

TUGAS AKHIR – TM184835

**PENGARUH JUMLAH SIKLUS *THERMAL CYCLING* PADA
COLD ROLLED STAINLESS STEEL AISI 316L TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN**

MAHDIYYAH DWIMA YANISA

NRP. 02111740000193

Dosen Pembimbing

Fahmi Mubarok, S.T., M.Sc, Ph.D.

NIP. 197801152003121002

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR – TM184835

**PENGARUH JUMLAH SIKLUS *THERMAL CYCLING* PADA
COLD ROLLED STAINLESS STEEL AISI 316L TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN**

MAHDIYYAH DWIMA YANISA

NRP. 02111740000193

Dosen Pembimbing

Fahmi Mubarok, S.T., M.Sc, Ph.D.

NIP. 197801152003121002

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT – TM184835

**INFLUENCE OF REPEATED *THERMAL CYCLING*
TREATMENT ONTO COLD ROLLED STAINLESS STEEL AISI
316L**

MAHDIYYAH DWIMA YANISA

NRP. 02111740000193

Advisor

Fahmi Mubarok, S.T., M.Sc, Ph.D.

NIP. 197801152003121002

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya

2022

HALAMAN PENGESAHAN

PENGARUH JUMLAH SIKLUS *THERMAL CYCLING* PADA *COLD ROLLED STAINLESS STEEL AISI 316L* TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Bidang Studi Metalurgi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

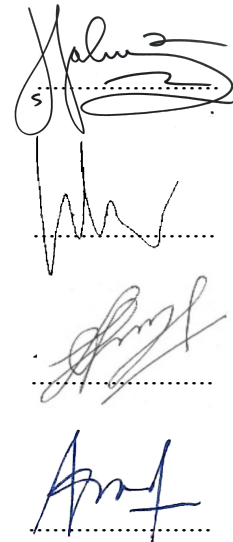
Oleh:

MAHDIYYAH DWIMA YANISA

NRP. 02111740000193

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Fahmi Mubarak S.T., M.Sc., PhD. (Pembimbing)
NIP. 197801152003121002
2. Dr. Eng. Sutikno S.T., MT (Penguji I)
NIP. 197407032000031001
3. Wahyu Wijanarko, S.T., M.Sc., PhD (Penguji II)
NIP. 198202092012121001
4. Ika Dewi Wijayanti S.T., M.Sc., PhD. (Penguji III)
NIP. 198512022014042002



SURABAYA
Juli 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET

INFLUENCE OF REPEATED THERMAL CYCLING TREATMENT ONTO COLD ROLLED STAINLESS STEEL AISI 316L

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
For obtaining Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology

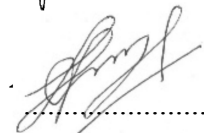
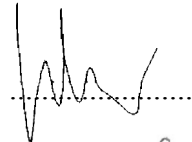
By:

MAHDIYYAH DWIMA YANISA

NRP. 02111740000193

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Fahmi Mubarok S.T., M.Sc., PhD. (Advisor)
NIP. 197801152003121002
2. Dr. Eng. Sutikno S.T., MT (Examiner I)
NIP. 197407032000031001
3. Wahyu Wijanarko, S.T., M.Sc., PhD (Examiner II)
NIP. 198202092012121001
4. Ika Dewi Wijayanti S.T., M.Sc., PhD. (Examiner III)
NIP. 198512022014042002



SURABAYA
July 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa : Mahdiyyah Dwima Y.
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Fahmi Mubarak S.T., M.Sc., PhD.

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Pengaruh Jumlah Siklus *Thermal Cycling* Pada *Cold Rolled Stainless Steel AISI 316L* Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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

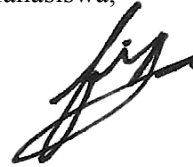
Mengetahui
Dosen Pembimbing



(Fahmi Mubarak S.T., M.Sc., PhD.)
NIP. 197801152003121002

Surabaya, 29 Juli 2022

Mahasiswa,



(Mahdiyyah Dwima Yanisa)
NRP. 02111740000193

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student : Mahdiyyah Dwima Y.
Department : Mechanical Engineering
Advisor : Fahmi Mubarak S.T., M.Sc., PhD.

hereby declare that the Final Project with the title "Influence Of Repeated Thermal Cycling Treatment Onto Cold Rolled Stainless Steel Aisi 316L" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

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

Acknowledged
Advisor



(Fahmi Mubarak S.T., M.Sc., PhD.)
NIP. 197801152003121002

Surabaya, 29 July 2022

Student,



(Mahdiyyah Dwima Yanisa)
NRP. 02111740000193

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PENGARUH JUMLAH SIKLUS *THERMAL CYCLING* PADA *COLD ROLLED STAINLESS STEEL* AISI 316L TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN

Nama : Mahdiyyah Dwima Yanisa
NRP : 02111740000193
Departemen : Teknik Mesin
Pembimbing : Fahmi Mubarak, S.T., M.Sc, Ph.D.

ABSTRAK

Salah satu prosedur umum yang dilakukan oleh dokter ortopedi untuk kasus patah tulang adalah dengan memasang implan tulang. Implan tulang jenis *austenitic stainless steel* AISI 316L banyak digunakan karena memiliki sifat mekanis yang baik seperti kekuatan dan keuletan yang tinggi. Secara standar internasional ASTM F138, implan tulang hasil produksi lokal telah memenuhi persyaratan. Namun bila dibandingkan dengan implan tulang impor, diketahui bahwa sifat mekanik implan lokal berada dibawah implan impor dari Eropa atau Amerika. Oleh karena itu, diperlukan tambahan proses perlakuan agar implan lokal dapat bersaing dengan produk impor.

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik implan lokal adalah dengan memodifikasi struktur mikro *austenitic stainless steel* menjadi struktur mikro berbentuk *spherical* berukuran halus dengan distribusi merata. Hal ini dapat diperoleh melalui proses *cold rolling* yang dilanjutkan dengan *thermal cycling*. Proses *thermal cycling* akan memicu rekristalisasi butiran baru karena adanya *stored strain energy* yang diperoleh akibat perlakuan dingin *cold rolling*. Pada penelitian ini akan diamati pengaruh siklus berulang 2x, 3x, 4x dan 5x dengan pengujian kekerasan dan struktur mikro. Proses *thermal cycling* yang berbeda-beda dilakukan untuk mencari jumlah siklus ideal dimana rekristalisasi merata (*full recrystallization*) terjadi pada spesimen *stainless steel* 316L yang telah mengalami *cold rolling*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan *thermal cycling* siklus berulang 2x, 3x, 4x dan 5x untuk derajat reduksi 50% dan 90% pada temperatur 900°C dengan waktu penahanan selama 35 detik tidak menunjukkan bahwa terjadi rekristalisasi di sebagian daerah batas butir *elongated grain*. Hal ini dibuktikan dengan penurunan rata-rata kekerasan yang tidak signifikan karena *stored strain energy* yang terlepas belum menyeluruh atau secara maksimal.

Nilai kekerasan material mengalami kenaikan setelah dilakukan perlakuan *cold rolling* 50% dan *cold rolling* 90%. Setelah dilakukan *thermal cycling* 900°C pada waktu 35 detik terlihat bahwa kekerasan menurun dengan penurunan terbesar terlihat setelah siklus *thermal cycling* 5 kali pada sampel *cold-roll* 50% dan sampel *cold-roll* 90% dengan kekerasan sebesar 328.00 HV_{0.3} dan 395.80 HV_{0.3} secara berurutan. Dalam penelitian ini diperoleh data bahwa kondisi perlakuan *thermal cycling* yang diberikan belum mampu memberikan rekristalisasi butiran baru.

Kata Kunci : cold rolling, thermal cycling, implan tulang stainless steel AISI 316L

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

INFLUENCE OF REPEATED *THERMAL CYCLING* TREATMENT ONTO COLD ROLLED STAINLESS STEEL AISI 316L

Name : Mahdiyyah Dwima Yanisa
NRP : 02111740000193
Department : Mechanical Engineering
Advisor : Fahmi Mubarak, S.T., M.Sc, Ph.D.

ABSTRACT

One of the most common procedures taken by orthopaedic doctors to treat bone fracture was utilizing bone implants. AISI 316L austenitic stainless steel was widely used as bone implant material because of its high strength and ductility. The local bone-implant had met the international standard of ASTM F138, however, in terms of the mechanical properties, this locally produced bone implant was still inferior to imported implants from Europe or USA. Therefore, additional treatment processes are necessary to improve the local's implant product. Thus this local product can compete with imported products.

Modifying the microstructure of austenitic stainless steel with grain refinement was one of the methods that can be implemented to improve the mechanical properties. This can be achieved through a cold rolling process followed by a thermal cycling treatment. Thermal cycling is the process of heating a sample to an elevated period with repeated cycles. The released strain energy will trigger the formation of new grain through recrystallization. In this study, the effect of repeated cycles of 2x, 3x, 4x and 5x will be observed and their influence was characterized using hardness testing and microstructure observation. Varied cycles of thermal cycling are carried out to find the ideal number of cycles where full recrystallization occurs in cold rolled 316L stainless steel specimens.

The results indicated no recrystallization had occurred in repeated thermal cycling treatments at 900°C with a holding time of 35 seconds with a cycle of 2x, 3x, 4x and 5x for both 50% degree cold roll reduction and 90% degree cold roll reduction. The average hardness was only slightly decreased as compared to their cold rolling condition, indicating that the stored strain energy was not completely released or converted through recrystallization.

The material's hardness value has increased following cold rolling treatment for 50% degree cold roll reduction and 90% degree cold roll reduction. Hardness value decreases after thermal cycling of 900°C for 35 seconds, with the largest decrease shown after the 5th cycle of thermal cycling on the 50% cold-rolled sample and 90% cold-rolled sample with the hardness of 328.00 HV_{0.3} and 395.80 HV_{0.3} respectively. The findings collected in this study show that the thermal cycling treatment parameters selected within this experiment had not been able to reach recrystallization.

Keywords : cold rolling, thermal cycling, stainless steel AISI 316L, bone implants

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis diberi kesempatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Pengaruh Jumlah Siklus Thermal Cycling pada Cold Rolled Stainless Steel AISI 316L terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro**”. Tugas Akhir ditujukan untuk memenuhi mata kuliah wajib yang harus diambil oleh mahasiswa Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis ingin berterima kasih juga kepada:

1. Orang tua penulis, **Dwi Muhammad Abdu** dan **Hilda Syafri** yang telah memberikan dukungan dan doa hingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Serta saudara penulis, kakak **Adinda Dwima Novita** dan adik-adik **Muhammad Rizky Putra**, **M. Dani Ramadhan**, **Syafira Zahra Nurasila**, dan **Annisa Tasya Salsabila** yang telah menyemangati dan menghibur penulis selama mengerjakan Tugas Akhir.
2. Almarhum ibu kandung penulis **Imma Herawati** yang telah mendidik, mendukung untuk menyelesaikan studi ini, serta menyayangi penulis sampai akhir hayatnya.
3. Bapak **Fahmi Mubarok ST., MSc., PhD** selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis. Terima kasih atas kesabarannya selama membimbing penulis.
4. Bapak **Dr. Eng. Sutikno ST., MT**, Bapak **Wahyu Wijanarko, S.T., M.Sc., Ph.D** dan Ibu **Ika Dewi Wijayanti ST., MSc., PhD** selaku dosen penguji Tugas Akhir. Terima kasih atas saran dan masukan yang telah diberikan.
5. Bapak **Triyogi Yuwono, Ir. DEA. Dr. Prof.** selaku dosen wali yang telah memberikan arahan dan membimbing penulis dalam menyelesaikan perkuliahan di Teknik Mesin FTIRS ITS.
6. **Karyawan Laboratorium Metalurgi Teknik Mesin ITS** yang banyak membantu serta memberikan dukungan untuk proses Tugas Akhir penulis.
7. **Mba Amanda**, **Mba Tya**, dan **Farlen** sebagai teman satu pembimbing Tugas Akhir/*Thesis* yang telah menemani proses pengerjaan dari awal. Terima kasih sudah menghibur serta memberikan saran dan petuah sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. **Teman-teman Laboratorium Metalurgi**, terima kasih sudah mendukung dan menemani menulis Tugas Akhir.
9. Best friend and number one supporter, **Andira Rahman Imani (Aan)**. Thank you for being present when I was at my lowest, I couldn't have done it without you. Sorry if this is not a grand gesture declaration of whatever you're expecting this to be. I'm not the best at that. Maybe I could show you a better way to convey my gratitude. Just one call away.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2022

Mahdiyyah Dwima Y.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
Daftar Isi.....	vii
Daftar Gambar.....	ix
Daftar Tabel.....	xi
BAB I Pendahuluan.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Batasan Masalah.....	2
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II Tinjauan Pustaka.....	4
2.1. Biomaterial Implan Tulang.....	4
2.2. Stainless Steel.....	5
2.3. Austenitic Stainless Steel.....	5
2.4. Metode Penguatan Material.....	7
2.4.1. Pengerasan Tegangan (<i>Strain Hardening</i>).....	7
2.4.2. Penguatan Larutan Padat (<i>Solid Solution Strengthening</i>).....	8
2.4.3. Penghalusan Butir (<i>Grain Size Reduction</i>).....	8
2.5. Grain Refinement Austenitic Stainless Steel.....	9
2.6. Cold rolling.....	12
2.7. Thermal cycling.....	13
2.7.1. Rekristalisasi.....	15
2.8. Diagram Schaeffler.....	16
2.9. Deformasi Dingin dan Kepadatan Dislokasi.....	17
BAB III Metodologi Penelitian.....	19
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	19
3.2. Spesimen Uji <i>Stainless Steel</i> 316L.....	20
3.2.1. Spesimen Material untuk <i>Cold rolling</i>	20
3.2.2. Spesimen Material untuk Thermal cycling, Uji Kekerasan Micro Vickers Hardness, Metallography.....	21
3.3. Peralatan Eksperimen.....	21
3.3.1. Penguian Metallography.....	23
3.3.2. Pengujian Scanning Electron Macroscopic (SEM).....	23
3.3.3. Pengujian Kekerasan <i>Micro Vickers</i>	24
3.3.4. Proses Cold rolling.....	24
3.3.5. Proses Thermal cycling.....	24
BAB IV Hasil dan Pembahasan.....	26
4.1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia.....	26
4.2. Hasil Pengujian Micro Vickers Hardness.....	26
4.3. Hasil Pengujian Pengamatan Struktur Mikro.....	29
4.3.1. Hasil Pengamatan Spesimen <i>Stainless Steel</i> 316L.....	29

4.3.2.	Hasil Pengamatan Spesimen <i>Stainless Steel</i> 316L <i>Cold rolling</i> 50% dan 90% 30	
4.3.3.	Hasil Pengamatan Spesimen <i>Stainless Steel</i> 316L <i>Thermal cycling</i> 2x	31
4.3.4.	Hasil Pengamatan Spesimen <i>Stainless Steel</i> 316L <i>Thermal cycling</i> 3x	32
4.3.5.	Hasil Pengamatan Spesimen <i>Stainless Steel</i> 316L <i>Thermal cycling</i> 4x	33
4.3.6.	Hasil Pengamatan Spesimen <i>Stainless Steel</i> 316L <i>Thermal cycling</i> 5x	34
4.4.	Diskusi Penelitian	35
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		38
5.1.	Kesimpulan	38
5.2.	Saran	38
Daftar Pustaka		40
Lampiran		42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Implan Tulang Stainless Steel 316L (PT. Pelopor Implantindo).....	4
Gambar 2. 2. Aplikasi Implan Patah Tulag (Sutowo, Ikhsan & Kartika, 2014).....	5
Gambar 2. 3. Diagram Fasa Baja Tahan Karat Austenitik (Kumar et al., 2009).....	6
Gambar 2. 4. <i>Impurity</i> Penyebab Dislokasi (Callister, 2007).....	8
Gambar 2. 5. Dislokasi Butir (Callister, 2007).....	9
Gambar 2. 6. Grafik Perbandingan Hasil Kekerasan Stainless Steel 316L <i>Cold rolling</i> , <i>Thermal cycling</i> , dan Stainless Steel 316L Merk Synthes (Mubarok, Fausia, Sutikno, Mahyudin, 2020).....	10
Gambar 2. 7. Grafik Perbandingan Rata-Rata Kekerasan Sampel Investment Casting, Cold Rolled dan Cold Rolled Thermally Cycled (Fahmi Mubarok, Amanda Rosalina, 2021).....	11
Gambar 2. 8. Skema Pengerjaan <i>Cold rolling</i> (Magda, 2009).....	12
Gambar 2. 9. Grafik Perbandingan Rata-Rata Ukuran Butir Pada <i>Cold rolling</i> dan <i>Thermal cycling</i> Terhadap Investment Casting (Mubarok, Fausia, Sutikno, Mahyudin, 2020) ...	14
Gambar 2. 10. Grafik Perbandingan Rata-Rata Ukuran Butir Spesimen Stainless Steel 316L Hasil Investment Casting, <i>Cold rolling</i> , dan <i>Cold rolling Thermal cycling</i> 900°C (Fahmi Mubarok, Amanda Rosalina, 2021).....	15
Gambar 2. 11. Diagram <i>Schaeffler</i> (Dacapo Stainless).....	17
Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian.....	19
Gambar 3. 2. Spesimen <i>Stainless Steel</i> 316L.....	20
Gambar 3. 3. Spesimen untuk Proses <i>Thermal cycling</i> dari Hasil <i>Cold rolling</i> (a) Cold Roll 90% (b) Cold Roll 50%.....	21
Gambar 3. 4. Mesin Cutting Wheel.....	21
Gambar 3. 5. <i>Olympus Stereo Microscope</i> Tipe.....	22
Gambar 3. 6. Mesin <i>Grinding</i> dan <i>Polishing</i>	22
Gambar 3. 7. Mesin <i>Rolling Mill</i>	24
Gambar 3. 8. Skema <i>Thermal cycling</i>	24
Gambar 4. 1. (a) Posisi Indentasi Uji Kekerasan Micro Vickers pada Spesimen <i>Stainless Steel</i> 316L (b) Hasil Indentasi Spesimen <i>Stainless Steel</i> 316L.....	27
Gambar 4. 2. Grafik Perbandingan Rata-Rata Nilai Kekerasan <i>Stainless Steel</i> 316L dan <i>Cold Rolled</i> 50% - <i>Thermal cycling</i>	28
Gambar 4. 3. Grafik Perbandingan Rata-Rata Nilai Kekerasan <i>Stainless Steel</i> 316L dan <i>Cold Rolled</i> 90% - <i>Thermal cycling</i>	29
Gambar 4. 4. Hasil Pengamatan Struktur Mikro <i>Stainless Steel</i> 316L Perbesaran (a) 500x (b) 1000x.....	30
Gambar 4. 5. Hasil Pengamatan Struktur Mikro <i>Stainless Steel</i> 316L <i>Cold rolling</i> 50% Perbesaran (a) 500x (b) 1000x.....	30
Gambar 4. 6. Hasil Pengamatan Struktur Mikro <i>Stainless Steel</i> 316L <i>Cold rolling</i> 90% Perbesaran (a) 500x (b) 1000x.....	31
Gambar 4. 7. Hasil Pengamatan Struktur Mikro <i>Stainless Steel</i> 316L <i>Cold rolling</i> 50% - <i>Thermal cycling</i> 2 Siklus Perbesaran (a) 500x (b) 1000x dan <i>Cold rolling</i> 90% - <i>Thermal cycling</i> 2 Siklus Perbesaran (c) 500x (d) 1000x.....	32
Gambar 4. 8. Hasil Pengamatan Struktur Mikro <i>Stainless Steel</i> 316L <i>Cold rolling</i> 50% - <i>Thermal cycling</i> 3 Siklus Perbesaran (a) 500x (b) 1000x dan <i>Cold rolling</i> 90% - <i>Thermal cycling</i> 3 Siklus Perbesaran (c) 500x (d) 1000x.....	33

Gambar 4. 9. Hasil Pengamatan Struktur Mikro Stainless Steel 316L <i>Cold rolling 50% - Thermal cycling 4</i> Siklus Perbesaran (a) 500x (b) 1000x dan <i>Cold rolling 90% - Thermal cycling 4</i> Siklus Perbesaran (c) 500x (d) 1000x	34
Gambar 4. 10. Hasil Pengamatan Struktur Mikro Stainless Steel 316L <i>Cold rolling 50% - Thermal cycling 5</i> Siklus Perbesaran (a) 500x (b) 1000x dan <i>Cold rolling 90% - Thermal cycling 5</i> Siklus Perbesaran (a) 500x (b) 1000x	35
Gambar 4. 11. Grafik Perbandingan Rata-Rata Nilai Kekerasan Spesimen Awal <i>Stainless Steel 316L, Cold Rolled, dan Cold Rolled-Thermal cycling</i>	36

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Standar Sifat Mekanik Stainless Steel Implant Quality (ASTM F138-13a, 2014).	7
Tabel 2. 2. Standar Komposisi Kimia Stainless Steel Implant Quality (ASTM F138-13a, 2014)	7
Tabel 2. 3. Rata-Rata Ukuran Butiran Sampel Cold Rolled dan Cold Rolled-Thermally Cycled (Fahmi Mubarak, Amanda Rosalina, 2021)	11
Tabel 3. 1. Label Spesimen Uji Stainless Steel 316L	20
Tabel 3. 2. Proses Tahapan <i>Thermal cycling</i>	25
Tabel 4. 1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Stainless Steel 316L	26
Tabel 4. 2. Hasil Pengujian Micro Vickers Hardness Pada Stainless Steel 316L, <i>Cold Rolled</i> 50% dan 90%, <i>Cold Rolled-Thermal cycling</i> 900°C 35s dengan Siklus 2x, 3x, 4x, 5x ..	27

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan penduduk di Indonesia menyebabkan peningkatan mobilisasi masyarakat melonjak setiap tahunnya terutama dalam penggunaan transportasi umum dan kendaraan pribadi. Tentunya cedera fraktur akibat kecelakaan lalu lintas tidak lagi asing ditemui di Indonesia. Menurut Badan Penelitian dan Pengembangan Kesehatan (2018), kasus fraktur di Indonesia mencapai prevalensi sebesar 5.5%. Bagian tubuh yang terkena cedera terbanyak adalah anggota gerak bagian bawah (67,9%) dan anggota gerak bagian atas (32,7%) (Risksedas, 2018). Laporan dari (*World Health Organization*, 2018) menyatakan bahwa 5,6 juta orang meninggal dunia dan 1,3 juta orang menderita fraktur akibat kecelakaan lalu lintas. Kasus cedera lalu lintas ini adalah penyebab kematian ke delapan untuk semua kelompok umur di seluruh dunia, sehingga menciptakan permintaan yang tinggi untuk perawatan medis dan layanan rehabilitasi (*World Health Organization*, 2018).

Fraktur atau patah tulang umumnya disebabkan oleh benturan yang sangat keras secara mendadak. Salah satu kasus penyebab patah tulang adalah kecelakaan lalu lintas yang memerlukan pertolongan pertama secepat mungkin. Selain respon medis yang cepat, tindakan selanjutnya adalah penyembuhan atau rehabilitasi. Rehabilitasi untuk patah tulang biasanya memerlukan alat bantu ortopedis seperti gips dan implan tulang. Implan tulang adalah alat yang berfungsi untuk mengembalikan dan mempertahankan posisi tulang yang mengalami fraktur ke posisi anatomisnya agar proses penyembuhan alami dari tubuh dapat berlangsung. Alat implan bekerja dengan cara dipasangkan pada tulang dan dibiarkan di dalam tubuh hingga proses penyembuhan terlihat cukup stabil. Oleh karena itu, alat implan harus terbuat dari material yang tidak mengganggu proses internal tubuh. Material seperti yang dideskripsikan tersebut adalah hasil dari teknologi biomaterial. Biomaterial adalah material yang digunakan untuk berkontak langsung dengan sistem biologi tubuh yang bertujuan untuk memperbaiki (*repair*), memulihkan (*restore*) atau mengganti (*replace*) jaringan yang rusak/sakit. Material implan yang banyak dipakai dalam bidang ortopedi untuk saat ini adalah jenis logam baja tahan karat atau *stainless steel* dan titanium (Risksedas, 2018)

Stainless steel AISI 316L merupakan salah satu tipe baja tahan karat yang sering dipakai sebagai bahan biomaterial yang umum digunakan bidang medis untuk material implan karena harganya yang lebih murah dibandingkan dengan titanium. *Stainless steel* AISI 316L adalah baja tahan karat dengan fasa austenitik. Kandungan kromium material ini juga cukup tinggi di angka 16-28 wt% yang memungkinkan material tersebut mencegah korosi yang diakibatkan reaksi elektrokimia di dalam tubuh manusia. Maka dari itu, material ini sesuai digunakan sebagai bahan untuk membuat implan tulang (Nanda, 2016)

Produksi implan menggunakan material *stainless steel* sudah ada di Indonesia. Berlokasi di Mojokerto, PT. Pelopor Teknologi Implantindo didirikan untuk mengembangkan produk implan tulang di Indonesia guna mengurangi ketergantungan pada implan impor. Meskipun implan lokal sudah memenuhi standar internasional ASTM F138 untuk AISI 316, implan impor masih lebih unggul karena memiliki kualitas yang jauh di atas persyaratan minimum sehingga produk lokal sulit bersaing dengan produk impor. Perbedaan dalam ukuran butiran (*grain size*) dan keseragaman butiran (*homogeneity/uniform*) pada struktur mikro menjadi faktor utama yang mempengaruhi sifat material dan membedakan kualitas kedua implan tersebut (Mubarok, Fausia, Sutikno, Mahyudin, 2020). Hal ini dibuktikan oleh hasil pengujian awal perbandingan implan lokal dan implan impor *synthes* dari Swiss. Implan lokal *stainless steel* AISI 316L hasil *investment casting* memiliki kekerasan sebesar 160 HV dengan struktur mikro butiran yang

besar 83 μm dan tidak homogen. Sementara implan impor *Synthes* memiliki kekerasan sebesar 548 HV dengan struktur mikro butiran yang kecil 28 μm dan homogen. Maka dapat disimpulkan dari perbedaan di atas bahwa implan impor *Synthes* memiliki sifat kekerasan yang lebih baik yang tentunya mempengaruhi kekuatan tariknya dan kualitas implannya (Fausia, 2018).

Ukuran dan homogenitas butir yang merupakan struktur mikro dari sebuah material implan *stainless steel* memiliki pengaruh besar terhadap kualitas. Oleh karena itu, diperlukan perubahan struktur mikro untuk meningkatkan kualitas implan. Material *stainless steel* AISI 316L memiliki fasa austenitik yang membuatnya cukup stabil meski diberi energi panas yang tinggi. Maka perlu metode khusus untuk merubah struktur mikronya. Metode tersebut adalah kombinasi dari pengerjaan dingin dan perlakuan panas. Diawali dengan *forging* atau *cold rolling*, kekuatan mekanik material meningkat sehingga menyebabkan meningkatnya *stored strain energy*, namun hal ini kemudian menurunkan kekuatan ulet material menjadi sekitar hanya 10%. Agar keuletannya dapat meningkat maka diperlukan perlakuan panas *annealing* atau *thermal cycling*. Proses *thermal cycling* memiliki kelebihan karena dapat mencegah munculnya *grain growth* setelah proses rekristalisasi butiran baru yang kecil dan homogen terjadi. Dengan pengintian dan pertumbuhan butir baru yang seragam dan lebih kecil, sifat mekanik material memiliki kondisi ideal dimana tercapai keseimbangan kekuatan dan keuletan *stainless steel* AISI 316L.

Dalam penelitian ini, *austenitic stainless steel* 316L diproses *cold rolling* sampai reduksi 50% dan 90% dari ketebalan awal 10 mm dan dilanjutkan dengan proses *thermal cycling* dengan waktu penahanan 35 detik, suhu 900°C, dan variasi jumlah siklus 2x, 3x, 4x, dan 5x. Proses *cold rolling* menyebabkan adanya *stored strain energy* di dalam material dan energi ini akan dilepaskan saat proses *thermal cycling* untuk memicu pengintian butir baru yang terjadi pada batas butir *elongated grain* akibat bertumpuknya dislokasi pada daerah tersebut. Pengaruh variasi siklus dalam proses *thermal cycling* terhadap derajat reduksi hasil *cold rolling* akan dibahas dengan melihat perubahan karakteristik baja menggunakan metalografi dan pengujian kekerasan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang ada, terdapat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi siklus *thermal cycling* terhadap *austenitic stainless steel* 316L yang sebelumnya mengalami proses *cold rolling*?
2. Bagaimana sifat mekanik dan metalografi pada *cold rolled stainless steel* 316L dengan variasi siklus *thermal cycling* yang berbeda-beda?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang ada, dapat dirumuskan tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Mempelajari pengaruh variasi siklus *thermal cycling* terhadap *austenitic stainless steel* 316L yang sebelumnya mengikuti proses *cold rolling* dilihat dari perubahan nilai kekerasan.
2. Mengamati struktur mikro AISI 316L melalui metalografi pada *cold rolled stainless steel* 316L yang mengalami variasi siklus *thermal cycling* yang berbeda-beda

1.4. Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, sangatlah penting untuk membatasi masalah guna mengatasi masalah yang berkembang dalam penelitian dan dapat mencapai tujuan yang diinginkan, yang meliputi:

1. Cacat pada *stainless steel* AISI 316L seperti porositas atau scratch tidak ikut diperhitungkan pada penelitian yang dilakukan.
2. Temperatur pemanasan tungku adalah konstan pada suhu 900°C serta seragam di seluruh bagian tungku dengan waktu penahanan 35 detik.
3. Perhitungan ukuran butiran dilakukan dengan metode *linear intercept method* sesuai dengan ASTM E112-12.

1.5. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat membantu berbagai kalangan. Berikut ini adalah beberapa keuntungan yang dapat diberikan:

1. Dapat meningkatkan kualitas produk lokal sehingga dapat bersaing dengan produk impor.
2. Dengan dilakukannya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan masukan kepada kalangan industri di Indonesia mengenai pengaruh *cold rolling* dan *thermal cycling* pada *stainless steel* AISI 316L.
3. Penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan dunia kesehatan di Indonesia, khususnya di bidang ortopedi.
4. Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat dan menambah wawasan bagi peneliti.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

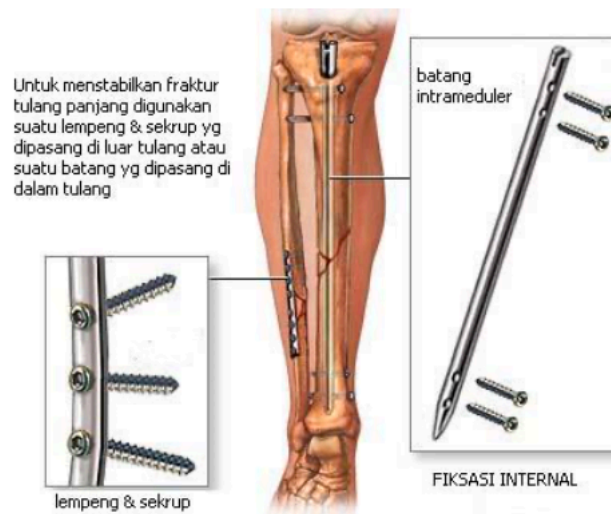
2.1. Biomaterial Implan Tulang

Biomaterial memainkan peran utama yaitu untuk memperbaiki (*repair*), memulihkan (*restore*) atau mengganti (*replace*) jaringan yang rusak/sakit dalam tubuh. Material yang digunakan harus mempunyai biokompatibilitas tinggi terhadap tubuh manusia dimana sifat material jika digunakan dalam sistem biologi haruslah aman dan bekerja selaras dengan tubuh tanpa menimbulkan efek samping yang berbahaya. Selain itu, sifat mekanik material seperti kekuatan, ketahanan aus, kekerasan dan keuletan juga sangat penting saat merancang pembuatan implan agar tidak mengganggu berjalannya pemulihan dalam tubuh.



Gambar 2. 1.Implan Tulang Stainless Steel 316L
(PT. Pelopor Implantindo)

Logam banyak digunakan sebagai bahan untuk berbagai jenis implan. Untuk saat ini material yang sering digunakan di bidang medis antara lain titanium dan *stainless steel* 316L hasil *investment casting* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Namun di antara dua opsi tersebut *stainless steel* 316L lebih sering dipilih karena harganya yang lebih murah jika dibandingkan dengan titanium walaupun jika dibandingkan berat jenisnya, *stainless steel* memiliki berat jenis yang lebih tinggi dibanding titanium. Contoh pengaplikasian biomaterial pada implan patah tulang yang ditempatkan dalam tubuh manusia ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2. Aplikasi Implan Patah Tulag
(Sutowo, Ikhsan & Kartika, 2014)

2.2. *Stainless Steel*

Stainless steel merupakan material yang tahan korosi di berbagai lingkungan, khususnya dalam lingkungan dengan suhu ruangan. Elemen utama dalam paduan *stainless steel* adalah kromium; konsentrasi kromium minimal sebesar 11 wt% dibutuhkan dalam paduan tersebut. Ketahanan korosi juga dapat diperkuat dengan elemen nikel. *Stainless steel* dibagi menjadi tiga kelas yang ditentukan oleh fasa utama pada mikrostruktur *stainless steel* yakni *martensitic*, *ferritic*, dan *austenitic* (Callister, 2007)

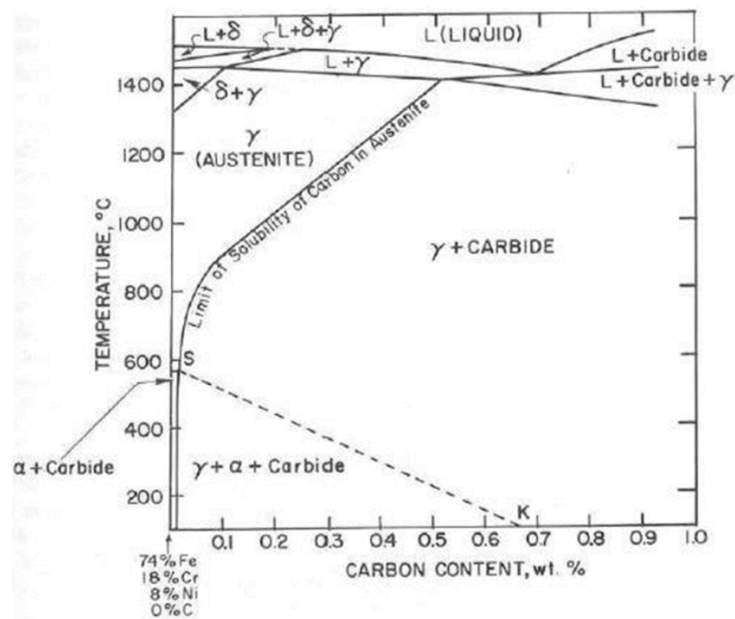
Logam yang banyak digunakan dalam biomaterial adalah *stainless steel* atau baja tahan karat karena manfaatnya seperti (Alvarado et al., 2003) :

- a. Ketahanan korosi yang tinggi, *stainless steel* menghambat korosi tinggi dengan baik di atmosfer udara maupun dalam lingkungan air.
- b. Tahan api dan panas, kombinasi paduan kromium dan nikel membantu mempertahankan kekuatan *stainless steel* pada suhu tinggi.
- c. Material higienis, *stainless steel* sangat mudah dibersihkan dan kriteria ini menjadikannya sesuai untuk biomaterial.
- d. *Long term value*, harga total *life cycle* baja *stainless steel* biasanya paling murah dibandingkan material yang lain.
- e. Mudah difabrikasi, teknik pembuatan baja modern membuat baja *stainless steel* dapat dipotong, bentuk, las, dan dibuat semudah baja tradisional.
- f. Tahan benturan, sifat ketangguhan *stainless steel* tinggi sehingga tahan menahan benturan.
- g. Keuntungan *strength-to-weight*, kekerasan *stainless steel* membuatnya ideal untuk perlakuan dingin atau *cold working* dan pada bentuk tipis.
- h. Penampilan menarik, lapisan terang *stainless steel* memberikan tampilan yang modern dan menarik.

2.3. *Austenitic Stainless Steel*

Austenitic stainless steel memiliki kandungan nikel dan kromium yang tinggi sehingga nikel menurunkan temperatur transformasi dan kromium memperlambat laju pendinginan kritis, maka dari kombinasi tersebut terciptalah struktur austenitik pada suhu ruangan. Layaknya semua logam austenitik, mereka bersifat non-magnetik dan tahan korosi. *Austenitic stainless*

steel tidak dapat diperkuat menggunakan perlakuan panas, namun dapat diperkuat menggunakan proses pendinginan. Logam ini adalah logam paling ulet di antara semua jenis *stainless steel* dan dapat dibentuk dengan mudah (Kempster, 1979).



Gambar 2. 3. Diagram Fasa Baja Tahan Karat Austenitik (Kumar et al., 2009)

Tentunya, *austenitic stainless steel* tidak akan mengalami perubahan fasa karena memiliki fasa austenitik yang stabil hingga pada temperatur tinggi sampai 1200°C. Gambar 2.3 menunjukkan diagram fasa *austenitic stainless steel*. Dapat dilihat bahwa fasa *austenite* tidak berubah sampai temperatur yang tinggi seperti pada temperatur ruangan. Kelarutan karbon pada *austenite* akan menurun seiring naiknya temperatur. Ketahanan material terhadap korosi akan menurun ketika terbentuk presipitat karbida krom pada batas butir. Presipitat ini terbentuk karena terjadi reaksi ikatan senyawa *chromium* dengan karbon dari butiran *austenite* pada temperatur 500 – 800°C. Maka kadar karbon *austenitic stainless steel* 316L diturunkan di bawah 0.03wt% agar mencegah terbentuknya karbida krom karena minimnya kadar karbon. (Kumar et al., 2009)

Austenitic stainless steel Jenis implan logam biomaterial yang sering dipakai untuk operasi bedah ortopedis adalah implan *stainless steel* 316L. *Stainless steel* 316L memiliki fasa *austenite* dan memiliki kandungan kromium antara 16 – 28%. Unsur paduan nikel merupakan penstabil fasa *austenite* sehingga penambahan unsur tersebut pada *stainless steel* 316L akan memberikan fasa *austenite* yang stabil sampai temperatur kamar. Penstabilan ini menyebabkan proses modifikasi *stainless steel* 316L tidak dapat dilakukan dengan perlakuan panas yang umum dipakai karena fasa *austenite* tidak akan berubah pada temperatur tinggi. Maka diperlukan proses tambahan agar perubahan fasa pada *stainless steel* 316L dapat terjadi. Seperti pada penelitian ini, *stainless steel* 316L akan diperlakukan proses pendinginan *cold rolling* dan kemudian dilanjutkan dengan perlakuan panas *thermal cycling*. Selain itu, *austenitic* memiliki struktur kristal FCC sehingga dapat di *cold rolling* sampai derajat reduksi 90°. Material *stainless steel* 316L memiliki sifat mekanik dan komposisi kimia yang ditetapkan oleh standar internasional ASTM F138-13a seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1 dan tabel 2.2. (Mabruri, 2012)

Tabel 2. 1. Standar Sifat Mekanik Stainless Steel Implant Quality
(ASTM F138-13a, 2014)

Condition	Diameter (mm)	Ultimate Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength (Mpa)	Elongation (%)
Annealed	1.6	490	190	40

Tabel 2. 2. Standar Komposisi Kimia Stainless Steel Implant Quality
(ASTM F138-13a, 2014)

Element	Composition, %wt
Carbon (C)	0.030 max
Manganese (Mn)	2.00 max
Phosphorous (P)	0.025 max
Sulfur (S)	0.010 max
Silicon (Si)	0.750 max
Chromium ^A (Cr)	17.00 - 19.00
Nickel (Ni)	13.00 - 15.00
Molybdenum ^A (Mo)	2.25 - 3.00
Nitrogen (N)	0.10 max
Copper (Cu)	0.50 max
Iron (Fe)	balance

Persyaratan komposisi kimia *Stainless Steel* harus memenuhi hal berikut:
 $\% \text{Cr} + 3.3 \times \% \text{Mo} \geq 26.0$ (ASTM F138-131, 2014)

2.4. Metode Penguatan Material

Penguatan material dapat berdampak terhadap peningkatan sifat mekanik dapat terjadi dengan berbagai cara. Metode-metode tersebut antara lain pengerasan tegangan (*strain hardening*), penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*), dan penghalusan butir (*grain size reduction*). Hubungan antara gerakan dislokasi dan sifat mekanik logam penting untuk dipahami saat mempelajari mekanisme penguatan logam. Hampir semua teknik penguatan material bergantung pada prinsip sederhana yakni mencegah pergerakan dislokasi untuk menguatkan dan mengeraskan sebuah material. (Callister, 2007)

2.4.1. Pengerasan Tegangan (*Strain Hardening*)

Pengerasan regangan (*strain hardening*) atau biasa disebut *work hardening* adalah penguatan logam dengan deformasi plastis. Arti dari deformasi plastis sendiri adalah perubahan bentuk secara permanen atau tidak dapat kembali seperti semula. Penguatan

ini disebabkan oleh gerakan dislokasi pada struktur kristal material. Pergeseran (*slip*) pada bidang kristal tertentu menyebabkan deformasi material. Jika gaya yang menghasilkan *slip* dihitung dengan mengasumsikan bahwa semua atom dalam bidang *slip* kristal bergeser pada saat yang sama, gaya akan menjadi sangat besar. Dislokasi adalah cacat kisi yang terlihat pada kristal. Pergerakan dislokasi pada bidang *slip* menghasilkan deformasi dengan tegangan yang sangat kecil yang dibutuhkan.

Ketika kristal diiris menjadi pelat tipis dan dipoles secara elektrolisis, berbagai ketidaksempurnaan yang dikenal sebagai dislokasi dapat dideteksi di bawah mikroskop elektron. Dislokasi adalah cacat kisi yang mempengaruhi kekuatan bahan kristal. Dislokasi akan bergerak ke permukaan luar sebagai akibat dari tegangan eksternal, sehingga menghasilkan deformasi. Dislokasi berinteraksi antara satu sama lain saat bergerak. Beberapa hasil reaksi mudah untuk bergerak, sementara yang lain sulit untuk bergerak. Titik yang sulit untuk bergerak bertindak sebagai sumber dislokasi baru (multiplikasi dislokasi). Akibatnya, kepadatan dislokasi meningkat. Semakin tinggi kerapatan dislokasi, semakin sulit dislokasi untuk bergerak, sehingga kekuatan logam meningkat.

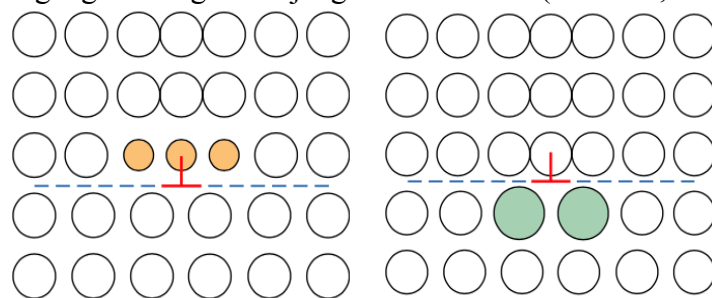
Pengujian tarik menyebabkan penguatan regangan (*strain hardening*). Regangan meningkat selama prosedur uji tarik, meningkatkan kekuatan tarik, kekuatan mulur, dan kekerasan sambil menurunkan kepadatan dan konduktivitas listrik. Hal ini juga menyebabkan penurunan keuletan. (Avner, 1974)

2.4.2. Penguatan Larutan Padat (Solid Solution Strengthening)

Logam paduan biasanya lebih kuat daripada logam murni karena ketidakmurnian (*impurity*) atom yang memasuki larutan padat memberikan tegangan kisi di sekitar atom induknya.

Regangan kisi disebabkan oleh kontaminasi interstisial atau *impurity* substitusi dalam larutan. Akibatnya, *impurity* ini akan berinteraksi dengan bidang dislokasi regangan dan mencegah pergerakan dislokasi.

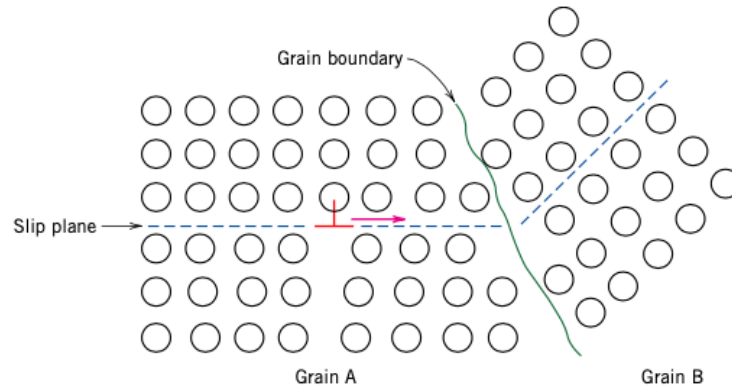
Impurity cenderung menyebar dan memisah di sekitar pusat dislokasi untuk mencari atom dengan radius yang sama dengannya. Hal ini akan menyebabkan berkurangnya tegangan energi dan “jankar” dislokasi. (Callister, 2007)



Gambar 2. 4. *Impurity* Penyebab Dislokasi (Callister, 2007)

2.4.3. Penghalusan Butir (*Grain Size Reduction*)

Penghalusan butir (*grain size reduction*) adalah salah satu metode yang paling efektif untuk penguatan material dengan mencegah pergerakan dislokasi yang bergerak melintasi batas butir (*grain boundary*).



Gambar 2. 5. Dislokasi Butir
(Callister, 2007)

Mengecilnya ukuran butir akan meningkatkan batas butir per satuan volume sekaligus mengurangi garis edar bebas dari *slip* yang berkelanjutan. Untuk membuat atau mengembangkan dislokasi baru pada butir berikutnya, maka pergerakan butir memerlukan tegangan yang tinggi.

Bidang *slip* tidak akan berlanjut atau berubah arah, sehingga membentuk penghalang batas butir (*grain boundary*) terhadap gerakan dislokasi. Sudut kecil dari lapisan butir membuatnya tidak efektif dalam menahan dislokasi. Sudut besar dari lapisan butir dapat menahan *block slip* dan meningkatkan kekuatan material. Dislokasi baru dalam pertambahan butir diperkirakan akan dipicu oleh konsentrasi tegangan di ujung *slip plane*.

Material dengan butir yang halus akan lebih keras dan kuat daripada material berbutir kasar. Hal ini disebabkan karena material berbutir halus memiliki lebih banyak permukaan pada total area lapisan butir, yang membatasi pergerakan dislokasi. Karena lebih banyak hambatan dalam pergerakan dislokasi karena banyaknya batas butir, material menjadi lebih kuat. Luas permukaan batas butir cenderung meningkat karena butir yang lebih halus akan meningkatkan batas butir. (Callister, 2007)

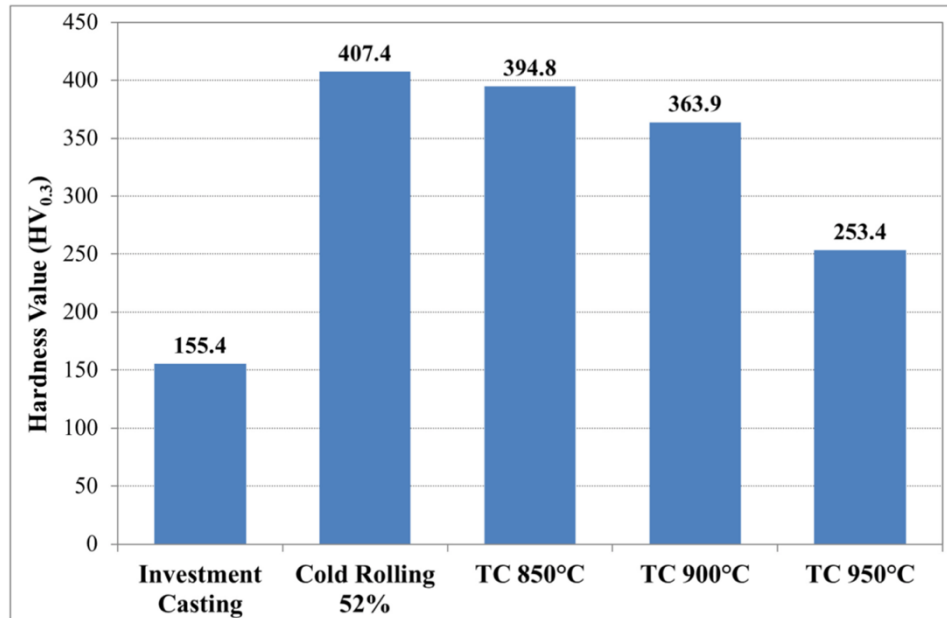
2.5. Grain Refinement Austenitic Stainless Steel

Pada penelitian ini implan *stainless steel* 316L diperbaiki sifat mekaniknya dengan mengecilkan ukurannya. Pada temperatur kamar, *austenitic stainless steel* memiliki fasa austenitik yang stabil sehingga tidak akan terjadi perubahan fasa selama pemanasan dan pendinginan. Akibatnya, penghalusan butiran hanya dapat dicapai melalui proses rekristalisasi. Proses untuk membuat butiran baru dapat dipicu dengan adanya tegangan sisa yang dihasilkan oleh proses *cold rolling* (Kumar et al., 2009).

Cold rolling diterapkan untuk memberikan deformasi plastis melalui *strain hardening* sehingga menghasilkan banyak tegangan sisa pada material saat proses *cold roll*. Kemudian, keuletan material akan menurun seiring dengan perubahan bentuk butiran dan kenaikan kekuatan tarik (Misra et al., 2010). *Severe Plastic Deformation*, *Thermo-Mechanical Treatment*, dan *Thermal cycling* adalah proses yang biasanya digunakan untuk mengubah butiran pada *austenitic stainless steel* (Karjalainen et al., 2008).

(Mubarok, Fausia, Sutikno, Mahyudin, 2020) melakukan penelitian mengenai “pengaruh *thermal cycling* pada implant *stainless steel* 316L terhadap sifat mekanik dari struktur mikro” menyatakan bahwa pada suhu 950°C setelah *thermal cycling* terjadi rekristalisasi pada batas butir, sehingga memiliki ukuran butir rata-rata sebesar 22,46 μm dengan bentuk *spherical* atau bulat. Penelitian dilakukan dengan *cold rolling* material 50% kemudian dilakukan *thermal*

cycling pada suhu antara 850 °C, 900 °C, dan 950 °C selama 35 detik, siklus dilakukan sebanyak 4 kali. Setelah *thermal cycling*, dilakukan pendinginan di udara sampai temperatur kamar. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur *thermal cycling* terhadap *austenitic stainless steel* 316L hasil *investment casting* dan mengetahui pengaruh dari proses pada sifat mekanik dan metalografinya (Mubarok, Fausia, Sutikno, Mahyudin, 2020).

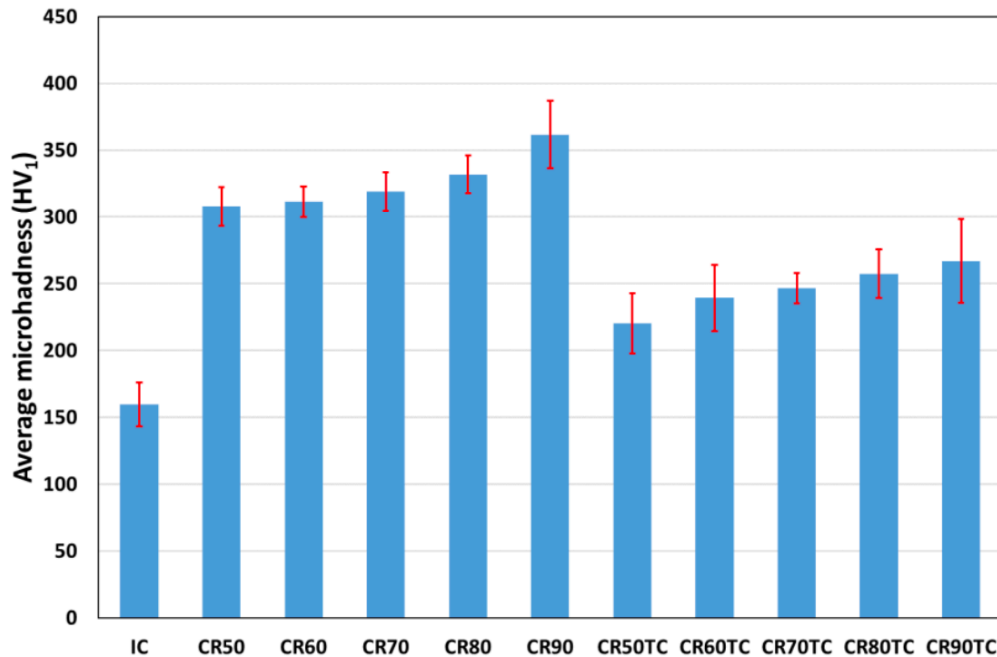


Gambar 2. 6. Grafik Perbandingan Hasil Kekerasan Stainless Steel 316L *Cold rolling*, *Thermal cycling*, dan Stainless Steel 316L Merk Synthes (Mubarok, Fausia, Sutikno, Mahyudin, 2020)

Gambar 2.6. menunjukkan nilai kekerasan untuk setiap sampel yang diuji. Sampel *investment casting* hanya memiliki kekerasan 155.4 HV dan mengalami peningkatan kekerasan menjadi 407.4 HV setelah dilakukan perlakuan *cold rolling* 52%. Kekerasan yang tinggi menunjukkan bahwa material memiliki *stored strain energy* yang cukup besar yang dihasilkan setelah beberapa kali proses pengerolan dingin. Setelah perlakuan *thermal cycling*, spesimen mengalami penurunan kekerasan karena *stored strain energy* dilepaskan secara bertahap karena terpapar suhu yang tinggi. *Thermal cycling* pada suhu 850°C dan 900°C hanya mengalami sedikit penurunan kekerasan yang menunjukkan bahwa *stored strain energy* hanya dilepaskan sedikit saja. Sehingga kondisi tersebut tidak memungkinkan terjadinya rekristalisasi butiran baru. Sedangkan suhu *thermal cycling* yang lebih tinggi pada 950°C menghasilkan kekerasan yang paling rendah karena banyaknya *stored strain energy* yang dilepaskan dan meningkatkan laju rekristalisasi sehingga pengintian butiran baru yang lebih kecil terjadi. (Mubarok, Fausia, Sutikno, Mahyudin, 2020).

(Fahmi Mubarok, Amanda Rosalina, 2021) melakukan penelitian berjudul “pengaruh perlakuan *thermal cycling* pada *cold rolled* AISI 316L dengan derajat reduksi berbeda-beda terhadap struktur mikro dan kekerasan”. Penelitian ini menyatakan bahwa pada suhu *thermal cycling* 900°C dengan derajat reduksi 90% terjadi rekristalisasi pada batas butir dan spesimen memiliki ukuran butir yang kecil sebesar 2.87 μm dan kekerasan sebesar 266.9 HV. Dalam penelitian ini digunakan variasi reduksi bertahap pada ketebalan akibat proses *cold rolling* yaitu 52%, 60%, 69%, 80%, 90% dan diberikan perlakuan *thermal cycling* 900°C dengan waktu penahanan selama 35 detik, sebanyak 4 kali. Setelah *thermal cycling* dilakukan pendinginan di udara sampai temperatur kamar. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi derajat reduksi bertahap *cold rolling* pada *austenitic stainless steel* 316L hasil *investment*

casting yang diikuti dengan *thermal cycling* dan mengetahui pengaruh dari proses pada sifat mekanik dan metalografinya (Fahmi Mubarok, Amanda Rosalina, 2021).



Gambar 2. 7. Grafik Perbandingan Rata-Rata Kekerasan Sampel Investment Casting, Cold Rolled dan Cold Rolled Thermally Cycled (Fahmi Mubarok, Amanda Rosalina, 2021)

Tabel 2. 3. Rata-Rata Ukuran Butiran Sampel Cold Rolled dan Cold Rolled-Thermally Cycled (Fahmi Mubarok, Amanda Rosalina, 2021)

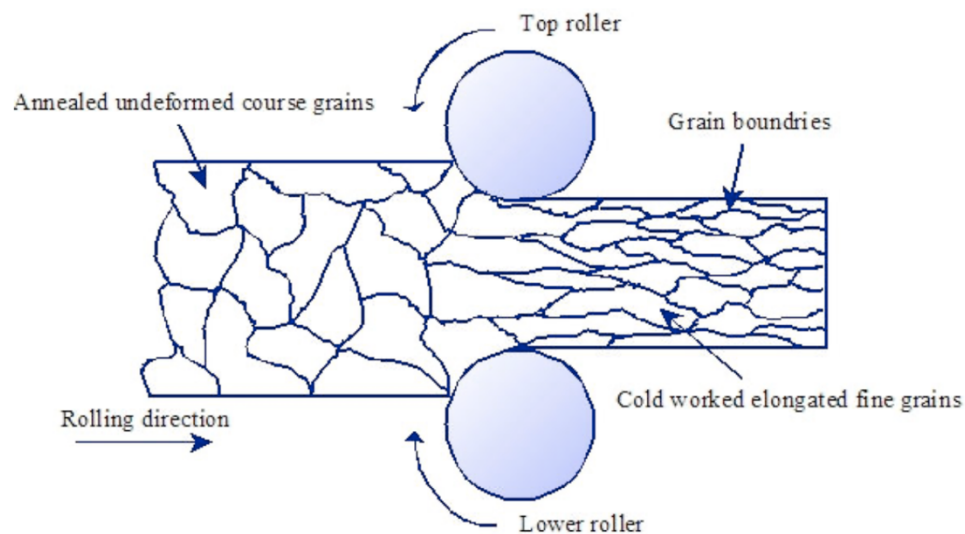
Sample name	CR50	CR60	CR70	CR80	CR90	CR50TC	CR60TC	CR70TC	CR80TC	CR90TC
Mean grain size (μm)	18.29	14.88	11.45	9.1	8.38	7.43	6.50	5.37	3.26	2.87
Standard Deviation (μm)	7.77	5.82	4.64	0.79	1.33	4.77	3.85	2.94	0.71	0.85

Gambar 2.7 menunjukkan peningkatan nilai kekerasan *stainless steel 316L thermal cycling* 900°C di setiap reduksi *cold rolling*. Jika dibandingkan, rata-rata kekerasan pada spesimen *stainless steel* hasil *cold rolling* cenderung lebih tinggi dari hasil *investment casting* dikarenakan *stored strain energy* hasil proses *cold rolling* sehingga kekerasan akan meningkat dari sebelum dilakukannya *cold rolling*. Sedangkan untuk spesimen hasil *cold rolling-thermal cycling* memiliki rata-rata kekerasan yang lebih tinggi daripada *investment casting* dikarenakan perlakuan panas *thermal cycling* pada temperatur tinggi menyebabkan adanya pengintian butiran baru pada batas butir dengan ukuran butiran yang jauh lebih kecil. *Thermal cycling* bertujuan untuk memicu rekristalisasi butiran baru dengan bentuk yang homogen dan ukuran lebih kecil, hal ini dikarenakan ukuran butiran yang kecil dan halus cenderung semakin memperbanyak batas butir sehingga *surface area* batas butir hasil *stored strain energy* akan semakin tinggi dan menyebabkan rekristalisasi mudah terjadi. Dari hasil yang didapatkan (Fahmi Mubarok, Amanda Rosalina, 2021) pada tabel 2.3, semakin tinggi tingkat deformasi

dingin maka ukuran butiran rekristalisasi akan semakin halus dan kecil. Spesimen CR50TC, CR60TC dan CR70TC mengalami rekristalisasi sebagian dimana pengintian butiran baru hanya terjadi di sebagian area saja dan belum menyeluruh. Spesimen CR80TC dan CR90TC mengalami rekristalisasi menyeluruh dimana pengintian terjadi di seluruh area dan berukuran kecil dan homogen. Hal ini juga dibuktikan dengan standar deviasi yang rendah yang mengindikasikan butiran hasil *cold rolling* telah berubah menjadi butiran yang lebih halus melalui mekanisme rekristalisasi. Tingginya jumlah *stored strain energy* dalam sampel menyebabkan rekristalisasi lebih mudah terjadi (Fahmi Mubarok, Amanda Rosalina, 2021).

2.6. Cold rolling

Cold rolling adalah proses pengerolan untuk menipiskan material yang dilakukan di bawah suhu rekristalisasi. *Cold rolling* dilakukan pada suhu ruangan. Pada proses pengerjaan dingin diperlukan gaya yang lebih besar daripada pengerjaan panas dan mengakibatkan sifat mekanis logam akan meningkat dengan signifikan. Pada proses pengerolan dingin, akan terjadi perubahan deformasi dan perubahan butir dari butir *equiaxed* menjadi butir yang memanjang. Jumlah pengerjaan dingin yang dapat dialami logam tergantung kepada kekuatan setiap logam, semakin ulet suatu logam, maka makin besar pengerjaan dingin yang dapat dilakukan. Logam murni relatif lebih mudah mengalami deformasi daripada logam paduan, hal ini karena penambahan unsur paduan cenderung meningkatkan kekuatan mekanis dan kekerasan dari logam murni tersebut (Kalpakjian, 1984). Skema *cold rolling* ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8. Skema Pengerjaan *Cold rolling*
(Magda, 2009)

Beberapa jenis baja paduan seperti baja tahan karat austenitik diberikan reduksi pengerolan bertahap sampai derajat reduksi 90%. Hal ini dapat dilakukan karena baja tahan karat austenitik memiliki fasa penstabil *austenite* dan struktur kristal FCC sehingga mempunyai keuletan yang tinggi. (Mabruri, 2012). Proses *cold rolling* akan menghasilkan permukaan benda kerja yang lebih halus jika dibandingkan dengan baja yang diproses pengerolan panas (*hot rolling*). Selain meningkatkan kekuatan mekanik material, *cold rolling* menyebabkan naiknya *stored strain energy* secara signifikan sehingga kekuatan naik drastis namun keuletannya turun secara signifikan. Maka untuk memperoleh keseimbangan kekuatan dan keuletan, diperlukan proses *thermal cycling* yang akan memicu rekristalisasi butiran baru dengan bentuk yang homogen dan ukuran yang lebih kecil sehingga keuletan material akan meningkat kembali. Adanya butiran baru yang halus dibanding butiran *elongated grain* dari proses *cold rolling* akan sedikit

menurunkan kekuatan sekaligus menaikkan keuletan materialnya sesuai dengan formula Hall-Petch (Callister, 2007) :

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

Dimana :

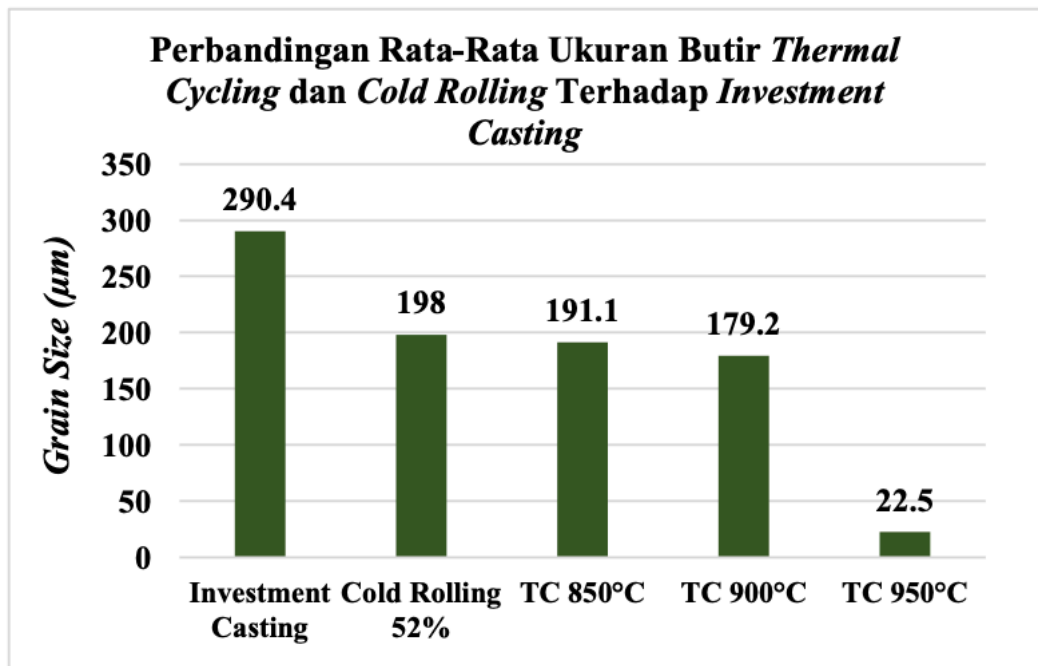
- σ_y : kekuatan *yield*
- d : grain size
- k : koefisien penguatan (konstanta spesifik pada setiap material)
- σ_0 : konstanta pada material untuk tegangan awal

Dapat dilihat bahwa ada 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. (Callister, 2007)

2.7. *Thermal cycling*

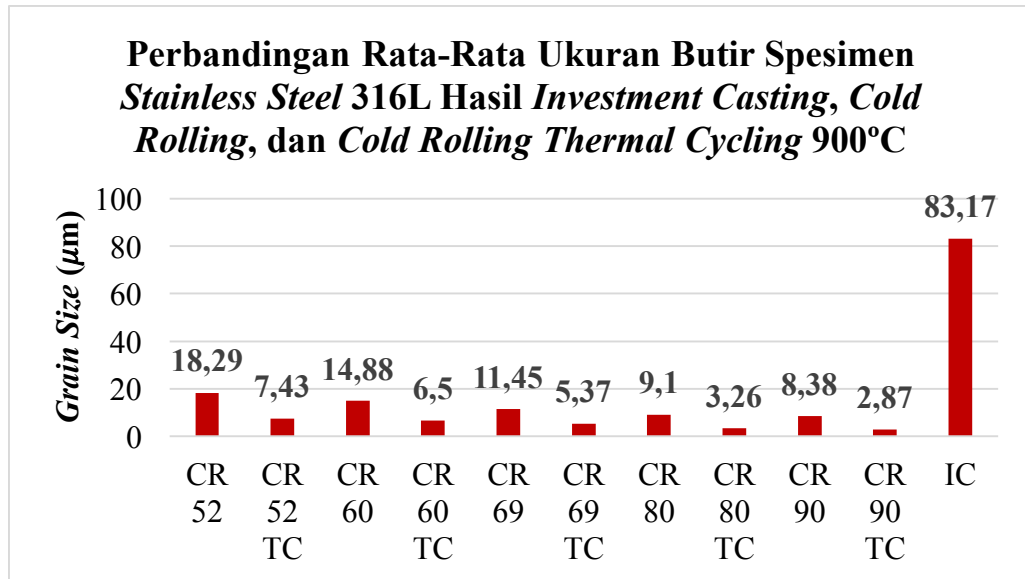
Thermal cycling adalah jenis perlakuan panas dimana material dipanaskan hingga temperatur tinggi dan kemudian diturunkan dengan pemberian temperatur rendah. Proses ini terdiri dari *cold rolling* dan *annealing* yang dilakukan secara berulang untuk memperkecil ukuran butir. Mekanisme dasar dari penghalusan butir melalui proses *thermal cycling* adalah sebagai berikut (Kumar et al., 2009) :

- a. Pengintian butiran baru terjadi di daerah dengan *stored strain energy* yang tinggi saat awal siklus termal dan menghasilkan peningkatan pada *strain heterogeneity* antara daerah yang telah rekristalisasi dan daerah tegangan sisa.
- b. Pada siklus termal selanjutnya, pengintian terjadi di daerah tegangan sisa. Hal ini dikarenakan *stored strain energy* di daerah tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan daerah yang sudah terekristalisasi.
- c. Gaya yang menyebabkan distorsi pada batas butir untuk pertumbuhan butir baru hasil dari rekristalisasi dikarenakan kecepatan difusi lambat dan pergerakan yang lemah pada batas butir di *austenite* (Pankaj Sharma, 2011).



Gambar 2. 9. Grafik Perbandingan Rata-Rata Ukuran Butir Pada *Cold rolling* dan *Thermal cycling* Terhadap *Investment Casting* (Mubarok, Fausia, Sutikno, Mahyudin, 2020)

Gambar 2.9. menunjukkan perbandingan ukuran butir pada sampel material *thermal cycling* dengan *investment casting* dan *cold rolling*. Rekristalisasi terjadi pada *thermal cycling* temperatur 950°C dibuktikan dengan ukuran butiran yang kecil berukuran 22.5 µm. Temperatur *thermal cycling* ini ditemukan lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian (Nanda, 2016), rekristalisasi terjadi pada temperatur 900°C dari jumlah reduksi *cold rolling* (Mubarok, Fausia, Sutikno, Mahyudin, 2020). Teori ini juga didukung oleh penelitian (Fahmi Mubarok, Amanda Rosalina, 2021) pada gambar 2.10 yang menunjukkan perbandingan ukuran butir pada sampel material *thermal cycling* dengan *investment casting* dan variasi derajat reduksi *cold rolling*. Jika diamati semakin tinggi derajat reduksi *cold rolling* maka ukuran butir semakin kecil. Adanya *thermal cycling* memicu terjadinya rekristalisasi butiran dengan melepas *stored strain energy* akibat *cold rolling*, sehingga didapatkan butiran baru yang lebih kecil dan homogen daripada butiran hasil *cold rolling* (Fahmi Mubarok, Amanda Rosalina, 2021).



Gambar 2. 10. Grafik Perbandingan Rata-Rata Ukuran Butir Spesimen Stainless Steel 316L Hasil Investment Casting, Cold rolling, dan Cold rolling Thermal cycling 900°C (Fahmi Mubarak, Amanda Rosalina, 2021)

2.7.1. Rekristalisasi

Jika dipanaskan, *austenitic stainless steel* yang telah diberi perlakuan pengerjaan dingin akan mengalami rekristalisasi kembali. Butiran yang dihasilkan akan lebih halus jika dilakukan pendinginan dengan cepat. Pendinginan udara dianggap cukup cepat untuk memicu penghalusan butir pada benda yang tipis ketebalannya. Sebelum terjadinya rekristalisasi terlebih dahulu terjadi *recovery* atau lepasnya tegangan sisa dalam kristal. Struktur kristal tidak berubah selama *recovery*, oleh karena itu karakteristik material tidak berubah. Ketika kristal memasuki rekristalisasi, maka karakteristik material mulai berubah. (Mabruri, 2012).

Rekristalisasi adalah proses pemanasan yang melibatkan pengintian dan penumbuhan 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. Namun, bentuk dendritik akan hilang setelah pengerjaan dingin dan pemanasan kembali. Kristal baru ini mula-mula muncul pada bagian kristal yang mengalami distorsi paling hebat, yaitu pada batas butir dan bidang slip (Callister, 2007). 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 (Callister, 2007). Jika pemanasan berlanjut setelah adanya pengintian butir baru, butir akan mengalami *grain growth*. Pertumbuhan butir berdampak pada suhu pemanasan. Butiran kristal yang besar memiliki *free energy* yang lebih rendah, karenanya butir kristal cenderung untuk tumbuh lebih besar hingga mencapai ukuran maksimum untuk temperatur tersebut (Callister, 2007).

(Nanda, 2016) melakukan penelitian dengan *cold rolling* diikuti dengan siklus termal berulang untuk menghasilkan ukuran butiran yang halus. Dari penelitian tersebut ditemukan bahwa siklus $n=4$ dengan *cold rolling* derajat reduksi 90% adalah nilai

optimal karena saat siklus $n > 4$ akan terjadi pertumbuhan butiran (*grain growth*) sehingga ukuran butiran tidak lagi kecil. Selain itu, diketahui bahwa diperlukan tingkat deformasi minimal sebesar 50% agar rekristalisasi butiran baru dapat terinisiasi. 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. Rekristalisasi akan meningkat setelah beberapa kali siklus termal, sedangkan struktur mikro dari deformasi dingin akan berkurang (Nanda, 2016). Akibat bertambahnya jumlah daerah yang mengalami pengintian karena tegangan sisa yang lebih besar pada material, ukuran butir rekristalisasi akan semakin kecil seiring dengan meningkatnya laju deformasi dingin (Kumar et al., 2009).

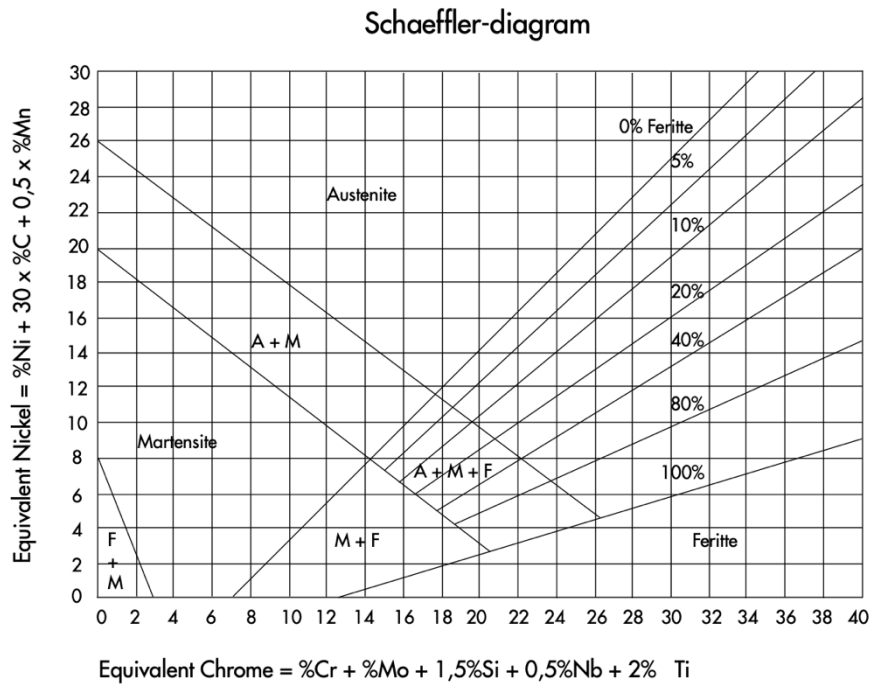
2.8. Diagram Schaeffler

Diagram *schaeffler* merupakan diagram yang dapat digunakan untuk mempresentasikan perbandingan dari kedua unsur ekivalen yang dikarenakan oleh unsur paduan dalam suatu material setelah diberi perlakuan panas pada temperatur di atas 1050°C dan didinginkan secara cepat hingga mencapai temperatur ruang. Unsur ekivalen yang dimaksud adalah kromium sebagai penstabil *ferrite* dan nikel sebagai penstabil *austenite*. Diagram ini menunjukkan batas dari fasa *austenitic*, *ferritic*, dan *martensitic* dan hubungannya dengan unsur ekivalen tersebut. Diagram *schaeffler* merupakan parameter penting untuk memprediksi susunan dari baja *austenitic* Cr-Ni dengan kandungan karbon mencapai 0.12%, namun diagram ini tidak menentukan komposisi dan volume fasa karbida. Berikut merupakan persamaan untuk menghitung nilai ekivalen dari kromium dan nikel:

$$\text{Cr}_{\text{eq}} = \text{Cr} + 2\% \text{ Si} + 1.5\% \text{ Mo} + 5\% \text{ V} + 1.75\% \text{ Nb} + 1.5\% \text{ Ti} + 0.75\% \text{ W} \dots (2.2)$$

$$\text{Ni}_{\text{eq}} = \text{Ni} + \text{Co} + 0.5\% \text{ Mn} + 0.3\% \text{ Cu} + 25\% \text{ N} + 30\% \text{ C} \dots (2.3)$$

Persamaan 2.2 menunjukkan nilai ekivalen dari kromium dimana nilai tersebut akan menunjukkan fasa α (*ferrite*) dan struktur yang terbentuk adalah BCC, sedangkan persamaan 2.3 menunjukkan nilai ekivalen dari nikel dimana nilai tersebut menunjukkan fasa γ (*austenite*) dan struktur yang terbentuk adalah FCC. Kedua persamaan di atas dapat menunjukkan pengaruh unsur paduan terhadap fasa yang terbentuk. Untuk memprediksi susunan dari baja tersebut adalah dengan mengkalkulasi hasil dari komposisi kimia pembentuk kromium dan nikel ekivalen, hasil dari kalkulasi tersebut diletakkan sesuai dengan nilai yang tersedia pada diagram untuk menentukan fasa yang terbentuk pada material baja tersebut. Berikut merupakan bentuk dari diagram *schaeffler* pada gambar 2.11. (Dacapo Stainless)



Gambar 2. 11. Diagram *Schaeffler*
(Dacapo Stainless)

2.9. Deformasi Dingin dan Kepadatan Dislokasi

Deformasi dingin secara langsung berkaitan dengan kepadatan dislokasi. Kepadatan dislokasi berhubungan dengan energi regangan yang tersimpan. Energi yang tersimpan mempercepat laju kinetik dari rekristalisasi sehingga semakin banyak butiran baru yang dibentuk. Kepadatan dislokasi sangat diinginkan untuk memahami perilaku rekristalisasi selama proses anil. Kepadatan dislokasi (ρ) pada baja tahan karat terkait dengan jumlah deformasi dingin menggunakan rumus:

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha \mu b \rho^{-1/2} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana:

- σ : tegangan aliran setelah deformasi dingin
- σ_0 : tegangan aliran awal, 210 MPa
- α : konstanta, 0.5
- μ : modulus geser, 80 GPa
- b : vektor burger, 2.49Å

masing – masing parameter untuk baja tahan karat (Raghavan,2004) (Roucoules, Pietrzyk, & Hodgson).

Model matematika Ludwigson untuk menghubungkan tegangan aliran dengan regangan untuk *austenitic stainless steel* diberikan rumus sebagai berikut:

$$\sigma = K \epsilon^n + \exp (K_1 + n_1 \epsilon) \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana K, n, K1, dan n1 adalah konstanta dari *Ludwigson's Relation*. Parameter kurva aliran yang diturunkan untuk *austeniticstainless steel* dalam *Ludwigson's Relation* diberikan sebagai:

K = 1356 MPa; n = 0,453; K1 = 5.2 dan n1 = 19.319 (Samuel & Choudhary, 2010) (Samuel & Rodriguez, 2005).

Selanjutnya, efek deformasi dingin pada kepadatan dislokasi dapat diperkirakan menggunakan hubungan *linear Bailey-Hirsch*:

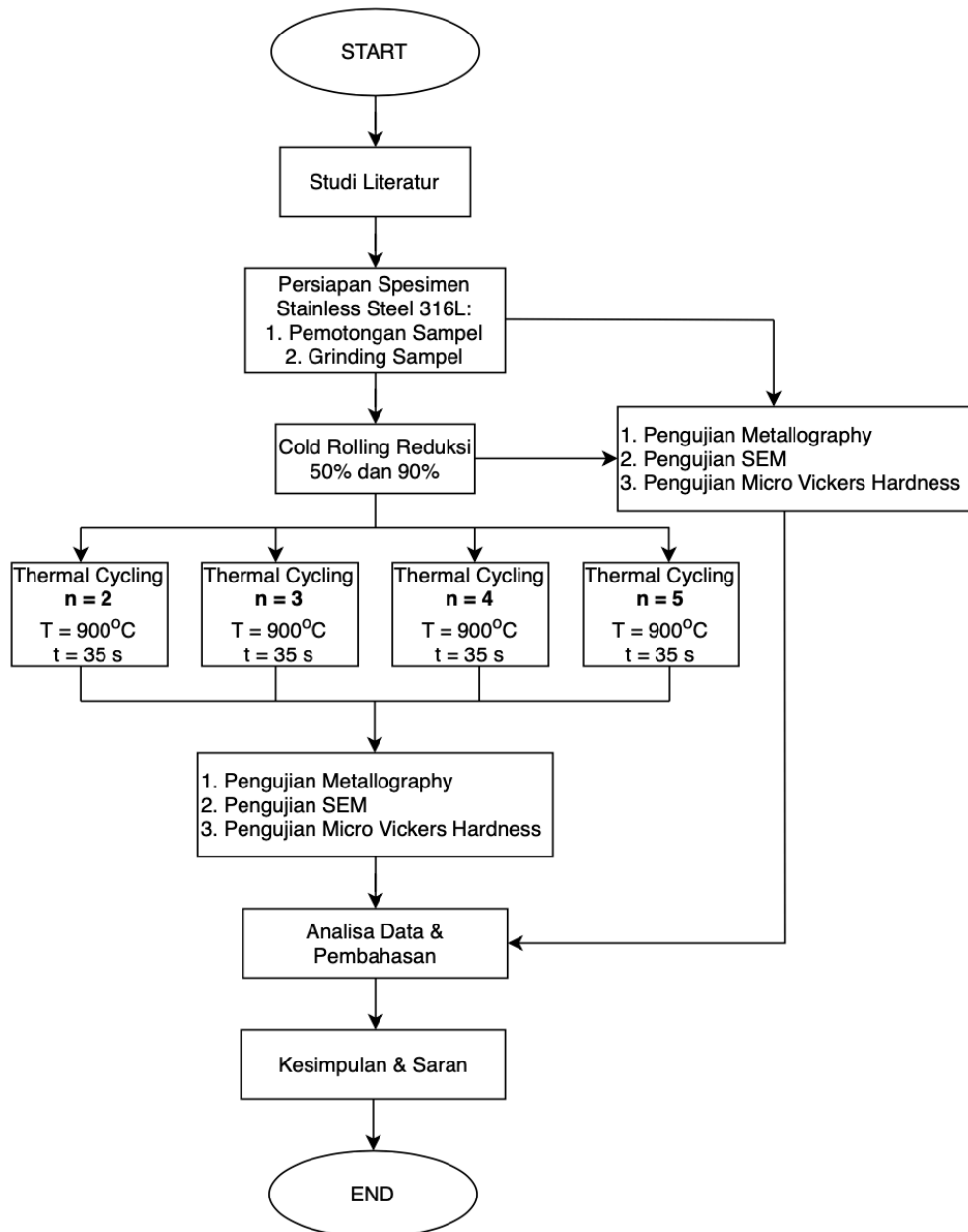
$$HV[GPa] = 0.7 + 1.5Gb\rho^{1/2} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana HV adalah kekerasan *Vickers* pada *stainless steel 316L* (GPa) G adalah *shear modulus* 80 Gpa, b adalah burger vektor struktur FCC *stainless steel* yaitu 2.49Å dan ρ adalah kepadatan dislokasi (m⁻²) (Samuel & Rodriguez, 2005).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.1 menunjukkan diagram alir penelitian yang merupakan langkah-langkah yang dilakukan selama penelitian ini.



Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian

3.2. Spesimen Uji *Stainless Steel 316L*

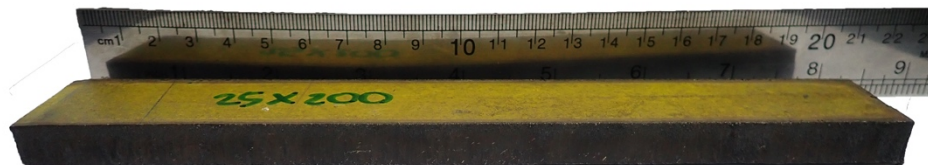
Spesimen material yang digunakan pada penelitian ini adalah *stainless steel 316L* yang berasal dari CV. Wijaya Makmur Sentosa. Dalam penelitian ini, spesimen awal akan diberlakukan perlakuan *cold rolling* dan dilanjutkan dengan perlakuan panas *thermal cycling*. Adapun pelabelan yang dilakukan pada spesimen uji untuk memudahkan analisa dan pembahasan pada penelitian ini. Berikut label untuk masing-masing spesimen uji :

Tabel 3. 1. Label Spesimen Uji *Stainless Steel 316L*

No.	Label	Deskripsi
1.	SS316L	Spesimen awal <i>stainless steel 316L</i>
2.	CR50	spesimen <i>cold rolling</i> reduksi 50%
3.	CR 90	spesimen <i>cold rolling</i> reduksi 90%
4.	CR 50 TC 2x	spesimen <i>cold rolling</i> reduksi 50% dan <i>thermal cycling</i> siklus 2x
5.	CR 50 TC 3x	spesimen <i>cold rolling</i> reduksi 50% dan <i>thermal cycling</i> siklus 3x
6.	CR 50 TC 4x	spesimen <i>cold rolling</i> reduksi 50% dan <i>thermal cycling</i> siklus 4x
7.	CR 50 TC 5x	spesimen <i>cold rolling</i> reduksi 50% dan <i>thermal cycling</i> siklus 5x
8.	CR 90 TC 2x	spesimen <i>cold rolling</i> reduksi 90% dan <i>thermal cycling</i> siklus 2x
9.	CR 90 TC 3x	spesimen <i>cold rolling</i> reduksi 90% dan <i>thermal cycling</i> siklus 3x
10.	CR 90 TC 4x	spesimen <i>cold rolling</i> reduksi 90% dan <i>thermal cycling</i> siklus 4x
11.	CR 90 TC 5x	spesimen <i>cold rolling</i> reduksi 90% dan <i>thermal cycling</i> siklus 5x

3.2.1. Spesimen Material untuk *Cold rolling*

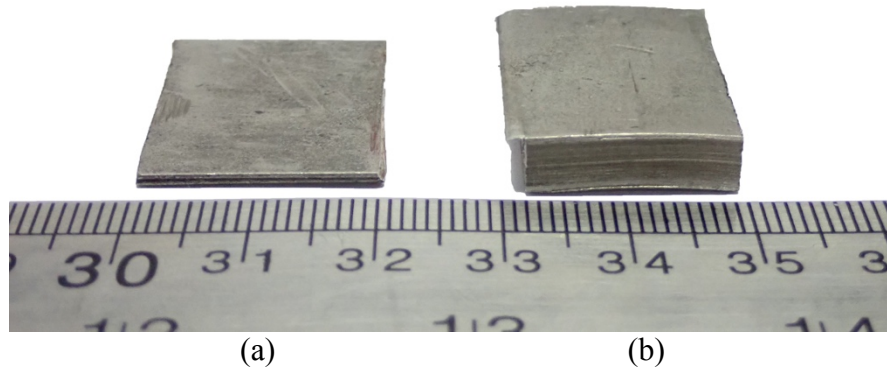
Pada gambar 3.2 adalah spesimen material *stainless steel 316L* yang diperoleh dari CV. Wijaya Makmur Sentosa, Jakarta dengan kondisi roll anneal. Spesimen ini kemudian diberi perlakuan dingin *cold rolling*. Spesimen berikut memiliki dimensi 200 mm x 20 mm x 10 mm. Setelah proses *cold rolling* reduksi 50% dan 90%, spesimen lalu dilanjutkan proses *thermal cycling*.



Gambar 3. 2. Spesimen *Stainless Steel 316L*

3.2.2. Spesimen Material untuk Thermal cycling, Uji Kekerasan Micro Vickers Hardness, Metallography

Spesimen yang telah mengalami proses *cold rolling* 50% dan 90% dapat dilihat pada gambar 3.3. Spesimen hasil *cold rolling* 50% dan 90% ini selanjutnya dipotong menjadi ukuran 20 x 23 x 5 mm untuk *cold rolling* 50% dan 20 x 25 x 1 mm untuk *cold rolling* 90%. Spesimen inilah yang digunakan untuk eksperimen variasi siklus perlakuan panas *thermal cycling* dengan temperatur 900°C selama 35 detik. Adapun variasi yang diberikan adalah 2x, 3x, 4x, dan 5x siklus pengulangan.



Gambar 3. 3. Spesimen untuk Proses *Thermal cycling* dari Hasil *Cold rolling* (a) Cold Roll 90% (b) Cold Roll 50%

3.3. Peralatan Eksperimen

Peralatan yang digunakan untuk eksperimen ini antara lain :

1. Penggaris
2. Kamera digital
3. Mesin Cutting Wheel



Gambar 3. 4. Mesin Cutting Wheel

4. Olympus Stereo Microscope



Gambar 3. 5. *Olympus Stereo Microscope Tipe*

5. Mesin Grinding dan Polishing



Gambar 3. 6. *Mesin Grinding dan Polishing*

6. Scanning Electro Microscope (SEM)
7. Mesin Micro Vickers Hardness
8. Mesin Rolling Mill
9. Tungku Pemanas

3.3.1. Pengujian Metallography

Pengujian *metallography* dilakukan untuk mengetahui struktur mikro awal *stainless steel* 316L dan setelah diberi perlakuan dingin *cold rolling*. Setelah perlakuan panas *thermal cycling* dengan berbagai variasi, dilakukan pula pengujian metallography sehingga dapat diperoleh struktur mikro yang kemudian dibandingkan dengan kondisi awal dan *cold rolling*. Adapun tahap-tahap yang perlu dipersiapkan untuk pengujian *metallography*, antara lain:

1. *Cutting* : pada proses ini, spesimen dipotong sesuai dengan dimensi yang dibutuhkan menggunakan mesin *cutting wheel*.
2. *Mounting* : proses *mounting* merupakan proses penambahan material (resin) pada spesimen untuk memudahkan dan mengamankan proses *grinding* dan *polishing*. Pada proses ini spesimen diberikan resin dan *hardener*.
3. *Grinding* : proses *grinding* adalah proses penghalusan permukaan pada material untuk memudahkan observasi dengan menggunakan kertas ampelas dengan *grit* 80, 150, 180, 320, 400, 600, 800, 1000, 2000, dan 5000. Penggosokan dilakukan dengan *grit* paling rendah pada arah sembarang hingga terbentuk goresan sejajar dan merata. Untuk *grit* tahap selanjutnya, spesimen di *grinding* dengan memutar arah peletakan sebesar 90° dari awal peletakan sampai terbentuk goresan baru.
4. *Polishing* : proses *polishing* dilakukan dengan cara menekan spesimen pada permukaan piringan yang dilapisi dengan kain halus beludru yang ditambahkan *metal polish cream*. Proses *polishing* dilakukan hingga permukaan spesimen mengkilap dan tidak terlihat goresan bekas *grinding*.
5. *Etching* : proses *etching* dilakukan dengan dua acara yaitu larutan *glyceregia* dan *lichtenegger-blöch*. Larutan *glyceregia* ini berupa asam klorida (HCl) 20 ml, asam nitrat (HNO₃) 10 ml, dan *glycerol* 20 ml diaduk hingga homogen dengan waktu pengetsaan selama 9 menit. Sedangkan, proses *lichtenegger-blöch* dengan menggunakan *ammonium difluoride* (NH₄F·HF) 20 g, *potassium metabisulfite* (K₂S₂O₅) 0.5 g, dan Aquades 100 ml dengan waktu pengetsaan selama 90 detik. Seluruh spesimen dicoba dengan dua proses etsa di atas. Setelah itu sampel akan dilihat dengan *Olympus Stereo Microscope* dengan pembesaran 50 kali sampai 2000 kali untuk menganalisis struktur mikro semua spesimen.

Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik *olympus*. Pengukuran butiran dilakukan mengikuti standar ASTM E112-12. Terdapat sebelas spesimen yang perlu disiapkan untuk pengamatan struktur mikro yaitu spesimen awal *stainless steel* 316L, *cold rolling*, dan spesimen *cold rolling-thermal cycling*. Spesimen *cold rolling* meliputi *cold rolling* reduksi 50% dan *cold rolling* reduksi 90%. Selain itu termasuk pula spesimen hasil *cold rolling* reduksi 50% dan reduksi 90% yang sudah diberi perlakuan panas *thermal cycling* pada temperatur 900°C selama 35 detik dengan yang dilakukan berulang sebanyak 2x, 3x, 4x, dan 5x. Pengambilan gambar struktur mikro dilakukan dengan perbesaran 100x, 200x, 500x dan 1000x. *Scanning Electron Microscope* juga digunakan dalam pengambilan gambar struktur mikro agar memperjelas batas butir pada setiap spesimen. Berikut hasil dari struktur mikro pada masing-masing spesimen yang telah dipersiapkan.

3.3.2. Pengujian Scanning Electron Macroscopic (SEM)

Dalam pengujian SEM ini akan didapatkan data berupa *topography*, *morphology*, komposisi, dan informasi *crystallography*. Adapun alat SEM yang digunakan adalah Hitachi Flexy SEM1000 yang dimiliki oleh Departemen Teknik Mesin ITS Surabaya.

3.3.3. Pengujian Kekerasan *Micro Vickers*

Pengujian kekerasan mikro dilakukan dengan mengikuti standar ASTM E384-17 dengan alat Shimadzu HMV Series Micro Hardness Tester yang dimiliki oleh Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Mesin ITS Surabaya. Pada penelitian ini digunakan pembebanan sebesar HV 0.3 (3 N) dengan lama peekan 10 detik dan dilakukan dengan melakukan indentasi pada 5 titik yang berbeda. Nilai kekerasan kemudian diambil dari nilai rata-rata hasil pengujian yang dilakukan.

3.3.4. Proses *Cold rolling*

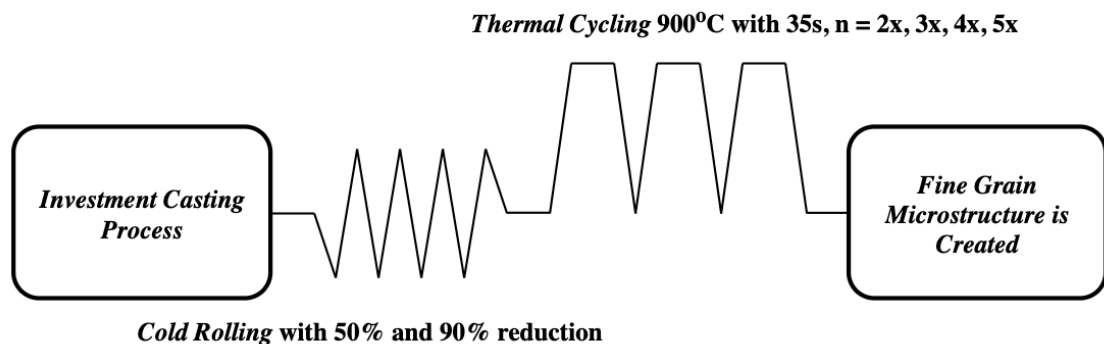
Proses *cold rolling* dilakukan dengan mesin *rolling mill* yang dimiliki oleh Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Material, Institut Teknologi Bandung. Gambar 3.7 menunjukkan mesin cold roll yang digunakan.



Gambar 3. 7. Mesin *Rolling Mill*




3.3.5. Proses *Thermal cycling*

Pengujian variasi siklus *thermal cycling* pada 316L yang telah mengalami *cold rolling* dilakukan pada tungku *furnace* Nabertherm tipe N11/HR yang dimiliki oleh Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Mesin ITS Surabaya. Proses *thermal cycling* dilakukan dengan memanaskan tungku sampai pada temperatur 900°C. Setelah itu, sampel dimasukkan dan ditahan di dalam tungku selama 35 detik. Spesimen dikeluarkan dari tungku dan dibiarkan mendingin di udara sampai temperatur sekitar 33°-37° C sebelum siklus selanjutnya dilakukan seperti terlihat pada gambar 3.8. Proses tahapan *thermal cycling* dapat dilihat pada tabel 3.2.



Gambar 3. 8. Skema *Thermal cycling*

Tabel 3. 2. Proses Tahapan *Thermal cycling*

No.	Gambar	Keterangan
1.		<p>Spesimen <i>cold rolling</i> 90% dan 50% disiapkan dan disusun.</p>
2.		<p>Lalu, spesimen dimasukkan ke dalam tungku pemanas yang sebelumnya sudah dipanaskan sampai mencapai temperatur 900°C. Waktu pemanasan dalam tungku dihitung dengan <i>stopwatch</i> selama 35 detik.</p>
3.		<p>Setelah 35 detik, spesimen dikeluarkan dan diukur temperaturnya dengan <i>thermo gun</i>. Pendinginan spesimen lalu dilakukan dengan udara sampai temperatur sekitar 33°-37°C. Lalu siklus selanjutnya dilakukan antara 2 sampai 5 kali.</p>

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, material *stainless steel* AISI 316L diberikan perlakuan dingin *cold rolling* sampai derajat reduksi 50% dan 90%. Lalu material diberikan perlakuan panas *thermal cycling* dengan temperatur 900°C dan waktu penahanan selama 35 detik serta variasi siklus 2x, 3x, 4x, 5x. Tujuan dari proses *thermal cycling* dengan siklus yang berbeda-beda ini adalah untuk mencari jumlah siklus ideal dimana rekristalisasi penuh (*full recrystallization*) telah terjadi pada spesimen 316L yang mengalami proses *cold rolling*. Hal ini karena struktur mikro hasil rekristalisasi akan memiliki butiran baru dengan ukuran butiran yang kecil dan homogen dibandingkan dengan butiran hasil *cold rolling* yang angular dan memanjang.

4.1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan menggunakan x-ray fluorescence (XRF) spektrometer. Hasil komposisi kimia spesimen *stainless steel* 316L lalu dibandingkan dengan standar ASTM F138-13a sebagai standar untuk material biomedis. Berikut tabel hasil pengujian komposisi kimia spesimen *stainless steel* 316L.

Tabel 4. 1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Stainless Steel 316L

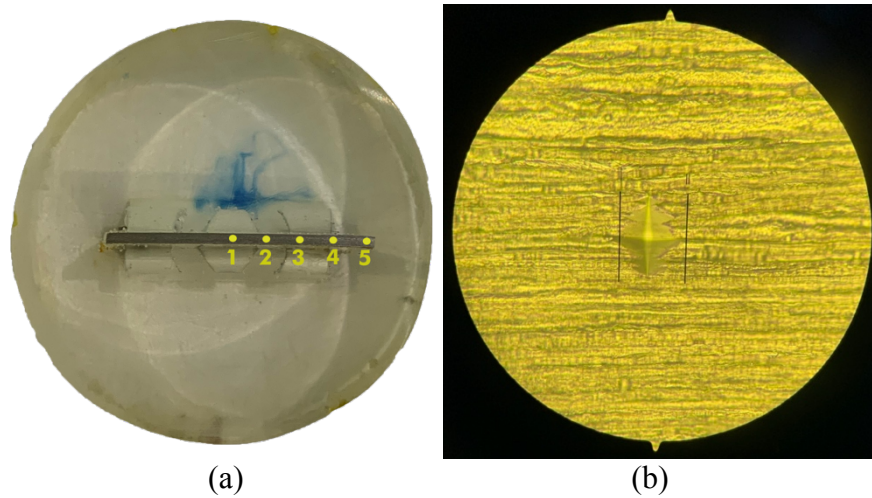
Unsur	Stainless Steel 316L	ASTM F138-13a
C	Not available	0.03
Mn	1.33	2.00
P	0.028	0.025
S	0.001	0.01
Si	0.39	0.750
Cr	16.7	17.00-19.00
Ni	10.1	13.00-15.00
Mo	2.06	2.25-3.00
N	0.04	0.1

Berdasarkan tabel 4.1, didapatkan material *stainless steel* 316L masih di bawah standar biomaterial ASTM F138-13a, yaitu kadar kromium di bawah 17.0wt%. Berdasarkan hasil pengujian komposisi kimia, spesimen memiliki kadar kromium 16.7wt%. Hal ini akan berpengaruh terhadap sifat korosif material karena kromium bertujuan untuk mencegah korosi pada material. Selain itu, dapat dilihat pula unsur nikel masih dibawah 13.00wt%. Rendahnya kandungan nikel dapat mempengaruhi kestabilan fasa *austenite* pada *stainless steel* AISI 316L karena nikel berfungsi sebagai pembentuk dan penstabil fasa *austenite*. Kadar nikel yang lebih rendah memungkinkan munculnya fasa delta ferrit atau martensit sehingga *stainless steel* akan memiliki sifat magnet walaupun lemah. Nikel juga meningkatkan keuletan dan mampu meningkatkan ketahanan terhadap korosi tegangan.

4.2. Hasil Pengujian Micro Vickers Hardness

Pengujian kekerasan *micro vickers* pada spesimen *stainless steel* 316L *cold rolling* dan *cold rolling-thermal cycling* dilakukan untuk mengetahui perbedaan nilai kekerasannya sebelum dan sesudah dilakukan perlakuan panas *thermal cycling*. Pengujian ini menggunakan

micro vickers hardness test dengan pembebanan HV 0.3 (2,942 N) selama sepuluh detik. Masing – masing permukaan spesimen diuji sebanyak lima kali dari posisi tengah ke kanan permukaan spesimen. Adapun contoh peletakan indentasi pada setiap spesimen seperti gambar 4.1.



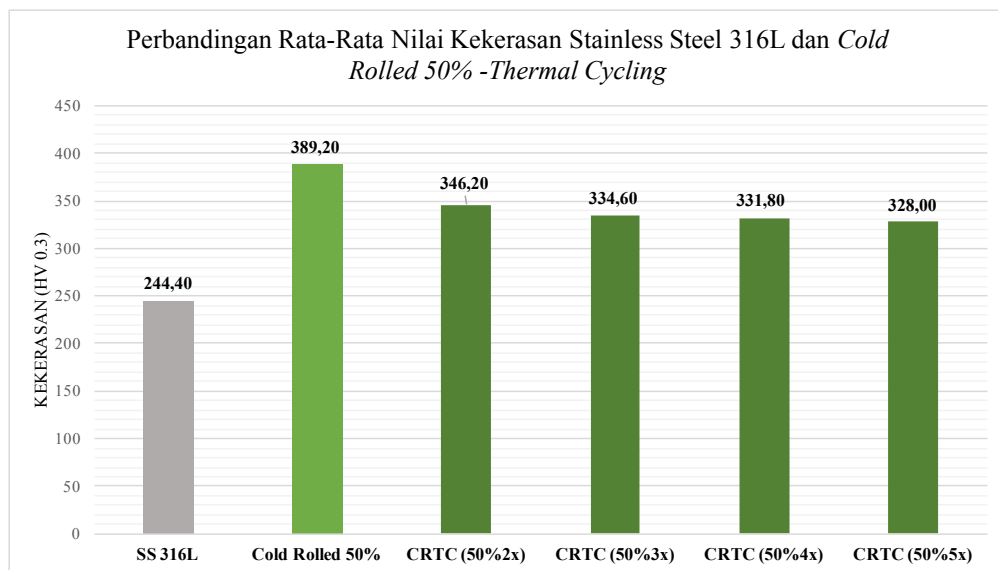
Gambar 4. 1. (a) Posisi Indentasi Uji Kekerasan Micro Vickers pada Spesimen *Stainless Steel* 316L (b) Hasil Indentasi Spesimen *Stainless Steel* 316L

Tabel 4. 2. Hasil Pengujian Micro Vickers Hardness Pada *Stainless Steel* 316L, *Cold Rolled* 50% dan 90%, *Cold Rolled-Thermal cycling* 900°C 35s dengan Siklus 2x, 3x, 4x, 5x

Spesimen	Kekerasan (HV) 0.3					Rata-Rata	St. Dev.
	1	2	3	4	5		
SS 316L	242	232	242	257	249	244,40	9,29
<i>Cold Rolled</i> 50%	382	382	388	399	395	389,20	7,66
<i>CRTC</i> (50%2x)	344	349	357	344	337	346,20	7,40
<i>CRTC</i> (50%3x)	332	348	335	324	334	334,60	8,65
<i>CRTC</i> (50%4x)	332	339	339	330	319	331,80	8,23
<i>CRTC</i> (50%5x)	326	333	327	328	326	328,00	2,92
<i>Cold Rolled</i> 90 %	442	443	434	438	446	440,60	4,67
<i>CRTC</i> (90%2x)	422	438	418	440	432	430,00	9,70
<i>CRTC</i> (90%3x)	407	428	410	423	415	416,60	8,79
<i>CRTC</i> (90%4x)	404	402	396	403	418	404,60	8,11
<i>CRTC</i> (90%5x)	398	381	403	404	393	395,80	9,36

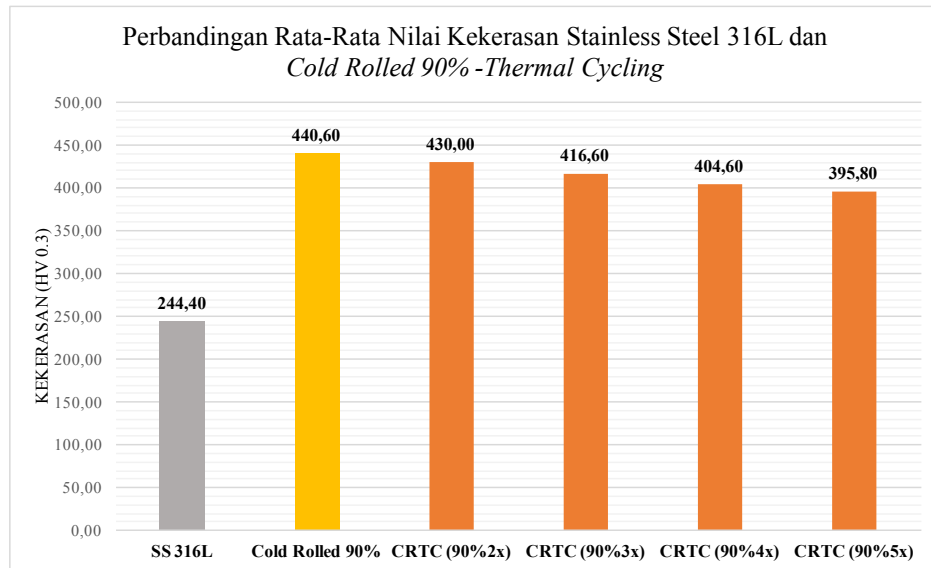
Tabel 4.2 merupakan hasil pengujian kekerasan *micro vickers* untuk spesimen *stainless steel* 316L, *cold rolled* derajat reduksi 50% dan 90%, serta spesimen *cold rolling* yang sudah diberi perlakuan panas *thermal cycling* dengan variasi siklus yang berbeda-beda.

Nilai kekerasan rata-rata spesimen SS316L sebesar 244.40 HV_{0.3}, CR 50 sebesar 389.20 HV_{0.3} dan CR 90 sebesar 440.60 HV_{0.3}. Kenaikan kekerasan rata-rata spesimen hasil *cold rolling* terjadi karena adanya *strain hardening* akibat perlakuan dingin. *Strain hardening* inilah yang kemudian tersimpan di dalam material sebagai *stored strain energy*. *Cold rolling* dengan reduksi berbeda akan menghasilkan *stored strain energy* yang berbeda dimana makin tinggi derajat reduksinya maka nilai *stored strain energy* menjadi semakin tinggi. Adanya *stored strain energy* akan memicu munculnya rekristalisasi butiran baru pada batas butir butiran *cold rolling* ketika spesimen diberikan perlakuan panas dengan *thermal cycling*. Adanya rekristalisasi butiran baru dengan ukuran yang jauh lebih kecil (*fine grain*) dan terdistribusi secara homogen akan meningkatkan keuletan dari 316L tanpa kehilangan kekerasan atau kekuatan secara signifikan.



Gambar 4. 2. Grafik Perbandingan Rata-Rata Nilai Kekerasan *Stainless Steel 316L* dan *Cold Rolled 50% - Thermal cycling*

Berdasarkan gambar 4.2, data menunjukkan kekerasan spesimen SS316L sebesar 244.40 HV_{0.3} dan CR 50 sebesar 389.20 HV_{0.3}. Spesimen mengalami kenaikan kekerasan karena proses *strain hardening* ketika perlakuan *cold working*, tetapi keuletannya menurun. Untuk mengembalikan keuletan seperti semula, maka dilanjutkan dengan proses *thermal cycling*. Data menunjukkan kekerasan CR 50 TC 2x, CR 50 TC 3x, CR 50 TC 4x, CR 50 TC 5x masing-masing sebesar 346.20 HV_{0.3}, 334.60 HV_{0.3}, 331.80 HV_{0.3}, 328.00 HV_{0.3}. Spesimen mengalami penurunan kekerasan dari hasil *cold roll* dan untuk setiap tahapan siklus *thermal cycling* walaupun dengan nilai penurunan kekerasan yang tidak signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa spesimen mengalami proses *recovery* dan hanya sedikit *stored strain energy* yang digunakan dalam proses rekristalisasi ketika spesimen dipanaskan kembali saat *thermal cycling*.



Gambar 4. 3. Grafik Perbandingan Rata-Rata Nilai Kekerasan *Stainless Steel 316L* dan *Cold Rolled 90% - Thermal cycling*

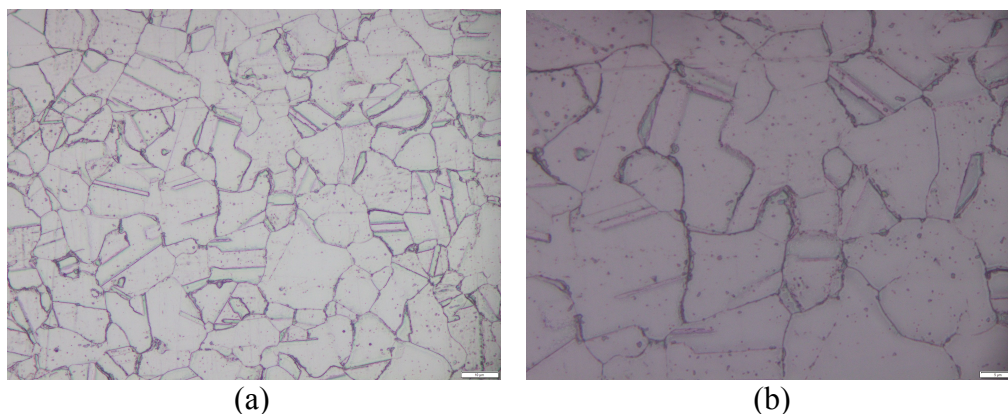
Berdasarkan gambar 4.3, data menunjukkan kekerasan spesimen SS316L sebesar 244.40 HV_{0.3} dan CR 90 sebesar 440.60 HV_{0.3}. Spesimen mengalami kenaikan kekerasan karena proses *strain hardening* ketika perlakuan *cold working*, tetapi keuletannya menurun. Untuk mengembalikan keuletan seperti semula, maka dilanjutkan dengan proses *thermal cycling*. Data menunjukkan kekerasan CR 90 TC 2x, CR 90 TC 3x, CR 90 TC 4x, CR 90 TC 5x masing-masing sebesar 430.00 HV_{0.3}, 416.60 HV_{0.3}, 404.60 HV_{0.3}, 395.80 HV_{0.3}. Spesimen mengalami penurunan kekerasan dari hasil *cold roll* dan untuk setiap tahapan siklus *thermal cycling*. Hal ini dikarenakan *stored strain energy* yang dihasilkan dari *cold rolling* dilepaskan untuk memicu rekristalisasi ketika spesimen diapaanakan kembali saat *thermal cycling*. Jika diamati lebih lanjut, hanya terjadi sedikit penurunan kekerasan pada siklus *thermal cycling* 2x, kekerasan terus menurun ketika dilakukan tambahan perlakuan *thermal cycling*. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan *thermal cycling* lebih dari 4x tidak memberikan efek dominan terhadap sampel yang telah mengalami *cold rolling* 90%. Jika dilihat dari penurunan kekerasan yang tidak signifikan saat siklus *thermal cycling*, boleh dikatakan bahwa sampel ini hanya mengalami *recovery* dan sedikit rekristalisasi pada struktur mikronya. Hal ini akan diamati lebih lanjut melalui identifikasi metalografi.

4.3. Hasil Pengujian Pengamatan Struktur Mikro

Pengujian *metallography* dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dan juga mengamati ukuran butiran yang terbentuk pada spesimen awal *stainless steel 316L*, spesimen hasil *cold rolling* dan spesimen hasil *thermal cycling*.

4.3.1. Hasil Pengamatan Spesimen *Stainless Steel 316L*

Pengujian *metallography* dilakukan pada spesimen *stainless steel 316L* hasil. Berikut adalah hasil pengamatan dari mikroskop optic *olympus*.

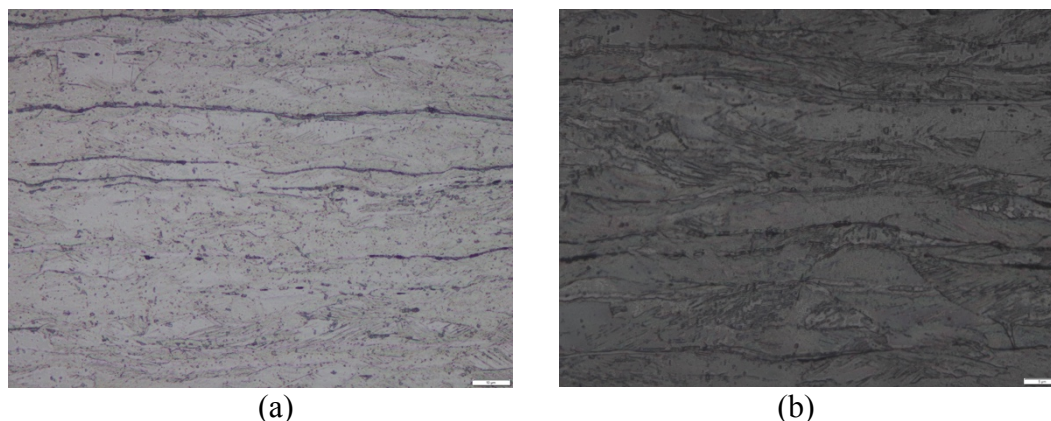


Gambar 4. 4. Hasil Pengamatan Struktur Mikro *Stainless Steel 316L* Perbesaran (a) 500x
(b) 1000x

Hasil pengujian *metallography* pada gambar 4.4 menunjukkan bahwa spesimen memiliki struktur layaknya *austenitic stainless steel* dengan karakter butiran berbentuk *angular* yang berukuran 162,8 μm .

4.3.2. Hasil Pengamatan Spesimen *Stainless Steel 316L Cold rolling 50% dan 90%*

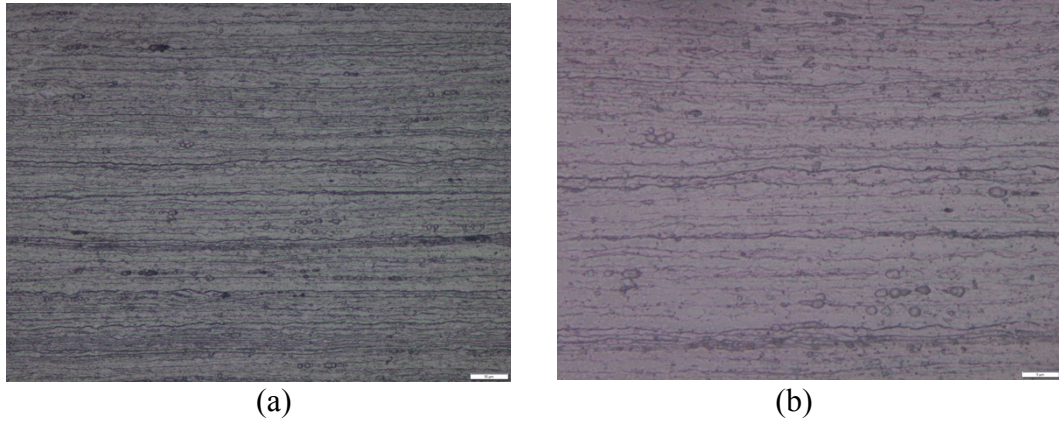
Spesimen *stainless steel 316L* dilakukan perlakuan dingin *cold rolling* dengan reduksi 50%. Pengambilan gambar mikrostruktur diambil dari sisi samping. Berikut hasil pengamatan dari mikroskop optik *olympus*.



Gambar 4. 5. Hasil Pengamatan Struktur Mikro *Stainless Steel 316L Cold rolling 50%*
Perbesaran (a) 500x (b) 1000x

Hasil pengujian *metallography* spesimen *cold rolling* reduksi 50% pada gambar 4.5. dapat diamati bahwa struktur mikro sudah tidak lagi berbentuk seperti pada gambar 4.4., melainkan struktur *elongated grain* dengan mengikuti arah saat dilakukan pengerolan.

Spesimen *stainless steel 316L* dilakukan perlakuan dingin *cold rolling* dengan reduksi 90%. Pengambilan gambar mikrostruktur diambil dari sisi samping. Berikut hasil pengamatan dari mikroskop optik *olympus*.

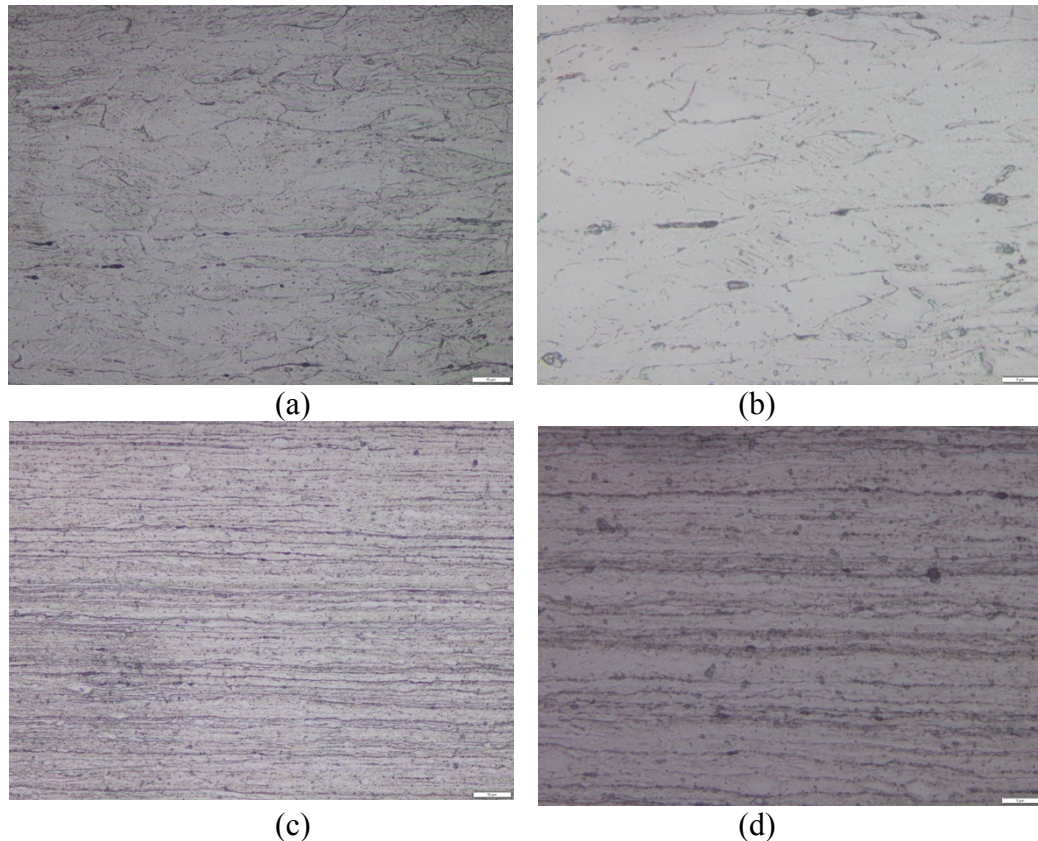


Gambar 4. 6. Hasil Pengamatan Struktur Mikro Stainless Steel 316L *Cold rolling* 90%
Perbesaran (a) 500x (b) 1000x

Hasil pengujian *metallography* spesimen *cold rolling* reduksi 90% pada gambar 4.6. dapat diamati bahwa struktur mikro sudah tidak lagi berbentuk seperti pada gambar 4.4., melainkan memiliki struktur *elongated grain* searah dengan pengerolan. Jika dibandingkan dengan pengamatan struktur pada *cold rolling* 50%, struktur pada *cold rolling* 90% memiliki butiran yang lebih pipih akibat proses pengerolan dingin yang berulang ulang.

4.3.3. Hasil Pengamatan Spesimen *Stainless Steel 316L Thermal cycling 2x*

Spesimen *stainless steel 316L cold rolling* 50% dan *cold rolling* 90% diberikan perlakuan panas *thermal cycling* pada temperatur 900°C dengan waktu penahanan selama 35 detik dan dilakukan berulang sebanyak 2 kali (2 siklus). Setiap siklus pendinginan dilakukan di udara sampai temperatur kamar. Berikut adalah hasil pengamatan struktur mikro tersebut.

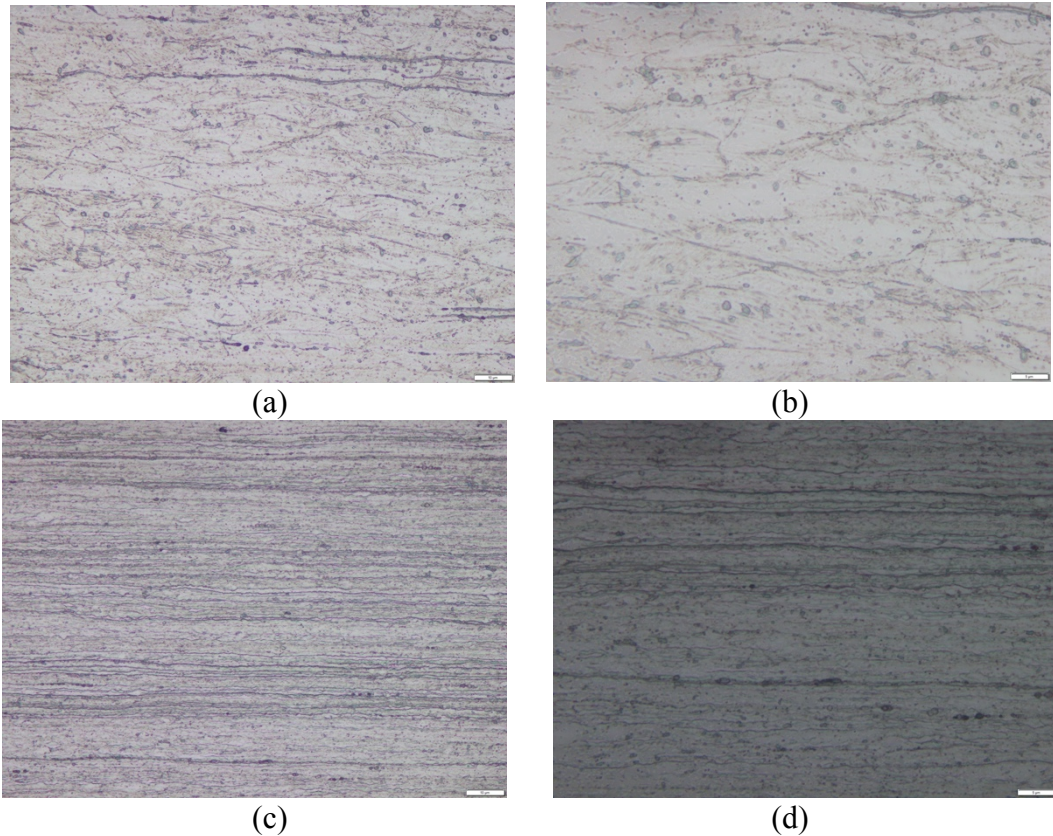


Gambar 4. 7. Hasil Pengamatan Struktur Mikro Stainless Steel 316L *Cold rolling* 50% - *Thermal cycling* 2 Siklus Perbesaran (a) 500x (b) 1000x dan *Cold rolling* 90% - *Thermal cycling* 2 Siklus Perbesaran (c) 500x (d) 1000x

Berdasarkan gambar 4.7. hasil pengamatan dari sisi samping spesimen yang dihasilkan oleh uji *metallography*, spesimen *cold rolling* 50% dan *cold rolling* 90% *thermal cycling* 2 siklus belum terjadi rekristalisasi dimana tidak terlihat butiran baru yang terbentuk pada batas butir *elongated grain*.

4.3.4. Hasil Pengamatan Spesimen *Stainless Steel 316L Thermal cycling 3x*

Spesimen *stainless steel 316L cold rolling* 50% dan *cold rolling* 90% diberikan perlakuan panas *thermal cycling* pada temperatur 900°C dengan waktu penahanan selama 35 detik dan dilakukan berulang sebanyak 3 kali (3 siklus). Setiap siklus pendinginan dilakukan di udara sampai temperatur kamar. Berikut adalah hasil pengamatan struktur mikro tersebut.

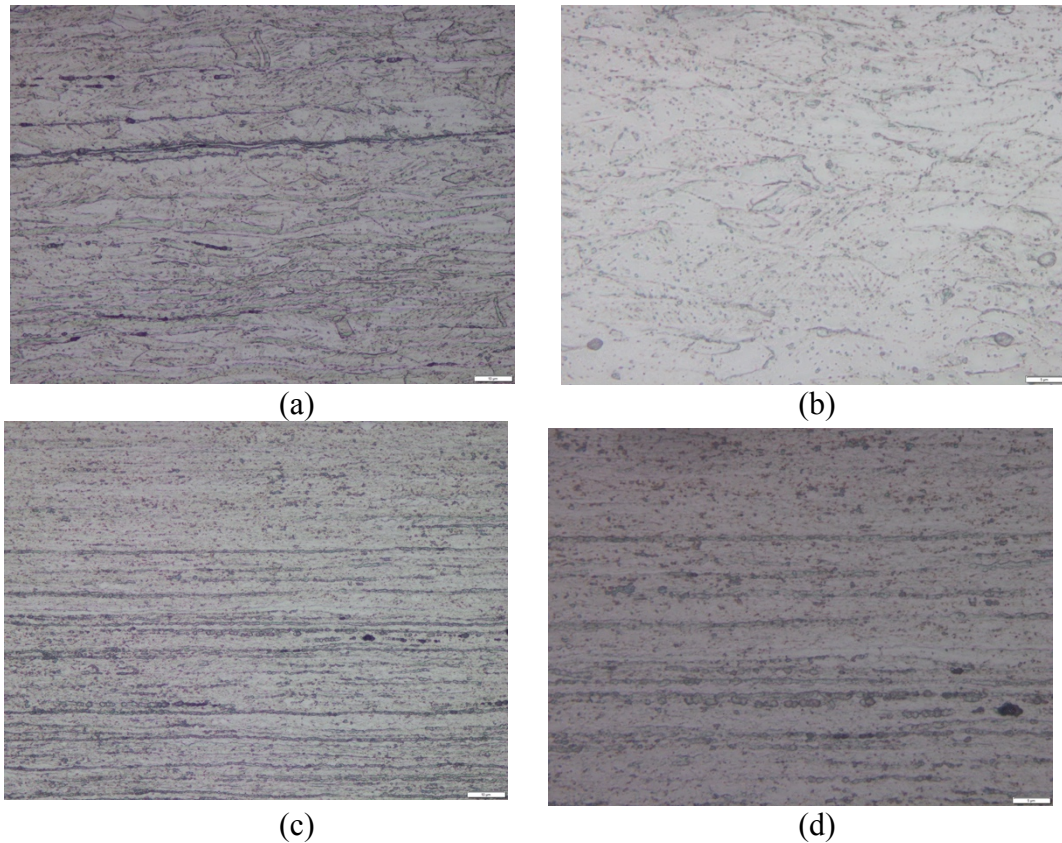


Gambar 4. 8. Hasil Pengamatan Struktur Mikro Stainless Steel 316L *Cold rolling* 50% - *Thermal cycling* 3 Siklus Perbesaran (a) 500x (b) 1000x dan *Cold rolling* 90% - *Thermal cycling* 3 Siklus Perbesaran (c) 500x (d) 1000x

Berdasarkan gambar 4.8 hasil pengamatan dari sisi samping spesimen yang dihasilkan oleh uji *metallography*, spesimen *cold rolling* 50% dan *cold rolling* 90% *thermal cycling* 3 siklus tidak terlihat pengintian butiran baru atau rekristalisasi. Hal ini sesuai dengan data kekerasan yang diperoleh dimana penurunan kekerasannya hanya sedikit dibanding pada kondisi *cold rolling* nya.

4.3.5. Hasil Pengamatan Spesimen *Stainless Steel* 316L *Thermal cycling* 4x

Spesimen *stainless steel* 316L *cold rolling* 50% dan *cold rolling* 90% diberikan perlakuan panas *thermal cycling* pada temperatur 900°C dengan waktu penahanan selama 35 detik dan dilakukan berulang sebanyak 4 kali (4 siklus). Setiap siklus pendinginan dilakukan di udara sampai temperatur kamar. Berikut adalah hasil pengamatan struktur mikro tersebut.

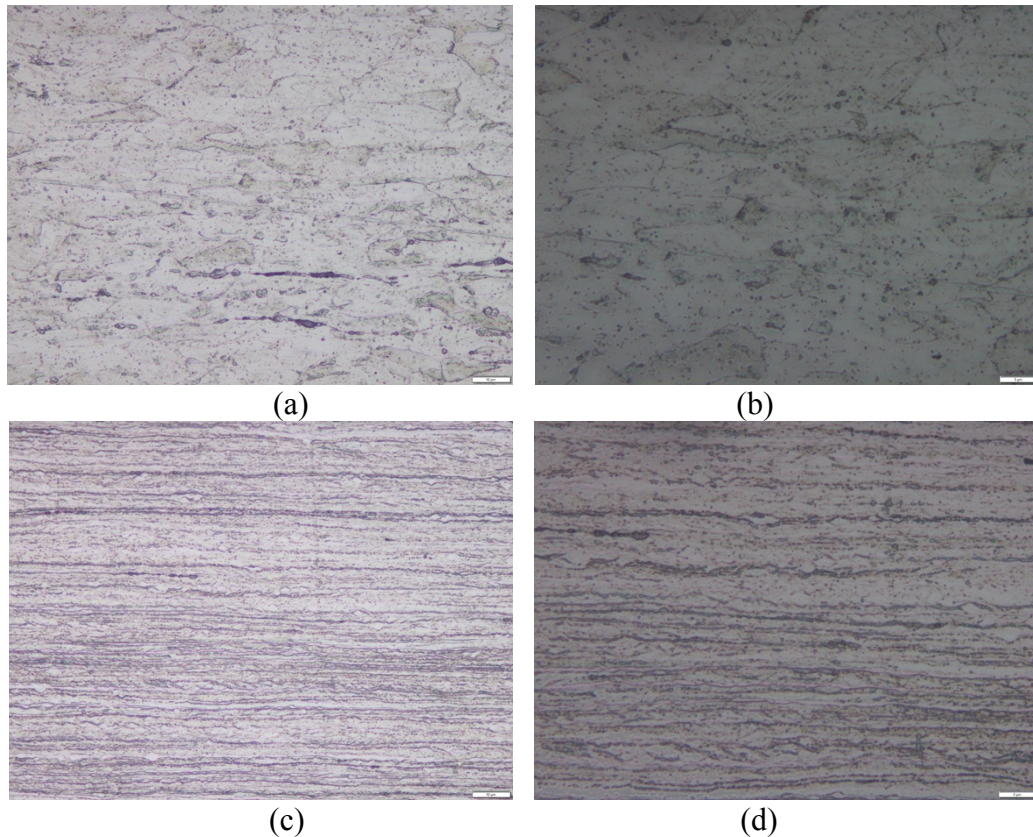


Gambar 4. 9. Hasil Pengamatan Struktur Mikro Stainless Steel 316L *Cold rolling* 50% - *Thermal cycling* 4 Siklus Perbesaran (a) 500x (b) 1000x dan *Cold rolling* 90% - *Thermal cycling* 4 Siklus Perbesaran (c) 500x (d) 1000x

Berdasarkan gambar 4.9 hasil pengamatan dari sisi samping spesimen yang dihasilkan oleh uji *metallography*, spesimen *cold rolling* 50% dan *cold rolling* 90% *thermal cycling* 4 siklus belum terjadi rekristalisasi butiran baru pada batas butir *elongated grain* hasil *cold rolling*. Hal ini didukung oleh penurunan kekerasan yang tidak signifikan jika dibandingkan dengan spesimen *cold rolling*.

4.3.6. Hasil Pengamatan Spesimen Stainless Steel 316L *Thermal cycling* 5x

Spesimen *stainless steel* 316L *cold rolling* 50% dan *cold rolling* 90% diberikan perlakuan panas *thermal cycling* pada temperatur 900°C dengan waktu penahanan selama 35 detik dan dilakukan berulang sebanyak 5 kali (5 siklus). Setiap siklus pendinginan dilakukan di udara sampai temperatur kamar. Berikut adalah hasil pengamatan struktur mikro tersebut.



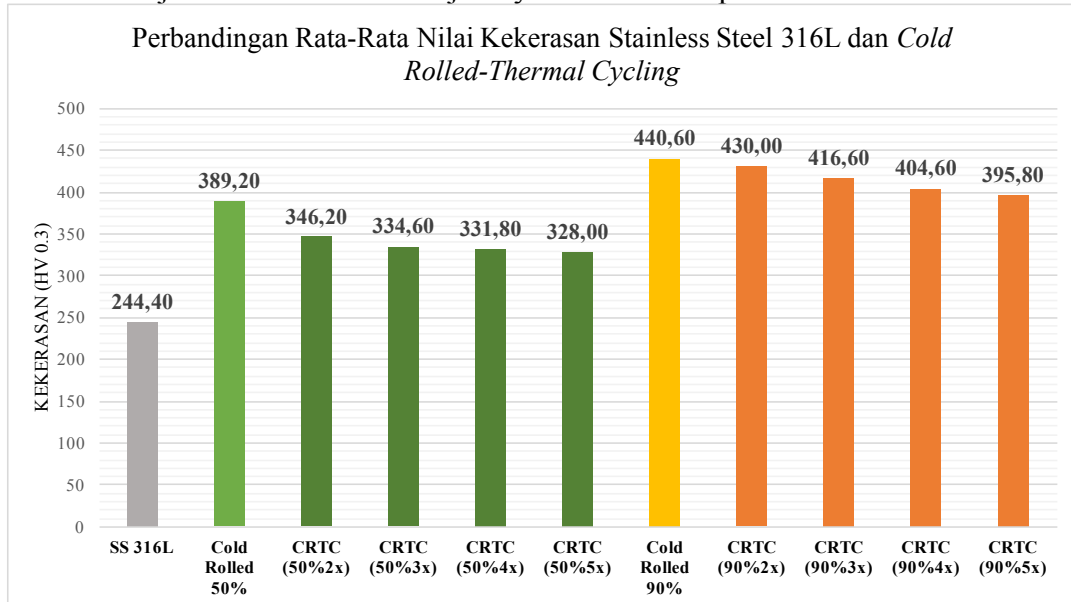
Gambar 4. 10. Hasil Pengamatan Struktur Mikro Stainless Steel 316L *Cold rolling* 50% - *Thermal cycling* 5 Siklus Perbesaran (a) 500x (b) 1000x dan *Cold rolling* 90% - *Thermal cycling* 5 Siklus Perbesaran (a) 500x (b) 1000x

Berdasarkan gambar 4.10 hasil pengamatan dari sisi samping spesimen yang dihasilkan oleh uji *metallography*, spesimen *cold rolling* 50% dan *cold rolling* 90% *thermal cycling* 5 siklus tidak mencapai rekristalisasi butir baru pada batas butir *elongated grain*. Hal ini dapat dikaitkan dengan data kekerasan yang menunjukkan penurunan kekerasan yang tidak signifikan dikarenakan *stored strain energy* yang dilepaskan untuk memicu rekristalisasi hanya sedikit saja dan belum maksimal.

4.4. Diskusi Penelitian

Hasil pengujian dari spesimen AISI 316L yang telah mengalami proses perlakuan dingin dan dilanjutkan dengan *thermal cycling* menunjukkan bahwa nilai kekerasan meningkat drastis setelah proses *cold rolling*. Semakin tinggi derajat reduksi *cold rolling*, maka semakin tinggi nilai kekerasan yang diperoleh. Hal ini menyebabkan AISI 316L yang mengalami *cold rolling* memiliki sifat keuletan yang rendah. Proses *thermal cycling* dilakukan untuk merubah butir *elongated grain* dari *cold rolling* menjadi butir *spherical* dengan ukuran kecil yang tersebar secara homogen melalui mekanisme rekristalisasi. Terbentuknya butir baru saat pemanasan *thermal cycling* terjadi karena tegangan sisa yang dihasilkan oleh proses *cold rolling* tersimpan dalam bentuk *stored strain energy*. Energi inilah yang kemudian digunakan untuk memicu tumbuhnya butir baru pada batas butir *elongated grain*. Hal ini terjadi karena batas butir memiliki *dislocation density* yang paling tinggi. Dengan proses *thermal cycling* yang berulang selama 2 kali, 3 kali, 4 kali, dan 5 kali untuk masing-masing spesimen, diharapkan pada setiap proses pemanasan akan muncul rekristalisasi butir baru dan mencegah *grain growth* dari butir sehingga ukuran butir yang kecil dapat dipertahankan dan dapat memperoleh keseimbangan antara kekuatan dan keuletan material yang paling optimum.

Proses *thermal cycling* memungkinkan pengintian butiran baru menjadi lebih maksimal, dikarenakan tiap siklus akan muncul inti butiran baru. Dengan munculnya butiran yang kecil dan halus cenderung akan semakin memperbanyak batas butir sehingga *surface area* batas butir hasil *stored strain energy* akan semakin tinggi yang menyebabkan rekristalisasi mudah terjadi dan halusnya ukuran butiran akan meningkatkan kekerasan spesimen. Variasi siklus dilakukan untuk mencari tahu jumlah siklus untuk terjadinya rekristalisasi parsial dan rekristalisasi merata.



Gambar 4. 11. Grafik Perbandingan Rata-Rata Nilai Kekerasan Spesimen Awal *Stainless Steel 316L*, *Cold Rolled*, dan *Cold Rolled-Thermal cycling*

Dilihat dari grafik pada gambar 4.11, terjadi kenaikan nilai kekerasan dari spesimen awal SS316L sebesar 244.40 HV0.3 dengan spesimen *cold rolling* CR 50 sebesar 389.20 HV0.3 dan CR 90 sebesar 440.60 HV0.3. Hal ini menunjukkan bahwa proses *cold rolling* dapat meningkatkan kekuatan material karena adanya peningkatan kerapatan dislokasi butir akibat *cold rolling* yang memberi efek menyulitkan pergerakan butir sehingga kekuatan material meningkat. Lalu material mengalami penurunan kekerasan pada spesimen *cold rolling-thermal cycling* dengan kekerasan spesimen roll 50% - *thermal cycling* sebesar CR50TC2x 346.20 HV0.3, CR50TC3x 334.60 HV0.3, CR50TC4x 331.80 HV0.3, CR50TC5x 328.00 HV0.3. Sedangkan kekerasan spesimen roll 90% - *thermal cycling* sebesar CR90TC2x 430.00 HV0.3, CR90TC3x 416.60 HV0.3, CR90TC4x 404.60 HV0.3, CR90TC5x 395.80 HV0.3. Penurunan kekerasan setiap tahapan siklus terjadi karena *stored strain energy* hasil *cold rolling* dilepaskan ketika diberi energi panas dari *thermal cycling*. Jika dibandingkan dengan spesimen awal SS316L sebesar 244.40 HV0.3, spesimen *cold rolling-thermal cycling* memiliki kekerasan yang lebih tinggi karena perlakuan panas *thermal cycling* pada temperatur tinggi menyebabkan *stored strain energy* hasil *cold rolling* untuk memicu rekristalisasi butir baru yang kecil dan homogen. Dengan dilakukannya pengulangan proses *thermal cycling*, semakin banyak jumlah siklus yang dilakukan akan meningkatkan pengintian butir baru karena di setiap siklus akan muncul inti butir baru dengan ukuran kecil.

Secara teori, semakin banyak siklus pengulangan *thermal cycling*, jumlah pengintian butir baru yang lebih kecil dan seragam akan meningkat. Namun berdasarkan hasil metalografi yang didapatkan, seluruh spesimen *cold rolling – thermal cycling* reduksi 50% dan 90% tidak menunjukkan rekristalisasi butir baru dimana tidak terlihat pertumbuhan butir baru di area batas butir *elongated grain*. Hal ini dapat dikaitkan dengan penurunan rata-rata kekerasan spesimen *cold rolling-thermal cycling* yang tidak signifikan sehingga spesimen

hanya mengalami *recovery* saja dan *stored strain energy* yang dilepaskan hanya sedikit saja. Tidak tercapainya rekristalisasi dapat disebabkan oleh berbagai macam hal. Salah satunya adalah waktu penahanan yang terlalu singkat sehingga seluruh area sampel tidak mencapai temperatur *thermal cycling* yang diharapkan. Tidak tercapainya rekristalisasi butiran baru pada penelitian ini dapat dikarenakan waktu penahanan yang kurang optimum sehingga pengintian butiran baru tidak terjadi secara merata. Hal lain yang dapat mempengaruhi rekristalisasi adalah temperatur. Proses *thermal cycling* dilakukan pada temperatur yang tinggi untuk membantu memberikan energi panas kepada *stored strain energy* agar menginisiasi rekristalisasi butiran baru. Tidak tercapainya rekristalisasi dapat dikarenakan temperatur yang kurang optimum. Berdasarkan jurnal Usi Fausia (2018) didapatkan bahwa pada temperatur 850°C-900°C belum terjadi rekristalisasi. Sehingga diperlukan temperatur di atas 900°C untuk terjadinya rekristalisasi pada spesimen.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan mengenai pengaruh jumlah siklus *thermal cycling* pada *cold rolled stainless steel* AISI 316L terhadap struktur mikro dan kekerasan, yaitu antara lain:

1. Kenaikan kekerasan antara spesimen awal *stainless steel* AISI 316L sebesar **244.40 HV_{0.3}** dengan spesimen hasil *cold rolling* sebesar CR 50 sebesar **389.20 HV_{0.3}** dan CR 90 sebesar **440.60 HV_{0.3}**. Kenaikan kekerasan terjadi karena proses *strain hardening* ketika dilakukan *cold rolling*. *Strain hardening* lalu akan tersimpan dalam material sebagai *stored strain energy*.
2. Kekerasan spesimen awal *stainless steel* AISI 316L **244.40 HV_{0.3}** jika dibandingkan dengan spesimen *stainless steel* AISI 316L yang sudah diberikan perlakuan *cold rolling* dan *thermal cycling* memiliki kekerasan yang lebih tinggi dengan nilai CR50TC2x **346.20 HV_{0.3}**, CR50TC3x **334.60 HV_{0.3}**, CR50TC4x **331.80 HV_{0.3}**, CR50TC5x **328.00 HV_{0.3}** dan CR90TC2x **430.00 HV_{0.3}**, CR90TC3x **416.60 HV_{0.3}**, CR90TC4x **404.60 HV_{0.3}**, CR90TC5x **395.80 HV_{0.3}**. Penurunan kekerasan setiap tahapan siklus terjadi karena *stored strain energy* hasil *cold rolling* dilepaskan ketika dipanaskan saat *thermal cycling*.
3. Hasil *metallography* tidak menunjukkan terjadinya rekristalisasi di area batas butir *elongated grain* untuk spesimen *cold rolling* reduksi 50% – *thermal cycling* dan *cold rolling* reduksi 90% – *thermal cycling*. Hal ini dibuktikan juga dengan penurunan rata-rata nilai kekerasan *cold rolling-thermal cycling* yang tidak signifikan sehingga spesimen hanya mengalami proses *recovery* dan hanya sedikit *stored strain energy* yang digunakan dalam proses rekristalisasi ketika spesimen dipanaskan kembali saat *thermal cycling*.

5.2. Saran

Setelah dilakukan penelitian didapat beberapa saran agar diperoleh informasi yang lebih komprehensif yaitu:

1. Diperlukan pembuatan peta grafik hubungan antara “Derajat *cold rolling* vs Parameter *thermal cycling*” untuk acuan bagi perusahaan pengembangan implant lokal.




(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Penelitian dan Pengembangan Kesehatan Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2018). *Laporan Nasional Riskesdas*.
- World Health Organization. (2018). Global Status Report On Road Safety : Summary.
- Badan Penelitian dan Pengembangan Kesehatan Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2018). *Riset Kesehatan Dasar*. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Nanda, T. (2016). A Thermal cycling Route for Processing Nano-Grains in AISI 316L Stainless Steel for Improved Tensile Deformation Behaviour. India: Department of Mechanical Engineering.
- Mubarok, F., Fausia, P. I., Sutikno, & Mahyudin, F. (2020). *Influence of Thermal cycling Temperature on the Recrystallization of Cold Rolled Stainless Steel 316L*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan Universitas Airlangga.
- Fausia, P. I. (2018). Pengaruh Thermal cycling Pada Implan Stainless Steel 316L Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sutowo, C., Ikhsan, M., & Kartika, I. (2014). *Karakteristik Material Biokompatibel Aplikasi Implan Medis Jenis Bone Plate*. Jakarta: Universitas Muhammadiyah Jakarta.
- Callister, W. D. (2007). *Material Science and Engineering An Introduction*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Alvarado, J., Maldonado, R., Marxuach, J., & Otero, R. (2003). *Biomechanics of Hip and Knee Prostheses. Application of Engineering Mechanics in Medicine*. GED: University of Puerto Rico Mayaguez.
- Kempster, M. H. (1979). *Materials for Engineers*. Bristol: Hodder and Stoughton Ltd.
- Kumar, R., Mahato, B., Sharma, S., & Sahu, J. (2009). Effect of Cyclic Thermal Process on Ultrafine Grain Formation in AISI 314L Austenitic Stainless Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, pp. 3266-3234.
- Maburi, E. (2012). Aplikasi Severe Plastic Deformation (SPD) dan Heavy Cold rolling Pada Baja Tahan Karat Austenitik 316L. Tangerang: Pusat Penelitian Metalurgi - LIPI.
- ASTM F138-13a. (n.d.). Standard Specification for Wrought 18Chromium — 14Nickel — 2.5 Molybdenum Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implants (UNS S31673). United States: Association of Standard Testing Materials.
- ASTM E112-12. (2012). *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. United States: American Society for Testing Materials.
- Cheah, C. M., Chua, C. K., Lee, C. W., Feng, C., & Totong, K. (2005). Rapid Prototyping and Tooling Techniques: A Review of Applications for Rapid Investment Casting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 208-320.
- Pecner, D., & Bernstein, I. M. (1977). *Handbook of Stainless Steel*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Kalpakjian, S. (1984). *Manufacturing Processes for Engineering Materials*. New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Poli, C. (2001). *Metal Casting Processes: Design for Manufacturing*. Boston: Butterworth-Heinemann.
- Avner, S. H. (1974). *Introduction to Physical Metallurgy*. England: McGraw-Hill Book Company.
- Misra, R. D., Zhang, Z., Venkatasurya, P. K., Somani, M. C., & 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*, 1-26.

- Karjalainen, L. P., Taulavuori, T., Sellman, M., & Kyröläinen, A. (2008). Some Strengthening Methods for Austenitic Stainless Steels. *Steel Research International*, 79, 404-412.
- Mubarok, F., & Rosalina, A. (2021). Effect of Thermal cycling On The Cold Rolled AISI 316L with Varying Degree of Reduction Toward Their Microstructure and Hardness. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Magda, D. (2009). Hands-On Lab Demonstration To Teach How Mechanical Properties Change Due To Cold Working and Recrystallisation. Utah: Weber State University, American Society for Engineering Education.
- Sharma, Pankaj, Nanda, T., Kumar, Ravi, & Pandey, O. P. (2011). Mechanism for Producing Ultra-Fine/ Nano Grained Microstructure for Austenitic Stainless Steels. India: Thapar University.
- Dacapo Stainless. (n.d). Application of Schaeffler Diagram.
- V., R. (2004). *Materials science and engineering*. India: PHI Learning Private Limited.
- Roucoules, C. P. (n.d.). Analysis Of Work Hardening And Recrystallisation During The Hot Working Of Steel Using A Statistically Based Internal Variable Model.
- Samuel, E. &. (2010). Universal scaling of work hardening parameters in type 316L (N) stainless steel. *Mat. Sci. Eng. A*. .
- Samuel, K. &. (2005). On Power-Law Type Relationships And The Ludwigson Explanation For The Stress-Strain Behaviour Of AISI 316 Stainless Steel. *J. Mater. Sci*.

LAMPIRAN

		INSPECTION CERTIFICATE 3.1 ACCORDING TO EN 10204																	
MANUFACTURER'S MARK BHS		INSPECTOR'S STAMP 		MELTING PROCESS EAF, AOD															
CUSTOMER		ORDER No.		ITEM No. 14															
CUSTOMER ORDER No.		REQUIREMENTS		DELIVERY NOTE No.															
SPECIFICATIONS ASTM A240 / A240M-16a ASME BPVC-III SA240 / SA240M-2017 EN 10028-7-2016		MATERIAL GRADE 316L 316 316L 316 1.4404 1.4401		CASE MATERIAL BPC1H25560 A0050250E02 BPC1H25561 A0050250E01 BPC1H25562 A0050250E03															
TOLERANCE ASTM A480/A480M		HEAT No. R8DJ		TYPE															
PRODUCT NO1 ; 1D Hot rolled, annealed & descaled		QUANTITY 25		TOTAL MASS 5950 kg															
CHEMICAL COMPOSITION (%)		DIMENSIONS 10 mm x 1220 mm x 2440 mm																	
	C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	N										
Min	0.030	0.015	0.045	2.00	0.75	16.5	10.0	2.00											
Max						18.0	13.0	2.50	0.10										
Actual	0.029	0.001	0.028	1.33	0.39	16.7	10.1	2.06	0.04										
MECHANICAL PROPERTIES																			
TEMPERATURE	DIRECTION	POSITION	Rm MPa	Rp0.2 MPa	Rp1.0 MPa	A50 %	A5 %	HRBW											
Ambient	Transverse	Requirement Min	320	220	260	40	45	HRBW											
		Max	670					95											
Ambient	Transverse	Head	601	323	391	52	49	85											
		Tail						86											
INTERGRANULAR CORROSION										Bahr Stainless Sdn Bhd certifies that the analysis and material on this certification is correct and meets the specifications stated. This document is issued without alteration or erasure and may only be reproduced in full. The radiation level exhibited by this material is not greater than the normal background level. This material is free from mercury contamination. This Material is PMI Tested. Declaration of Performance: tinyurl.com/n3ruqka/ Visual and dimensional control: no exceptions. The delivery is in accordance with the order. Test to verify batch and quality have been made. This material meets the Hardness requirement of NACE MR0175 / ISO 15156-3:2015 & NACE MR0103 / ISO 17945:2015. Bahr Stainless is ISO 9001:2008 & ISO 14001:2004 Certified. Material not weld repaired. BAHRU STAINLESS SDN BHD IS MEMBER OF ACERINOX GROUP. Test Name Legend: Rm - Tensile strength (UTS) Rp0.2 - Yield/proof strength at 0.2% strain Rp1.0 - Yield/proof strength at 1.0% strain A5 - Elongation with gauge length = 5.65*sqrt(cross-sectional area) A50 - Elongation with gauge length = 50mm A80 - Elongation with gauge length = 80mm									
HEAT TREATMENT (SOLUTION ANNEALED)																			
Anneal °C					Quench														
1050 - 1100					AIR/SPRAY														
										BAHRU STAINLESS PTD 4069 (P.L.O 108), Jalan Rumbia 4, Tanjung Langkat Ind 81700 Pasir Gudang, Johor, Malaysia  Swin Le Teoh QC ENGINEER									

BIODATA PENULIS



Mahdiyyah Dwima Yanisa dilahirkan di Cilacap, 19 Januari 1999, merupakan anak kedua dari 3 bersaudara dari orang tua Dwi Muhammad Abdu dan Imma Herawati (almarhum). Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SD Sekolah Indonesia Singapura pada tahun 2005, Bedok Town Secondary School Singapore pada tahun 2011 dan SMA Jubilee School pada tahun 2015. Setelah lulus dari SMA Jubilee School tahun 2017, penulis melanjutkan studi S1 di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem – Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2017 dan terdaftar dengan NRP 02111740000193.

Selama menempuh pendidikan di ITS, penulis sempat aktif mengikuti lomba Formula SAE di Jepang sebagai kepala koordinator sponsorship di bawah naungan Tim Anargya *Formula Electric* pada tahun 2019. Penulis juga berpartisipasi di forum komunikasi ilmiah internasional “*Belt and Road Student Summer Camp – Beijing*” tentang “*Green Energy dan Autonomous Vehicle*” pada tahun 2018. Penulis memiliki pengalaman kerja *internship* di PT. Pertamina MOR (*Marketing Operation Region*) III, divisi *Supply & Distribution* dan memiliki tanggung jawab alokasi distribusi minyak dan gas untuk daerah Jabodetabek. Di Departemen Teknik Mesin, penulis aktif di kegiatan organisasi mahasiswa yaitu Mesin ITS Autosport dan menjabat sebagai kepala divisi Public Relation untuk periode tahun 2019/2020. Penulis bergabung di Laboratorium Metalurgi dan Cor dan aktif sebagai Asisten Praktikum Metalurgi.