



TUGAS AKHIR – TM141585

**PENGARUH *THERMAL CYCLING* PADA IMPLAN
STAINLESS STEEL 316L TERHADAP SIFAT
MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO**

**PUTRI INTAN USI FAUSIA
NRP. 0211144000031**

Dosen Pembimbing
Fahmi Mubarak ST., MSc., PhD
NIP. 197801152003121002

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



TUGAS AKHIR – TM141585

**PENGARUH *THERMAL CYCLING* PADA IMPLAN
STAINLESS STEEL 316L TERHADAP SIFAT
MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO**

PUTRI INTAN USI FAUSIA
NRP. 0211144000031

Dosen Pembimbing
Fahmi Mubarak ST., MSc., PhD
NIP. 197801152003121002

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



FINAL PROJECT – TM141585

***EFFECT OF THERMAL CYCLING TOWARDS
MECHANICAL CHARACTERISTIC AND MICRO
STRUCTURE OF STAINLESS STEEL AISI 316L
IMPLAN***

PUTRI INTAN USI FAUSIA
NRP. 0211144000031

Faculty Advisor
Fahmi Mubarok ST., MSc., PhD
NIP. 197801152003121002

Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Intstitut of Technology
Surabaya 2018

**PENGARUH *THERMAL CYCLING* PADA IMPLAN
STAINLESS STEEL AISI 316L TERHADAP SIFAT
MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

PUTRI INTAN USI FAUSIA

NRP. 0211144000031

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Fahmi Mubarak ST, MS (Pembimbing)
NIP. 19780115200310001
2. Prof. Dr. Ir. Wijaya Setiawan, DEA (Penguji I)
NIP. 195012111980001
3. Dr Eng. Sutikno, S.T, M.T (Penguji II)
NIP. 197407032000031001
4. Ir. Hari Subianto, MSc (Penguji III)
NIP. 196006231988081002

SURABAYA

JULI, 2018

PENGARUH *THERMAL CYCLING* PADA IMPLAN *STAINLESS STEEL* AISI 316L TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO

Nama Mahasiswa : Putri Intan Usi Fausia
NRP : 2114100031
Jurusan : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Fahmi Mubarak, ST.,MSc.,PhD

Abstrak

Kasus patah tulang merupakan masalah besar dalam dunia kesehatan. Berdasarkan data dari Departemen Kesehatan RI tahun 2013 didapatkan sekitar delapan juta orang mengalami kejadian fraktur atau patah tulang dengan penyebab yang berbeda-beda. Dalam banyak kasus, dokter ortopedi akan melakukan operasi dengan memasang material implan pada bagian tulang yang patah. Salah satu material yang bisa digunakan sebagai plat implan yaitu *stainless steel* AISI 316L. PT. Pelopor Teknologi Implantindo adalah salah satu perusahaan lokal yang memproduksi implan *stainless steel* AISI 316L. Akan tetapi kualitas produk implan lokal tidak sebaik yang diimpor. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan kualitas salah satunya dengan cara memperbaiki sifat mekaniknya.

Austenitik *stainless steel* 316L hasil *investment casting* diproses *cold rolling*. Selanjutnya proses *thermal cycling* yang akan memicu adanya rekristalisasi yang memiliki ukuran butir yang lebih kecil dibandingkan ukuran butir *cold rolling*. Proses *thermal cycling* dilakukan pada suhu 850⁰C, 900⁰C, dan 950⁰C selama 35 detik dan diulang empat kali. Pengaruh temperatur akan diamati melalui metalografi dan sifat mekanik.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sifat mekanik yaitu mengalami kenaikan kekerasan dari *stainless steel* 316L hasil *investment casting* sebesar 139,2 HV menjadi 253,4 HV

pada stainless steel 316L thermal cycling 950⁰C. Perlakuan pada temperatur ini juga mengubah bentuk butir saat *investment casting* menjadi bentuk butir *angular* dan kecil dikarenakan adanya rekristalisasi dengan ukuran dari 290,36 μm ke 22,45 μm .

Kata Kunci : *Implan stainless steel bone plate AISI 316L, investment casting, cold rolling, thermal cycling.*

EFFECT OF THERMAL CYCLING TOWARDS MECHANICAL CHARACTERISTIC AND MICRO STRUCTURE OF STAINLESS STEEL AISI 316L IMPLAN

Student's Name : Putri Intan Usi Fausia
Student's Number : 2114100031
Departement : Mechanical Engineering
Lecturer Supervisor : Fahmi Mubarok ST., MSc., PhD

Abstract

Bone fracture is one of the major problem in medical world. Based on the data of Ministry of Health, Republic of Indonesia on 2013, around eight million people suffering from a fracture bone caused by different conditions. In most cases, the orthopedic doctor will perform surgery by adding implant material to stabilize the fractured bone. One of the material commonly used as implant plate is stainless steel AISI 316L. PT. Pelopor Teknologi Implantindo is one of the local company that manufacture implant stainless steel AISI 316L. They implement investment casting process to produce these implants.. Due to this process, they quality of the local implant product is not as good as the imported one. Thus, this research is performed to improve the quality, namely the mechanical properties of the local implant product.

The AISI 316L implant from investment casting process was first cold-rolled to introduce residual stress. The next process, that is thermal cycling, is implemented to allow recrystallization of new grain to occur, thus reducing their grain size. Thermal cycling process was carried out at 850⁰C , 900⁰C, and 950⁰C for 35 second and repeated four times.. The influence of the temperature will be observed through metalography and mechanical properties

The results show that mechanical properties namely the hardness of the increased hardness of 316L stainless steel investment casting results of 139.2 HV to 253.4 HV on 316L stainless steel thermal cycling 9500C. Treatment at this temperature also changes the grain shape when investment casting becomes angular and small grain shape due to recrystallization with size from 290.36 μm to 22.45 μm .

Key words : Implan stainless steel bone plate AISI 316L, investment casting, cold rolling, thermal cycling

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat dan hidayahNya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**PENGARUH THERMAL CYCLING PADA IMPLAN STAINLESS STEEL AISI 316L TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO**”. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orang tua penulis, Anang Widodo dan Anny Widiasmara. Serta adik kandung penulis, Putra Berlian, Putra Safira, dan Putri Permata, yang senantiasa selalu memberikan semangat dan nasihat yang sangat berarti;
2. Bapak Fahmi Mubarak ST., MSc., PhD sebagai dosen pembimbing yang telah membantu, mendorong, dan memberikan ilmu hingga terselesaikannya tugas akhir ini;
3. Bapak Dr. Eng. Sutikno, ST.,MT, Bapak Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA, Bapak Ir. Hari Subianto, MSc yang selaku dosen penguji tugas akhir. Terima kasih atas nasehat dan saran yang telah diberikan;
4. Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, MSc., PhD selaku dosen wali yang telah memberikan arahan dan bimbingan perkuliahan sampai akhirnya penulis dapat menyelesaikan kuliah jenjang S-1;
5. Ahmad Rosidi, terima kasih atas dukungan dan petuahnya;
6. Teman-teman laboratorium metalurgi terima kasih sudah pernah menemani penulis di laboratorium;
7. Karyawan laboratorium metalurgi teknik mesin ITS, sudah banyak membantu untuk proses tugas akhir penulis;

Penulis menyadari bahwa tugas akhir inimasih banyak kekurangan, untuk itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi perbaikan dan kesempurnaan tugas akhir ini.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

(Halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

| | |
|---|----------|
| Abstrak | ii |
| <i>Abstract</i> | iv |
| KATA PENGANTAR..... | vi |
| DAFTAR ISI..... | viii |
| DAFTAR GAMBAR | xii |
| DAFTAR TABEL | xv |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Perumusan Penelitian | 3 |
| 1.3 Tujuan Penelitian..... | 3 |
| 1.4 Batasan Masalah..... | 3 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 7 |
| 2.1 Implan Baja Nirkarat | 7 |
| 2.2 <i>Stainless steel</i> | 8 |
| 2.3 Implan Austenitic <i>Stainless steel</i> 316L..... | 8 |
| 2.4 <i>Investment Casting</i> | 10 |
| 2.5 Metode Penguatan Material..... | 11 |
| 2.5.1 Pengerasan regang (<i>strain hardening</i>) | 11 |
| 2.5.2 Fasa Kedua | 11 |
| 2.5.3 Presipitasi..... | 12 |
| 2.5.4 Dispersi..... | 12 |

| | |
|---|-----------|
| 2.6 <i>Grain Refinement Austenitic Stainless steel</i> | 12 |
| 2.7 Pengaruh Pengerjaan Dingin Terhadap Sifat Mekanik | 14 |
| 2.8 Perlakuan Panas..... | 17 |
| 2.9 <i>Thermal cycling</i> | 17 |
| 2.10 Hubungan Antara <i>Cold Working</i> dan Temperatur Rekristalisasi | 20 |
| 2.11 Hubungan Antara Waktu Tahan Pemanasan dan Ketebalan Plat | 21 |
| BAB III METODOLOGI PERCOBAAN..... | 25 |
| 3.1 Diagram Alir Penelitian..... | 25 |
| 3.2.1 Sampel material untuk pengujian metallography dan pengujian SEM | 26 |
| 3.2.2 Sampel material untuk <i>Cold rolling</i> | 26 |
| 3.3 Peralatan..... | 27 |
| 3.4 Prosedur <i>Thermal cycling</i> | 28 |
| 3.4.1 <i>Thermal cycling</i> | 28 |
| 3.5 Langkah-langkah Penelitian | 28 |
| 3.5.1 Studi Literatur | 28 |
| 3.5.2 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian..... | 29 |
| 3.5.3 Pengambilan Data Awal | 29 |
| 3.5.4 Pengujian <i>Metallography</i> | 29 |
| 3.5.5 Pengujian <i>Scanning Electron Macroscopic</i> | 30 |
| 3.5.6 Proses <i>Cold rolling</i> | 31 |
| 3.5.7 Proses <i>Thermal cycling</i> | 31 |

| | |
|---|-----------|
| 3.5.8 Pengujian <i>Mikro Vickers Hardness</i> | 32 |
| 3.6 Hasil Data Awal | 32 |
| 3.6.1 Data awal pengujian metalografi | 32 |
| 3.6.2 Data Awal Pengujian Kekerasan..... | 34 |
| BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN..... | 37 |
| 4.1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia..... | 37 |
| 4.2 Hasil Pengamatan Struktur Mikro | 38 |
| 4.2.1 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Pada Spesimen Hasil <i>Cold rolling</i> | 39 |
| 4.2.2 Hasil Pengamatan Struktur Mikro pada Spesimen <i>Thermal cycle</i> suhu 850 ⁰ C..... | 41 |
| 4.2.3 Hasil Pengamatan Struktur Mikro pada Spesimen <i>Thermal cycle</i> suhu 900 ⁰ C | 42 |
| 4.3 Pengujian Microhardness | 47 |
| 4.3.1 Hasil Pengujian Microhardness Pada <i>Stainless steel</i> 316L Hasil Investment Casting | 47 |
| 4.3.2 Hasil Pengujian Microhardness Pada <i>Stainless steel</i> 316L <i>Cold rolling</i> | 49 |
| 4.3.3 Hasil Pengujian Microhardness Pada <i>Stainless steel</i> 316L <i>Thermal cycle</i> Suhu 850 ⁰ C..... | 51 |
| 4.3.4 Hasil Pengujian Microhardness Pada <i>Stainless steel</i> 316L <i>Thermal cycle</i> Suhu 900 ⁰ C..... | 53 |
| 4.3.5 Hasil Pengujian Microhardness Pada <i>Stainless steel</i> 316L <i>Thermal cycle</i> Suhu 950 ⁰ C..... | 55 |
| 4.4 Ringkasan analisis | 56 |

| | |
|--|-----------|
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... | 61 |
| 5.1 Kesimpulan | 61 |
| 5.2 Saran | 61 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 2.1 | Implan patah tulang | 7 |
| Gambar 2.2 | Pemasangan implan pada patah tulang | 8 |
| Gambar 2.3 | Diagram Fasa menampilkan struktur mikro yang terkait dengan komposisi <i>Stainless steel</i> | 9 |
| Gambar 2.4 | Pengaruh derajat deformasi terhadap sifat mekanik (kekuatan, keuletan, dan kekerasan) dan bentuk butiran | 15 |
| Gambar 2.5 | Skema pengerjaan dingin (<i>cold rolling</i>)..... | 16 |
| Gambar 2.6 | <i>Schematic Representation Of The Cold Work Anneal Cycle</i> | 18 |
| Gambar 2.7 | <i>The variation of recrystallization temperature with percent cold work for iron</i> | 21 |
| Gambar 2.8 | Fraksi Rekristalisasi dengan waktu <i>annealing</i> ... | 23 |
| Gambar 3.1 | Diagram alir penelitian | 25 |
| Gambar 3.2 | <i>Implant Stainless steel 316L hasil investment casting</i> | 26 |
| Gambar 3.3 | <i>Implant Stainless steel 316L Synthes, Switzerland tipe premium sebagai referensi</i> | 26 |
| Gambar 3.4 | Sampel material untuk <i>Cold rolling</i> | 27 |
| Gambar 3.5 | Sampel material setelah <i>cold rolling</i> dengan reduksi 50% | 27 |
| Gambar 3.6 | Grinder – Polisher GRIPO 300-1V..... | 27 |
| Gambar 3.7 | <i>Olympus Stereo Microscope</i> | 28 |
| Gambar 3.8 | Mesin <i>cold rolling</i> | 31 |
| Gambar 3.9 | Skema <i>Thermal Cycling</i> | 31 |
| Gambar 3.10 | Struktur mikro pada <i>stainless steel 316L hasil investment casting</i> : a) Perbesaran 100x dan b) Perbesaran 200x | 32 |
| Gambar 3.11 | Hasil struktur mikro <i>stainless steel AISI 316L hasil investment casting</i> : a) 100x dan b) 200x | 33 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 3.12 | Hasil struktur mikro <i>stainless steel</i> AISI 316L Synthes : a) Perbesaran 500x dan b) Perbesaran 1000x..... | 33 |
| Gambar 3.13 | (a) Hasil indentasi <i>stainless steel</i> 316L merk Synthes dan (b) Posisi Indentasi Pada Uji Microhardness <i>stainless steel</i> 316L merk Synthes | 34 |
| Gambar 4.1 | Mikrostruktur Pada Spesimen <i>Cold rolling</i> : a) Perbesaran 100x, b) Perbesaran 200x dan c) Perbesaran 500x | 39 |
| Gambar 4.2 | Mikrostruktur pada <i>stainless steel</i> 316L : a) Perbesaran 100x dan b) Perbesaran 200x | 40 |
| Gambar 4.3 | Mikrostruktur pada <i>stainless steel</i> 316L dengan perbesaran 500x dan 1000x | 40 |
| Gambar 4.4 | Mikrostruktur pada <i>Stainless steel thermal cycle</i> 850oC perbesaran (a) 100x, (b) 200x, dan (c) 500x..... | 41 |
| Gambar 4.5 | Mikrostruktur <i>Stainless steel</i> 316L <i>thermal cycle</i> 850oC perbesaran (a) 100x dan (b) 200x | 42 |
| Gambar 4.6 | Mikrostruktur <i>stainless steel</i> 316L <i>thermal cycle</i> 900 ⁰ C perbesaran (a) 100x, (b) 200x, dan (c) 500x..... | 43 |
| Gambar 4.7 | Mikrostruktur <i>stainless steel</i> 316L <i>thermal cycle</i> 900 ⁰ C..... | 44 |
| Gambar 4.8 | Mikrostruktur <i>Stainless steel</i> 316L <i>thermal cycle</i> 950 ⁰ C perbesaran (a) 100x, (b) 200x, dan (c) 500x..... | 45 |
| Gambar 4.9 | Mikrostruktur <i>stainless steel</i> 316L <i>thermal cycle</i> 950oC (50x, 200x, 500x, 1000x)..... | 46 |
| Gambar 4.10 | (a) Hasil indentasi Spesimen <i>Investment Casting</i> dan (b) Posisi Indentasi Pada Uji Microhardness Spesimen <i>Investment Casting</i> | 48 |
| Gambar 4.11 | Gambar 4.11 (a) Hasil indentasi Spesimen <i>Cold Rolling</i> dan (b) Posisi Indentasi Pada Uji Microhardness Spesimen <i>Cold Rolling</i> | 49 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 4.12 | (a) Hasil indentasi Spesimen <i>Thermal cycle</i> 8500C dan (b) Posisi Indentasi Pada Uji Microhardness Spesimen <i>Thermal cycle</i> 850 ⁰ C | 51 |
| Gambar 4.13 | (a) Hasil indentasi Spesimen <i>Thermal cycle</i> 900 ⁰ C dan (b) Posisi Indentasi Pada Uji Microhardness Spesimen <i>Thermal cycle</i> 900 ⁰ C | 53 |
| Gambar 4.14 | (a) Hasil indentasi Spesimen <i>Thermal cycle</i> 950 ⁰ C dan (b) Posisi Indentasi Pada Uji Microhardness Spesimen <i>Thermal cycle</i> 950 ⁰ C | 55 |
| Gambar 4.15 | Grafik Perbandingan Hasil Kekerasan <i>Stainless steel</i> 316L <i>Cold rolling</i> , <i>Thermal cycle</i> Dan <i>Stainless steel</i> 316L Merk Synthes | 58 |
| Gambar 4.16 | Grafik Ukuran Butir Pada <i>Cold rolling</i> , <i>Thermal cycle</i> Dan <i>Stainless steel</i> 316L Merk Synthes.... | 59 |

(Halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2.1 Komposisi kimia <i>stainless steel</i> implan quality | 10 |
| Tabel 3.1 Data awal hasil pengujian kekerasan | 35 |
| Tabel 4.1 Komposisi Kimia Hasil Uji <i>Spectometer</i> | 38 |
| Tabel 4.2 Hasil Uji Micro Vickers Hardness Spesimen <i>Investment Casting</i> | 48 |
| Tabel 4.3 Hasil Uji Micro Vickers Hardness Spesimen <i>Cold rolling</i> | 50 |
| Tabel 4.4 Hasil Uji Micro Vickers Hardness Spesimen <i>Thermal cycle 850⁰C</i> | 52 |
| Tabel 4.5 Hasil Uji Micro Vickers Hardness Spesimen <i>Thermal cycle 900⁰C</i> | 54 |
| Tabel 4.6 Hasil Uji Micro Vickers Hardness Spesimen <i>Thermal cycle 950⁰C</i> | 56 |

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kasus patah tulang merupakan masalah besar dalam dunia kesehatan. Berdasarkan data dari Departemen Kesehatan RI tahun 2013, terdapat sekitar delapan juta orang mengalami kejadian fraktur atau patah tulang dengan penyebab yang berbeda-beda [1]. Salah satu upaya medis yang standar dilakukan oleh dokter ortopedi untuk penyembuhan patah tulang adalah dengan cara memasang material implan pada bagian tulang yang patah untuk mengembalikan posisi tulang (reposisi) ke kondisi anatomisnya dan mempertahankan posisi tersebut (immobilisasi) hingga proses penyambungan tulang solid terjadi. Bahan implan yang umum digunakan saat ini adalah biomaterial berbasis logam seperti baja tahan karat (*stainless steel*) dan titanium [1]. Implan *stainless steel* AISI 316L merupakan salah satu jenis material yang sering digunakan pada operasi tulang yang patah atau rusak.

Dalam dunia kedokteran, *stainless steel* banyak digunakan pada pembedahan tulang karena sifat mekaniknya yang baik dan memiliki biokompatibilitas tinggi dengan tubuh manusia. *Stainless steel* merupakan *steel alloy* dengan penambahan unsur kromium lebih dari 10,5 wt% yang membuat sifat bahan tersebut menjadi tahan terhadap karat/nirkarat (*stainless*).

Tipe *austenitic stainless steel* merupakan jenis *stainless steel* yang paling banyak digunakan untuk implan patah tulang di dunia kedokteran. *Austenitic stainless steel* yang biasa digunakan yaitu *stainless steel* 316L harus memiliki kekuatan dan keuletan sesuai standard ASTM F138-13a. Produsen implan patah tulang ini banyak tersebar di beberapa negara. Sayangnya sampai saat ini, implan yang diproduksi dengan komponen lokal hanya berkisar sekitar 5% dari yang beredar di pasaran. PT. Pelopor Teknologi Implantindo, Mojokerto merupakan salah satu

perusahaan *implan stainless steel* di Indonesia yang berusaha agar produk implan lokal dapat memenuhi kebutuhan implant *stainless steel* di Indonesia. Perusahaan ini menggunakan metode *investment casting* dalam tahap proses produksinya.

Harus diakui bahwa kualitas implan hasil dari proses *investment casting Stainless steel AISI 316L* masih belum setara dengan kualitas produk implan dari luar negeri yang kebanyakan dibuat dengan metode *forging*. Secara karakter mekanik, implan yang dibuat dengan metode *forging* memiliki kekuatan mekanik dan elongasi lebih tinggi dibandingkan dengan implan yang dihasilkan melalui *investment casting*. Oleh karena itu dibutuhkan suatu perlakuan panas tambahan pada implan hasil *investment casting* agar memiliki karakteristik mekanik tidak berbeda jauh dengan implan hasil *forging*.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menaikkan sifat mekanik *austenitic stainless steel*. Tujuan utama dari proses perlakuan ini adalah untuk memperbaiki struktur mikro dari produk *investment casting* yang memiliki struktur dendritik dengan karakter butiran besar menjadi sebuah struktur dengan, butiran berukuran nano, sub-mikron atau mikron. Perubahan butiran ini akan menaikkan kekuatan dengan tetap mempertahankan keuletan dari *austenitic stainless steel*.

Pada penelitian ini, *austenitic stainless steel 316L* hasil *investment casting* di proses *cold rolling* untuk direduksi sampai dengan 50% ketebalan awalnya, dan dilanjutkan dengan proses *thermal cycling* pada suhu antara 850⁰C, 900⁰C, dan 950⁰C. Proses *cold rolling* akan memberikan tegangan sisa pada material dan saat *thermal cycle* dilakukan, maka akan terjadi rekristalisasi butiran baru yang ukurannya jauh lebih kecil dibanding dengan butiran hasil *cold rolling*. Jika temperatur *thermal cycle* yang diberikan mencapai temperatur rekristalisasi materialnya. Pengaruh dari temperatur dan jumlah siklus *thermal* akan diamati melalui perubahan sifat mekanik dan metalographi. Hubungan antara proses *thermal cycle*, temperatur proses dan jumlah siklus

dengan karakteristik akhir baja hasil investment casting akan dibahas secara lebih detail.

1.2 Perumusan Penelitian

Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah:

Bagaimana pengaruh temperatur *thermal cycle* terhadap *austenitic stainless steel* 316L hasil *investment casting* dilihat dari sifat mekanik dan metalografi?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari dilakukannya penelitian ini yaitu mempelajari pengaruh temperatur *thermal cycle* terhadap *austenitic stainless steel* 316L hasil *investment casting* dan mengetahui pengaruh dari proses ini pada sifat mekanik dan metalografi yang akan diamati dengan lebih detail.

1.4 Batasan Masalah

Untuk dapat menyelesaikan permasalahan yang muncul dalam penelitian dan mencapai tujuan yang diinginkan, maka diperlukan batasan masalah, antara lain :

1. Cacat pada *stainless steel* AISI 316L berupa makro dan mikro *porosity* hasil *investment casting* dianggap tidak memiliki pengaruh signifikan.
2. Temperatur pemanasan dianggap konstan pada suhu 850⁰C, 900⁰C, 950⁰C dengan waktu penahanan 35 detik dan dilakukan sebanyak empat siklus.
3. Pendinginan dilakukan di udara.
4. Pengaruh dari proses perlakuan *cold roll dan thermal cycle* terhadap sifat mekanik dilihat dengan mengukur perubahan angka kekerasan dan pengamatan metalografi karena keterbatasan jumlah sampel.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian yang dilakukan ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik untuk berbagai kalangan. Adapun manfaat yang bisa diberikan yaitu sebagai berikut :

1. Dapat meningkatkan kualitas produk *investment casting* sehingga dapat setara dengan produk dari forging (synthes)
2. Dengan dilakukannya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan masukan kepada kalangan industri mengenai pengaruh *Cold-Rolling* dan *Thermal cycling* pada *Stainless steel AISI 316L*.
3. Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat dan menambah wawasan bagi peneliti.

1.6 Sistematika Laporan

Laporan penelitian Tugas Akhir ini ditulis berdasarkan sistematika penulisan sebagai berikut :

- BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang dilakukannya penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, dan sistematika penulisan laporan hasil penelitian.

- BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori-teori dasar berkaitan dengan penelitian sehingga dapat diperoleh pengertian dan pengetahuan yang menunjang untuk analisis pembahasan masalah pada penelitian.

- BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi rencana penelitian, prosedur pelaksanaan, bahan peralatan, pengujian dan dimensi spesimen.

- BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi data-data hasil penelitian dan pembahasan mengenai data-data tersebut serta permasalahan yang terjadi.

- **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisi kesimpulan dari penelitian ini dan saran yang mungkin berguna untuk penelitian selanjutnya.

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

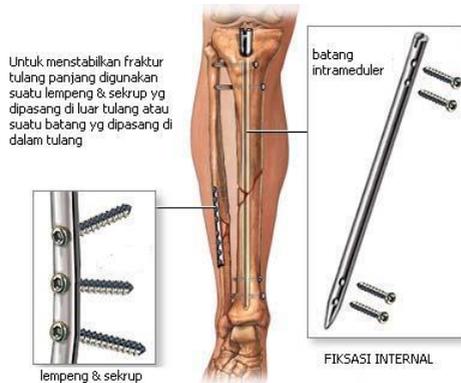
2.1 Implan Baja Nirkarat

Material yang digunakan pada tubuh manusia harus memiliki biokompatibilitas yang tinggi sehingga saat berinteraksi tidak menyebabkan reaksi ataupun iritasi yang dapat merugikan tubuh manusia maupun material itu sendiri. Material ini dikenal pula sebagai biomaterial. Aplikasi dari biomaterial salah satunya adalah untuk memperbaiki fungsi jaringan tubuh secara berkelanjutan seperti pada kasus patah tulang (ortopedi). Material yang ideal harus memiliki sifat mekanis seperti kekuatan, kekerasan, keuletan, ketahanan terhadap aus, dan lain sebagainya seperti yang ditetapkan oleh standar nasional maupun internasional.



Gambar 2.1 Implan patah tulang

Stainless steel 316L merupakan salah satu biomaterial yang banyak dipilih pada proses implantasi dalam operasi bedah ortopedis. Selain memiliki kompatibilitas yang tinggi, harganya yang relatif murah menjadi salah satu faktor dominan juga yang melatar belakangi pemilihan implan ini walaupun secara berat jenis, *stainless steel* memiliki berat jenis lebih tinggi dibanding biomaterial yang lain [11]. Contoh pemakaian biomaterial pada implan patah tulang yang ditempatkan di dalam tubuh (internal) ditunjukkan pada gambar 2.2



Gambar 2.2 Pemasangan implan pada patah tulang [17]

2.2 *Stainless steel*

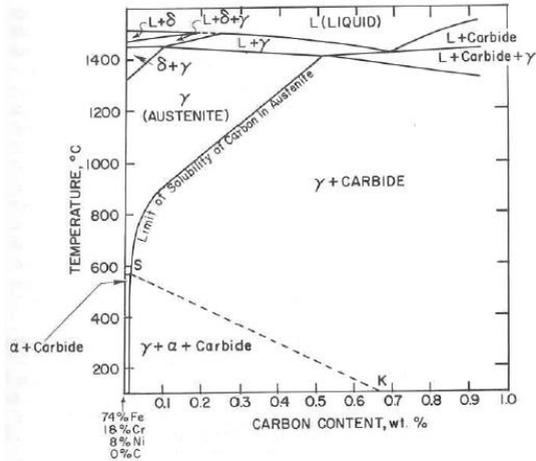
Stainless steel sendiri merupakan baja paduan dengan kadar paduan tinggi (*high alloy steel*). *Stainless steel* memiliki sifat yang tidak mudah terkorosi sebagaimana logam baja yang lain. *Stainless steel* harus memiliki minimal 17% Cr. Selain Cr, paduan unsur lain seperti Ni, Mo, Cu, Ti, Nb sering tambahkan untuk memperbaiki struktur mikro dan sifat mekanik. Sifat tahan korosinya diperoleh dari penambahan unsur kromium. Kandungan karbon pada *stainless steel* berkisar antara 0,03% sampai lebih dari 1,0% tergantung dari jenis *stainless steel* [16]. Berdasarkan struktur mikro atau mekanisme peningkatan kekuatannya, *stainless steel* dibagi dikategorikan menjadi lima jenis antara lain :

1. *Martensitic stainless steel*
2. *Ferritic stainless steel*
3. *Austenitic stainless steel*
4. *Precipitation-hardening stainless steel*
5. *Duplex stainless steel*

2.3 Implan *Austenitic Stainless steel 316L*

Austenitic stainless steel merupakan paduan yang cukup untuk menstabilkan austenite pada suhu ruang. *Austenitic*

stainless steel memiliki kandungan kromium antara 16 - 28% dan nikel antara 3.5 - 32%. *Austenitic stainless steel* memiliki struktur kristal FCC sehingga dapat di roll dalam keadaan dingin sampai reduksi 90% [8].



Gambar 2.3 Diagram Fasa menampilkan struktur mikro yang terkait dengan komposisi *Stainless steel* [10]

Pada gambar diatas menunjukkan perubahan fasa yang terjadi jika dipanaskan pada temperatur tertentu. Dan dapat mengetahui pada temperatur terdapat masih adanya karbida yang menyebabkan ketahanan korosi menurun. *Austenitic stainless steel* memiliki fasa austenite yang stabil sampai temperatur kamar karena penambahan unsur paduan nikel yang merupakan penstabil austenite. Pada penelitian ini digunakan material *stainless steel* 316L merk Synthes, Switzerland sebagai acuan (*reference*) karena merupakan implan *stainless steel* 316L kelas premium. Adapun material yang akan di eksplorasi pada penelitian ini adalah implan SS 316L hasil dari *investment casting* oleh PT Pelopor Teknologi Implantindo, Mojokerto. Implan SS 316L yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada standar ASTM F138-13a.

Tabel 2.1 Komposisi kimia *stainless steel* implan quality [5]

| Element | Implan Quality (% wt) |
|-----------------|-----------------------|
| | ASTM F138-13a |
| C | 0.03 |
| Mn | 2.00 |
| P | 0.025 |
| S | 0.01 |
| Si | 0.75 |
| Cr ^A | 17.00 – 19.00 |
| Ni | 13.00-15.00 |
| Mo ^A | 2.25-3.00 |
| N | 0.10 |
| Cu | 0.50 |
| Fe | Balance |

Persyaratan komposisi harus memenuhi hal-hal berikut :

$$\%Cr + 3,3 \times \%Mo \geq 26,0$$

2.4 Investment Casting

Investment casting merupakan salah satu metode pengecoran. Bahan yang digunakan untuk pengecoran merupakan bahan habis pakai misalnya lilin (*wax*). Metode *investment casting* ini untuk produk dengan bentuk rumit dan diperlukan dimensi yang presisi. Metode ini biasa digunakan terutama untuk menghasilkan peralatan kedokteran maupun tulang buatan yang terbuat dari logam paduan misalnya paduan kobalt krom [3].

Tahap-tahap dari pengecoran ini terdiri atas :

1. Pembuatan pola
Pola dibuat sesuai dengan bentuk dan dimensi aslinya. Bahan pola dapat berupa lilin, resin maupun plastik.
2. Pembuatan sistem saluran
Sistem saluran pengecoran ini terdiri atas cawan tuang, saluran turun, pengalir, saluran masuk serta lubang angin dan penambah jika diperlukan. Bahan

yang digunakan untuk sistem saluran ini sama dengan bahan pola.

3. Penuangan logam cair

Sebelum dilakukan penuangan, pola dan sistem saluran ini dirangkai menjadi satu lalu dilapisi dengan gypsum atau keramik. Setelah pelapisan selesai, maka dilakukan pemanasan pada cetakan beserta sistem salurannya yang terbentuk agar pola lilinnya meleleh dan dihasilkan rongga cetak.

4. Pembongkaran

Pada proses berikutnya selaras dengan metode pengecoran secara umum. Pembongkaran ini dengan menghancurkan cetakan. [3]

2.5 Metode Penguatan Material

Penguatan material yang berdampak terhadap peningkatan sifat mekanik dapat terjadi berbagai cara, antara lain dengan menisme pengerasan regangan (*strain hardening*), fasa kedua, presipitasi, dispersi, dan penghalusan butir.

2.5.1 Pengerasan regang (*strain hardening*)

Penguatan ini melalui mekanisme pengerasan regangan dapat terjadi terhadap semua logam akibat proses deformasi plastis yang menyebabkan terjadinya peningkatan kerapatan dislokasi. Dislokasi yang semakin rapat ini mengakibatkan dislokasi itu sendiri semakin sulit bergerak sehingga dibutuhkan lebih banyak energi atau gaya untuk mendeformasi material [14].

2.5.2 Fasa Kedua

Penguatan atau pengerasan dapat terjadi melalui mekanisme fasa kedua karena timbulnya senyawa fasa paduan. Senyawa fasa yang terbentuk ini akan menghambat pergerakan dislokasi dan menaikkan kekuatan material [14].

2.5.3 Presipitasi

Pengerasan logam dapat juga ditingkatkan dengan proses presipitasi yaitu pengerasan melalui partikel endapan fasa yang halus dan menyebar. Pengerasan presipitasi ini biasa terjadi melalui perlakuan panas, *quenching* dan *aging* [14].

2.5.4 Dispersi

Penguatan logam tanpa pengaruh suhu overaging dapat dilakukan dengan metode dispersi. Partikel dispersi yang digunakan merupakan partikel yang tidak larut pada matriknya [14].

2.5.5 Penghalusan butir dan tekstur

Penguatan dengan cara penghalusan butir ini terjadi pada struktur butir. Pada penghalusan ini terjadi deformasi, saat dislokasi akan bergerak pada bidang slip dan berusaha mencapai permukaan luar. Karena orientasi setiap butir ini berbeda dengan yang lain, orientasi bidang slip pada butir-butir juga akan berbeda-beda. Batas butir yang banyak akan mengakibatkan gerakan dislokasi semakin sukar karena semakin banyak rintangan sehingga material menjadi semakin kuat. Butir yang semakin halus cenderung akan semakin memperbanyak batas butir [14].

Pada penelitian ini untuk meningkatkan sifat mekanik implan *stainless steel* 316L hasil *investment casting* dilakukan dengan menghaluskan butir kristal dengan dilakukan perlakuan panas berupa *thermal cycling* [15].

2.6 Grain Refinement Austenitic Stainless steel

Pada penelitian ini implan *stainless steel* 316L hasil *investment casting* diperbaiki sifat mekanik dengan mengecilkan ukuran butirannya. Baja tahan karat austenitik memiliki fasa austenite yang stabil pada temperatur kamar sehingga pada waktu pemanasan dan pendinginan tidak akan terjadi perubahan fasa. Oleh karena itu, penghalusan butiran hanya dapat dicapai dengan proses rekristalisasi. Proses pembentukan butiran baru dengan

rekristalisasi ini dapat dipicu dengan adanya tegangan sisa yang dihasilkan oleh proses *cold rolling* [10].

Cold rolling diterapkan untuk memberikan deformasi plastis melalui *strain hardening* sehingga akan banyak terdapat tegangan sisa pada material pada proses *cold roll*, keuletan material akan menurun seiring dengan perubahan bentuk butiran dan kenaikan kekuatan tarik [6]. Beberapa jenis mekanisme yang umum dilakukan untuk merubah butiran pada *austenitic stainless steel* adalah *Severe Plastic Deformation*, *Thermo-Mechanical Treatment*, dan *Thermal cycling* [9].

Tarun Nanda (2016) [19] melakukan penelitian dengan *cold rolling* diikuti dengan siklus termal berulang untuk menghasilkan ukuran butir yang halus. Parameter untuk melakukan *cold rolling*, suhu anil untuk *thermal cycling*, waktu penahanan selama setiap siklus dan jumlah siklus termal ditentukan melalui prosedur langkah-langkah secara sistematis yaitu material dilakukan *cold rolling* reduksi 70%. Selanjutnya dilakukan *thermal cycling* dengan suhu anil 700⁰C, 800⁰C, 900⁰C dengan waktu penahanan selama 35 detik dan siklus sebanyak empat kali. *Thermal cycling* yang dilakukan berulang mengakibatkan pengurangan ukuran butir yang sangat signifikan dari butiran awal berukuran 90-120 μm sebelum cold roll menjadi butiran baru dengan ukuran 800-1200 nm. Selain itu kekuatan tariknya meningkat dari 590 MPa ke 1220 MPa.

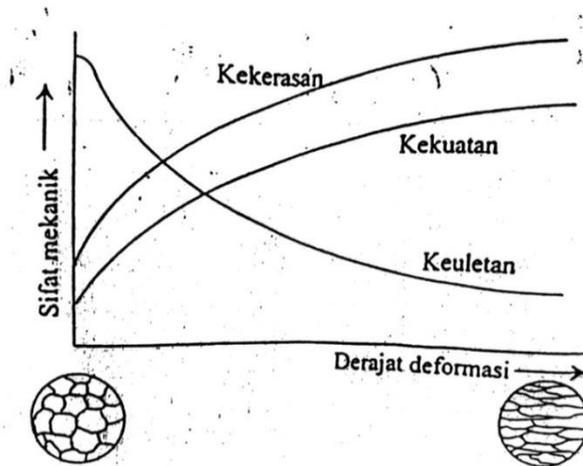
Efendi Mabruri (2012) [8] melakukan penelitian aplikasi *severe plastic deformation* (SPD) ini menggunakan *equal channel angular pressure* (ECAP) dan *heavy cold rolling* pada baja tahan karat austenitik 316L. ECAP pass 1 (single pass) dengan jumlah regangan 65% dapat meningkatkan kekuatan tarik baja tahan karat austenitik 316L menjadi 1.6 kali lipat, sedangkan *heavy cold rolling* dengan regangan 1.65 dapat meningkatkan kekuatan tarik menjadi 2.1 kali lipatnya. Pemanasan anil yang dilakukan setelah proses *cold rolling* akan menaikkan keuletan material dengan konsekuensi penurunan kekuatan tarik dari 1.055 MPa menjadi 655 MPa.

Saeful Hidayat (2012) [18] melakukan penelitian terhadap pengaruh proses rol dan perlakuan panas pada ingot baja tahan karat austenitik yang mengandung unsur Ti dan Y terhadap struktur mikro dan kekerasan.. Material hasil pengecoran diberi perlakuan cold roll dengan reduksi sebesar 10%. Selanjutnya material tersebut diberi perlakuan panas pada temperatur 850 C selama satu jam dengan gas pelindung argon. Bahan plat hasil pengerolan yang diberikan perlakuan panas mempunyai kekerasan lebih tinggi 12% dibanding dengan kekerasan ingot hasil peleburan. Analisa struktur mikro pada baja setelah perlakuan panas tetap menunjukkan struktur austenitik dendritik.

2.7 Pengaruh Pengerjaan Dingin Terhadap Sifat Mekanik

Pengerjaan dingin pada logam akan mengakibatkan perubahan butiran karena dislokasi melalui mekanisme slip dan twinning.. Dislokasi akan terjadi sesuai dengan arah pembebanan dan dalam hal ini pengerjaan dingin dilakukan dengan pembebanan tegak lurus arah batang logam sehingga butirannya akan berubah menjadi *elongated grain*. Pemberian beban saat *cold rolling* akan menyebabkan terjadinya *strain hardening* sehingga akan terjadi perubahan sifat mekanik dimana kekuatan dan kekeasan akan naik, sedangkan keuletannya relatif akan menurun [2].

Seiring dengan naiknya persentase reduksi atau naiknya derajat deformasi maka perbedaan laju *tensile strength* dan *yield strength* menjadi tidak lagi signifikan. Hal ini sangat diperhatikan dalam operasi pembentukan seperti *cold rolling* karena terjadinya patah atau fraktur pada saat proses *cold rolling* harus dihindari. Patah atau fraktur dapat terjadi ketika derajat reduksi yang diberikan sangat tinggi sehingga deformasi plastik tidak lagi terjadi [2].



Gambar 2.4 Pengaruh derajat deformasi terhadap sifat mekanik (kekuatan, keuletan, dan kekerasan) dan bentuk butiran [2]

2.7.1 Cold rolling

Cold rolling merupakan salah satu pengerolan yang dilakukan pada temperatur ruangan atau dibawah temperatur rekristalisasi. Perlakuan *Cold rolling* pada temperatur ruangan akan memerlukan energi yang besar karena besarnya tegangan yang harus diberikan pada material sebelum akhirnya deformasi plastik/permanen dapat terjadi. Beberapa jenis baja paduan dapat diberikan reduksi pengerolan bertahap sampai dengan 90%. Salah satunya adalah baja tahan karat asutenitik karena baja jenis ini memiliki fasa metastabil austenitik dengan struktur kristal FCC sehingga keuletannya sangat tinggi [8]. Deformasi yang cukup berarti dapat terjadi karena terjadinya slip pada sejumlah besar bidang slip, dan pada setiap bidang slip tersisa banyak dislokasi.

Proses pengerolan dingin akan menghasilkan kondisi permukaan benda kerja yang lebih baik atau lebih halus dibanding dengan baja yang diproses pengerolan panas. Perubahan sifat mekanik yang terjadi karena proses pengerolan baja tahan karat austenitik ternyata masih bisa dirubah dengan proses *thermal cycling*. Proses *thermal cycle* akan menaikkan keuletan baja tahan

karat austenitik yang tadinya turun karena proses *cold roll* dengan proses rekristalisasi butiran baru. Adanya butiran baru yang berbentuk bulat dan berukuran jauh lebih kecil dibanding butiran elongated grain dari proses cold roll akan menaikkan keuletan sekaligus mencegah penurunan kekuatan sesuai dengan formula Hall-Petch.

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{d}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

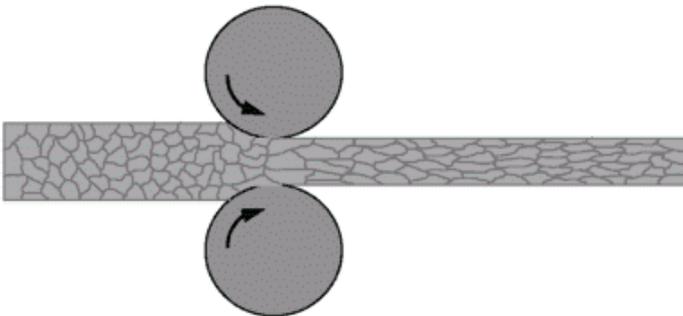
σ_y : Kekuatan yield

d : *Grain size*

k : Koefisien penguatan (konstanta spesifik pada setiap material)

σ_0 : Konstanta pada material untuk tegangan awal

Dapat dilihat bahwa adanya hubungan antara kekuatan luluh dengan ukuran butir. Ukuran butir dapat diatur melalui : laju pendinginan, deformasi plastis yang diikuti dengan perlakuan panas yang sesuai. Ketika ukuran butir akan semakin mengecil, kekuatan luluh akan meningkat [2]. Pada penelitian ini digunakan untuk memperhalus butiran pada *stainless steel* 316L dengan dilakukan *cold rolling* terlebih dahulu. Berikut skema dari pengerjaan *cold rolling* :



Gambar 2.5 Skema pengerjaan dingin (*cold rolling*) [7]

2.8 Perlakuan Panas

Perlakuan panas dapat didefinisikan sebagai kombinasi operasi pemanasan dan pendinginan terhadap logam atau paduan dalam keadaan padat dengan waktu tertentu yang dimaksudkan untuk memperoleh perubahan sifat mekanik tertentu. Langkah pertama dalam setiap proses laku panas adalah memanaskan logam ataupun paduan ke temperatur desainnya, lalu menahan beberapa saat temperatur itu dan mendinginkannya dengan laju pendinginan yang terkontrol. Umumnya, selama pemanasan dan pendinginan, ini akan terjadi perubahan struktur mikro, perubahan ukuran butiran, dan dapat juga terjadi perubahan fasa sehingga menyebabkan terjadinya perubahan sifat dari logam atau paduan tersebut [15].

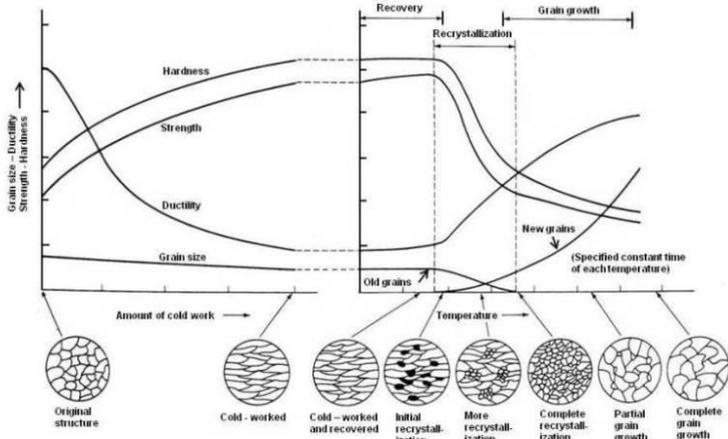
Proses perlakuan panas yang dilakukan pada penelitian ini bertujuan untuk memperhalus ukuran butiran dari baja tahan karat austenitik sehingga butiran dari proses *investment casting dan cold-rolling* dapat berubah menjadi bulat dengan ukuran butir nano atau sub-mikron setelah dilakukan proses *thermal cycle*. Baja tahan karat austenitik saat dipanaskan tidak akan mengalami perubahan fasa, sehingga proses perlakuan panas yang dilakukan bukan untuk merubah fasa namun dengan mekanisme rekristalisasi butiran baru untuk mencapai sifat mekanik yang paling optimal [15].

2.9 Thermal cycling

Jika baja yang mengalami pengerjaan dingin maka kekuatan dan kekerasannya sedangkan keuletannya akan menurun. Pada saat pengerjaan dingin akan menyebabkan banyaknya dislokasi, sehingga pergerakan dislokasi akan semakin sulit. Tegangan sisa (*residual stress*) ini mengakibatkan terjadinya kenaikan kekerasan dan kekuatan tarik yang menyebabkan material rentan patah jika material akan dideformasi lebih lanjut dikarenakan keuletannya menurun [15]. Maka jika logam dipanaskan kembali atom-atom akan menerima sejumlah energi panas yang didapatkan untuk bergerak sejumlah kristal lebih akan bebas cacat dan bebas tegangan sisa [2].

2.9.1 Recrystallization

Baja tahan karat austenitik yang diberi perlakuan pengerjaan dingin akan mengalami rekristalisasi saat dipanaskan kembali. Jika dilakukan pendinginan cepat, maka butiran yang dihasilkan semakin halus, namun hal ini tergantung dari ketebalan material. Untuk benda yang relatif tipis, maka pendinginan udara dianggap sudah cukup cepat untuk memicu terjadinya penghalusan butiran [8]. Sebelum terjadinya rekristalisasi terlebih dahulu terjadi *recovery*, lepasnya tegangan sisa dalam kristal. Pada tahap *recovery* belum ada perubahan struktur kristal, jadi belum ada perubahan sifat dari material. Perubahan sifat mulai terjadi pada saat memasuki rekristalisasi.



Schematic Representation of the Cold-worked and Anneal Cycle showing the effects on Properties and Microstructure

Gambar 2.6 Schematic Representation Of The Cold Work Anneal Cycle [2]

Pada gambar diatas menunjukkan perubahan yang terjadi bila logam terjadi deformasi plastis saat proses *cold work* lalu dipanaskan pada suatu temperatur kemudian ditahan selama waktu tertentu lalu didinginkan kembali dengan lambat. Proses ini bukan hanya tergantung pada temperatur pemanasan saja, tetapi juga dengan waktu penahanan. Hasil yang sama dapat diperoleh

dari temperatur yang lebih tinggi dan waktu yang lebih singkat [2].

Pada proses rekristalisasi adalah proses pemanasan melalui pengintian dan pertumbuhan butir baru. Pemanasan kembali hingga ke temperatur lebih tinggi akan menyebabkan munculnya kristal baru dari kristal yang terdistorsi, dengan struktur lattice komposisi kimia yang sama seperti pada saat sebelum pengerjaan dingin. Kecuali kristal dendritik, pada kristal yang tadinya dendritik, setelah pengerjaan dingin dan pemanasan kembali bentuk dendrit akan hilang. Kristal baru ini mula-mula muncul pada bagian kristal yang mengalami distorsi paling hebat, yaitu pada batas butir dan bidang slip [2]. Mula-mula beberapa atom dari kristal yang terdistorsi akan membentuk inti kristal baru dengan susunan atom yang tidak terdistorsi. Kemudian atom lain dari kristal lama mulai bergabung dalam susunan kristal baru, kristal tumbuh menjadi besar. Bila semua atom kristal lama seluruhnya habis bergabung dalam kristal baru maka rekristalisasi sudah selesai [2]. Setelah terjadi adanya butiran baru maka butiran tersebut jika pemanasan tetap terjadi maka butiran akan mengalami *Grain Growth*. Pertumbuhan butir yang berpengaruh terhadap temperatur pemanasannya. Butir kristal yang besar mempunyai *free energy* yang lebih rendah, karenanya butir kristal cenderung untuk tumbuh lebih besar hingga mencapai ukuran maksimum untuk temperatur tersebut [2].

Setiap siklus termal ini menghasilkan penyebaran tegangan sisa yang tidak teratur sehingga proses rekristalisasi lebih mudah terjadi pada area yang memiliki tegangan sisa dibandingkan pertumbuhan butiran yang ada. Setelah beberapa kali siklus termal, rekristalisasi akan semakin meningkat dan struktur mikro dari deformasi dingin akan berkurang [19]. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tingkat deformasi dingin, maka ukuran butiran rekristalisasi akan semakin kecil karena makin banyaknya daerah yang mengalami nukleasi akibat adanya tegangan sisa yang lebih tinggi di dalam material [10].

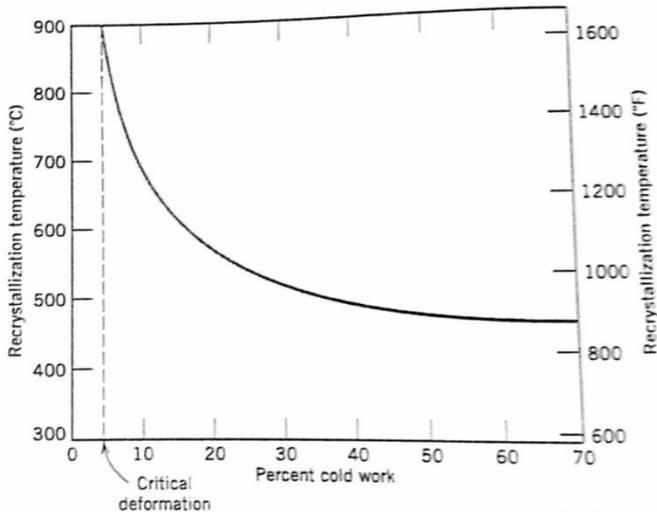
Thermal cycling merupakan perlakuan panas yang dilakukan pada material dimana material diberi temperatur yang tinggi kemudian diturunkan dengan pemberian temperatur rendah. Setelah itu dilakukan kembali perlakuan awal lagi dengan pemberian temperatur yang tinggi dan pendinginan, sampai beberapa kali perlakuan dan membentuk sebuah siklus [15]. Pada penelitian ini dibutuhkan proses annealing berulang-ulang pada material hasil *cold rolling* untuk mengurangi ukuran butir dan memperhalus butir.

2.10 Hubungan Antara *Cold Working* dan Temperatur Rekrystalisasi

Pada saat *cold working*, kenaikan persentase reduksi akan menyebabkan penumpukan dislokasi yang makin banyak pada batas butir sehingga tegangan sisa di dalam material makin meningkat. Semakin tinggi tegangan sisa maka akan makin mudah bagi material ini untuk mengalami rekrystalisasi butiran baru. Penelitian Tarun Nanda (2016) menunjukkan bahwa diperlukan tingkat deformasi minimal sebesar 50% agar rekrystalisasi butiran baru dapat terinisiasi. Temperatur yang diperlukan untuk memulai rekrystalisasi ini tergantung dari besaran persentase *cold working*. Makin tinggi persentase *cold working*, maka temperatur rekrystalisasi yang diperlukan akan makin turun [20]. Pada penelitian ini dilakukan *cold rolling* reduksi 70%. Spesimen hasil *cold rolling* reduksi 70% ini di *thermal cycling* pada suhu 700⁰C, 800⁰C, 900⁰C. Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian tersebut kondisi optimum dimana terjadi seluruh rekrystalisasi dilakukan proses *thermal cycling* dengan suhu 900⁰C, dengan waktu penahanan 35 detik sebanyak empat siklus bahwa butiran pada AISI 316L berubah menjadi lebih halus dengan ukuran 90-120 μm .

Pada grafik dibawah menjelaskan bahwa temperatur rekrystalisasi selain bergantung pada jenis logamnya, juga tergantung pada derajat deformasi yang dialami sebelum

pemanasan. Semakin tinggi derajat deformasi akan semakin rendah temperatur rekristalisasinya.



Gambar 2.7 *The variation of recrystallization temperature with percent cold work for iron [2]*

2.11 Hubungan Antara Waktu Tahan Pemanasan dan Ketebalan Plat

Mengingat bahwa perubahan yang terjadi selama pemanasan tergantung pada temperatur dan waktu, maka perubahan yang sama dapat terjadi pada temperatur pemanasan yang lebih rendah (tetapi sudah dalam daerah temperatur yang dianjurkan) dan waktu tahan yang lebih lama. Sebaliknya, jika waktu tahannya dipersingkat maka akan dibutuhkan temperatur yang lebih tinggi untuk menginisiasi proses rekristalisasi butiran baru.

Unsur paduan seperti misalnya chrom, molybden, wolfram, titanium dan vanadium akan menyebabkan karbida menjadi lebih stabil sehingga lebih sulit terurai. Hal ini menyebabkan baja paduan yang mengandung unsur-unsur tersebut akan memerlukan

temperatur inisiasi rekristalisasi yang lebih tinggi dan waktu tahan yang lebih panjang,

Ukuran benda kerja juga ikut berpengaruh karena berhubungan dengan *hardenability* dari baja paduan tersebut. Pada umumnya, benda kerja yang lebih besar akan memerlukan waktu tahan yang lebih panjang agar terjadi homogenisasi temperatur. Beberapa pedoman dalam menentukan waktu tahan yaitu baja perkakas kadar chrom yang tinggi sebesar ½ menit per mm tebal [2]. Akan tetapi pada penelitian Tarun Nanda (2016) mengatakan spesimen yang dilakukan cold rolling pengurangan ketebalan sebesar 70% dilakukan perlakuan annealing pada temperatur berbeda dan waktu penahanan pada *furnace*. Hasil penelitian menunjukkan ada hubungan yang dari perhitungan nilai fraksi rekristalisasi dihitung dengan mengambil nilai kekerasan dengan metode Vickers Hardness. Hubungan dari fraksi rekristalisasi (X) untuk mengetahui waktu annealing (t) [10].

$$X = \frac{H_0 - H_t}{H_0 - H_a} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

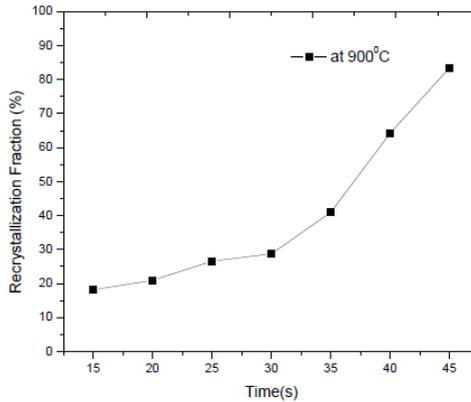
nilai X : Fraksi Rekristalisasi

H_0 : Kekerasan dari struktur saat *cold deformed*

H_a : Kekerasan dari *solution annealed* material

H_t : Kekerasan dari material annealed dalam waktu

Hasil dari penelitian ini menunjukkan volume sebenarnya dari fraksi rekristalisasi pada material sesuai dengan perbedaan waktu annealing dan dilakukan pada temperatur pemanasan yang konstan sebesar 900⁰C. Berikut grafik yang didapatkan :



Gambar 2.8 Fraksi Rekrystalisasi dengan waktu *annealing*

Dilihat dari grafik diatas bahwa 50% fraksi rekrystalisasi selesai terjadi pada waktu *annealing* 35 detik. Sehingga penelitian ini proses thermal cycle ini menyebabkan adanya beberapa butiran yang sudah terekristalisasi dan sebagian masih adanya dislokasi akibat cold work. Pada grafik tersebut didapatkan bahwa siklus pertama saat thermal cycle dengan waktu 35 detik sudah mengalami 50% fraksi rekrystalisasi. Sehingga penelitian ini dipilih waktu anil selama 35 detik.

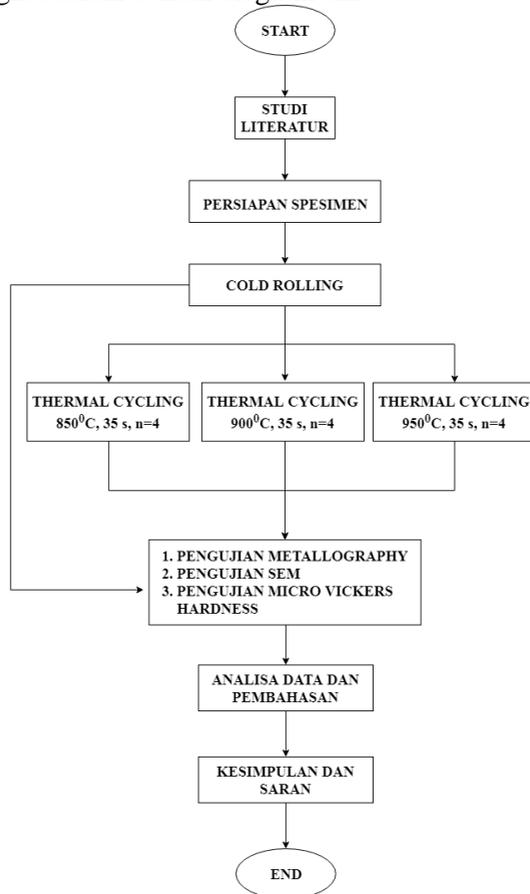
Karena hanya permukaan benda kerja saja yang berhubungan langsung dengan media pendingin, maka ratio antara luas permukaan dengan berat benda kerja akan menjadi faktor penting yang ikut menentukan laju pendinginan benda kerja. Luas permukaan ini merupakan fungsi dari bentuk geometris dan ukuran benda kerja. Ratio yang besar akan menjadikan laju pendinginan benda kerja menjadi tinggi sehingga benda kerja berbentuk plat akan lebih cepat menjadi dingin daripada yang berbentuk silindris [2].

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PERCOBAAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah dalam melakukan penelitian ini digambarkan secara singkat dalam bentuk diagram alir.

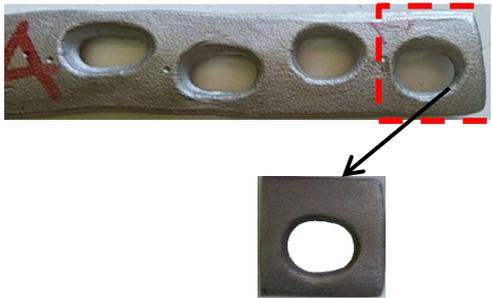


Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

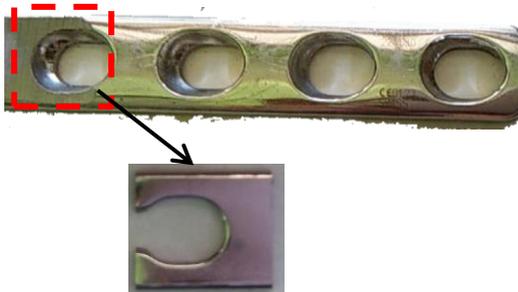
3.2 Sampel Material *Stainless steel 316L*

3.2.1 Sampel material untuk pengujian metallography dan pengujian SEM

Berikut ini adalah sampel material pengujian yang akan dilakukan dari material hasil *investment casting Stainless steel 316L* dan *Synthes Stainless steel 316L*. Pada pengambilan data awal, material yang akan dilakukan pengujian sebagai berikut.



Gambar 3.2 Implant *Stainless steel 316L* hasil *investment casting*.



Gambar 3.3 Implant *Stainless steel 316L* Synthes, Switzerland tipe premium sebagai referensi

3.2.2 Sampel material untuk *Cold rolling*

Berikut ini adalah sampel material pengujian yang akan dilakukan. Pada gambar dibawah ini menunjukkan material yang akan dilakukan *cold rolling*. Ukuran spesimen yaitu sebesar 93 mm x 16.7 mm x 4.3 mm. Material pada sampel berikut adalah *Stainless steel AISI 316L* hasil *investment casting*.



Gambar 3.4 Sampel material untuk *Cold rolling*

Setelah dilakukan pengerolan dingin dengan reduksi 50%, maka ukuran yang didapatkan sebesar 164,04 mm x 18,34 mm x 2,05 mm.



Gambar 3.5 Sampel material setelah *cold rolling* dengan reduksi 50%

3.3 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain sebagai berikut :

1. Penggaris
2. Jangka Sorong
3. Kamera Digital
4. Mesin Wire Cut
5. Spektrometer
6. Mesin *Grinding* dan *Polishing*



Gambar 3.6 Grinder – Polisher GRIPO 300-1V

7. Mesin Rolling Mill

8. Tungku Pemanasan
9. *Olympus Stereo Microscope*



Gambar 3.7 *Olympus Stereo Microscope*

10. Scanning Electron Microscope (SEM)

3.4 Prosedur *Thermal cycling*

3.4.1 *Thermal cycling*

Setelah dilakukan proses *Cold rolling* dengan mereduksi ketebalan sampai 50 persen. Selanjutnya proses *Thermal cycling*, setiap satu siklus dengan pemanasan masing-masing 850°C , 900°C , dan 950°C selama 35 detik dan dilakukan pendinginan di udara sampai temperatur kamar. *Thermal cycling* setiap suhu pemanasan dilakukan sebanyak empat siklus. *Thermal cycling* digunakan agar terjadi pertumbuhan butir dengan ukuran yang kecil, sehingga akan mempengaruhi sifat mekanik dari material.

3.5 Langkah-langkah Penelitian

Dalam melaksanakan studi eksperimen ini, serangkaian melakukan eksperimen ini menjadi beberapa tahapan agar penelitian ini berjalan dengan baik dan sistematis. Adapun langkah-langkah yang dilakukan untuk melakukan eksperimen ini adalah sebagai berikut :

3.5.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mengumpulkan teori proses dan eksperimen yang berhubungan dengan Mekanisme *Ultra Fine or Nano Grain Size Microstructure*, *Cold rolling*, dan *Thermal cycling* yang didapatkan dari berbagai buku, tesis, dan

jurnal. Studi literatur dilakukan agar penulis menambah wawasan mengenai eksperimen yang akan dilaksanakan.

3.5.2 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Pada eksperimen ini dilakukan pada material *Stainless steel* 316L hasil dari proses investment casting. Eksperimen ini bertujuan agar meningkatkan sifat mekanik dengan proses *Thermal cycling*. Perumusan masalah ini disertai dengan penetapan batasan masalah untuk memperjelas lingkup penelitian.

3.5.3 Pengambilan Data Awal

Pengambilan data awal ini sebagai acuan dilakukannya eksperimen. Data awal ini didapatkan dengan mengetahui microstructure dan kekerasan dari material *Stainless steel* AISI 316L hasil investment casting sebelum dilakukannya proses *Thermal cycling* dan *Stainless steel* AISI 316L Synthes sebagai acuan (*reference*).

3.5.4 Pengujian Metallography

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dari *Stainless steel* AISI 316L hasil investment casting dan *Stainless steel* AISI 316L Synthes. Struktur mikro diamati agar mengetahui ukuran butir pada material *Stainless steel* AISI 316L hasil investment casting dan *Stainless steel* AISI 316L Synthes sebelum dilakukan eksperimen. Pengujian *Metallography* juga dilakukan kembali setelah eksperimen. Pengujian *Metallography* ini diawali dengan beberapa persiapan antara lain :

1. Spesimen harus dipotong dengan ukuran , dengan menggunakan mesin Wire Cut.
2. *Mounting* – pada proses ini sampel diberikan resin dan hardener.
3. *Grinding* – pada proses ini, sampel digosok dengan mesin grinding, dengan pertama-tama dengan grit paling kasar yaitu 80 dan setelah itu menggunakan grit yang lebih halus secara bertahap yaitu 150, 320, 500, 800, 1000, dan 2000. Penggosokan dilakukan dengan meletakkan permukaan sampel yang ingin digosok pada permukaan kertas gosok yang diawali

dengan paling kasar pada arah sembarang sampai terjadi adanya goresan berbentuk garis-garis yang sejajar dan merata. Setelah itu spesimen dicuci dengan air kemudian kembali digosok dengan mengubah arah peletakan sebesar 90^0 dari awal peletakan, sehingga goresan baru akan terbentuk.

4. *Polishing* – proses *polishing* dilakukan dengan cara sampel ditekan pada permukaan piringan yang dilapisi kain penggosok yang telah ditambahi *metal polish cream*. *Polishing* dilakukan sampai permukaan sampel mengkilap dan tidak ada goresan bekas *grinding*.
5. *Etching* – proses *etching* dilakukan dengan dua cara yaitu *electrolytic etching* dan larutan glyceresia. Proses *electrolytic etching* dengan menggunakan asam oksalat ($H_2C_2O_4$) sebanyak 10 g dan Aquades sebanyak 100 ml diaduk hingga homogen, dengan waktu pengetsaan selama 3-5 menit. Sedangkan untuk larutan glyceresia ini berupa asam klorida (HCl) 20 ml, asam nitrat (HNO_3) 10 ml, dan glycerol 20 ml diaduk hingga homogen, dengan waktu pengetsaan selama 2 menit. Seluruh spesimen dicoba dengan kedua etsa tersebut. Setelah itu sampel akan dilihat dengan *Olympus Stereo Microscope* dengan pembesaran 100 kali sampai 500 kali untuk menganalisa struktur mikro kedua sampel.

3.5.5 Pengujian *Scanning Electron Macroscopic*

Dalam pengujian SEM ini akan didapatkan berupa topography, morphology, komposisi, dan info kristallography. Elektron berinteraksi dengan atom yang membentuk sampel dan menghasilkan sinyal yang berisi informasi tentang topografi permukaan sampel, komposisi, dan sifat lain seperti koonduktivitas listrik pada material. SEM dapat menghasilkan gambar beresolusi tinggi dari permukaan sampel nanti.

3.5.6 Proses *Cold rolling*

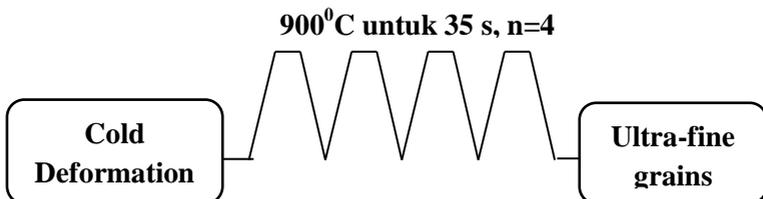
Pengerolan dingin merupakan proses perubahan bentuk logam secara plastis dengan melewatkannya diantara rol. Pengerolan dingin dilakukan dibawah temperatur rekristalisasi. Tujuan dari pengerolan dingin ini adalah memperkecil tebal sampel dengan direduksikan sebesar 50%, yang selanjutnya akan dilakukan proses *Thermal cycling*.



Gambar 3.8 Mesin *Cold rolling*.

3.5.7 Proses *Thermal cycling*

Setelah spesimen diproses *Cold rolling*, spesimen di potong dengan ukuran 1 cm x 1 cm untuk dilakukan proses *Thermal cycling*. Pada sampel akan dipotong sepanjang 5 mm, setiap sampel dipanaskan dengan temperature yang berbeda-beda yaitu 850⁰C, 900⁰C, 950⁰C selama 35 s. Setelah itu pendinginan dilakukan di udara sampai suhu sama dengan temperatur ruang.



Gambar 3.9 Skema *thermal cycling*

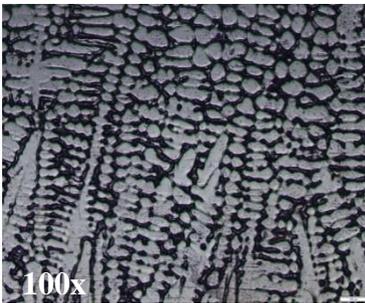
3.5.8 Pengujian Mikro Vickers Hardness

Mikro Vickers Hardness ini sangat penting pada indenter dengan beban uji 1 hingga 1000 gram-force dan digunakan untuk mengukur kekerasan fasa tertentu, partikel yang kecil dan material brittle. *Vickers Hardness Number* diperoleh dengan membagi beban yang digunakan dan luasan area yang terkena indentasi. Area indentasi ini ditentukan oleh jarak rata-rata antara dua diagonal yang terkena indentasi. Pada penelitian ini digunakan beban rendah sebesar HV 1 (9,805 N).

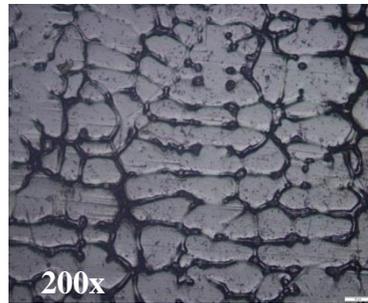
3.6 Hasil Data Awal

3.6.1 Data awal pengujian metalografi

Pada pengujian awal, dilakukan dengan melihat struktur mikro pada *stainless steel 316L* hasil investment casting dan material pengacu yaitu *stainless steel 316L* merk Synthes. Berikut hasil dari pengujian awal.



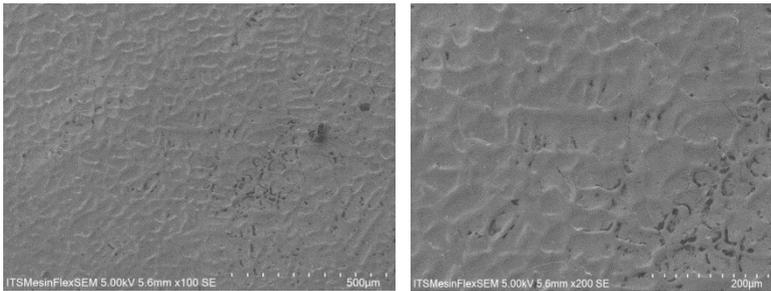
(a)



(b)

Gambar 3.10 Struktur mikro pada *stainless steel 316L* hasil *investment casting* : a) Perbesaran 100x dan b) Perbesaran 200x

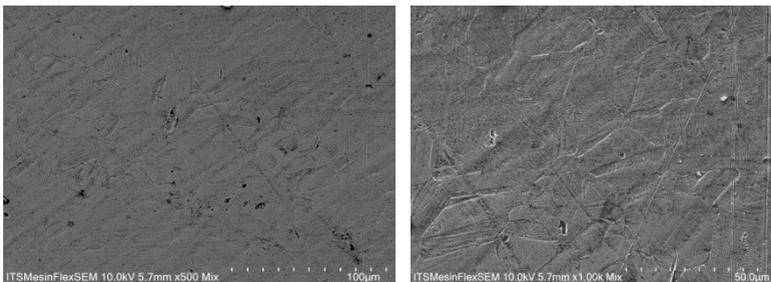
Hasil dari pengujian sampel material dengan menggunakan SEM, sebagai berikut :



(a)

(b)

Gambar 3.11 Hasil struktur mikro *stainless steel* AISI 316L hasil investment casting : a) 100x dan b) 200x



(a)

(b)

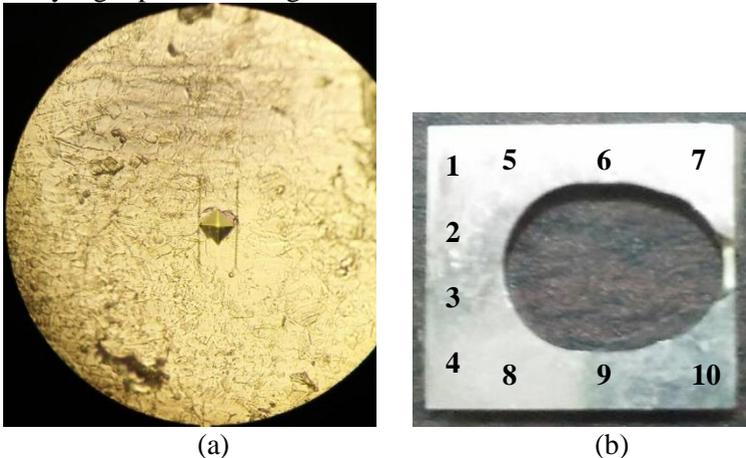
Gambar 3.12 Hasil struktur mikro *stainless steel* AISI 316L Synthes : a) Perbesaran 500x dan b) Perbesaran 1000x.

Dari hasil yang diperoleh pada pengujian metallography. *Stainless steel* 316L hasil invesment memiliki ukuran butir 290,36 μm . Sedangkan *stainless steel* 316L merk Synthes memiliki ukuran butir 28,144 μm . Hal ini menunjukkan bahwa *stainless steel* 316L hasil investment casting lebih besar dari *stainless steel* 316L merk Synthes. Sehingga pada penelitian ini untuk memperkecil ukuran butir *stainless steel* 316L hasil invesment

casting agar memadai *stainless steel* 316L merk Synthes dilakukan *cold rolling* dengan dilanjutkan proses *thermal cycling*, agar memperoleh hasil ukuran yang sama dengan *stainless steel* 316L merk Synthes.

3.6.2 Data Awal Pengujian Kekerasan

Pada pengambilan data awal pada *stainless steel* 316L hasil investment casting dan *stainless steel* 316L merk Synthes ini bertujuan agar mengetahui kekerasan awal sebelum dilakukan *thermal cycling*, diberikan pembebanan sebesar HV 1 (9,804 N). Data yang diperoleh sebagai berikut :



Gambar 3.13 (a) Hasil indentasi *stainless steel* 316L merk Synthes dan (b) Posisi Indentasi Pada Uji Microhardness *stainless steel* 316L merk Synthes

Tabel 3.1 Data awal hasil pengujian kekerasan

| Material | Titik | Kekerasan (HV) | Rata – rata kekerasan (HV) |
|--|--------------|-----------------------|-----------------------------------|
| <i>Stainless steel</i> AISI 316L produk Synthes | 1 | 551 | 548,7 |
| | 2 | 562 | |
| | 3 | 512 | |
| | 4 | 559 | |
| | 5 | 545 | |
| | 6 | 542 | |
| | 7 | 541 | |
| | 8 | 548 | |
| | 9 | 566 | |
| | 10 | 561 | |

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah *stainless steel 316L* hasil *investment casting* yang telah diberi perlakuan *cold rolling* dengan reduksi 50%. Proses *thermal cycling* pada temperatur yang berbeda-beda bertujuan untuk mencari temperatur rekristalisasi ideal dimana butiran baru dengan ukuran yang lebih kecil dibandingkan dengan butiran awal baik *investment casting* maupun setelah *cold rolling*. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini meliputi pengujian komposisi kimia untuk mengetahui apakah sudah sesuai standar, pengujian microhardness untuk mengetahui sifat mekaniknya, dan pengamatan struktur mikro melalui teknik metalografi.

4.1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan alat spektrometer SPECTROMAXx arc spark OES metal analyzer benchtop dari Ametex, Jerman milik PT. Pelopor Teknologi Implantindo. Komposisi kimia standar biomaterial mengacu pada ASTM F138-13a. Hasil pengujian komposisi kimia ditunjukkan pada lampiran *Stainless steel 316L* dan tabel 4.1

Tabel 4.1 Komposisi Kimia Hasil Uji *Spectrometer*

| Unsur | Komposisi kimia (% wt) | |
|-------|--|--------------------------------|
| | ASTM F138-13a (untuk 316L implant) | <i>Stainless steel</i> 316L |
| C | 0.03 | 0.0102 |
| Mn | 2.00 | 0.909 |
| P | 0.025 | 0.023 |
| S | 0.01 | 0.0045 |
| Cr | 17.00-19.00 | 15.79 |
| Ni | 13.00-15.00 | 13.51 |
| Mo | 2.25-3.00 | 3.71 |
| N | 0.1 | 0.124 |
| Cu | 0.5 | 0.118 |
| Fe | Balance | 65.1 |

Didapatkan dari hasil uji komposisi kimia dari *Stainless steel* 316L masih dibawah standar biomaterial dengan standar ASTM F138-13a dengan kadar kromium dibawah 17wt%. Hal ini berpengaruh ke sifat korosif dari *stainless steel* implant karena kromium adalah unsur unutup meminimalkan *pitting corrosion* akan terjadi, meskipun juga tergantung dari individu setiap orang.

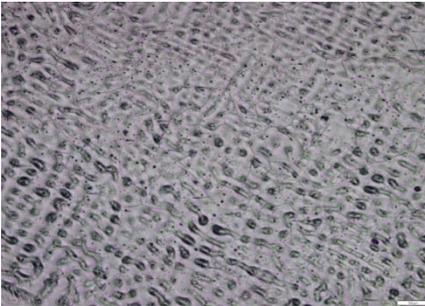
4.2 Hasil Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik olympus. Pengamatan struktur mikro ini bertujuan untuk melihat bentuk butiran dan ukuran butiran pada spesimen *stainless steel* 316L. Persiapan spesimen untuk struktur mikro dilakukan pada 4 spesimen yaitu pada spesimen hasil *cold rolling* reduksi 50%, spesimen hasil *cold rolling-thermal cyling* dengan pemanasan suhu 850⁰C, 900⁰C, dan 950⁰C. Pengambilan gambar struktur mikro dilakukan dengan perbesaran 100x, 200x, dan 500x. Pengambilan gambar struktur mikro juga dilakukan pada *Scanning Electron Microscope* untuk memperjelas batas butir pada setiap setiap spesimen. Berikut hasil

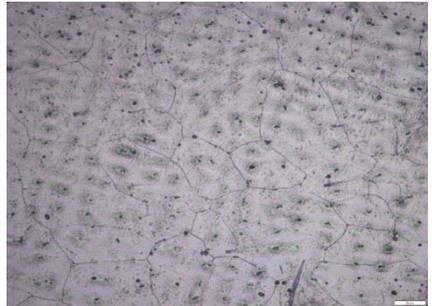
dari struktur mikro pada masing-masing spesimen yang telah dipersiapkan.

4.2.1 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Pada Spesimen Hasil *Cold rolling*

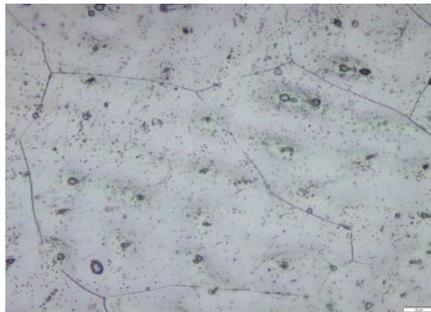
Stainless steel 316L hasil investment casting dilakukan *cold rolling* dengan reduksi sebesar 50%. Pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa struktur mikro sudah tidak merupakan dendritik, akan tetapi struktur mikro dari spesimen hasil *cold rolling* ini mengikuti arah saat dilakukan rolling.



(a)



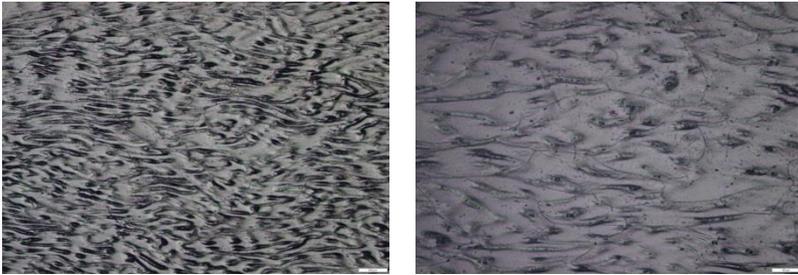
(b)



(c)

Gambar 4.1 Mikrostruktur Pada Spesimen *Cold rolling* : a) Perbesaran 100x, b) Perbesaran 200x dan c) Perbesaran 500x

Pengambilan mikrostruktur juga diambil dari sisi samping pada spesimen agar diketahui bentuk butir, berikut hasil metallographynya :

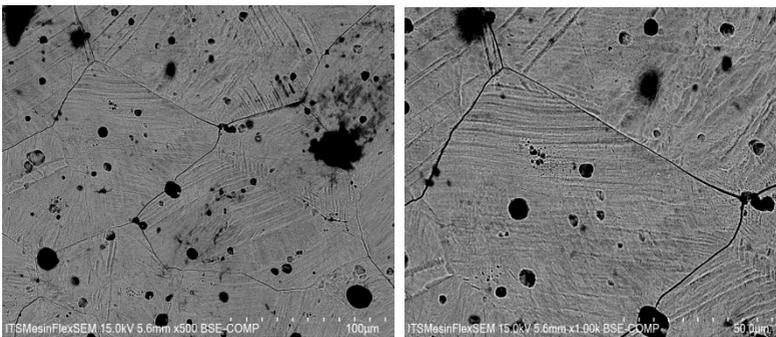


(a)

(b)

ambar 4.2 Mikrostruktur pada *stainless steel* 316L : a) Perbesaran 100x dan b) Perbesaran 200x

Pengambilan gambar mikrostruktur juga dilakukan pada *Scanning Electron Microscope*. Berikut hasil dari *Scanning Electron Microscope* :



(a)

(b)

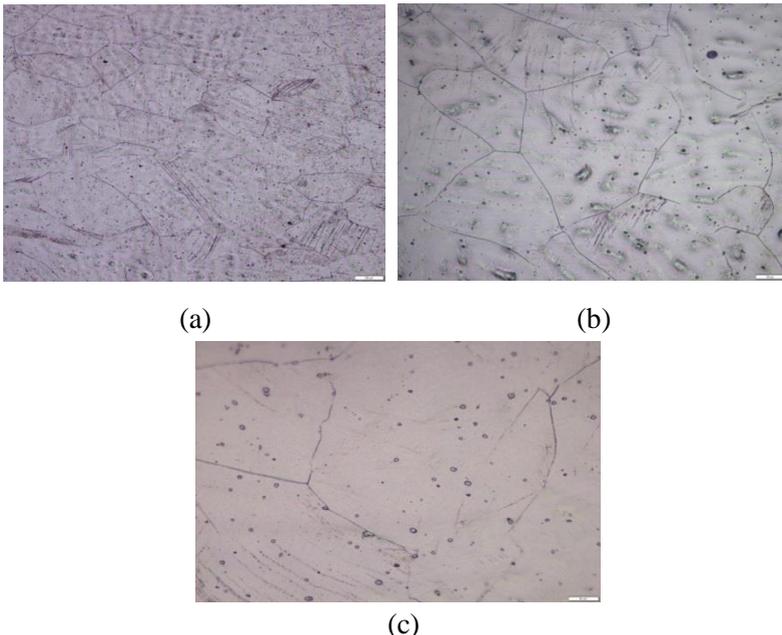
Gambar 4.3 Mikrostruktur pada *stainless steel* 316L dengan perbesaran 500x dan 1000x

Dari hasil pengamatan pada 4.1 dan 4.2 bahwa didapatkan struktur mikro pada *stainless steel* 316L yang sudah dilakukan *cold rolling* berbentuk *elongated grain* atau membujur

sesuai dengan arah saat *cold rolling*. Ukuran butir dari hasil *cold rolling* sebesar 116,42 μm . Proses *cold rolling* akan menyebabkan adanya tegangan sisa pada spesimen. Tegangan sisa ini akan mempengaruhi rekristalisasi inti baru pada batas butir yang memiliki banyak dislokasi saat dilakukan *thermal cycling*.

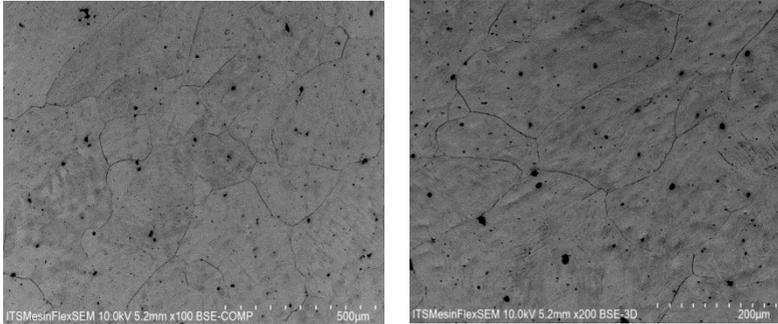
4.2.2 Hasil Pengamatan Struktur Mikro pada Spesimen *Thermal cycle* suhu 850⁰C

Spesimen hasil *cold rolling* dipotong dengan wire cut dengan ukuran 28,28 mm x 18,76 mm x 2 mm untuk dilakukan *thermal cycle* pada suhu 850⁰C, dengan waktu penahanan 35 detik yang diulang sebanyak 4 kali (4 siklus). Setelah dilakukan *thermal cycle*, dilakukan pendinginan dengan udara sampai temperatur kamar.



Gambar 4.4 Mikrostruktur pada *Stainless steel thermal cycle* 850⁰C perbesaran (a) 100x, (b) 200x, dan (c) 500x

Pengambilan gambar mikrostruktur juga dilakukan pada *Scanning Electron Microscope*. Berikut hasil dari *Scanning Electron Microscope* :



(a)

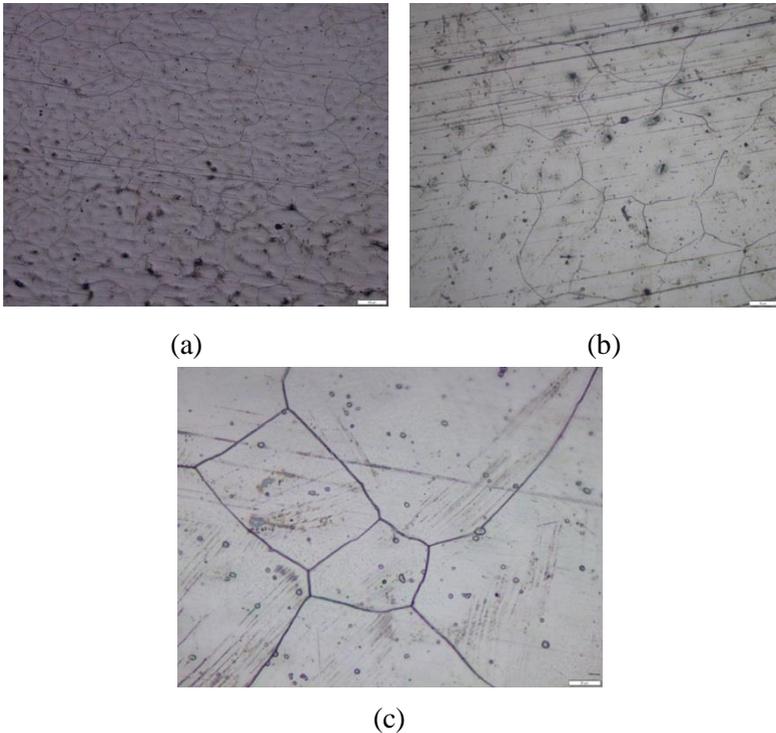
(b)

Gambar 4.5 Mikrostruktur *Stainless steel* 316L *thermal cycle* 850⁰C perbesaran (a) 100x dan (b) 200x

Dari hasil pengamatan pada gambar 4.2 dan 4.3 didapatkan spesimen hasil *thermal cycle* pada suhu 850⁰C memiliki ukuran butir sebesar 132,17 µm. Jika dibandingkan dengan hasil *cold rolling* dengan ukuran 116,42 µm, ukuran butir pada *thermal cycle* 850⁰C berbeda dari *cold rolling* tetapi tidak terpaut jauh, karena masih terpaut pada standar deviasi yang ada. Jika dilihat pada batas butir di spesimen *thermal cycle* 850⁰C juga belum terjadi rekristalisasi.

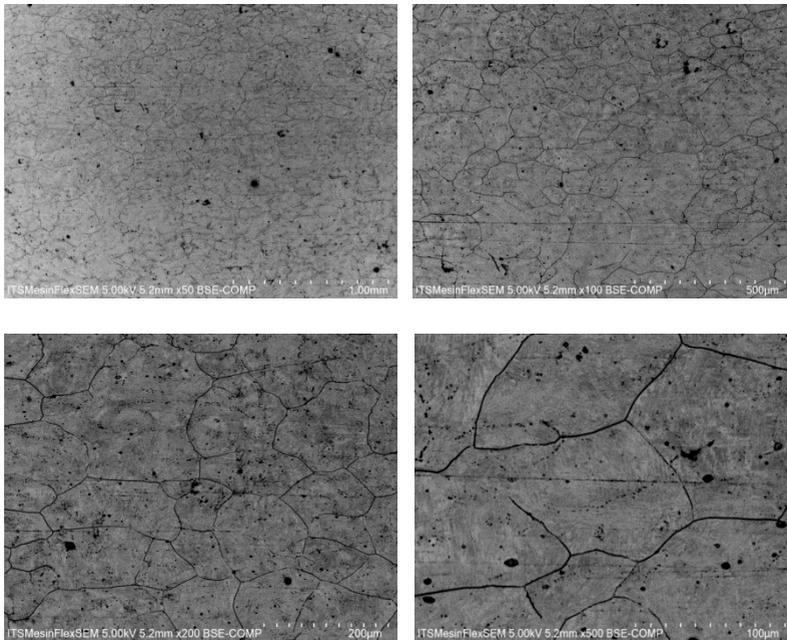
4.2.3 Hasil Pengamatan Struktur Mikro pada Spesimen *Thermal cycle* suhu 900⁰C

Spesimen hasil *cold rolling* dilakukan juga *thermal cycle* pada suhu 900⁰C dengan waktu penahanan 35 detik dan diulang sebanyak 4 kali (4 siklus). Setiap siklus pendinginan dilakukan di udara sampai spesimen dengan temperatur kamar.



Gambar 4.6 Mikrostruktur *stainless steel 316L thermal cycle* 900°C perbesaran (a) 100x, (b) 200x, dan (c) 500x

Pengambilan gambar mikrostruktur juga dilakukan dengan Scanning Electron Microscope. Berikut gambar mikrostruktur spesimen dengan perlakuan *thermal cycle* 900°C :



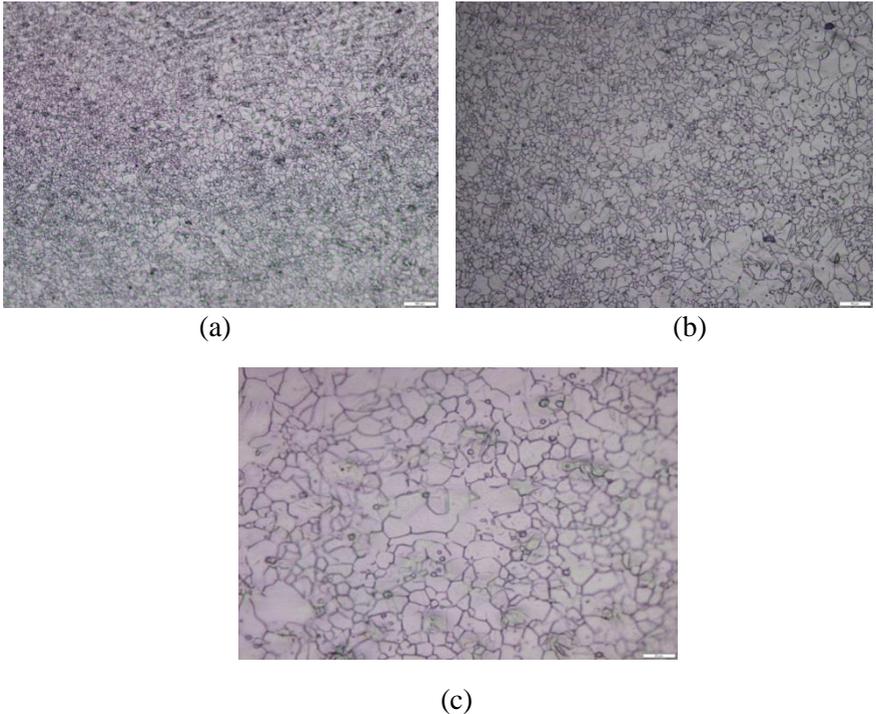
Gambar 4.7 Mikrostruktur *stainless steel* 316L *thermal cycle* 900⁰C

Dari gambar mikrostruktur yang didapatkan bahwa spesimen *thermal cycle* pada suhu 900⁰C memiliki bentuk butir yang angular dan bulat. Dilihat secara mikro spesimen *thermal cycle* pada suhu 900⁰C memiliki ukuran butir sebesar 95,029 µm. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran butir tidak terpaut jauh dengan spesimen hasil *thermal cycle* 850⁰C. Dipastikan bahwa pada *thermal cycle* juga tidak ada muncul rekristalisasi.

4.2.4 Hasil Pengamatan Struktur Mikro pada Spesimen *Thermal cycle* suhu 950⁰C

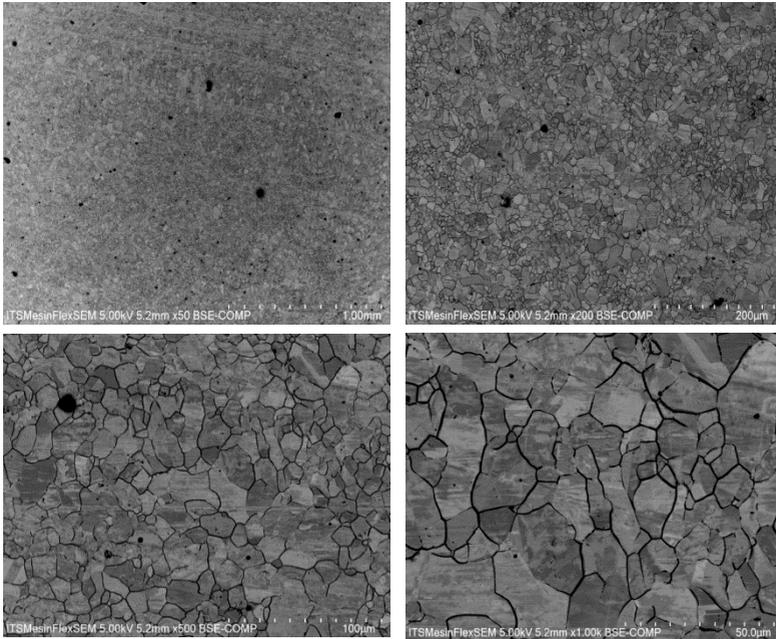
Spesimen hasil coll rolling diberikan *thermal cycle* dengan suhu 950⁰C, waktu penahanan 35 detik, dan dilakukan diulang sebanyak 4 kali (4 siklus). Setiap siklus dilakukan

pendinginan pada udara, sampai spesimen pada temperatur kamar.



Gambar 4.8 Mikrostruktur *Stainless steel 316L thermal cycle 950⁰C* perbesaran (a) 100x, (b) 200x, dan (c) 500x

Pengambilan mikrostruktur juga dilakukan dengan *Scanning Electron Microscope*. Berikut gambar mikrostruktur spesimen *thermal cycle 950⁰C* dengan *Scanning Electron Microscope* :



Gambar 4.9 Mikrostruktur *stainless steel* 316L *thermal cycle* 950⁰C (50x, 200x, 500x, 1000x)

Dari gambar mikrostruktur yang didapatkan pada spesimen *thermal cycle* 950⁰C bahwa spesimen mengalami rekristalisasi pada batas butir. Dengan adanya rekristalisasi, butiran pada spesimen akan sangat kecil dibandingkan dengan spesimen hasil *cold rolling*. Ini dilihat dari ukuran butir dari *thermal cycling* 950⁰C sebesar 22,45 µm dan *cold rolling* memiliki ukuran butir sebesar 116,42 µm. Jika dilihat secara mikro spesimen yang dilakukan *thermal cycle* 950⁰C ini butirannya memiliki ukuran yang tidak sama. Jika dilihat pada gambar mikrostruktur, terdapat adanya pengintian dan sedikit pertumbuhan butir pada beberapa area. Pertumbuhan butir ini dimungkinkan terjadi karena butiran yang baru yang menginti

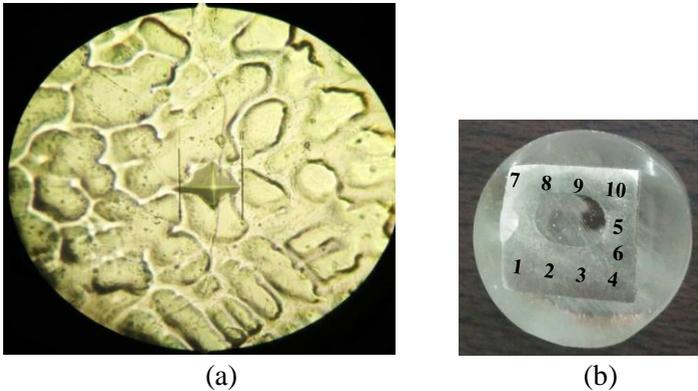
sempat tumbuh pada tahapan siklus selanjutnya (dilakukan 4 kali siklus). Siklus yang berulang ini dimaksudkan agar pengintian butiran baru dapat terus terjadi sekaligus juga mencegah terjadinya pertumbuhan butir secara signifikan karena exposure yang cukup lama dengan temperatur tinggi. Sehingga dapat dikatakan bahwa temperatur rekristalisasi pada *stainless steel* 316L cold roll reduksi 50% terjadi pada temperatur diatas 900⁰C. Pada percobaan ini diperoleh informasi bahwa temperatur 950⁰C dengan waktu penahanan 35 detik dan dilakukan sebanyak empat siklus telah memicu rekristalisasi.

4.3 Pengujian Microhardness

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kekerasan pada spesimen *cold rolling* dan spesimen *cold rolling-thermal cycle* pada suhu 850⁰C, 900⁰C, dan 950⁰C. Pengujian dilakukan dengan pembebanan 1 HV dan dilakukan pada beberapa lokasi di setiap spesimen. Berikut hasil pengujian kekerasan pada setiap spesimen.

4.3.1 Hasil Pengujian Microhardness Pada *Stainless steel* 316L Hasil Investment Casting.

Spesimen *stainless steel* 316L hasil invesment casting pada pengujian awal dilakukan microhardness dengan metode vickers. Pemberian pembebanan sebesar 1 HV. Berikut posisi indentasi dan nilai kekerasan pada *stainless steel* 316L invesment casting sebagai berikut :



Gambar 4.10 (a) Hasil indentasi Spesimen *Investment Casting* dan (b) Posisi Indentasi Pada Uji Microhardness Spesimen *Investment Casting*

Tabel 4.2 Hasil Uji Micro Vickers Hardness Spesimen *Investment Casting*

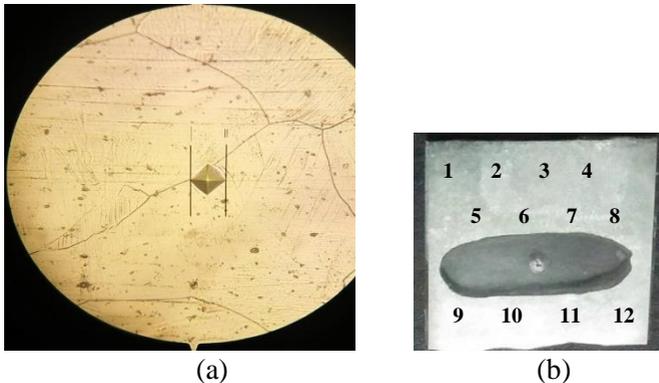
| Titik ke-n | Nilai kekerasan (HV) | Rata-rata kekerasan (HV) |
|------------|----------------------|--------------------------|
| 1 | 141 | 139,2 |
| 2 | 137 | |
| 3 | 137 | |
| 4 | 135 | |
| 5 | 133 | |
| 6 | 143 | |
| 7 | 142 | |
| 8 | 139 | |
| 9 | 145 | |
| 10 | 140 | |

Pada pengujian awal dilakukan pengujian kekerasan pada *stainless steel 316L* hasil *investment casting* dengan rata-rata kekerasan yaitu 139,2 HV. Hasil kekerasan ini akan dibandingkan dengan data kekerasan pada spesimen *cold rolling* dan spesimen

cold rolling-thermal cycle pada suhu 850°C , 900°C , dan 950°C untuk melihat apakah ada perubahan sifat mekanik pada proses *cold rolling-thermal cyling*.

4.3.2 Hasil Pengujian Microhardness Pada *Stainless steel 316L Cold rolling*

Pengujian microhardness *stainless steel 316L cold rolling* dilakukan pada beban HV 1, dengan menggunakan metode vickers dimana indenter intan pyramid. Berikut posisi indentasi dan hasil uji microhardness pada *stainless steel 316L cold rolling*:



Gambar 4.11 (a) Hasil indentasi Spesimen *Cold Rolling* dan (b) Posisi Indentasi Pada Uji Microhardness Spesimen *Cold Rolling*

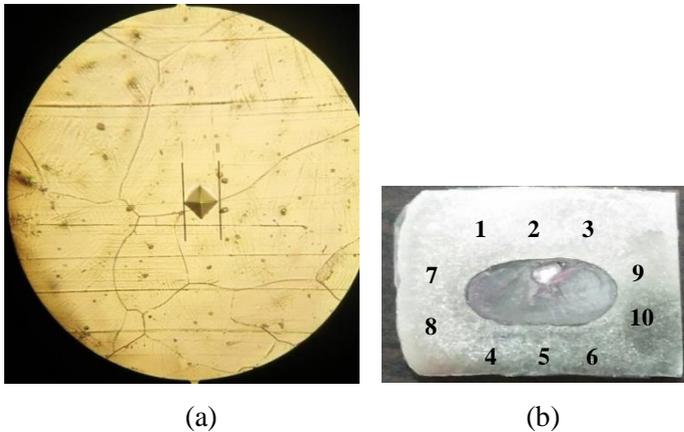
Tabel 4.3 Hasil Uji Micro Vickers Hardness Spesimen *Cold rolling*

| Titik ke-n | Nilai kekerasan (HV) | Rata-rata kekerasan (HV) |
|------------|----------------------|--------------------------|
| 1 | 460 | 406 |
| 2 | 407 | |
| 3 | 409 | |
| 4 | 402 | |
| 5 | 452 | |
| 6 | 418 | |
| 7 | 407 | |
| 8 | 407 | |
| 9 | 400 | |
| 10 | 416 | |

Pada spesimen *cold rolling* didapatkan rata-rata nilai kekerasan sebesar 406 HV. Jika dibandingkan dengan nilai kekerasan *stainless steel* 316L hasil investment casting sebesar 139,2 HV, nilai kekerasan *stainless steel* 316L yang sudah dilakukan *cold rolling* lebih besar dari *stainless steel* 316L hasil *investment casting*. Dengan adanya *cold rolling*, sebagian energi yang diberikan untuk mendeformasi material energinya dikeluarkan sebagai panas dan sebagian lagi tetap tersimpan dalam struktur kristal yang biasa disebut tegangan sisa. Hal ini akan menyebabkan kekerasan meningkat dari sebelum dilakukan *cold rolling*.

4.3.3 Hasil Pengujian Microhardness Pada *Stainless steel* 316L *Thermal cycle* Suhu 850⁰C

Pengujian *microhardness* dilakukan pada spesimen hasil *cold rolling* yang dilakukan *thermal cycle* pada suhu 850⁰C. Pengujian ini dilakukan dengan pembebanan HV 1, menggunakan metode *micro vickers hardness*. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui adanya pengaruh ukuran butir terhadap sifat mekanik pada spesimen. Berikut posisi indentasi dan nilai kekerasan pada *stainless steel* 316L *thermal cycle* 850⁰C.



Gambar 4.12 (a) Hasil indentasi Spesimen *Thermal cycle* 850⁰C dan (b) Posisi Indentasi Pada Uji Microhardness Spesimen *Thermal cycle* 850⁰C

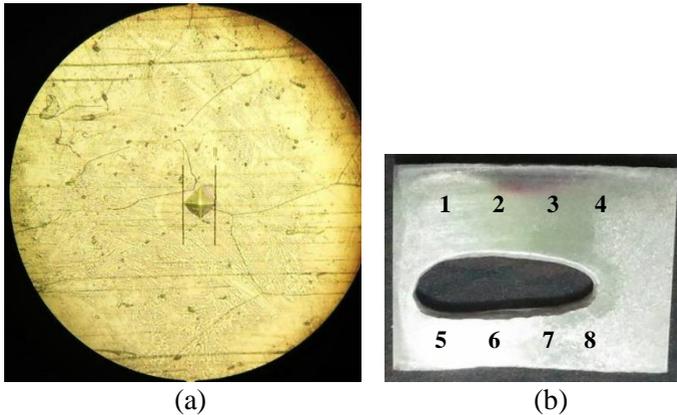
Tabel 4.4 Hasil Uji *Micro Vickers Hardness* Spesimen *Thermal cycle 850°C*

| Titik ke-n | Nilai kekerasan (HV) | Rata-rata kekerasan (HV) |
|------------|----------------------|--------------------------|
| 1 | 408 | 394,4 |
| 2 | 372 | |
| 3 | 397 | |
| 4 | 388 | |
| 5 | 409 | |
| 6 | 389 | |
| 7 | 382 | |
| 8 | 397 | |
| 9 | 407 | |
| 10 | 399 | |

Pada spesimen hasil *thermal cycle* suhu 850°C mempunyai rata-rata kekerasan sebesar 394,4 HV. Hal ini mengalami penurunan jika dibandingkan dengan spesimen yang dilakukan *cold rolling* yaitu dengan kekerasan 406 HV. Pada proses *thermal cycle 850°C* mengakibatkan tegangan sisa dari pengerjaan dingin (*cold rolling*) akan menghilang, walaupun itu tidak semuanya akan hilang. Ini dibuktikan dengan menurunnya kekerasan dari *cold rolling* reduksi 50%.

4.3.4 Hasil Pengujian Microhardness Pada *Stainless steel 316L Thermal cycle Suhu 900⁰C*

Pengujian microhardness dilakukan pada spesimen hasil *cold rolling* yang dilakukan *thermal cycle* pada suhu 900⁰C. Pengujian ini dilakukan dengan pembebanan HV 1, menggunakan metode *micro vickers hardness*. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui adanya pengaruh ukuran butir terhadap sifat mekanik pada spesimen. Berikut posisi indentasi dan nilai kekerasan pada *stainless steel 316L thermal cycle 900⁰C*.



Gambar 4.13 (a) Hasil indentasi Spesimen *Thermal cycle 900⁰C* dan (b) Posisi Indentasi Pada Uji Microhardness Spesimen *Thermal cycle 900⁰C*

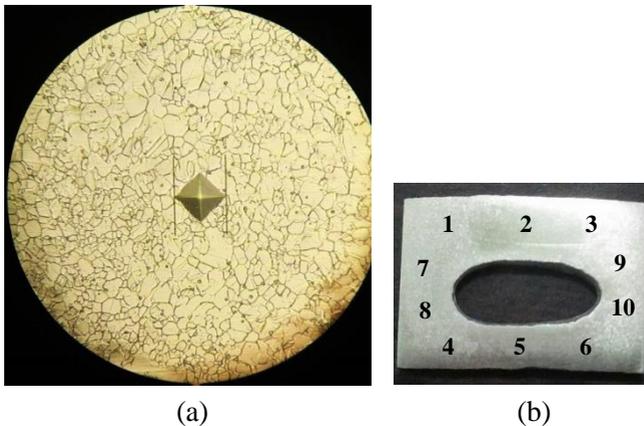
Tabel 4.5 Hasil Uji Micro Vickers Hardness Spesimen *Thermal cycle* 900°C

| Titik ke- n | Nilai kekerasan (HV) | Rata-rata kekerasan (HV) |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|
| 1 | 350 | 363,9 |
| 2 | 376 | |
| 3 | 343 | |
| 4 | 360 | |
| 5 | 334 | |
| 6 | 371 | |
| 7 | 377 | |
| 8 | 353 | |
| 9 | 382 | |
| 10 | 393 | |

Dari data yang diperoleh bahwa kekerasan pada spesimen *thermal cycle* 900°C ini sebesar 363,9 HV. Spesimen *cold rolling* tanpa *thermal cycle* mempunyai rata-rata kekerasan sebesar 406 HV. Pada pengerjaan dingin (*cold rolling*) masih ada tegangan sisa. Tegangan ini akan mengakibatkan terjadinya kenaikan kekerasan. Akan tetapi pada *thermal cycling* di suhu 900°C, kekerasannya menurun dari kekerasan hasil *cold rolling*. Hal ini disebabkan karena tegangan sisa akibat *cold rolling* sudah berkurang, akan tetapi pada *thermal cycling* di suhu 900°C belum cukup untuk terjadi rekristalisasi.

4.3.5 Hasil Pengujian Microhardness Pada *Stainless steel 316L Thermal cycle Suhu 950⁰C*

Pengujian microhardness dilakukan pada spesimen hasil *cold rolling* yang dilakukan *thermal cycle* pada suhu 950⁰C. Pengujian ini dilakukan dengan pembebanan HV 1, menggunakan metode *micro vickers hardness*. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui adanya pengaruh ukuran butir terhadap sifat mekanik pada spesimen. Berikut posisi indentasi dan nilai kekerasan pada *stainless steel 316L thermal cycle 950⁰C*.



Gambar 4.14 (a) Hasil indentasi Spesimen *Thermal cycle 950⁰C* dan (b) Posisi Indentasi Pada Uji Microhardness Spesimen *Thermal cycle 950⁰C*

Tabel 4.6 Hasil Uji Micro Vickers Hardness Spesimen *Thermal cycle 950°C*

| Titik ke-n | Nilai kekerasan (HV) | Rata-rata kekerasan (HV) |
|------------|----------------------|--------------------------|
| 1 | 287 | 253,4 |
| 2 | 274 | |
| 3 | 260 | |
| 4 | 245 | |
| 5 | 241 | |
| 6 | 295 | |
| 7 | 264 | |
| 8 | 250 | |
| 9 | 246 | |
| 10 | 273 | |

Dari data yang didapatkan menunjukkan bahwa nilai kekerasan rata-rata pada spesimen *thermal cycle 950°C* memiliki sebesar 190,2 HV. Jika dibandingkan dengan nilai kekerasan pada spesimen *investment casting*, nilai kekerasan akan naik. Pada penelitian ini dilakukan *thermal cycling* untuk menghilangkan tegangan sisa akibat *cold rolling* dan juga akan menyebabkan terjadinya rekristalisasi. Tegangan sisa akibat *cold rolling* yang hilang ini, pada *thermal cycling* di suhu 950°C juga sudah cukup untuk terjadi adanya rekristalisasi pada batas butir. Dengan halusanya ukuran butiran maka kekerasan akan naik, hal ini sudah sesuai jika dilihat perbandingan antara *stainless steel 316L* hasil *investment casting* dan *thermal cycling 950°C*.

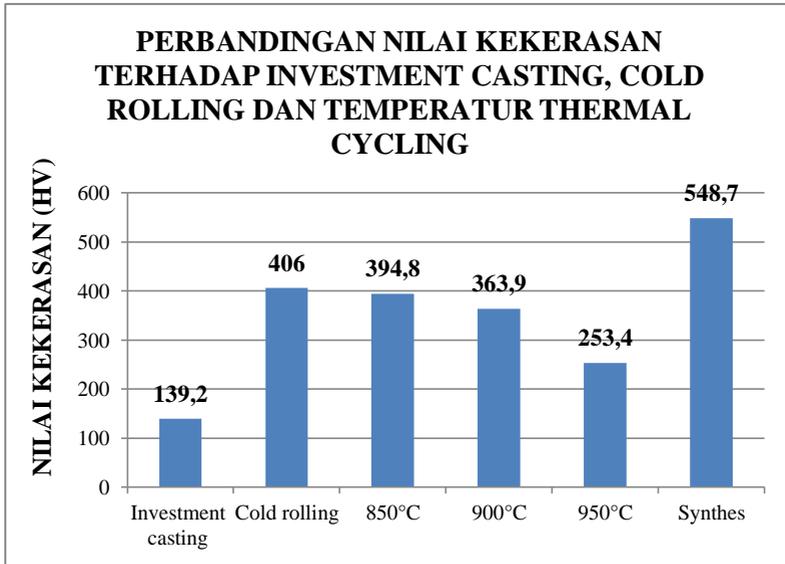
4.4 Ringkasan analisis

Pada penelitian ini implan *stainless steel 316L* hasil *investment casting* bertujuan untuk memperbaiki sifat mekanik dan memperhalus ukuran butir dengan mengacu pada *stainless steel 316L* merk Synthes. Hal ini dapat dilakukan dengan pengerjaan dingin dan dilanjutkan pemanasan kembali. Pengerjaan dingin (*cold rolling*) yang dilakukan pada *stainless steel 316L* direduksi sebesar 50%. Saat proses *cold rolling*, akan

timbul tegangan sisa yang menyebabkan kenaikan kekerasan. Sehingga diperlukan *thermal cycling* untuk menghilangkan tegangan sisa, dan tegangan sisa akan memicu terjadi rekristalisasi pada batas butir. Pada proses *thermal cycling* ini juga akan menentukan pada suhu berapa, akan terbentuk rekristalisasi dengan *cold rolling* reduksi sebesar 50%.

Tarun Nanda (2016) melakukan penelitian pada *stainless steel* 316L yang bertujuan untuk memperhalus ukuran butiran. Ini dilakukan dengan proses *cold rolling* yang direduksi sebesar 70%. Selanjutnya dilakukan proses *thermal cycling* pada suhu 700⁰C, 800⁰C, 900⁰C dengan waktu penahanan 35 detik yang diulang sebanyak 4 kali (4 siklus). Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa *cold rolling* reduksi 70% dengan *thermal cycle* suhu 900⁰C sudah terjadi rekristalisasi pada seluruh batas butirnya. Sedangkan pada penelitian ini *stainless steel* 316L dilakukan *cold rolling* yang direduksi sebesar 50% dan selanjutnya dilakukan *thermal cycling*. Diketahui bahwa *stainless steel* 316L ini pada *thermal cycling* disuhu 950⁰C sudah terjadi rekristalisasi pada batas butir, sedangkan untuk suhu 850⁰C dan 900⁰C belum terjadi rekristalisasi. Sehingga penelitian ini sesuai dengan teori yang menyebutkan bahwa semakin besar tingkat deformasi pengerjaan dingin, maka temperatur rekristalisasi akan semakin menurun.

Hal ini juga membuat pengaruh pada kekerasan spesimen. Kekerasan pada *thermal cycling* temperatur 850⁰C dan 900⁰C hampir sama dikarenakan masih adanya daerah dislokasi pada batas butir. Sehingga menyebabkan kekerasan tidak banyak berubah dari hasil *cold rolling* yang sebesar 406 HV. Sedangkan kekerasan terkecil spesimen yang dilakukan *thermal cycling* pada temperatur 950⁰C yaitu sebesar 253,4 HV. Perbandingan kekerasan antara *stainless steel* 316L hasil *thermal cycle* 950⁰C dan *stainless steel* 316L merk Synthes dapat dilihat pada grafik dibawah.

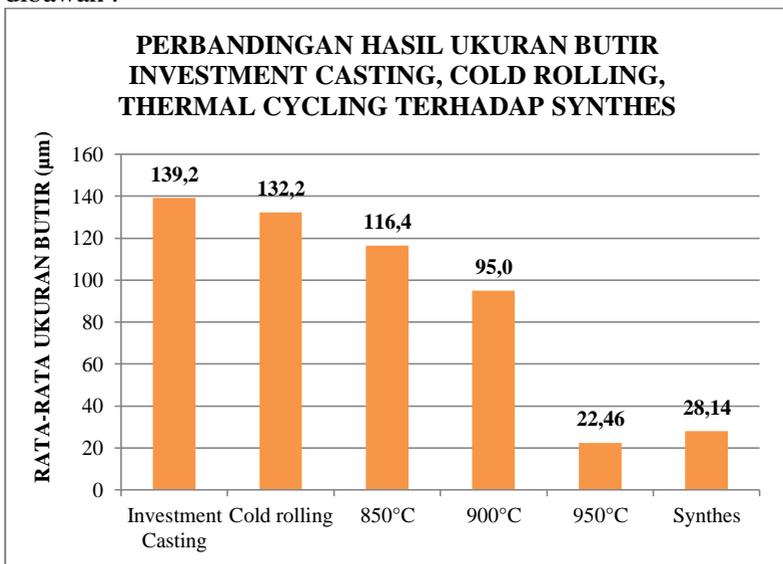


Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Hasil Kekerasan *Stainless steel 316L Cold rolling, Thermal cycle Dan Stainless steel 316L Merk Synthes*

Dilihat pada grafik, kekerasan meningkat dari *stainless steel 316L* hasil *investment casting* sebesar 139,2 HV dibandingkan dengan kekerasan terhadap thermal cycling 950⁰C. Hal ini juga dapat dikatakan bahwa proses *thermal cycling* dapat memperbaiki sifat mekaniknya akan tetapi masih berbeda jauh dengan material *stainless steel 316L* merk Synthes. Penurunan kekerasan ini dikarenakan pada thermal cycle suhu 850⁰C dan 900⁰C masih adanya butiran lama yang masih ada dislokasi dan beberapa yang sudah tidak ada dislokasi. Akan tetapi saat thermal cycling 950⁰C sudah mengalami rekristalisasi. Penghalusan butir memang sangat cenderung menaikkan kekerasan. Akan tetapi perbedaan ini dapat terjadi akibat adanya proses *cold rolling* yang mengakibatkan kekerasan naik, akan tetapi keuletan dari material akan turun. Selanjutnya dilakukan *thermal cycle* yang mengakibatkan tegangan sisa akan menghilang untuk memicu

terjadi rekristalisasi pada batas butir yang banyak penumpukan dislokasi. Hasil thermal cycling 950°C sangat jauh dengan *stainless steel* 316L merk Synthes dikarenakan proses pembuatan Synthes dilakukan dengan *forging* serta machining manufaktur yang berbeda dengan *stainless steel* 316L hasil *investment casting*. Hal inilah dapat juga mengakibatkan hasil kekerasan sangat berbeda jauh.

Sedangkan jika ditinjau dari ukuran butir setiap temperatur *thermal cycling*. Hasil yang didapatkan pada grafik dibawah :



Gambar 4.16 Grafik Hasil Ukuran Butir Pada *Cold rolling*, *Thermal cycle* Dan *Stainless steel* 316L Merk Synthes

Pada setiap temperatur *thermal cycling* 850°C , 900°C , dan 950°C memiliki ukuran butir yaitu $132.17\ \mu\text{m}$, $95.029\ \mu\text{m}$, $22.45\ \mu\text{m}$. Pada temperatur *thermal cycling* 850°C dan 900°C memiliki ukuran butir yang tidak terpaut jauh. Pada temperatur *thermal cycling* 850°C dan 900°C juga belum terjadi rekristalisasi. Sedangkan ukuran butir yang sangat kecil terjadi pada temperatur

thermal cycling di suhu 950°C karena pada batas butirnya sudah terekristalisasi. Jika dibandingkan dengan material pengacu yaitu *stainless steel* 316L merk Synthes nilai ukuran butir tidak terpaut jauh dari dengan ukuran butir pada *stainless steel* 316L *thermal cycling* 950°C . Hal ini membuktikan bahwa proses *cold rolling* dan *thermal cycling* dapat memperhalus ukuran butir pada *stainless steel* 316L hasil *investment casting*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan mengenai pengaruh perlakuan *cold rolling-thermal cycling* pada *stainless steel* 316L hasil *investment casting* yang diberi:

1. Terjadi kenaikan nilai kekerasan pada spesimen hasil *cold rolling* reduksi 50% dibanding hasil *investment casting* dari 139,2 HV menjadi 406 HV.
2. Dari kekerasan hasil *investment casting* 139,2 HV jika dibandingkan dengan hasil *thermal cycle* 950⁰C maka kekerasan menjadi 253,4 HV.
3. Ukuran butir pada *stainless steel* 316L hasil *investment casting* sebesar 290,36 μm mengalami penurunan ukuran butir pada hasil *cold rolling* reduksi 50% menjadi 116,42 μm dengan bentuk *elongated grain*. Setelah itu ukuran butir menurun seiring bertambahnya temperature *thermal cycle*. Pada temperatur 850⁰C dan 900⁰C belum terjadi rekristalisasi di batas butir serta memiliki ukuran butir sebesar 132,17 μm dan 95,02 μm . Sedangkan setelah *thermal cycling* 950⁰C didapatkan rekristalisasi pada batas butirnya sehingga memiliki ukuran butir rata-rata sebesar 22,456 μm dengan bentuk angular atau bulat.

5.2 Saran

Beberapa hal yang dapat penulis sarankan agar didapat diperoleh informasi yang lebih komprehensif adalah:

1. Meneliti pengaruh jumlah siklus *thermal cycle* pada temperatur 950⁰C untuk *cold rolling* reduksi 50%.
2. Dilakukan perbandingan antara pengaruh derajat reduksi *cold rolling* terhadap temperatur *thermal cycling* dimana rekristalisasi sudah terjadi.

(Halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Penelitian dan Pengembangan Kesehatan Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. 2013. Riset Kesehatan Dasar. Jakarta : Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- [2] Callister, William D. 2007. *Material Science and Engineering An Introduction*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- [3] Suherman, Koko. 2008. Pembuatan cetakan untuk Wax Pattern pada Investment Casting Sudu Runner Turbin Francis. Bandung : Institut Teknolodi Bandung.
- [4] Pujadi.,Dimas Irawan. 2006. Pengaruh Pendinginan Udara Dalam Proses Pencetakan Terhadap Mikrostruktur Baja Cor Stainless Tahan Panas SS 309. Jakarta : Indonesia.
- [5] ASTM F138-13a. 2013. Standard Specification for Wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum *Stainless steel* Bar and Wire for Surgical Implants (UNS S31673). United States: Association of Standard Testing Materials.
- [6] Misra, R.D.K., Zhang, Z., Venkatasurya, P.K.C., Somani, M.C. and Karjalainen, L.P. 2010. *The Effect of Nitrogen on the Formation of Phase Reversion-Induced Nanograined/ Ultrafine-Grained Structure and Mechanical Behaviour of a Cr-Ni-N Steel*. *Materials Science and Engineering A*, pp. 1-26.
- [7] Kalpakjian, Serope. 1984. *Manufacturing Process for Engineering Materials*. New Jersey: Pearson Education, Inc.
- [8] Mabruhi, Efendi. 2012. Aplikasi *Severe Plastic Deformation* (Spd) Dan *Heavy Cold rolling* Pada Baja Tahan Karat Austenitik 316L. Tangerang : Pusat Penelitian Metalurgi – LIPI.
- [9] Karjalainen, L.P., Taulavuori, T., Sellman, M. and Kyröläinen, A. 2008, ‘Some Strengthening Methods for Austenitic *Stainless steels*’, *Steel Research International*, Vol.79, No. 6, pp. 404-412.

- [10] Kumar, B.R., Mahato, B., Sharma, S. and Sahu, J.K. 2009. Effect of Cyclic Thermal Process on Ultrafine Grain Formation in AISI 304L Austenitic *Stainless steel*. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 40A, pp. 3226-3234.
- [11] Cahyanto, Arief. 2009. Makalah Biomaterial. Bandung : Universitas Padjajaran.
- [12] Winarno, Feriansya Dayu. 2015. Pengaruh Termal Siklik Komposit Matrik Polyester Dengan Aditif Partikel Montmorillonite Berpenuat Serat Sabut Kelapa. Jember : Fakultas Teknik Universitas Jember.
- [13] Baker, I., Liu, L. and Mandal, D. 1995. “*The Effect of Grain Size on the Stored Energy of Cold Work as a Function of Strain for Polycrystalline Nickel*”, *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 32, No. 2, pp. 167-171
- [14] Rosdiana, Hera. 2013. Mekanikse Penguatan Logam. Jakarta : Fakultas Teknik Universitas Pancasila.
- [15] Avner S. H. 1974. Introduction to Physical Metallurgy. Inggris: McGraw-Hill Book Company (UK) Ltd.
- [16] Davis, J.R. 1994. ASM Specialty Handbook; *Stainless steels*. ASM International
- [17] Ikhsan, Muhammad. 2014. Karakteristik Material Biokompetibel Aplikasi Implan Medis Jenis Bone Plate. Jakarta : Jurusan Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah.
- [18] Hidayat, Saeful. 2012. Pengaruh Proses Rol dan Perlakuan Panas Pada Ingot Baja Tahan Karat Austenit yang Mengandung Unsur Ti dan Y Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan. Bandung : Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri.
- [19] Nanda, Tarun. 2016. *A Thermal cycling Route for Processing Nano-grains in AISI 316L Stainless steel for Improved Tensile Deformation Behaviour*. India: Departement of Mechanical Engiineering, Thapar University.

- [20] Di Schino, A. 2003. *Recrystallization and Grain Growth in Austenitic Stainless steel; A Statistical Approach* Vol. 37

(Halaman sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

- Hasil kekerasan pada *stainless steel* 316L hasil *investment casting*

| | | | | |
|-----|--------|--------|------|----|
| 137 | 118.39 | 116.39 | ---- | OK |
| 137 | 115.96 | 117.05 | ---- | OK |
| 135 | 112.54 | 121.68 | ---- | OK |
| 133 | 121.55 | 114.85 | ---- | OK |
| 143 | 106.27 | 121.58 | ---- | OK |
| 145 | 111.87 | 114.49 | ---- | OK |
| 150 | 116.22 | 105.99 | ---- | OK |
| 140 | 110.99 | 118.80 | ---- | OK |
| 141 | 116.74 | 112.50 | ---- | OK |

- Hasil kekerasan pada *stainless steel* 316L hasil *cold rolling*

| HV | L 1 | L 2 | HV | OK |
|-----|-------|-------|------|----|
| 460 | 65.51 | 61.51 | 46.1 | OK |
| 407 | 71.03 | 63.97 | 41.5 | OK |
| 409 | 67.32 | 67.32 | 41.7 | OK |
| 402 | 66.94 | 68.85 | 41.0 | OK |
| 452 | 63.78 | 64.28 | 45.5 | OK |
| 418 | 66.33 | 66.90 | 42.5 | OK |
| 407 | 69.54 | 65.44 | 41.5 | OK |
| 396 | 68.37 | 68.52 | 40.4 | OK |
| 398 | 69.76 | 66.77 | 40.6 | OK |
| 407 | 69.45 | 65.47 | 41.5 | OK |

- Hasil kekerasan stainless steel 316L merk Synthes

| HV | L 1 | L 2 | HRC | JG |
|-----|-------|-------|------|----|
| 737 | 49.43 | 50.90 | 41.9 | OK |
| 551 | 58.89 | 57.12 | 51.9 | OK |
| 562 | 57.97 | 56.92 | 51.9 | OK |
| 512 | 59.28 | 61.00 | 51.9 | OK |
| 458 | 63.54 | 63.71 | 46.8 | OK |
| 472 | 62.59 | 62.79 | 47.0 | OK |
| 461 | 62.27 | 64.63 | 46.2 | OK |
| 559 | 56.80 | 58.36 | 52.9 | OK |
| 545 | 58.21 | 58.40 | 52.0 | OK |
| 542 | 57.65 | 59.37 | 51.8 | OK |

- Hasil kekerasan stainless steel 316L thermal cycling 850⁰C

| HV | L 1 | L 2 | HRC | JG |
|-----|-------|-------|------|----|
| 408 | 67.93 | 66.91 | 41.6 | OK |
| 372 | 70.29 | 70.83 | 38.0 | OK |
| 397 | 69.87 | 66.77 | 40.5 | OK |
| 388 | 69.53 | 68.68 | 39.6 | OK |
| 409 | 68.95 | 65.77 | 41.7 | OK |
| 389 | 69.05 | 69.05 | 39.7 | OK |
| 382 | 69.62 | 69.62 | 39.8 | OK |
| 397 | 68.53 | 68.07 | 40.5 | OK |
| 407 | 68.67 | 66.24 | 41.5 | OK |
| 399 | 69.16 | 67.25 | 40.7 | OK |

- Hasil kekerasan stainless steel 316L thermal cycling 900°C

| HV | L 1 | L 2 | HRC | TS |
|-----|-------|-------|------|----|
| 457 | 62.68 | 64.64 | 45.9 | OK |
| 358 | 75.54 | 70.10 | 35.5 | OK |
| 376 | 72.23 | 68.13 | 38.4 | OK |
| 334 | 75.27 | 73.63 | 33.7 | OK |
| 360 | 72.68 | 70.78 | 36.6 | OK |
| 320 | 77.81 | 75.32 | 32.2 | OK |
| 371 | 70.00 | 71.42 | 37.8 | OK |
| 377 | 71.47 | 68.74 | 38.5 | OK |
| 353 | 70.68 | 74.36 | 35.8 | OK |
| 382 | 71.44 | 67.83 | 39.0 | OK |

- Hasil kekerasan stainless steel 316L thermal cycling 950°C

| HV | L 1 | L 2 | HRC | TS |
|-----|-------|--------|------|----|
| 221 | 89.53 | 93.59 | 15.7 | OK |
| 211 | 93.59 | 94.02 | 13.5 | OK |
| 207 | 92.41 | 96.98 | 12.6 | OK |
| 213 | 92.59 | 94.17 | 14.0 | OK |
| 190 | 97.34 | 100.15 | 8.5 | OK |
| 215 | 93.84 | 91.67 | 14.4 | OK |
| 196 | 96.92 | 97.58 | 10.0 | OK |
| 213 | 93.23 | 93.23 | 14.0 | OK |
| 202 | 94.17 | 97.55 | 11.5 | OK |
| 207 | 96.79 | 92.55 | 12.6 | OK |

BIODATA PENULIS



Penulis yang memiliki nama lengkap Putri Intan Usi Fausia lahir di Madiun, 24 Mei 1996. Penulis merupakan anak pertama dari empat bersaudara padangan dari dr. Anang Widodo dan Anny Widiasmara SE.,MSi. Dalam keseharian penulis lebih akrab disapa “usi”.

Pendidikan formal penulis dimulai tahun 2002 di SDN 01 Mejayan, kemudian dilanjutkan SMP Negeri 1 Mejayan. Setelah lulus SMP pada tahun 2014 penulis menamatkan pendidikan SMAnya di SMAN 2 Madiun. Setelah lulus SMA, penulis melanjutkan studinya di jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya pada tahun 2014. Dan dengan kehendak Allah SWT pada tahun 2018 mendapatkan gelar sarjana teknik.

usifausia24@gmail.com