis biasanya melibatkan satu atau dua paduan logam.

7. Crevice Corrosion

Merupakan jenis korosi lokal. Terjadi di sela-sela gasket, sambungan berpindah, sekrup-sekrup atau daerah permukaan logam yang tersembunyi yang terkena korosi. Serangan korosi jenis ini biasanya berhubungan dengan sejumlah kecil larutan yang terjebak oleh lubang, kotoran permukaan, dan celah-celah dibawah kepala baut.



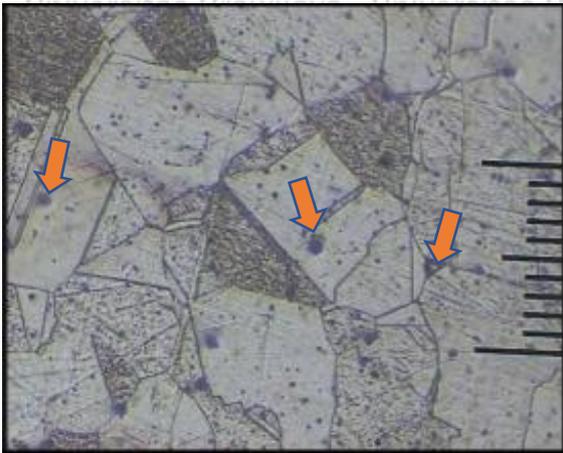
Gambar 2.8 Crivice corrosion

Sumber: Utomo (2009)

2.6 Korosi Batas Butir (*Intergranular Corrosion*)

Presipitasi karbida dalam Gambar 2.9 terjadi karena adanya peningkatan kekuatan karbon. Dalam baja, karbon merupakan elemen yang harus diperhitungkan. Semakin tinggi temperatur, daya kelarutan karbon semakin meningkat sehingga jika karbon berkaitan

dengan logam, maka akan terbentuk karbida. Kekerasan dan kekuatan martensit meningkat dengan bertambahnya kandungan karbon. (Gunawan, 2017)



Gambar 2.9 Presipitasi karbida
Sumber: Budiando (2009)

Intergranular corrosion adalah jenis korosi tipe lokal, yang mana korosi terjadi pada daerah batas butir, karena adanya endapan dan kemudian memisah. (Kenneth, 1995). Ketika suatu elemen kehilangan ketahanannya terhadap korosi batas butir, baik dari batas atau zona yang berdekatan dengannya akan menciptakan situasi di mana salah satu bagian menjadi anoda dan bagian sisa lainnya akan menjadi katoda. Serangan itu biasanya berlangsung di sepanjang garis tipis di sepanjang batas butir. Dalam skenario terburuk, seluruh butir bahkan mungkin terlepas dan memperburuk batas butir tersebut (NACE, 2014).

Baja tahan karat tipe 316 adalah suatu logam paduan yang mempunyai sifat tahan terhadap korosi, sehingga banyak dipakai di dunia industri terutama pada peralatan yang dioperasikan pada temperatur tinggi. Permasalahan yang sering timbul pada baja tahan karat tipe 316 adalah ketika dioperasikan pada temperatur sensitisasi yaitu 500 - 900 °C, akan mengakibatkan terbentuknya presipitasi karbida krom (terutama Cr_{23}C_6) dan mengendap pada batas butir saat terjadi pendinginan. Sehingga daerah sekitar batas butir mengalami depletion chrom, atau miskin chromium ($< 12\%$). Daerah yang kekurangan khromium itu menjadi lebih rentan terserang korosi dalam lingkungan agresif dibandingkan daerah yang jauh dari batas butir. Sehingga apabila berada pada lingkungan korosif cenderung akan terjadi korosi batas butir atau *intergranular corrosion* (Sunandrio, 2014).



Gambar 2.10 Korosi batas butir pada stainless steel tersensitisasi
Sumber: Sunandrio (2014)

2.7 Uji Metalografi

Metalografi adalah ilmu yang mempelajari tentang cara pemeriksaan logam mengetahui sifat, struktur, temperatur, dan persentase campuran logam tersebut. Dalam proses pengujian metalografi, pengujian logam menjadi dua jenis, yaitu:

1. Pengujian makrostruktur (*Macroscope Test*)

Pengujian makro ialah proses pengujian bahan yang menggunakan mata terbuka dengan tujuan dapat memeriksa celah dan lubang dalam bahan. Angka kevalidan pengujian makros berkisar 0,5 hingga 50 kali.

2. Pengujian mikrostruktur (*Microscope Test*)

Pengujian mikro ialah proses pengujian terhadap logam yang bentuk kristal logamnya tergolong sangat halus. Sedemikian halusanya sehingga pengujiannya memerlukan kaca pembesar lensa mikroskop yang memiliki kualitas perbesaran antara 50 hingga 3000 kali.

2.7.1 Langkah-langkah Pengujian Metalografi

Berikut merupakan langkah-langkah untuk melakukan pengujian metalografi. Adapun langkah-langkah yang harus dilakukan adalah:

1. Pemotongan

Pemotongan specimen cukup dalam dimensi yang tidak terlalu besar ($<10 \times 10 \times 10$) mm dan tidak boleh menjadi panas berlebihan dalam proses pemotongan untuk menghindari rusaknya struktur specimen tersebut akibat panas.

2. Penyalutan (*Mounting*)

Media *mounting* yang dipilih haruslah sesuai dengan material dan jenis reagen etsa yang akan digunakan. Pada umumnya *mounting* menggunakan material plastik sintetik. Materialnya dapat berupa resin (*castable resin*) yang dicampur dengan

hardener, atau bakelit. Penggunaan *castable* resin lebih mudah dan alat yang digunakan lebih sederhana dibandingkan bakelit, karena tidak diperlukan aplikasi panas dan tekanan. Namun bahan *castable* resin ini tidak memiliki sifat mekanis yang baik (lunak) sehingga kurang cocok untuk material-material yang keras. Teknik *mounting* yang paling baik adalah menggunakan *thermosetting* resin dengan menggunakan material bakelit. Material ini berupa bubuk yang tersedia dengan warna yang beragam. *Thermosetting mounting* membutuhkan alat khusus, karena dibutuhkan aplikasi tekanan (4200 lb/in²) dan panas (1490C) pada *mold* saat *mounting*.

3. Pegampelasan (*Grinding*)

Sampel yang baru saja dipotong, atau sampel yang telah terkorosi memiliki permukaan yang kasar. Permukaan yang kasar ini harus diratakan agar pengamatan struktur mudah untuk dilakukan. Pengampelasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas silicon karbit (SiC) dengan berbagai tingkat kekasaran yang ukuran butir abrasifnya dinyatakan dengan mesh, yaitu kombinasi dari 220, 330, 500, 600, 800, dan 1000. Ukuran grit pertama yang dipakai tergantung pada kekasaran permukaan dan kedalaman kerusakan yang ditimbulkan oleh pemotongan. Seperti perubahan struktur akibat panas yang timbul pada saat proses pemotongan dan perubahan bentuk sample akibat beban alat potong. Hal yang harus diperhatikan pada saat pengampelasan adalah pemberian air. Air berfungsi sebagai pemidah geram, memperkecil kerusakan akibat panas yang timbul yang dapat merubah struktur mikro sampel dan memperpanjang masa pemakaian kertas amplas.

4. Pemolesan (*Polishing*)

Spesimen yang sudah melewati proses penggrindaan, diteruskan ke proses pemolesan. Mesin yang digunakan adalah mesin poles metalografi. Mesin ini terdiri dari piringan yang berputar dengan kain beludru (*selvyt*).

Cara pemolesannya, benda uji diletakkan diatas piring yang berputar, kain poles diberi sedikit pasta oles. Pasta oles yang biasa digunakan adalah alumina (Al₂O₃). Dalam istilah perdagangan diberi nama autosol atau gama alumina. Bila garis-garis bekas pengampelasan masih terlihat, pemolesan diteruskan. Apabila terlihat sudah rata, maka specimen dibersihkan dan dilanjutkan dengan pengetsaan.

5. Pengetsaan (*Etching*)

Etsa merupakan proses penyerangan atau pengikisan batas butir secara selektif dan terkendali dengan pencelupan ke dalam larutan pengetsa baik menggunakan listrik maupun tidak ke permukaan sampel sehingga detil struktur yang akan diamati akan

terlihat dengan jelas dan tajam. Untuk beberapa material, mikrostruktur baru muncul jika diberikan zat etsa. Sehingga perlu pengetahuan yang tepat untuk memilih zat etsa yang tepat. Ada 3 jenis etsa, yaitu:

a. Etsa Kimia

Merupakan proses pengetsaan dengan menggunakan larutan kimia dimana zat etsa yang digunakan ini memiliki karakteristik tersendiri sehingga pemilihannya disesuaikan dengan sampel yang akan diamati. Contohnya antara lain: *nitrid acid* / nital (asam nitrit + alkohol 95%), picral (asam picric + alkohol), *ferric chloride*, *hydroflouric acid*, dll. Perlu diingat bahwa waktu etsa jangan terlalu lam (umumnya sekitar 4 – 30 detik), dan setelah dietsa, segera dicuci dengan air mengalir lalu dengan alkohol kemudian dikeringkan dengan alat pengering.

b. Elektro Etsa (Etsa elektrolitik)

Merupakan proses etsa dengan menggunakan reaksi elektro etsa. Cara ini dilakukan dengan pengaturan tegangan dan kuat arus listrik serta waktu pengetsaan. Etsa jenis ini biasanya khusus untuk stainless steel karena dengan etsa kimia susah untuk mendapatkan detil strukturnya.

2.8 Hardness Test (Kekerasan)

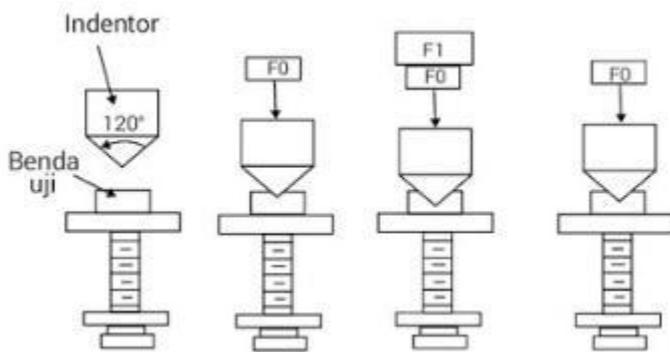
Hardness test merupakan uji NDT (*Non Destructive test*) dimana pada pengujian ini dapat diketahui suatu nilai kekerasan pada sebuah material/spesimen uji. cara pengujian hardnes ini dilakukan dengan metode *hardness vickers*, *rockwell* dan *brinell*. Uji kekerasan ini berupa pembentukan lekukan pada permukaan logam memakai bola baja yang dikeraskan kemudian ditekan dengan beban tertentu. Beban diterapkan pada wktu tertentu, biasanya 30 detik, dan diameter lekukan diukur dengan mikroskop, setelah beban dihilangkan. Permukaan harus relatif halus, rata, bersih dari debu atau kerak (Furqon dkk, 2016)

Hardness rockwell test adalah pengujian dengan cara menekan permukaan benda uji dengan suatu indenter. Penekanan indenter tersebut dilakukan dengan menekan beban pendahuluan (beban minor), kemudian ditambah dengan beban utama (beban mayor), kemudian beban mayor dilepaskan sedangkan beban minor masih dipertahankan.

Untuk alat pengujian *hardness rockwell test* adalah penguji harus memasang indenter terlebih dahulu sesuai jenis pengujian yang diperlukan, yaitu *indenter* bola bahan atau kerucut intan. Setelah itu penguji meletakkan spesimen yang akan diuji kekerasannya ditempat yang tersedia dan menyetel beban yang akan digunakan untuk proses penekanan.

Untuk mengetahui nilai kekerasannya penguji bisa melihat jarum yang terpasang pada alat ukur berupa *dial indicator pointer*.

Kelebihan dari *hardness rockwell test* adalah mampu digunakan untuk bahan yang sangat keras. Bisa dipakai untuk batu gerinda hingga plastik. Cocok untuk semua material yang keras dan bahkan lunak. Adapun kekurangan *hardness rockwell test* adalah tingkat ketelitiannya rendah. Tidak stabil bisa terkena guncangan. Dan penekanan bebannya tidak praktis.



Gambar 2.11 Pengujian *rockwell hardness*

Pada pengujian kekerasan bahan dengan metode *Rockwell*, kedalaman penetrasi permanen yang dihasilkan dari penerapan dan pelepasan beban utama dipakai untuk menentukan angka kekerasan Rockwell, sebagai berikut,

$$HR = E - e$$

dengan:

E = konstanta dengan nilai 100 untuk indenter intan dan 130 untuk indenter bola

e = kedalaman penetrasi permanen karena beban utama (F1) diukur dengan satuan 0,002 mm. Jadi, $e = h/0,002$

2.9 Uji SEM-EDS

SEM bertujuan untuk melihat morfologi dan topografi dari suatu sampel. Sedangkan EDS merupakan suatu alat yang digunakan untuk mengetahui unsur yang terkandung pada sampel. EDS dapat dilakukan pada daerah yang kecil (titik), garis dan kotak. Selain itu EDS dapat digunakan untuk mengetahui sebaran unsur (*mapping*) pada sampel.

2.10 Hipotesis

Dari tinjauan pustaka yang telah dijelaskan maka, dapat dalam penelitian ini akan ditarik hipotesis dimana variasi media pendinginan setelah proses perlakuan panas mempengaruhi sifat mekanik suatu logam. Semakin keras material menyebabkan jumlah



presipitasi karbida semakin sedikit. Pada temperatur sensitasi yang lebih lama akan menyebabkan bertambahnya jumlah presipitasi karbida pada batas butir yang menyebabkan menurunnya jumlah kadar kromium (Cr) disekitarnya. Semakin sedikit kadar kromium semakin mudah suatu logam untuk terjadi korosi. Semakin banyak presipitasi karbida pada batas butir menyebabkan menurunnya ketahanan korosi suatu material. Ketahanan korosi rendah menyebabkan laju korosi yang tinggi.



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Spesimen yang digunakan adalah *Stainless Steel* 316. Spesimen ini mengalami proses perlakuan panas dengan variasi temperatur pemanasan, waktu *holding*, dan metode pendinginan.

Spesimen dibagi menjadi 6 yaitu A, B, C, D, E dan F dengan variasi *temperature holding* dan metode pendinginan. Media pendinginan yang digunakan ada 3 jenis yaitu pendinginan tungku, oli, dan air es. Untuk spesimen *Stainless Steel* 316 A, B, dan C diberi *heat treatment* pada temperatur 1000°C dengan *holding time* 1 jam, lalu didinginkan pada media tungku, oli, dan air es. Untuk spesimen *Stainless Steel* 316 D, E dan F diberi *heat treatment* pada temperatur 1000°C dengan *holding time* 1 jam, lalu diturunkan hingga temperatur 450°C dengan *holding time* 2 jam, lalu didinginkan pada media tungku, air es dan oli.

Untuk mengetahui komposisi kimia spesimen *stainless steel* 316 yang telah diberi perlakuan sebelumnya, maka dilakukan uji EDS pada spesimen. Untuk mengetahui mikrostruktur pada spesimen dilakukan uji mikrostruktur pada spesimen. Untuk mengetahui nilai kekerasan pada spesimen dilakukan uji kekerasan. Ketahanan korosi pada spesimen bisa diketahui dengan cara uji laju korosi dengan media NaCl 3,5%.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada rentang waktu Februari – Mei 2020. Penelitian ini dilakukan dilaboratorium sebagai berikut.

- Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya
- Laboratorium Pengujian Bahan Teknik Mesin Universitas Merdeka Malang
- Laboratorium Sentral Ilmu Hayati Universitas Brawijaya
- PT. PJB Service Sidoarjo

3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Variabel bebas

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan sebelum penelitian.

Variabel bebasnya adalah, temperatur *heat treatment*: 1000°C dan 450°C dengan variasi media pendinginan: pendinginan dalam tungku, air es dan oli, kemudian variasi waktu *holding* yang pertama: 1 jam (*Holding Time*) pada temperatur 1000°C dan yang kedua 1 jam (*Holding Time*) pada temperatur 1000°C, + 450°C dan di *holding* selama 2 jam

2. Variabel terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung dari variabel bebas. Variabel terikatnya adalah struktur mikro, kekerasan, korosi batas butir dan laju korosi.

3. Variabel terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya dikonstankan. Variabel terkontrolnya adalah Dimensi *Stainless Steel* 316 yaitu 40 mm x 10 mm x 5 mm

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

3.4.1 Alat-alat Penelitian

Pada penelitian ini digunakan beberapa peralatan, yaitu:

1. Alat pemotong material

Gambar 3.1 digunakan untuk memotong *Stainless Steel* 316.



Gambar 3.1 Powerhacksaw

Spesifikasi:

Merek : Kasto

Tipe : HBS 210/240

Cutting Diameter (mm) : 210

Voltage (V)/Frequency (Hz) : 400/50

Total Power Requirement (kW) : 1,3

2. *Furnace* (Dapur Pemanasan)

Furnace ini digunakan untuk proses pemanasan (*heating*), penahanan (*holding*), dan pendinginan (*cooling*) dalam dapur.

Spesifikasi dapur listrik yang digunakan adalah:

Merek : B-One Muffle Furnace

Tipe : FNC

Voltage : 220 V / 5Hz

Daya : 2500 W

Suhu max : 3000°C

Buatan : China



Gambar 3.2 *Furnace*

3. Peralatan pada pengujian struktur mikro

- Mesin *Centrifugal Sand Paper Machine*

Gambar 3.3 digunakan untuk menghaluskan benda kerja.

Merek : SAPHIR 330

Buatan : Jerman

Diameter : 15 cm

Putaran : 120 rpm

Daya : 0,55 kW

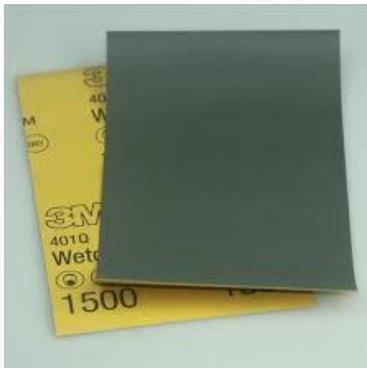
Tegangan : 220



Gambar 3.3 Centrifugal sand paper machine

- Kertas gosok grid 400,1000, 2000

Gambar 3.4 digunakan untuk membersihkan spesimen dari terak dan kotoran.



Gambar 3.4 Kertas gosok

- Mechanical polisher dengan polishing alumina.

Gambar 3.5 digunakan untuk menghaluskan dan mengkilapkan permukaan spesimen.



Gambar 3.5 Metal polish

- Mikroskop logam

Gambar 3.6 digunakan untuk melihat mikrostruktur spesimen, Dalam pengujian ini digunakan pembesaran 200 kali.

Spesifikasi mikroskop logam yang digunakan:

- Merek : Nikon
- Buatan : Jepang





Gambar 3.6 Mikroskop logam

- Kamera untuk mengambil gambar struktur mikro dengan pembesaran 1000x

Digunakan untuk memfoto struktur mikro specimen ada pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Kamera

4. Alat pengujian kekerasan

- Merek : Mitutoyo HR-400
- Buatan : Jepang
- Indentor bola Rockwell : 1/16"
- Indentor intan : 120°
- Skala pembebanan : HRA = 588 N
- HRB = 980 N
- HRC = 1471 N
- HR15N = 147,1 N





Gambar 3.8 Alat pengujian kekerasan

5. Peralatan pada pengujian SEM-EDX

a. SEM-EDX (*Scanning Electron Microscope Energy Dispersive X-ray*)

Pengujian SEM ini dilakukan untuk mengetahui morfologi lapisan *stainless steel* 316. Sedangkan EDX untuk mengetahui unsur kimia lapisan *stainless steel* 316.



Gambar 3.9 FE-SEM Quanta FEG 650

Spesifikasi Gambar 3.9:

Instrumen SEM : FEI Quanta FEG 650

Tipe SEM : FE-SEM

EDS *detector* : *X-act Oxford Instrument*

EDS *software* : *AZtecOne*

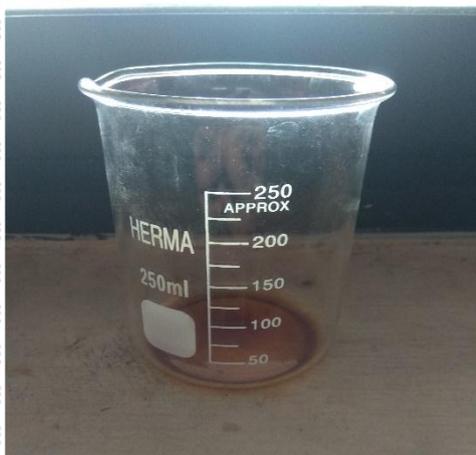
Lisensi : Universitas Brawijaya

Manajemen : Laboratorium Sentral Ilmu Hayati (LSIH)

6. Peralatan pada pengujian korosi

- *Baker glass*

Gambar 3.10 digunakan untuk meletakkan larutan NaCl



Gambar 3.10 Gelas ukur

Autolab

Merek : Autolab PGSTAT 204

Maximum Current : ± 400 mA

Compliance voltage : ± 20 V

Potential range : ± 10 V

Applied potential accuracy : $\pm 0,2\% \pm 2$ mV

Applied potential resolution : 150 μ V

Measured potential resolution : 0,3 μ V (gain 1000)

Maximum scan rate : 1000 V/s with 15 mV step

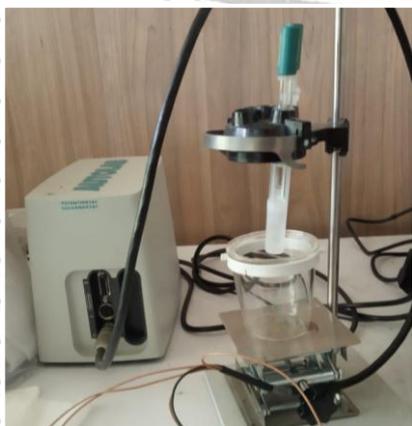
Current ranges : 10 nA to 10 mA

Current accuracy : $\pm 0.2\%$

Applied current solution : 0.015% of current range

Measured current resolution : 0.0003% of current range

At 10nA range : 30fA



Gambar 3.11 Penguji korosi

3.4.2 Bahan-bahan Penelitian

1. Logam yang diuji (*Stainless steel 316*)

Baja yang digunakan untuk pengujian adalah *stainless steel 316* dan dipotong sesuai dengan dimensi pada Gambar 3.12 dan Komposisinya ada dalam Tabel 3.1.



Gambar 3.12 *Stainless steel 316*

Tabel 3.1
Komposisi Kimia *Stainless Steel 316*

| % | C | Mn | Si | P | Cr | Mo | Ni | N |
|-----|------|----|-------|------|----|----|----|-----|
| Min | - | - | - | - | 16 | 2 | 10 | - |
| Max | 0,08 | 2 | 0,045 | 0,03 | 18 | 3 | 14 | 0,1 |

Sumber: ASTM A240

2. Oli

Media pendinginan yang digunakan untuk mendinginkan spesimen sesudah diberi *heat treatment* adalah oli.



Gambar 3.13 Oli

3. Air es

Air es digunakan sebagai media pendinginan. Air es diletakan di dalam *Styrofoam*.



Gambar 3.14 Air es

4. Larutan Etsa

Larutan etsa yang digunakan merupakan campuran antara HNO_3 + HCl dengan perbandingan 1:3 dalam Gambar 3.15.



Gambar 3.15 Etsa

5. NaCl 3,5%

Gambar 3.16 digunakan sebagai pelarut untuk uji korosi.

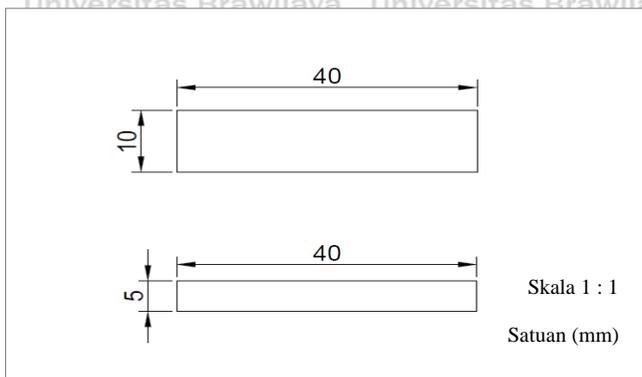


Gambar 3.16 NaCl 3,5%

3.5 Dimensi Benda Kerja

Plat *Stainless Steel* 316 memiliki ketebalan 5 mm akan dipotong dengan dimensi 40 mm x 10 mm x 5 mm. Setelah plat dipotong sesuai dengan dimensi yang ditentukan, spesimen akan dibersihkan permukaannya dengan menggunakan amplas dan ditulis pada

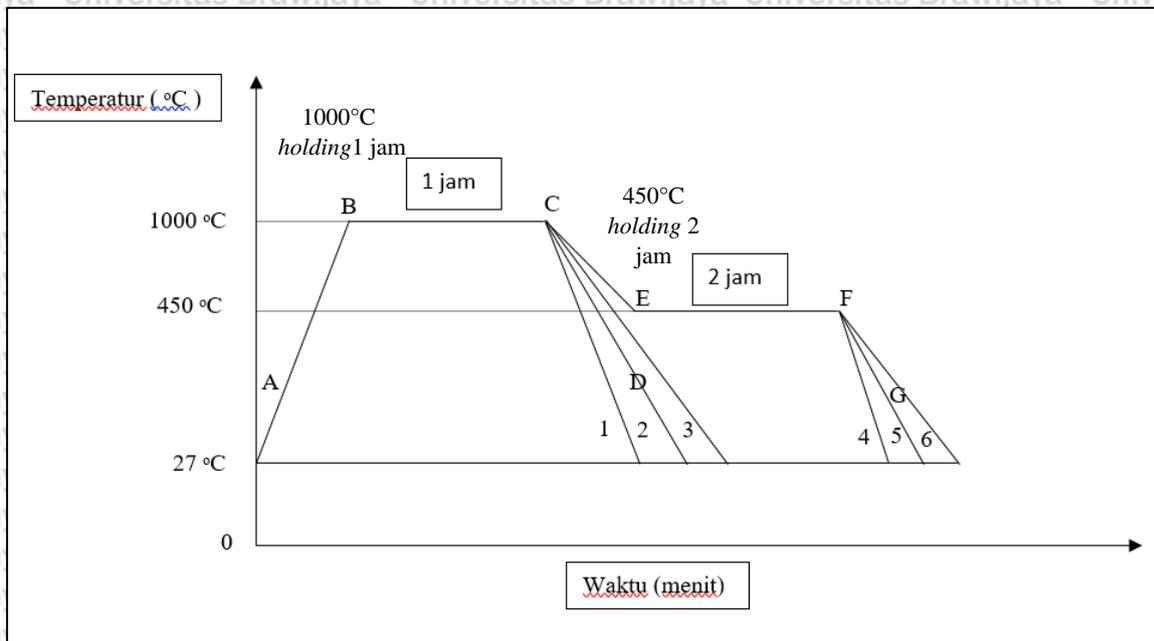
Gambar 3.17.



Gambar 3.17 Dimensi benda kerja (*Stainless Steel* 316)

3.6 Skema Penelitian

3.6.1 Skema Heat Treatment



Gambar 3.17 Proses heat treatment

Keterangan Gambar 3.17:

- A-B : Heating
- B-C : Holding
- C-D : Cooling
- C-E : Penurunan temperatur
- E-F : Holding
- F-G : Cooling
- C-1 : Pendinginan dengan media air es
- C-2 : Pendinginan dengan media oli
- C-3 : Pendinginan dalam tungku (*furnance*)
- G-4 : Pendinginan dengan media air es
- G-5 : Pendinginan dengan media oli
- G-6 : Pendinginan dalam tungku (*furnance*)

Dari skema *heat treatment* diatas, dapat dijelaskan sebagai berikut:

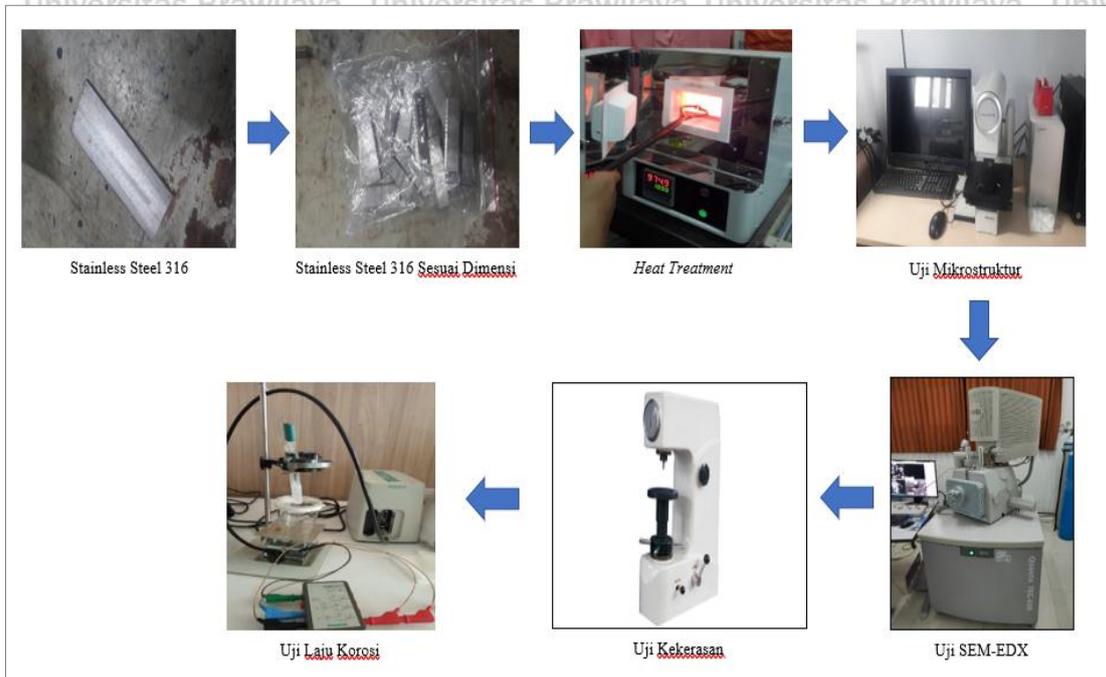
Proses pertama ialah pemanasan spesimen A, B, dan C hingga temperatur 1000°C kemudian dilakukan *holding* selama 1 jam, lalu didinginkan dengan media pendingin air es, oli, dan di dalam *furnace*.

Proses kedua ialah pemanasan spesimen D, E, dan F hingga temperatur 1000°C kemudian dilakukan *holding* selama 1 jam, setelah itu turunkan temperatur hingga 450°C kemudian dilakukan *holding* selama 2 jam, lalu didinginkan dengan media pendingin air es, oli, dan di dalam *furnace*.



3.6.2 Skema Pengujian

Gambar 3.18 merupakan skema penelitian dalam skripsi ini.



Gambar 3.18 Skema pengujian

3.7 Prosedur Penelitian

3.7.1 Prosedur Heat Treatment

Potong spesimen uji sesuai ukuran yang telah ditentukan spesimen A, B, C, D, E dan F. Untuk spesimen A, B dan C Spesimen dipanaskan di dapur listrik dengan temperatur awal adalah temperatur kamar dan kecepatan pemanasannya 1°C/s. Suhu diatur hingga mencapai 1000°C kemudian di-*holding* selama 1 jam. Setelah selesai 1 jam spesimen dikeluarkan dari dapur listrik untuk didinginkan oleh media air es untuk spesimen A, oli untuk spesimen B dan pendinginan dalam dapur listrik untuk spesimen C. Untuk spesimen D, E dan F, Spesimen dipanaskan dalam dapur listrik dengan temperatur awal dimana memakai temperatur kamar dan kecepatan pemanasannya 1°C/s. Suhu diatur hingga mencapai 1000°C kemudian di-*holding* selama 1 jam. Setelah selesai 1 jam suhu diturunkan hingga mencapai 450°C, kemudian di-*holding* selama 2 jam. Setelah waktu *holding* selesai, spesimen uji didinginkan dengan media pendingin air es untuk spesimen D, oli untuk spesimen E dan pendingin di dapur listrik untuk spesimen F.

3.7.2 Prosedur Pengujian Kekerasan

Siapkan perangkat uji kekerasan *Rockwell Hardness Mitutoyo*, pertama mengatur beban sebesar (15 kgf), lalu memasang *indenter 1/16"*. Kemudian, meletakkan spesimen pada landasan, Atur tuas pada posisi *unloading*, putar *turn wheel* searah jarum jam secara perlahan hingga benda kerja menyentuh *indenter* tanpa mengalami *impact*. Tunggu sampai harga kekerasan senilai HR 15T yang terbaca pada layar.

3.7.3 Pengujian Mikrostruktur

Siapkan spesimen *stainless steel 316* yang sudah dilapisi etsa dan akan dilakukan uji foto mikro. Siapkan kamera dengan lensa mikro, tempatkan kamera pada kedudukan kamera agar kamera tetap pada posisi lurus dengan spesimen. Kemudian letakkan spesimen *stainless steel 316* yang sudah dilapisi pada meja datar agar dapat dilihat secara tegak lurus. Ambil foto dengan perbesaran yang diinginkan sampai mendapatkan hasil.

3.7.4 Prosedur SEM-EDX

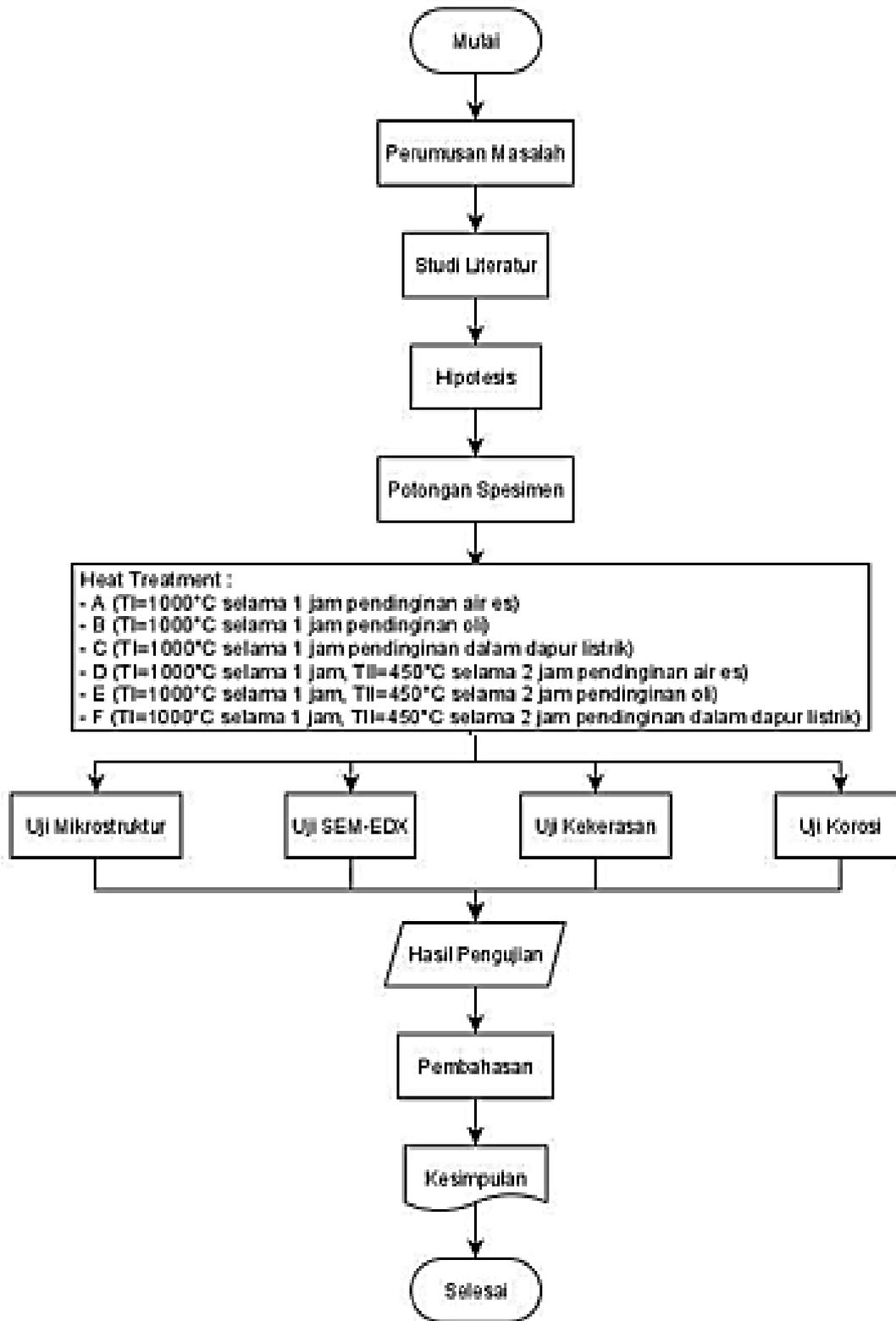
Pengujian SEM-EDX dilakukan dengan alat. Pertama ambil spesimen yang akan diuji lalu letakkan pada wadah tempat untuk melakukan uji SEM-EDX. Pilih bagian batas butir dalam uji SEM-EDX, lalu lakukan perbesaran sesuai yang diinginkan. Simpan gambar dan lakukan analisis.

3.7.5 Prosedur Pengujian Elektrokimia / Uji Korosi

Sebelum pengujian dilaksanakan, siapkan larutan NaCl 3,5%, seberat 3,5 gram NaCl dan dicampur dengan aquades sebanyak 100ml. Pertama memasang kabel-kabel ke tiga elektroda berbeda, yaitu elektroda kerja, elektroda acuan, dan elektroda referensi. Lalu menuangkan larutan NaCl 3,5% ke gelas kimia dan mencelupkan ketiga elektroda tersebut. Kemudian mengatur tegangan sebesar -1 V s.d. 1,5 V (sesuai ISO 10993-15: 2000), memasukan nilai *density*, *equivalent weight*, dan luas permukaan, kemudian menyambungkan semua kabel ke komputer kemudian melakukan pengukuran dan mencatat hasilnya berupa i_{corr} , E_{corr} , β_a , β_c .

3.8 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.19 merupakan diagram alir dalam skripsi ini.



Gambar 3.19 Diagram alir penelitian





Halaman ini sengaja dikosongkan

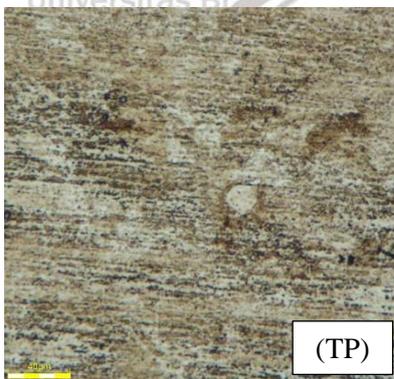


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

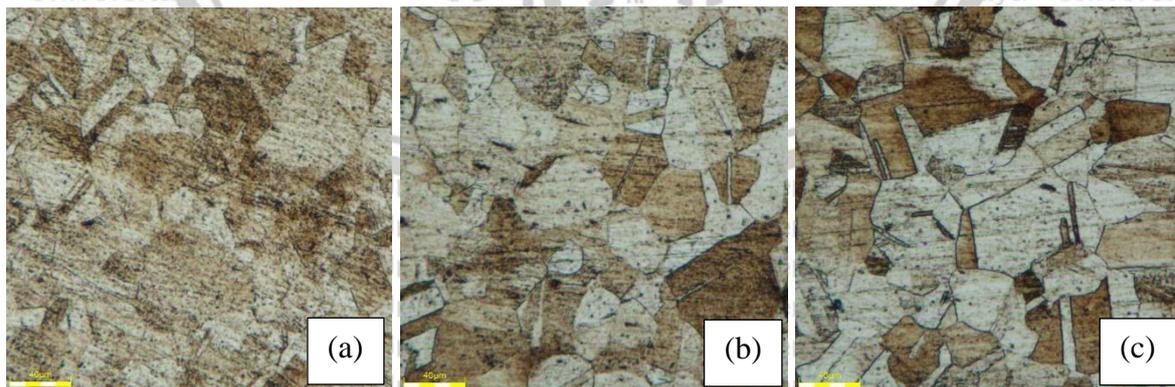
4.1.1 Gambar Hasil Foto Struktur Mikro pada *Stainless Steel 316*

Foto mikro dilakukan dengan menggunakan *Olympus digital microscope* dengan menggunakan perbesaran 1109x pada spesimen tanpa perlakuan dan didapatkan hasil dalam Gambar 4.1 sebagai berikut.



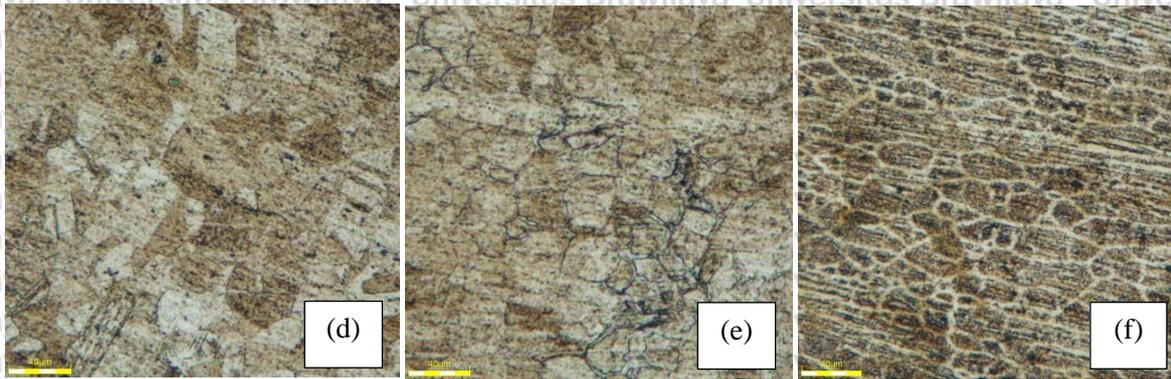
Gambar 4.1 Foto mikro spesimen tanpa perlakuan

Foto mikro dilakukan dengan menggunakan *Olympus digital microscope* dengan menggunakan perbesaran 1109x pada spesimen setelah dilakukan *heat treatment* dan didapatkan hasil dalam Gambar 4.2 sebagai berikut.



Gambar 4.2 Foto mikro spesimen dengan variasi media pendinginan a) Air Es ,b) Oli ,c) Tungku, dengan *temperature* 1000°C waktu *holding* 1 jam

Foto mikro dilakukan dengan menggunakan *Olympus digital microscope* dengan menggunakan perbesaran 1109x pada spesimen setelah dilakukan *heat treatment* dan didapatkan hasil dalam Gambar 4.3 sebagai berikut.

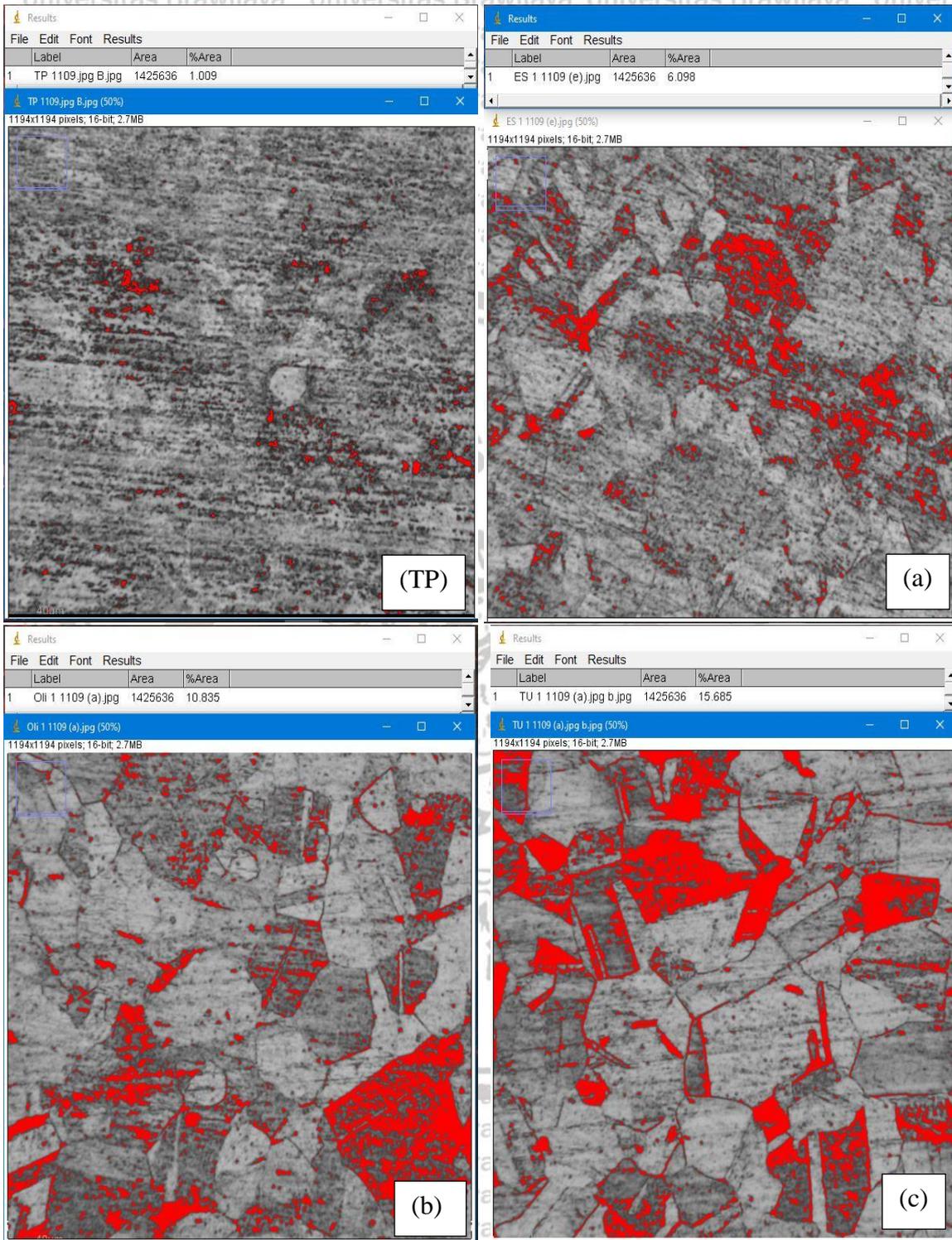


Gambar 4.3 Foto mikro spesimen dengan variasi media pendinginan d) Air Es ,e) Oli ,f) Tungku, dengan $T_1=1000^{\circ}\text{C}$ waktu *holding* 1 jam, kemudian ditambah $T_2=450^{\circ}\text{C}$ waktu *holding* 2 jam

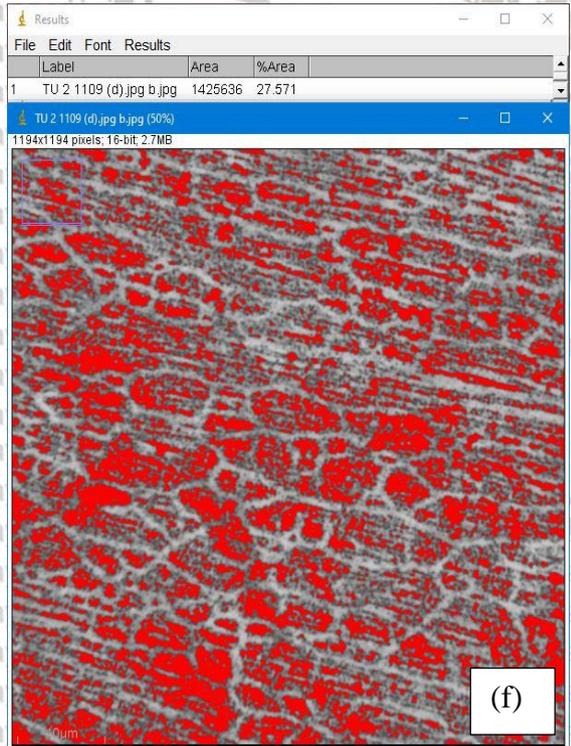
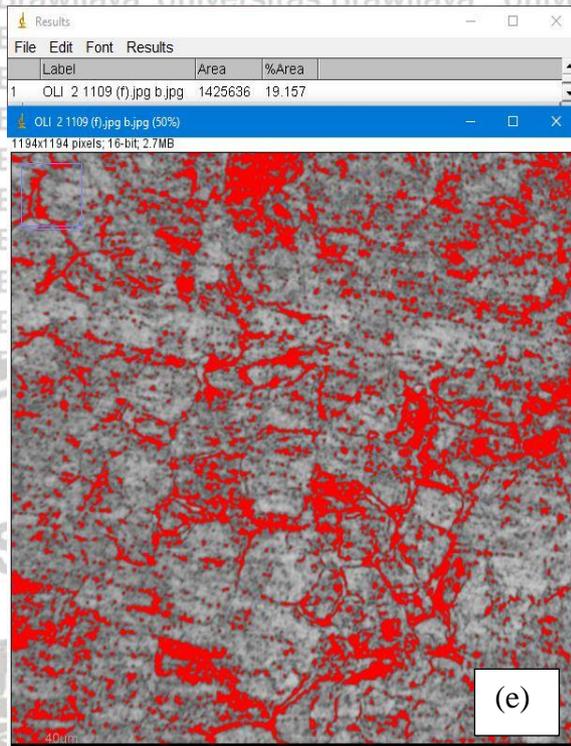
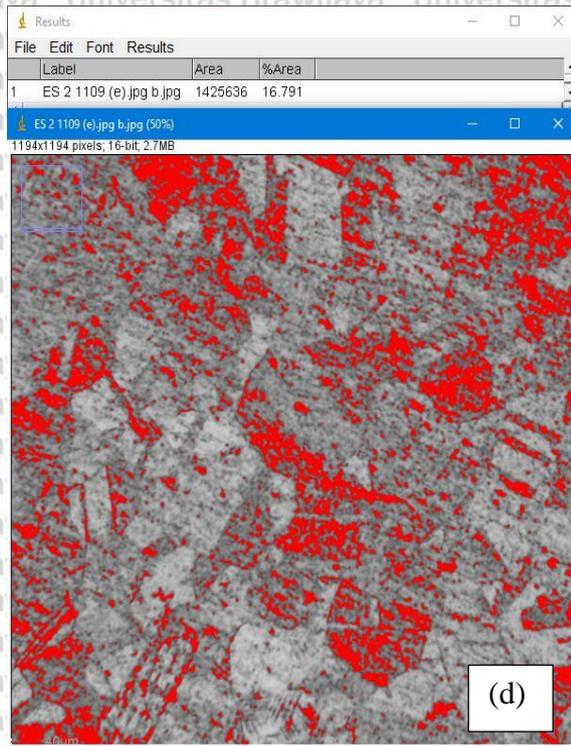
4.1.2 Analisis Gambar dari Hasil Foto Mikro Spesimen *Stainless Steel 316*

Gambar 4.1 adalah foto mikro untuk spesimen tanpa perlakuan. Gambar 4.2 merupakan penampakan foto mikro setelah proses *heat treatment*. Gambar diatas menunjukkan urutan dari variasi media pendinginan dengan *temperature* 1000°C waktu *holding* 1 jam (a) adalah Air es (b) Oli dan (c) adalah Tungku, Sedangkan untuk Gambar 4.3 adalah foto mikro dengan variasi media pendinginan dengan $T_1=1000^{\circ}\text{C}$ waktu *holding* 1 jam, kemudian ditambah $T_2=450^{\circ}\text{C}$ waktu *holding* 2 jam (d) Air es (e) Oli dan (f) Tungku. Terdapat perbedaan hasil penampakan foto dikarenakan perbedaan variasi media pendinginan, temperatur pemanasan dan waktu *holding*.

Pada Gambar diatas dapat kita lihat bahwa semakin lama spesimen melewati temperatur sensitasi maka korosi batas butirnya juga terlihat semakin banyak dibuktikan dengan presipitasi karbida yang terlihat pada foto mikro. Dan untuk mengetahui persentase daerah korosi batas butirnya diperlukan *Software ImageJ*. Hasil proses *ImageJ* bisa dilihat di Gambar dibawah ini.



Gambar 4.4 Persentase dan persebaran pengendapan kromium karbida spesimen tanpa perlakuan dan spesimen dengan variasi media pendinginan a) Air Es ,b) Oli ,c) Tungku, dengan *temperature* 1000°C waktu *holding* 1 jam



Gambar 4.5 Persentase dan persebaran pengendapan kromium karbida spesimen dengan variasi media pendinginan d) Air Es ,e) Oli ,f) Tungku, dengan *temperature* 1000°C waktu *holding* 1 jam, + 450°C dan di-*holding* selama 2 jam.

Dari gambar diatas terlihat spesimen tanpa perlakuan, korosi batas butir sangat sedikit sedikit persentasenya. Spesimen A dengan pemanasan 1000°C waktu *holding* 1 jam dengan pendinginan air es, korosi batas butir tidak terlihat jelas, untuk spesimen B pemanasan 1000°C waktu *holding* 1 jam dengan pendinginan oli korosi batas butir terlihat sedikit lebih banyak dari spesimen A, dan untuk spesimen C pemanasan 1000°C waktu *holding* 1 jam dengan pendinginan dalam tungku korosi batas butir terlihat jelas. Untuk spesimen D perlakuan pemanasan 1000°C waktu *holding* 1 jam ditambah 450°C waktu *holding* 2 jam dengan pendinginan air es, korosi batas butir terlihat tetapi tidak terlalu banyak, untuk spesimen E perlakuan pemanasan 1000°C waktu *holding* 1 jam ditambah 450°C waktu *holding* 2 jam dengan pendinginan oli, korosi batas butir terlihat banyak. Untuk spesimen F perlakuan pemanasan 1000°C waktu *holding* 1 jam ditambah 450°C waktu *holding* 2 jam dengan pendinginan dalam tungku, korosi batas butir terlihat sangat jelas melebihi spesimen E.

Hasil persentase persebaran pengendapan chromium karbida sesuai gambar diatas jika diurutkan dari yang paling banyak adalah spesimen F, E, D, C, B dan A. Karena Spesimen F merupakan yang paling lama didaerah temperatur sensitasi dan spesimen A yang paling cepat melaluinya. Dan spesimen tanpa perlakuan sangat sedikit persebarannya.

Hal ini disebabkan karena pengendapan chromium karbida tersebut terjadi pada temperatur sensitasi suatu material. Yang mana temperatur sensitasi *stainless steel* 316 ini pada suhu 450°-870°C. Semakin lama material tersebut berada di temperatur sensitasi maka akan semakin banyak presipitasi karbida yang terbentuk (Budianto A et al. 2009)

4.2 Data Hasil Kekerasan pada Spesimen *Stainless Steel* 316

Setelah proses *heat treatment*, *stainless steel* 316 dilakukan uji kekerasan. Dengan hasil pengujiannya sebagai berikut:

Tabel 4.1
Hasil Uji Kekerasan *Stainless Steel* 316

| Spesi- men | Perlakuan | Kekerasan (HRA) | |
|---------------|---|-----------------|-----------|
| | | Nilai | Rata-rata |
| TP | Tanpa Perlakuan | 56 | 57 |
| | | 57 | |
| | | 58 | |
| A | Pemanasan 1000°C 1 jam, Pendinginan Air Es | 50 | 50 |
| | | 49 | |
| | | 50 | |
| B | Pemanasan 1000°C 1 jam, Pendinginan Oli | 45 | 45,67 |
| | | 46 | |
| | | 46 | |

| Spesi- men | Perlakuan | Kekerasan (HRA) | |
|---------------|-------------------------|-----------------|-----------|
| | | Nilai | Rata-rata |
| C | Pemanasan 1000°C 1 jam, | 39 | 39,33 |
| | Pendinginan Tungku | 39 | |
| | | 40 | |
| D | Pemanasan 1000°C 1 jam | 48 | 47,67 |
| | + 450°C 2 jam, | 47 | |
| | Pendinginan Air Es | 48 | |
| E | Pemanasan 1000°C 1 jam | 41 | 41,67 |
| | + 450°C 2 jam, | 42 | |
| | Pendinginan Oli | 42 | |
| F | Pemanasan 1000°C 1 jam | 36 | 36,33 |
| | + 450°C 2 jam, | 36 | |
| | Pendinginan Tungku | 37 | |

Pengujian kekerasan pada spesimen *stainless steel* 316 ini menggunakan alat *Rockwell* yang mana pengujian *Rockwell* ini menggunakan indenter. Indenter yang digunakan pada pengujian *Rockwell* ini ada 2 yaitu indenter kerucut intan dan indenter bola baja. Indenter kerucut intan pada umumnya digunakan untuk menguji material-material yang keras. Sementara indenter bola baja sering digunakan untuk menguji kekerasan material-material yang lebih lunak (Pusat Lingkaran, 2017).

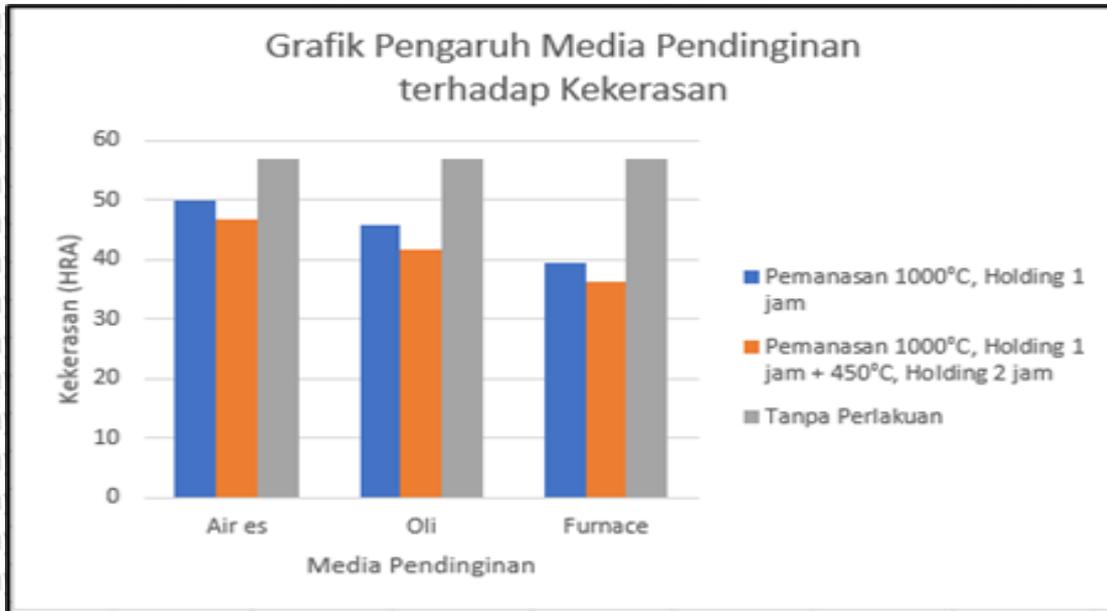
Pengujian kekerasan *stainless steel* 316 disini menggunakan skala HRA (kerucut intan 120°), dengan jumlah beban 60 kgf, karena untuk pengujian kekerasan pada *stainless steel* 316 menggunakan skala *rockwell* baik HRA, HRB atau HRC bisa saja dilakukan dengan syarat nilai kekerasannya tidak diatas rentang nilai kekerasan yang diizinkan untuk setiap skalanya. Yang mana untuk skala HRA rentang nilainya antara 20 sampai 65 dengan maksimal *error*nya sebesar 0,5 yang terdapat pada tabel dibawah. Apabila nilainya diluar dari rentang yang diizinkan menggunakan skala lain yang lebih berat atau lebih ringan (ASTM E18-15).

| | Range of Standardized Test Blocks | Maximum Repeatability, R (HR units) | Maximum Error, E (HR units) |
|---------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| HRA | 20 to 65 | 1.0 | ± 0.5 |
| | 70 to 78 | 0.7 | ± 0.5 |
| | 80 to 84 | 0.5 | ± 0.3 |
| HRBW | 40 to 59 | 1.0 | ± 0.7 |
| | 60 to 79 | 0.7 | ± 0.5 |
| | 80 to 100 | 0.7 | ± 0.5 |
| HRC | 20 to 30 | 1.0 | ± 0.5 |
| | 35 to 55 | 0.7 | ± 0.5 |
| | 60 to 65 | 0.5 | ± 0.3 |
| HRD | 40 to 48 | 1.0 | ± 0.5 |
| | 51 to 67 | 0.7 | ± 0.5 |
| | 71 to 75 | 0.5 | ± 0.3 |
| HREW | 70 to 79 | 0.7 | ± 0.5 |
| | 84 to 90 | 0.7 | ± 0.5 |
| | 93 to 100 | 0.5 | ± 0.5 |
| HRFW | 60 to 75 | 0.7 | ± 0.5 |
| | 80 to 90 | 0.7 | ± 0.5 |
| | 94 to 100 | 0.5 | ± 0.5 |
| HRGW | 30 to 50 | 1.0 | ± 0.5 |
| | 55 to 75 | 1.0 | ± 0.5 |
| | 80 to 94 | 1.0 | ± 0.5 |
| HRHW | 80 to 94 | 1.0 | ± 0.5 |
| | 96 to 100 | 1.0 | ± 0.5 |
| | HRKW | 40 to 60 | 0.7 |
| 65 to 80 | | 0.5 | ± 0.5 |
| 85 to 100 | | 0.5 | ± 0.5 |
| HRLW ^A | | 1.0 | ± 0.5 |
| HRMW ^A | | 1.0 | ± 0.5 |
| HRPW ^A | | 1.0 | ± 0.5 |
| HRRW ^A | | 1.0 | ± 0.5 |
| HRSW ^A | | 1.0 | ± 0.5 |
| HRVW ^A | | 1.0 | ± 0.5 |
| HR15N | 70 to 77 | 1.0 | ± 0.5 |
| | 78 to 88 | 0.7 | ± 0.5 |
| | 90 to 92 | 0.5 | ± 0.4 |
| HR30N | 42 to 50 | 1.0 | ± 0.5 |
| | 55 to 73 | 0.7 | ± 0.5 |
| | 77 to 82 | 0.5 | ± 0.4 |
| HR45N | 20 to 31 | 1.0 | ± 0.5 |
| | 37 to 61 | 0.7 | ± 0.5 |
| | 66 to 72 | 0.5 | ± 0.4 |
| HR15TW | 74 to 80 | 1.0 | ± 0.7 |
| | 81 to 86 | 0.7 | ± 0.5 |
| | 87 to 93 | 0.7 | ± 0.5 |
| HR30TW | 43 to 56 | 1.0 | ± 0.7 |
| | 57 to 69 | 0.7 | ± 0.5 |
| | 70 to 83 | 0.7 | ± 0.5 |
| HR45TW | 13 to 32 | 1.0 | ± 0.7 |
| | 33 to 52 | 0.7 | ± 0.5 |
| | 53 to 73 | 0.7 | ± 0.5 |
| HR15WW ^A | | 1.0 | ± 0.5 |
| HR30WW ^A | | 1.0 | ± 0.5 |
| HR45WW ^A | | 1.0 | ± 0.5 |
| HR15XW ^A | | 1.0 | ± 0.5 |
| HR30XW ^A | | 1.0 | ± 0.5 |
| HR45XW ^A | | 1.0 | ± 0.5 |
| HR15YW ^A | | 1.0 | ± 0.5 |
| HR30YW ^A | | 1.0 | ± 0.5 |
| HR45YW ^A | | 1.0 | ± 0.5 |

Gambar 4.6 Tabel rentang skala yang diizinkan kekerasan rockwell (ASTM E18 – 15)

4.2.1 Grafik Pengaruh Media Pendinginan terhadap Kekerasan

Dari hasil pengujian kekerasan spesimen *stainless steel* 316 setelah dilakukan proses *heat treatment* dengan variasi temperatur, media pendinginan dan waktu *holding*. Didapatkan hasil grafik pengaruh median pendinginan terhadap kekerasan sebagai berikut.



Gambar 4.7 Pengaruh media pendinginan terhadap kekerasan

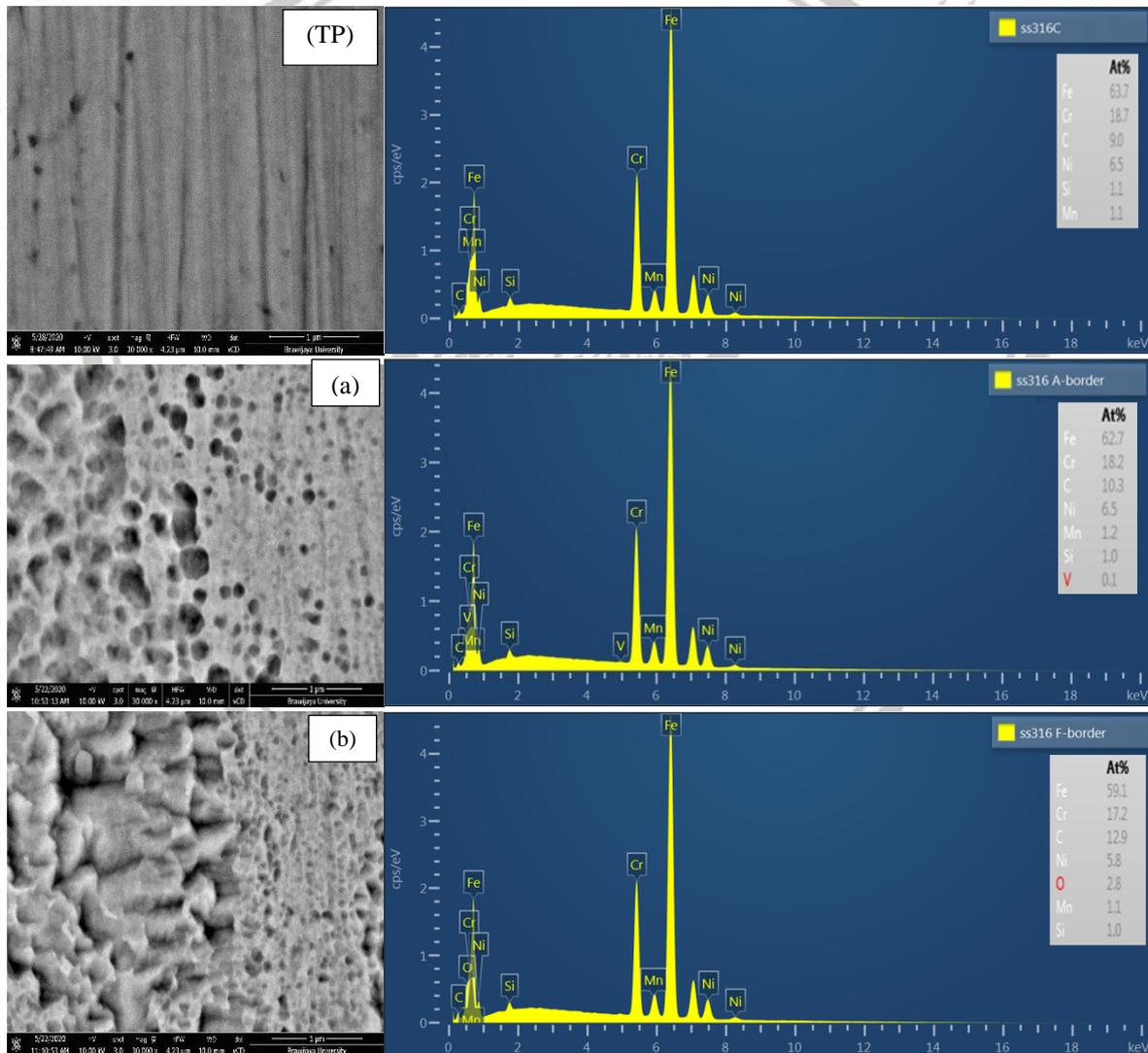
Dari Gambar 4.7 diketahui nilai kekerasan dari spesimen yang telah di *heat treatment*. Nilai kekerasan tertinggi dimiliki oleh spesimen dengan media pendinginan air es kemudian oli dan yang terakhir media pendinginan tungku.

Hal ini disebabkan semakin cepat pendinginan maka nilai kekerasannya akan semakin tinggi, kecepatan pendinginan dipengaruhi oleh tingkat densitas dari media pendinginan karena densitas semakin tinggi, tingkat kerapatannya juga semakin meningkat yang menyebabkan transfer panas menjadi lebih cepat. Sebaliknya densitas yang rendah menyebabkan transfer panas yang semakin lama karena jarak kerapatannya yang lebih jauh.

Dan perbandingan pemanasan 1 kali *holding* di 1000°C selama 1 jam dengan pemanasan 2 kali *holding* yaitu 1000°C selama 1 jam ditambah 450°C selama 2 jam, nilai kekerasan yang lebih tinggi dimiliki oleh spesimen dengan pemanasan dan *holding* sekali saja. Hal ini terjadi karena lebih dekat dengan jarak temperatur terakhir sebelum didinginkan dengan temperatur lebur spesimen *stainless steel* 316 (1398°C) maka nilai kekerasan yang didapat akan semakin tinggi atau semakin tinggi temperatur pemanasan maka nilai kekerasannya akan semakin tinggi pula (Maula F et al. 2013).

4.3 Data Hasil Pengujian SEM-EDS

Pengujian SEM-EDS dilakukan menggunakan alat FEI Quanta FEG 650 di LSIH Universitas Brawijaya. Pengujiannya ini dilakukan untuk melihat persebaran komposisi kimia berdasarkan foto SEM pada spesimen setelah dilakukan proses *heat treatment*. Spesimen uji untuk pengujian EDS yaitu spesimen A (*heating* 1000°C selama 1 jam, pendinginan air es) yang memiliki korosi batas butir paling sedikit setelah diberi perlakuan, spesimen F (*heating* 1000°C selama 1 jam, + 450°C dan di-*holding* selama 2 jam, pendinginan *furnace*) yang memiliki korosi batas butir terbanyak setelah diberikan perlakuan, dan spesimen G (tanpa perlakuan). Berikut hasil uji SEM-EDS:



Gambar 4.8 Foto uji SEM-EDS: (TP) Spesimen tanpa perlakuan dengan perbesaran 30000x, (a) spesimen A dengan perbesaran 30000x, (b) Spesimen F dengan perbesaran 30000x.

4.3.1 Analisis Pengamatan pada Uji SEM-EDS

Pada Gambar 4.8 (TP), analisis unsur atau komposisi dari spesimen tanpa perlakuan *stainless steel* 316. Nilai Fe merupakan unsur yang paling dominan dengan nilai 63,7%. Untuk unsur Chromium (Cr) didapatkan nilai sebesar 18,7%. Dan untuk unsur carbon (C) didapatkan nilai 9,0 %.

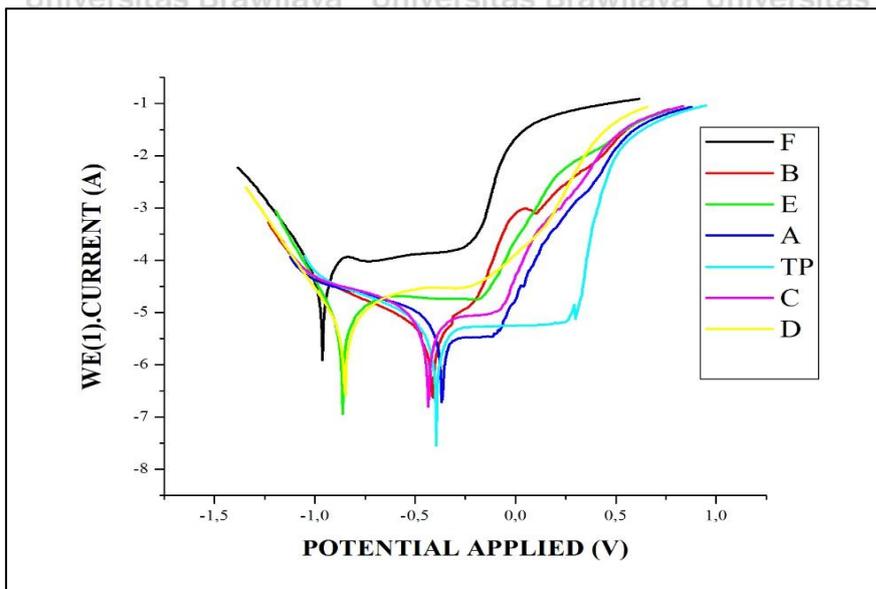
Pada Gambar 4.8 (a), didapatkan analisis unsur atau komposisi dari spesimen A yang berpengaruh terhadap terjadinya korosi batas butir pada material *stainless steel* 316 (Fe, Cr, C). Nilai Fe merupakan unsur yang paling dominan dengan nilai 62,7%. Untuk unsur Chromium (Cr) didapatkan nilai sebesar 18,2% yang mana nilainya lebih kecil dari spesimen TP. Karena pengambilan data pada spot daerah batas butirnya. Dan untuk unsur carbon (C) didapatkan nilai 10,3%.

Sedangkan pada gambar (b), analisis unsur atau komposisi dari spesimen F yang berpengaruh terhadap terjadinya korosi batas butir pada material *stainless steel* 316 (Fe, Cr, C). Nilai Fe merupakan unsur yang paling dominan dengan nilai 59,1%. Untuk unsur Chromium (Cr) didapatkan nilai sebesar 17,2% yang mana nilainya lebih kecil dari spesimen A. Karena pengambilan data pada spot daerah batas butirnya. Hal ini sesuai dengan pernyataan korosi antar butir disebabkan oleh presipitasi karbida Cr pada batas butir, yang menyebabkan daerah tersebut kekurangan Cr didekatnya, dari daerah tersebut korosi dimulai (Budianto A et al. 2009). Dan untuk unsur carbon (C) didapatkan nilai 12,9%.

4.4 Data Hasil Pengujian Laju Korosi terhadap Variasi *Heat Treatment*

Pengujian laju korosi dari masing-masing variasi *heat treatment* dan media pendinginan menggunakan alat AUTOLAB PGSTAT 204. Pengujian dilakukan dengan media larutan yaitu NaCl 3,5 % sebagai simulator dari air laut.

Gambar 4.9 merupakan grafik kurva polarisasi potensiodinamik dari spesimen *stainless steel* 316 tanpa perlakuan dan yang sudah dilakukan proses *heat treatment*. Grafik dibawah terdapat 2 sumbu yaitu sumbu X yang merupakan *potential applied* atau besarnya voltase dan sumbu Y merupakan log dari arus yang dialirkan kepada spesimen yang ujikan., Hasil pengujian laju korosi sebagai berikut:



Gambar 4.9 Kurva polarisasi potensiodinamik

Tabel 4.2

Hasil Pengujian Laju Korosi

| No | Variasi Suhu <i>Heat Treatment</i> | Variasi Media Pendinginan | <i>Corrosion Rate</i> (mm/year) |
|----|---------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| TP | | | 0.086216 |
| 1A | 1000°C | Air Es | 0.11269 |
| 2B | | Oli | 0.12251 |
| 3C | | Tungku | 0.14507 |
| 4D | 1000°C + 450°C | Air Es | 0.22188 |
| 5E | | Oli | 0.36298 |
| 6F | | Tungku | 0.42135 |

Berdasarkan data pengujian korosi pada Tabel 4.2, dapat dilihat hasil dari variasi *heat treatment* terhadap laju korosi, bahwa laju korosi tertinggi dimiliki oleh spesimen F dengan perlakuan pemanasan 1000°C + 450°C pendinginan tungku dengan nilai laju korosi 0,42135 mm/year. Sedangkan untuk spesimen A perlakuan pemanasan 1000°C pendinginan air es memperoleh nilai laju korosi terendah dengan nilai 0,11269 mm/year.

Hal ini dikarenakan jika semakin lama proses *heat treatment* pada temperatur sensitasi akan menyebabkan semakin banyak korosi batas butir yang terjadi pada material tersebut (Budianto A et al. 2009), dibuktikan pada analisa yang didapatkan dari persentase korosi batas butir pada *software ImageJ* pada pembahasan sebelumnya. Sehingga semakin banyak korosi batas butir yang terjadi menyebabkan semakin besar nilai laju korosi pada material tersebut.



Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Proses *heat treatment* dengan variasi pendinginan berpengaruh terhadap terjadinya korosi batas butir pada *stainless steel* 316. Dimana semakin lama *stainless steel* 316 dipanaskan dan berada pada temperatur sensitasiya (450° - 870° C) maka akan semakin banyak pengendapan chromium karbida yang terjadi dan menyebabkan korosi batas butir.
2. Semakin cepat waktu pendinginan menyebabkan semakin tinggi nilai kekerasan. Waktu pendinginan yang cepat menyebabkan jarak antar butir menjadi rapat karena tidak dapat kembali ke posisi semula setelah dipanaskan pada temperatur tertentu dan menyebabkan material menjadi keras.
3. Semakin tinggi nilai kekerasan suatu material, maka korosi batas butir yang terjadi setelah dilakukan proses *heat treatment* akan semakin sedikit, dan sebaliknya korosi batas butir semakin banyak menyebabkan kekerasan menurun.
4. Pemanasan 1000° C dengan media pendinginan menggunakan air es mendapatkan nilai korosi batas butir paling kecil, dibuktikan pada nilai laju korosinya yaitu 0,11269 mm/year.

5.2 Saran

1. Penelitian selanjutnya sebaiknya membahas tentang pengaruh *Heat Treatment* dengan penambahan beberapa metode yang berbeda.
2. Perlunya penelitian lebih lanjut tentang material yang lebih baik dari *stainless steel*, utamanya 316. Contoh seperti titanium atau material lain yang lebih baik ketahanan korosinya.
3. Perlunya penelitian lebih lanjut dengan menggunakan objek penelitian berupa makhluk hidup agar data yang didapatkan sesuai dengan keadaan yang sebenarnya.



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Agung. 2017. Pengaruh Variasi Temperatur Pada Proses Heat Treatment Baja S45c Dengan beberapa Media Pendingin Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro. *Jurnal Teknik Mesin UBL*,
- Ajriyanto, M. K., Kisworo, J., Nabhani. R., Mulijani. S. 2008. Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Ketahanan Korosi Batas Butir Baja Tahan Karat Tipe 316. *Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN*.
- ASTM E112-12. 2013. *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. (2019). Pengaruh Proses Perlakuan Panas Terhadap Nilai Kekerasan Metal Matrix Composite Coating Pada Substrat SS 316 Untuk Aplikasi Pipa Boiler, (2018), 101–108.
- Budianto, A., Purwantini, K., Sujitno, T., Babarsari, J., Pos, K., & Yogyakarta, Y. 2009. Antar Butir Dari Material Baja Tahan Karat Austenitik Setelah Mengalami Proses Pemanasan Material Karat Structure Observation of. *Jfn*, 3(2), 107–130.
- Fontana, M. G. 1987. *Corrosion Engineering*. Third Edition. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- Gapsari, Femiana. 2017. *Pengantar Korosi*. Malang: Universitas Brawijaya Press.
- Groover, Mikell P. 2010. *Fundamental of Modern Manufacturing, Material, Processes and System*. United State of America : John Wiley & Sons.
- Groysman, Alec. 2010. *Corrosion for Everybody*. London Ney York : Springer Dordrecht Heidelberg.
- Gunawan, E. 2017. Pengaruh Temperatur Pada Proses Perlakuan Panas Baja Tahan Karat Martensitik Aisi 431 Terhadap Laju Korosi Dan Struktur Mikro. *Teknika: Engineering and Sains Journal*, 1(1), 55–66. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1116030>.
- Handoyo, Y. (2015). Pengaruh Quenching Dan Tempering Pada Baja Jis Grade S45C Terhadap Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro Crankshaft. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Unisma “45” Bekasi*, 3(2).
- Irawan, A. (2016). Analisis Korosi pada Pipa Gas. *ResearchGate*, Universitas Negeri Semarang.
- Marpaung, H., Suriansyah, & Ismail, N. R. 2016. Pengaruh Heat Treatment Terhadap Kekerasan dan Mikrostruktur Sprocket Drive dan Sprocket Driven.
- Martides. E. et al. 2019. Pengaruh Proses Perlakuan Panas Terhadap Nilai Kekerasan Metal Matrix Composite Coating Pada Substrat SS 316 Untuk Aplikasi Pipa Boiler, (2018), 101–108.
- Pattiriew, Kevin J., Rauf, Fentje A., Lumintang, Romels. 2013. Analisis Laju Korosi Pada Baja Karbon dengan Menggunakan Air Laut dan H₂SO₄. *Teknik Mesin: Universitas Sam Ratulangi Manado*.
- Payana, D., Widiyarta, I. M., & Sucipta, M. 2018. Kekerasan Baja Karbon Sedang dengan Variasi Suhu Permukaan Material. *Jurnal METTEK*.

Prajitno D.H, Setiawan J. 2019. Perilaku Elektrokimia Baja Tahan Karat SS 316 dalam Media Nano Fluida. Jawa Barat: *Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan - BATAN*.

Pramono, A. 2011. Karakteristik Mekanik Proses Hardening Baja Aisi 1045 Media Quenching Untuk Aplikasi Sprochet Rantai. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Cakra M*, 5(1), 32–38.

Prifiarni, S., Anwar, M. S., & Mabruri, E. 2016. Pengaruh Perlakuan Panas terhadap Struktur Mikro dan Ketahanan Korosi Baja Tahan Karat Martensitik 13Cr-1Mo. *Widyaiset*, 2(1), 9–16.

Rochim, Taufiq. 1993. *Teori dan Teknologi Proses Permesinan. Higher Education Development Support Project*, Bandung: ITB.

Furqon, S, G. R., Firman, M., & Sugeng, M. A. S. 2016. Analisa Uji Kekerasan Pada Poros Baja St 60 Dengan Media Pendingin Yang Berbeda. *Uniska*, 01(02), 21–26.

Setyowati, V. A., & Widodo, E. 2018. Analisis Kekuatan Tarik dan Karakteristik XRD pada Material *Stainless Steel* dengan Kadar Karbon yang Berbeda, (April), 0–6.

Sidiq, M. F., Shidik, M. A., & Soebyakto. 2016. Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST) Yogyakarta,

Sumaraw, E. A., & Bidang, P. 2010. Dan Kekerasan Baja Crmov Dengan Media *Quench* Yang Berbeda, 5(2), 66–73.

Sumarji. 2011. Studi Perbandingan Ketahanan Korosi *Stainless Steel* Tipe SS 304 dan SS 201 Menggunakan *Metode U-Bend Test* secara Siklik dengan Variasi Suhu dan Ph. *Rotor*, 4, 1–8.

Wahyuningsih U, dkk. 2017. Penanggulangan Korosi pada Pipa Gas dengan Metode *Catodic Protection* (Anoda Korban). *STT PLN: Teknik Mesin*.

Zakiyya H, Drastiawati N, S. 2016. Evaluasi Sensitasi pada Baja Tahan Karat 316 Menggunakan Alat Kemampukerasan type Jominy. Surabaya: *Universitas Negeri Surabaya*.



LAMPIRAN



Lampiran 1
Data Hasil Uji Kekerasan



LABORATORIUM UJI LOGAM
JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MERDEKA MALANG

LEMBAR DATA UJI KEKERASAN

| | | | |
|----------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|
| Nama | : Muhammad Arief Hidayat | Jenis Mesin | : Rockwell Hardness Tester |
| NIM | : 165060201111043 | Bentuk bahan | : Plat |
| Hari / tanggal | : Rabu/08-April-2020 | Indeks Rockwell | : A |
| Pukul | : 13.00 s/d selesai | | |
| Standar Uji | : ASTM | | |

| No | Jenis Bahan | Beban Mayor (kg) | Beban Minor (kg) | Waktu (det) | Jenis Indentor | Warna skala | Harga Kekerasan (HRA) | Rata-rata Kekerasan (HRA) |
|-------------|----------------------------------|------------------|------------------|-------------|----------------|-------------|-----------------------|---------------------------|
| 1 2 3 | Base Metal | 60 | 10 | 5 | Diamond Cone | Black | 56 57 58 | 57 |
| 1 2 3 | Stainless Steel 316 (Air es) (1) | 60 | 10 | 5 | Diamond Cone | Black | 50 49 50 | 50 |
| 1 2 3 | Stainless Steel 316 (Air es) (2) | 60 | 10 | 5 | Diamond Cone | Black | 48 47 48 | 47,67 |

* Coret yang tidak perlu

Mengetahui,
Kepala Laboratorium Uji Logam

Instruktur



Ir. Mardjuki, MT

Ir. H. Jumiadi, MT





**LABORATORIUM UJI LOGAM
JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MERDEKA MALANG**

LEMBAR DATA UJI KEKERASAN

| | | | |
|-----------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------|
| Nama | : Muhammad Arief Hidayat | Jenis Mesin | : Rockwell Hardness Tester |
| NIM | : 165060201111043 | Bentuk bahan | : Plat |
| Hari / tanggal | : Rabu/08-April-2020 | Indeks Rockwell | : A |
| Pukul | : 13.00 s/d selesai | | |
| Standar Uji | : ASTM | | |

| No | Jenis Bahan | Beban Mayor (kg) | Beban Minor (kg) | Waktu (det) | Jenis Indentor | Titik Pengujian (mm) | Harga Kekerasan (HRA) | Rata-rata Kekerasan (HRA) |
|-------------|-----------------------------------|------------------|------------------|-------------|----------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|
| 1 2 3 | Stainless Steel 316 (Oli) (1) | 60 | 10 | 5 | Diamond Cone | Black | 45 46 46 | 45,67 |
| 1 2 3 | Stainless Steel 316 (Oli) (2) | 60 | 10 | 5 | Diamond Cone | Black | 41 42 42 | 41,67 |
| 1 2 3 | Stainless Steel 316 (Furnace) (1) | 60 | 10 | 5 | Diamond Cone | Black | 39 39 40 | 39,33 |
| 1 2 3 | Stainless Steel 316 (Furnace) (2) | 60 | 10 | 5 | Diamond Cone | Black | 36 36 37 | 36,33 |

* Coret yang tidak perlu

Mengetahui,
Kepala Laboratorium Uji Logam



Ir. Mardjuki, MT

Instruktur

Ir. H. Jumiadi, MT



Lampiran 2
Data Hasil Uji SEM-EDS

19052020

5/28/2020

Project Notes

SEM Instrument : FEI - Quanta FBG 650
 SEM type : FESEM
 License to : Universitas Brawijaya
 EDS detector : Oxford Instrument - X-act
 EDS software : AZtecOne
 Manage by : Laboratorium Sentral Ilmu Hayati (Central Laboratory of Life Science)

Specimen Notes for 'ss316 A'

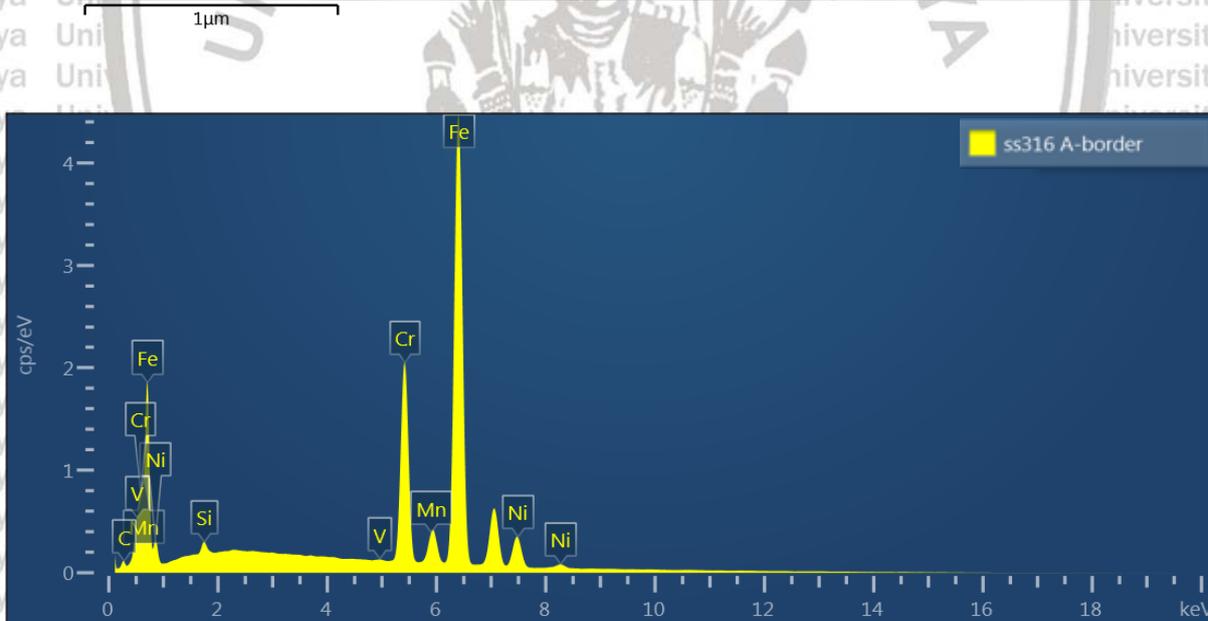
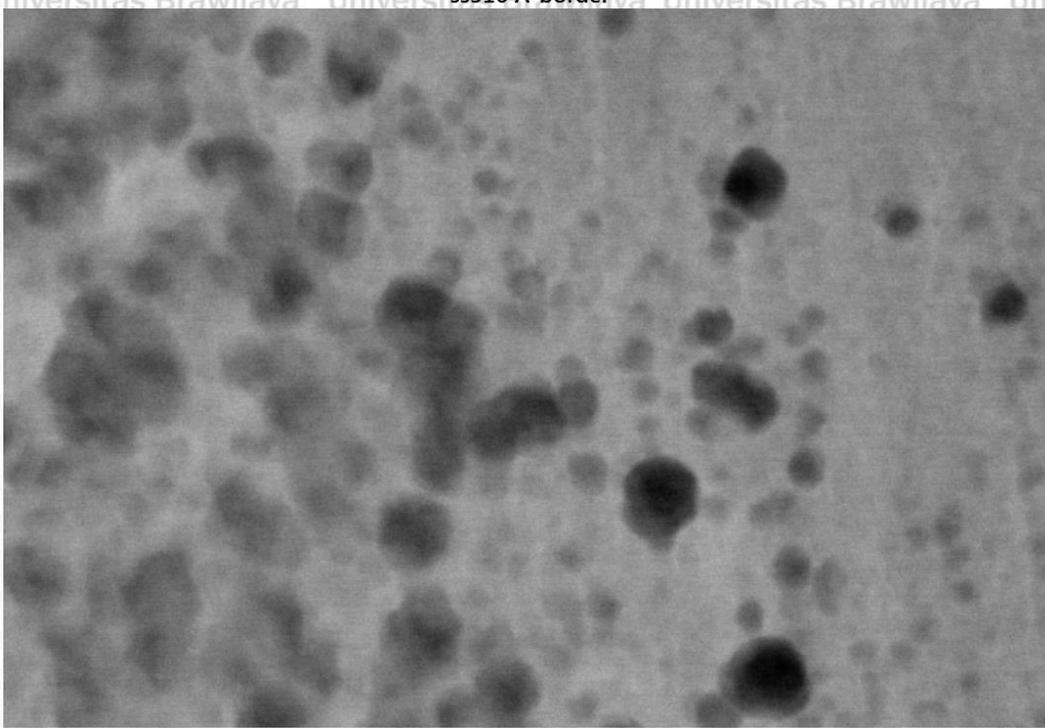
FESEM set-up for EDS acquisition
 Vacuum mode : High Vacuum
 HV : 20 kV
 spot size : 5
 dwell time : 1 us
 WD : 10 mm
 tilt : 0
 SEM Image det. : vCD (BSE image)
 Sample prep : sample was put on top of the stub with double sided carbon tape. No sputter coating.



The Business of Science®



ss316 A-border



| ss316 A-border | | | | |
|----------------|-----------|----------|----------------|----------|
| Element | Line Type | Weight % | Weight % Sigma | Atomic % |
| Cr | K series | 18.72 | 0.12 | 18.18 |
| Fe | K series | 69.30 | 0.22 | 62.68 |
| Ni | K series | 7.57 | 0.13 | 6.51 |
| Mn | K series | 1.28 | 0.09 | 1.18 |
| Si | K series | 0.54 | 0.04 | 0.98 |
| C | K series | 2.46 | 0.21 | 10.34 |
| V | K series | 0.13 | 0.04 | 0.13 |
| Total | | 100.00 | | 100.00 |

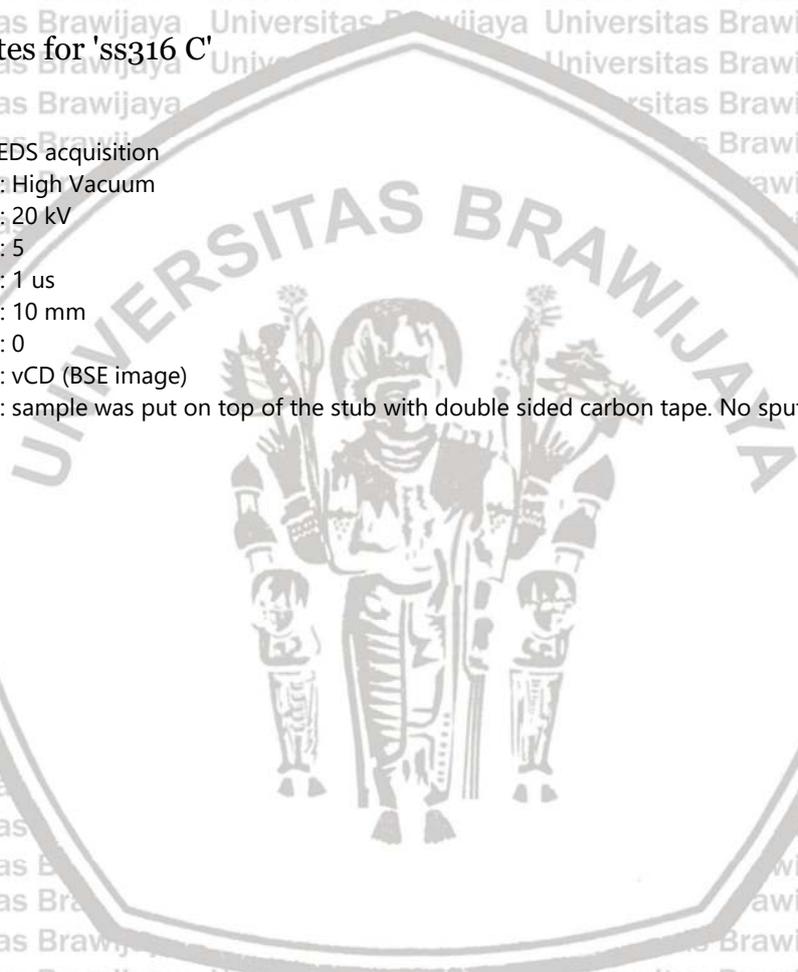


Project Notes

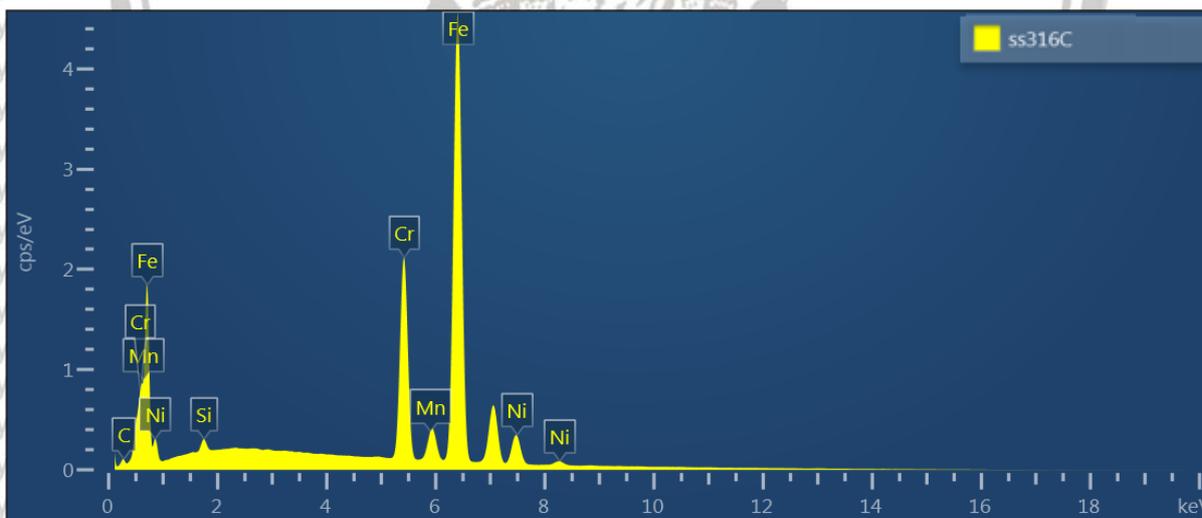
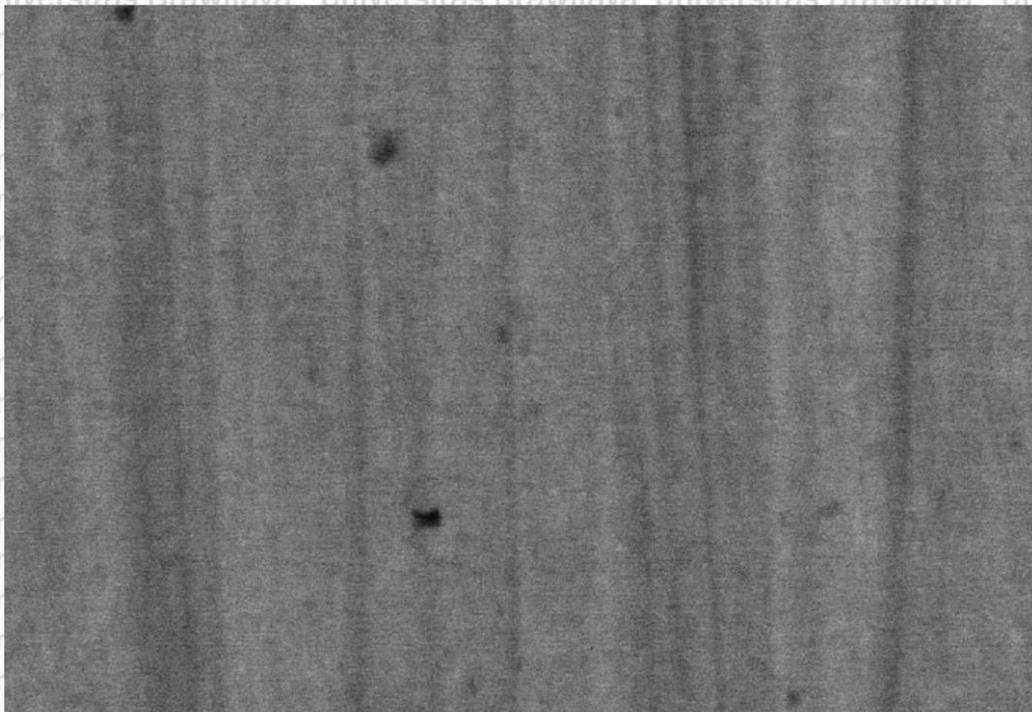
SEM Instrument : FEI - Quanta FEG 650
 SEM type : FESEM
 License to : Universitas Brawijaya
 EDS detector : Oxford Instrument - X-act
 EDS software : AZtecOne
 Manage by : Laboratorium Sentral Ilmu Hayati (Central Laboratory of Life Science)

Specimen Notes for 'ss316 C'

FESEM set-up for EDS acquisition
 Vacuum mode : High Vacuum
 HV : 20 kV
 spot size : 5
 dwell time : 1 us
 WD : 10 mm
 tilt : 0
 SEM Image det. : vCD (BSE image)
 Sample prep : sample was put on top of the stub with double sided carbon tape. No sputter coating.



ss316C



| ss316C | | | | |
|---------|-----------|----------|----------------|----------|
| Element | Line Type | Weight % | Weight % Sigma | Atomic % |
| Cr | K series | 19.03 | 0.12 | 18.68 |
| Fe | K series | 69.72 | 0.22 | 63.74 |
| Ni | K series | 7.42 | 0.13 | 6.45 |
| Si | K series | 0.58 | 0.04 | 1.06 |
| Mn | K series | 1.13 | 0.08 | 1.05 |
| C | K series | 2.12 | 0.20 | 9.01 |
| Total | | 100.00 | | 100.00 |



19052020

5/28/2020

Project Notes

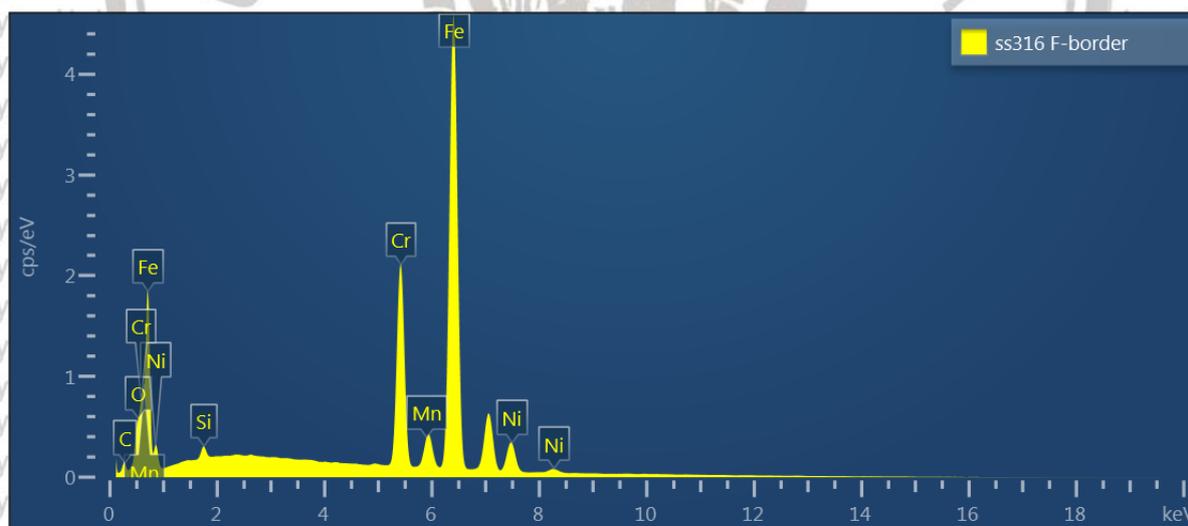
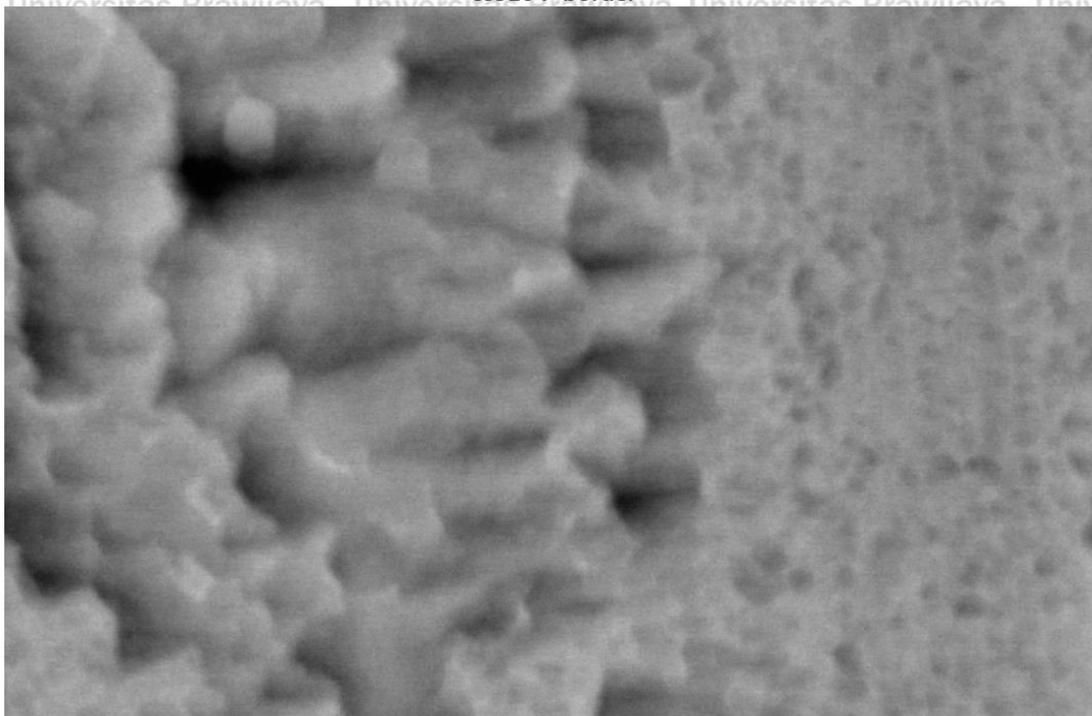
SEM Instrument : FEI - Quanta FEG 650
SEM type : FESEM
License to : Universitas Brawijaya
EDS detector : Oxford Instrument - X-act
EDS software : AZtecOne
Manage by : Laboratorium Sentral Ilmu Hayati (Central Laboratory of Life Science)

Specimen Notes for 'ss316 F'

FESEM set-up for EDS acquisition
Vacuum mode : High Vacuum
HV : 20 kV
spot size : 5
dwell time : 1 us
WD : 10 mm
tilt : 0
SEM Image det. : vCD (BSE image)
Sample prep : sample was put on top of the stub with double sided carbon tape. No sputter coating.



ss316 F-border



| ss316 F-border | | | | |
|----------------|-----------|----------|----------------|----------|
| Element | Line Type | Weight % | Weight % Sigma | Atomic % |
| Cr | K series | 18.57 | 0.12 | 17.24 |
| Fe | K series | 68.39 | 0.24 | 59.12 |
| Ni | K series | 7.11 | 0.12 | 5.84 |
| C | K series | 3.22 | 0.22 | 12.94 |
| Si | K series | 0.56 | 0.04 | 0.96 |
| Mn | K series | 1.22 | 0.08 | 1.07 |
| O | K series | 0.94 | 0.13 | 2.83 |
| Total | | 100.00 | | 100.00 |

