



TUGAS AKHIR - TM184835

**PENGARUH PERLAKUAN *THERMAL CYCLING*
PADA *COLD ROLLED* AISI 316L DENGAN
DERAJAT REDUKSI BERBEDA-BEDA TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN**

AMANDA ROSALINA
NRP. 0211144000095

Dosen Pembimbing
Fahmi Mubarak S.T, M.Sc, Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



TUGAS AKHIR - TM184835

**PENGARUH PERLAKUAN *THERMAL CYCLING*
PADA *COLD ROLLED* AISI 316L DENGAN
DERAJAT REDUKSI BERBEDA-BEDA TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN**

AMANDA ROSALINA
NRP. 0211144000095

Dosen Pembimbing
Fahmi Mubarak S.T., M.Sc, Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



FINAL PROJECT - TM184835

**THE INFLUENCE OF THERMAL CYCLING ON
THE COLD ROLLED AISI 316L WITH VARIED
DEGREE OF REDUCTION TOWARD
MICROSTRUCTURE AND HARDNESS**

AMANDA ROSALINA
NRP. 0211144000095

Supervisor
Fahmi Mubarak S.T., M.Sc, Ph.D

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty Of Industrial Technology and Systems Engineering
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2020

HALAMAN PENGESAHAN

PENGARUH PERLAKUAN *THERMAL CYCLING* PADA *COLD ROLLED* AISI 316L DENGAN DERAJAT REDUKSI BERBEDA-BEDA 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:

AMANDA ROSALINA
NRP. 02111440000095

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Fahmi Mubarak S.T., M.Sc., PhD. (Pembimbing I)
NIP. 197801152003121002
2. Dr. Eng. Sutikno S.T., M.T (Penguji I)
NIP. 197407032000031001
3. Ika Dewi Wijayanti S.T., M.Sc., PhD. (Penguji II)
NIP. 198512022014042002
4. Putu Suwarta S.T., M.Sc., PhD. (Penguji III)
NIP. 198203032009121007

SURABAYA
Juli 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**PENGARUH PERLAKUAN *THERMAL CYCLING*
PADA *COLD ROLLED* AISI 316L DENGAN DERAJAT
REDUKSI BERBEDA-BEDA TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN**

Nama Mahasiswa : Amanda Rosalina
NRP : 0211144000095
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Fahmi Mubarak S.T., M.Sc, Ph.D

ABSTRAK

Kecelakaan kerja dan kecelakaan lalu lintas merupakan salah satu penyebab utama terjadinya kasus patah tulang. Salah satu tindakan yang dilakukan oleh dokter dalam mengobati patah tulang adalah dengan melakukan pemasangan implan tulang. Salah satu jenis material implan tulang yang umum digunakan adalah austenitic stainless steel 316L yang memiliki sifat mekanik tinggi sesuai standar internasional ASTM F138 dan memiliki biokompatibilitas yang tinggi.

Beberapa produsen di Indonesia telah memproduksi implan lokal 316L dengan metode investment casting. Walaupun secara standar ASTM telah memenuhi persyaratan, namun secara sifat mekanik, produk lokal masih dibawah produk impor dari Eropa atau Amerika. Agar implan lokal mampu bersaing dengan produk impor maka dilakukan proses modifikasi struktur mikro agar butiran investment casting yang berukuran besar yaitu sekitar 83.17 μm dapat dirubah menjadi butiran halus dibawah 10 μm melalui mekanisme rekristalisasi.

Mekanisme rekristalisasi ini dapat dipicu dengan melakukan thermal cycling pada 316L yang telah diberikan perlakuan cold-rolling. Derajat reduksi cold rolling yang berbeda-beda akan memberikan jumlah stored strain energy yang berbeda sehingga mempengaruhi dislocation density yang ada di dalam

material. Mekanisme rekristalisasi saat thermal cycling sangat bergantung dari dislocation density ini.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada stainless steel 316L setelah diberi perlakuan thermal cycling pada 900°C selama 35 detik dengan 4 kali siklus dengan derajat reduksi cold rolling 52%, 60%, 69%, 80% dan 90% menunjukkan bahwa pada derajat reduksi 80% dan 90% terjadi rekristalisasi total dari butiran secara merata pada semua bagian. Ukuran rata-rata butiran mengecil menjadi 3.26 μm , dan 2.87 μm dan kekerasan rata-rata meningkat dari 159 HV menjadi 257 HV dan 267 HV.

Pada kondisi derajat reduksi yang lain, ditemukan bahwa rekristalisasi belum terjadi pada keseluruhan material. Kekerasan yang diperoleh juga lebih rendah dibanding pada kondisi 80% dan 90% dengan ukuran butiran rata-rata yang lebih besar dan perbedaan antar butiran minimum dan maksimum yang lebih lebar.

Kata Kunci: Cold rolling, implant stainless steel 316L, investment casting, thermal cycling.

THE INFLUENCE OF THERMAL CYCLING ON THE COLD ROLLED AISI 316L WITH VARIED DEGREE OF REDUCTION TOWARD MICROSTRUCTURE AND HARDNESS

Student's Name : Amanda Rosalina
NRP : 0211144000095
Department : Mechanical Engineering
Supervisor : Fahmi Mubarak S.T., M.Sc, Ph.D

ABSTRACT

Accidents during work and in the road are one of the main causes of bone fractures. An orthopedic surgeon usually install bone implant to support damaged bone. One of the bone implant that is widely used is austenitic stainless steel 316L. This material had high mechanical properties as dictated by international standard ASTM F138 and proven to exhibit biocompatibility.

Several manufacturers in Indonesia have been successfully produced 316L implants using investment casting method. Even though the mechanical properties of local implant product had met ASTM standards requirements, it was still lower as compared to imported implant from Europe or US. In order to compete with imported products, local implant 316L from investment casting was modified to reduce their coarse grain size of about 83.17 μm in average to become finer grain of under 10 μm through recrystallization mechanism.

This recrystallization mechanism on 316L can be triggered by thermal cycling after 316L was subjected to cold-rolling treatment. Different degrees of cold rolling reduction will give different amounts of stored strain energy which will affect the amount of dislocation density in the material. The recrystallization mechanism during thermal cycling was aided by the availability of density dislocation.

After cold rolled 316L with thickness reduction degrees of 52%, 60%, 69%, 80% and 90% were given thermal cycling treatment at 900°C for 35 seconds with 4 cycles, it was found that homogenous full recrystallization was confirmed on 80% and 90% reduction degrees samples. The average grain size of 80 and 90% reduction degree samples decreased to 3.26 μm and 2.87 μm respectively while the average hardness increased to 257 HV₂ and 267 HV respectively from 159 HV measured for investment casting product.

Conversely, only partial recrystallization was observed in other degree of reduction samples. The obtained hardness also lower than 80% and 90% reduction degree. Larger average grain size and wider minimum and maximum grain differences was measured on these samples.

Keywords: Cold rolling, implan stainless steel 316L, investment casting, thermal cycling.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran dan rahmat Allah SWT yang telah melimpahkan kasih, pertolongan, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tugas akhir dengan judul: **“Pengaruh Thermal Cycling pada Cold Rolled AISI 316L dengan Derajat Reduksi Berbeda-Beda Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan”**. Tak lupa shalawat serta salam untuk Rasulullah SAW yang telah menjadi panutan hidup bagi seluruh makhluk di alam semesta. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana Teknik S-1 di Departemen Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dalam kesempatan ini, secara khusus penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. Ibu **Miskanah** dan Bapak **Mohamad Rokim** selaku orang tua yang telah sepenuh hati merawat, mendidik, menyayangi serta memberikan dukungan dan doa yang tak henti-hentinya agar segala urusan penulis dimudahkan dan dilancarkan oleh Allah SWT. Tak lupa juga **Keluarga Besar Kadis** yang selalu mendukung dan sabar menunggu penulis menuntaskan pendidikan sarjana ini.
2. Bapak **Fahmi Mubarak ST., MSc., PhD.**, Selaku dosen pembimbing yang selalu sabar dan telah meluangkan waktu untuk membimbing, mengarahkan, memberi banyak ilmu yang tidak ternilai sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini. Terima kasih Pak atas kemurahan hatinya.
3. Bapak **Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST., M.Eng. Sc.** Selaku Kepala Sub Direktorat Admisi ITS juga dosen wali penulis yang telah memberikan bimbingan selama masa perkuliahan.
4. Ibu **Ika Dewi Wijayanti ST., MSc., PhD.**, Bapak **Dr.Eng. Sutikno ST., MT** dan Bapak **Putu Suwarta, ST., MSc., PhD.** Selaku dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan

saran serta bimbingan untuk menyempurnakan penulisan tugas akhir ini.

5. **Seluruh Dosen dan Karyawan Teknik Mesin ITS.** Terkhusus **Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA.** Bapak **Dr. Wawan Aries Widodo, ST., M.T.** dan Bapak **Bambang Pramujati, ST., M.Sc. Eng., Ph.D.,** yang telah memberikan dukungan juga bantuan saat masa sulit penulis pada awal tahun 2018. Dosen Laboratorium Metalurgi, **Pak Wayan, Bu Kis, Pak Indra, Pak Warno** dan **Pak Wahyu** terima kasih atas semua ilmunya. **Pak Mantri, Pak Gatot, Mas Agus, Pak Budi, Mas Yahya, Mas Luki** terima kasih telah banyak membantu pengerjaan eksperimen tugas akhir penulis. Juga **Mas Reza, Mbah No, Pak Mul, Bu Sri,** terimakasih atas segala kebaikan dan hiburan selama penulis kuliah di Teknik Mesin ITS.
6. **M-57.** Angkatan supel selama berkuliah dan berorganisasi yang penuh kenangan, merepotkan, tetapi menyenangkan. Berbanggalah karena kita menjadi generasi terakhir yang masih mendapatkan segala keutuhan mesin, terima kasih buat semuanya. Kalian luar biasa semoga M-57 bisa berguna bagi sesama.
7. **Naufallia Fitri, Nonnia Dewi dan Shabrina Alin** sebagai sahabat bahkan melebihi saudara yang tak segan untuk mengulurkan tangan, membantu, mendukung, menguatkan dan menemani saat masa tersulit juga bahagia baik selama perkuliahan maupun keseharian hidup penulis. Terima kasih untuk segalanya, semoga Allah SWT selalu memberikan kebaikan juga kebahagiaan kepada kalian.
8. **Toples Kopi; Leli, Dahlan dan Diki** sebagai sahabat penulis dari kecil. Terima kasih untuk waktu, juga percakapan luar biasa baik dukungan, *sharing*, bantuan, dan segala hal yang selalu menguatkan dan membangun semangat positif dalam menjalani kehidupan dari kecil sampai di titik sekarang. Semoga bisa selalu menjadi sahabat sampai surga, ditunggu puncak berikutnya.

9. **Ciwi Cantik; Alfia, Bella, dan Hafizah** sebagai sahabat penulis semenjak duduk di bangku SMA. Terima kasih selalu ada dalam kondisi senang bahkan tersulit penulis, meskipun penulis jarang bertemu kalian terlebih setelah duduk di bangku perkuliahan. Terima kasih untuk waktu dan dukungannya yang tidak pernah putus agar penulis kuat menyelesaikan segala permasalahan hidup terutama untuk menuntaskan perkuliahan penulis. Semoga segala kebaikan kalian dibalas oleh Allah.
10. **Maulana Hanif Labiib Muchdor** sebagai penasihat sekaligus saksi segala keputusan yang diambil oleh penulis baik kegiatan akademik, non akademik juga kehidupan sehari-hari. Terima kasih atas segala hal terlebih energi positif, tenaga serta waktu yang sudah diluangkan saat musibah terberat penulis tahun 2018 dan momen kegagalan penulis awal Januari tahun 2020. Terima kasih untuk jumlah kopi yang tak terhitung serta obrolan didalamnya. Terima kasih untuk segala bantuannya dalam penyusunan Tugas Akhir penulis sampai tuntas. Terima kasih juga selalu mendukung dalam kondisi apapun meskipun tak jarang menguji kesabaran yang mana membuat penulis lebih kuat hingga saat ini. Semoga kamu dikelilingi dengan kebahagiaan, keberkahan dan hal baik, juga selalu bersama ridho Allah atas segala keputusan yang akan diambil kedepannya. Sukses dan semangat untuk apapun yang akan dihadapi di masa mendatang.
11. **Rongkat; Furqon, Acen, Burhan, Eja, Lanang, Ebum, Afli dan Barus** yang selalu merepotkan dan bergantung dalam hal apapun. Terima kasih 4 tahun kebersamaannya untuk bantuan, hiburan, segala drama juga kesabaran kalian mendengarkan omelan penulis. Percayalah kehadiran kalian begitu luar biasa sudah seperti adik kandung penulis, semoga semua tidak sampai disini ya, ditunggu *update* kehidupan masing-masing setelah ini.

12. **Deajeng Prameswari** dan **Billy Firmansyah** sebagai teman, sahabat juga rekan kerja terbaik selama berjuang di kampus merah. Terima kasih segala dukungan, bantuan juga kepercayaan bahwa penulis bisa melalui segala rintangan ini. Semoga kita segera dipertemukan kembali.
13. **Gendats; Betti, Mala,** dan **Uzik** sebagai sahabat penulis di perkuliahan yang selalu menyalurkan energi positif untuk penulis dalam segala hal. Terima kasih untuk kesabarannya menghadapi penulis yang selalu menyibukkan diri dengan organisasi. Maaf jika penulis belum bisa membalas segala kebaikan terlebih waktu yang selalu kalian luangkan. Semoga kita selalu dilindungi dan dipertemukan dengan lingkungan yang baik.
14. **Safirranika Mulya Nova** sebagai adik tingkat sekaligus seperti teman dan keluarga penulis sendiri. Terima kasih sudah mempercayakan penulis untuk jadi tempat *sharing* kehidupan kamu yang penuh perjuangan luar biasa, dari kamu penulis banyak belajar untuk bersyukur dengan apa yang sudah diberi Allah di kehidupan sekarang. Terima kasih juga bantuan dan waktunya untuk menemani tahun terakhir di kampus, sehingga penulis tidak merasa sendiri meskipun jauh dari teman satu angkatan. Semoga segalanya akan berakhir dengan bahagia, sukses dan semangat terus ya.
15. **Adib Satriawan, Ryzqy Kumara Dhana** dan **Habib Ma'ruf** sebagai adik tingkat yang tak segan memberikan bantuan, waktu juga tenaga kapanpun penulis membutuhkan. Terima kasih sudah selalu menemani penulis terlebih saat tersulit penulis dan di tahun terakhir penulis. Terima kasih untuk obrolan berbobotnya terutama usahanya untuk memberikan yang terbaik bagi generasi penerus kemahasiswaan selanjutnya. Semoga segala usaha yang sudah kita bangun bersama dapat semakin kuat dan diteruskan dengan baik oleh adik-adik.
16. **Winnie The Pooh; Sandrina, Denyta, Nadiah** dan **Lince** apresiasi untuk segala usahanya menjadi yang terbaik, juga

terima kasih selalu merayakan momen kebahagiaan dan apapun pencapaian penulis. Semoga pondasi ini tetap terjaga keutuhannya sampai kapanpun ketika penulis ingin berkunjung. Semangat mengemban ilmu dan bermanfaat untuk siapapun terutama di kampus merah tercinta ini.

17. **Adik Bang Ami; Ghusti Raka, Wildhan Nugroho, Pieter Hernando dan Yosua Zulkarnaen.** Terima kasih menjadi adik sekaligus *partner* tugas akhir yang rewel, merepotkan tapi selalu baik dan membantu untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Alhamdulillah, *we did it* setelah sekian *chat* penuh dengan ketidakpastian dan membingungkan. Semoga pengalaman tugas akhir penuh adrenalin ini dapat memberikan kesuksesan untuk kehidupan kita semua di masa mendatang. Sukses ya ditunggu cerita konyol setelah kelulusan ini.
18. **Anisah Nurul Izzah, Roze Windu dan Kirana Alif Fatika** untuk segala bantuan yang tak segan diberikan kepada penulis entah dalam dunia perkuliahan juga dalam keseharian penulis. Terima kasih selalu mendengarkan keluh kesah penulis dalam proses pengerjaan tugas akhir ini. Terima kasih sudah selalu menghibur dan memberi dukungan saat penulis sudah mulai lelah dalam pengerjaan tugas akhir ini. Semoga kebahagiaan selalu menyertai kalian.
19. **Sherlina Puspita Maya** sebagai saudara terdekat penulis yang banyak memberikan *support*, bantuan juga waktunya untuk menguatkan dan menemani segala asam garam kehidupan penulis. Terima kasih sudah menerima penulis apapun kondisinya.
20. **Sahabat Ilalang,** terima kasih untuk segala momen dan kenangannya sejak duduk di bangku SMA sampai sekarang dan kapanpun. Ditunggu kabar baiknya.
21. **PSDM HMM 15/16 dan PSDM HMM 16/17** terima kasih telah kebersamai untuk membentuk pondasi menjadi SMRM, terkhusus **Juliandito Adzani** terima kasih sudah membuat penulis menjadi lebih *independent*, teliti, berhati-

hati dan berani untuk mengambil tindakan dengan lebih percaya diri juga pembelajaran lainnya, inshaAllah segala kebaikan dan ilmu yang sudah kamu beri akan penulis bagikan ke orang lain.

22. **SeksDep HMM 16/17** sebagai *partner* dan tim kerja terbaik dan terkompak sepanjang sejarah persekdep-an di HMM. Terima kasih untuk momen senang, sedih, tengkar, *deadline*, ghibah dan segala hal yang menyebalkan, menyenangkan, mengharukan tak lupa juga pasti menguatkan. **Seluruh Pengurus Himpunan HMM 15/16 dan HMM 16/17** terima kasih atas pengalaman organisasinya yang luar biasa menantang juga menyenangkan.
23. **Tim SC POROS 2015 dan SC POROS 2016** terima kasih atas ilmu, pengetahuan, pengalaman kaderisasi juga kehidupan yang luar biasa. Terkhusus **Tim Sejenak Cangkruk POROS 2017** terima kasih pengalaman segala asam garam kehidupannya, semoga kabar baik juga kebahagiaan selalu menyertai sampai kapanpun. Tetap berhati-hati dan waspada dalam mengambil langkah. Sukses buat kita semua.
24. **Keluarga SC Poros 2017; Sauki, Audha, Fahreza, Robin, Rubi, Agi, Tria, Denny, Derryl, Gerald, Riyan dan Biyan** yang hobi minta traktir. Terima kasih sudah menjadi alasan penulis untuk belajar menjadi pribadi yang lebih baik. Terima kasih atas segala usahanya menjadi yang paling kompak dalam situasi dan kondisi apapun. Kalian menjadi bagian penting dalam kehidupan di kampus merah ini. Sukses buat semuanya.
25. **Ikhlas Danadyaksa**. Terkhusus **Gerry Prasetyo dan M. Risky Caesar** terima kasih banyak membantu dan selalu siap menampung keluh kesah tentang organisasi, kehidupan juga masalah kepemanduan terlebih setelah kalian lulus dari kampus perjuangan ini. Semoga kita dapat bertemu segera mungkin.

26. **Pemandu Ikhlas, Pemandu Kompas dan Pemandu Andalas;** terima kasih pengalamannya menjadi tim yang hebat mengonsept dan menyelenggarakan pelatihan LKMM ITS. Teruntuk adik-adik **Pemandu Panah Emas** dan **Pemandu Kontras** terima kasih sudah selalu memberikan ruang bagi penulis untuk *sharing* ilmu dalam dunia kepemanduan. Semoga kepemanduan ITS kedepannya lebih baik terlebih Pemandu Merah Mesin.
27. **Tim Bakor Pemandu FTI-ITS 2016/2017** terima kasih pengalaman serta ilmunya mengelola kepemanduan 10 Departemen yang sangat berharga dan bermanfaat untuk kehidupan perkuliahan juga. Terkhusus **Amanda Karida** terima kasih sudah menjadi tempat cerita terbaik tentang apapun di tim kepemanduan. Semoga kebahagiaan dan kebaikan selalu menyertai kamu.
28. **Rakyat Metalurgi. Engra, Vidi, Gemilang, Mukor, Aldo, Mona, Usi, Zuli, Anggi, Edric, Ucup, Faizal, Zhul, Ijaz, Ijal, Abdur, Tegar, Islah, Ghazy, Nindi, Mas Rayhan, Mas Safa'at** dan masih banyak lagi. Terima kasih atas bantuannya dan selalu meramaikan suasana laboratorium terhoror di Teknik Mesin ITS.
29. **Senior. Mba Dewi M53, Mas Galih M53, Mas Kevin M53, Mas Budhita M53, Mas Galang M53, Mas Coper M53, Mas Arya M54, Mas Bobby M54, Mas Azhar M54, Mas Ari M54, Mas Putra M54, Mba Dewor M54, Mba Nazila M54, Mba Esty M54, Mas Tomi M54, Mas Nabil M54, Mas Aji M54, Mba Icha M55, Mas Iril M55, Mas Nico M55, Mas Faiz M55, Mas Adhi M55, Mas Oji M55, Mas Fitroh M55, Mas Amri M55, Mba Bella M55, Mba Selvi M55, Mas Azis M55, Mas Vrista M55, Mas Eden M55, Mas Mul M55, Mas Haidir M55, Mba Risa M55, Mas Alif M55, Mas Punjung M55, Mba Pindi M55, Mas Rian M55, Mas Fian M55, Mas Wilis M55, Mas Deva M55, Mas Ghani M55, Mas Havi M55, Mba Fifi M55, Mba Iwed M55, Mba Rahma M55, Mba Fira M55, Mba Shofie M56,**

Mba Tiara M56, Mba Fiky M56, Mba Itak M56, Mas Firman M56, Mas Luthfan M56, Mas Afif M56, Mas Alawy M56, Mba Sarah M56 Mas Angga M56, Mas Bintang M56 dan Mas Fridam M56, yang banyak membantu penulis untuk berkembang di dunia perkuliahan. Terima kasih atas ilmu juga pengalamannya sehingga membantu penulis untuk bertahan di kampus perjuangan ini.

30. **Junior. Disa M58, Devinda M58, Azhar M58, Tomy M58, Alwi M58, Tegar M58, Abdur M58, Aldo M58, Ijal M58, Arkan M58, Juan M58, Jove M58, Dewi M58, Deasy M58, Dhina M58, Bahar M58, Lucyn M58, Darry M59, Faris M59, Echa M59, Bella M59, Adima M59, Emy M59, Auli M59, Thaariq M59, Dion M59, Yusuf M59, Almer M59, Taty M59, Nuge M59, Raihan M59, Wildhan M59, Ghusti M59, Favian M59, Songko M59, Fadhil M59, Izzan M59, Teo M59, Arche M59, Annisa M59, Ajie M59, Fatir M59, Bagus M59, Daffa M59, Dika M59, Naufal M59, Bawir M59, Farlen M60, Pongas M60, Iqbal M60, Adit.C M60, Puts M60, Farrel M60, Yoga M60, Josep M60, Alfin M60, Mifti M60, Aheng M60, Gerry M60, Dodit M60, Ari M60, Mega M60, Ajeng M60, Dika M60, Bot M60, Lala M60, Andre M60, Icanck M61, Adhi M61, Arighi M61, Hakim M61, Kevin M61, Pray M61, Badil M61, Artha M61, Fadil M61, Dhau M61, Aceng M61, Kelpo M61, Faqih M61, Peka M61, Thariq M61, Putra M61, Bob M61, Fadhil M61, Theonof M61, Ani M61 Febi M61, Yafi M61, Tata M61, Nauval M61, Dhani M61, Tyo M61,** dan masih banyak lagi, sebagai tempat diskusi yang baik dan pertolongan yang telah diberikan, terima kasih.
31. **Adik-adik SC 1 Poros 2016 dan SC 8 Poros 2018,** terima kasih atas tingkah kocak dan momen kebersamaannya terutama saat menjadi IC kalian. Besyukur dapat diterima dengan baik oleh kalian semua. Sukses selalu ya buat kedepannya.

32. **Arcana Auriga**, keluarga OSIS SMAN 1 Pandaan terima kasih atas pondasi organisasinya yang kuat sehingga dapat berguna untuk kehidupan perkuliahan penulis. Salam rindu untuk sanggar.
33. **Tim Kemahasiswaan Teknik Mesin** dan **Tim Kemahasiswaan ITS** tahun 2018, terima kasih atas pelajarannya yang membuat penulis lebih berhati-hati dalam bertindak. Semoga semua yang telah terjadi dapat menjadi bekal juga pelajaran terbaik untuk kehidupan penulis di masa mendatang.
34. **SMRM** terima kasih atas segala hal entah yang baik maupun yang buruk. Semoga semakin bertambahnya gelar M yang ada juga semakin membara semangatnya untuk menjadi penerus yang selalu membangun citra gemilang untuk Teknik Mesin lebih baik dan bermanfaat untuk sesama. Vivat Mesin! *Mesin Über Alles!*
35. **Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya**. Almamater tercinta, semoga kejayaan selalu membersamai. Vivat! Hidup ITS!
Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Akhir kata, semoga tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi siapapun yang membacanya.

Surabaya, 28 Juli 2020
Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

COVER.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT.....	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xxiii
DAFTAR GAMBAR.....	xxvii
DAFTAR TABEL.....	xxxii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Biomaterial dalam Implan	7
2.2 Baja Tahan Karat (<i>Stainless Steel</i>)	9
2.3 <i>Austenitic Stainless Steel 316L</i>	10
2.4 <i>Investment Casting</i>	12
2.5 Perlakuan Panas pada <i>Austenitic Stainless Steel</i>	15
2.6 <i>Cold Rolling</i>	17
2.7 Metode Penguatan Material.....	18
2.7.1 Penghalusan Butir (<i>Grain Size Reduction</i>)	18
2.7.2 Pengerasan Regangan (<i>Strain Hardening</i>)	19
2.7.3 <i>Solid Solution Strengthening</i>	20
2.8 <i>Grain Refinement Austenitic Stainless Steel</i>	21
2.9 Rekristalisasi	24
2.10 Hubungan Antara Waktu Tahan Pemanasan dan Ketebalan Plat.....	26
2.11 Hubungan Antara <i>Cold Working</i> dan Temperatur Rekristalisasi	28
2.12 Deformasi Dingin dan Kepadatan Dislokasi	30
2.13 Diagram <i>Schaeffler</i>	31
2.14 <i>Thermal Cycling</i>	32

BAB III METODE PENELITIAN	35
3.1 Diagram Alir Penelitian	35
3.2 Spesimen Uji.....	36
3.2.1 Spesimen untuk <i>Cold Rolling</i>	37
3.2.2 Spesimen Hasil <i>Cold Rolling</i> untuk <i>Thermal Cycling</i> serta Uji <i>Micro Hardness</i> dan <i>Metallography</i>	37
3.3 Langkah-Langkah Penelitian	38
3.3.1 Studi Literatur	38
3.3.2 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian	39
3.3.3 Pengambilan Data Awal Penelitian	39
3.3.3.1 Pengujian <i>Metallography</i>	39
3.3.3.2 Pengujian Kekerasan.....	41
3.3.3.3 Proses <i>Cold Rolling</i>	42
3.3.3.4 Proses <i>Thermal Cycling</i>	42
3.3.3.5 Pengujian <i>Scanning Electron Macroscopic</i>	43
3.4 Hasil Data Awal	44
3.4.1 Spesimen Hasil <i>Investment Casting</i> (IC).....	44
3.4.1.1 Pengujian <i>Metallography</i> Spesimen Hasil <i>Investment Casting</i>	44
3.4.1.2 Pengujian <i>Microhardness</i> Spesimen Hasil <i>Investment Casting</i>	46
3.4.2 Spesimen Hasil <i>Cold Rolling</i> (CR)	47
3.4.2.1 Pengujian <i>Metallography</i> Spesimen <i>Cold Rolling</i>	47
3.4.2.2 Pengujian <i>Microhardness</i> Spesimen <i>Cold Rolling</i>	58
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	63
4.1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia.....	63
4.1.1 Perhitungan Nilai Ekuivalen Kromium dan Nikel .	65
4.2 Hasil Pengujian <i>Metallography</i>	68
4.2.1 Hasil Pengamatan Struktur Mikro <i>Stainless Steel</i> <i>316L Cold Rolling</i> Reduksi 52% <i>Thermal Cycling</i> 900°C (CR 52 TC).....	68
4.2.2 Hasil Pengamatan Struktur Mikro <i>Stainless Steel</i> <i>316L Cold Rolling</i> Reduksi 60% <i>Thermal Cycling</i> 900°C (CR 60 TC).....	71

4.2.3 Hasil Pengamatan Struktur Mikro <i>Stainless Steel</i> 316L <i>Cold Rolling</i> Reduksi 69% <i>Thermal Cycling</i> 900°C (CR 69 TC).....	74
4.3 Pengujian <i>Microhardness</i>	89
4.3.1 Hasil Pengujian <i>Microhardness Stainless Steel</i> 316L <i>Thermal Cycling</i> 900°C.....	90
4.3.2 Ringkasan Analisis Pengujian <i>Microhardness</i>	91
4.4 Pengujian <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)	93
4.5 Ringkasan Analisis.....	95
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	99
5.1Kesimpulan	99
5.2Saran.....	99
DAFTAR PUSTAKA	101
LAMPIRAN.....	105
BIODATA PENULIS	107

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Implan Tulang	7
Gambar 2.2 Pengaplikasian Biomaterial pada Implan Patah Tulang	8
Gambar 2.3 Tahapan Proses <i>Investment Casting</i>	13
Gambar 2.4 Diagram Fasa <i>Austenitic Stainless Steel</i>	16
Gambar 2.5 Skema <i>Cold Rolling</i>	17
Gambar 2.6 Gerakan Dislokasi Terhalang Batas Butir	19
Gambar 2.7 Grafik Perbandingan Hasil Kekerasan <i>Stainless Steel 316L Cold Rolling, Thermal Cycle</i> dan <i>Stainless Steel 316L Merk Synthes</i>	23
Gambar 2.8 Grafik Hasil Ukuran Butir pada <i>Cold Rolling Thermal Cycling</i> dan <i>Stainless Steel 316L Merk Synthes</i>	24
Gambar 2.9 Fraksi Rekristalisasi dengan Waktu <i>Annealing</i> pada <i>Stainless Steel</i>	27
Gambar 2.10 <i>The Variation of Recrystallization Temperature With Percent Cold Work For Iron</i>	29
Gambar 2.11 Diagram <i>Schaeffler</i>	32
Gambar 2.12 Grafik Perbandingan Rata-Rata Ukuran Butir <i>Thermal Cycling</i> dan <i>Cold Rolling Terhadap Investment Casting</i>	33
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	35
Gambar 3.2 Spesimen untuk <i>Cold Rolling</i>	37
Gambar 3.3 Spesimen setelah <i>Cold Rolling</i>	37
Gambar 3.4 <i>Olympus Stereo Microscope</i>	39
Gambar 3.5 Mesin <i>Micro Vickers Hardness</i>	41
Gambar 3.6 Mesin <i>Rolling Mill</i>	42
Gambar 3.7 <i>Furnace Nabertherm N11/HR</i>	43
Gambar 3.8 Skema <i>Thermal Cycling</i>	43
Gambar 3.9 Mesin <i>Scanning Electron Microscope</i>	44
Gambar 3.10 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Spesimen Hasil <i>Investment Casting</i> Perbesaran (a) 100x (b) 200x	45

Gambar 3.11 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Permukaan Atas Spesimen <i>Cold Rolling</i> Reduksi 52% Perbesaran (a) 50x (b) 100x (c) 200x	48
Gambar 3.12 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Permukaan Atas Spesimen <i>Cold Rolling</i> Reduksi 60% Perbesaran (a) 50x (b) 100x (c) 200x	50
Gambar 3.13 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Permukaan Atas Spesimen <i>Cold Rolling</i> Reduksi 69% Perbesaran (a) 50x (b) 100x (c) 200x	52
Gambar 3.14 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Permukaan Atas Spesimen <i>Cold Rolling</i> Reduksi 80% Perbesaran (a) 50x (b) 100x (c) 200x	54
Gambar 3.15 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Permukaan Atas Spesimen <i>Cold Rolling</i> Reduksi 90% Perbesaran (a) 50x (b) 100x (c) 200x	56
Gambar 3.16 Grafik Ukuran Butir Spesimen <i>Stainless Steel 316L</i> yang telah Mengalami <i>Cold Rolling</i>	57
Gambar 3.17 (a) Posisi Indentasi Pengujian Kekerasan pada Permukaan Atas Spesimen <i>Stainless Steel 316L</i> Setelah <i>Cold Rolling</i> (b) Hasil Indentasi Pengujian Kekerasan Spesimen <i>Stainless Steel 316L</i> Setelah <i>Cold Rolling</i>	58
Gambar 3.18 Grafik Kekerasan Spesimen <i>Stainless Steel 316L</i> yang telah mengalami <i>Cold Rolling</i>	60
Gambar 3.19 Grafik <i>Dislocation Density</i> Spesimen <i>Stainless Steel 316L</i> yang telah mengalami <i>Cold Rolling</i>	62
Gambar 4.1 Hasil Perhitungan Nilai Ekuivalen Kromium dan Nikel pada Material AISI 316L.....	67
Gambar 4.2 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sisi Samping Spesimen <i>Stainless Steel 316L Cold Rolling</i> Reduksi 52% <i>Thermal Cycling</i> 900°C perbesaran (a)100x (b)200x (c)500x (d)1000x ...	70
Gambar 4.3 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sisi Samping Spesimen <i>Stainless Steel 316L Cold Rolling</i> reduksi 60% <i>Thermal Cycling</i> 900°C perbesaran (a)100x (b)200x (c)500x (d)1000x ...	73

Gambar 4.4 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sisi Samping Spesimen <i>Stainless Steel 316L Cold Rolling</i> Reduksi 69% <i>Thermal Cycling 900°C</i> perbesaran (a)100x (b)200x (c)500x (d)1000x...	76
Gambar 4.5 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sisi Samping Spesimen <i>Stainless Steel 316L Cold Rolling</i> Reduksi 80% <i>Thermal Cycling 900°C</i> perbesaran (a)100x (b)200x (c)500x (d)1000x...	79
Gambar 4.6 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sisi Samping Spesimen <i>Stainless Steel 316L Cold Rolling</i> Reduksi 90% <i>Thermal Cycling 900°C</i> perbesaran (a)100x (b)200x (c)500x (d)1000x...	82
Gambar 4.7 Grafik Ukuran Butir Spesimen <i>Stainless Steel 316L</i> setelah <i>Cold Rolling-Thermal Cycling 900°C</i>	84
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Rata-Rata Ukuran Butir pada <i>Stainless Steel 316L</i> Hasil <i>Investment Casting, Cold Rolling</i> dan <i>Cold Rolling Thermal Cycling 900°C</i>	86
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Rata-Rata Ukuran Butir pada <i>Stainless Steel 316L</i> Hasil <i>Investment Casting, Cold Rolling</i> dan <i>Cold Rolling Thermal Cycling 900°C</i>	88
Gambar 4.10 Posisi Indentasi Pengujian Kekerasan pada Sisi Samping Spesimen <i>Stainless Steel Thermal Cycling 900°C</i>	89
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Rata-Rata Kekerasan pada <i>Stainless Steel 316L</i> Hasil <i>Investment Casting, Cold Rolling</i> dan <i>Cold Rolling Thermal Cycling 900°C</i>	92
Gambar 4.12 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Spesimen <i>Stainless Steel 316L Cold Rolling</i> dengan <i>Thermal Cycling 900°C</i> (a) Reduksi 52% perbesaran 500x (b) Reduksi 90% perbesaran 500x (c) Reduksi 52% perbesaran 2000x (b) Reduksi 90% perbesaran 2000x menggunakan <i>scanning electron microscope</i> .	94
Gambar 4.13 Grafik Perbandingan Rata-Rata Kekerasan Terhadap Rata-Rata Ukuran Butir Spesimen <i>Thermal Cycling 900°C</i>	96

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Standar Sifat Mekanik <i>Stainless Steel Implant Quality</i> (ASTM F138-13a).....	11
Tabel 2.2 Komposisi Kimia <i>Stainless Steel Implant Quality</i> (ASTM F138-13a).....	11
Tabel 3.1 Nilai Reduksi <i>Cold Rolling Stainless Steel 316L</i>	38
Tabel 3.2 Data Awal Spesimen <i>Stainless Steel 316L</i> Hasil <i>Investment Casting</i>	46
Tabel 3.3 Hasil Pengujian <i>Microhardness Stainless Steel 316L</i> Setelah Mengalami <i>Cold Rolling</i>	59
Tabel 3.4 Hasil Perhitungan <i>Dislocation Density Stainless Steel 316L</i> Setelah Mengalami <i>Cold Rolling</i>	61
Tabel 4.1 Komposisi Kimia Material Hasil Uji Spectro	64
Tabel 4.2 Rata–Rata Ukuran Butir Spesimen <i>Stainless Steel 316L Cold Rolling-Thermal Cycling 900°C</i>	83
Tabel 4.3 Hasil Pengujian <i>Microhardness Stainless Steel 316L Cold Rolling-Thermal Cycling 900°C</i>	90

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jumlah kecelakaan lalu lintas jalan di Indonesia pada tahun 2017 mencapai 98.417 kasus. Kecelakaan lalu lintas ini merupakan salah satu penyebab terjadinya patah tulang selain kecelakaan kerja. Sebagian besar kasus kecelakaan kerja terjadi pada usia produktif (Subdirektorat Statistik Transportasi, 2017). Data dari Kementerian Kesehatan Republik Indonesia menunjukkan bahwa pada tahun 2018 terdapat sekitar 14,5 juta orang mengalami kejadian fraktur atau patah tulang dengan penyebab yang berbeda-beda (Badan Penelitian dan Pengembangan Kesehatan , 2018). Laporan WHO juga menunjukkan bahwa 50% kondisi patah tulang adalah patah tulang paha atas yang dapat mengakibatkan kecacatan seumur hidup dan kematian (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2015).

Patah tulang merupakan suatu kondisi dimana terjadi diskontinuitas tulang sehingga diperlukan tindakan medis. Salah satu tindakan yang dapat dilakukan untuk merawat patah tulang adalah dengan melakukan pemasangan implan tulang. Implan tulang merupakan salah satu teknologi biomaterial yang sering digunakan pada bedah ortopedik dengan tujuan untuk mengembalikan posisi tulang ke kondisi anatomisnya dan mempertahankan posisi tersebut hingga proses penyambungan tulang solid terjadi. Beberapa material telah digunakan sejak implan ortopedi ditemukan, seperti logam, keramik, polimer, dan komposit. Penggunaan masing-masing material berdasarkan kebutuhan. Bahan implan yang umum digunakan saat ini adalah biomaterial berbasis logam seperti baja tahan karat (*stainless steel*) dan titanium (Badan Penelitian dan Pengembangan Kesehatan , 2018). Bidang kedokteran biasanya menggunakan *stainless steel* untuk implan tulang dikarenakan material ini memiliki sifat tahan korosi yang tinggi, sifat tahan aus, memiliki sifat biokompatibilitas dengan tubuh manusia serta lebih murah dibandingkan titanium.

Produsen implan tulang banyak tersebar di berbagai negara, namun di Indonesia implan yang diproduksi dengan komponen lokal berkisar sekitar 5% dari yang ada di pasaran. PT. Pelopor Teknologi Implantindo yang berlokasi di Mojokerto merupakan salah satu perusahaan implan *stainless steel* di Indonesia yang berusaha agar produk implan lokal dapat memenuhi kebutuhan implan *stainless steel* di Indonesia. Metode *wax investment casting* digunakan dalam tahap produksi implan pada perusahaan tersebut. Teknologi *investment casting* dipilih agar komposisi kimia implan lokal 316L dapat dikontrol dengan maksimal sehingga diperoleh produk mendekati bentuk akhir (*near-net shape product*) sesuai dengan standar ASTM F138-13a. Proses *investment casting* menghasilkan struktur mikro dendritik dan secara umum telah memenuhi standar ASTM F138-13a secara komposisi kimia (Mubarok, Fausia, Sutikno, & Mahyudin, 2019). Namun bila dibandingkan dengan implan impor dari Eropa yang ada di pasaran, produk dari proses *investment casting* masih belum setara. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan struktur mikro terutama ukuran butiran dan keseragaman butiran dari material implan tersebut. (Fausia, 2018) telah melakukan pengujian pada spesimen implan impor Eropa, didapatkan hasil untuk nilai kekerasan sebesar 548.7 HV dan ukuran butir sebesar 28.144 μm . Oleh karena itu dibutuhkan perlakuan tambahan pada implan lokal 316L menggunakan prosedur *grain refinement*, dimana butiran *stainless steel* 316L dirubah menjadi butiran halus berukuran nano, sub-mikron atau mikron. Perubahan butiran ini akan menaikkan kekuatan dengan tetap mempertahankan keuletan dari *stainless steel* 316L, sehingga dihasilkan ukuran butir yang halus dan seragam agar dapat bersaing dengan implan impor Eropa.

Pada penelitian ini menggunakan *stainless steel* jenis *austenitic*. *Austenitic stainless steel* dipilih karena memiliki sifat tahan korosi yang paling baik dengan kadar kromiumnya yang tinggi, dibandingkan dengan baja tahan karat *martensitic* dan *ferritic* (Silva, 2011). Adanya kandungan nikel pada *austenitic stainless steel* juga dapat memperlambat transformasi *martensitic*

karena adanya *cold deformation*, dalam penelitian ini yaitu *cold rolling*. Selain itu struktur kristal FCC pada *austenitic stainless steel* dapat membuat material tersebut di-roll dalam keadaan dingin sampai reduksi 90% (Mabruri, 2012). Struktur Kristal FCC sangat tangguh dan ulet sehingga tidak membuat material kehilangan kekuatan pada saat diberikan perlakuan panas pada temperatur tinggi dibandingkan *ferritic stainless steel* yang memiliki struktur BCC (ASM International, 2008).

Stainless steel 316L memiliki fasa austenitik yang stabil sampai temperatur kamar sehingga transformasi atau perubahan fasa yang umumnya digunakan sebagai bahan dasar perubahan struktur mikro pada proses perlakuan panas baja tidak dapat digunakan untuk *stainless steel* 316L (Nanda, 2016). Modifikasi struktur mikro implan 316L dapat dilakukan dengan kombinasi pengerjaan dingin dan perlakuan panas. Hal ini dapat diawali dengan pengerjaan dingin seperti *cold-rolling* atau *forging* dan dilanjutkan dengan perlakuan panas *thermal-cycling*. Adanya kombinasi *cold rolling-thermal cycling* dikarenakan *cold rolling* akan menurunkan elongasi material jauh dari standar ASTM F138 untuk implan, oleh karena itu diberikan perlakuan *thermal cycling* pada temperatur tinggi agar terjadi pengintian struktur mikro baru dengan ukuran butiran jauh lebih kecil dibandingkan dengan butiran awal. Ketika struktur mikro implan dirubah dengan menjadikan butirannya menjadi seragam dan berukuran kecil maka akan terjadi kenaikan kekuatan sehingga didapatkan keseimbangan antara kekuatan dan keuletan dari implan *stainless steel* 316L.

Dalam penelitian ini implan *stainless steel* 316L hasil *investment casting* dimodifikasi dengan memberikan proses *cold rolling* dengan reduksi ketebalan bertahap 52%, 60%, 69%, 80%, 90% dari ketebalan awalnya kemudian dilanjutkan dengan proses *thermal cycling* 900°C. Proses *cold rolling* akan menghasilkan *stored strain energy* pada spesimen, dan saat *thermal cycling* dilakukan *stored strain energy* akan dilepaskan untuk memicu proses rekristalisasi butiran baru yang ukurannya jauh lebih kecil dibanding dengan butiran hasil *investment casting*. Hubungan

antara variasi derajat reduksi bertahap akibat proses *cold rolling* dan proses *thermal cycling* akan dibahas dengan melihat perubahan karakteristik baja secara metalografi dan pengujian kekerasan.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun permasalahan yang akan dianalisa dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi derajat reduksi bertahap *cold rolling* pada 316L hasil *investment casting* setelah dilakukan proses *thermal cycling*.
2. Bagaimana perubahan morfologi dan kekerasan akibat *thermal cycling* pada *cold rolled* 316L dibanding kondisi produk *investment casting*.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mempelajari pengaruh variasi derajat reduksi bertahap *cold rolling* pada 316L hasil *investment casting* yang diikuti proses *thermal cycling*.
2. Menganalisa perubahan morfologi dan sifat kekerasan akibat *thermal cycling* pada *cold rolled* 316L.

1.4 Batasan Masalah

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

1. Porositas yang terdapat pada spesimen AISI 316L hasil *investment casting* dianggap tidak berpengaruh pada pengujian yang dilakukan.
2. Temperatur pemanasan pada suhu 900°C diasumsikan homogen diseluruh bagian tungku.
3. *Cold rolling* dilakukan dengan mereduksi spesimen secara bertahap.
4. Arah pengerolan homogen di setiap reduksi.
5. Pendinginan dilakukan di udara.

1.5 Manfaat Penelitian

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

1. Dapat meningkatkan kekerasan produk *investment casting* sehingga dapat bersaing dengan produk dari implan impor Eropa.
2. Dengan dilakukannya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan masukan kepada kalangan industri mengenai pengaruh *cold rolling* dan *thermal cycling* pada *stainless steel* AISI 316L.
3. Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat dan menambah wawasan bagi peneliti.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomaterial dalam Implan

Biomaterial didefinisikan sebagai bahan yang dapat berinteraksi dengan sistem pada tubuh manusia untuk mengevaluasi, merawat, menambah atau mengganti jaringan, organ atau fungsi tubuh tanpa menimbulkan efek samping negatif (Subdirektorat Statistik Transportasi, 2017). Biomaterial merupakan bahan yang umum digunakan di dunia medis. Fungsi dari biomaterial salah satunya adalah untuk memperbaiki fungsi jaringan tubuh secara berkelanjutan seperti pada kasus patah tulang (ortopedi). Salah satu aplikasi biomaterial adalah implan tulang berupa *broad plate* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Implan tulang dari logam digunakan sebagai penyangga bagian tulang yang patah sehingga dapat memicu penyambungan tulang yang patah secara maksimal.

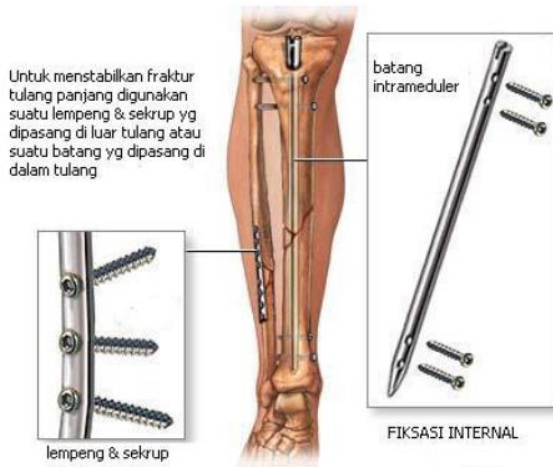


Gambar 2.1 Implan Tulang (Sutowo, Ikhsan, & Kartika, 2014)

Pemilihan material yang akan digunakan untuk implan harus memenuhi syarat, yaitu:

- a. Biokompatibilitas, selaras dengan tubuh tanpa menimbulkan penolakan atau reaksi yang berbahaya bagi tubuh manusia
- b. Material tahan korosi dan keausan tinggi, material yang akan di implan harus dapat bertahan lama di dalam tubuh saat fase penyembuhan, karena di dalam tubuh manusia itu sendiri lingkungannya sangat korosif serta mudah iritasi, sehingga dibutuhkan material yang tahan terhadap korosi (Sutowo, Ikhsan, & Kartika, 2014)

Contoh pemakaian biomaterial pada implan patah tulang yang ditempatkan dalam tubuh manusia ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Pengaplikasian Biomaterial pada Implan Patah Tulang (Sutowo, Ikhsan, & Kartika, 2014)

Jenis material implan tulang yang digunakan didasarkan oleh beberapa pertimbangan dan dikelompokkan berdasarkan jenis material, desain struktur implan, peraturan, dan faktor keadaan pasien (Jones, Topoleski, & Tsao, 2017). Implan *stainless steel* 316L merupakan salah satu biomaterial yang banyak dipilih karena

harganya yang lebih murah dibandingkan implan jenis titanium (Badan Penelitian dan Pengembangan Kesehatan, 2018). *Stainless steel* memiliki keunggulan dalam segi biokompatibilitas dan sifat fisik, serta sifat mekanik terutama nilai keuletan yang seimbang dengan logam lain yang digunakan.

2.2 Baja Tahan Karat (*Stainless Steel*)

Logam yang banyak digunakan sebagai material implan adalah baja tahan karat, biasa dikenal sebagai *stainless steel*. *Stainless steel* merupakan baja paduan dengan kadar paduan yang tinggi (*high alloy steel*). *Stainless steel* digunakan pada kondisi yang membutuhkan ketahanan korosi dan panas yang tinggi. Paduan utama dalam *stainless steel* untuk meningkatkan ketahanan baja terhadap korosi adalah kromium (Cr), yaitu minimal sebesar 11%. Unsur lain seperti Ni, Mo, Cu, dan Ti juga ditambahkan pada *stainless steel* dengan tujuan untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan memperbaiki struktur mikro serta sifat mekanik (Davis, 1994).

Stainless steel mempunyai kemampuan untuk membentuk lapisan oksida yang stabil dan melekat pada permukaan, sehingga melindungi baja terhadap lingkungan korosif. Pada umumnya *stainless steel* memiliki banyak manfaat, diantaranya:

1. Mudah dibersihkan sehingga banyak digunakan pada alat yang berhubungan dengan kesehatan.
2. Ketahanan korosi tinggi, *stainless steel* memiliki ketahanan korosi tinggi di atmosfer maupun didalam lingkungan air.
3. Kemampuan yang tinggi untuk diproses pengerjaan dingin (*cold working*).
4. Mudah fabrikasi, dengan pembuatan modern pada baja *stainless steel* dapat mudah dilas, dipotong maupun dibentuk.

2.3 *Austenitic Stainless Steel 316L*

Austenitic stainless steel memiliki unsur paduan utama yaitu kromium dan nikel. Adanya kandungan nikel bertujuan agar fasa *austenite* dapat stabil sampai temperatur ruang. Sedangkan kandungan kromium berpengaruh pada ketahanan korosi *stainless steel*, dimana kromium berfungsi untuk meningkatkan kestabilan oksida pada permukaan. Semakin tinggi kromium, maka ketahanan korosi semakin baik. Hal ini membuat *austenitic stainless steel* memiliki sifat tahan korosi yang paling baik dibandingkan dengan baja tahan karat *martensitic* dan *ferritic* (Silva, 2011). *Austenitic stainless steel* memiliki fasa *austenite* yang stabil hingga temperatur kamar. Kandungan nikel yang tinggi memperlambat transformasi *martensitic* karena *cold deformation*. *Austenitic stainless steel* memiliki struktur kristal FCC sehingga dapat di-roll dalam keadaan dingin sampai reduksi 90% (Mabruri, 2012). Struktur kristal FCC pada *austenitic stainless steel* sangat tangguh dan ulet. Struktur ini yang membuat *austenitic stainless steel* tidak kehilangan kekuatan pada saat temperatur tinggi dibandingkan *ferritic stainless steel* yang memiliki struktur BCC (ASM International, 2008).

Austenitic stainless steel banyak digunakan sebagai material implan tulang dikarenakan memiliki ketahanan korosi yang tinggi. Jenis *austenitic stainless steel* yang umum digunakan adalah *stainless steel 316L* (Umardhani & Suprihanto, 2013). *Stainless steel grade 316L* terdiri dari komposisi utama karbon, kromium, nikel dan molibdenum (Adri, 2016). Kandungan kromium antara 16 – 19% dan nikel antara 10 – 13% (Mabruri, 2012). *Stainless steel 316L* dibuat dengan kadar karbon rendah untuk menaikkan ketahanan korosi. Karakteristik pada material tipe 316L antara lain ketahanan *creep* yang tinggi, kekuatan tarik yang tinggi dan tahan terhadap korosi. Pada umumnya tipe ini sering digunakan pada industri kimia, instrumen industri tekstil, makanan dan minuman maupun medis (ASTM F138-13a, 2013). Adapun material yang akan diteliti dalam penelitian ini adalah implan *stainless steel 316L* hasil dari *investment casting* oleh PT. Pelopor Teknologi

Implantindo, Mojokerto. Implan yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada standar ASTM F138-13a. Kandungan komposisi kimia serta sifat mekanik pada *stainless steel* ditunjukkan pada tabel 2.1 dan 2.2.

Tabel 2.1 Standar Sifat Mekanik *Stainless Steel Implant Quality* (ASTM F138-13a)

<i>Condition</i>	<i>Annealed</i>
<i>Diameter (mm)</i>	1.60
<i>Ultimate Tensile Strength (MPa)</i>	490
<i>Yield Strength (Mpa)</i>	190
<i>Elongation (%)</i>	40

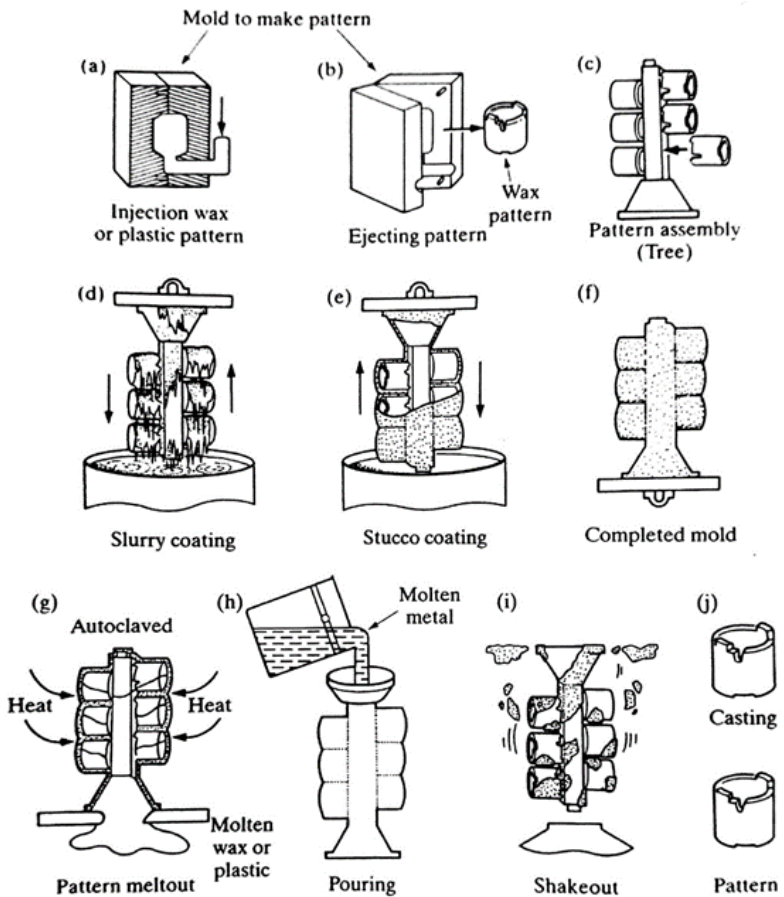
Tabel 2.2 Komposisi Kimia *Stainless Steel Implant Quality* (ASTM F138-13a)

<i>Element</i>	<i>Composition % (mass/mass)</i>
<i>Carbon</i>	0.030 max
<i>Manganese</i>	2.00 max
<i>Phosphorus</i>	0.025 max
<i>Sulfur</i>	0.010 max
<i>Silicon</i>	0.75 max
<i>Chromium</i>	17.00 to 19.00
<i>Nickel</i>	13.00 to 15.00
<i>Molybdenum</i>	2.25 to 3.00
<i>Nitrogen</i>	0.10 max
<i>Copper</i>	0.50 max
<i>Iron</i>	<i>Balance</i>

Persyaratan komposisi kimia harus memenuhi hal berikut ini: %Cr + 3.3 x % Mo \geq 26.0 (ASTM F138-13a, 2013).

2.4 Investment Casting

Investment casting atau biasa dikenal sebagai *lost wax process* merupakan salah satu jenis teknologi pengecoran presisi yang dapat menghasilkan produk dengan dimensi presisi dan bentuk geometri yang rumit, seperti kemiringan, kelengkungan dan kehalusan permukaan produk coran. Permukaan yang halus hasil dari proses ini terjadi akibat logam yang memiliki daerah beku yang sempit, sedangkan permukaan yang kasar akibat logam yang memiliki daerah beku yang lebar (Adri, 2016). Pada proses *investment casting* hasil dari permukaan akhir sangat baik sehingga material yang terbuang saat proses permesinan dapat dikendalikan sekecil mungkin (Syahid & Sofyan, 2012). Proses *investment casting* menggunakan pola yang terbuat dari bahan habis pakai, seperti *wax* atau *polystyrene*. Cetakan dalam *investment casting* direplikasi dari pola yang presisi dan dipindahkan dari proses pengecoran (Perdana, 2008). Metode ini biasa digunakan terutama untuk menghasilkan peralatan kedokteran maupun tulang buatan yang terbuat dari logam paduan kobalt krom (Suherman, 2018). Tahap-tahap dari proses *investment casting* tersebut dapat dilihat pada gambar 2.3 dibawah.



Gambar 2.3 Tahapan Proses *Investment Casting* (Kalpakjian, 1984)

Adapun tahapan dari proses *investment casting* pada gambar 2.3 adalah:

1. Proses dimulai dengan pembuatan cetakan *wax pattern* dimana *molten wax* pada temperatur 55°C diinjeksikan ke dalam tempat yang telah dibentuk sesuai dengan bentuk yang

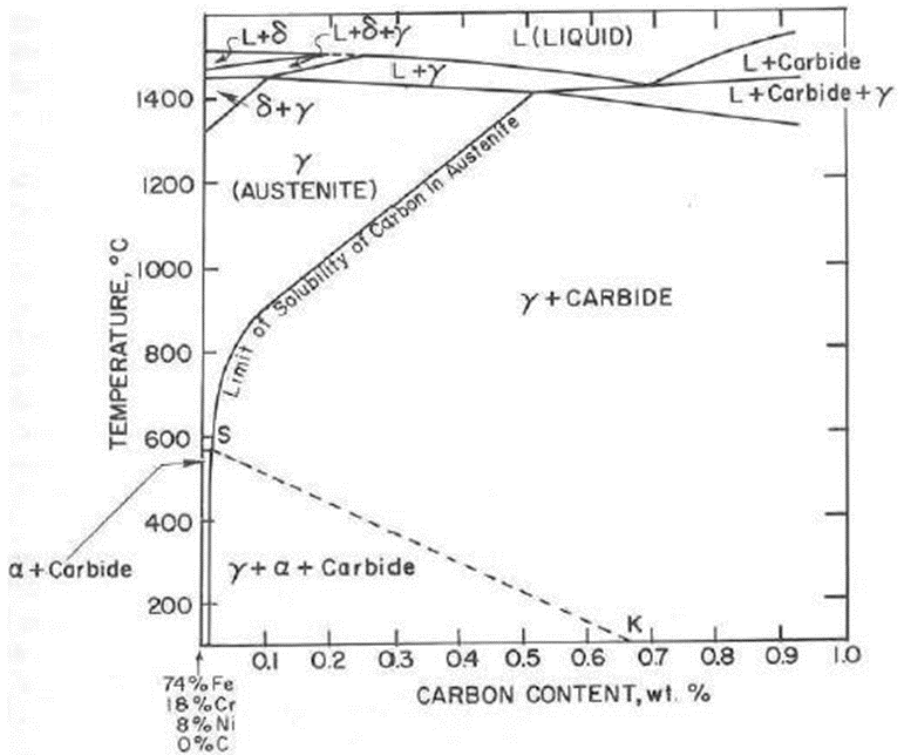
dibutuhkan. Pada proses ini terdapat pembuatan sistem saluran sebagai jalan masuk atau saluran bagi logam cair yang dituangkan. Bahan yang digunakan untuk pembuatan sistem saluran dibuat dengan bahan yang sama dengan pembuatan pola. Sistem saluran dari proses pengecoran ada beberapa bagian, yaitu:

- A. Cawan Tuang
Berbentuk seperti corong dengan saluran turun dibawahnya. Cawan tuang ini digunakan sebagai tempat penerima logam cair dan penyaring kotoran dari logam cair.
 - B. Saluran Turun (*Sprue*)
Saluran turun dibuat lurus dan tegak dengan irisan berupa lingkaran. Saluran ini yang pertama membawa cairan logam dari cawan ke dalam pengalir dan saluran masuk.
 - C. Saluran Turun Dasar (*Sprue Base*)
Merupakan pelebaran dari bagian bawah dari saluran turun.
 - D. Pengalir (*Runner*)
Berfungsi untuk membawa cairan logam dari saluran turun ke bagian-bagian yang telah disesuaikan dengan cetakan.
 - E. Saluran Masuk (*Ingate*)
Merupakan saluran pendek yang menghubungkan antara pengalir dan rongga cetakan. Fungsi dari saluran masuk adalah mengisikan cairan logam dari saluran pengalir ke dalam rongga cetakan (Suherman, 2018)
2. *Wax Pattern* mulai mengeras dan dikeluarkan dari cetakan.
 3. Bila produk yang akan dilakukan pengecoran berukuran relatif kecil, maka *wax pattern* tersebut dapat dirangkai (*tree assembly*), sehingga dalam sekali pengecoran akan didapatkan beberapa produk. Namun jika produknya besar, maka sekali pengecoran hanya menghasilkan satu produk saja.
 4. Pola yang telah digabung ke dalam *tree assembly* kemudian dicelupkan ke dalam *slurry coating* yang bekerja sebagai bahan pengikat.

5. Setelah dicelupkan ke dalam *slurry coating*, pola diberi *stucco coating* dimana pola diberi taburan partikel-partikel keramik kasar.
6. Pola ditunggu beberapa saat hingga menyatu dengan *coating* dan mengeras.
7. Proses dilanjutkan dengan pemanasan dimana rangkaian pola diletakkan dengan posisi terbalik dengan tujuan untuk melelehkan lilin yang mengalir ke bawah sehingga terbentuk cetakan dari keramik.
8. Apabila pola sudah diizinkan untuk solidifikasi, lelehan logam di tuangkan ke dalam pola hingga membeku dengan tujuan untuk menaikkan kekerasan, *tensile strength*, dan *impact strength*.
9. Proses akhir dari *investment casting* yaitu material keramik dihancurkan dari pola secara manual (*shake out*) atau menggunakan *pneumatic vibration machine*.
10. Setelah cairan logam membeku, hasil *investment casting* dapat dipisah dari *pattern* (Kalpakjian, 1984)

2.5 Perlakuan Panas pada Austenitic Stainless Steel

Pada dasarnya *austenitic stainless steel* tidak dapat diberi perlakuan panas layaknya pada baja pemanasan atau pendinginan yang lambat maka akan menyebabkan terbentuknya presipitat karbida pada batas butir. Selain itu, presipitat karbida dapat terjadi ketika baja tersebut dipanaskan pada temperatur antara 500–800°C. Untuk menghilangkan efek terbentuknya presipitat karbida pada temperatur tinggi, dapat dilakukan dengan adanya proses dengan perlakuan panas *annealing solution treatment* diatas temperatur 1100°C.



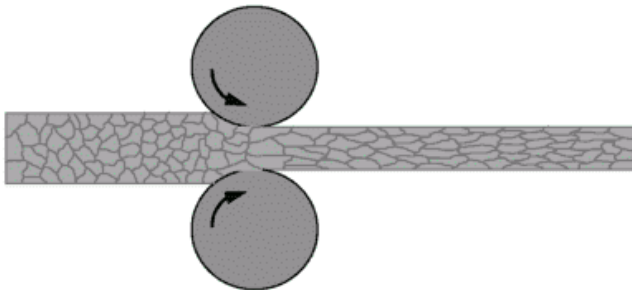
Gambar 2.4 Diagram Fasa *Austenitic Stainless Steel* (Kumar, Mahato, Sharma, & Sahu, 2009)

Pada gambar 2.4 menunjukkan diagram fasa *austenitic stainless steel*. Terlihat bahwa apabila dipanaskan maka fasa yang terbentuk tetap *austenite* seperti pada temperatur kamar. Namun kelarutan karbon dalam *austenite* akan menurun seiring naiknya temperatur, dan pada temperatur 500–800°C karbon yang keluar dari butiran *austenite* ke batas butir akan mengikat senyawa *chromium* sehingga terbentuk presipitat karbida krom pada batas butir ini sehingga akan mengurangi ketahanan material terhadap korosi (Kumar, Mahato, Sharma, & Sahu, 2009). Oleh karena itu

pada *austenitic stainless steel* 316L, kadar karbon diturunkan dibawah 0.03 wt% sehingga mencegah terbentuknya karbida krom karena minimnya kadar karbon.

2.6 Cold Rolling

Cold rolling adalah proses pengerolan yang dilakukan pada temperatur ruangan atau dibawah temperatur rekristalisasi untuk memperoleh benda yang lebih tipis dengan melakukan deformasi plastis *undirectional*. Perlakuan *cold rolling* pada temperatur ruangan akan memerlukan energi yang besar, karena besarnya tegangan yang harus diberikan pada material sebelum akhirnya deformasi plastis terjadi. Beberapa jenis baja paduan dapat diberikan reduksi pengerolan bertahap sampai dengan 90%, salah satunya adalah *austenitic stainless steel* dikarenakan baja jenis ini memiliki fasa metastabil austenit dengan struktur kristal FCC sehingga keuletannya sangat tinggi (Sutowo, Ikhsan, & Kartika, 2014). Adapun skema pengerjaan *cold rolling* dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Skema *Cold Rolling* (Suherman, 2018)

Proses *cold rolling* akan menghasilkan permukaan benda kerja yang lebih baik atau lebih halus dibandingkan dengan baja yang diproses *hot rolling*. Perubahan sifat mekanik yang terjadi karena proses pengerolan *austenitic stainless steel* dapat diubah dengan proses *annealing* atau *thermal cycling* untuk memicu

rekristalisasi butiran baru yang lebih halus. 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 yaitu:

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

Dimana :

σ_y : kekuatan *yield*

d : *grain size*

k : koefisien penguatan (konstanta spesifik pada setiap material)

σ_o : konstanta pada material untuk tegangan awal

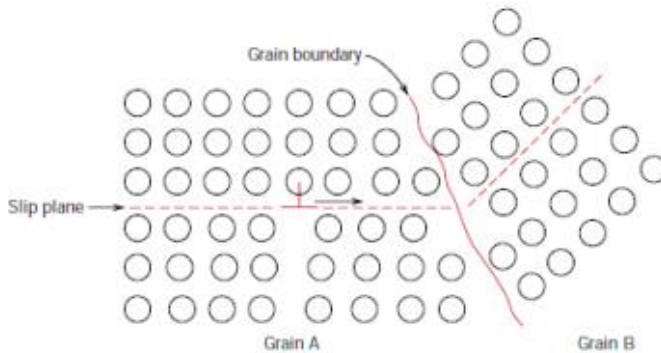
Dapat dilihat bahwa adanya hubungan antara kekuatan luluh dengan ukuran butir. Ukuran butir dapat diatur melalui laju pendinginan, deformasi plastis yang diikuti dengan perlakuan panas yang sesuai. Ketika ukuran butir akan semakin mengecil, kekuatan luluh akan meningkat (Callister, 2007).

2.7 Metode Penguatan Material

Penguatan material yang berdampak terhadap peningkatan sifat mekanik terjadi berbagai cara. Mekanisme penguatan material terdiri dari tiga metode yaitu pengerasan tegangan (*strain hardening*), penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*) dan penghalusan butir (*grain size reduction*). Mekanisme tersebut merupakan hubungan antara pergerakan dislokasi dan sifat mekanik dari logam.

2.7.1 Penghalusan Butir (*Grain Size Reduction*)

Penguatan dengan cara penghalusan butir terjadi pada struktur butir. Pada penghalusan ini terjadi deformasi saat dislokasi akan bergerak pada bidang slip dan berusaha mencapai permukaan luar, seperti yang dapat diilustrasikan pada gambar 2.6



Gambar 2.6 Gerakan Dislokasi Terhalang Batas Butir (Rosdiana, 2013)

Orientasi setiap butir ini berbeda dengan yang lain, orientasi bidang slip pada butir-butir juga akan berbeda-beda. *Slip plane* tidak berlanjut atau mengalami perubahan arah. Sudut yang kecil dari lapisan butir tidak efektif dalam menahan dislokasi. Sudut yang besar dari lapisan butir mampu menahan *block slip* dan meningkatkan kekuatan pada material. Konsentrasi tegangan di ujung *slip plane* kemungkinan akan memicu dislokasi baru dalam pertambahan butir. Material dengan butir yang halus akan lebih keras dan kuat dibanding butiran yang kasar, disebabkan karena mempunyai jumlah permukaan lebih besar pada total area lapisan butir yang akan menghambat pergerakan dislokasi. Batas butir yang banyak akan mengakibatkan gerakan dislokasi semakin sukar karena semakin banyak rintangan, sehingga material menjadi semakin kuat. Butir yang semakin halus cenderung akan semakin memperbanyak batas butir sehingga *surface area* batas butiran semakin tinggi (Callister, 2007).

2.7.2 Pengerasan Regangan (*Strain Hardening*)

Strain hardening (pengerasan regangan) adalah penguatan logam dengan deformasi plastis (perubahan bentuk secara permanen atau tidak dapat kembali seperti semula). Penguatan ini

terjadi karena dislokasi gerakan dalam struktur kristal dari material. Deformasi bahan disebabkan oleh slip (pergeseran) pada bidang kristal tertentu. Jika gaya yang menyebabkan slip ditentukan dengan pengandaian bahwa seluruh atom pada bidang slip kristal serempak bergeser, maka gaya tersebut akan besar sekali. Dalam kristal terdapat cacat kisi yang dinamakan dislokasi. Dengan pergerakan dislokasi pada bidang slip yang menyebabkan deformasi dengan memerlukan tegangan yang sangat kecil. Kalau kristal dipotong menjadi plat tipis dan dipoles secara elektrolisa, maka akan terlihat di bawah mikroskop elektron, sejumlah cacat yang disebut dislokasi (Callister, 2007).

Dislokasi merupakan kristalografi cacat, atau ketidakteraturan dalam struktur kristal logam akibat adanya tegangan dari luar yang dapat menyebabkan terjadinya deformasi plastis. Selama bergerak dislokasi bereaksi satu sama lain. Hasil reaksi ada yang mudah bergerak dan ada yang sulit bergerak. Yang sulit bergerak berfungsi sebagai sumber dislokasi baru (multiplikasi dislokasi). Sehingga kerapatan dislokasi semakin tinggi. Semakin tinggi kerapatan dislokasi, maka semakin sulit dislokasi bergerak sehingga kekuatan logam akan naik.

Strain hardening terjadi selama pengujian tarik. Pada proses uji tarik regangan akan bertambah sehingga kekuatan tarik, kekuatan mulur dan kekerasannya akan meningkat pula sedangkan massa jenis dan hantaran listriknya menurun. Hal ini juga mengakibatkan menurunnya keuletan. *Yield strength* dan *hardness* akan meningkat sebagai akibat *strain hardening*, tetapi *ductility* akan menurun sehingga material menjadi lebih *brittle*. Efek *strain hardening* dapat dihilangkan dengan perlakuan panas *annealing* (Callister, 2007).

2.7.3 Solid Solution Strengthening

Logam paduan umumnya lebih kuat dibandingkan dengan logam murni, karena impuritas atom yang masuk ke dalam larutan padat memaksakan tegangan kisi di sekeliling atom induknya. Interstitial atau impuritas substitusi dalam sebuah larutan akan mengakibatkan regangan kisi. Dan hasilnya

impuritas ini akan berinteraksi dengan bidang dislokasi regangan dan menghambat pergerakan dislokasi.

Impuritas cenderung menyebar dan memisah di sekitar inti (*core*) dislokasi untuk menemukan atom yang sesuai dengan radiusnya. Hal ini akan menurunkan tegangan energi keseluruhan dan dislokasi.

2.8 *Grain Refinement Austenitic Stainless Steel*

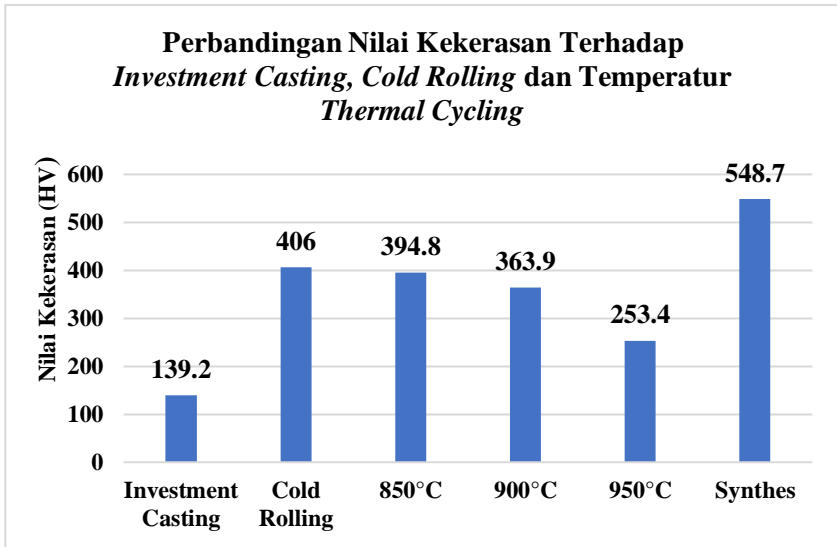
Pada penelitian ini implan *stainless steel* 316L hasil *investment casting* diperbaiki sifat mekaniknya dengan melihat kekerasan dan struktur mikro dari material. Baja tahan karat *austenitic* memiliki fasa *austenite* yang stabil pada temperatur kamar sehingga pada waktu pemanasan dan pendinginan tidak akan terjadi perubahan fasa. Oleh karena itu, penghalusan butiran hanya dapat dicapai dengan proses rekristalisasi. Proses pembentukan butiran baru dengan rekristalisasi ini dapat dipicu dengan adanya tegangan sisa yang dihasilkan oleh proses *cold rolling* (Suherman, 2018).

Cold rolling diterapkan untuk memberikan deformasi plastis melalui *strain hardening* sehingga banyak terdapat *stored strain energy* pada material proses *cold roll*, keuletan material akan menurun seiring dengan perubahan bentuk butiran dan kenaikan kekuatan tarik (Misra, Zhang, Venkatasurya, Somani, & Karjalainen, 2010). Metode yang umum dilakukan untuk merubah butiran pada *austenitic stainless steel* adalah *severe plastic deformation*, *thermo-mechanical treatment*, dan *thermal cycling* (Karjalainen, Taulavuori, Sellman, & Kyröläinen, 2008).

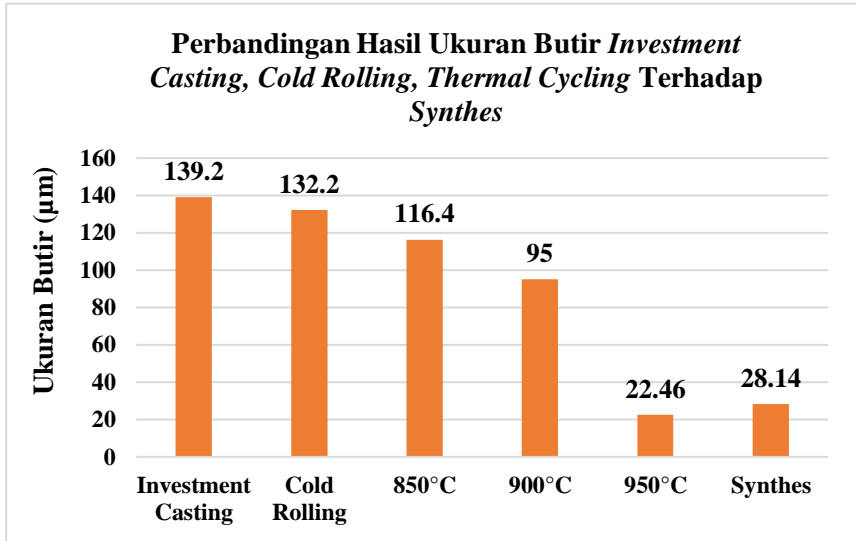
(Nanda, 2016) melakukan penelitian berjudul “*thermal cycling route for processing nano-grains in AISI 316L stainless steel for improved tensile deformation behaviour*”. Penelitian tersebut mengenai *cold rolling* diikuti dengan siklus termal berulang untuk menghasilkan ukuran butir yang halus. Parameter untuk melakukan *cold rolling*, suhu anil untuk *thermal cycling*, waktu penahanan selama setiap siklus dan jumlah siklus termal ditentukan melalui prosedur langkah-langkah secara sistematis

yaitu dengan cara material dilakukan *cold rolling* reduksi sebesar 70%. Kemudian dilakukan *thermal cycling* pada suhu 700°C, 800°C, dan 900°C dengan waktu penahanan selama 35 detik dan siklus sebanyak 4 kali. *Thermal cycling* yang dilakukan berulang memicu proses rekristalisasi butiran baru sehingga ukuran butiran menjadi jauh lebih kecil yaitu sebesar 90 – 120 µm dibandingkan dengan butiran awal saat *cold roll* sebesar 800 – 1200 nm. Selain itu kekuatan tariknya meningkat dari 590 Mpa ke 1220 Mpa (Nanda, 2016).

(Fausia, 2018) melakukan penelitian mengenai “pengaruh *thermal cycling* pada implan *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 22,456 µm dengan bentuk angular 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 selama 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 metalografi (Fausia, 2018).



Gambar 2.7 merupakan grafik hasil penelitian (Fausia, 2018), menyatakan bahwa nilai kekerasan dari *stainless steel* hasil *investment casting* meningkat dibandingkan dengan kekerasan terhadap *thermal cycling* 950°C. Penurunan kekerasan dikarenakan *thermal cycling* suhu 850°C dan 900°C terdapat butiran lama yang masih ada dislokasi dan beberapa yang sudah tidak ada dislokasi. Akan tetapi *thermal cycling* pada 950°C sudah mengalami rekristalisasi. Penghalusan butir memang sangat cenderung menaikkan kekerasan. Akan tetapi perbedaan ini dapat terjadi akibat adanya proses *cold rolling* yang mengakibatkan kekerasan naik, namun keuletan dari material akan turun (Fausia, 2018).



Gambar 2.8 Grafik Hasil Ukuran Butir pada *Cold Rolling Thermal Cycling* dan *Stainless Steel 316L Merk Synthes (Fausia, 2018)*

Pada gambar 2.8 grafik hasil penelitian (Fausia, 2018) menunjukkan ukuran butir yang sangat kecil terjadi pada temperatur *thermal cycling* di suhu 950°C karena pada batas butirnya sudah terekristalisasi. Perbedaan dengan material *stainless steel 316L merk synthes* nilai ukuran butir terpaut jauh dari ukuran butir pada *stainless steel 316L thermal cycling* di suhu 950°C. Hal ini membuktikan bahwa proses *cold rolling* dan *thermal cycling* dapat memperhalus ukuran butir pada *stainless steel 316L* hasil *investment casting* (Fausia, 2018).

2.9 Rekrystalisasi

Rekrystalisasi merupakan proses pemanasan melalui pengintian dan pertumbuhan butir baru. Pemanasan kembali hingga temperatur lebih tinggi akan menyebabkan munculnya

kristal baru dari kristal yang terdistorsi, dengan struktur *lattice* komposisi kimia yang sama seperti pada saat sebelum pengerjaan dingin kecuali kristal dendritik. Setelah pengerjaan dingin dan pemanasan kembali bentuk dendritik akan hilang. Kristal baru ini mula-mula muncul pada bagian kristal yang mengalami distorsi yang paling hebat, yaitu pada batas butir dan bidang slip (Avner, 1974). 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). Setelah adanya butiran baru jika pemanasan tetap terjadi butiran tersebut akan mengalami *grain growth*. Pertumbuhan butir yang berpengaruh terhadap temperatur pemanasannya. Butir kristal yang besar mempunyai *free energy* yang lebih rendah, karenanya butir kristal cenderung untuk tumbuh lebih besar hingga mencapai ukuran maksimum untuk temperatur tersebut (Callister, 2007).

Austenitic stainless steel yang diberikan perlakuan pengerjaan dingin akan mengalami rekristalisasi saat dipanaskan kembali. Jika dilakukan pendinginan cepat, maka butiran yang dihasilkan semakin halus, namun hal ini tergantung dari ketebalan material. Untuk benda yang relatif tipis, maka pendinginan udara dianggap sudah cukup cepat untuk memicu terjadinya penghalusan butir (Rosdiana, 2013). Sebelum terjadinya rekristalisasi terlebih dahulu terjadi *recovery*, lepasnya tegangan sisa dalam kristal. Pada tahap *recovery* belum ada perubahan struktur kristal, jadi belum ada perubahan sifat dari material. Perubahan yang terjadi yaitu tegangan dalam berkurang. Hal ini terjadi untuk mencegah terjadinya distorsi pada benda kerja yang mengalami pengerjaan dingin sebagai akibat tegangan sisa. Perubahan sifat mulai terjadi pada saat memasuki rekristalisasi.

Setiap siklus termal menghasilkan penyebaran tegangan sisa yang tidak teratur sehingga proses rekristalisasi lebih mudah terjadi pada area yang memiliki tegangan sisa dibandingkan pertumbuhan

butiran yang ada. Setelah beberapa kali siklus termal, rekristalisasi akan semakin meningkat dan struktur mikro dari deformasi dingin akan berkurang (Nanda, 2016). Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi derajat deformasi pengerjaan dingin, maka ukuran butiran baru hasil rekristalisasi akan semakin kecil karena pengintian butiran baru yang muncul semakin banyak, sehingga daerah batas butir yang memiliki tingkat dislokasi lebih tinggi saat reduksi pengerjaan dingin akan semakin meningkat (Kumar, Mahato, Sharma, & Sahu, 2009).

2.10 Hubungan Antara Waktu Tahan Pemanasan dan Ketebalan Plat

Unsur paduan seperti misalnya krom, molibdenum, wolfram, titanium dan vanadium akan menyebabkan karbida menjadi lebih stabil sehingga lebih sulit terurai. Hal ini menyebabkan baja paduan yang mengandung unsur–unsur tersebut akan memerlukan temperatur inisiasi rekristalisasi yang lebih tinggi dan waktu tahan yang lebih panjang. Ukuran benda kerja juga ikut berpengaruh karena berhubungan dengan *hardenability* dari baja paduan tersebut. Pada umumnya, benda kerja yang lebih besar akan memerlukan waktu tahan yang lebih panjang agar terjadi homogenisasi temperatur (Callister, 2007).

Penelitian (Nanda, 2016) mengatakan spesimen yang dilakukan *cold rolling* dengan reduksi ketebalan sebesar 70% dilakukan perlakuan *annealing* pada temperatur berbeda dan waktu penahanan pada *furnace*. Hasil penelitian menunjukkan ada hubungan dari perhitungan nilai fraksi rekristalisasi dengan mengambil nilai kekerasan dengan metode *Vickers Hardness*. Hubungan dari fraksi rekristalisasi (X) untuk mengetahui waktu *annealing* (t) (Kumar, Mahato, Sharma, & Sahu, 2009).

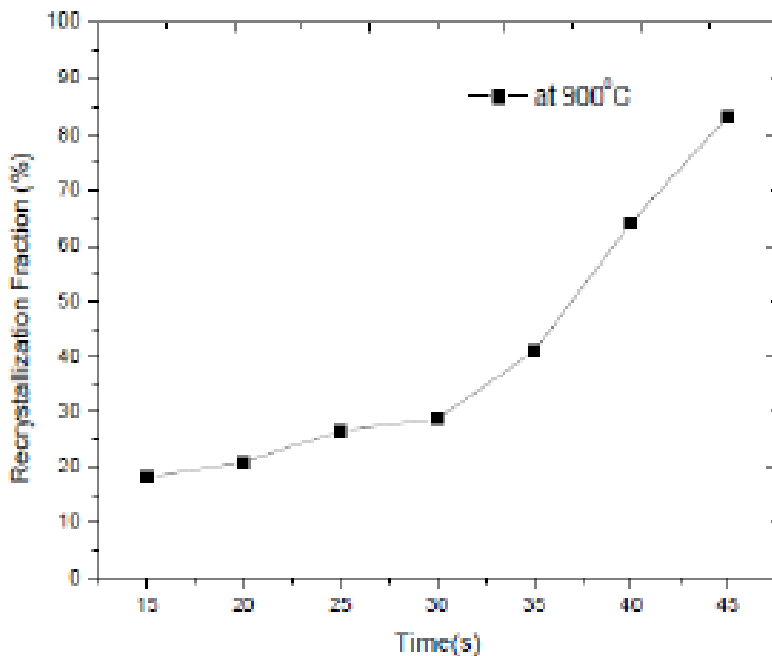
$$X = \frac{H_o - H_t}{H_o - H_a} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

- X : Fraksi rekristalisasi
- H_o : Kekerasan dari struktur saat *cold deformed*
- H_a : Kekerasan dari *solution annealed* material

Ht : Kekerasan dari material *annealed* dalam waktu

Hasil dari penelitian ini menunjukkan volume sebenarnya dari fraksi rekristalisasi pada material sesuai dengan perbedaan waktu *annealing* dan dilakukan pada temperatur pemanasan yang konstan sebesar 900°C. Berikut grafik yang didapatkan:



Gambar 2.9 Fraksi Rekristalisasi dengan Waktu *Annealing* pada *Stainless Steel* (Nanda, 2016)

Dilihat dari grafik gambar 2.9 bahwa 50% fraksi rekristalisasi selesai terjadi pada waktu *annealing* 35 detik. Sehingga penelitian ini proses *thermal cycle* ini menyebabkan adanya beberapa butiran yang sudah terekristalisasi dan sebagian masih adanya dislokasi akibat *cold work*. Pada grafik tersebut

didapatkan bahwa siklus pertama saat *thermal cycle* dengan waktu 35 detik sudah mengalami 50% fraksi rekristalisasi. Sehingga penelitian ini dipilih waktu anil selama 35 detik (Nanda, 2016).

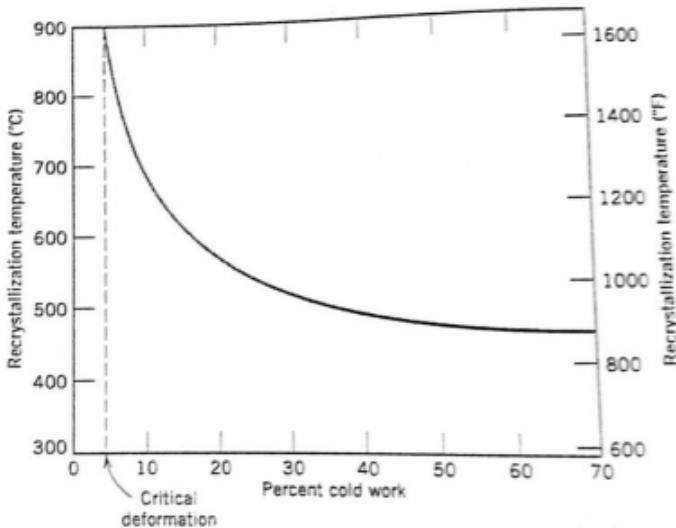
Karena hanya permukaan benda kerja saja yang berhubungan langsung dengan media pendingin, maka ratio antara luas permukaan dengan berat benda kerja akan menjadi faktor penting yang ikut menentukan laju pendinginan benda kerja. Luas permukaan ini merupakan fungsi dari bentuk geometris dan ukuran benda kerja. Ratio yang besar akan menjadikan laju pendinginan benda kerja menjadi tinggi sehingga benda kerja berbentuk plat akan lebih cepat menjadi dingin daripada yang berbentuk silindris (Callister, 2007).

2.11 Hubungan Antara *Cold Working* dan Temperatur Rekristalisasi

Pada saat *cold working*, kenaikan persentase reduksi akan menyebabkan penumpukan dislokasi yang makin banyak pada batas butir sehingga tegangan sisa di dalam material makin meningkat. Semakin tinggi tegangan sisa maka akan makin mudah bagi material ini untuk mengalami rekristalisasi butiran baru. Penelitian (Nanda, 2016) menunjukkan bahwa diperlukan tingkat deformasi minimal sebesar 50% agar rekristalisasi butiran baru dapat terinisiasi. Temperatur yang diperlukan untuk memulai rekristalisasi ini tergantung dari besaran persentase *cold working*. Makin tinggi persentase *cold working*, maka temperatur rekristalisasi yang diperlukan akan makin turun (Schino, 2003). Pada penelitian ini dilakukan *cold rolling* reduksi 70%. Spesimen hasil *cold rolling* reduksi 70% ini di *thermal cycling* pada suhu 700°C, 800°C, 900°C. Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian tersebut kondisi optimum dimana terjadi seluruh rekristalisasi dilakukan proses *thermal cycling* dengan suhu 900°C, dengan waktu penahanan 35 detik sebanyak empat siklus bahwa butiran pada AISI 316L berubah menjadi lebih halus dengan ukuran 90 – 120 µm (Nanda, 2016).

Penelitian (Fausia, 2018) didapatkan bahwa ukuran butir pada *stainless steel* 316L hasil *investment casting* sebesar 290,36 μm mengalami penurunan ukuran butir pada hasil *cold rolling* reduksi 50% menjadi 116,42 μm dengan bentuk *elongated grain*. Setelah itu ukuran butir menurun seiring bertambahnya temperatur *thermal cycle*. Pada temperatur 850°C dan 900°C belum terjadi rekristalisasi di batas butir serta memiliki ukuran butir sebesar 132,17 μm dan 95,02 μm . Sedangkan setelah *thermal cycling* 950°C didapatkan rekristalisasi pada batas butirnya sehingga memiliki ukuran butir rata-rata sebesar 22,456 μm dengan bentuk angular atau bulat (Fausia, 2018).

Pada gambar 2.10 dibawah menjelaskan bahwa temperatur rekristalisasi selain bergantung pada jenis logamnya, juga tergantung pada derajat deformasi yang dialami sebelum pemanasan. Semakin tinggi derajat deformasi akan semakin rendah temperatur rekristalisasinya (Rosdiana, 2013).



Gambar 2.10 *The Variation of Recrystallization Temperature With Percent Cold Work For Iron (Callister, 2007)*

2.12 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:

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha \mu b \rho^{1/2} \dots\dots\dots(2.3)$$

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:

$$\sigma = K \epsilon^n + \exp(K_1 + n_1 \epsilon) \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana K, n, K₁, dan n₁ adalah konstanta dari *Ludwigson's Relation*. Parameter kurva aliran yang diturunkan untuk *austenitic stainless 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*:

$$HV[GPa] = 0.7 + 1.5Gbp^{1/2} \dots\dots\dots(2.5)$$

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).

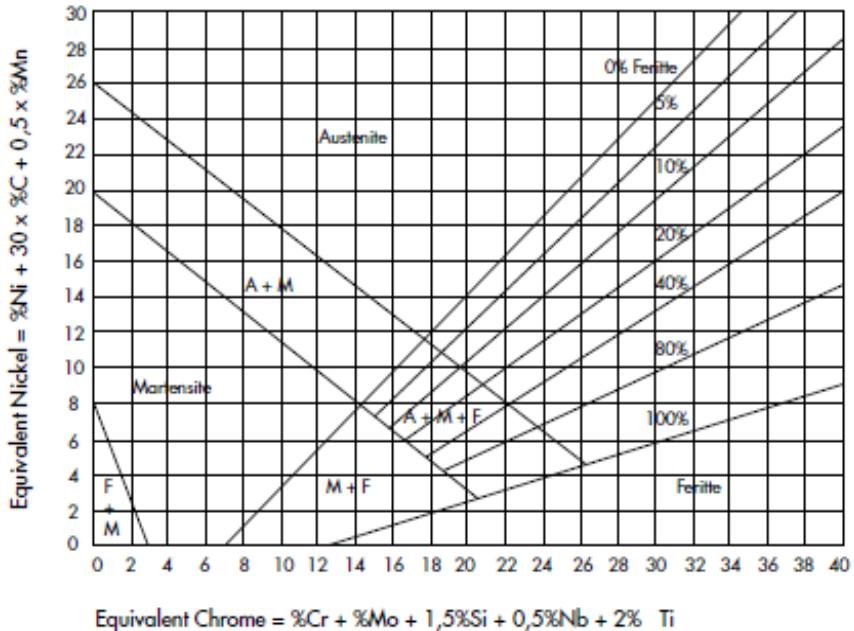
2.13 Diagram *Schaeffler*

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 diatas 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 austenitik 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 :

$$Cr_{eq} = Cr + 2\% Si + 1.5\% Mo + 5\% V + 1.75\% Nb + 1.5\% Ti + 0.75\% W \dots\dots\dots(2.6)$$

$$Ni_{eq} = Ni + Co + 0.5\% Mn + 0.3\% Cu + 25\% N + 30\% C \dots\dots\dots(2.7)$$

Persamaan 2.6 menunjukkan nilai ekivalen dari kromium dimana nilai tersebut akan menunjukkan fasa α *ferrite* dan struktur yang terbentuk adalah BCC, sedangkan persamaan 2.7 menunjukkan nilai ekivalen dari nikel dimana nilai tersebut menunjukkan fasa γ (*austenite*) dan struktur yang terbentuk adalah FCC. Kedua persamaan diatas 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).

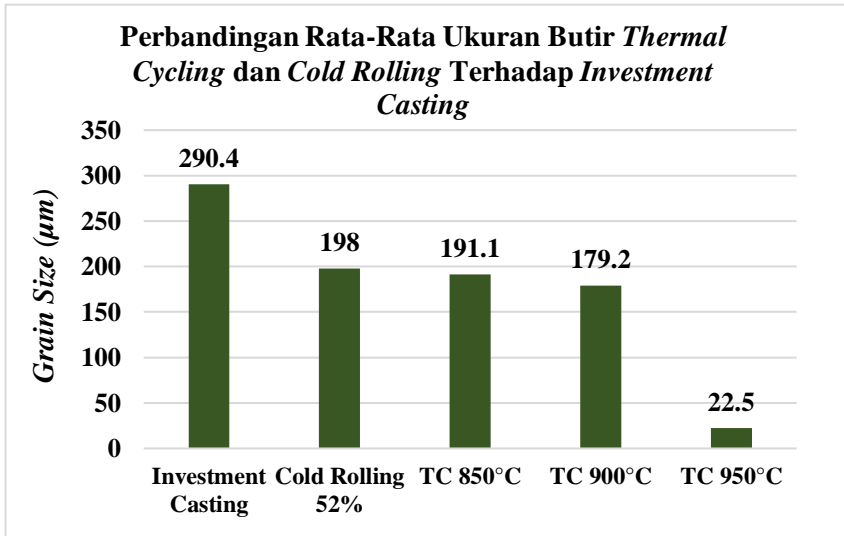


Gambar 2.11 Diagram *Schaeffler* (*Dacapo Stainless*)

2.14 Thermal Cycling

Thermal cycling merupakan perlakuan panas yang dilakukan pada material, dimana material diberi temperatur yang tinggi kemudian diturunkan dengan pemberian temperatur rendah. Jika baja yang mengalami pengerjaan dingin maka kekuatannya akan meningkat, sedangkan keuletannya akan menurun. Pada saat pengerjaan dingin akan menyebabkan banyaknya dislokasi, sehingga pergerakan dislokasi akan semakin sulit. Tegangan sisa (*residual stress*) ini mengakibatkan terjadinya kenaikan kekerasan dan kekuatan tarik yang menyebabkan material rentan patah jika material akan dideformasi lebih lanjut dikarenakan keuletannya menurun (Avner, 1974). Jika logam dipanaskan kembali atom-atom akan menerima sejumlah energi

panas yang didapatkan untuk bergerak sejumlah kristal lebih akan bebas cacat dan bebas tegangan sisa (Callister, 2007).



Gambar 2.12 Grafik Perbandingan Rata-Rata Ukuran Butir *Thermal Cycling* dan *Cold Rolling* Terhadap *Investment Casting* (Mubarok, Fausia, Sutikno, & Mahyudin, 2019)

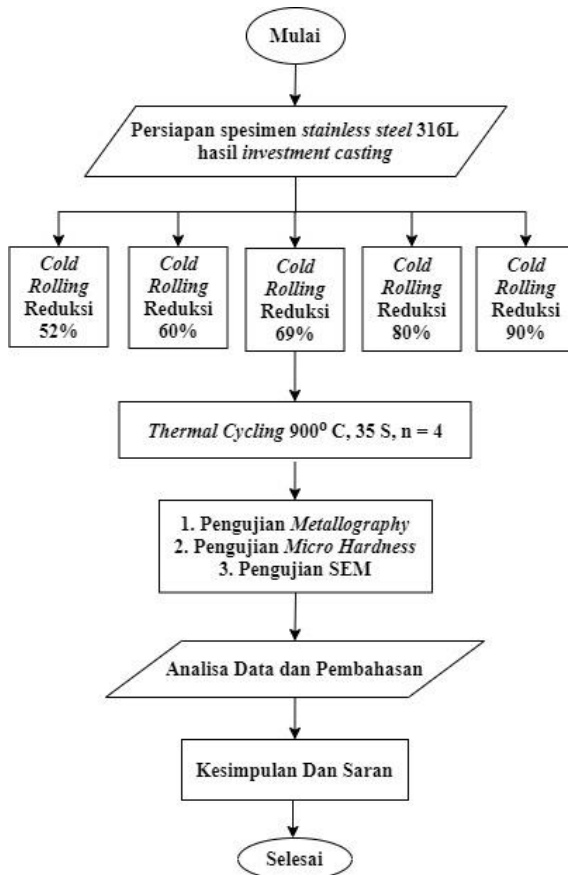
Gambar 2.12 menunjukkan perbandingan ukuran butir pada sampel material *thermal cycling* dengan *investment casting* dan *cold rolling*. Rekristalisasi yang menyebabkan ukuran butir lebih kecil terjadi pada *thermal cycling* 950°C. Temperatur *thermal cycling* ini ditemukan lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian (Nanda, 2016). Pada percobaan (Nanda, 2016) rekristalisasi terjadi pada temperatur 900°C dari jumlah reduksi *cold rolling* (Mubarok, Fausia, Sutikno, & Mahyudin, 2019).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Langkah–langkah yang akan dilakukan dalam penelitian ini secara singkat dapat digambarkan melalui diagram penelitian. Berikut adalah skema diagram alir penelitian:



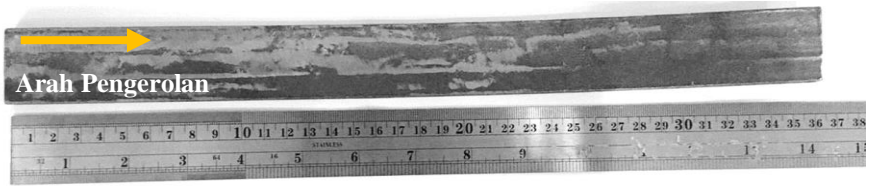
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Spesimen Uji

Spesimen yang digunakan untuk penelitian ini adalah *stainless steel* AISI 316L hasil dari proses *investment casting* yang berasal dari PT. Pelopor Implantindo, Mojokerto, Indonesia. *Stainless steel* AISI 316L hasil dari proses *investment casting* akan diberikan perlakuan *cold rolling-thermal cycling*. Pengambilan sampel untuk masing-masing variasi sebanyak satu buah sampel dengan asumsi seluruh populasi seragam, sehingga masing-masing variasi dapat diwakili dengan satu sampel. Dari masing-masing variasi akan diambil data rata-rata untuk tiap pengujian untuk merepresentasikan data dalam penelitian ini. Data rata-rata dari masing-masing variasi selanjutnya akan dibahas dan dibandingkan untuk menjawab tujuan dari penelitian ini. Pelabelan juga dilakukan pada spesimen uji untuk memudahkan dalam pembahasan dan analisa data pada penelitian ini, adapun label untuk masing-masing spesimen uji sebagai berikut:

- IC = spesimen *investment casting*
- CR 52 = spesimen hasil *cold rolling* reduksi 52%
- CR 60 = spesimen hasil *cold rolling* reduksi 60%
- CR 69 = spesimen hasil *cold rolling* reduksi 69%
- CR 80 = spesimen hasil *cold rolling* reduksi 80%
- CR 90 = spesimen hasil *cold rolling* reduksi 90%
- CR 52 TC = spesimen hasil *cold rolling* reduksi 52%
thermal cycling 900°C
- CR 60 TC = spesimen hasil *cold rolling* reduksi 60%
thermal cycling 900°C
- CR 69 TC = spesimen hasil *cold rolling* reduksi 69%
thermal cycling 900°C
- CR 80 TC = spesimen hasil *cold rolling* reduksi 80%
thermal cycling 900°C
- CR 90 TC = spesimen hasil *cold rolling* reduksi 90%
thermal cycling 900°C

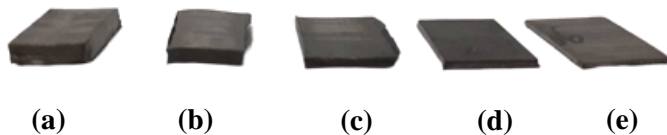
3.2.1 Spesimen untuk *Cold Rolling*



Gambar 3.2 Spesimen untuk *Cold Rolling*

Pada gambar 3.2 dibawah ini menunjukkan spesimen *stainless steel* AISI 316L hasil *investment casting* yang akan dilakukan *cold rolling*. Spesimen terlebih dahulu dipotong sebelum dilakukannya pengerolan.

3.2.2 Spesimen Hasil *Cold Rolling* untuk *Thermal Cycling* serta Uji *Micro Hardness* dan *Metallography*



Gambar 3.3 Spesimen setelah *Cold Rolling*

Adapun nilai reduksi spesimen setelah *cold rolling* gambar 3.3 dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Nilai Reduksi *Cold Rolling Stainless Steel 316L*

No	Tebal Spesimen Awal	Tebal Spesimen Akhir	Reduksi <i>Cold Rolling</i>
1	10.6 mm	5.1 mm	52%
2	10.6 mm	4.2 mm	60%
3	10.6 mm	3.3 mm	69%
4	10.6 mm	2.16 mm	80%
5	10.6 mm	1.08 mm	90%

Adapun gambar 3.3 merupakan dimesi spesimen setelah *cold rolling*, pengukuran menggunakan jangka sorong dengan ketelitian 0.02 mm:

- Spesimen *cold rolling* reduksi 52% = 33.21 x 20.2 x 5.1 mm
- Spesimen *cold rolling* reduksi 60% = 32.54 x 25.08 x 4.2 mm
- Spesimen *cold rolling* reduksi 69% = 34.2 x 24.1 x 3.3 mm
- Spesimen *cold rolling* reduksi 80% = 34.8 x 24.24 x 2.16 mm
- Spesimen *cold rolling* reduksi 90% = 35.02 x 24.3 x 1.08 mm

Spesimen pada gambar 3.3 akan diberikan perlakuan *thermal cycling* serta dilakukan pengujian *micro hardness* dan *metallography* setelah proses *cold rolling*.

3.3 Langkah-Langkah Penelitian

Adapun langkah-langkah penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

3.3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh teori-teori yang berhubungan dengan mekanisme *cold rolling* dan *thermal cycling* serta pengaruh temperturnya pada spesimen *stainless steel 316L* hasil proses *investment casting*.

3.3.2 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Perumusan masalah ini disertai dengan batasan masalah untuk memperjelas lingkup penelitian yang akan dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui ukuran butir pada implan *stainless steel* 316L hasil proses *investment casting* terhadap kekerasan dan struktur mikro setelah diberikan kombinasi perlakuan *cold rolling* dan *thermal cycling*.

3.3.3 Pengambilan Data Awal Penelitian

Pengambilan data awal ini sebagai acuan dilakukannya penelitian. Data awal ini didapatkan melalui spesimen *stainless steel* 316L hasil *investment casting* sebelum dilakukannya proses *thermal cycling*. Berikut ini adalah prosedur pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini:

3.3.3.1 Pengujian *Metallography*

Pengujian *metallography* menggunakan mikroskop seperti pada gambar 3.4 sebagai penunjang untuk mengetahui struktur mikro, ukuran butir dan informasi struktur lainnya.



Gambar 3.4 *Olympus Stereo Microscope*

Pengujian ini dilakukan sebelum dan sesudah eksperimen sebagai pembandingan struktur mikro antara *stainless steel* 316L hasil proses *investment casting* dan *stainless steel* 316L hasil proses *investment casting* yang telah diberi perlakuan *cold rolling* serta *thermal cycling*. Berikut ini merupakan prosedur dalam persiapan spesimen untuk pengujian *metallography*, yaitu:

1. *Cutting*, spesimen untuk spesimen uji dipotong dengan dimensi tertentu menggunakan mesin gergaji.
2. *Mounting*, dilakukan untuk memudahkan pemegangan terhadap spesimen berukuran kecil atau memiliki bentuk tidak beraturan yang sulit penanganannya saat proses *grinding*. Pada proses ini spesimen diberikan resin dan hardener.
3. *Grinding*, dilakukan untuk meratakan dan menghasilkan permukaan yang lebih halus dengan menggunakan kertas amplas dengan grid mulai dari 80, 100, 240, 360, 500, 600, 800, 1000, dan 2000. Penggosokan dilakukan dengan menggunakan *grid* paling rendah hingga terbentuk goresan yang sejajar dan merata. Spesimen diletakkan berbeda disetiap *grid*, dimana spesimen di *grinding* dengan mengubah arah sebesar 90° dari awal peletakan hingga terbentuk goresan baru.
4. *Polishing*, proses *polishing* dilakukan dengan cara spesimen ditekan pada permukaan piringan yang dilapisi kain beludru yang telah diberi *metal polish cream*. *Polishing* dilakukan sampai permukaan spesimen mengkilap dan tidak ada goresan bekas *grinding*.
5. *Etching*, proses *etching* dilakukan dengan larutan *glyceresia*. Larutan *glyceresia* ini berupa asam klorida (HCl) 20 ml, asam nitrat (HNO₃) 10 ml, dan *glycerol* 20 ml diaduk hingga homogen. Setelah itu spesimen akan dilihat dengan *olympus stereo microscope* dengan pembesaran 50 kali sampai 2000 kali untuk menganalisa struktur mikro semua spesimen.

3.3.3.2 Pengujian Kekerasan

Uji kekerasan merupakan salah satu uji merusak material dimana material diuji dengan beban tertentu. Mesin uji kekerasan yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan mesin *micro vickers hardness* seperti pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Mesin *Micro Vickers Hardness*

Micro vickers hardness ini sangat penting pada indenter dengan beban uji 1 hingga 1000 *gram-force* dan digunakan untuk mengukur kekerasan fasa tertentu, partikel yang kecil dan material *brittle*. *Vickers hardness number* diperoleh dengan membagi beban yang digunakan dan luasan area yang terkena indentasi. Area indentasi ini ditentukan oleh jarak rata-rata antara dua diagonal yang terkena indentasi. Pada penelitian ini digunakan beban sebesar HV 0.3 (2.942 N).

3.3.3.3 Proses *Cold Rolling*

Cold Rolling merupakan proses perubahan bentuk logam secara plastis dengan melewatkannya diantara rol pada mesin *rolling mill* seperti pada gambar 3.6. *Cold rolling* dilakukan dibawah temperatur rekristalisasi. Proses *cold rolling* dilakukan dengan mereduksi material secara bertahap sampai pada derajat reduksi dengan ketebalan yang diinginkan. Reduksi pada spesimen bertahap sebesar 52%, 60%, 69%, 80%, dan 90%. Tujuan dari *cold rolling* adalah mereduksi tebal spesimen, yang selanjutnya akan dilakukan proses *thermal cycling*.



Gambar 3.6 Mesin *Rolling Mill*

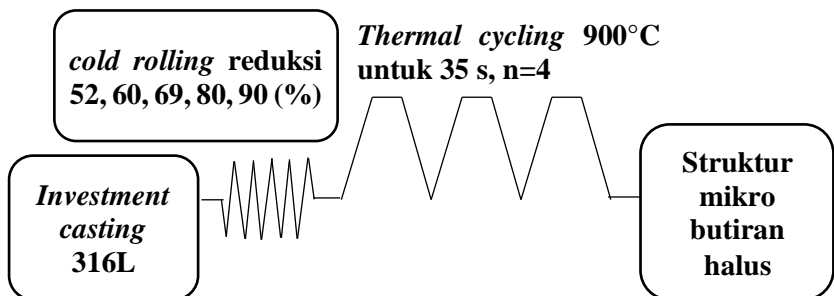
3.3.3.4 Proses *Thermal Cycling*

Spesimen hasil *cold rolling* yang telah dipotong dengan dimensi tertentu diberikan perlakuan *thermal cycling* menggunakan tungku pemanasan (*furnace*) seperti pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 *Furnace Nabertherm N11/HR*

Setiap spesimen dengan reduksi sebesar 52%, 60%, 69%, 80%, 90% dipanaskan pada suhu 900°C selama 35 s, dilakukan sebanyak 4 kali siklus. Setelah itu pendinginan dilakukan di udara sampai temperatur ruang seperti pada gambar skema 3.8.



Gambar 3.8 Skema *Thermal Cycling*

3.3.3.5 Pengujian *Scanning Electron Macroscopic*

Mesin *Scanning Electron Microscope* (SEM) seperti pada gambar 3.9 digunakan untuk mengetahui informasi

kristalografi yang terdapat dalam material dengan pancaran tinggi elektron. Dalam pengujian SEM ini akan didapatkan berupa *topography*, *morphology*, komposisi, dan info *crystallography*. Elektron berinteraksi dengan atom yang membentuk sampel dan menghasilkan sinyal yang berisi informasi tentang topografi permukaan spesimen, komposisi, dan sifat lain seperti konduktivitas listrik pada material. SEM dapat menghasilkan gambar beresolusi tinggi dari permukaan spesimen nanti.



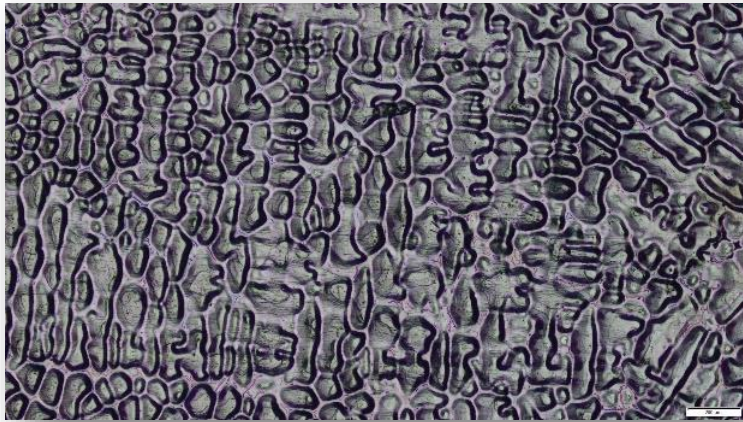
Gambar 3.9 Mesin *Scanning Electron Microscope*

3.4 Hasil Data Awal

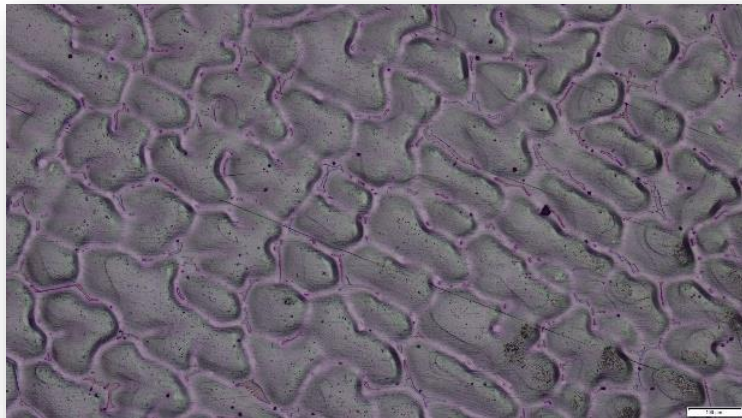
3.4.1 Spesimen Hasil *Investment Casting* (IC)

3.4.1.1 Pengujian *Metallography* Spesimen Hasil *Investment Casting*

Hasil dari pengujian metalografi dengan perbesaran 100x dan 200x untuk spesimen hasil *investment casting* menggunakan *olympus stereo microscope* pada gambar 3.10.



(a)



(b)

Gambar 3.10 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Spesimen Hasil *Investment Casting* Perbesaran (a) 100x (b) 200x

Dari hasil pengujian *metallography* hasil *investment casting* pada gambar 3.10 perbesaran 200x didapatkan ukuran butir rata-rata sebesar $83.17 \mu\text{m} \pm 4.56$.

3.4.1.2 Pengujian *Microhardness* Spesimen Hasil *Investment Casting*

Pengujian awal kekerasan dilakukan untuk mengetahui kekerasan pada spesimen hasil *investment casting*. Pengujian ini menggunakan *micro vickers hardness* dengan pembebanan 0.3 HV (2.942 N) dalam kurun waktu sepuluh detik sesuai dengan standar ASTM E384. Masing-masing permukaan spesimen diuji sebanyak sepuluh kali dari samping kiri ke tengah permukaan spesimen. Berikut data pengujian kekerasan spesimen *investment casting* pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data Awal Spesimen *Stainless Steel 316L* Hasil *Investment Casting*

Indentasi Ke-n	Kekerasan	Rata-Rata
1	167	159.06 ± 17.37
2	156	
3	119	
4	159	
5	159	
6	169	
7	154	
8	188	
9	157	
10	168	

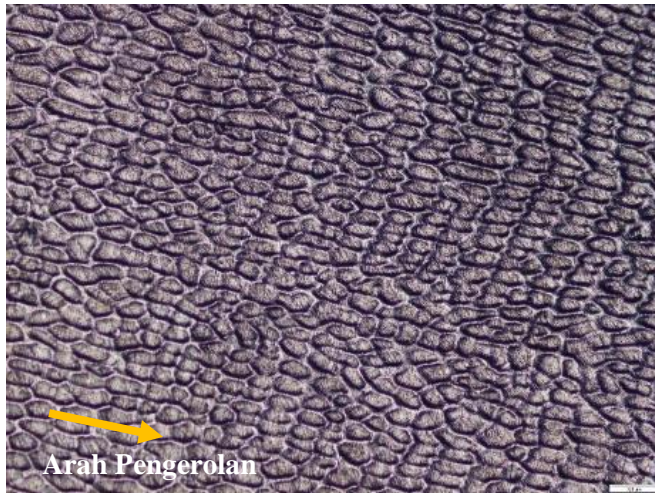
Pada pengujian awal dilakukan pengujian kekerasan pada spesimen *stainless steel* 316L hasil *investment casting* dengan rata-rata kekerasan yaitu 159.6 HV. Hasil kekerasan ini akan dibandingkan dengan kekerasan pada spesimen *cold rolling* dan spesimen *cold rolling-thermal cycling* pada suhu 900°C untuk melihat apakah ada perubahan nilai kekerasan pada proses *cold rolling-thermal cycling*.

3.4.2 Spesimen Hasil *Cold Rolling* (CR)

3.4.2.1 Pengujian *Metallography* Spesimen *Cold Rolling*

Hasil dari pengujian metalografi dengan perbesaran 50x, 100x, 200x untuk spesimen AISI 316L *investment casting* yang telah mengalami *cold rolling* menggunakan *olympus stereo microscope* pada gambar 3.11 sampai dengan 3.15. Pengukuran butiran dilakukan dengan menggunakan *linear intercept method* sesuai dengan ASTM E112-12. Hasil ukuran butir pada masing-masing spesimen pada gambar 3.16.

✚ Spesimen *Cold Rolling* Reduksi 52% (CR 52)



(a)



(b)



(c)

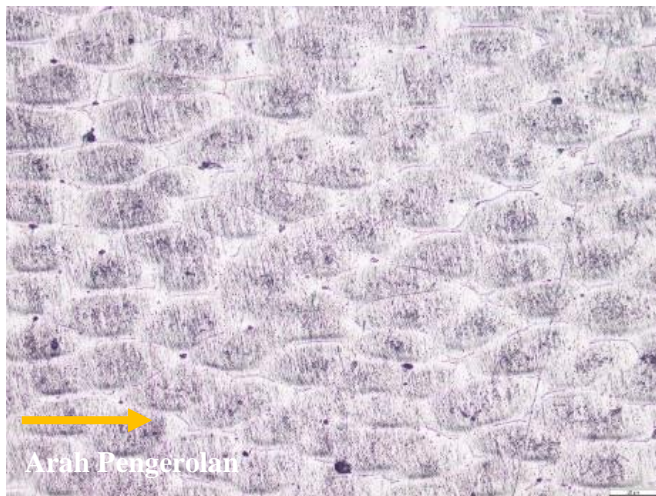
Gambar 3.11 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Permukaan Atas Spesimen *Cold Rolling* Reduksi 52% Perbesaran (a) 50x (b) 100x (c) 200x

Dari hasil yang diperoleh pada pengujian *metallography* pada gambar 3.11, spesimen *stainless steel* 316L hasil *cold rolling* reduksi 52% memiliki rata-rata ukuran butir sebesar $18.29 \mu\text{m} \pm 7.77$ dengan bentuk *elongated grain* searah dengan arah pengerolan.

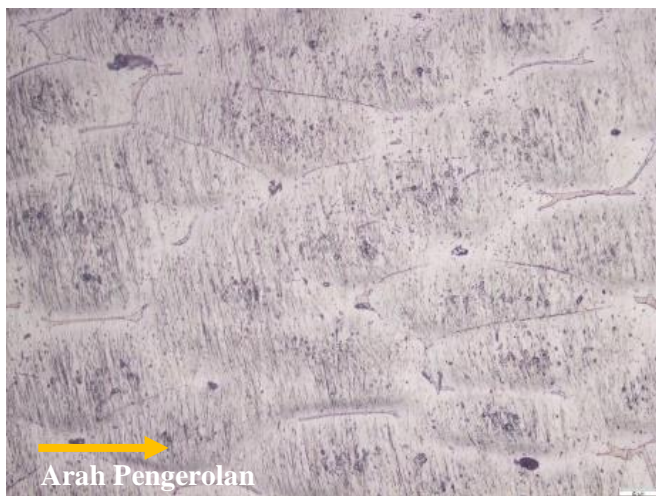
✚ **Spesimen *Cold Rolling* Reduksi 60% (CR 60)**



(a)



(b)



(c)

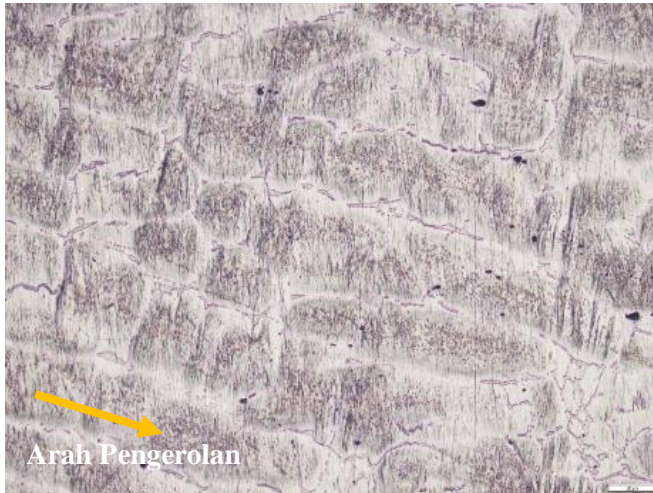
Gambar 3.12 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Permukaan Atas Spesimen *Cold Rolling* Reduksi 60% Perbesaran (a) 50x (b) 100x (c) 200x

Dari hasil yang diperoleh pada pengujian *metallography* pada gambar 3.12, spesimen *stainless steel* 316L hasil *cold rolling* reduksi 60% memiliki rata-rata ukuran butir sebesar $14.88 \mu\text{m} \pm 5.82$ dengan bentuk *elongated grain* searah dengan arah pengerolan.

✚ **Spesimen *Cold Rolling* Reduksi 69% (CR 69)**



(a)



(b)



(c)

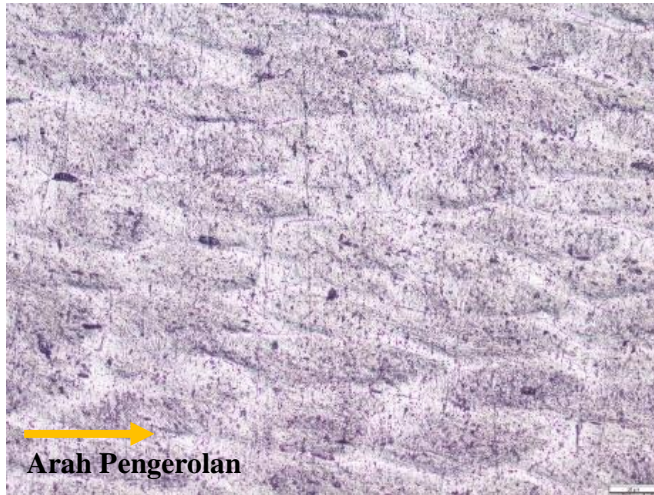
Gambar 3.13 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Permukaan Atas Spesimen *Cold Rolling* Reduksi 69% Perbesaran (a) 50x (b) 100x (c) 200x

Dari hasil yang diperoleh pada pengujian *metallography* pada gambar 3.13, spesimen *stainless steel* 316L hasil *cold rolling* reduksi 69% memiliki rata-rata ukuran butir sebesar $11.45 \mu\text{m} \pm 4.64$ dengan bentuk *elongated grain* searah dengan arah pengerolan.

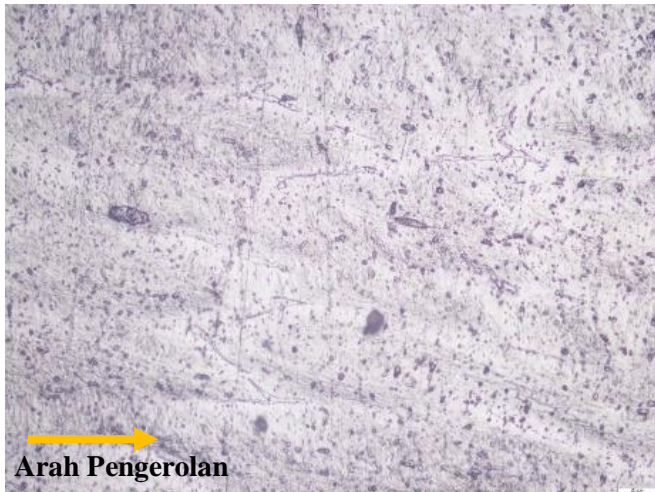
✚ **Spesimen Cold Rolling Reduksi 80% (CR 80)**



(a)



(b)

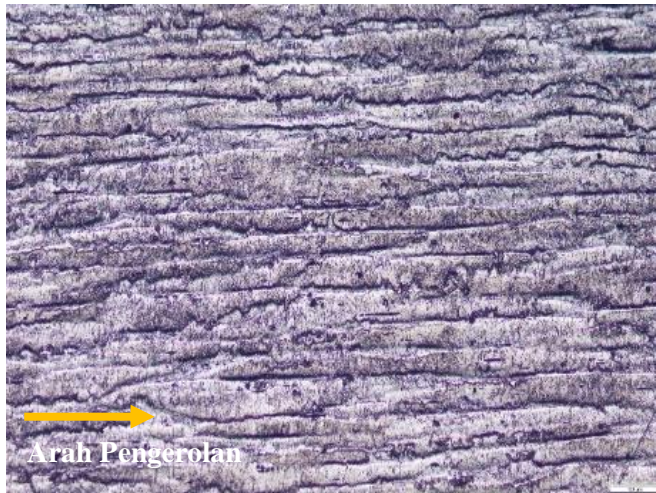


(c)

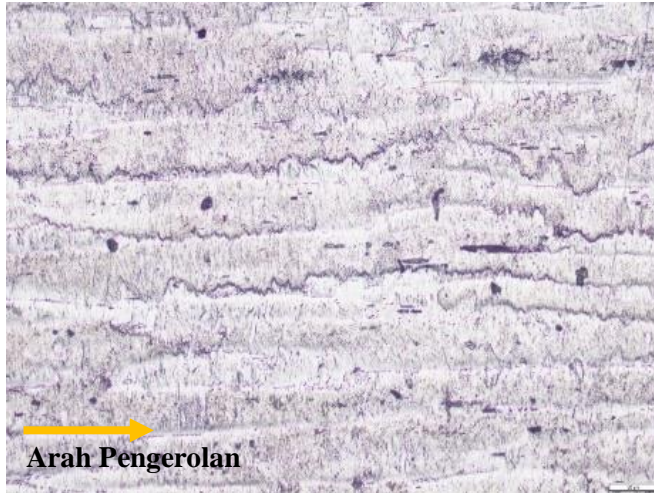
Gambar 3.14 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Permukaan Atas Spesimen *Cold Rolling* Reduksi 80% Perbesaran (a) 50x (b) 100x (c) 200x

Dari hasil yang diperoleh pada pengujian *metallography* pada gambar 3.14, spesimen *stainless steel* 316L hasil *cold rolling* reduksi 80% memiliki rata-rata ukuran butir sebesar $9.10 \mu\text{m} \pm 0.79$ dengan bentuk *elongated grain* searah dengan arah pengerolan.

✚ **Spesimen *Cold Rolling* Reduksi 90% (CR 90)**



(a)



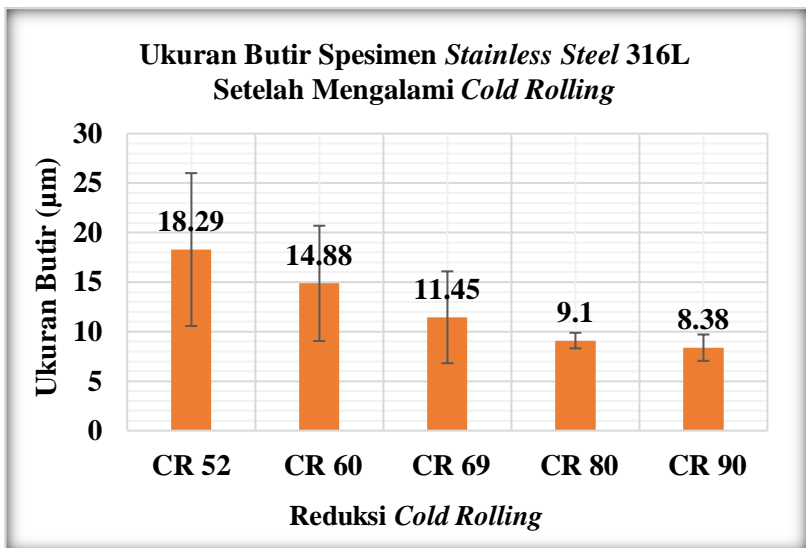
(b)



(c)

Gambar 3.15 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Permukaan Atas Spesimen *Cold Rolling* Reduksi 90% Perbesaran (a) 50x (b) 100x (c) 200x

Dari hasil yang diperoleh pada pengujian *metallography* pada gambar 3.15, spesimen *stainless steel* 316L hasil *cold rolling* reduksi 90% memiliki rata-rata ukuran butir sebesar $8.38 \mu\text{m} \pm 1.33$ dengan bentuk *elongated grain* searah dengan arah pengerolan. Adapun grafik ukuran butir untuk spesimen *stainless steel* 316L yang telah mengalami *cold rolling* pada gambar 3.16.



Gambar 3.16 Grafik Ukuran Butir Spesimen *Stainless Steel* 316L yang telah Mengalami *Cold Rolling*

Dari grafik pada gambar 3.16 diperoleh bahwa ukuran butiran rata-rata spesimen setelah mengalami *cold rolling* makin mengecil dengan naiknya derajat pengerolan, hal ini terjadi karena butiran makin tertekan pada area tegak lurus dengan arah pengerolan.

3.4.2.2 Pengujian *Microhardness* Spesimen *Cold Rolling*

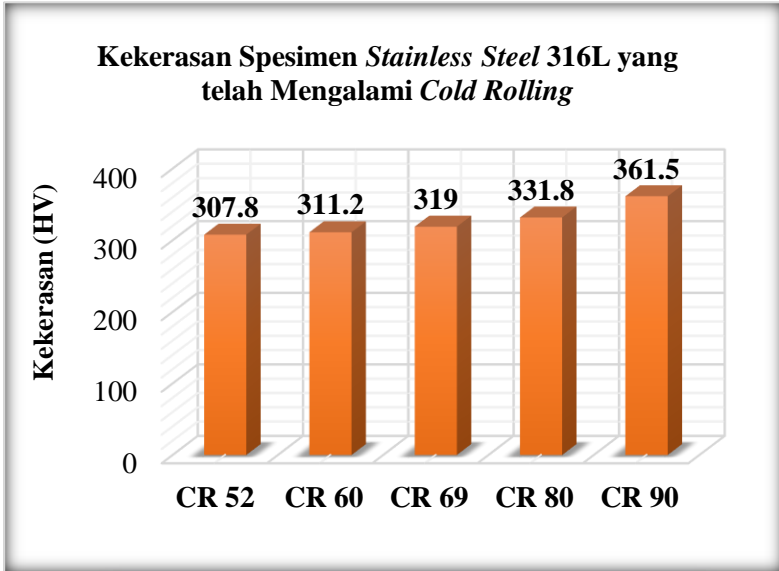
Pengujian *microhardness* dilakukan untuk mengetahui kekerasan pada material *stainless steel* AISI 316L hasil *investment casting* setelah di *rolling* dengan reduksi bertahap dimulai 52%, 60%, 69%, 80%, 90%. Pengujian ini menggunakan *micro vickers hardness* dengan pembebanan 0.3 HV (9.807 N) dalam kurun waktu sepuluh detik. Masing-masing permukaan spesimen diuji sebanyak sepuluh kali dari samping kiri ke tengah permukaan. Berikut data pengujian kekerasan dan perhitungan *dislocation density* pada tabel 3.3 dan 3.4, serta ilustrasi pengujian *micro vickers hardness* pada gambar 3.17.



Gambar 3.17 (a) Posisi Indentasi Pengujian Kekerasan pada Permukaan Atas Spesimen *Stainless Steel* 316L Setelah *Cold Rolling* (b) Hasil Indentasi Pengujian Kekerasan Spesimen *Stainless Steel* 316L Setelah *Cold Rolling*

Tabel 3.3 Hasil Pengujian *Microhardness Stainless Steel 316L* Setelah Mengalami *Cold Rolling*

Indentasi Ke-n	Kekerasan (HV)				
	CR 52	CR 60	CR 69	CR 80	CR 90
1	337	297	320	348	391
2	306	316	331	325	325
3	305	317	309	337	341
4	312	299	317	350	380
5	287	313	341	306	408
6	312	305	320	329	376
7	295	303	310	324	335
8	328	302	342	325	358
9	302	330	299	352	357
10	294	330	300	322	344
Rata-Rata	307.8 ± 14.57	311.2 ± 11.45	319 ± 14.51	331.8 ± 13.97	361.5 ± 25.26

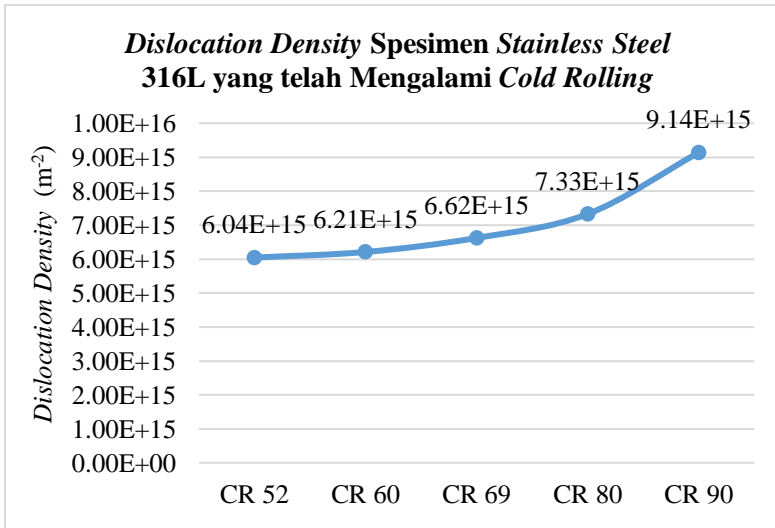


Gambar 3.18 Grafik Kekerasan Spesimen *Stainless Steel* 316L yang telah mengalami *Cold Rolling*

Dari grafik pada gambar 3.18 menunjukkan bahwa semakin tinggi presentase reduksi *cold rolling* dari spesimen *stainless steel* 316L hasil *investment casting* maka kekerasannya semakin meningkat.

Tabel 3.4 Hasil Perhitungan *Dislocation Density Stainless Steel 316L* Setelah Mengalami *Cold Rolling*

Titik Ke-n	<i>Dislocation Density (m⁻²)</i>				
	52%	60%	69%	80%	90%
1	7.6005E +15	5.4837E +15	6.6587E +15	8.243E +15	1.1005E +16
2	5.9299E +15	6.4462E +15	7.261E+ 15	6.9293 E+15	6.9293E +15
3	5.8795E +15	6.499E+ 15	6.0826E +15	7.6005 E+15	7.8311E +15
4	6.2371E +15	5.5814E +15	6.499E+ 15	8.3626 E+15	1.026E+ 16
5	5.0084E +15	6.2891E +15	7.8311E +15	5.9299 E+15	1.2207E +16
6	6.2371E +15	5.8795E +15	6.6587E +15	7.1495 E+15	9.9962E +15
7	5.3869E +15	5.7793E +15	6.1339E +15	6.8747 E+15	7.4864E +15
8	7.0941E +15	5.7295E +15	7.8893E +15	6.9293 E+15	8.8498E +15
9	5.7295E +15	7.2052E +15	5.5814E +15	8.4831 E+15	8.7881E +15
10	5.3389E +15	7.2052E +15	5.6305E +15	6.7663 E+15	8.0063E +15
Rata-Rata	6.04E+1 5	6.21E+1 5	6.62E+1 5	7.33E+ 15	9.14E+1 5



Gambar 3.19 Grafik *Dislocation Density* Spesimen *Stainless Steel 316L* yang telah mengalami *Cold Rolling*

Perhitungan *dislocation density* menggunakan rumus pada persamaan (2.5), dan didapatkan hasil bahwa *dislocation density* meningkat dengan peningkatan derajat reduksi *cold rolling* seperti ditunjukkan pada gambar 3.19. Terlihat bahwa pada spesimen *cold rolling* reduksi 90% memiliki nilai *dislocation density* paling tinggi sebesar $9.14E+15 \text{ m}^{-2}$. Sedangkan nilai *dislocation density* paling rendah terdapat pada spesimen *cold rolling* reduksi 52% dengan rata-rata *dislocation density* sebesar $6.04E+15 \text{ m}^{-2}$. *Dislocation density* secara langsung berhubungan dengan *stored strain energy* yang tinggi, dengan adanya *stored strain energy* akan mempercepat kinetika dari rekristalisasi sehingga butiran baru yang lebih kecil dapat terbentuk, hal ini sudah sesuai teori jika dilihat dari hasil *dislocation density* pada spesimen *stainless steel 316L* setelah mengalami *cold rolling*.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menggunakan material *stainless steel* AISI 316L hasil dari proses *investment casting* yang diperoleh dari PT Pelopor Teknologi Implantindo, Mojokerto. Material yang digunakan pada penelitian ini diberi perlakuan *cold rolling* menghasilkan derajat reduksi bertahap sebesar 52%, 60%, 69%, 80% dan 90%. Setelah material *cold rolling* dipotong, selanjutnya dilakukan proses perlakuan panas dengan *thermal cycling* pada suhu 900°C selama 35 detik dan siklus dilakukan secara berulang sebanyak 4 kali. Proses ini bertujuan untuk mencari pada derajat reduksi berapa rekristalisasi butiran baru akan muncul. Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi pengujian komposisi kimia material untuk mengetahui kesesuaian standar dengan ASTM F138-13a, pengamatan struktur mikro melalui teknik metalografi dan pengujian kekerasan melalui uji *microhardness*.

4.1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia yang terdapat pada material baja tahan karat AISI 316L kemudian dibandingkan dengan standar ASTM F138-13a. Alat yang digunakan untuk pengujian ini yaitu spektrometer SPECTROMAXx *arc spark OES metal analyzer benchtop* dari Ametex, Jerman milik PT Pelopor Teknologi Implantindo. Adapun hasil pengujian komposisi kimia ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Komposisi Kimia Material Hasil Uji Spectro

Unsur	Investment 316L	ASTM F138-13a
C	0.0258	0.03
Ni	12.34	13-15
Mn	0.876	2
P	0.0225	0.025
S	0.0054	0.01
Cr	17.11	17-19
Mo	2.39	2.25-3
N	0.0622	0.1
Cu	0.159	0.5
Fe	66.3	Bal

Berdasarkan tabel 4.1, hasil komposisi kimia yang dimiliki material AISI 316L memiliki nilai yang tidak jauh berbeda apabila dibandingkan dengan standar biomaterial ASTM F138-13a. Kadar kromium dan molibdenum masing-masing material yang berguna sebagai peningkatan oksida pada permukaan dan ketahanan material terhadap korosi berada pada standar ASTM F138-13a. Dari data uji komposisi kimia yang diperoleh menunjukkan bahwa komposisi kimia dari *stainless steel* AISI 316L masih dibawah standar biomaterial ASTM F138-13a, yaitu kadar nikel kurang dari 13.00 %wt. Dari hasil pengujian didapatkan kadar nikel hanya sebesar 12.34 %wt. Hal ini berpengaruh terhadap sifat kemagnetan dari *austenitic stainless steel* AISI 316L karena nikel berfungsi sebagai pembentuk dan penstabil fasa austenit, kadar nikel yang lebih rendah memungkinkan munculnya fasa delta ferrit atau martensit sehingga *stainless steel* akan memiliki sifat magnet

walaupun lemah. Nikel juga berfungsi untuk menaikkan keuletan serta meningkatkan ketahanan korosi tegangan.

4.1.1 Perhitungan Nilai Ekuivalen Kromium dan Nikel

Nilai ekuivalen kromium dan nikel digunakan untuk menentukan nilai perbandingan dari kedua unsur ekuivalen yang dikarenakan oleh unsur paduan dalam suatu material. Berikut ini merupakan perhitungan nilai ekuivalen kromium dan nikel pada masing-masing material:

1. Material AISI 316L *Investment Casting*

Berikut ini merupakan perhitungan nilai ekuivalen kromium dan nikel pada material AISI 316L hasil *investment casting*:

- Nilai Ekuivalen Kromium:

$$Cr_{eq} = Cr + 2\% Si + 1.5\% Mo + 5\% V + 1.75\% Nb + 1.5\% Ti + 0.75\% W$$

$$Cr_{eq} = 17.11 + 2\% (0.371) + 1.5\% (2.39) + 5\% (0.0691) + 1.75\% (0.053) + 1.5\% (0.0020) + 0.75\% (0.0187)$$

$$Cr_{eq} = 17.11 + 0.00742 + 0.03585 + 0.003455 + 0.0009275 + 0.00003 + 0.00014025$$

$$Cr_{eq} = 17.16$$

- Nilai Ekuivalen Nikel:

$$Ni_{eq} = Ni + Co + 0.5\% Mn + 0.3\% Cu + 25\% N + 30\% C$$

$$Ni_{eq} = 12.34 + 0.0820 + 0.5\% (0.876) + 0.3\% (0.159) + 25\% (0.0622) + 30\% (0.0258)$$

$$Ni_{eq} = 12.34 + 0.0820 + 0.00438 + 0.000477 + 0.01555 + 0.0774$$

$$Ni_{eq} = 12.52$$

Hasil dari perhitungan ini akan ditunjukkan pada titik berwarna kuning.

2. Material AISI 316L Standar F138-13a

Berikut ini merupakan perhitungan nilai ekivalen kromium dan nikel pada material AISI 316L Menurut standar F138-13a:

- Nilai Ekivalen Kromium:

$$Cr_{eq} = Cr + 2\% Si + 1.5\% Mo + 5\% V + 1.75\% Nb + 1.5\% Ti + 0.75\% W$$

$$Cr_{eq} = 18 + 2\%(0) + 1.5\%(2.625) + 5\%(0) + 1.75\%(0) + 1.5\%(0) + 0.75\%(0)$$

$$Cr_{eq} = 18 + 0.039375$$

$$Cr_{eq} = 18.04$$

- Nilai Ekivalen Nikel:

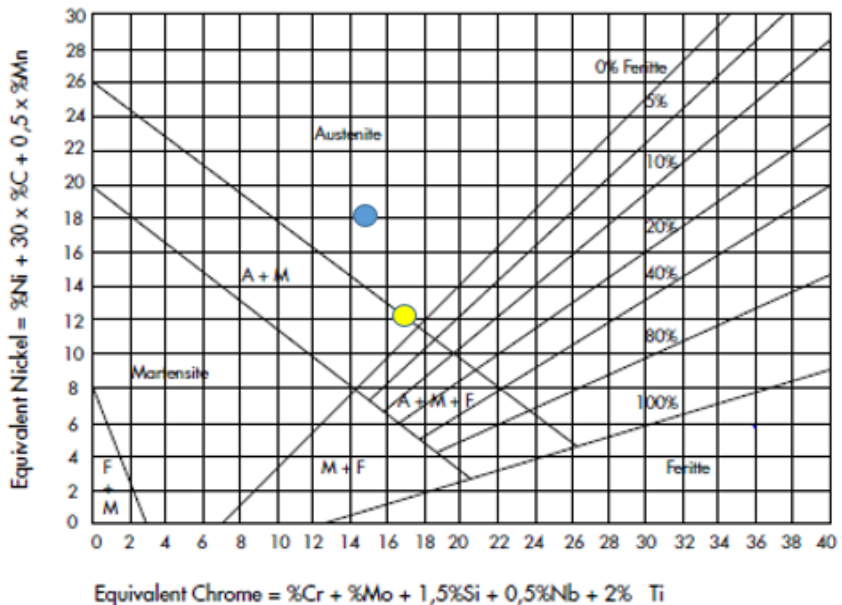
$$Ni_{eq} = Ni + Co + 0.5\% Mn + 0.3\% Cu + 25\% N + 30\% C$$

$$Ni_{eq} = 14 + 0 + 0.5\% (2) + 0.3\% (0.5) + 25\% (0.1) + 30\% (0.03)$$

$$Ni_{eq} = 14 + 0.01 + 0.0015 + 0.025 + 0.009$$

$$Ni_{eq} = 14.05$$

Hasil dari perhitungan ini akan ditunjukkan pada titik berwarna biru.



Gambar 4.1 Hasil Perhitungan Nilai Ekuivalen Kromium dan Nikel pada Material AISI 316L

Berdasarkan hasil perhitungan pada gambar 4.1 diperoleh nilai ekuivalen kromium dan nikel pada masing–masing material AISI 316L, dimana material AISI 316L hasil *investment casting* ditunjukkan dengan titik kuning dan material 316L menurut standar ASTM F138-13a ditunjukkan dengan titik biru. Hasil perhitungan AISI 316L dengan standar ASTM F138-13a menunjukkan bahwa material berada pada fasa *austenite* dan membuktikan bahwa AISI 316L merupakan *austenitic stainless steel*.

Pada material AISI 316L hasil *investment casting*, didapatkan hasil perhitungan yang menunjukkan bahwa material AISI 316L (titik kuning) berada pada daerah *austenite+martensite* hal ini menunjukkan material dengan penambahan titanium sebesar 0.002% merupakan jenis *austenitic stainless steel* dengan fasa

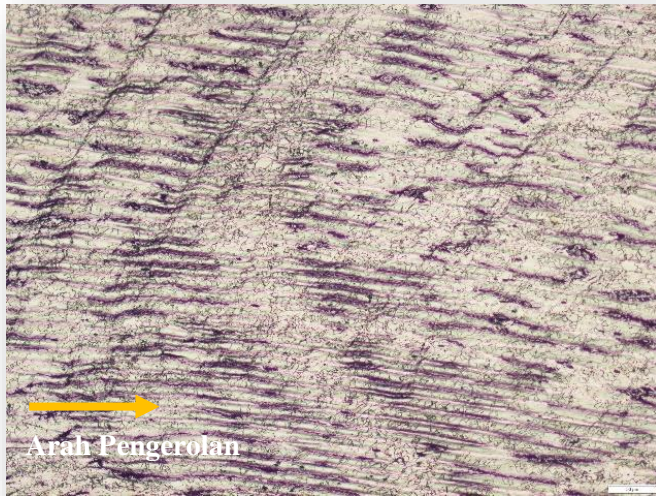
austenite dan fasa *martensite*. Adanya fasa *martensite* disebabkan karena kandungan nikel pada material AISI 316L berada di bawah standar ASTM F138-13a.

4.2 Hasil Pengujian *Metallography*

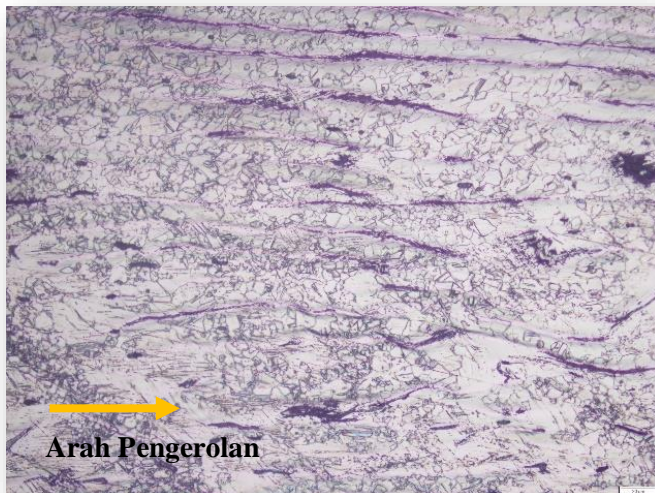
Pengujian *metallography* dilakukan untuk mengetahui struktur mikro dan ukuran butir pada spesimen *stainless steel* AISI 316L. Pengukuran butiran menggunakan *linear intercept method* sesuai dengan standar ASTM E112-12 pada perbesaran 500x. Rata-rata ukuran butir *stainless steel* 316L dapat dilihat pada tabel 4.2. Spesimen yang disiapkan untuk pengujian *metallography* ada 5 spesimen yaitu spesimen hasil *investment casting* yang telah mengalami *cold rolling* reduksi bertahap 52%, 60%, 69%, 80% dan 90% serta diberi perlakuan *thermal cycling* 900°C. Pengambilan gambar struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop *optic olympus* dengan perbesaran tertentu. Berikut hasil dari struktur mikro pada masing-masing spesimen.

4.2.1 Hasil Pengamatan Struktur Mikro *Stainless Steel* 316L *Cold Rolling* Reduksi 52% *Thermal Cycling* 900°C (CR 52 TC)

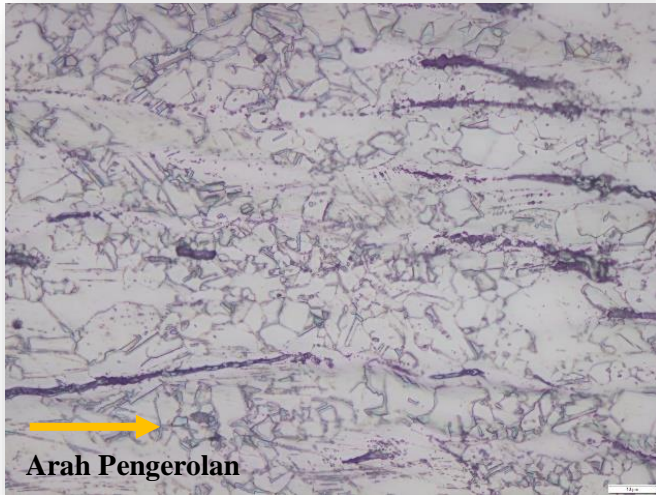
Pengamatan struktur mikro menggunakan teknik *metallography*. Spesimen hasil *cold rolling* reduksi 52% diberi perlakuan *thermal cycling* 900°C, dengan waktu penahanan 35 detik yang dilakukan berulang sebanyak 4 kali (4 siklus). Setelah *thermal cycling*, dilakukan pendinginan udara sampai temperatur kamar. Berikut gambar 4.2 merupakan hasil dari pengamatan struktur mikro spesimen *stainless steel* 316L *cold rolling* reduksi 52% *thermal cycling* 900°C:



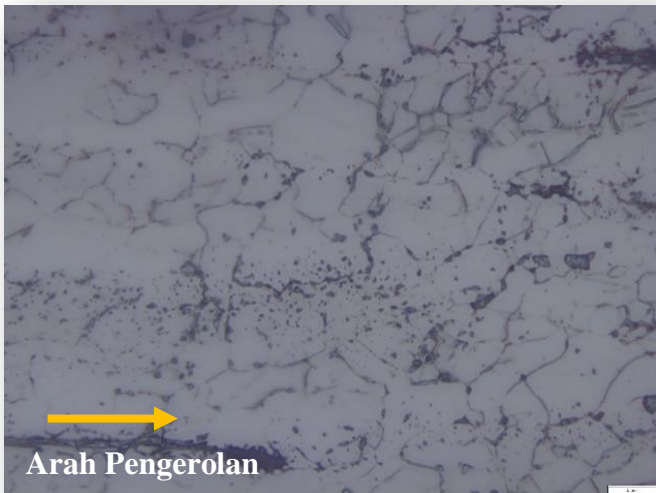
(a)



(b)



(c)



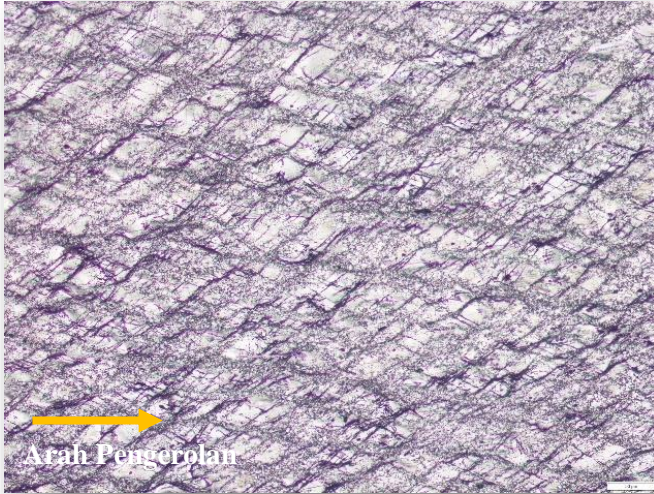
(d)

Gambar 4.2 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sisi Samping Spesimen *Stainless Steel 316L Cold Rolling Reduksi 52% Thermal Cycling 900°C* perbesaran (a)100x (b)200x (c)500x (d)1000x

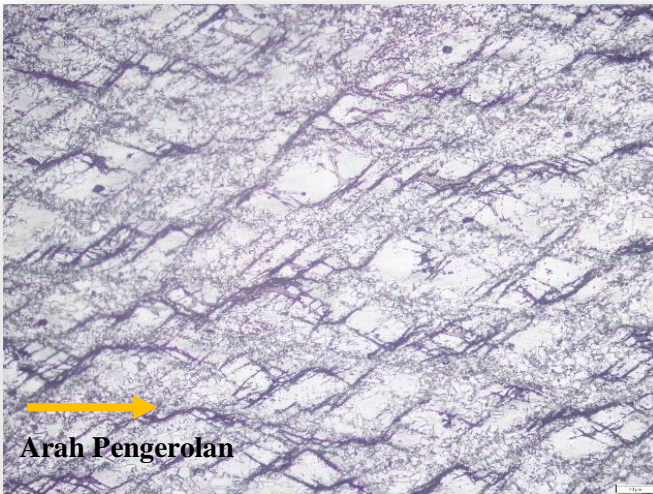
Dari hasil pengamatan uji *metallography* dari sisi samping pada gambar 4.2 didapatkan struktur mikro spesimen *cold rolling* reduksi 52% *thermal cycling* 900°C dengan ukuran butir minimum sebesar 1.54 μm , maksimum sebesar 25.8 μm serta rata-rata sebesar 7.43 $\mu\text{m} \pm 4.77$. Pada spesimen *cold rolling* reduksi 52% *thermal cycling* 900°C ini terjadi rekristalisasi sebagian (*partially recrystallization*) dibuktikan dengan adanya pengintian dan pertumbuhan butir pada beberapa area di batas butir, namun ukuran butirannya belum homogen.

4.2.2 Hasil Pengamatan Struktur Mikro *Stainless Steel 316L Cold Rolling Reduksi 60% Thermal Cycling 900°C (CR 60 TC)*

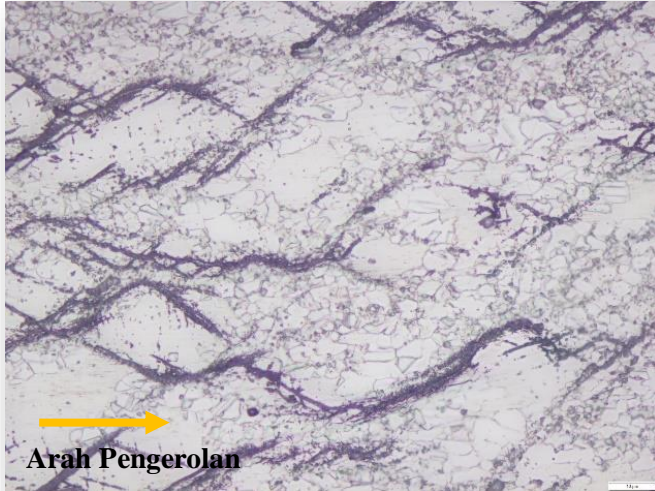
Pengamatan struktur mikro menggunakan teknik *metallography*. Spesimen hasil *cold rolling* reduksi 60% diberi perlakuan *thermal cycling* 900°C, dengan waktu penahanan 35 detik yang dilakukan berulang sebanyak 4 kali (4 siklus). Setelah *thermal cycling*, dilakukan pendinginan udara sampai temperatur kamar. Berikut gambar 4.3 merupakan hasil dari pengamatan struktur mikro spesimen *stainless steel 316L cold rolling* reduksi 60% *thermal cycling* 900°C:



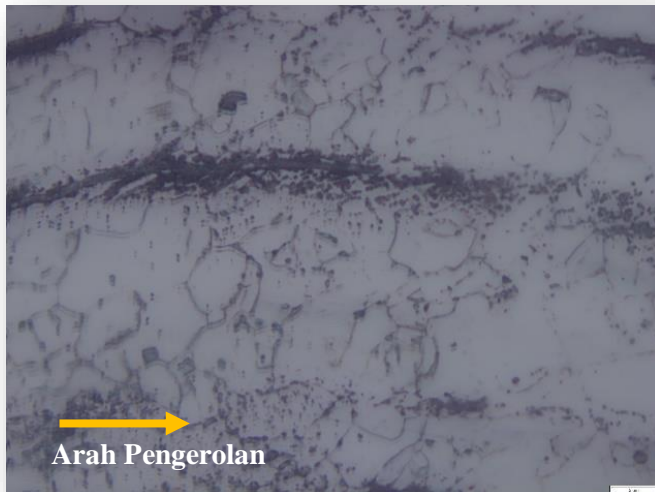
(a)



(b)



(c)



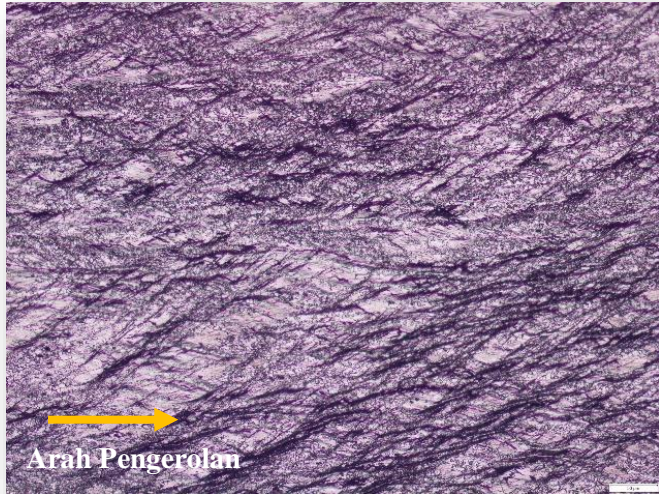
(d)

Gambar 4.3 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sisi Samping Spesimen *Stainless Steel 316L Cold Rolling* reduksi 60% *Thermal Cycling 900°C* perbesaran (a)100x (b)200x (c)500x (d)1000x

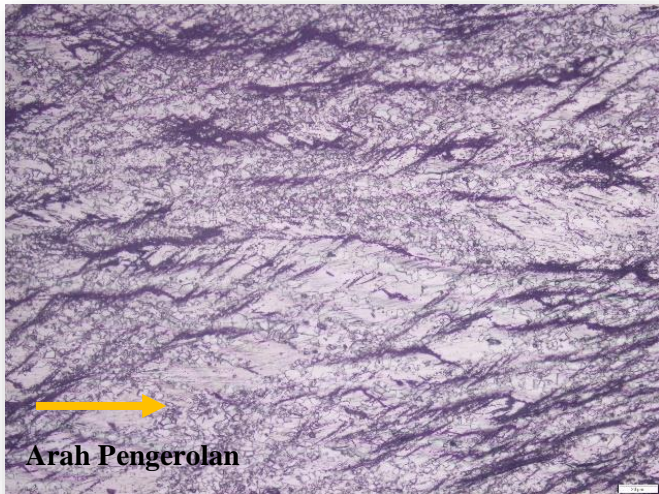
Dari hasil pengamatan uji *metallography* dari sisi samping pada gambar 4.3 didapatkan struktur mikro spesimen *cold rolling* reduksi 60% *thermal cycling* 900°C dengan ukuran butir minimum sebesar 1.33 μm , maksimum sebesar 18.74 μm serta rata-rata sebesar 6.50 $\mu\text{m} \pm 3.85$. Pada spesimen *cold rolling* reduksi 60% hasil *thermal cycling* 900°C ini terjadi rekristalisasi sebagian (*partially recrystallization*) dibuktikan dengan adanya pengintian dan pertumbuhan butir pada daerah di batas butir lebih banyak dibandingkan dengan spesimen *cold rolling* reduksi 50% *thermal cycling* 900°C seperti pada gambar 4.2, namun ukuran butirannya masih belum homogen.

4.2.3 Hasil Pengamatan Struktur Mikro *Stainless Steel* 316L *Cold Rolling* Reduksi 69% *Thermal Cycling* 900°C (CR 69 TC)

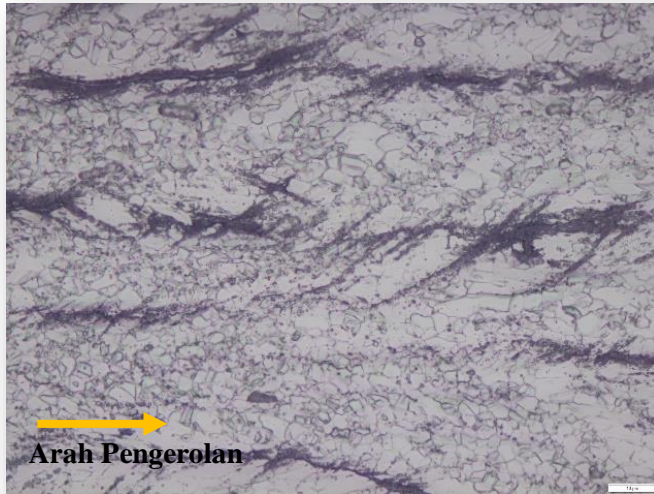
Pengamatan struktur mikro menggunakan teknik *metallography*. Spesimen hasil *cold rolling* reduksi 69% diberi perlakuan *thermal cycling* 900°C, dengan waktu penahanan 35 detik yang dilakukan berulang sebanyak 4 kali (4 siklus). Setelah *thermal cycling*, dilakukan pendinginan udara sampai temperatur kamar. Berikut gambar 4.4 merupakan hasil dari pengamatan struktur mikro spesimen *stainless steel* 316L *cold rolling* reduksi 69% *thermal cycling* 900°C:



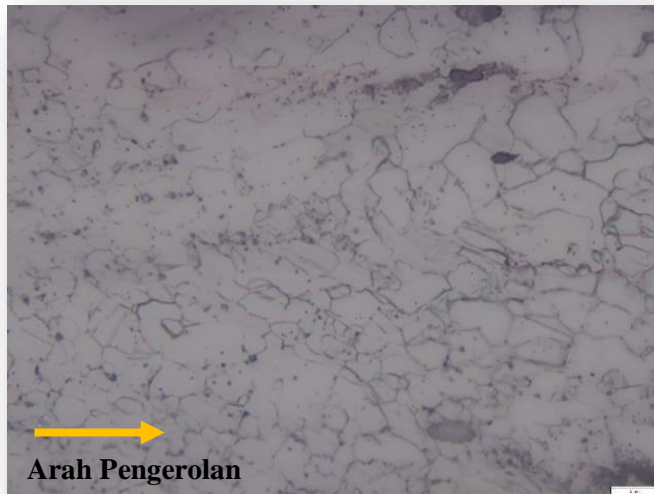
(a)



(b)



(c)



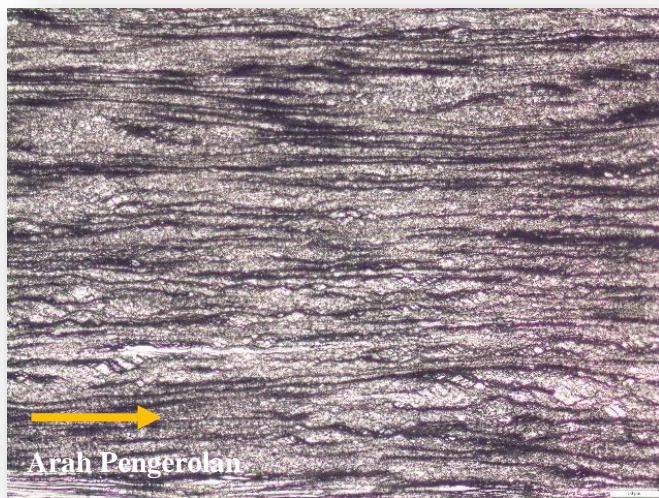
(d)

Gambar 4.4 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sisi Samping Spesimen *Stainless Steel 316L Cold Rolling Reduksi 69% Thermal Cycling 900°C* perbesaran (a)100x (b)200x (c)500x (d)1000x

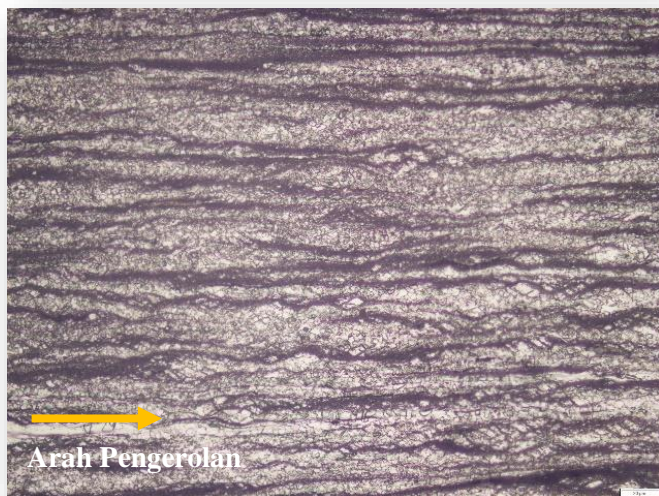
Dari hasil pengamatan uji *metallography* dari sisi samping pada gambar 4.4 didapatkan struktur mikro spesimen *cold rolling* reduksi 69% *thermal cycling* 900°C dengan ukuran butir minimum sebesar 2.43 μm , maksimum sebesar 15.69 μm serta rata-rata sebesar 5.37 $\mu\text{m} \pm 2.94$. Pada spesimen *cold rolling* reduksi 69% hasil *thermal cycling* 900°C ini terjadi rekristalisasi sebagian (*partially recrystallization*) dibuktikan dengan adanya pengintian dan pertumbuhan butir pada daerah di batas butir lebih banyak dan hampir merata di seluruh area dibandingkan dengan spesimen *cold rolling* reduksi 69% *thermal cycling* 900°C seperti pada gambar 4.3, namun ukuran butirannya masih belum homogen.

4.2.4 Hasil Pengamatan Struktur Mikro *Stainless Steel* 316L *Cold Rolling* Reduksi 80% *Thermal Cycling* 900°C (CR 80 TC)

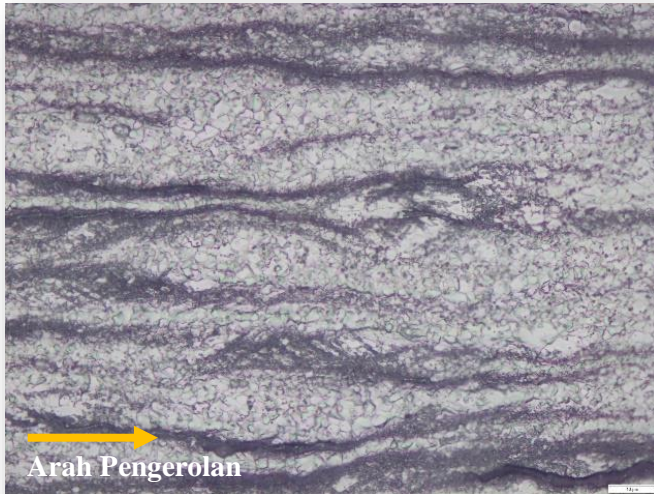
Pengamatan struktur mikro menggunakan teknik *metallography*. Spesimen hasil *cold rolling* reduksi 80% diberi perlakuan *thermal cycling* 900°C, dengan waktu penahanan 35 detik yang dilakukan berulang sebanyak 4 kali (4 siklus). Setelah *thermal cycling*, dilakukan pendinginan udara sampai temperatur kamar. Berikut gambar 4.5 merupakan hasil dari pengamatan struktur mikro spesimen *stainless steel* 316L *cold rolling* reduksi 80% *thermal cycling* 900°C:



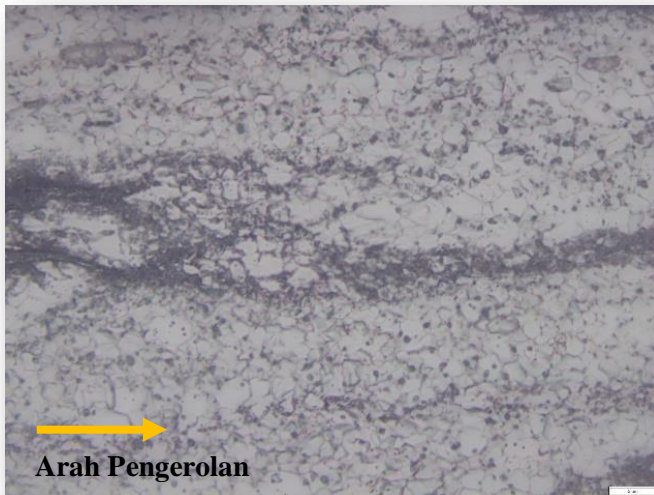
(a)



(b)



(c)



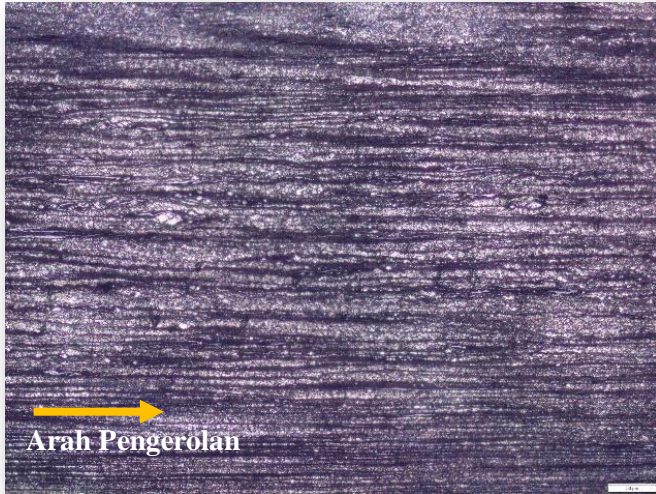
(d)

Gambar 4.5 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sisi Samping Spesimen *Stainless Steel 316L Cold Rolling Reduksi 80% Thermal Cycling 900°C* perbesaran (a)100x (b)200x (c)500x (d)1000x

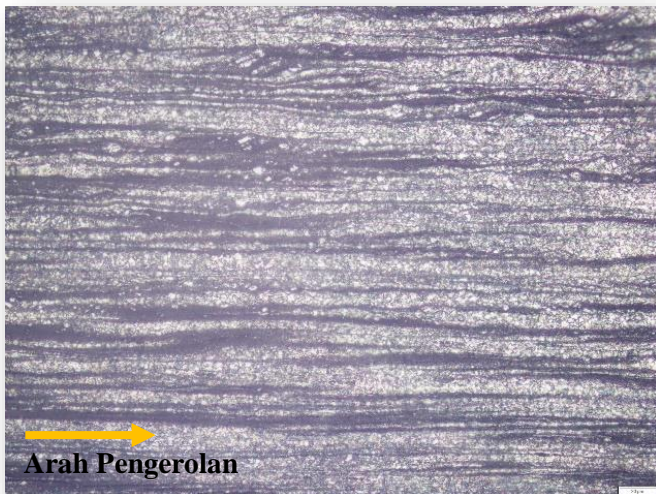
Dari hasil pengamatan uji *metallography* dari sisi samping pada gambar 4.5 didapatkan struktur mikro spesimen *cold rolling* reduksi 80% *thermal cycling* 900°C. Spesimen telah mengalami rekristalisasi merata (*fully recrystallization*) pada batas butir ditandai adanya pengintian dan pertumbuhan butir pada batas butir serta ukuran butirnya homogen. Spesimen *cold rolling* reduksi 80% *thermal cycling* 900°C memiliki ukuran butir minimum sebesar 1.68 μm , maksimum sebesar 5.07 μm serta rata-rata sebesar 3.26 $\mu\text{m} \pm 0.71$ dimana ukuran butir tersebut lebih kecil daripada spesimen hasil *cold rolling* reduksi 80% dengan nilai ukuran butir sebesar 9.1 μm .

4.2.5 Hasil Pengamatan Struktur Mikro *Stainless Steel 316L Cold Rolling Reduksi 90% Thermal Cycling 900°C (CR 90 TC)*

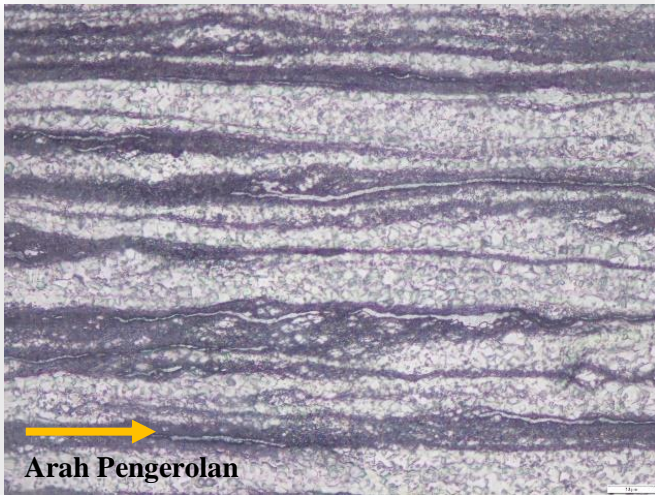
Pengamatan struktur mikro menggunakan teknik *metallography*. Spesimen hasil *cold rolling* reduksi 90% diberi perlakuan *thermal cycling* 900°C, dengan waktu penahanan 35 detik yang dilakukan berulang sebanyak 4 kali (4 siklus). Setelah *thermal cycling*, dilakukan pendinginan udara sampai temperatur kamar. Berikut gambar 4.6 merupakan hasil dari pengamatan struktur mikro spesimen *stainless steel 316L cold rolling* reduksi 90% *thermal cycling* 900°C:



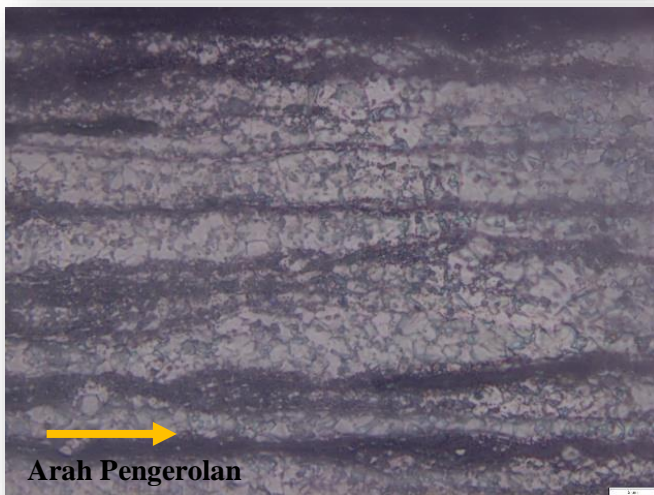
(a)



(b)



(c)



(d)

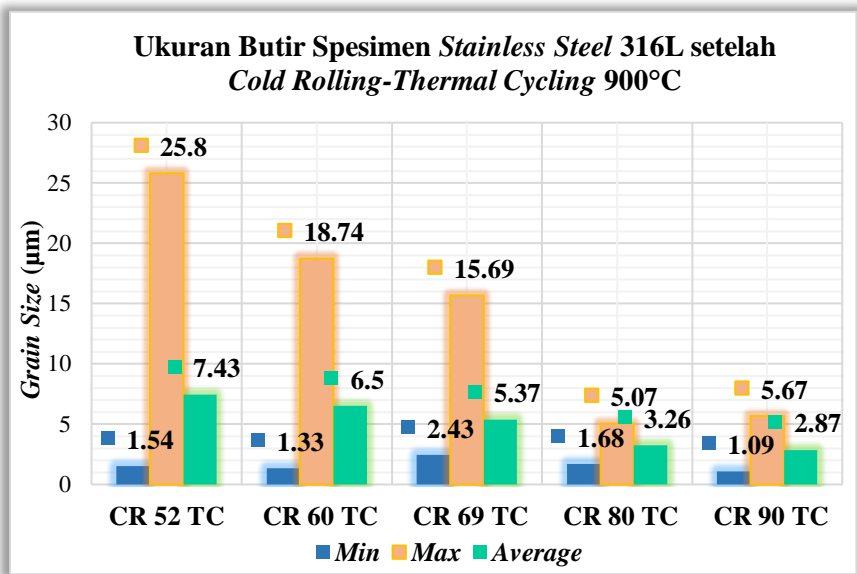
Gambar 4.6 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sisi Samping Spesimen *Stainless Steel 316L Cold Rolling Reduksi 90% Thermal Cycling 900°C* perbesaran (a)100x (b)200x (c)500x (d)1000x

Dari hasil pengamatan uji *metallography* dari sisi samping pada gambar 4.6 didapatkan struktur mikro spesimen *cold rolling* reduksi 90% *thermal cycling* 900°C dengan dengan ukuran butir minimum sebesar 1.09 μm , maksimum sebesar 5.67 μm serta rata-rata sebesar $2.87\mu\text{m} \pm 0.85$ dimana ukuran butir tersebut lebih kecil daripada spesimen hasil *cold rolling* reduksi 90% dengan ukuran butir sebesar 8.38 μm .

Jika diamati pada gambar struktur mikro spesimen telah mengalami rekristalisasi merata (*fully recrystallization*) ditunjukkan dengan ukuran butir yang homogen dan terjadi pengintian serta pertumbuhan butir pada batas butir, hal ini terjadi karena butiran baru yang mengintui tumbuh pada tiap tahapan siklus yang terjadi (dilakukan 4 siklus). Siklus yang berulang ini dimaksudkan agar pengintian butiran baru menjadi lebih maksimal karena pada tiap tahapan siklus akan muncul inti butiran baru dengan ukuran kecil.

Tabel 4.2 Rata-Rata Ukuran Butir Spesimen *Stainless Steel* 316L *Cold Rolling-Thermal Cycling* 900°C

Perlakuan	Ukuran Butir Minimum (μm)	Ukuran Butir Maximum (μm)	Rata-Rata Ukuran Butir (μm)	Standar Deviasi
CR 52 TC	1.54	25.8	7.43	4.77
CR 60 TC	1.33	18.74	6.50	3.85
CR 69 TC	2.43	15.09	5.37	2.94
CR 80 TC	1.68	5.07	3.26	0.71
CR 90 TC	1.09	5.67	2.87	0.85



Gambar 4.7 Grafik Ukuran Butir Spesimen *Stainless Steel* 316L setelah *Cold Rolling-Thermal Cycling* 900°C

Pada gambar 4.7 merupakan grafik rata-rata ukuran butir pada spesimen *cold rolling* setelah diberi perlakuan *thermal cycling* 900°C. Jika diamati semakin tinggi derajat reduksi maka ukuran butir semakin kecil. Adanya *thermal cycling* memicu terjadinya rekristalisasi butiran dengan melepas *stored strain energy* hasil *cold rolling*, sehingga didapatkan butiran baru yang lebih kecil dan homogen daripada butiran hasil *cold rolling*.

Pada spesimen *stainless steel* 316L *cold rolling* reduksi 52%, 60% dan 69% yang telah diberi perlakuan *thermal cycling* 900°C didapatkan perbedaan nilai ukuran butir antara nilai maksimum dan minimum yang menunjukkan bahwa ada butiran yang masih kasar (berukuran besar) dan belum mengalami rekristalisasi. Dari pengamatan pada gambar 4.7 terlihat bahwa spesimen dengan *cold rolling* reduksi 52%, 60% dan 69% yang telah diberi perlakuan *thermal cycling* 900°C masih memiliki

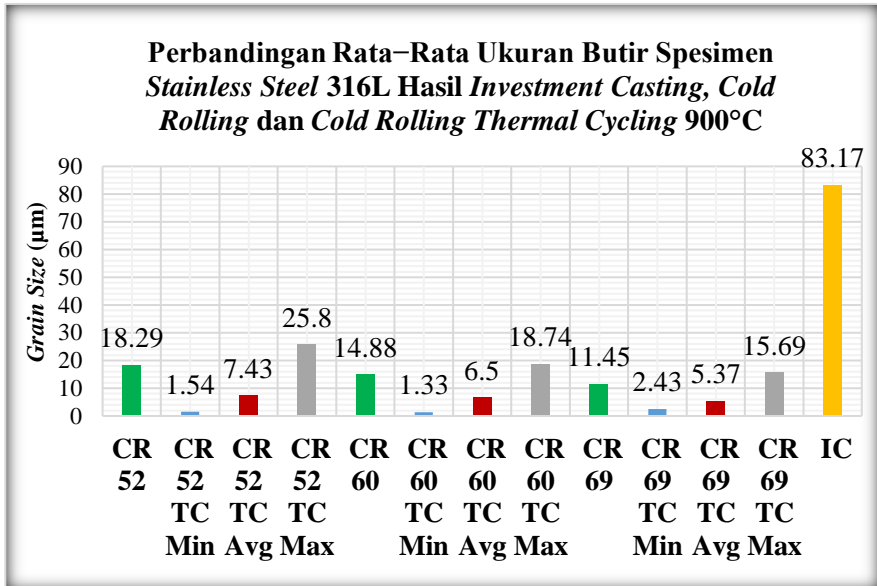
butiran dengan ukuran kasar yaitu 25.8 μm , 18.74 μm dan 15.69 μm , dimana nilai ukuran butir tersebut cenderung mendekati butiran awal sebelum proses *thermal cycling* dilakukan pada spesimen tersebut yaitu sebesar 18.29 μm , 14.88 μm dan 11.45 μm . Hal ini menunjukkan bahwa hanya terjadi rekristalisasi sebagian (*partially recrystallization*) pada spesimen ini. Pada gambar 4.2, 4.3 dan 4.4 juga memperkuat kesimpulan penelitian ini dengan terlihat adanya butiran yang masih berukuran besar pada area yang diamati secara struktur mikro.

Pada gambar 4.7 spesimen *stainless steel 316L cold rolling* reduksi 80% dan 90% yang telah diberi perlakuan *thermal cycling* 900°C, terlihat bahwa ukuran butiran minimum dan maksimum cenderung tidak berbeda secara signifikan dibandingkan dengan ukuran butiran minimum dan maksimum untuk spesimen *cold rolling* reduksi 52%, 60%, dan 69%. Hal ini menunjukkan bahwa proses rekristalisasi telah terjadi diseluruh area dan terbentuk butiran dengan ukuran seragam. Hasil pengamatan struktur mikro pada gambar 4.5 dan 4.6 juga menunjukkan ukuran butiran yang halus (kecil) di seluruh area yang diamati secara struktur mikro.

4.2.6 Ringkasan Analisis Pengujian Metallography

Pada penelitian ini *stainless steel 316L hasil investment casting* akan dimodifikasi struktur mikronya dengan mengubah ukuran butir dengan mekanisme rekristalisasi. Hal ini dapat dilakukan dengan kombinasi pengerjaan dingin dan perlakuan panas yaitu *cold rolling-thermal cycling*. *Cold rolling* dilakukan untuk menghasilkan *stored strain energy* yang menyebabkan kenaikan kekerasan pada spesimen. Pada saat *thermal cycling*, *stored strain energy* yang akan memicu terjadinya rekristalisasi butiran baru pada batas butir. *Cold rolling* yang dilakukan pada spesimen *stainless steel* hasil *investment casting* ini direduksi secara bertahap sebesar 52%, 60%, 69%, 80%, dan 90% kemudian diberikan perlakuan *thermal cycling* pada suhu 900°C dengan waktu penahanan 35 detik, dan siklus diulang sebanyak 4 kali. Berikut pada gambar 4.8 dan 4.9 merupakan grafik

perbandingan rata-rata ukuran butir spesimen *stainless steel investment casting* dengan *cold rolling* dan *cold rolling-thermal cycling*:

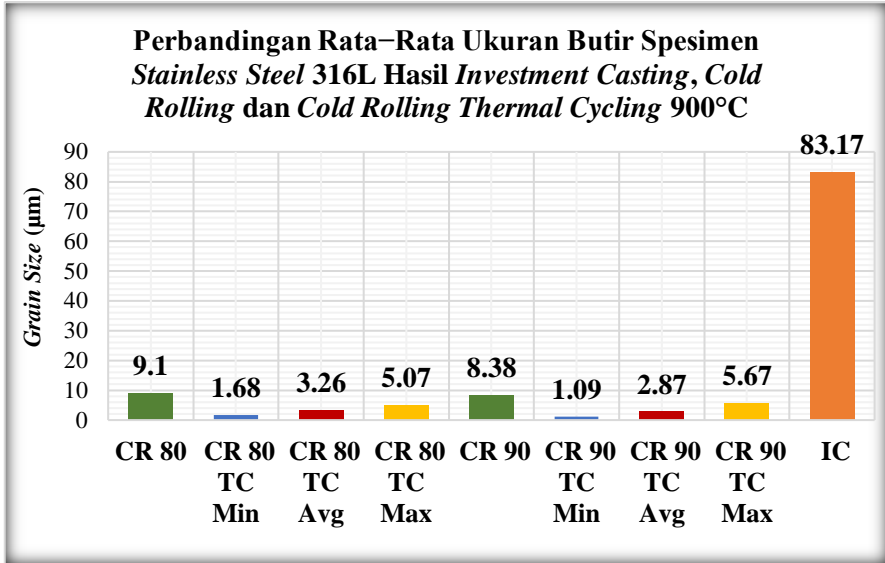


Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Rata-Rata Ukuran Butir pada *Stainless Steel 316L* Hasil *Investment Casting*, *Cold Rolling* dan *Cold Rolling Thermal Cycling 900°C*

Dilihat pada grafik gambar 4.8 spesimen hasil *investment casting* memiliki rata-rata ukuran butir sebesar 83.17 µm dimana ukuran butir ini lebih besar daripada spesimen *stainless steel 316L* hasil *cold rolling* dan *cold rolling-thermal cycling*. Pada spesimen *stainless steel 316L* yang telah mengalami *cold rolling* reduksi 52%, 60%, dan 69% masing-masing memiliki rata-rata ukuran butir sebesar 18.29 µm, 14.88 µm dan 11.45 µm. Jika dibandingkan rata-rata ukuran butir pada spesimen *stainless steel* hasil *cold rolling* cenderung menurun dari hasil *investment casting*, hal ini

dikarenakan adanya deformasi plastis melalui *strain hardening* sehingga terjadi perubahan ukuran butir.

Sedangkan untuk spesimen *stainless steel* 316L hasil *cold rolling* reduksi 52% *thermal cycling* 900°C memiliki ukuran butir minimum sebesar 1.54 μm , maksimum sebesar 25.8 μm serta rata-rata sebesar 7.43 μm . *Cold rolling* reduksi 60% *thermal cycling* 900°C dengan ukuran butir minimum sebesar 1.33 μm , maksimum sebesar 18.74 μm serta rata-rata sebesar 6.50 μm . *Cold rolling* reduksi 69% *thermal cycling* 900°C ukuran butir minimum sebesar 2.43 μm , maksimum sebesar 15.69 μm serta rata-rata sebesar 5.37 μm . Jika dibandingkan dengan rata-rata ukuran butir hasil spesimen *investment casting* dan *cold rolling*, spesimen *cold rolling-thermal cycling* memiliki rata-rata ukuran butir beragam, ada yang masih kasar (besar) merupakan hasil dari *cold rolling* yang belum sepenuhnya terjadi pengintian pada saat pemanasan berlangsung, dan butiran halus (kecil) dikarenakan setelah pemanasan pada spesimen menyebabkan pengintian butiran baru pada daerah batas butir, sehingga dapat dikatakan spesimen telah rekristalisasi sebagian (*partially recrystallization*).



Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Rata-Rata Ukuran Butir pada *Stainless Steel 316L* Hasil *Investment Casting*, *Cold Rolling* dan *Cold Rolling Thermal Cycling 900°C*

Dilihat pada grafik gambar 4.9 spesimen hasil *investment casting* memiliki rata-rata ukuran butir sebesar 83.17 µm dimana ukuran butir ini lebih besar daripada spesimen *stainless steel 316L* hasil *cold rolling* dan *cold rolling-thermal cycling*. Pada spesimen *stainless steel 316L* yang telah mengalami *cold rolling* reduksi 80%, dan 90% masing-masing memiliki rata-rata ukuran butir sebesar 9.1 µm dan 8.38 µm. Jika dibandingkan rata-rata ukuran butir pada spesimen *stainless steel* hasil reduksi *cold rolling* cenderung menurun dari hasil *investment casting*, hal ini dikarenakan adanya deformasi plastis melalui *strain hardening* sehingga terjadi perubahan ukuran butir meskipun tidak terpaut jauh.

Sedangkan untuk spesimen *stainless steel 316L* hasil *cold rolling* reduksi 80% *thermal cycling 900°C* memiliki ukuran butir

minimum sebesar 1.68 μm , maksimum sebesar 5.07 μm serta rata-rata sebesar 3.26 μm . *Cold rolling* reduksi 90% *thermal cycling* 900°C dengan ukuran butir minimum sebesar 1.09 μm , maksimum sebesar 5.67 μm serta rata-rata sebesar 2.87 μm . Pada saat *cold rolling* reduksi 80% dan 90%, temperatur 900°C sudah mampu mentransformasi seluruh butiran menjadi butiran baru yang lebih halus dengan mekanisme rekristalisasi. Jika dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dari (Fausia, 2018) dimana pada *cold rolling* reduksi 50% diperlukan temperatur *thermal cycling* sebesar 950°C untuk memperoleh *fully recrystallized grain*, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa makin tinggi *cold rolling reduction*, maka *stored strain energy* makin tinggi dan menghasilkan *dislocation density* yang makin besar. Hal ini menjadikan spesimen tersebut dapat ditransformasi pada temperatur *thermal cycling* yang lebih rendah.

4.3 Pengujian *Microhardness*

Pengujian *microhardness* dilakukan dengan tujuan mengetahui kekerasan pada spesimen *austenitic stainless steel* AISI 316L setelah mengalami *cold rolling* dan diberi perlakuan *thermal cycling* 900°C. Pengujian ini menggunakan *micro vickers hardness* dengan pembebanan 0.3 HV (9.807 N) dalam kurun waktu sepuluh detik. Berikut gambar 4.10 merupakan posisi indentasi pengujian *microhardness* pada masing-masing spesimen uji:



Gambar 4.10 Posisi Indentasi Pengujian Kekerasan pada Sisi Samping Spesimen *Stainless Steel Thermal Cycling* 900°C.

4.3.1 Hasil Pengujian *Microhardness Stainless Steel 316L Thermal Cycling 900°C*

Pengujian *microhardness* dilakukan pada spesimen hasil *cold rolling* reduksi bertahap 52%, 60%, 69%, 80%, 90% yang telah diberikan perlakuan *cold rolling-thermal cycling 900°C*. Berikut hasil pengujian kekerasan pada masing–masing spesimen uji pada tabel 4.3

Tabel 4.3 Hasil Pengujian *Microhardness Stainless Steel 316L Cold Rolling-Thermal Cycling 900°C*

Indentasi Ke-n	Kekerasan (HV)				
	CR 52 TC	CR 60 TC	CR 69 TC	CR 80 TC	CR 90 TC
1	244	253	257	238	239
2	218	228	235	268	237
3	182	270	259	262	265
4	230	224	234	242	275
5	183	275	248	266	268
6	248	275	251	274	352
7	244	214	240	245	261
8	230	219	227	240	250
9	210	228	263	297	276
10	213	209	250	242	246
Rata–Rata	220.2 ± 22.59	239.5 ± 24.78	246.4 ± 11.33	257.4 ± 18.33	266.9 ± 31.35

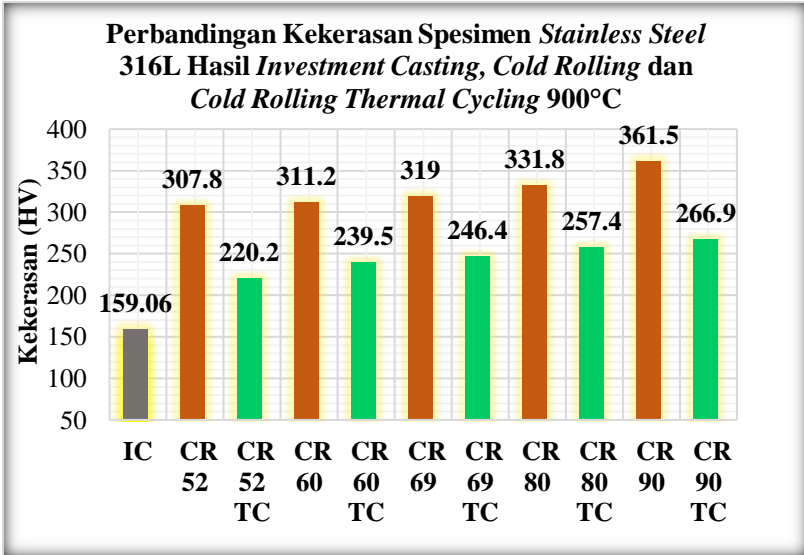
Berdasarkan hasil pengujian yang diperoleh pada tabel 4.3 diperoleh nilai kekerasan pada masing-masing spesimen *stainless steel* 316L hasil *cold rolling-thermal cycling* 900°C, terlihat bahwa pada spesimen *cold rolling* reduksi 90% *thermal cycling* 900°C memiliki nilai rata-rata kekerasan paling tinggi sebesar 266.9 HV. Sedangkan nilai kekerasan paling rendah terdapat pada spesimen *cold rolling* reduksi 52% *thermal cycling* 900°C dengan rata-rata kekerasan sebesar 220.2 HV.

Spesimen hasil *investment casting* memiliki rata-rata kekerasan sebesar 159.06 HV. Nilai kekerasan *stainless steel* 316L hasil *cold rolling-thermal cycling* 900°C lebih besar dari spesimen hasil *investment casting* dikarenakan dengan adanya *cold rolling*, sebagian energi yang diberikan untuk mendeformasi material akan dikeluarkan sebagai panas dan sebagian lagi tersimpan dalam struktur kristal yang disebut tegangan sisa. Hal ini menyebabkan kekerasan meningkat dari sebelum diberi perlakuan *cold rolling*. Dengan halusnya ukuran butiran maka kekerasan akan naik, hal ini sudah sesuai teori jika dilihat perbandingan antara *stainless steel* 316L hasil *investment casting* dan *cold rolling-thermal cycling* 900°C. Hasil pada tabel 4.3 untuk pengambilan data sebanyak sepuluh titik untuk masing-masing permukaan spesimen menunjukkan bahwa perbedaan nilai kekerasan tidak terlalu signifikan, sehingga dapat disimpulkan bahwa adanya porositas pada spesimen hasil *investment casting* tidak berpengaruh pada pengujian kekerasan.

4.3.2 Ringkasan Analisis Pengujian *Microhardness*

Pengujian *microhardness* dilakukan dengan tujuan mengetahui kekerasan pada spesimen *austenitic stainless steel* AISI 316L setelah *cold rolling* dan diberi perlakuan *thermal cycling* 900°C. *Cold rolling* spesimen *stainless steel* hasil *investment casting* ini direduksi secara bertahap sebesar 52%, 60%, 69%, 80%, dan 90% kemudian diberikan perlakuan *thermal cycling* 900°C dengan waktu penahanan 35 detik, dan siklus diulang sebanyak 4 kali. Berikut gambar 4.10 merupakan grafik perbandingan rata-rata kekerasan spesimen *stainless steel*

investment casting dengan *cold rolling* dan *cold rolling-thermal cycling*:



Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Rata-Rata Kekerasan pada *Stainless Steel* 316L Hasil *Investment Casting*, *Cold Rolling* dan *Cold Rolling Thermal Cycling* 900°C

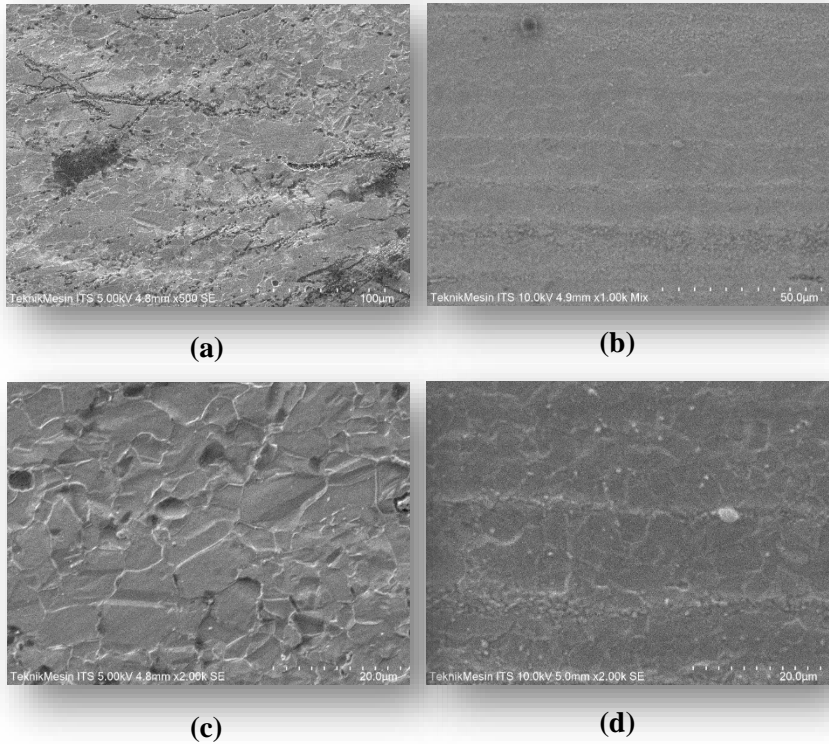
Dilihat pada grafik gambar 4.11 spesimen hasil *investment casting* memiliki rata-rata kekerasan sebesar 159.06 HV dimana kekerasan ini lebih kecil daripada spesimen *stainless steel* 316L hasil *cold rolling* dan *cold rolling-thermal cycling*. Pada spesimen *stainless steel* 316L *cold rolling* reduksi 52%, 60%, 69%, 80%, 90% masing-masing memiliki rata-rata kekerasan sebesar 307.8 HV, 311.2 HV, 319 HV, 331.8 HV dan 361.5 HV. Jika dibandingkan, rata-rata kekerasan pada spesimen *stainless steel* hasil *cold rolling* cenderung lebih tinggi dari hasil *investment casting* dikarenakan adanya *cold rolling* menimbulkan *stored strain energy* sehingga kekerasan akan meningkat dari sebelum dilakukannya *cold rolling*.

Sedangkan untuk spesimen *stainless steel* 316L hasil *cold rolling-thermal cycling* dengan reduksi 52%, 60%, 69%, 80%, dan 90% masing-masing memiliki rata-rata kekerasan sebesar 220.2 HV, 239.5 HV, 246.4 HV, 257.4 HV dan 266.9 HV. Jika dibandingkan dengan rata-rata kekerasan hasil spesimen *investment casting* dengan rata-rata kekerasan sebesar 159.06 HV, spesimen *cold rolling-thermal cycling* memiliki rata-rata kekerasan lebih tinggi dikarenakan perlakuan panas *thermal cycling* pada temperatur tinggi menyebabkan adanya pengintian butiran baru pada batas butir dengan ukuran butiran jauh lebih kecil. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa proses *cold rolling-thermal cycling* dapat menaikkan kekerasan pada spesimen *stainless steel* 316L hasil *investment casting*.

Pengujian kekerasan adalah salah satu sifat mekanik yang bisa digunakan untuk melihat kekuatan material, namun sifat keuletan tidak bisa diperoleh dari pengujian ini, oleh karenanya struktur mikro implan perlu diamati karena ukuran butiran berkaitan erat dengan sifat mekanik kekuatan dan keuletan sesuai dengan formula *hall-petch* pada persamaan (2.1), dimana ketika ukuran butir mengecil maka kekuatan luluh akan meningkat.

4.4 Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM)

Pengambilan gambar struktur mikro juga dilakukan pada *scanning electron microscope* untuk memperjelas batas butir pada setiap spesimen. Berikut hasil perbandingan dari struktur mikro pada spesimen *cold rolling-thermal cycling* reduksi 52% dan 90% pada gambar 4.12.



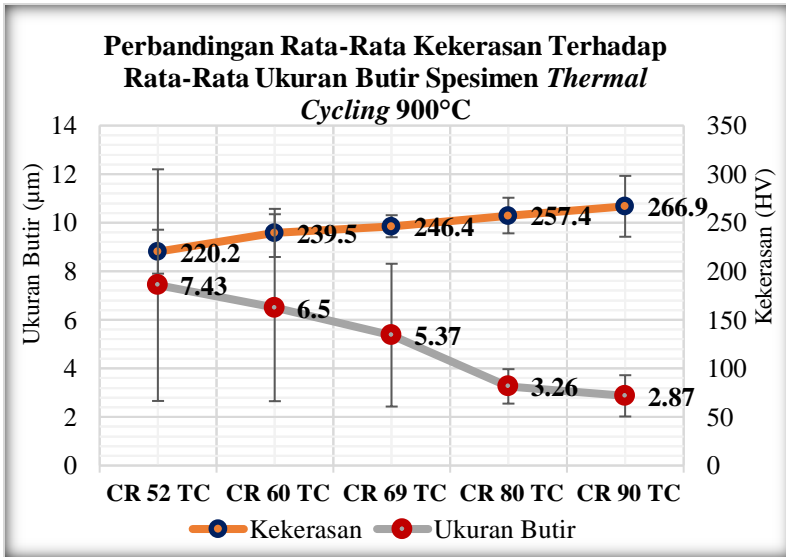
Gambar 4.12 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Spesimen *Stainless Steel 316L Cold Rolling* dengan *Thermal Cycling 900°C* (a) Reduksi 52% perbesaran 500x (b) Reduksi 90% perbesaran 500x (c) Reduksi 52% perbesaran 2000x (d) Reduksi 90% perbesaran 2000x menggunakan *scanning electron microscope*.

Pengamatan menggunakan *scanning electron microscope* seperti pada gambar 4.12 untuk spesimen *stainless steel 316L cold rolling-thermal cycling 900°C* reduksi 52% hasil persentase area sebesar 32%, dan dari pengamatan ukuran butirnya jauh lebih besar dan belum homogen di beberapa area permukaan dibandingkan dengan reduksi 90%. Hal ini menunjukkan bahwa spesimen masih

rekristalisasi sebagian (*partially recrystallization*). Sedangkan untuk spesimen *stainless steel 316L cold rolling-thermal cycling 900°C* reduksi 90% hasil persentase area sebesar 52% dan dari pengamatan terlihat ukuran butir sudah homogen. Hal ini menunjukkan bahwa spesimen telah rekristalisasi merata (*fully recrystallization*).

4.5 Ringkasan Analisis

Pada penelitian ini implan lokal *stainless steel 316L* hasil *investment casting* akan dimodifikasi struktur mikronya dengan memperhalus ukuran butirnya dengan mekanisme rekristalisasi mengacu pada implan *stainless steel 316L* impor dari Eropa. Agar terjadi rekristalisasi maka harus dilakukan proses *cold working* untuk menghasilkan *stored strain energy*. Pada saat *thermal cycling*, *stored strain energy* inilah yang akan memicu munculnya rekristalisasi butiran baru. Dalam penelitian ini menggunakan variasi reduksi bertahap 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 (4 siklus). Munculnya rekristalisasi butiran baru dengan ukuran lebih kecil atau lebih halus akan diamati sebagai fungsi variasi derajat reduksi bertahap ketebalan plat implan. Pada gambar 4.13 ini merupakan hasil rangkuman mengenai grafik perbandingan rata-rata kekerasan terhadap rata-rata ukuran butir pada spesimen *thermal cycling 900°C*:



Gambar 4.13 Grafik Perbandingan Rata-Rata Kekerasan Terhadap Rata-Rata Ukuran Butir Spesimen *Thermal Cycling* 900°C

Dilihat pada grafik gambar 4.13 spesimen *stainless steel* 316L *thermal cycling* 900°C terjadi kenaikan kekerasan disetiap reduksi *cold rolling*, dimana nilai rata-rata kekerasan paling tinggi terdapat pada spesimen *cold rolling-thermal cycling* reduksi 90%, sedangkan nilai rata-rata kekerasan paling rendah terdapat pada spesimen *cold rolling-thermal cycling* reduksi 52%. Selain itu dilihat dari ukuran butir juga didapatkan hasil rata-rata ukuran butir paling kecil pada spesimen *cold rolling-thermal cycling* reduksi 90%, sedangkan nilai rata-rata ukuran butir paling besar terdapat pada spesimen *cold rolling-thermal cycling* reduksi 52%.

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 yang

menyebabkan rekristalisasi mudah terjadi. Hasil yang didapatkan semakin tinggi tingkat deformasi dingin, maka ukuran butiran rekristalisasi akan semakin halus dan kecil. Dengan halusnya ukuran butiran maka kekerasan akan naik, hal ini sesuai dengan hasil dari perlakuan *cold rolling-thermal cycling* 900°C pada penelitian ini dimana kekerasan paling tinggi terjadi pada spesimen *cold rolling-thermal cycling* 900°C reduksi 90% sebesar 266.9 HV, diikuti oleh ukuran butiran yang kecil sebesar 2.87 μm . Dengan adanya peningkatan nilai kekerasan, dapat dikatakan bahwa proses *cold rolling-thermal cycling* dapat meningkatkan nilai kekerasan AISI 316L.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan mengenai efek *thermal cycling* pada AISI 316L dengan variasi reduksi *cold roll* terhadap struktur mikro dan kekerasan yaitu:

1. Pada *stainless steel* AISI 316L hasil *investment casting* yang diikuti proses *thermal cycling* 900°C didapatkan bahwa semakin tinggi derajat reduksi bertahap *cold rolling*, maka butiran rekristalisasi akan semakin halus dan homogen, diikuti dengan kekerasan yang semakin meningkat.
2. Rata-rata ukuran butir pada *stainless steel* AISI 316L hasil *investment casting* yang diikuti proses *thermal cycling* 900°C paling kecil pada reduksi bertahap *cold rolling* 90% yaitu sebesar 2.87 μm dan diikuti dengan kekerasan yang meningkat sebesar 266.9 HV.
3. Rekristalisasi merata (*fully recrystallization*) terjadi pada spesimen *cold rolling-thermal cycling* 900°C dengan reduksi 80% dan 90% dimana ukuran butirannya menjadi halus dan seragam, sedangkan pada spesimen dengan *cold rolling-thermal cycling* 900°C dengan reduksi 52%, 60% dan 69% masih terdapat butiran dengan ukuran besar mendekati ukuran butiran pada saat *cold rolling*. Hal ini menunjukkan bahwa proses rekristalisasi hanya terjadi pada sebagian butiran (*partially recrystallization*).

5.2 Saran

Setelah dilakukan penelitian, didapatkan beberapa saran agar informasi yang diperoleh lebih komperhensif adalah sebagai berikut:

1. Meneliti pengaruh jumlah siklus *thermal cycling* untuk masing-masing reduksi bertahap *cold rolling*.

2. Meneliti pengaruh temperatur *thermal cycling* yang berbeda untuk masing–masing reduksi bertahap *cold rolling*.
3. Diperlukan pengujian tarik pada spesimen yang telah mengalami rekristalisasi untuk mengetahui nilai kekuatan dan keuletan implan lokal agar dapat dipasarkan di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Adri, M. D. (2016). **Studi kekerasan Permukaan Produk Investment Casting Aluminium Minuman kaleng Bekas Dengan Parameter Temperatur Tuang dan Ukuran Butir Lempung**. Riau : Universitas Riau.
- ASM International. (2008). *Stainless Steels for Design Engineers: Austenitic Stainless Steels*. Ohio: ASM International.
- ASTM E112-12. (2012). *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. American Society for Testing Materials.
- ASTM E384-17. (2017). *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. American Society for Testing Materials.
- ASTM F138-13a. (2013). *Standard Specification for Wrought 18Chromium – 14 Nickel – 2.5 Molybdenum Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implants (UNS S31673)*. United States: Association of Standard Testing Materials.
- Avner, S. H. (1974). *Introduction to Physical Metallurgy*. Inggris: Inggris: McGraw-Hill Book Company (UK) Ltd.
- Badan Penelitian dan Pengembangan Kesehatan . (2018). **Riset Kesehatan Dasar**. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Callister, W. D. (2007). *Material Science and Engineering An Introduction*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Dacapo Stainless. (n.d.). **Application of Schaeffler Diagram**.
- Davis, J. R. (1994). *ASM Specialty Handbook; Stainless steels*. Ohio: ASM International.
- Fausia, P. I. (2018). **Pengaruh Thermal Cycling Pada Implan Stainless Steel 316L Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Jones, L. C., Topoleski, L. D., & Tsao, A. (2017). *Biomaterials in Orthopedic Implants*. Mechanical Testing of Orthopedic Implants, 17-32.

- Kalpakjian, S. (1984). *Manufacturing Process for Engineering Materials*. New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Karjalainen, L., Taulavuori, T., Sellman, M., & Kyröläinen, A. (2008). *Some Strengthening Methods for Austenitic Stainless steels*. Steel Research International, Vol.79, No. 6, 404-412.
- Kementrian Kesehatan Republik Indonesia. (2015). **Pusat Data dan Informasi Kesehatan**.
- Kumar, R., Mahato, B., Sharma, S., & Sahu, J. (2009). *Effect of Cyclic Thermal Process on Ultrafine Grain Formation in AISI 304L Austenitic Stainless Steel*. Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 40A, pp 3266-3234.
- Mabruri, E. (2012). **Aplikasi Severe Plastic Deformation (SPD) Dan Heavy Cold Rolling Pada Baja Tahan Karat Austenitik 316L**. Tangerang : Pusat Penelitian Metalurgi – LIPI.
- Misra, R., Zhang, Z., Venkatasurya, P., Somani, M., & Karjalainen, L. (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 , 1-26.
- Mubarok, F., Fausia, P. I., Sutikno, & Mahyudin, F. (2019). *Influence of Thermal Cycling Temperature on the Recrystallization of Cold Rolled Stainless Steel 316L*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan Universitas Airlangga.
- Nanda, T. (2016). *A Thermal cycling Route for Processing stored-grains in AISI 316L Stainless steel for Improved Tensile Deformation Behaviour*. India: Departement of Mechanical Engineering, Thapar University.
- Perdana, P. (2008). **Pengaruh Quenching Terhadap Karakteristik Mekanis dan Ketahanan Korosi Pada Material Super Duplex UNS S32750 Lasan**. Jakarta: Universitas Indonesia.

- Raghavan, V. (2004). *Materials science and engineering*. PHI Learning Private Limited: India.
- Rosdiana, H. (2013). **Mekanisme Penguatan Logam**. Jakarta: Fakultas Teknik Universitas Pancasila.
- Roucoules, C., Pietrzyk, M., & Hodgson, P. (n.d.). *Analysis Of Work Hardening And Recrystallisation During The Hot Working Of Steel Using A Statistically Based Internal Variable Model*.
- Samuel, E., & Choudhary, B. (2010). *Universal scaling of work hardening parameters in type 316L (N) stainless steel*. *Mat. Sci. Eng. A*.
- Samuel, K., & Rodriguez, P. (2005). *On Power-Law Type Relationships And The Ludwigsen Explanation For The Stress-Strain Behaviour Of AISI 316 Stainless Steel*. *J. Mater. Sci*.
- Schino, A. D. (2003). *Recrystallization and Grain Growth in Austenitic Stainless steel*. A Statistical Approach Vol. 37.
- Silva, P. M. (2011). *Cold Deformation Effect on the Microstructures and Mechanical Properties of AISI 301LN and 316L stainless steels*. pp 605-614.
- Subdirektorat Statistik Transportasi. (2017). **Statistik Transportasi Darat**.
- Suherman, K. (2018). **Pembuatan cetakan untuk Wax Pattern pada Investment Casting Sudu Runner Turbin Francis**. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Sutowo, C., Ikhsan, M., & Kartika, I. (2014). **Karakteristik Material Biokompetibel Aplikasi Implan Medis Jenis Bone Plate**. Jakarta: Universitas Muhammadiyah Jakarta.
- Syahid, M., & Sofyan, B. T. (2012). **Studi Awal Proses Investment Casting Sudu Turbin Aluminium Paduan A356**. Yogyakarta: Annual Engineering Seminar.
- ASTUmardhani, Y., & Suprihanto, A. (2013). **Pengembangan Metode Peningkatan Kekerasan Baja Tahan Karat AISI Lewat Proses Nitridasi Gas Temperatur Tinggi**. Semarang: Universitas Diponegoro.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN



 Desa Cinandang, Kec. DawarBlandong, Kab. Mojokerto
 +62812311374
 teguh.prasetyo@pt-pti.com



Measure Date Time	Recalculation Date Time	Method Name
27/6/2019 3:38:36 PM	27/6/2019 3:39:51 PM	Fe-30-F

Sample Name	Sample Id	Furnace	Inspector	Quality
ASTM F 138	27FB004	150	ANG	AISI 316L

Elements Conc.

Meas.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
	%	%	%	%	%	%	%
	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.
1	0.0277	0.372	0.878	0.0237	0.0063	17.09	2.42
2	0.0240	0.369	0.874	0.0213	0.0048	17.14	2.36
W. Min						16.00	2.00
<X>	0.0258	0.371	0.876	0.0225	0.0054	17.11	2.39
W. Max	0.0300	0.750		0.0450	0.0300	18.00	3.00

Meas.	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V
	%	%	%	%	%	%	%
	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.
1	12.34	0.0060	0.0625	0.159	0.0051	0.0020	0.0688
2	12.34	0.0029	0.0614	0.160	0.0055	0.0021	0.0693
W. Min	10.00						
<X>	12.34	0.0045	0.0620	0.158	0.0053	0.0020	0.0691
W. Max	14.00						

Meas.	W	Pb	Sn	As	Ca	Sb	Se
	%	%	%	%	%	%	%
	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.
1	0.0186	0.0486	0.0146	0.0103	0.0018	0.0310	0.0120
2	0.0188	0.0484	0.0131	0.0036	0.0017	0.0298	0.0115
<X>	0.0187	0.0485	0.0139	0.0070	0.0017	0.0304	0.0117

Meas.	Ta	B	N	Fe		
	%	%	%	%		
	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.		
1	<-0.0200	0.0026	0.0564	66.3		
2	<-0.0200	0.0025	0.0679	66.3		
<X>	<-0.0200	0.0026	0.0622	66.3		

Gambar 1 Hasil Spektroskopi Material

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Amanda Rosalina lahir di Mojokerto, 27 Februari 1996, merupakan anak tunggal dari pasangan Mohamad Rokim dan Miskanah. Menempuh pendidikan sekolah dasar di SDN Trawas 1 pada tahun 2002, kemudian melanjutkan pendidikan ke jenjang sekolah menengah pertama di SMPN 1 Trawas pada tahun 2008, selanjutnya menempuh sekolah menengah atas di SMAN 1 Pandaan pada tahun 2011.

Penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2014.

Pada masa perkuliahan, penulis mendapat amanah sebagai staf Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa HMM 2015/2016. Kemudian menjadi sekretaris Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa HMM 2016/2017. Penulis juga aktif dalam pelatihan LKMM dan kepanduan ITS sekaligus anggota Divisi Internal Badan Koordinasi Pemandu BEM FTI-ITS 2015/2016. Selama berkuliah banyak pelajaran hidup yang menyenangkan dan menantang menempa karakter penulis menjadi manusia jauh lebih baik. Dalam kegiatan akademik, penulis bergabung di Laboratorium Metalurgi sebagai asisten praktikum dan grader mata kuliah Metalurgi. Penulis juga terlibat dalam penyusunan paper mengenai Peningkatan Kualitas Mekanik Implan 316 Lokal. Pengalaman kerja yang dimiliki penulis yakni *internship* di PT Pindad Bandung Divisi Alat Berat tahun 2017. Penulis berharap tugas akhir ini dapat menjadi kebermanfaatannya bagi banyak orang. Untuk informasi, saran, dan kepentingan sehubungan dengan penelitian, penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik: amandarosalinaa@gmail.com