



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH SENSITASI TERHADAP PERILAKU KOROSI
RETAK TEGANG PADA SS 304 DENGAN METODE BENT
BEAM STRESS CORROSION CRACKING TEST
LINGKUNGAN NACL**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**HUTRI PRIANUGRAH
0806455736**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar**

Nama : Hutri Prianugrah

NPM : 0806455736

Tanda Tangan : 

Tanggal : 4 Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Hutri Prianugrah

NPM : 0806455736

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Judul Skripsi : Pengaruh Sensitasi Terhadap Perilaku Korosi Pada SS
304 Dengan Metode Bent Beam Stress Corrosion
Cracking Test Lingkungan NaCl

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan
Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang
diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material,
Fakultas Teknik, Universitas Indonesia**

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi M.S, DEA

Penguji 1 : Dr. Ir. Sutopo M.Sc

Penguji 2 : Dr. Rianti Dewi Sulamet A. S.T., M. Eng

Penguji 3 : Ayende S.T., M.Si

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Juli 2012

KATA PENGANTAR

Pertama–tama, penulis haturkan syukur kepada Allah SWT karena berkat restu, nikmat dan bimbingan-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan baik tanpa adanya hambatan yang cukup berarti dalam pengujian sampai akhirnya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka untuk memenuhi salah satu syarat untuk menggapai gelar Sarjana Teknik (ST) jurusan Metalurgi dan Material di Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan masa perkuliahan dan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi M.S, DEA, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu dan pikiran untuk mengarahkan Penulis dalam penyusunan skripsi ini.
2. Prof. Dr-Ing. Ir. Bambang Suharno, selaku Kepala Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI dan sebagai penguji
3. Dr. Ir. Myrna Ariati M M.Si, selaku Pembimbing Akademis Penulis selama menempuh studi di Teknik Metalurgi dan Material.
4. Semua dosen beserta karyawan yang ada di Departemen Metalurgi dan Material FTUI, yang telah memberikan bimbingan selama masa perkuliahan.
5. Orang tua Penulis, Mispriyadi dan Irwani Nasution beserta kakak penulis Ratri Nidia P dan Pudia Prisandhy yang telah memberikan bantuan dukungan moral dan materil hingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
6. Teman-teman Metalurgi yang membantu dan memberi semangat.

Akhir kata, Penulis menghaturkan ucapan termakasih sebesar-besarnya pada seluruh pihak, baik yang telah disebut maupun tidak. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, Juli 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai civitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di

bawah ini, :

Nama : Hutri Prianugrah
NPM : 080645736
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Pengaruh Sensitasi Terhadap Perilaku Korosi Pada SS 304 Dengan Metode
Bent Beam Stress Corrosion Test Lingkungan NaCl**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis atau pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 4 Juli 2012

Yang menyatakan


(Hutri Prianugrah)

ABSTRAK

Nama : Hutri Prianugrah
NPM : 0806455736
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Sensitasi Terhadap Perilaku Korosi Pada SS 304 Dengan Metode Bent Beam *Stress Corrosion Test* Lingkungan NaCl

Korosi retak tegang pada *austenitic stainless steel* yang mengalami sensitasi kerap terjadi pada wadah dalam ukuran tonase, pipa, *heat exchanger*, *water cooled nuclear power plant*. Faktor pemicu berupa fenomena sensitasi yang membentuk karbida krom di batas butir akibat dari proses las, *flame cutting*, perlakuan panas, *metal fabrication* atau pun material yang sedang beroperasi pada temperatur tinggi. Adanya tegangan yang dapat berupa tegangan sisa dan tegangan aplikasi. Dan juga lingkungan korosif.

Pada penelitian ini menggunakan metode bent beam pada lingkungan *salt spray* dengan variabel laju pendinginan berupa pendinginan air, udara dan tungku dengan pemanasan temperatur 800°C waktu tahan 100 menit. Pengamatan pada penelitian ini meliputi pengamatan keberadaan karbida krom menggunakan elektro etsa, pengamatan perilaku korosi visual menggunakan *dye penetrant test*, mikrostruktur dan pengujian mekanik berupa pengujian kekerasan *Rockwell*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karbida krom terbentuk pada sampel dengan pendinginan air, udara dan tungku, dengan kuantitas terbanyak ada pada sampel pendinginan tungku kemudian udara, dan kromium karbida paling sedikit ada pada sampel pendinginan air. Kekerasan tertinggi ada pada sampel pendinginan air 63.1 HRB, kemudian udara 62.5 HRB dan kekerasan terendah pada pendinginan tungku 61.9 HRB. Pengamatan perilaku korosi pada semua sampel menunjukkan belum adanya retak, namun terdeteksi adanya *pitting* dengan kuantitas *pitting* yang beragam.

Kata kunci: *Austenitic stainless steel*, sensitasi, *chromium carbide*, *bent beam*

ABSTRACT

Name : Hutri Prianugrah
NPM : 0806455736
Major : Metallurgy and Material Engineering
Title : Effect of Sensitization on Corrosion Behavior
SS304 With Bent Beam Stress Corrosion Test in
NaCl Environment

Stress corrosion cracking in sensitized austenitic stainless steel sometimes happened in the tonnage storage, pipe, heat exchanger, and water cooled nuclear power plant. The factor that initiate SCC in this case is a sensitization which form chrome carbide in grain boundaries which is caused by welding, flame cutting, heat treating, metal fabrication or high temperature operation. The stress comes from applied stress and residual stress. And corrosive environment.

This research used bent beam method in salt spray environment. The different cooling rate was applied to the samples. The medium of cooling used in this research are water cooling, air cooling and furnace cooling. The sampel was sensitized at 800°C and 100 min holding time. Observations of this research included identification of Karbida krom with electro etching and optical microscope, observation of corrosion behavior with dye penetrant test and optical microscope, and hardness rockwell testing.

The result shows that chrome carbide can be formed with water cooling, air cooling and furnace cooling. The highest quantities of chrome carbide is in furnace cooling sample and the second place is air cooling sample. And the lowest quantities of Cr carbide is in air cooling sample. The hardest is in water colling sample 63.1 HRB. Air cooling sample 62.5 HRB. And furnace cooling sampel 61.9 HRB. The observation of corrosion behavior shows pitting corrosion but there aren't cracks yet. The pits have variation amounts in every variables samples.

Keywords: Austenitic stainless steel, sensitization, chromium carbide, bent beam

DAFTAR ISI

| | |
|--|------------|
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | i |
| HALAMAN PENGESAHAN..... | ii |
| KATA PENGANTAR..... | iii |
| HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS..... | iv |
| AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS..... | iv |
| ABSTRAK | v |
| DAFTAR ISI..... | vii |
| DAFTAR TABEL | ix |
| DAFTAR GAMBAR..... | x |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.3. Tujuan Penelitian..... | 3 |
| 1.4. Batasan Penelitian | 3 |
| 1.5. Tempat Penelitian..... | 4 |
| 1.6. Sistematika Penelitian | 4 |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA..... | 6 |
| 2.1 Korosi | 6 |
| 2.1.1 Definisi | 6 |
| 2.1.2 Korosi Pada <i>Stainless Steel</i> | 6 |
| 2.1.3 <i>Stress Corrosion Cracking</i> | 7 |
| 2.1.3.1 Definisi..... | 7 |
| 2.1.3.2 Mekanisme Korosi Retak Tegang..... | 7 |
| 2.1.3.3 Morfologi Perpatahan SCC..... | 9 |
| 2.1.3.4 Faktor Mempengaruhi SCC..... | 10 |
| 2.2 Sensitasi..... | 11 |
| BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN | 14 |

| | |
|---|-----------|
| 3.1. Diagram alir penelitian | 14 |
| 3.2. Alat dan Bahan | 15 |
| 3.2.1. Alat..... | 15 |
| 3.2.2. Bahan | 15 |
| 3.3 Prosedur Kerja..... | 15 |
| 3.4 Preparasi Sampel | 16 |
| 3.4.1 Preparasi Uji Tarik..... | 16 |
| 3.4.2 Preparasi Sampel Uji Komposisi | 17 |
| 3.4.3 Preparasi Sampel Uji Metalografi (Pengujian Keberadaan Karbida) ... | 17 |
| 3.4.4 Preparasi Sampel Uji <i>Stress Corrosion Cracking</i> | 19 |
| 3.4.5 Preparasi Sampel Uji Kekerasan..... | 19 |
| 3.5 <i>Perlakuan panas</i> (Sensitasi)..... | 20 |
| 3.6 Pembuatan Spesimen Holder..... | 20 |
| 3.7 Pembuatan Larutan NaCl 5% | 21 |
| 3.8 Pengujian Salt Spray | 21 |
| 3.9 Pengujian Penetran (<i>Liquid Penetrant Testing</i>) | 22 |
| 3.10 Pengamatan Mikro Perilaku Korosi | 24 |
| BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN | 25 |
| 4.1 Karakterisasi Komposisi Material | 25 |
| 4.2 Analisa Nilai Pengujian Tarik | 26 |
| 4.3 Pengamatan Keberadaan Kromium Karbida | 28 |
| 4.4 Analisa Nilai Kekerasan | 35 |
| 4.5 Analisa Pengamatan Visual Dan Mikro Perilaku Korosi Uji Bent Beam ... | 40 |
| BAB 5 KESIMPULAN | 47 |
| 5.1 Kesimpulan..... | 47 |
| DAFTAR PUSTAKA | 49 |

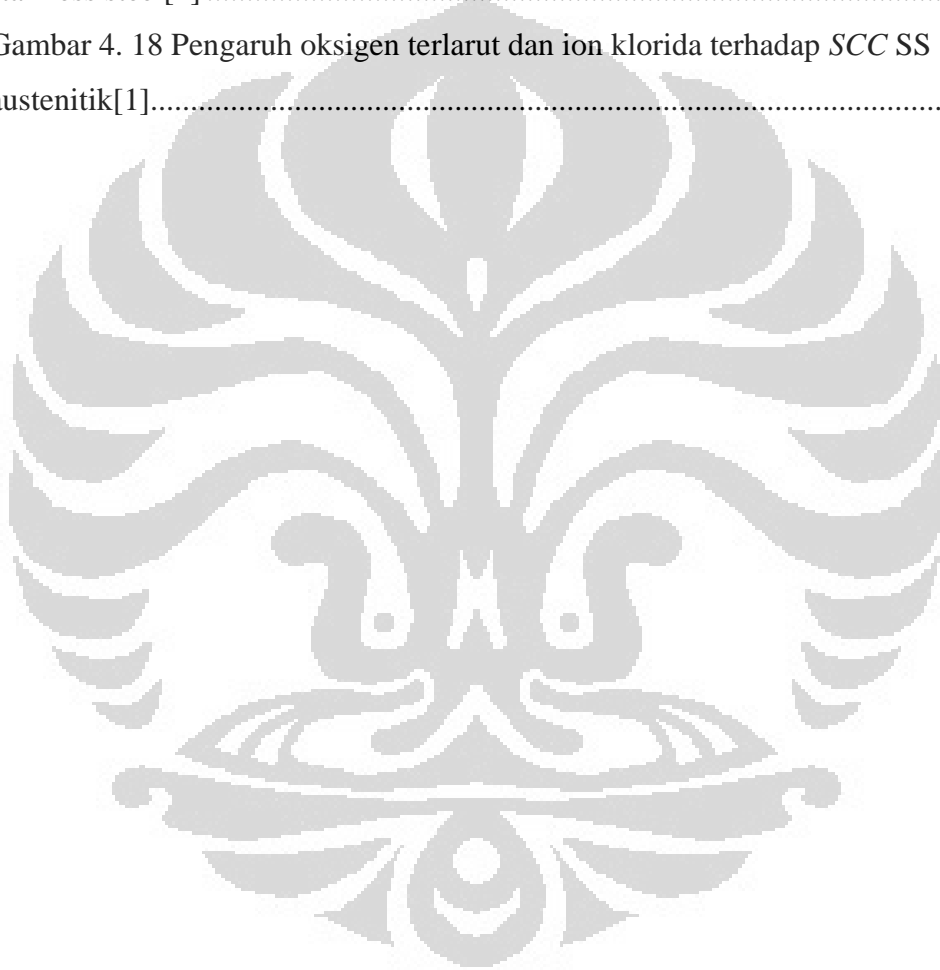
DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 4. 1 Hasil uji komposisi SS304 | 25 |
| Tabel 4. 2 Komposisi SS304 (ASTM A 666-03)..... | 26 |
| Tabel 4. 3 Nilai tegangan dan regangan 30% <i>yield stress</i> | 27 |
| Tabel 4. 4 Perhitungan regangan..... | 27 |
| Tabel 4. 5 Perhitungan panjang sampel | 27 |
| Tabel 4. 6 Hasil uji tarik..... | 28 |
| Tabel 4. 7 Hasil uji kekerasan SS304 Non-HT | 35 |
| Tabel 4. 8 Hasil uji kekerasan SS304 pendinginan air..... | 36 |
| Tabel 4. 9 Hasil uji kekerasan SS304 pendinginan udara..... | 36 |
| Tabel 4. 10 Hasil uji kekerasan SS304 pendinginan tungku..... | 37 |
| Tabel 4. 11 Hasil rata-rata uji kekerasan SS304 | 37 |
| Tabel 4. 12 Data kekerasan literatur SS304 A-204..... | 40 |
| Tabel 4. 13 Indikasi <i>pit</i> dan <i>crack</i> | 43 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2. 1 Penyebab <i>premature fracture</i> disebabkan korosi pada komponen struktur[16]..... | 10 |
| Gambar 2. 2 Pelepasan ion-ion Fe ²⁺ dari batas butir[5] | 11 |
| Gambar 2. 3 Skema gambaran pelepasan ion-ion Fe ²⁺ sekitar presipitasi senyawa khrom karbida di batas butir[5]..... | 11 |
| Gambar 2. 4 Pengaruh temperatur dan laju pendinginan terhadap pembentukan <i>Cr carbide</i> [20]..... | 12 |
| Gambar 2. 5 a). Intergranular corrosion terjadi pada austenitic ss b). Karbida krom terbentuk dengan pendinginan lambat c). quench anneal melarutkan carbide yang mencegah intergranular corrosion[20] | 13 |
| Gambar 3. 1 Sampel uji tarik sebelum dibuat gauge length | 16 |
| Gambar 3. 2 Sampel uji tarik sesudah dibuat gauge length[14] | 17 |
| Gambar 3. 3 Perlatan elektro etsa | 17 |
| Gambar 3. 4 Skema cara pemasangan elektronik etsa[5] | 18 |
| Gambar 3. 5 Alat foto mikro dan mikroskop optik..... | 19 |
| Gambar 3. 6 Tungku Nabertherm | 20 |
| Gambar 3. 7 Perancangan bentuk holder | 21 |
| Gambar 3. 8 Mesin <i>salt spray</i> | 22 |
| Gambar 3. 9 <i>Penetrant, cleaner, developer</i> | 24 |
| Gambar 4. 1 Sampel uji komposisi | 25 |
| Gambar 4. 2 Sampel uji tarik | 27 |
| Gambar 4. 3 Sampel uji keberadaan karbida | 28 |
| Gambar 4. 4 Non-HT 200X | 29 |
| Gambar 4. 5 Non-HT 500X | 29 |
| Gambar 4. 6 Pendinginan air 200X..... | 30 |
| Gambar 4. 7 Pendinginan air 500X..... | 31 |
| Gambar 4. 8 Pendinginan Udara 200X | 32 |
| Gambar 4. 9 Pendinginan udara 500X | 32 |
| Gambar 4. 10 Pendinginan tungku 200X..... | 33 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4. 11 Pendinginan tungku 500X..... | 34 |
| Gambar 4. 12 Grafik rata-rata uji kekerasan SS304 semua kondisi sampel | 37 |
| Gambar 4. 13 Persen reduksi terhadap persen volum martensit[18] | 38 |
| Gambar 4. 14 Nilai kekerasan terhadap persen reduksi ketebalan[18]..... | 39 |
| Gambar 4. 15 Sampel diberi <i>penetrant</i> | 41 |
| Gambar 4. 16 Sampel diberi <i>developer</i> | 41 |
| Gambar 4. 17 Kondisi temperatur dan konsentrasi Cl untuk SCC pada austenitic stainless steel[1] | 42 |
| Gambar 4. 18 Pengaruh oksigen terlarut dan ion klorida terhadap SCC SS austenitik[1]..... | 45 |



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Stress-corrosion cracking (SCC) merupakan perpatahan getas pada paduan di lingkungan dengan pembebanan tegangan tarik konstant yang relatif kecil dan terekspos dengan lingkungan yang korosif[1]. Retakan pada *stress corrosion cracking* dapat berbentuk retakan *intergranular* atau *transgranular* yang secara kasat mata tidak dapat terlihat dan akan terlihat dengan jelas bila menggunakan *scanning electron microscope* (SEM) atau dengan mikroskop lain dengan perbesaran yang sesuai. *Crack* atau retakan yang terbentuk akan mengalami propagasi seiring dengan waktu dan pembebanan yang teraplikasi sehingga lambat laun material akan mengalami kegagalan.

SCC juga dapat menyerang logam paduan yang dikenal memiliki ketahanan akan korosi yang baik seperti stainless steel. Material ini banyak digunakan untuk konstruksi di lingkungan fluida korosif, seperti wadah dalam ukuran tonase, pipa, *heat exchanger*, *water cooled nuclear power plant*. Permasalahan yang timbul bila material *austenitic stainless steel* ini diaplikasikan pada lingkungan yang korosif, dengan pembebanan yang statis dan juga pada temperatur operasi yang tinggi. Kondisi operasi temperatur tinggi memicu terbentuknya karbida krom di batas butir yang menurunkan ketahanan korosi *austenitic stainless steel*. Selain itu keberadaan *Cr carbide* juga dapat dikarenakan proses pengelasan pada *austenitic stainless steel*. Mekanisme ini disebut dengan sensitasi yang mengakibatkan serangan korosi dibatas butir (*intergranular corrosion*). Ada atau tidaknya *Cr carbide* yang terbentuk berpengaruh terhadap ketahanan korosi dan retak juga perpatahan yang terbentuk serta kekuatan mekanik dari austenitic stainless steel ini. Maka dengan lingkungan yang seperti ini sangat berpotensi mengalami kegagalan material yang dipicu dari korosi yang terjadi biasa disebut dengan korosi retak tegang[2] [5].

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan sebagai simulasi pengujian korosi retak tegang, diantaranya yaitu: Slow strain rate, constant load stress, C-Ring, O-ring, U-bend, dan Bent beam stress corrosion test specimen. Metode pengujian bending yang digunakan adalah metode bent beam dengan

acuan standard yang digunakan merujuk pada ASTM G39 [3]. Selain dari tegangan, lingkungan juga sangat berpengaruh. Pada percobaan ini disimulasikan lingkungan ekstreme (lingkungan air laut) dengan metoda salt spray yang mana menggunakan konsentrasi NaCl 3.5% sebagai pertimbangan sumber ion klorida. Namun sebelumnya dilakukan proses pemanasan pada temperatur sensitasi dengan pemanasan menggunakan *furnace* dan memvariasikan media pendinginan yang terdiri dari pendinginan air, udara, dan pendinginan tungku. Dengan terbentuknya *chromium carbide* atau terjadi sensitasi, sehingga fenomena ini merupakan simulasi proses temperature kerja yang tinggi ataupun sebagai simulasi material *austenitic stainless steel* yang dilas dan juga temperatur operasi tinggi.

1.2. Perumusan Masalah

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh sensitasi atau keberadaan sensitasi (kromium karbida) pada *austenitic stainless steel* tipe 304 di batas butir terhadap ketahanan akan korosi retak tegang dalam lingkungan korosif yang mengandung ion klorida (NaCl 3.5%) dengan menggunakan metode *two loaded bent beam*. Dengan dilakukannya penelitian ini, diharapkan dapat diketahui bahaya yang ditimbulkan dengan adanya sensitasi atau kromium karbida pada *austenitic stainless steel* tipe 304. Dapat diketahui bahwa dengan adanya sensitasi, ketahanan akan korosi retak tegang juga akan menurun. *Cr Carbide* yang terbentuk dibatas butir menjadikan material mengalami perpatahan akibat SCC berjenis *Intergranular SCC*. Ini terjadi akibat proses sensitasi sehingga terbentuk *depleted zone* disekitar batas butir dan menjadikan perbedaan potensial antara batas butir dengan daerah disekitar batas butir (*depleted zone*). Yang mana potensial lebih rendah terdapat di *depleted zone* sehingga daerah ini mudah terkorosi. Sensitasi dengan terbentuknya kromium karbida merupakan pencerminan terhadap material stainless steel yang telah dilas, *flame cutting*, *perlakuan panas*, *metal fabrication* atau pun material yang sedang beroperasi dalam temperatur tinggi dan secara mikro sudah terdapat *Cr Carbide* didalamnya. Sementara tegangan yang didapat oleh material dapat berasal dari tegangan pada

saat pengoperasian (fluida atau gas dalam pipa) ataupun tegangan internal yang berasal dari tegangan sisa dalam material itu sendiri[8].

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh perbedaan media pendinginan atau laju pendinginan terhadap sensitasi yang terbentuk.
2. Mengamati nilai kekerasan material akibat sensitasi.
3. Mengamati kondisi atau perilaku korosi material dengan parameter ada atau tidaknya *Cr carbide* pada sampel akibat pengaruh pembebanan dan *salt spray*.
4. Mengetahui pengaruh *Cr carbide* atau sensitasi terhadap timbulnya *stress corrosion cracking* pada material *austenitic stainless steel* dalam lingkungan ekstrim *salt spray*.

1.4. Batasan Penelitian

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini antara lain :

1. Benda Uji

Material yang digunakan adalah austenitic stainless steel tipe 304. Dengan komposisi: 0.06% C; 16-18% Cr; 8.25% Ni; 0.96% Mn; <1% Si; <0.008 S; 0.03% P; 72.06%. Penekukan dilakukan dengan 9 jenis sampel, dimana kesembilan sampel merupakan austenitic stainless steel yang disensitasi dengan memvariasikan media pendinginan. Tiga sampel pendinginan air, tiga sampel pendinginan udara, dan tiga sampel pendinginan tungku. Dimensi setiap sampel yang digunakan adalah 22.5x3 cm dan ketebalan berkisar 0.8 mm.

2. Pemanasan *Furnace* dan Variasi Pendinginan

Pemanasan menggunakan tungku sampai temperatur sensitasi (800°C). Media pendinginan dan proses pendinginan pada percobaan ini divariasikan agar mengetahui variasi laju pendinginan terhadap terjadinya

sensitasi. Variasi yang digunakan berupa pendinginan air, udara, dan tungku.

3. Specimen Holder

Specimen holder yang digunakan terbuat dari kayu. Specimen holder ini dibuat berdasarkan standard ASTM G-39 dengan metode *two-point loaded specimen* sebanyak enam buah *holder*. Ukuran specimen holder adalah:

- a. Panjang antar holder (H): 20.8 cm
- b. Lebar holder: 5 cm
- c. Tebal: 4 cm

4. Larutan NaCl 3.5%

Larutan NaCl 3.5% yang digunakan merupakan simulasi lingkungan ekstrim (lingkungan air laut) yang korosif, dengan memanfaatkan ion Cl sebagai penginisiasi terjadinya korosi.

5. Pengujian

Pengujian SCC dilakukan dengan metode salt spray sebagai simulasi lingkungan ekstrim atau lingkungan air laut. Selain itu juga dilakukan pengamatan mikroskop optic untuk mengetahui mikrostruktur, fenomena korosi yang terjadi dan perpatahan atau *crack*.

1.5. Tempat Penelitian

Sampel diperoleh dari Lindetevez Trade Center Glodok. Sedangkan semua pengujian dalam penelitian ini dilakukan di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia Depok.

1.6. Sistematika Penelitian

Sistematika penulisan dalam penelitian ini disusun agar penulisan skripsi ini menjadi runut sehingga kerangka alur penelitian mudah dimengerti, sistematis dan praktis. Sistematika tersebut dapat diuraikan dalam bentuk

bab-bab yang saling terpartisi dan saling berkaitan satu sama lain, yaitu sebagai berikut :

Bab 1 Pendahuluan

Membahas latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan penelitian dan sistematika penulisan.

Bab 2 Tinjauan Pustaka

Membahas dasar teori penunjang tentang material komposit, MMC, wettability, dan proses peleburan dengan menggunakan metode stir casting.

Bab 3 Metodologi Penelitian

Membahas diagram alir penelitian, alat dan bahan, prosedur penelitian dan pengujian sampel.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Membahas data yang didapat dari hasil pengujian yang telah dilakukan serta membandingkan dengan teori yang berlaku.

Bab 5 Kesimpulan

Berisi tentang kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Korosi

2.1.1 Definisi

Proses korosi merupakan kerusakan atau penurunan kualitas yang terjadi pada material, khususnya logam dan paduannya, karena reaksi kimia dengan lingkungannya. Pada dasarnya logam yang berada di alam ini terdapat dalam senyawa kimia atau mineral. Maka dari itu kaitannya adalah pada proses ekstraksi, sejumlah energi diperlukan untuk membebaskan logam tersebut dari senyawa kimianya. Sedangkan pada proses korosi logam tersebut akan kembali ke bentuk asalnya berupa senyawa kimia. Energi yang terlibat pada proses korosi sama dengan yang terlibat pada proses ekstraksi. Maka dari itu, proses korosi dapat juga disebut dengan proses kebalikan dari proses ekstraksi[1].

2.1.2 Korosi Pada *Stainless Steel*

Stainless steel itu sendiri harus mengandung minimal 50% Fe. Dan juga bukan merupakan paduan tunggal (single alloy), sehingga stainless steel memiliki paduan-paduan lain yang memiliki karakteristik masing-masing di dalamnya. Cr merupakan paduan penting di dalam stainless steel dan merupakan unsure paduan yang mengubah baja/besi (iron) menjadi stainless steel. Kandungan Cr yang terkandung setidaknya berkisar 10.5% yang berperan secara optimal untuk mencegah terbentuknya karat. Semakin banyak Cr yang terkandung, maka ketahanan akan korosi juga semakin meningkat. Namun dalam aplikasi dan lingkungan yang spesifik diperlukan unsure paduan lain untuk membantu meningkatkan ketahanan akan korosi[1].

Sifat ketahanan yang baik akan korosi datang dari lapisan chromium oxide (Cr_2O_3), yang secara instan terbentuk dipermukaan. Lapisan (film) ini melindungi stainless steel dari korosi dan terkadang juga disebut lapisan pasif yang mampu memperbaiki ke

rusakan dipermukaan dengan sendirinya akibat terekspose lingkungan yang korosif.

2.1.3 Stress Corrosion Cracking

2.1.3.1 Definisi

Korosi retak tegang atau juga biasa disebut dengan *stress corrosion cracking* timbul pada logam yang berada dalam kondisi pembebanan atau tegangan statis yang cenderung rendah dengan kondisi lingkungan yang korosif. Selain pembebanan atau pemberian gaya secara eksternal (*applied stress*) korosi jenis ini dapat terpicu karena pembebanan internal material atau tegangan sisa yang terdapat di dalam internal material (*residual stress*) Korosi ini pada umumnya terjadi pada material yang memiliki lapisan pasif pada permukaannya. Namun korosi retak tegang juga memungkinkan terjadi pada semua jenis material logam baik *ferrous maupun non-ferrous*. Dengan kata lain SCC adalah korosi yang terjadi akibat pengaruh tegangan dan lingkungan yang korosif. Pengaruh SCC pada material biasanya menyebabkan terjadinya kegagalan akibat inisiasi crack yang ditimbulkan dan terjadi perambatan retak hingga akhirnya terjadi kegagalan. Biasanya, kebanyakan dari permukaan tidak mengalami serangan terhadap SCC namun dengan adanya *crack* halus dan mempenetrasi ke dalam material[4][7].

2.1.3.2 Mekanisme Korosi Retak Tegang

Pada prinsipnya korosi retak tegang terdiri dari 3 tahap, yaitu inisiasi korosi retak tegang, propagasi korosi retak tegang dan *final failure*. Inisiasi retak korosi retak tegang dapat terjadi oleh beberapa mekanisme, yaitu *mechanical features, local galvanic cells initiating dissolution, perkembangan corrosion pits, initiation at a stress-induced phenomenon* dan *crack tip strain rate*[9][12]. Umumnya inisiasi korosi retak tegang terjadi melalui mekanisme *corrosion pits* atau *crack tip strain rate*, dimana *crack tip strain rate* terjadi lebih dominan[9]. Mekanisme *corrosion pits*, akan menghasilkan inisiasi korosi retak tegang pada bagian bawah (*bottom*) *pits*. Sedangkan propagasi retak korosi retak tegang dapat terjadi oleh banyak mekanisme, seperti *film rupture and slip dissolution*,

adsorption induced cleavage, atomic surface mobility, film induced cleavage dan *localized surface plasticity*[11][12].

Mekanisme dasar propagasi korosi retak tegang yang umum terjadi pada material adalah sebagai berikut:

1. *Active Path Dissolution*

Korosi terjadi sepanjang daerah yang lebih aktif terkorosi (ex, batas butir, segregasi). Applied stress akan menyebabkan retak terbuka sehingga produk korosi lebih mudah berdifusi menjauhi ujung retak, dan ujung retak terkorosi lebih cepat.

2. *Hydrogen Embrittlement*

Atom H berdifusi ke dalam logam dan cenderung menuju daerah triaxial tensile stress (ex, cracks atau notches). Menyebabkan cleavage lebih mudah terjadi atau mempermudah perkembangan local deformasi plastis → embrittlement

3. *Film Induced Cleavage*

Terjadi pada material ductile. Ductile material yang dilapisi lapisan brittle, retak akan terinisiasi dari lapisan tersebut dan propagasi ke material ductile dalam jarak yang kecil (sekitar 1 μm) sebelum ujung retak blunting. Blunting akan menyebabkan ujung retak terbuka & mudah terekspos korosi yang akan menghasilkan lapisan produk korosi *brittle*. → terjadi berulang.

Urutan : korosi → *brittle film* → retak (inisiasi dan propagasi) → *blunting* → korosi → *brittle film*

Dan secara keseluruhan mekanisme perpatahan yang terjadi pada korosi retak tegang dimana SCC terjadi dengan lambat dan lingkungan akan menyebabkan propagasi retak. Propagasi retak ini merupakan hasil dari interaksi tegangan mekanis dan reaksi korosi. Untuk memahami SCC lebih jauh, perlu diketahui dengan jelas pembebanan yang terlibat, tipe dari material, dan

lingkungan yang dapat menyebabkan SCC. SCC biasa terjadi pada paduan karena memiliki konsentrasi yang berbeda sehingga menyebabkan perbedaan konsentrasi tegangan dalam. Lingkungan yang dapat menyebabkan SCC biasanya adalah lingkungan berair dan dapat membentuk lapisan kondensasi uap yang dapat menghasilkan ikatan kimia. Pada air biasanya dilakukan dengan mensimulasikan kondisi air laut. Maka dari itu berdasarkan literatur kita dapat mengetahui dan mengamati bahwa *austenitic stainless steel* rentan mengalami SCC pada larutan yang mengandung *chloride*.

Untuk tahapan perpatahan yang terjadi pada *Stress corrosion cracking* terdiri dari beberapa tahapan, antara lain :

- a. *Crack initiation and stage 1 propagation*
- b. *Stage 2 or steady state crack propagation*
- c. *Stage 3 crack propagation or final failure*

2.1.3.3 Morfologi Perpatahan SCC

Bentuk perpatahan korosi retak tegang secara makroskopis pada umumnya termasuk kedalam jenis perpatahan getas. Yang mana memiliki cirri perpatahan yang rata, sedikit atau bahkan tidak terjadi deformasi plastis. Namun apabila perpatahan yang terjadi diamati dengan perbesaran yang lebih besar dengan kata lain dalam skala mikro, maka akan terlihat beberapa jenis perpatahan, diantaranya[10]:

1. *Transgranular*

Perpatahan ini terjadi dengan mekanisme membelah butir. Umumnya terjadi pada *Yield Strength* rendah, 600-1200 Mpa. Terjadi pada NN pH SCC.

2. *Intergranular*

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

3. *Mixed Fracture*

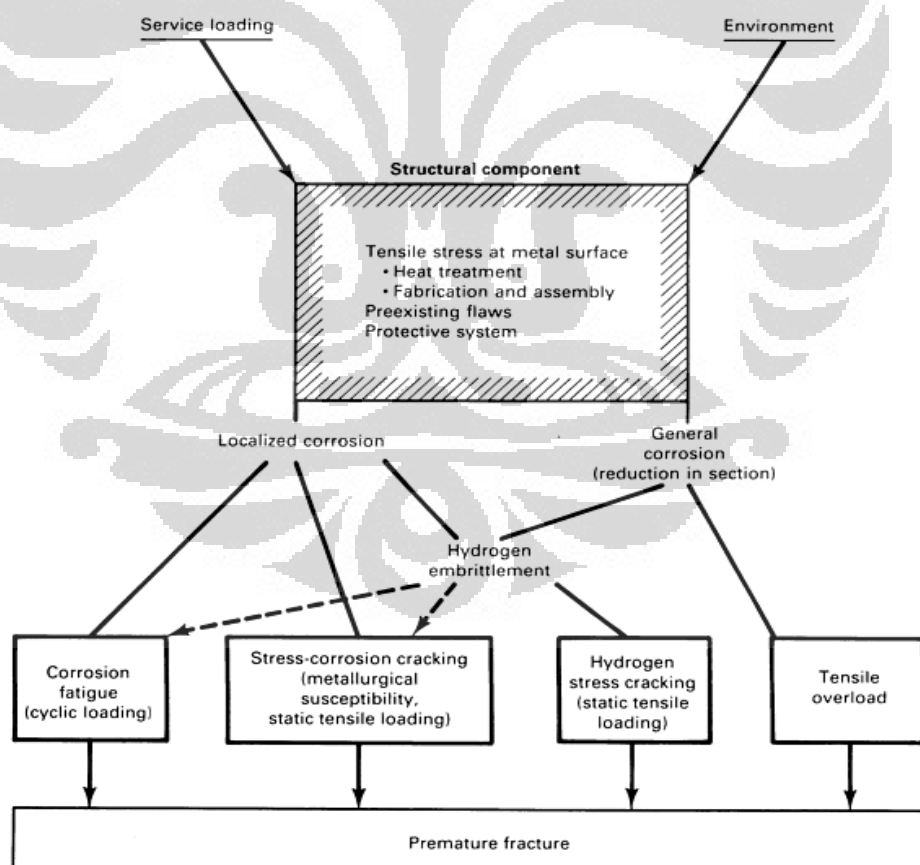
Perpatah ini merupakan gabungan antara perpatahan intergranular dengan transgranular. sehingga umumnya terjadi pada *yield strength* antara 1200-1400 Mpa.

2.1.3.4 Faktor Mempengaruhi SCC

Stress Corrosion Cracking adalah salah satu bentuk korosi yang disebabkan oleh lingkungan yang korosif. Ada 3 faktor utama yang menyebabkan terjadinya SCC yaitu:

- 1) Material rentan korosi
- 2) Lingkungan korosif
- 3) Tegangan

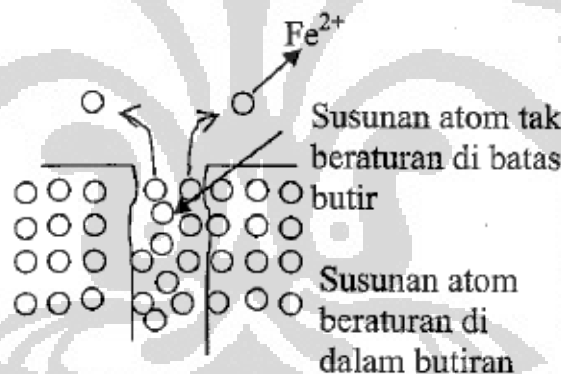
Setiap faktor di atas mempengaruhi kerentanan material terhadap *Stress Corrosion Cracking*.



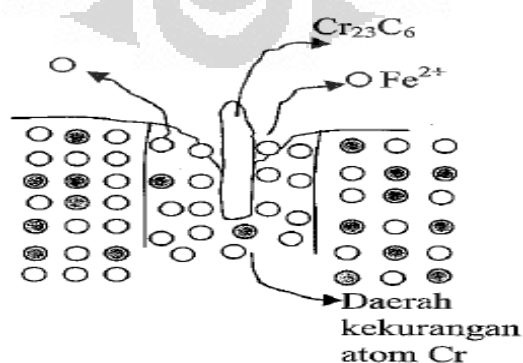
Gambar 2. 1 Penyebab *premature fracture* disebabkan korosi pada komponen struktur[16]

2.2 Sensitasi

Sensitasi adalah proses berlangsungnya presipitasi unsur karbon dan membentuk senyawa karbon karbida di batas butir baja austenitic stain less steel selama dioperasikan pada suhu tinggi. Pemanasan pada suhu sensitasi menyebabkan atom-atom C posisi intertisi yang awalnya di dalam butiran bebas berdifusi dan cenderung menuju ke batas butir. Atom-atom Cr berbeda. Pada posisi substitusi, atom-atom Cr tidak begitu bebas berdifusi selama baja dioperasikan pada suhu tinggi. Atom-atom C yang berada di batas butir membentuk senyawa khrom karbida (mayoritas senyawa Cr_{23}C_6). Berdasarkan ikatan kimia senyawa khrom karbida ini, satu atom C mengikat hampir empat atom Cr, dan atom-atom C di batas butir mengikat atom-atom Cr disekitarnya. Akibatnya, di daerah sekitar batas butir, kandungan Cr menjadi berkurang. Kandungan Cr di antar butir turun hingga sampai kurang lebih 2%. [5]



Gambar 2. 2 Pelepasan ion-ion Fe^{2+} dari batas butir[5]

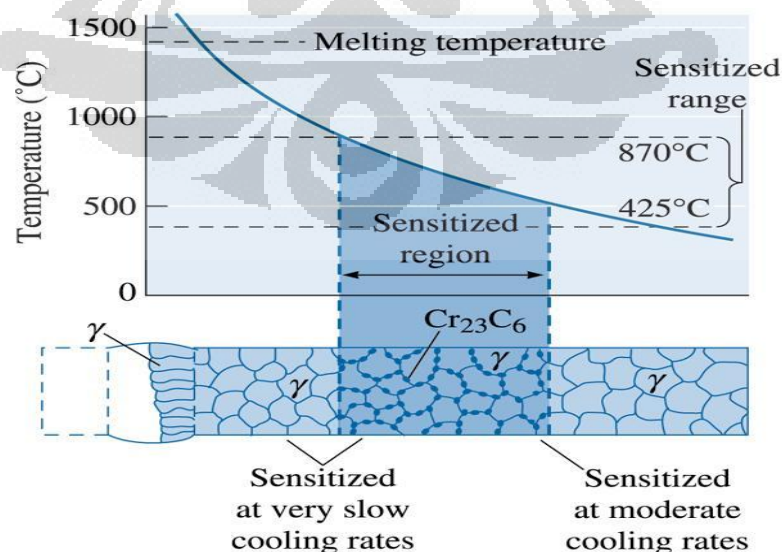


Gambar 2. 3 Skema gambaran pelepasan ion-ion Fe^{2+} sekitar presipitasi senyawa khrom karbida di batas butir[5].

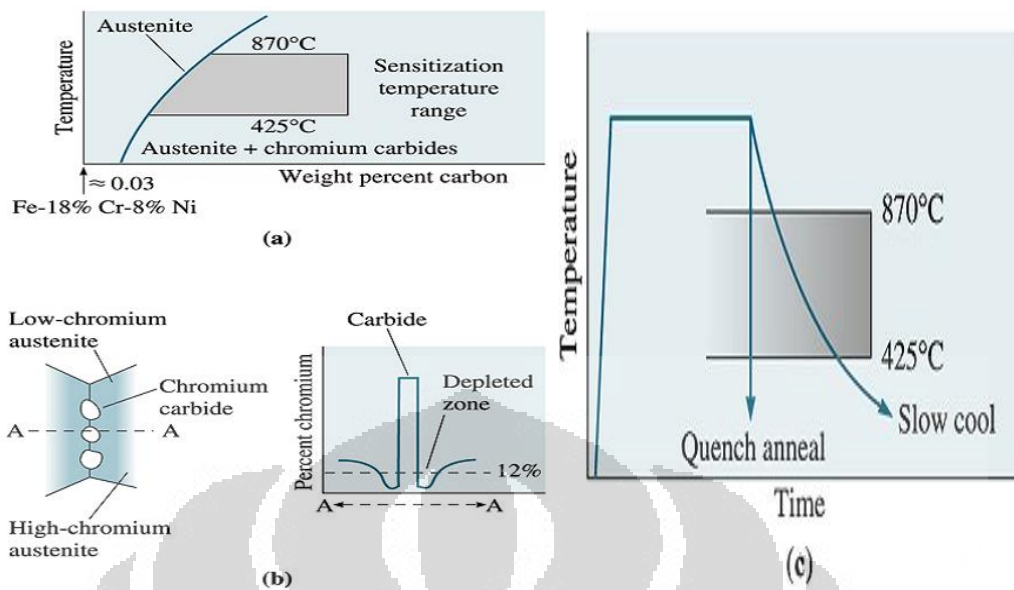
Karbida krom terbentuk pada temperatur antara 425 and 900 °C. Chromium carbide sukar untuk terlarut dikarenakan T_m yang tinggi, maka untuk menghilangkannya dilakukan dengan pemanasan yang tinggi $>1000^\circ\text{C}$. (temperature *annealing*) biasanya dengan pendinginan air atau dengan kecepatan pendinginan yang tinggi [6].

Berkurangnya kandungan Cr di daerah dekat batas butir (daerah antarbutir) mengakibatkan daerah ini mudah terserang korosi. Daerah ini mempunyai sifat anodik, sedangkan butir sendiri memiliki sifat yang katodik. Polaritas ini terjadi bila permukaan baja austenite stainless steel ini berada dalam lingkungan yang korosif, dan serangannya mengarah di sepanjang antarbutir. Akibatnya, tiap butiran logam terlepas dari logam dasarnya[5].

Pendinginan untuk mendapatkan Karbida krom haruslah dengan metode pendinginan lambat atau moderat (pendinginan furnace atau udara). Dikarenakan bila menggunakan metoda pendinginan lambat Karbida krom yang terlarut pada saat pemanasan akan mengalami pengerasan dan sempat bergerak menuju batas butir (sensitasi). Masih ada waktu untuk membentuk Karbida krom untuk bergerak kebatas butir. Sementara bila dengan menggunakan pendinginan yang cepat (water) Karbida krom yang terlarut akibat pemanasan akan terperangkap dalam fasa yang masih cair[6].



Gambar 2. 4 Pengaruh temperatur dan laju pendinginan terhadap pembentukan *Cr carbide*[20]



Gambar 2.5 a). Intergranular corrosion terjadi pada austenitic ss b). Karbida krom terbentuk dengan pendinginan lambat c). quench anneal melarutkan carbide yang mencegah intergranular corrosion[20]

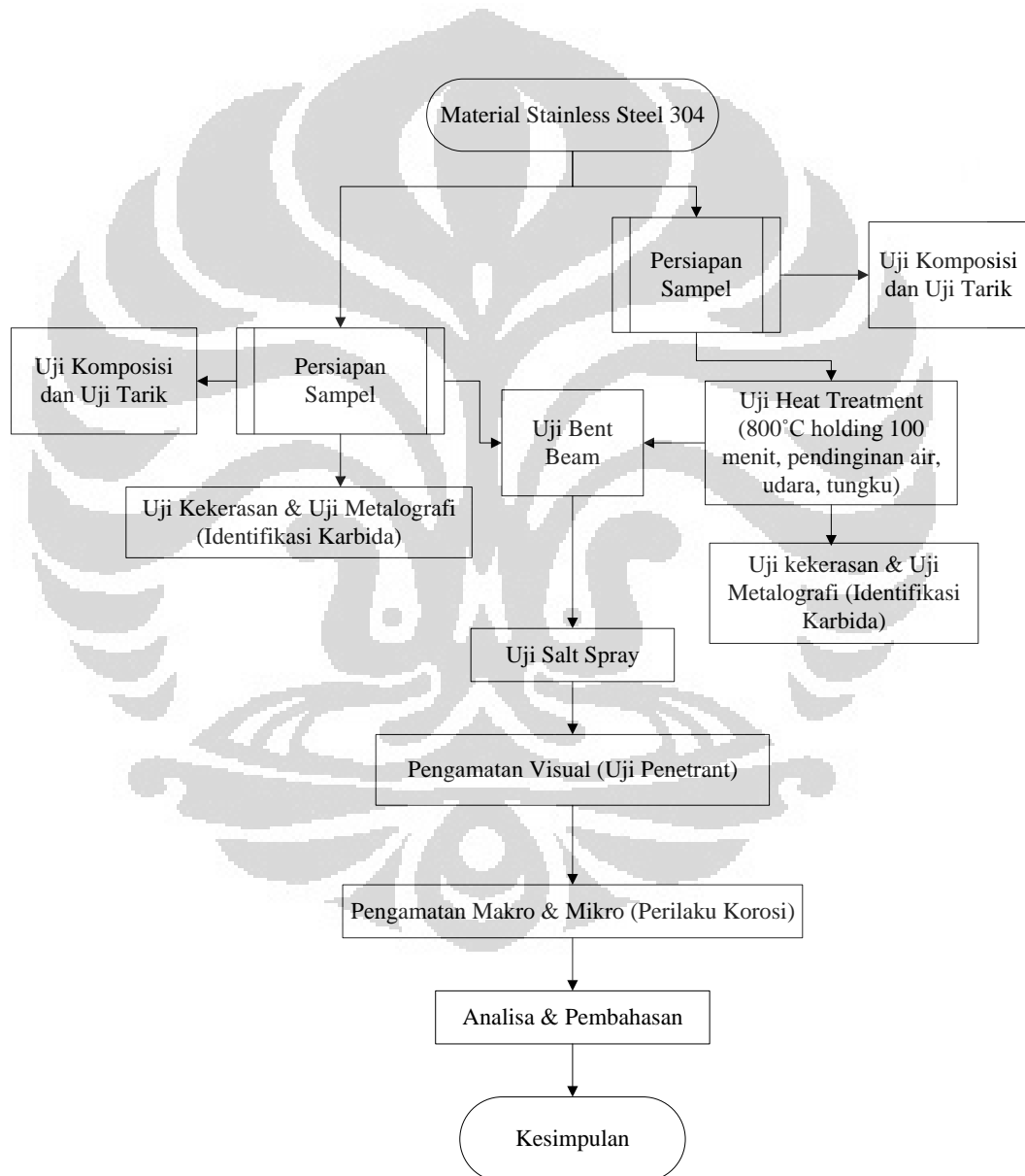
Chromium carbide terbentuk di batas butir, dimana daerah disekitar batas butir tersebut memiliki kandungan Cr yang sedikit akibat bermigrasinya Cr ke batas butir. Ini menjadikan di daerah tersebut menjadi lebih aktif terkorosi. Maka daerah tersebut rentan akan terjadi korosi disekitar batas butir ini terlihat pada Gambar 2.5 b). Sedangkan untuk menghindari terbentuknya *Cr carbide* dilakukan *quench anneal*, yang mana sebelumnya dilakukan *solution anneal* pada temperatur di atas 1000°C[6].

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram alir penelitian

Prosedur penelitian ini secara umum dilakukan melalui beberapa tahapan yang ada pada diagram alir penelitian.



3.2. Alat dan Bahan

3.2.1. Alat

Alat – alat yang digunakan pada penelitian ini, antara lain :

1. Mesin shimadzu untuk uji tarik
2. *Optical Emission Spectroscopy*
3. Timbangan digital
4. *Furnace*
5. *Salt spray*
6. Alat pemotong plat material
7. Alat pengujian metalografi

3.2.2. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah NaCl 3.5%, hal ini dilakukan untuk menciptakan lingkungan yang korosif terhadap SS 304. NaCl 3.5% digunakan baik untuk metode celup maupun untuk metode pengujian *salt spray*.

3.3 Prosedur Kerja

Tahapan prosedur kerja dalam penelitian ini diawali dengan preparasi sampel awal. Sampel yang digunakan berupa austenitic stainless steel tipe 304 yang dipreparasi untuk pengujian komposisi. Pengujian komposisi dilakukan untuk mengetahui komposisi aktual masing-masing unsur yang ada pada material yang kemudian disesuaikan dengan komposisi yang ada pada literatur. Sehingga dengan komposisi yang terdeteksi maka kita dapat memastikan fenomena yang terjadi apabila material jenis ini mengalami perlakuan. Dan juga komposisi sangat berpengaruh terhadap sifat mekanis material. Selain itu, pengujian tarik juga perlu dilakukan untuk menentukan kekuatan tarik dari material SS 304. Data yang bisa didapatkan adalah *yield stress* dan modulus elastisitas. Hal ini merupakan data yang diperlukan untuk menentukan jarak dari holder pada spesimen holder.

Setelah itu sampel preparasi sampel berikutnya dilakukan. Sampel dipersiapkan untuk dilakukan pemanasan (sensitasi) yang mana dilakukan dalam

furnace dengan temperatur berkisar 900°C dengan memvariasikan kecepatan pendinginan dengan media pendinginan yang berbeda. Pendingiannya berupa pendinginan air, udara, dan tungku. Lalu dilanjutkan dengan pengujian metalografi untuk mengetahui atau mengidentifikasi karbida yang terbentuk.

Kemudian dilakukan pembebanan dengan metode *two loaded bent beam* untuk semua sampel dan sekaligus dilakukan pengujian *salt spray* berdasarkan ASTM B 117. *Salt spray* digunakan untuk mensimulasikan keadaan ekstrim pada material SS 304.

Untuk mengetahui material mana yang rentan akan korosi retak tegang dapat diidentifikasi menggunakan pengujian metalografi dengan mikroskop optik dengan menganalisa secara kuantitatif retakan yang terjadi. Dan kemudian dilakukan pengujian SEM atau pengamatan menggunakan mikroskop optik untuk mengetahui jenis perpatahan.

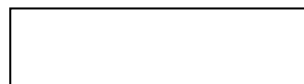
3.4 Preparasi Sampel

Sampel dipotong untuk dilakukan beberapa pengujian, yaitu:

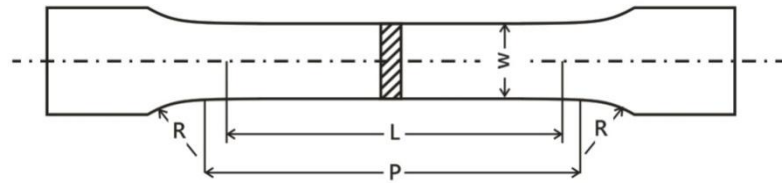
- Uji Tarik
- Uji Komposisi
- Uji Metalografi (Pengujian Karbida)
- Uji Stress Corrosion cracking
- Uji Kekerasan

3.4.1 Preparasi Uji Tarik

Preparasi sampel uji tarik dilakukan dengan memotong sampel dengan standar JIS 5A dimana sampel dipotong dengan ukuran 20 x 3 cm². Setelah itu, dibuat *gauge length* seluas 2,5 x 5 cm².



Gambar 3. 1 Sampel uji tarik sebelum dibuat *gauge length*



Gambar 3. 2 Sampel uji tarik sesudah dibuat *gauge length*[14]

Setelah dipotong untuk membentuk *gauge length*, sebaiknya sampel dilakukan pengikiran di bagian *gauge length* yang bertujuan untuk meratakan sampel. Hal ini dilakukan agar tidak terdapat konsentrasi tegangan pada daerah yang tidak rata yang dapat menginisiasi retak.

3.4.2 Preparasi Sampel Uji Komposisi

Uji komposisi dilakukan dengan *Optical Emission Spectroscopy* dan berdasarkan ASTM E1086. Preparasi dilakukan dengan pemotongan sampel $2 \times 3 \text{ cm}^2$. Setelah itu, dilakukan pengamplasan untuk mendapatkan material yang rata.

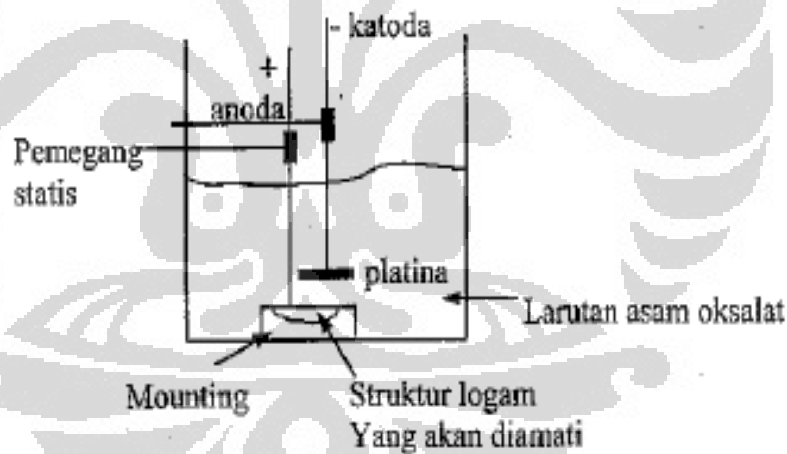
3.4.3 Preparasi Sampel Uji Metalografi (Pengujian Keberadaan Karbida)

Pengujian keberadaan karbida dilakukan dengan standar uji ASTM A262-02a. Tahapannya adalah sebagai berikut:



Gambar 3. 3 Perlatan elektro etsa

1. Sampel dipotong secara melintang dengan ukuran 1 cm x 1 cm dengan berbagai kondisi.
2. Sampel dikeraskan dengan resin agar mudah dilakukan proses ampelas dan poles.
3. Sampel diampelas dari grit 120 hingga 1200. Sampel dipoles dari 1 mikron hingga 0.05 mikron.
4. Pembuatan larutan etsa melalui penambahan 100 gram kristal asam oksalat ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan 900 mL air distilasi. Dua bahan dicampur hingga 1000 mL hingga terlarut sempurna.
5. Sampel – sampel tersebut dietsa pada rapat arus 1 A/cm^2 selama satu setengah menit (90 detik) dan dengan tegangan 6-9 V tercelup.
6. Setelah proses tersebut, dilakukan observasi dengan mikroskop optik dengan perbesaran 100 x hingga 500 x untuk mengidentifikasi secara kualitatif jejak krom karbida di batas butir.



Gambar 3. 4 Skema cara pemasangan elektronik etsa[5]



Gambar 3. 5 Alat foto mikro dan mikroskop optik

3.4.4 Preparasi Sampel Uji *Stress Corrosion Cracking*

Pengujian dengan menggunakan *Bent beam* adalah pengujian yang dilakukan untuk melihat pengaruh tegangan dan lingkungan korosif pada suatu material. Preparasi sampel *stress corrosion cracking* ini berdasarkan standar ASTM G-39 dengan metode *two-point loaded specimen*. Sampel dilakukan pemotongan dengan ukuran 22.5 x 3 cm dengan ketebalan 0.08 cm. Kondisi yang harus dipenuhi menurut standar ini adalah sampel tidak boleh berdeformasi secara plastis ketika dibending sehingga memenuhi ketentuan $(L-H)/H$ harus berada dalam range 0.01 – 0.50 [15]. Selain itu, Sampel yang akan diuji harus dibersihkan permukaannya, hal ini bertujuan agar kondisi permukaan tidak mempengaruhi hasil pengujian, untuk itu perlu diratakan permukaannya dengan pengamplasan.

3.4.5 Preparasi Sampel Uji Kekerasan

Sampel yang digunakan dalam pengujian kekerasan menggunakan sampel sisa hasil potongan sampel uji *stress corrosion cracking*. Dengan dimensi masing-masing sampel 3 x 7.5 cm dengan ketebalan 0.08 cm. Pengujian kekerasan menggunakan metode Rockwell C dan B dengan pembebanan masing-masing 150 kgf dan 100 kgf.

3.5 Perlakuan panas (Sensitasi)

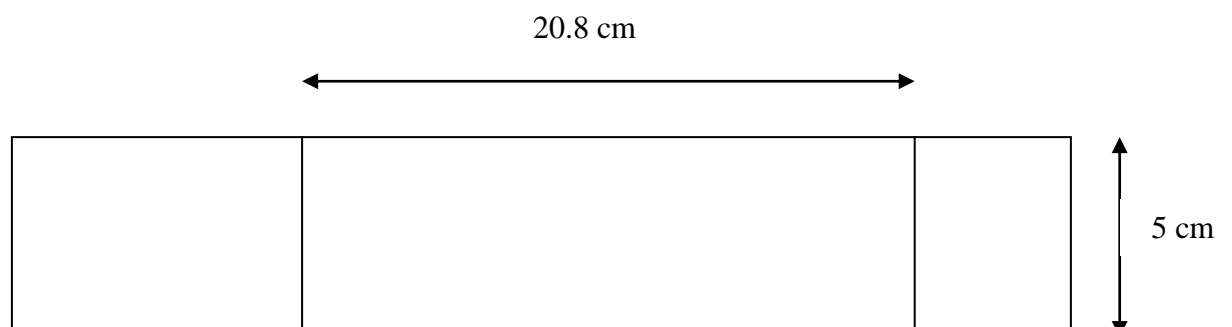
Proses sensitasi pada sampel menggunakan tungku atau *furnace* Nabertherm pada temperatur 800 °C dengan waktu tahan selama 90 menit. Ini dilakukan pada tiga jenis variabel sampel dengan membedakan media pendinganannya yang berupa pendingan air, udara dan tungku. Untuk masing-masing variabel dibuat tiga sampel. ukuran sampel yang digunakan sama dengan ukuran sampel untuk pengujian korosi retak tegang. Dikarenakan setelah tahapan ini dilakukan pengujian *stress corrosion cracking* dengan metode *bend beam* dalam lingkungan *salt spray*.

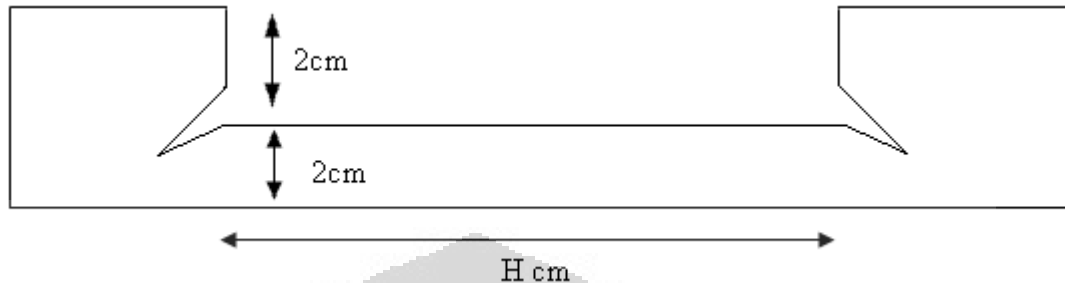


Gambar 3. 6 Tungku Nabertherm

3.6 Pembuatan Spesimen Holder

Spesimen holder dibuat berdasarkan standar ASTM G-39. Spesimen ini dapat digunakan untuk material yang tidak terdeformasi secara plastis dengan ketentuan $(L-H)/H$ harus berada dalam range 0.01 – 0.50. Untuk memenuhi ketentuan ini, holder span sekitar 177.8 – 215.9 mm merupakan ukuran yang tepat ketika pengaplikasian baja yang memiliki tegangan aplikasi 1380 Mpa.





Gambar 3. 7 Perancangan bentuk holder

3.7 Pembuatan Larutan NaCl 5%

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh persen deformasi terhadap stress corrosion cracking. Sebagai salah satu syarat terjadinya *stress corrosion cracking* adalah lingkungan yang korosif. Dalam penelitian ini, lingkungan yang digunakan adalah NaCl 5% untuk mensimulasikan kondisi lingkungan air laut (*seawater condition*) [1]. Larutan ini dapat dibuat dengan melarutkan 50 gram NaCl dalam 1 liter air. Air memiliki massa jenis 1 kg/liter, hal ini berarti air memiliki berat 1kg dalam 1 liter.

$$\text{Perhitungan NaCl} = \frac{50 \text{ gram NaCl}}{1000 \text{ gram air}} = 5 \% \text{ NaCl}$$

3.8 Pengujian Salt Spray

Pengujian salt spray dimana mensimulasikan material dalam lingkungan yang ekstrim seolah-olah berada dilingkungan air laut. Di mana dalam pengujian ini menggunakan larutan NaCl 5% sebagai sumber ion Cl^- yang memiliki karakteristik korosif terhadap beberapa material termasuk *austenitic stainless steel*. Larutan NaCl disemprot menggunakan tekanan udara dari kompresor sehingga larutan NaCl tersebut berubah menjadi kabut (*fog*) yang sifatnya korosif dan agresif.

Prosedur pengujian *salt spray* meliputi :

- Memasukkan air kedalam cerobong sampai batas maksimum

- Masukkan larutan NaCl 5 % ke wadah teratas di samping lemari salt spray
- Atur posisi material di dalam lemari salt spray
- Atur tekanan sebesar 1 atm dan suhu temperatur sebesar 40°C
- Tekan tombol power



Gambar 3. 8 Mesin *salt spray*

3.9 Pengujian Penetran (*Liquid Penetrant Testing*)

Uji penetran termasuk metode uji tanpa rusak yang mampu menentukan lokasi cacat seperti *laps*, *folds*, *cracks* dan *porosity* yang terbuka di permukaan suatu material atau komponen. Teknik – teknik penetran dapat digunakan pada material yang tidak tergantung pada sifat fisiknya asalkan permukaannya tidak menyerap (*non porous*) dan cocok dengan proses penetran. Metode penetran cair dapat digunakan untuk memeriksa semua material atau komponen yang termasuk jenis bahan *ferrous* dan *non ferrous*, konduktor dan isolator, magnetik dan non magnetik, dan semua bahan *alloys*. Pengujian dengan sistem ini banyak digunakan pada bahan *casting*, las – lasan (*welding*) dan tempa.

Prinsip dasar dari metode ini adalah dengan memanfaatkan sifat kapilaritas antara penetran dan material yang diuji. Secara umum penetran masuk ke dalam cacat atau bukaan halus karena sifat kapilaritas. Kemampuan suatu penetran untuk memasuki daerah cacat atau bukaan halus sangat tergantung pada sifat tegangan

permukaan dan *wet ability* atau mampu basahnya. Kedua sifat penting tersebut harus selalu diperhatikan karena kedua sifat tersebut sangat berpengaruh terhadap sensitivitas suatu penetran. Penetran yang sensitif mampu masuk kedalam lubang atau bukaan yang lebarnya 70-125 nm.

Berikut merupakan tahapan proses pengerjaan inspeksi penetran:

1. Benda uji terdapat cacat yang tidak terlihat dengan mata telanjang.
2. Cairan penetran diaplikasikan pada permukaan benda uji.
3. Setelah didiamkan beberapa menit, penetran dapat memasuki daerah cacat. Kelebihan penetran yang ada di permukaan material benda uji dihilangkan atau dibersihkan.
4. *Developer* diaplikasikan sehingga penetran yang terjebak pada daerah cacat dapat terdeteksi. *Developer* ini berguna untuk menarik atau menghisap zat *penetrant* yang terjebak dalam cacat sehingga cacat dapat terdeteksi.

Kelemahan dari metode ini adalah metode penetran hanya dapat digunakan pada permukaan terbuka dan metode ini tidak dapat digunakan pada komponen dengan permukaan kasar, memiliki lapisan *coating* dan berpori. Langkah – langkah yang harus dilakukan dalam uji penetran adalah sebagai berikut:

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



Gambar 3. 9 Penetrant, cleaner, developer

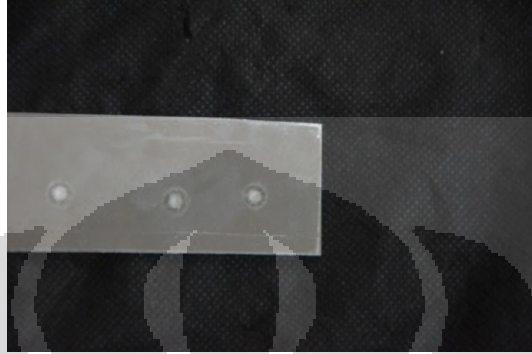
3.10 Pengamatan Mikro Perilaku Korosi

Pengamatan hasil pengujian sampel untuk setiap variabel dengan mengamati secara horizontal penampang sampel yang telah dibuat *notch* atau takik dibagian tengah dari material tersebut yang mana dibagian tengah dari sampel merupakan daerah dengan tegangan aplikasi terbesar. Takik ini dibuat dengan tujuan sebagai konsentrasi pembebanan dan harapannya daerah sekitar takik merupakan daerah inisiasi *crack*, dengan kata lain takik dibuat untuk mempercepat terjadinya retakan. Untuk melihat perilaku korosi dan rambatan retakan jenis transgranular atau intergranular dengan menggunakan mikroskop optik perbesaran 100 -1000 X. Selain itu pengamatan ini juga untuk mengetahui perilaku korosi yang terjadi pada sampel *austenitic stainless steel* tipe 304 setelah mengalami pengujian bent beam dalam lingkungan salt spray NaCl.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Komposisi Material



Gambar 4. 1 Sampel uji komposisi

Pengujian karakterisasi komposisi material penting dilakukan karena pengujian ini sangat berpengaruh terhadap hasil pengujian lainnya. Pengujian ini dilakukan untuk memverifikasi kesesuaian sampel yang ada dengan standar komposisi material tersebut dalam hal ini *austenitic stainless steel* tipe 304. Pengujian karakterisasi komposisi yang dilakukan menggunakan *Optical Emission Spectriscopy (OES)* dengan penembakan sebanyak tiga kali dengan daerah yang berbeda untuk mendapatkan komposisi yang merata. Dan hasil yang didapat adalah sebagai berikut.

Tabel 4. 1 Hasil uji komposisi SS304

| Pengujian | Fe | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo |
|-----------|------|-------|-------|------|-------|--------|------|-------|
| 1 | 69.6 | 0.03 | 0.518 | 1.56 | >0.06 | >0.06 | 19.2 | 0.081 |
| 2 | 70 | 0.038 | 0.545 | 1.59 | >0.06 | <0.005 | 18.9 | 0.098 |
| 3 | 69.8 | 0.035 | 0.495 | 1.56 | >0.06 | <0.005 | 18.9 | 0.089 |
| Ave | 69.8 | 0.034 | 0.519 | 1.57 | >0.06 | >0.06 | 19 | 0.089 |

| Pengujian | Ni | Al | Co | Cu | Nb | Ti | V | W |
|-----------|------|-------|-------|------|--------|--------|------|--------|
| 1 | 8.41 | 0.003 | 0.091 | 0.25 | 0.0135 | <0.002 | 0.06 | <0.002 |
| 2 | 8.24 | 0.004 | 0.09 | 0.27 | 0.0177 | <0.002 | 0.06 | <0.002 |
| 3 | 8.5 | 0.003 | 0.09 | 0.26 | 0.0128 | <0.002 | 0.06 | <0.002 |
| Ave | 8.38 | 0.003 | 0.091 | 0.26 | 0.0147 | <0.002 | 0.06 | <0.002 |

Tabel 4. 2 Komposisi SS304 (ASTM A 666-03)

| Material | C | Mn | P | S | Si | Cr | Ni | |
|----------|------|------|-------|-------|------|-----------|----------|------|
| SS304 | 0.08 | 2.00 | 0.045 | 0.030 | 0.75 | 18.0-20.0 | 8.0-10.5 | Wt.% |

Berdasarkan hasil pengujian komposisi material menggunakan *OES* yang disesuaikan dengan data komposisi literatur, material yang dipakai dalam penelitian ini termasuk kedalam jenis *austenitic stainless steel* tipe 304.

4.2 Analisa Nilai Pengujian Tarik

Pada penelitian ini, ingin diketahui pengaruh tegangan terhadap kerentanan *stress corrosion cracking*. Oleh karena itu, ditentukan tegangan untuk mengetahui kerentanannya. Nilai besaran tegangan yang diaplikasikan pada penelitian ini adalah 30 % *yield stress*. Besaran tegangan ini ditentukan berdasarkan pada sifat elastis atau batas elastis material tersebut, bila tegangan melebihi batas elastic maka material akan terdeformasi plastis dengan kata lain telah melewati batas elastis. Maka dari itu untuk mendapatkan tegangan aplikasi sebesar 30% *yield stress* diperlukan perhitungan untuk menentukan dimensi dalam hal ini panjang sampel, dengan menggunakan rumus tegangan aplikasi sebagai berikut:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_m} \dots \dots \dots (a)$$

$$\epsilon = 4 (2E - K) \left[\frac{k}{2} - \frac{2E-K}{12} \left(\frac{t}{H} \right) \right] \frac{t}{H} \dots \dots \dots (b)$$

$$\frac{L-H}{H} = \left[\frac{K}{2E-K} \right] - 1 \dots \dots \dots (c)$$

Perhitungan yang dilakukan pertama adalah melakukan perhitungan nilai tegangan 30% dari *yield stress*. Jika telah mendapat nilai tegangannya yang perlu dilakukan berikutnya adalah menghitung nilai regangannya (*strain*) ϵ .

Tabel 4. 3 Nilai tegangan dan regangan 30% *yield stress*

| % Yield Stress | Tegangan(kg/mm ²) | Regangan |
|----------------|-------------------------------|----------|
| 30 % | 19.875 | 0.002976 |

Setelah mendapatkan nilai regangan berikutnya dilakukan penentuan sudut yang terbentuk untuk menghasilkan nilai *strain* yang diinginkan berdasarkan persamaan (b). Ini dilakukan karena sudut yang terbentuk akan mempengaruhi nilai E dan K.

Tabel 4. 4 Perhitungan regangan

| % Yield stress | Besar Sudut | K | E | 4(2E - K) | k | 2E - K/12 | t/h | $\left[\frac{k}{2} - \frac{2E - K}{12} \left(\frac{t}{H}\right)\right]$ | Strain |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|---|--------------|
| 30 | 30 | 1.59 814 | 1.54 415 | 5.96 064 | 0.25 88 | 0.124 18 | 0.003 81 | 0.12892 | 0.0029 27 |

Setelah nilai regangan yang diinginkan didapat, yang dilakukan selanjutnya adalah menghitung dimensi dalam hal ini panjang sampel untuk menghasilkan tegangan aplikasi yang sesuai dengan keinginan. Perhitungan dapat menggunakan perhitungan (c).

Tabel 4. 5 Perhitungan panjang sampel

| %Yield stress | K | E | H | 2E-K | $\left[\frac{K}{2E - K}\right] - 1$ | Panjang Sampel(mm) |
|---------------|---------|---------|-----|---------|-------------------------------------|--------------------|
| 30 | 1.59814 | 1.54415 | 210 | 1.49016 | 0.072462 | 225.217 |

**Gambar 4. 2** Sampel uji tarik

Tabel 4. 6 Hasil uji tarik

| Pengujian | Yield Stress(kg/mm ²) | UTS (kg/mm ²) | Modulus Elastisitas (Kg/mm ²) |
|-----------|-----------------------------------|---------------------------|--|
| 1 | 66.50 | 135 | 6670 |
| 2 | 66.0 | 135 | 6688 |
| Average | 66.25 | 135 | 6679 |

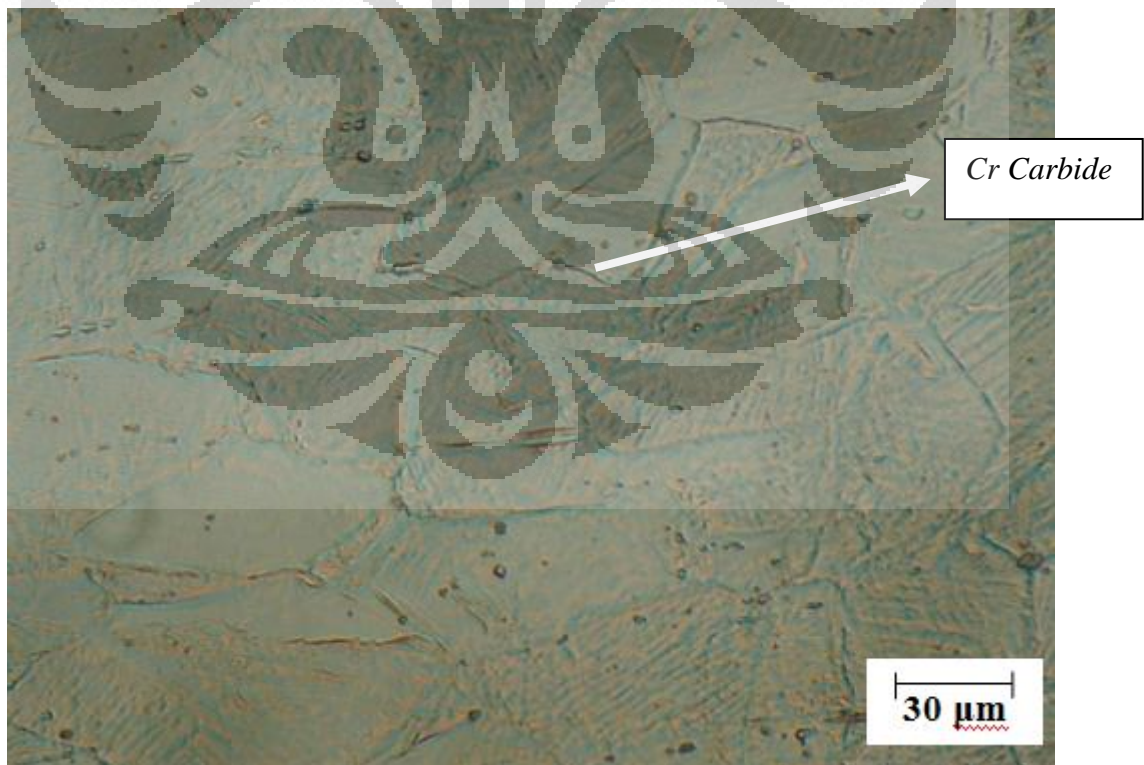
4.3 Pengamatan Keberadaan Kromium Karbida

**Gambar 4. 3** Sampel uji keberadaan karbida

Untuk dapat mengamati dan mengidentifikasi keberadaan dan kuantitas dari *Cr carbide* harus dilakukan preparasi terlebih dahulu. Preparasi sampel yang dilakukan sama dengan preparasi sampel metalografi, dimana diawali dengan proses pemotongan sampel untuk setiap variabel, variabel *Non-HT*, pendinginan air, pendinginan udara, dan pendinginan tungku. Setelah itu dilanjutkan dengan proses *mounting*, pengamplasan, pemolesan dan terakhir dilakukan proses elektroetsa menggunakan asam oksalat 10% dengan voltase sebesar 6-9 V dengan waktu pengetsaan selama 90 detik. Apabila proses elektroetsa telah berhasil dapat dilakukan pengamatan mikroskop optik dengan perbesaran 200-500X. Gambaran hasil indentifikasi karbida dengan variabel pendinginan dari proses sensitasi dapat dilihat pada Gambar 4.4 - 4.11.



Gambar 4. 4 Non-HT 200X

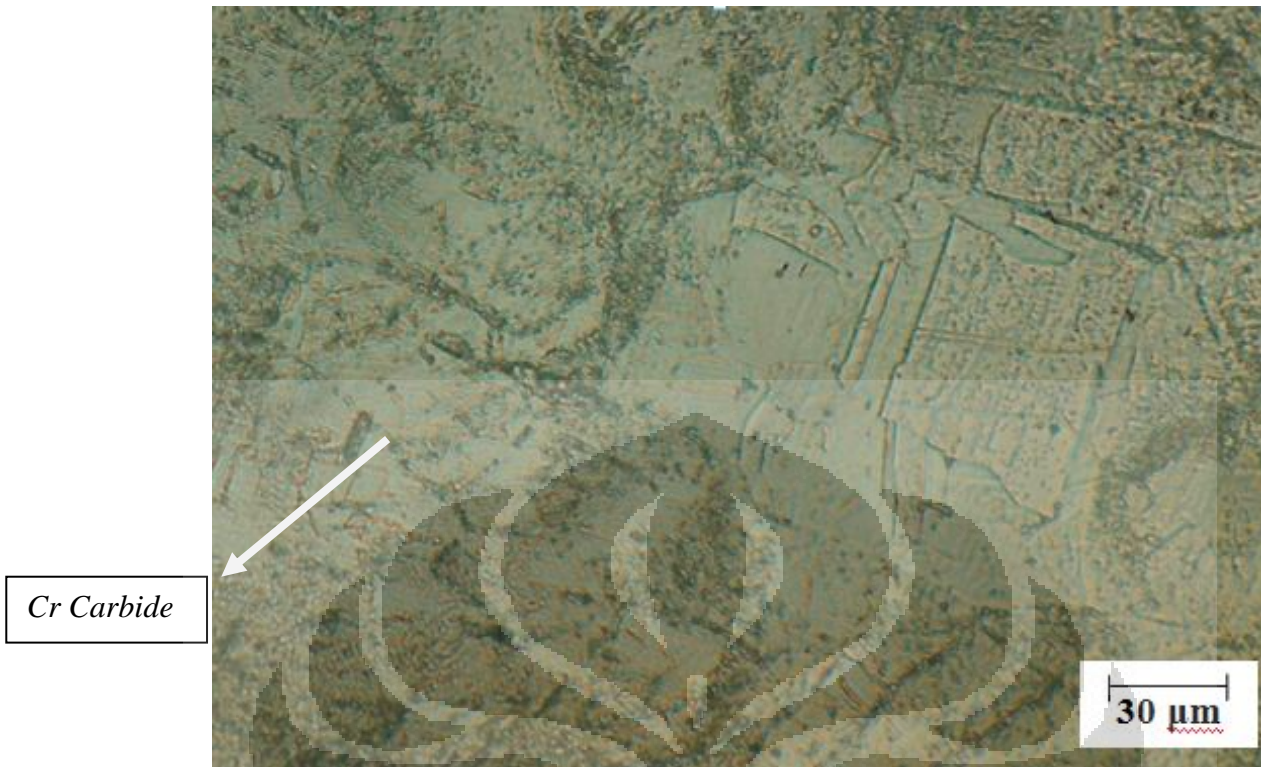


Gambar 4. 5 Non-HT 500X

Berdasarkan Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 terlihat butir yang mana juga terlihat *Cr carbide* ada namun dalam jumlah yang masih sedikit. Karbida krom yang terbentuk berada di sekitar batas butir. Jumlah *Cr carbide* yang tidak terlalu banyak dikarenakan material atau sampel ini tidak mengalami proses pemanasan yang bertujuan untuk menimbulkan karbida krom dan proses sensitasi. Sehingga berdasarkan teori keberadaan karbida berpengaruh terhadap kerentanan akan korosi dalam hal ini *intergranular stress corrosion*[16].



Gambar 4. 6 Pendinginan air 200X

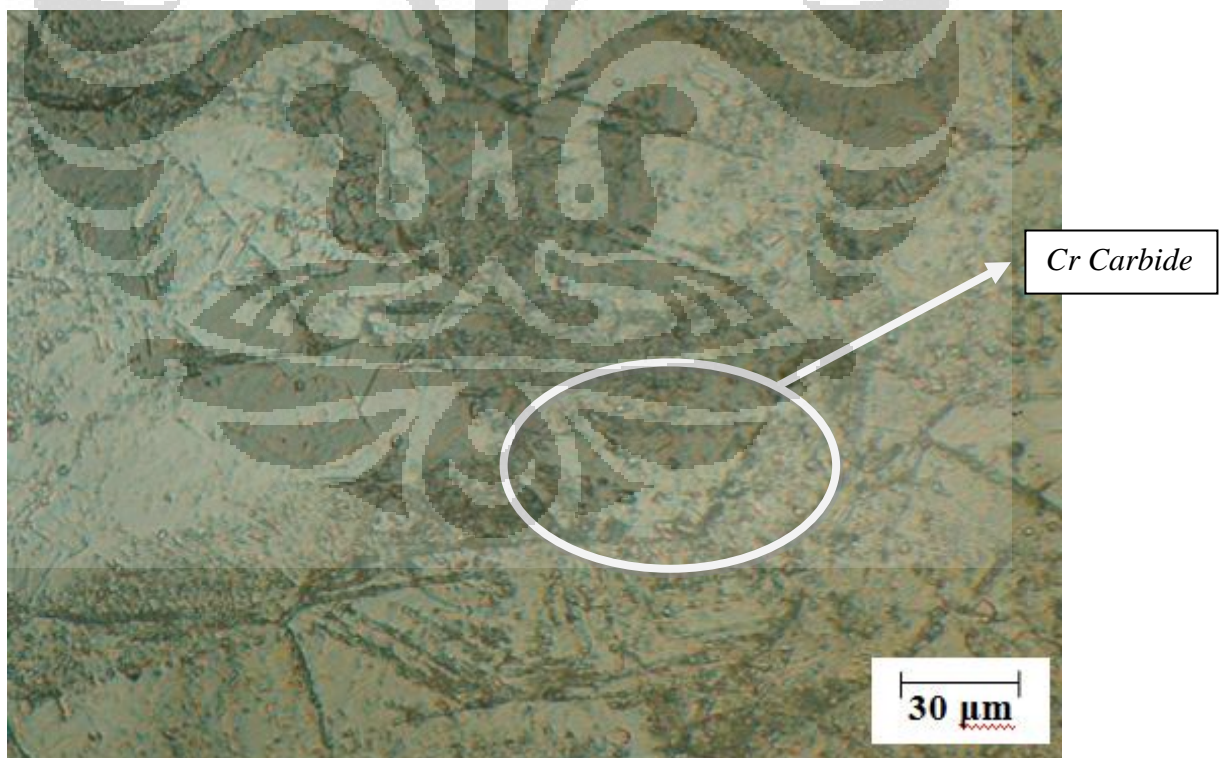


Gambar 4. 7 Pendinginan air 500X

Sementara untuk variabel pendinginan air terlihat karbida krom sudah mulai terbentuk di batas butir namun masih dalam jumlah yang masih sedikit dan juga masih belum mengisi batas butir secara sempurna. Dari Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 dapat diamati bahwa masih terdapat butir yang tidak terdapat krom karbida di batas butirnya. Ini sesuai dengan teori literatur yang ada, bahwa pembentukan krom karbida dipengaruhi oleh laju pendinginan. Karbida krom terbentuk pada temperatur sensitasi dengan laju pendinginan lambat[6]. Sehingga sampel yang mengalami pemanasan pada temperatur sensitasi dan pendinginan menggunakan air yang merupakan pendinginan cepat menghasilkan terbentuknya karbida krom dengan jumlah yang sedikit.



Gambar 4. 8 Pendinginan Udara 200X

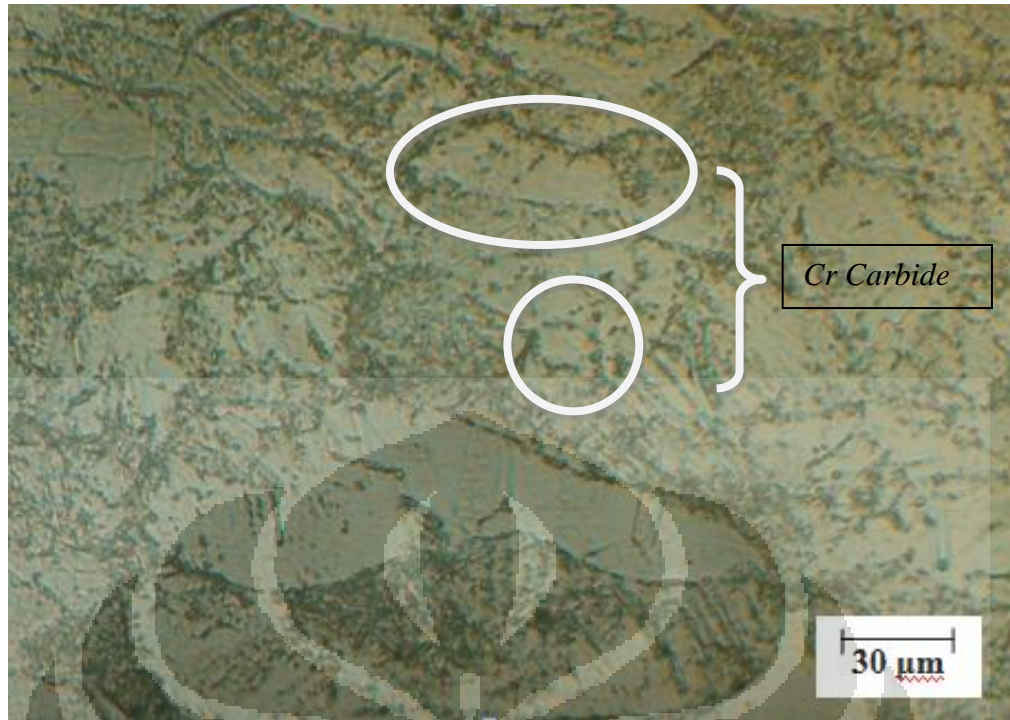


Gambar 4. 9 Pendinginan udara 500X

Hasil pengamatan keberadaan karbida pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 dapat terlihat keberadaan karbida krom di batas butir dan sudah mulai mengelilingi atau mengisi batas butir secara sempurna dan juga secara kuantitatif jumlah karbida krom yang terbentuk lebih banyak di beberapa butir dibandingkan dengan sampel pendinginan air. Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 menjelaskan bahwa laju pendinginan yang lebih lama atau moderate yaitu dengan menggunakan media pendinginan udara menjadikan sampel *austenitic stainless steel* membentuk karbida krom lebih banyak dibandingkan dengan pendinginan air.



Gambar 4. 10 Pendinginan tungku 200X



Gambar 4. 11 Pendinginan tungku 500X

Pendinginan tungku merupakan pendinginan dengan laju pendinginan paling lama. Dengan demikian terlihat pada Gambar 4.10 dan 4.11 karbida krom yang terbentuk memiliki jumlah yang lebih banyak dan cenderung lebih mengisi batas butir secara sempurna, sehingga seolah-olah mengelilingi butir secara keseluruhan.

Material *austenitic stainless steel* 304 yang mengalami sensitasi akan membentuk presipitat atau endapan yang berupa endapan karbida krom di batas butir. Pada saat endapan krom karbida mengendap di batas butir terbentuk pula daerah *Cr depleted zone* yang mana merupakan daerah kurang akan Cr. Pada saat pengendapan krom karbida terjadi secara terus menerus dan semakin banyak, menyebabkan daerah yang kekurangan Cr memiliki kandungan Cr yang semakin sedikit dikarenakan Cr yang ada bermigrasi kebatas butir yang nanti membentuk endapan karbida krom. Ini menjadikan daerah di sekitar batas butir yang merupakan *Cr depleted zone* menjadi rentan akan terkena *intergranular corrosion*[16]. Dan bila terjadi pada lingkungan yang korosif dan terdapat aplikasi tegangan maka yang terjadi berupa *intergranular stress corrosion cracking* yang acap kali terjadi pada *stainless steel* tipe austenit.

4.4 Analisa Nilai Kekerasan

Pada pengujian kekerasan ini menggunakan metode *Rockwell B* dengan pembebanan 100 kgf dan juga *Rockwell C* dengan pembebanan 150 kgf. Sehingga dari pengujian ini untuk setiap variabel akan didapat nilai kekerasan HRB dan HRC dengan penjejukan enam titik untuk setiap variable sampel. Maka didapat nilai kekerasan sebagai berikut.

Tabel 4. 7 Hasil uji kekerasan SS304 Non-HT

| Material | Titik | HRB | HRC |
|-----------|-------|-------|-------|
| Non-HT | 1 | 85.0 | 37.5 |
| | 2 | 84.85 | 37.45 |
| | 3 | 84.45 | 37.6 |
| | 4 | 84.5 | 37.35 |
| | 5 | 84.45 | 37.7 |
| | 6 | 85.2 | 37.8 |
| Rata-rata | | 84.7 | 37.6 |

Data berdasarkan Tabel 4.7 menunjukkan nilai kekerasan HRB dan HRC material SS304 dengan variabel material yang tidak disensitasi atau Non-HT. Rata-rata nilai kekerasan yang diperoleh adalah 84.7 untuk nilai HRB, sementara 37.6 untuk nilai HRC. Dengan membandingkan nilai kekerasan HRB berdasarkan literatur ASTM A-204 untuk material SS304 memiliki kekerasan 92 HRB. Nilai kekerasan aktual yang diperoleh untuk sampel Non-HT memiliki kesesuaian dengan literatur yang dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 8 Hasil uji kekerasan SS304 pendinginan air

| Material | Titik | HRB | HRC |
|-----------------|-------|------|------|
| Pendinginan Air | 1 | 62.6 | 11.5 |
| | 2 | 63.0 | 12.0 |
| | 3 | 63.2 | 12.0 |
| | 4 | 63.0 | 11.5 |
| | 5 | 63.4 | 11.4 |
| | 6 | 63.5 | 11.7 |
| Rata-rata | | 63.1 | 11.7 |

Data nilai kekerasan HRB pada sampel dengan variabel laju pendinginan dengan menggunakan pendinginan air memiliki rata-rata nilai sebesar 63.1 HRB. Nilai kekerasan ini mengalami penurunan jika dibandingkan dengan nilai kekerasan material atau sampel Non-HT.

Tabel 4. 9 Hasil uji kekerasan SS304 pendinginan udara

| Material | Titik | HRB | HRC |
|-------------------|-------|------|------|
| Pendinginan Udara | 1 | 62.5 | 11.0 |
| | 2 | 62.4 | 11.0 |
| | 3 | 62.4 | 11.5 |
| | 4 | 62.5 | 11.3 |
| | 5 | 62.5 | 11.2 |
| | 6 | 62.7 | 11.7 |
| Rata-rata | | 62.5 | 11.3 |

Nilai kekerasan aktual untuk sampel dengan variabel pendinginan udara memiliki rata-rata nilai kekerasan sebesar 62.5 HRB. Ini menunjukkan bahwa terjadi penurunan nilai kekerasan bila dibandingkan dengan nilai kekerasan untuk sampel Non- dan juga sampel pendinginan air.

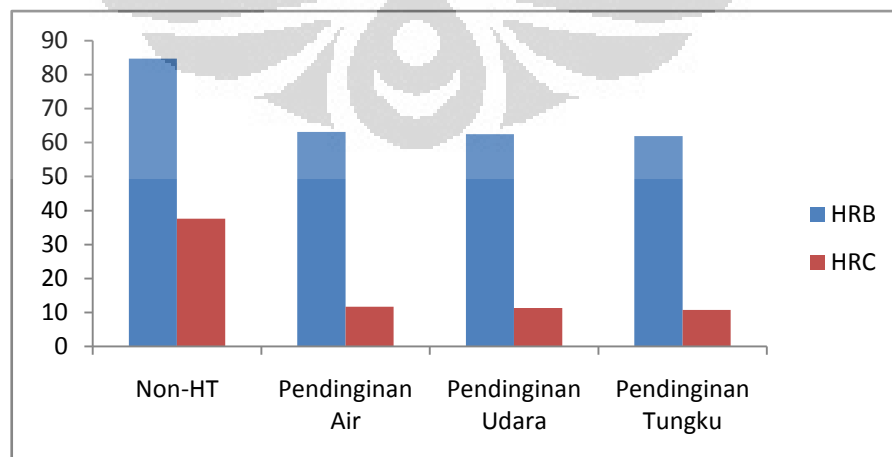
Tabel 4. 10 Hasil uji kekerasan SS304 pendinginan tungku

| Material | Titik | HRB | HRC |
|--------------------|-------|------|------|
| Pendinginan Tungku | 1 | 62.5 | 9.9 |
| | 2 | 61.9 | 11.3 |
| | 3 | 62.0 | 11.0 |
| | 4 | 61.2 | 11.3 |
| | 5 | 62.1 | 10.5 |
| | 6 | 62.0 | 10.2 |
| Rata-rata | | 61.9 | 10.7 |

Nilai kekerasan untuk sampel dengan variabel pendinginan tungku memiliki nilai kekerasan terkecil dibandingkan dengan variabel lainnya. Nilai kekerasan rata-rata sebesar 61.9 HRB.

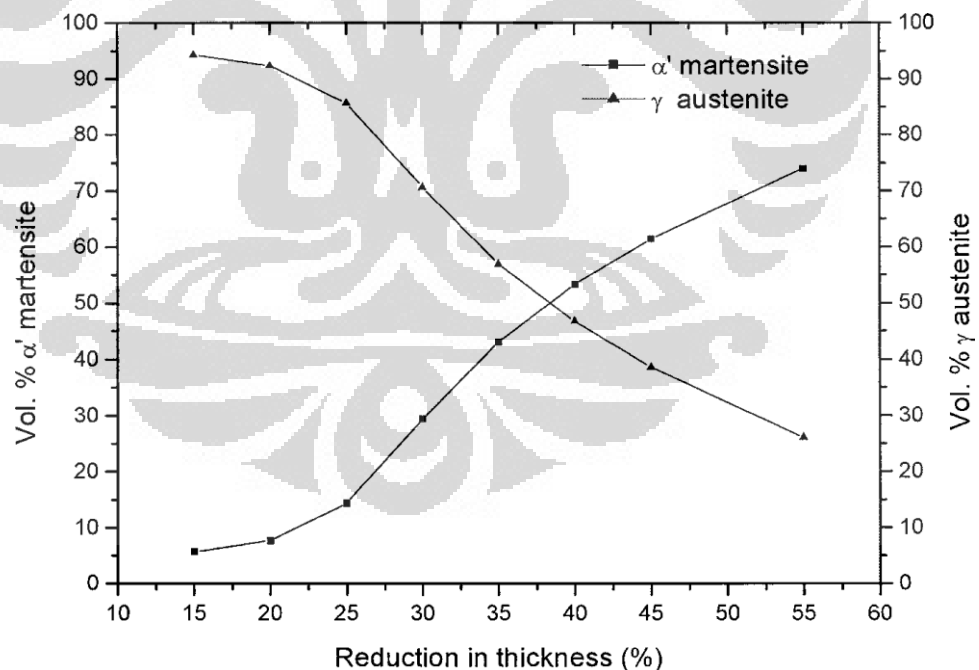
Tabel 4. 11 Hasil rata-rata uji kekerasan SS304

| Material | HRB | HRC |
|--------------------|------|------|
| Non-HT | 84.7 | 37.6 |
| Pendinginan Air | 63.1 | 11.7 |
| Pendinginan Udara | 62.5 | 11.3 |
| Pendinginan Tungku | 61.9 | 10.7 |

**Gambar 4. 12** Grafik rata-rata uji kekerasan SS304 semua kondisi sampel

Penurunan nilai kekerasan material SS304 pada kondisi sampel yang tidak mengalami pemanasan atau Non-HT dengan sampel yang mengalami pemanasan dalam hal ini proses sensitasi temperatur 800°C dengan waktu tahan selama 100 menit dengan variasi pendinginan air, udara dan tungku dapat terlihat pada Gambar 4.12. Penurunan nilai kekerasan terjadi secara linier dimana nilai kekerasan terbesar ada pada sampel Non-HT diikuti dengan sampel pendinginan air, kemudian pendinginan udara, dan yang terakhir dengan nilai kekerasan terkecil ada pada sampel pendinginan tungku.

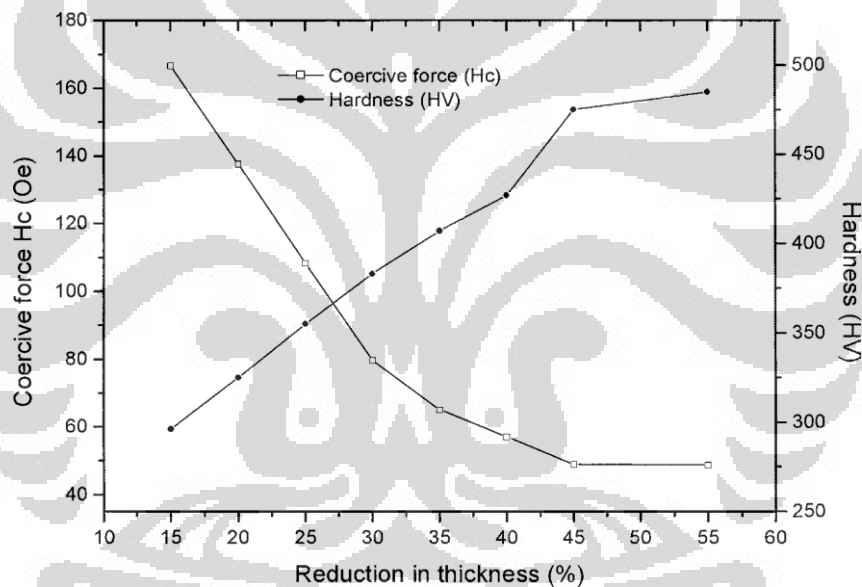
Berdasarkan literatur[17] material *austenitic stainless steel* dapat meningkatkan nilai kekerasan dan kekuatan dengan cara perlakuan pengerjaan dingin dalam hal ini *cold work*. Pada material austenitic stainless steel, deformasi memicu terjadinya transformasi fasa yang awalnya berupa fasa austenit menjadi martensit. Pengaruh dari perubahan ini berupa terjadinya peningkatan nilai kekerasan. Fenomena ini yang disebut dengan *strain hardening* atau pengerasan regangan.



Gambar 4. 13 Persen reduksi terhadap persen volum martensit[18]

Stainless steel memang secara umum rentan terhadap martensitic transformation yang diakibatkan oleh *plastic deformation (cold roll)*, *subzero*

cooling, subzero deformation, hydrogen charging, ion implantation dan *magnetron sputtering*. Namun metode yang paling umum digunakan untuk menjadikan material stainless steel mengalami peningkatan kekerasan adalah dengan metode deformasi plastis (canai dingin). Pada stainless steel dislokasi dan *twins* merupakan penyebab utama fenomena martensitic phase transformation yang terbentuk pada saat mengalami deformasi plastis. Dislokasi, *twins, grain boundaries* dan *grain size* merupakan faktor penting terhadap degradasi dan *metallurgical stability* pada *stainless steel* [18]. Stainless steel dengan jumlah fasa austenit yang banyak menjadikan kekerasannya kecil sementara dengan jumlah martensit yang banyak kekerasan akan meningkat. Pembentukan fasa martensit akan maksimal apabila nilai persen reduksi semakin besar terlihat pada Gambar 4.13.



Gambar 4. 14 Nilai kekerasan terhadap persen reduksi ketebalan[18]

Kekuatan dari *stainless steel* ditentukan berdasarkan keberadaan dan pergerakan dislokasi. Pada material *stainless steel* yang telah mengalami perlakuan canai dingin peningkatan kekuatan disebabkan peningkatan kuantitas fasa martensit. Secara umum deformasi plastis menyebabkan penghambatan pergerakan dislokasi sementara proses nukleasi martensit yang memicu peningkatan kekerasan. Mekanisme pengerasan atau transformasi fasa austenit menjadi martensit terjadi dengan persen reduksi yang kecil terhadap ketebalan menginisiasi martensit untuk mulai terbentuk, dan dengan perlakuan canai secara

progresif membentuk *martensite lath* ternukleasi dan dengan persen reduksi yang besar terhadap ketebalan menjadikan martensit mengalami perubahan bentuk menjadi *irregular blocky shape*[18]. Dari sinilah peningkatan nilai kekerasan material *austenitic stainless steel* terjadi.

Tabel 4. 12 Data kekerasan literatur SS304 A-204

| Material | HRB | Brinell |
|----------|-----|---------|
| SS304 | 92 | 201 |

Berdasarkan penjelasan di atas bahwa nilai kekerasan menurun akibat *austenitic stainless steel* memiliki bentuk mikrostruktur butir cenderung pipih dan memanjang sesuai arah rol dingin pada umumnya. Namun pada saat material jenis ini mengalami dengan temperatur yang cukup tinggi diatas 700°C terjadi perbesaran butir. Ini memberikan efek terhadap sifat mekanik bahan menjadi lebih rendah dibandingkan dengan ukuran butir yang lebih kecil. Selain itu yang dilakukan terhadap sampel menjadikan mulai terbentuk kembali fasa austenitic dan hilangnya tegangan sisa akibat deformasi plastis pengerjaan canai dingin. Ini juga menjadikan pergerakan dislokasi menjadi tidak terhambat. Tegangan sisa mempunyai hubungan nilai kekerasan material pada umumnya. Faktor-faktor inilah yang menyebabkan menurunnya nilai kekerasan material *austenitic stainless steel* yang mengalami [19].

4.5 Analisa Pengamatan Visual Dan Mikro Perilaku Korosi Uji Bent Beam

Pengamatan visual untuk mengidentifikasi retakan pada setiap sampel yang telah mengalami pengujian *bent beam* dalam *salt spray* selama 25 hari menggunakan metode *dye penetrant testing*. Seluruh sampel disiapkan untuk dilakukan penginspeksian. Pertama dilakukan pembersihan menggunakan *cleaner* dipermukaan sampel khususnya pada bagian tengah dari sampel. Dikarenakan daerah tengah sampel memiliki tegangan tertinggi dan daerah yang paling memungkinkan terbentuknya retakan.



Gambar 4. 15 Sampel diberi *penetrant*

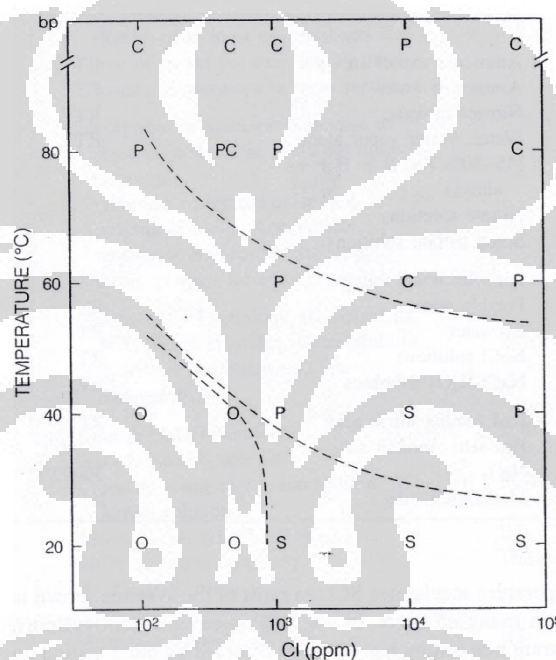
Setelah pemberian cleaner dan dibersihkan menggunakan kain lap, sampel siap untuk diberi penetran seperti pada gambar 4.15 di daerah yang sama yaitu di bagian tengah sampel. Diamkan selama 5 menit kemudian bersihkan kembali menggunakan cleaner. Lalu sampel siap untuk diberi developer yang kemudian diamkan selama 10 menit, tunggu sampai ada retakan yang timbul.



Gambar 4. 16 Sampel diberi *developer*

Berdasarkan pengamatan secara visual dengan metode *dye penetrant testing*, terlihat pada Gambar 4.16 bahwa masih belum terjadi retakan pada semua sampel *austenitic stainless steel 304* dengan variasi pendinginan setelah pemanasan sensitasi.

Retak belum terjadi dikarenakan berdasarkan literatur yang ada pada umumnya temperatur lingkungan Cl yang digunakan dalam pengujian stress corrosion cracking pada *austenitic stainless steel* menggunakan temperatur yang relatif tinggi[1].



Gambar 4.17 Kondisi temperatur dan konsentrasi Cl untuk SCC pada *austenitic stainless steel*[1]

SCC pada *austenitic stainless steel* rentan pada temperatur yang meningkat dan pada konsentrasi Cl tertentu dan ini dapat terlihat pada Gambar 4.17. Dikaitkan dengan kondisi penelitian aktual yang dilakukan, dimana konsentrasi NaCl sebesar 5% dan temperatur dalam *salt spray* kurang lebih sebesar 40°C masih sangat kecil kemungkinannya untuk terjadi retakan.

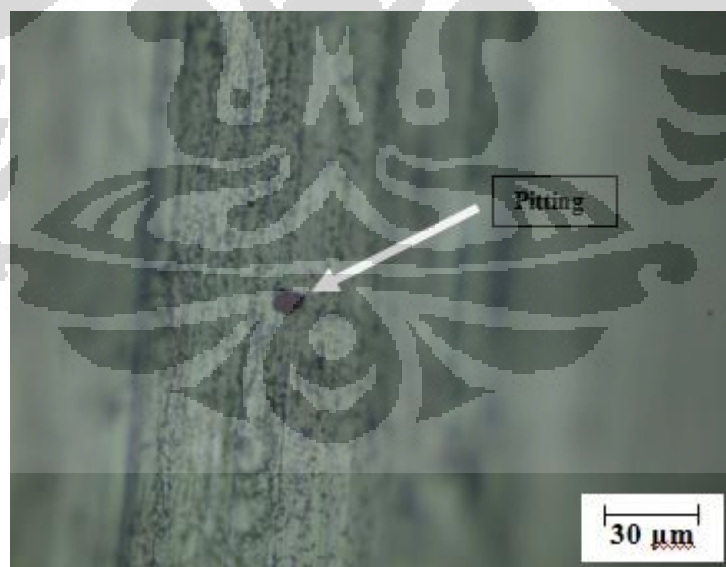
Pengamatan mikro perilaku korosi yang terjadi pada setiap variabel sampel setelah mengalami pemanasan sensitasi dan pengujian *bent beam* pada lingkungan *salt spray* menggunakan mikroskop optik dihasilkan data pengamatan yang ada pada Tabel 4.13. Pengamatan menggunakan mikroskop dilakukan di sepanjang

takik di tengah sampel yang telah disiapkan sebagai daerah inisiasi retak dan daerah yang rentan terserang korosi dengan tegangan tertinggi. Didapatkan pitting corrosion pada seluruh variabel sampel. Namun untuk retakan belum terjadi pada setiap variabel.

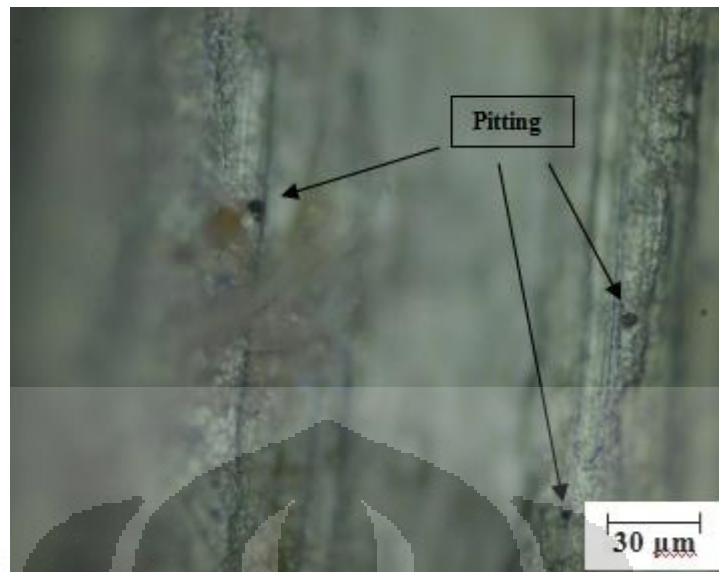
Tabel 4. 13 Indikasi *pit* dan *crack*

| Sampel | <i>Pitting</i> | <i>Cracking</i> |
|------------------------|----------------|-----------------|
| Pendinginan Air (A) | Ada | Tidak ada |
| Pendinginan Udara (U) | Ada | Tidak ada |
| Pendinginan Tungku (F) | Ada | Tidak ada |

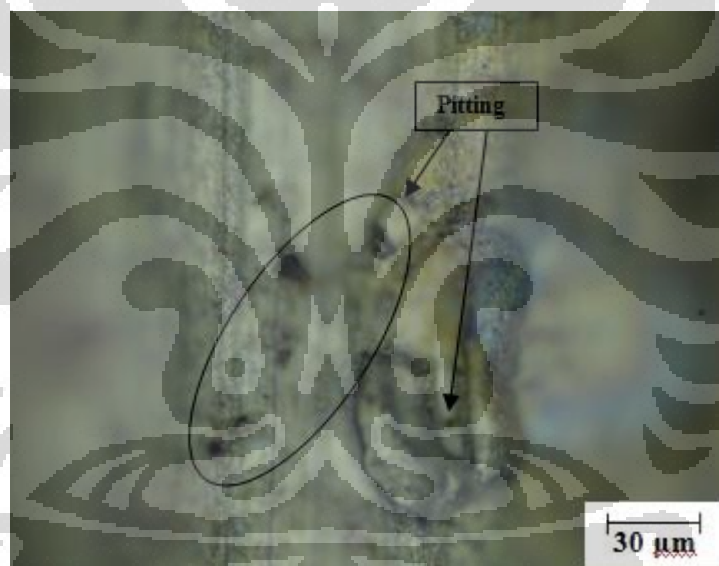
Pada setiap variabel terbentuk *pitting* yang secara kuantitas dapat dibandingkan. Untuk sampel pendinginan air (A), terbentuk *pitting* dengan jumlah yang sedikit dibandingkan dengan sampel pendinginan udara (U) dan sampel pendinginan tungku (F). Dan *pitting* terbanyak terdapat pada sampel pendinginan tungku (F). Jumlah *pitting* diidentifikasi pada daerah sepanjang takik untuk setiap variabel.



Gambar 4. 18 *Pitting* sampel pendinginan air 500x



Gambar 4. 19 *Pitting* sampel pendinginan udara 500x

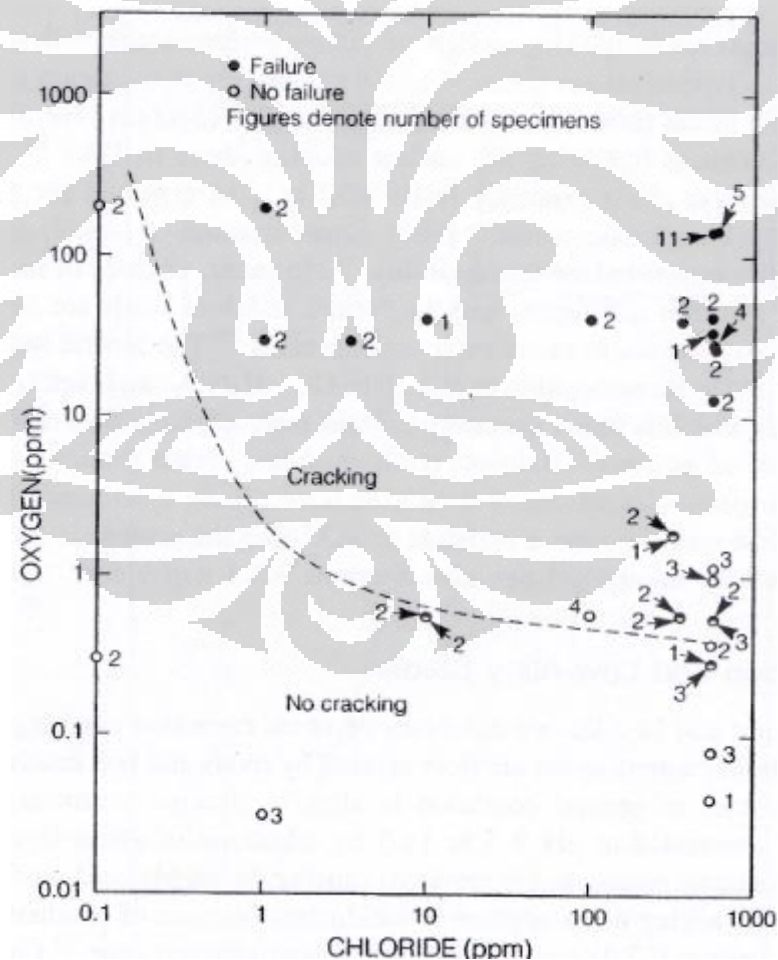


Gambar 4. 20 *Pitting* sampel pendinginan tungku 500x

Dari pengamatan mikro dapat diketahui bahwa terdapat hubungan antara kuantitas karbida yang terbentuk dengan kuantitas *pitting* yang ada. Dimana semakin banyak karbida krom yang terbentuk maka daerah aktif yang ada akan semakin luas, dalam hal ini daerah yang rentan terserang lingkungan korosif Cl akan semakin luas. Maka dari itu semakin banyak karbida krom yang terbentuk maka akan semakin banyak *pitting* yang terbentuk di daerah aktif tersebut.

Dari pembahasan ini juga dapat diketahui bahwa pitting yang terbentuk juga mempengaruhi kerentanan akan korosi retak tegang. Dimana semakin banyak pitting yang terbentuk maka akan semakin rentan akan korosi retak tegang.

Retakan tidak terlihat pada pengamatan ini, hal yang memungkinkan mengapa retakan masih belum terbentuk dikarenakan retakan atau *failure* yang terjadi pada austenitic stainless steel umumnya terjadi pada lingkungan larutan yang mengandung ion Cl^- dan juga yang tidak kalah penting adalah adanya oksigen terlarut[1]. Sementara pada percobaan menggunakan metode *salt spray* dimana kemungkinan adanya oksigen terlarut dapat dibilang sedikit dikarenakan *salt spray* prinsipnya pada lingkungan yang tertutup atau terisolasi tanpa udara dari luar yang masuk secara langsung, ini menjadikan retakan belum terbentuk pada sampel percobaan yang telah dilakukan dalam waktu 25 hari.



Gambar 4. 21 Pengaruh oksigen terlarut dan ion klorida terhadap SCC SS austenitik[1]

Berdasarkan Gambar 4.18, terlihat bahwa oksigen terlarut dan ion klorida sangat berpengaruh terhadap terjadinya kegagalan yang diakibatkan korosi retak tegang. Dapat disimpulkan untuk mencegah terjadinya retakan pada *austenitic stainless steel* dapat dilakukan dengan meminimalisasi kandungan oksigen terlarut dan ion klorida pada lingkungan fluida.



BAB 5

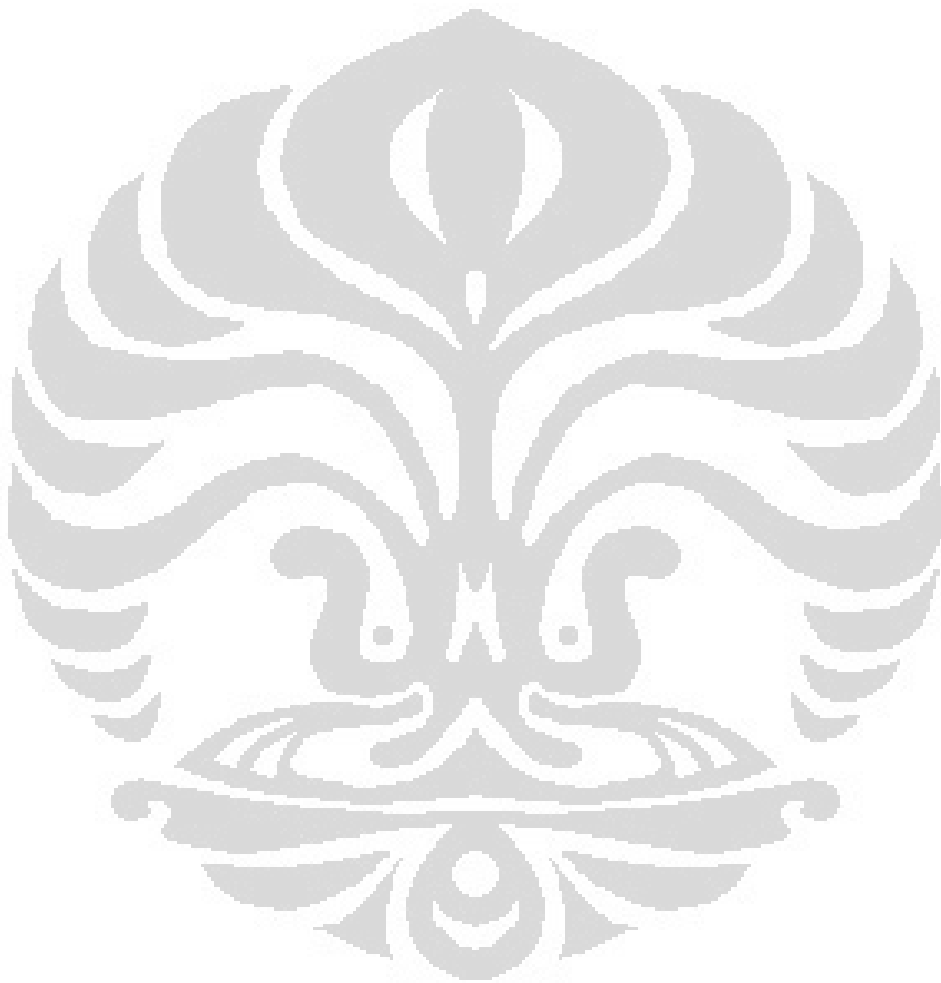
KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Material austenitic stainless steel tipe 304 rentan mengalami sensitasi yang berpengaruh terhadap sifat mekanik dan ketahanan akan korosi.
2. Media pendinginan yang berupa pendinginan air membentuk karbida krom dengan jumlah yang sedikit dibandingkan dengan pendinginan udara. Sementara pendinginan tungku membentuk karbida krom dengan jumlah yang paling banyak.
3. Penurunan nilai kekerasan terjadi secara linier dimana nilai kekerasan terbesar ada pada sampel *Non-HT* diikuti dengan sampel pendinginan air, kemudian pendinginan udara, dan yang terakhir dengan nilai kekerasan terkecil ada pada sampel pendinginan tungku. Sampel *Non-HT* memiliki kekerasan yang paling tinggi dimana cenderung tidak terjadi sensitasi dibandingkan dengan sampel yang dipanaskan pada temperatur 800°C dengan variasi laju pendinginan.
4. Karbida krom terbentuk pada sampel yang dipanaskan pada temperatur 800°C dengan pendinginan air dengan jumlah yang relatif sedikit. Sampel dengan pendinginan udara membentuk karbida di batas butir dengan jumlah yang lebih banyak. Karbida krom paling banyak terbentuk pada sampel dengan pendinginan tungku.
5. Perilaku korosi yang terjadi pada sampel untuk semua variabel terdapat perbedaan dari kuantitas *pitting* yang terbentuk. Jumlah *pitting* paling sedikit terdapat pada sampel dengan pendinginan air. Sampel pendinginan udara *pitting* yang terbentuk cukup banyak, sementara sampel pendinginan tungku memiliki *pitting* terbanyak. Jumlah *pitting* yang terbentuk berbanding lurus dengan karbida krom yang terbentuk.

6. Retakan yang merupakan representasi terjadinya korosi retak tegang atau tidak masih belum terbentuk pada setiap sampel untuk semua variabel.



BAB 6

DAFTAR PUSTAKA

1. A.Jones, D., *Principles and Prevention of Corrosion*. Vol. 8. 1992, New York: Macmillan Publishing Company.
2. Srisuwan, N., *Investigation of Chromium Carbide Precipitation and Corrosion Behavior on Stainless Steel AISI 304 for Welding Process Development*. The 2nd RMUTP International Conference, 2010.
3. ASTM, G-39, "Standard Practice for Preparation and Use of Bent Beam Stress Corrosion Test specimen ". 2009.
4. G.Fontana, M., *Corrosion Engineering*. 1987, Ohio: Mc Graw Hill.
5. Saefudin, *Pengaruh Suhu Pemanasan Terhadap Sensitasi Pada Baja Stainless Steel 304*. LIPI, Metalurgi, Vol 23, No.2, 2008.
6. ASM, Vol 4, *Heat Treating*. ASM International, 1991.
7. Sedriks. A. John., *Corrosion of Stainless Steels*. 1976, New York: John Wiley & Sons. Inc.
8. Li, Delin., Mao, X., *Stress Corrosion Cracking of Long Term Ageing-Treated 316 Stainless Steel in Boiling 42% MgCl Solution*. Journal of Materials Science Letters 16, 1997: p. 244-247.
9. Ramamurthy, S. and A. Atrens. *The influence of applied stress rate on the stress corrosion cracking of 4340 and 3.5NiCrMoV steels in distilled water at 30°C*. Corrosion Science, 2010. **52**(3): p. 1042-1051.
10. Bulloch, J.H., *Some effects of yield strength on the stress corrosion cracking behaviour of low alloy steels in aqueous environments at ambient temperatures*. Engineering Failure Analysis, 2004. **11**(6): p. 843-856.
11. Song, F.M., *Predicting the mechanisms and crack growth rates of pipelines undergoing stress corrosion cracking at high pH*. Corrosion Science, 2009. **51**(11): p. 2657-2674.
12. Y. Prawoto, K. Sumeru, and W. B.Wan Nik. *Stress Corrosion Cracking of Steel and Aluminum in Sodium Hydroxide: Field Failure and Laboratory Test*. Advances in Materials Science and Engineering. 2012: p. 8.

13. Alyousif, O.M. and R. Nishimura, *On the stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement of sensitized austenitic stainless steels in boiling saturated magnesium chloride solutions: Effect of applied stress*. Corrosion Science, 2008. **50**(10): p. 2919-2926
14. ASTM, E-008, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials". 2003: United States.
15. ASTM, G-39, "Standard Practice for Preparation and Use of Bent Beam Stress Corrosion Test specimen ". 2009.
16. ASM, Vol 13, *Corrosion of Stainless Steel*, ASM Handbook, 1990.
17. ASM, Vol 1, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. ASM Handbook, 1990.
18. K. Mumtaz., et al., *Magnetic measurements of martensitic transformation in austenitic stainless steel after room temperature rolling*. Journal of Materials Science **39** (2004) 85– 97.
19. P. Gadang, *Korosi Retak Tegang Material Stainless Steel AISI 304 Di Lingkungan MgCl₂*, Universitas Indonesia, 2008.
20. Prof. Dr. Ir. Johny Wahyuadi Soedarsono, DEA, *Korosi dan Pencegahan*, Departemen Teknik Metalurgi dan Material UI, 2008.