

**PENGARUH TEMPERATUR *SOLUTION TREATMENT* DAN
AGING TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR
MIKRO INCONEL 718 HASIL *SPARK PLASMA SINTERING***

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

Rifqi Makarim
3334200054

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON - BANTEN**

2024

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH TEMPERATUR *SOLUTION TREATMENT* DAN
AGING TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR
MIKRO INCONEL 718 HASIL *SPARK PLASMA SINTERING***

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I



Prof. Alfirano, ST, MT, Ph.D
NIP. 197406292003121001

Pembimbing II



Prof. Dr. Efendi, S.T., M.T
NIP. 197001051996031002

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH TEMPERATUR *SOLUTION TREATMENT* DAN
AGING TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR
MIKRO INCONEL 718 HASIL *SPARK PLASMA SINTERING***

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh :

Rifqi Makarim

3334200054

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal
18 September 2024

Susunan Dewan Penguji

Penguji I

: Prof. Alfirano, ST, MT, Ph.D

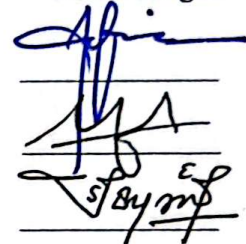
Penguji II

: Prof. Dr. Efendi, S.T., M.T

Penguji III

: Suryana, S.T., M.Si

Tanda Tangan



Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik



Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Metalurgi

Abdul Aziz, ST., MT., Ph. D.

NIP. 198003072005011002

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Pengaruh Temperatur *Solution Treatment* dan *Aging*
Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Inconel 718
Hasil *Spark Plasma Sintering*

Nama Mahasiswa : Rifqi Makarim

NIM : 3334200054

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut adalah benar-benar hasil asli karya saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang saya sadari dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, Juni 2024



Rifqi Makarim

NIM. 3334200054

ABSTRAK

Pada penelitian ini telah dilakukan fabrikasi Inconel 718 menggunakan teknologi *spark plasma sintering* dengan temperatur 950°C dengan *heating rate* 50°C / menit, tekanan sebesar 16 kN, dan *holding time* selama 30 menit. Kemudian dilakukan *solution treatment* pada temperatur 900°C, 1000°C, dan 1100°C dengan *holding time* selama 3 jam lalu dilakukan *aging* pada temperatur 675°C, 725°C, dan 775°C dengan *holding time* selama 8 jam dengan media *quenching* air. Untuk mengetahui struktur mikro dan sifat mekanik dari sampel Inconel 718 dilakukan pengujian yang meliputi analisis struktur mikro pada morfologi permukaan menggunakan *optical microscope*, analisis sifat mekanik berupa pengujian densitas, uji tekan, dan uji kekerasan yang masing-masing menggunakan metode archimedes, alat *universal testing machine*, dan alat *vickers microhardness*. Dari hasil pengamatan metalografi didapatkan untuk sampel *solution treatment* 900°C + *aging* memiliki ukuran dan kandungan fasa δ yang lebih besar dibandingkan dengan sampel *solution treatment* 1000°C + *aging* dan sampel *solution treatment* 1100°C + *aging*. Dari analisis densitas didapatkan nilai densitas relatif tertinggi pada temperatur *solution treatment* 1100°C + *aging* 725°C yaitu 96,4% dan nilai densitas relatif terendah pada temperatur *solution treatment* 900°C + *aging* 775°C yaitu 90,3%. Dari uji tekan didapatkan kekuatan tekan tertinggi paduan Inconel 718 pada sampel dengan *solution treatment* 1000°C + *aging* menunjukkan kekuatan luluh tertinggi yaitu 4734 MPa. Dari uji *vickers* didapatkan nilai kekerasan tertinggi pada sampel yang di-*solution treatment* pada temperatur 1000°C + *aging* 725°C dengan nilai kekerasannya 470,9 HV. Setelah dilakukan *solution treatment* dan *aging*, nilai kekerasan dan sifat tekan meningkat secara signifikan karena pengendapan fasa γ'' dan γ' selama proses *aging*.

Kata Kunci: Inconel 718, *Spark Plasma Sintering*, *Heat Treatment*, Struktur Mikro, Sifat Mekanik.

KATA PENGANTAR

Puji syukur Penulis panjatkan kepada Allah swt. atas berkat dan rahmat-Nya sehingga Penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Temperatur *Solution Treatment* dan *Aging* Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Inconel 718 Hasil *Spark Plasma Sintering*”. Skripsi ini bertujuan untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar sarjana seperti yang telah tercantum dalam kurikulum Program Studi S1 Jurusan Teknik Metalurgi Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah mengarahkan dan membimbing dalam pengerjaan proposal skripsi sehingga dapat terselesaikan dengan baik. Ucapan terima kasih penulis ucapkan kepada :

1. Bapak Abdul Aziz, ST., MT., Ph. D. selaku Ketua Program Studi Teknik Metalurgi Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
2. Ibu Andinnie Juniarsih, S.T., M.T. selaku Koordinator Skripsi Jurusan Teknik Metalurgi.
3. Bapak Prof Dr. Alfirano, S.T., M.T., Ph.D selaku pembimbing pertama Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
4. Bapak Prof. Efendi Maburi selaku pembimbing lapangan di BRIN Serpong.
5. Kedua orang tua, kakak, adik, dan teman-teman yang selalu memberikan semangat dan motivasi dalam penyusunan skripsi.
6. Seluruh pihak yang telah berpartisipasi dalam penyusunan skripsi.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan proposal skripsi ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca demi perbaikan dan kemajuan bersama. Atas perhatiannya, penulis ucapkan terima kasih.

Cilegon, Juni 2024

Rifqi Makarim

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Ruang Lingkup	6
1.5 Sistematika Penulisan	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Inconel 718	9
2.2 <i>Spark Plasma Sintering</i>	11
2.3 Metalurgi Serbuk	13

2.3.1 <i>Mixing</i>	13
2.3.2 Kompaksi.....	14
2.3.3 <i>Sintering</i>	16
2.4 Pengaruh Temperatur <i>Solution Treatment</i> dan <i>Aging</i> Terhadap Sifat Mekanik.....	19
2.5 Pengaruh Temperatur <i>Solution Treatment</i> dan <i>Aging</i> Terhadap Struktur Mikro.....	21
2.6 Mekanisme <i>Heat Treatment</i> Inconel 718	24
2.6.1 <i>Solution Treatment</i>	26
2.6.2 <i>Quenching</i>	26
2.6.3 <i>Aging</i>	27
BAB III METODE PENELITIAN	28
3.1 Diagram Alir Penelitian	28
3.2 Alat dan Bahan	29
3.2.1 Alat-alat yang digunakan.....	29
3.2.2 Bahan-bahan yang digunakan.....	30
3.3 Prosedur Penelitian	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	40
4.1 Hasil Pengamatan Metalografi	40
4.2 Hasil Pengujian Densitas	46
4.3 Hasil Pengujian Tekan.....	49
4.4 Hasil Pengujian Kekerasan.....	54

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran	58
DAFTAR PUSTAKA.....	59
LAMPIRAN	
LAMPIRAN A. Contoh Perhitungan	63
LAMPIRAN B. Data Penelitian.....	65
LAMPIRAN C. Gambar Alat dan Bahan.....	69

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 <i>Limiting Chemical Composition</i> , %.....	9
Tabel 3.1 Sampel yang Digunakan Untuk Pengujian.....	34
Tabel 4.1 Nilai Densitas Aktual Inconel 718.....	46
Tabel 4.2 Nilai Densitas Relatif Inconel 718	48
Tabel 4.3 Hasil Uji Tekan Inconel 718	51
Tabel 4.4 Hasil Uji <i>Vickers</i> Inconel 718	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Inconel 718 a) Gambar SEM b) Distribusi Ukuran Partikel.....	11
Gambar 2.2 Skema Sistem Kontrol Alat SPS.....	12
Gambar 2.3 Jenis-Jenis Kompaksi.....	15
Gambar 2.4 a) Partikel Awal b) Penyusunan Kembali c) Formasi Leher Terbentuk.....	18
Gambar 2.5 a) Pertumbuhan Leher b) Perpanjangan Batas Butir c) Pertumbuhan Butir Berlanjut.....	18
Gambar 2.6 a) Pertumbuhan leher <i>discontinues pore-phase</i> b) Pertumbuhan butir dan pengurangan porositas c) Pertumbuhan butir.....	19
Gambar 2.7 Nilai Kekerasan <i>Vickers</i> Paduan Inconel 718 Hasil SPS.....	19
Gambar 2.8 Kurva <i>Stress-Strain</i> Paduan Inconel 718 Hasil SPS.....	20
Gambar 2.9 SEM Paduan SPS Inconel 718 (a,b) Sebelum dan (c,d) Setelah <i>Heat Treatment</i>	22
Gambar 2.10 SEM Inconel 718 a) 950°C <i>solution treatment + aging</i> , b) 1000°C <i>solution treatment + aging</i> , c) 1080°C <i>solution treatment + aging</i>	23
Gambar 2.11 Skematik Ilustrasi Proses <i>Heat Treatment</i> Inconel 718	25
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	29
Gambar 3.2 <i>Spark Plasma Sintering</i> (SPS) Fuji SPS-625.....	31
Gambar 3.3 <i>Spark Plasma Sintering Monitor Controlling</i>	32
Gambar 3.4 Hasil Proses SPS Sampel Inconel 718.....	33
Gambar 3.5 <i>Wire Cut</i> Hasil Proses SPS.....	33
Gambar 3.6 Proses <i>Grinding</i> dan <i>Polishing</i>	35
Gambar 3.7 Sampel Inconel 718 Setelah <i>Etching</i>	36
Gambar 3.8 Mikroskop Optik.....	36
Gambar 3.9 Uji Densitas.....	37

Gambar 3.10 <i>Micro Vickers Hardness</i> HM-200.....	38
Gambar 3.11 Alat <i>Universal Testing Machine</i>	39
Gambar 4.1 Hasil OEM Inconel 718 <i>Solution Treatment</i> a)900°C+aging 675°C, b)900°C + aging 725°C, c)900°C + aging 775°C.....	41
Gambar 4.2 Hasil OEM Inconel 718 <i>Solution Treatment</i> a)1000°C+aging 675°C, b)1000°C + aging 725°C, c)1000°C + aging 775°C.....	43
Gambar 4.3 Hasil OEM Inconel 718 <i>Solution Treatment</i> a)1100°C+aging 675°C, b)1100°C + aging 725°C, c)1100°C + aging 775°C.....	45
Gambar 4.4 Hasil Uji Densitas Inconel 718.....	47
Gambar 4.5 Nilai Kuat Tekan Inconel 718 dengan Variasi Temperatur <i>Solution Treatment</i> dan <i>Aging</i>	50
Gambar 4.6 a)Nilai <i>Fracture Stress</i> Inconel 718, b)Nilai <i>Yield Stress</i> Inconel 718.....	52
Gambar 4.7 Hasil Uji Kekerasan Vickers Inconel 718 dengan Variasi Temperatur <i>Solution Treatment</i> dan <i>Aging</i>	55

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri manufaktur yang berkaitan dengan material logam khususnya berbasis ferrous mengalami perkembangan yang sangat pesat. Salah satu aplikasinya adalah pada industri dirgantara. Industri dirgantara memiliki peran penting dalam perkembangan zaman saat ini terutama pada transportasi udara modern, dimana pesawat terbang memungkinkan perjalanan jauh dengan cepat, efisien, dan aman sehingga mempermudah konektivitas global, perdagangan internasional, sekaligus mobilitas dan pertukaran budaya. Selain itu, industri dirgantara memiliki peran penting dalam keamanan serta pertahanan dengan kemampuannya untuk memiliki dan mengoperasikan pesawat tempur, *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV), dan teknologi dirgantara lainnya menjadi faktor penting dalam pertahanan keamanan nasional. Salah satu bagian penting dalam pesawat udara adalah turbin. Turbin berperan menghasilkan daya dorong yang dibutuhkan untuk menjaga kestabilan pesawat udara selama melakukan perjalanan. Dalam pengoperasiannya, turbin berada di bawah kondisi operasi yang berat dan membutuhkan paduan berkekuatan tinggi dengan ketahanan terhadap temperatur, tekanan, dan kondisi erosi yang tinggi [1]. Oleh karena itu diperlukan bahan baku yang sesuai agar turbin dapat bekerja dengan optimal. Adapun salah satu bahan baku yang umum digunakan untuk turbin ialah paduan inconel 718.

Inconel 718 merupakan paduan yang dapat diperkeras dengan presipitasi dan mengandung sejumlah besar Fe, Nb, Mo, selain itu terdapat kandungan kecil Al dan Ti. Jenis paduan ini dirancang untuk kekuatan, ketahanan mulur, dan umur lelah yang baik pada temperatur tinggi hingga 700 °C dan memiliki kemampuan las yang baik karena kinetika presipitasi yang relatif lambat. Inconel 718 memiliki nilai kekuatan yang tinggi pada temperatur tinggi sehingga cocok diaplikasikan pada lingkungan dengan kondisi temperatur ekstrem [2]. Selain itu, inconel 718 juga memiliki ketahanan korosi yang baik dan sifat mekanik yang tinggi dengan kemampuan las yang baik sehingga banyak digunakan dalam berbagai macam aplikasi salah satunya turbin pesawat. Berdasarkan jurnal penelitian oleh Marques, dkk (2023), Inconel 718 merupakan salah satu paduan yang paling banyak digunakan di bidang dirgantara dan telah dilaporkan cocok untuk diproses dengan metalurgi serbuk.

Untuk mengolah inconel 718 dapat dilakukan dengan metalurgi serbuk. Dengan menggunakan proses metalurgi serbuk dapat menghasilkan struktur mikro yang homogen pada tingkat mikroskopis dan komposisi kimia dari paduan dapat dikontrol lebih baik. Berdasarkan jurnal penelitian oleh Rusianto (2009), Metalurgi serbuk merupakan proses serbuk logam atau paduan logam diubah dengan ukuran tertentu diubah menjadi produk jadi tanpa menggunakan proses pengecoran. Proses metalurgi serbuk ini memiliki keuntungan dapat mengurangi biaya pengolahan, menggunakan energi yang relatif kecil, dan hasil akhir dapat disesuaikan dengan ukuran yang diinginkan [3]. Permasalahan yang ditemukan ketika menggunakan

hasil proses metalurgi serbuk ini adalah mengolah serbuk logam tersebut menjadi paduan yang memiliki nilai tinggi.

Serbuk logam yang hanya dipadatkan melalui proses *pressing* atau *compacting* umumnya masih memiliki ikatan antar butir yang lemah dan porositas yang tinggi sehingga menyebabkan material memiliki kekuatan mekanik yang rendah. Dalam proses metalurgi serbuk, *sintering* perlu dilakukan untuk meningkatkan kekuatan mekanik dengan memfasilitasi penyatuan butiran serbuk melalui difusi pada temperatur tinggi, sehingga membentuk ikatan yang lebih kuat antar partikel. Berdasarkan jurnal penelitian oleh Gendre M, dkk (2010), Teknologi *spark plasma sintering* (SPS) merupakan teknologi yang hemat energi dan ramah lingkungan untuk preparasi material dan pemrosesannya. Hal tersebut menunjukkan keuntungan yang cukup besar dalam pembuatan nano material, komposit, dan aplikasi lainnya. Dengan menggunakan SPS dapat mewujudkan kepadatan tinggi pada temperatur rendah dan waktu yang singkat dengan laju pendinginan yang dapat dikontrol. Selain metode *sintering*, karakteristik dari serbuk seperti ukuran partikel, kemurnian, dan rasio rongga dapat mempengaruhi sifat sampel yang akan dibuat [3]. Menurut A.H.R. Sirkin (1999) kualitas serbuk awal yang digunakan juga dapat mempengaruhi sifat sampel yang akan dibuat. Serbuk yang dihasilkan melalui *plasma rotation electrode process* (PREP) menjadi prioritas karena dapat menjamin produk serbuk memiliki nilai kemurnian yang tinggi, distribusi ukuran partikel, dan kontaminasi oksida yang lebih sedikit [5].

Setelah dilakukan *spark plasma sintering*, Inconel 718 memiliki sifat mekanik yang kurang optimal terutama pada temperatur tinggi. Dalam kondisi ini,

paduan mungkin tidak cukup kuat untuk menahan beban mekanik yang tinggi atau kondisi operasi yang ekstrem. Semua fasa paduan Inconel 718 dapat dikontrol dengan pemilihan siklus *heat treatment* yang tepat yang dapat dialami paduan dan fraksi volume serta distribusinya menentukan struktur mikro dan meningkatkan sifat mekaniknya. Oleh karena itu, *heat treatment* pada paduan Inconel 718 hasil fabrikasi SPS perlu dioptimalkan dengan tujuan untuk menyesuaikan struktur mikro, meningkatkan sifat mekanik yang diperlukan, dan melarutkan fasa-fasa presipitat yang tidak diinginkan, seperti fasa delta (δ) dan karbida yang mungkin terbentuk selama proses SPS. Fasa delta (δ) bertindak sebagai penghambat pertumbuhan butir selama proses pemanasan pada temperatur tinggi. Fasa delta (δ) yang berada di batas butir membantu mempertahankan ukuran butir yang lebih kecil yang berdampak positif pada kekuatan material. Namun, jika fasa delta (δ) muncul dalam jumlah yang berlebihan, hal tersebut dapat menyebabkan penurunan keuletan (*ductility*) dan ketangguhan material.

Dalam proses *heat treatment* Inconel 718 meliputi *solution treatment* dan *aging*. Kedua proses tersebut dilakukan karena proses tersebut dapat memenuhi kebutuhan penguatan dan kestabilan material paduan berbasis nikel dengan cara yang optimal. *Solution treatment* dilakukan dengan tujuan untuk melarutkan fasa penguat pada batas butir untuk mendapatkan ukuran butir yang diinginkan dan menghilangkan tegangan sisa. Sedangkan, *aging* dilakukan pada temperatur yang lebih rendah untuk memungkinkan terbentuknya presipitat γ' dan γ'' . Presipitat γ' dan γ'' memberikan penguatan signifikan pada Inconel 718 tanpa mengurangi ketangguhannya [6]. Menurut penelitian Kuo (2009) Inconel 718 biasanya

dilakukan *solution treatment* pada temperatur 1010°C - 1095°C diikuti dengan proses *aging* pada temperatur 620°C - 720°C. Dalam penelitian tersebut, material Inconel 718 yang telah dilakukan *solution treatment* dan *aging* terbukti dapat meningkatkan sifat mekanik jika dibandingkan dengan yang tidak diberikan perlakuan panas. Dalam aplikasi industri, proses *solution treatment* dan *aging* yang berbeda memiliki pengaruh yang signifikan terhadap struktur mikro dan sifat mekanik. Sejauh ini, banyak penelitian terdahulu untuk menganalisis variasi endapan dengan proses *heat treatment* yang berbeda pada Inconel 718. Namun, studi sistematis tentang hubungan antara evolusi proses *aging* dengan struktur mikro dan sifat mekanik masih kurang. Untuk mendapatkan proses *heat treatment* yang lebih sesuai untuk inconel 718, metode perlakuan baru diusulkan dalam penelitian ini.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, dengan segala kelebihan dari paduan Inconel 718, terdapat kekurangan yang sangat perlu diperhatikan dalam pengaplikasiannya untuk bahan baku turbin, dimana paduan inconel memiliki tingkat kekerasan yang tinggi tetapi konduktivitas termalnya rendah. Hal tersebut menimbulkan kesulitan saat digunakan untuk proses permesinan dan pembentukan konvensional, khususnya dalam pembuatan komponen yang kompleks. Oleh sebab itu dilakukan penelitian ini untuk mengatasi kekurangan dari paduan inconel 718 dan untuk mengoptimalkan sifat mekanik dan mikrostruktur yang dihasilkan dari paduan inconel 718 dengan memvariasikan temperatur *solution treatment* dan temperatur *aging*. Hasil tersebut memberikan acuan untuk mengoptimalkan proses *heat treatment* pada Inconel 718.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah Penulis susun, rumusan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh variasi temperatur *solution treatment* terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur inconel 718.
2. Bagaimana pengaruh variasi temperatur *aging* terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur inconel 718.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah Penulis susun, tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Untuk mengetahui pengaruh variasi temperatur *solution treatment* terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur inconel 718.
2. Untuk mengetahui pengaruh variasi temperatur *aging* terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur inconel 718.

1.4 Ruang Lingkup

Pada judul penelitian yang Penulis bawakan yang berjudul “Pengaruh Temperatur *Solution Treatment* dan *Aging* Inconel 718 Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro” ruang lingkup penelitiannya antara lain :

- a. Bahan baku: Penelitian ini menggunakan bahan utama berupa serbuk inconel 718 sebanyak 51,866 gram.

b. Variabel: Penelitian ini menggunakan 2 variabel bebas dan 2 variabel terikat antara lain:

Variabel bebas:

1. Temperatur *Solution Treatment*: Variabel bebas pertama adalah temperatur yang digunakan dalam proses *solution treatment*. Penelitian ini akan membandingkan beberapa temperatur *solution treatment* yang berbeda untuk melihat hasilnya akan memengaruhi sifat mekanik dan struktur mikronya.
2. Temperatur *Aging*: Variabel bebas kedua adalah temperatur yang akan diatur dalam proses *aging*. Penelitian ini akan menguji beberapa tingkat temperatur yang berbeda untuk melihat bagaimana perubahan temperatur ini memengaruhi sifat mekanik dan struktur mikronya.

Variabel terikat:

1. Sifat Mekanik: Variabel terikat pertama adalah sifat mekanik dari yang akan diukur melalui beberapa pengujian, yaitu:
 - Uji Tekan: Untuk menilai kekuatan tekan hasil dari proses *solution treatment* dan *aging* inconel 718.
 - Uji Kekerasan: Untuk mengukur kekerasan permukaan hasil dari *solution treatment* dan *aging* inconel 718.
 - Uji Densitas: Untuk mengukur karakteristik fisik dan struktural dari bahan serbuk logam.
2. Struktur Mikro: Variabel terikat kedua adalah struktur hasil *sintering* inconel 718 yang akan dianalisis melalui pengujian metalografi.

c. Lokasi penelitian: Penelitian ini akan dilakukan di BRIN Serpong, Gedung 225, Kawasan Puspiptek Setu Serpong, Muncul, Kec. Setu, Kota Tangerang Selatan, Banten, 15314.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi terdiri dari lima bab. Bab I adalah Pendahuluan yang menjelaskan tentang latar belakang studi *solution treatment* dan *aging* Inconel 718 yang diproses menggunakan *spark plasma sintering*, identifikasi masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup, dan sistematika penulisan. Bab II menjelaskan tinjauan pustaka tentang metalurgi serbuk Inconel 718, pengaruh temperatur *solution treatment* dan *aging* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro, dan mekanisme *heat treatment* Inconel 718. Bab III menjelaskan metodologi penelitian meliputi diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan, dan prosedur yang dilakukan pada penelitian. Pada bab IV menjelaskan hasil dan pembahasan dari penelitian yang telah dilakukan kemudian ditarik kesimpulan dan saran pada bab V. Pada skripsi ini juga terdapat daftar pustaka yang berisi referensi-referensi dan lampiran yang berisi contoh perhitungan, data hasil penelitian, dan alat serta bahan yang digunakan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Inconel 718

Inconel 718 merupakan paduan yang dapat diperkeras dengan presipitasi dan mengandung sejumlah besar Fe, Nb, Mo, selain itu terdapat kandungan kecil Al dan Ti. Jenis paduan ini dirancang untuk kekuatan, ketahanan mulur, dan umur lelah yang baik pada temperatur tinggi hingga 700 °C dan memiliki kemampuan las yang baik karena kinetika presipitasi yang relatif lambat. Inconel 718 memiliki nilai kekuatan yang tinggi pada temperatur tinggi sehingga cocok diaplikasikan pada lingkungan dengan kondisi temperatur ekstrem. Selain itu, inconel 718 juga memiliki tahan korosi yang baik dan sifat mekanik yang tinggi dengan kemampuan las yang baik sehingga banyak digunakan dalam turbin gas, komponen mesin roket berbahan bakar cair, dan tangki kriogenik. Namun, kekerasan yang tinggi dan konduktivitas termal yang rendah dari paduan tersebut menimbulkan kesulitan saat menggunakan proses pemesinan dan pembentukan konvensional, khususnya untuk pembuatan komponen yang kompleks [7]. Batasan komposisi dari paduan ini dapat dilihat pada Tabel 2.1.

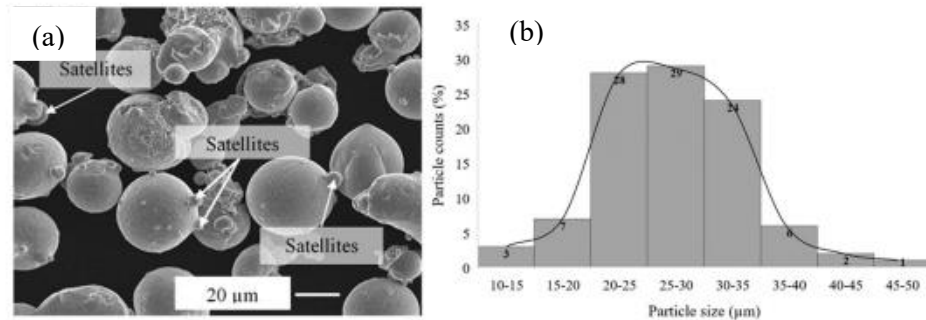
Tabel 2.1 *Limiting Chemical Composition, % [7]*

<i>Chemical Composition</i>	<i>%</i>
Nickel (plus cobalt)	Balance*
Chromium	17.00 – 21.00
Iron	17.00

Tabel 2.1 (Lanjutan)

<i>Chemical Composition</i>	<i>%</i>
Niobium (plus tantalum)	4.75 – 5.50
Molybdenum	2.80 – 3.30
Titanium	0.65 – 1.15
Aluminium	0.20 – 0.80
Cobalt	1.00 max
Carbon	0.08 max
Manganese	0.35 max
Silicon	0.35 max
Phosphorus	0.015 max
Sulfur	0.015 max
Boron	0.006 max
Copper	0.30 max

Inconel 718 merupakan paduan Ni-Fe-Cr dengan 50-55% Ni dan 21% Cr dapat menghindari oksidasi pada temperatur tinggi. Mo dengan 2,8-3,3% bermanfaat untuk menghindari korosi pitting. Unsur lain seperti titanium, cobalt, aluminium, dan besi juga terdapat dalam paduan ini. Selain itu, kelarutan chromium, tungsten, molibdenum, dan cobalt pada matriks austenitik dapat meningkatkan kekuatan mekanik. Morfologi serbuk inconel 718 dianalisis dengan *scanning electron microscope*. Berdasarkan Gambar 2.1 (a) serbuk yang digunakan memiliki ukuran partikel rata-rata adalah 20 μm , namun berdasarkan Gambar 2.1 (b) sebagian besar ukuran partikelnya berkisar antara 20 μm dan 35 μm [8].

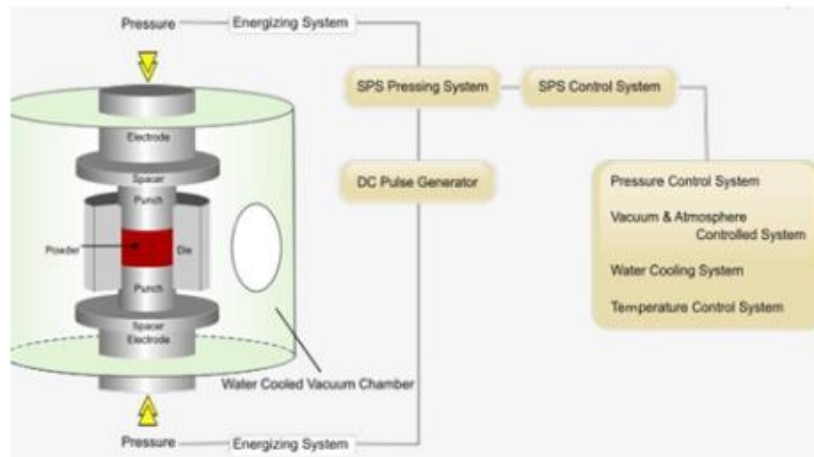


Gambar 2.1 Inconel 718 a) Gambar SEM b) Distribusi Ukuran Partikel [8]

2.2 Spark Plasma Sintering

Sintering merupakan proses pembuatan dan pemadatan material berbentuk padat dalam keadaan panas pada temperatur jauh dibawah *melting point*-nya dengan menggunakan tekanan ataupun tidak. Salah satu metode dalam proses *sintering* adalah SPS (*spark plasma sintering*) yang merupakan sebuah teknologi maju yang dapat digunakan untuk menghasilkan *bulk* (padatan) yang dimana serbuk penyusunnya memiliki densitas yang cukup tinggi. SPS (*spark plasma sintering*) termasuk ke dalam teknik *solid compaction* dan metode *pressured sintering*. *Pressing sintering* merupakan metode *sintering* yang memanfaatkan tekanan dalam prosesnya. SPS (*spark plasma sintering*) memiliki sensor perubahan ketebalan yang dapat dikontrol selama proses berlangsung. Dengan dapat mengontrol laju pemanasan (*heating rate*) maka dapat menghasilkan proses *sintering* dalam waktu yang cukup singkat [8]. Hasil dari proses SPS menghasilkan sampel yang memiliki butir kristal yang cukup halus sehingga banyak diaplikasikan untuk mensintesis beberapa bulk material. Dengan menggunakan *spark plasma sintering*, proses

sintering-nya dapat dikontrol secara signifikan agar mendapatkan sifat mekanik yang sempurna. Skematik dari alat SPS dapat dilihat dari Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Skema Sistem Kontrol Alat SPS [9]

Secara umum proses SPS (*spark plasma sintering*) dilakukan di dalam *chamber*, di dalam *chamber* tersebut terdapat *graphite punch* dan *graphite dies* yang berfungsi untuk cetakan sampel dan sebagai wadah dari sampel serbuk. *Graphite spacer* digunakan untuk alat bantu *pressure* yang terdapat pada atas dan bawah *graphite die*. *Graphite die* diatur pada posisi di tengah antara atas dan bawah dari *graphite spacer* yang terdapat sebuah elektroda. Elektroda memiliki fungsi untuk memberikan tekanan pada *graphite die* dengan bantuan tegangan DC dari sistem kontrol SPS. Selain itu, sistem kontrol SPS berfungsi untuk mengatur udara vakum di dalam *chamber*, waktu pemanasan, pendinginan alat, temperatur, dan perubahan ketebalan yang dapat dilihat pada monitor komputer yang sudah terhubung dengan alat SPS tersebut [9].

2.3 Metalurgi Serbuk

Metalurgi serbuk merupakan teknik pembuatan logam yang dibuat menggunakan partikel yang halus dalam keadaan padat. Proses pembentukan ini meliputi bahan berupa serbuk yang dimasukkan ke dalam cetakan lalu dilakukan proses kompaksi. Setelah proses kompaksi, serbuk akan membentuk *green body* sesuai dengan bentuk cetakan. *Green body* tersebut dilakukan proses *sintering* agar pergerakan atom dalam bahan partikel dapat terjadi dan menghasilkan rongga di dalam bahan yang dapat mempengaruhi berat jenisnya [10]. Keuntungan menggunakan metalurgi serbuk adalah dapat memberikan kontrol komposisi yang lebih teliti, paduan dapat dibentuk dari bahan dengan perbedaan kepadatan dan temperatur leleh yang tinggi, dan penggunaan *mixing* yang tidak dapat difabrikasi menggunakan metode lain. Secara umum semua logam dapat dibentuk menjadi serbuk, namun hanya terdapat beberapa jenis logam yang digunakan dalam pembuatan serbuk logam. Dalam pembentukan serbuk menggunakan metode yang bergantung pada sifat-sifat khusus yang dimiliki dari material logam tersebut. Setiap jenis logam memiliki ciri-ciri kimia dan fisis tertentu sehingga diperlukan metode pembuatan yang berbeda [11].

2.3.1 Mixing

Mixing (pencampuran serbuk) dilakukan dengan cara mencampurkan jenis logam yang berbeda dengan material lain dengan tujuan agar dapat memberikan sifat mekanik dan fisik yang lebih baik. *Lubricant* (pelumas) memungkinkan ditambahkan agar dapat meningkatkan sifat *powders flow*. Selain itu, *binders* juga dapat ditambahkan agar dapat meningkatkan *green*

strength [12]. Proses *mixing* dapat dilakukan dengan dua metode, yaitu *dry mixing* dan *wet mixing*.

a. *Dry mixing*

Pencampuran kering (*dry mixing*) merupakan metode pencampuran yang dilakukan di udara luar dan tidak memerlukan pelarut untuk melarutkan. Metode ini digunakan apabila menggunakan material yang tidak mudah teroksidasi.

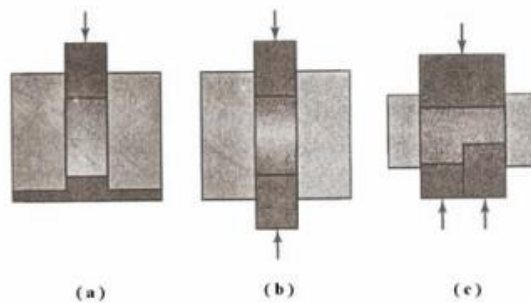
b. *Wet mixing*

Pencampuran basah (*wet mixing*) merupakan metode pencampuran dimana *filler* dan serbuk matrik dicampur terlebih dahulu dengan menggunakan pelarut polar. Pelarut polar diberikan dengan tujuan agar mempermudah proses *mixing* dan untuk melapisi permukaan suatu material agar tidak terjadi kontak langsung dengan udara luar sehingga material dapat tercegah dari terjadinya oksidasi. Metode ini digunakan apabila menggunakan material yang mudah teroksidasi.

2.3.2 Kompaksi

Kompaksi merupakan sebuah proses pembentukan logam dari serbuk dengan mekanisme penekanan setelah serbuk logam dimasukkan ke dalam suatu cetakan (*dies*). Apabila semakin besar tekanan kompaksi maka porositas di antara partikel akan semakin sedikit tetapi nilai porositas tidak mungkin mencapai nol. Secara umum proses kompaksi dapat dilakukan dengan penekanan satu arah dan dua arah. Pada penekanan satu arah penekan atas akan bergerak ke bawah. Sedangkan dengan penekanan dua arah, penekan atas dan

bawah saling menekan dengan arah yang berlawanan secara bersamaan. Macam produk yang dihasilkan dari proses metalurgi serbuk sangat bergantung pada proses kompaksi dalam membentuk serbuk menggunakan kekuatan yang baik [13]. Permukaan dalam cetakan (*dies*) harus halus dengan tujuan agar dapat mengurangi gesekan. Pada Gambar 2.3 ini merupakan beberapa jenis kompaksi yaitu *single punches*, *double punches*, dan *multiple punches*.



Gambar 2.3 Jenis-jenis Kompaksi [13]

Secara umum proses kompaksi terdapat dua macam metode, yaitu *cold compaction* dan *hot compaction*. *Cold compaction* dilakukan apabila menggunakan material yang mudah teroksidasi dan menggunakan temperatur kamar. Sedangkan, *hot compaction* dilakukan apabila menggunakan material yang tidak mudah teroksidasi dan menggunakan di atas temperatur kamar. Kedua macam metode tersebut memiliki cara kerja yang hampir sama, perbedaannya pada *hot compaction* terjadi perlakuan panas yang dilakukan bersamaan dengan proses penekanan *punch*. Proses kompaksi pada serbuk dilakukan dengan tujuan agar serbuk dapat menempel satu sama lain sebelum dilanjutkan ke dalam proses *sintering*. Produk yang dikeluarkan dari proses

kompaksi biasa disebut dengan bahan kompak mentah, bentuk benda tersebut menyerupai produk akhir tetapi nilai kekuataannya masih cukup rendah. Kekuatan akhir bahan akan didapatkan setelah dilakukan proses *sintering*.

2.3.3 *Sintering*

Sintering merupakan proses pemadatan sebuah material serbuk dengan membentuk ikatan batas butir di antara serbuk penyusunnya. Ikatan antar butir dapat terjadi karena pemanasan dengan atau tanpa menggunakan penekanan dan mengatur temperatur *sintering* dibawah temperatur leleh dari partikel penyusunnya. Proses pemanasan ini menyebabkan partikel bersatu dan efektivitas reaksi tegangan permukaan meningkat sehingga kepadatan bertambah. Proses *sintering* merupakan tahapan lanjutan dari pembuatan *green body* pada proses kompaksi dan dapat terjadi dibawah temperatur leleh [14]. Dalam melakukan proses *sintering* terdapat beberapa parameter yang perlu diperhatikan sebagai berikut.

a. Ukuran partikel serbuk

Apabila semakin halus serbuk yang digunakan maka akan semakin cepat laju *sintering* dan level impuritas juga semakin baik.

b. Temperatur *sintering*

Apabila menggunakan temperatur *sintering* yang tinggi maka akan menyebabkan pertumbuhan butir, *shrinkage* yang lebih tinggi, dan biaya yang cukup mahal. Untuk proses *sintering* tidak ada kondisi temperatur yang tepat untuk suatu bahan, namun untuk *sinter* padat dilakukan di bawah temperatur lebur dari bahan tersebut.

c. Waktu *sintering*

Dalam proses *sintering* apabila semakin lama waktu yang digunakan maka diameter serbuk akan semakin besar. Waktu proses *sintering* juga dapat menentukan densifikasi namun temperatur *sintering* lebih mempengaruhi.

d. Tekanan kompaksi

Apabila semakin tinggi tekanan kompaksi yang digunakan maka dislokasi akan semakin banyak sehingga menyebabkan proses *sintering* semakin cepat. Selain itu, produk awal kompaksi apabila ditekan menggunakan tekanan rendah maka akan menyebabkan *shrinkage* yang lebih besar dibandingkan menggunakan tekanan tinggi karena tekanan kompaksi dapat menaikkan densitas produk awal dan mengurangi porositas

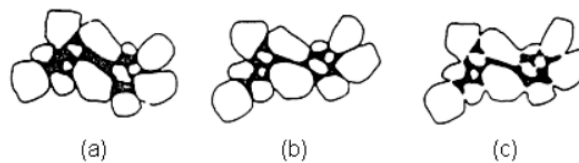
e. *Green density*

Densitas yang meningkat akan menyebabkan porositas yang lebih kecil, terjadi penyusutan yang kecil, dan dimensi yang seragam.

Selama proses *sintering* terjadi terdapat proses perpindahan materi atau proses difusi. Proses difusi ini merupakan pergerakan dari atom-atom sepanjang bahan dan permukaan sehingga setelah proses *sintering* terjadi penyusutan, pengurangan pori-pori, dan pembentukan fasa baru. Dalam proses *sintering* terdapat beberapa tahapan yang terjadi, secara umum tahapan tersebut mengacu pada perubahan fisik selama proses pembentukan ikatan antar partikel berlangsung [14]. Berikut ini merupakan tahapan-tahapan *sinter* yang terjadi.

a. *Initial Stage*

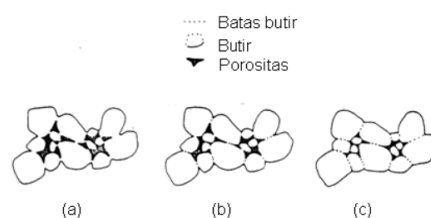
Pada tahapan ini ditandai dengan adanya penyusunan formasi leher kembali yang meliputi penyusunan partikel dan formasi leher awal antar partikel yang dapat dilihat dari Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 a) Partikel awal b) Penyusunan kembali c) Formasi leher terbentuk [14]

b. *Intermediate Stage*

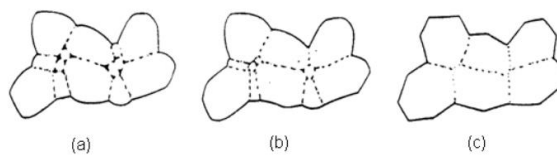
Pada tahapan ini pertumbuhan leher terus berlanjut yang berbarengan dengan pertumbuhan pori dan pertumbuhan butir. Perubahan fisik yang terjadi pada tahapan ini dapat dilihat pada Gambar 2.5 dengan adanya pusat partikel yang bergerak semakin dekat secara bersamaan, batas butir mulai berpindah dan menyebabkan butir tumbuh, porositas menurun, pembentukan saluran yang berhubungan dan berakhir saat porositas terisolasi. Pada tahapan ini terjadi penyusutan secara maksimal.



Gambar 2.5 a) Pertumbuhan leher b) Perpanjangan batas butir c) Pertumbuhan butir berlanjut [14]

c. *Final Stage*

Tahapan ini ditandai dengan munculnya batas butir dan hilangnya struktur pori. Selama tahapan terakhir ini terjadi perubahan fisik meliputi terjadinya pertumbuhan butir terjadi dan porositas mengalami pergerakan terakhir yang dapat dilihat berdasarkan Gambar 2.6 berikut.

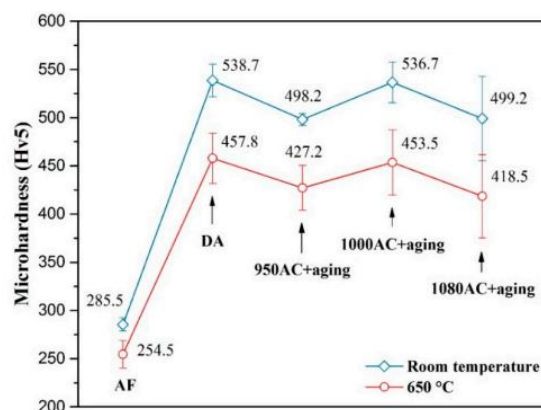


Gambar 2.6 a) Pertumbuhan leher dengan *discontinues pore-phase* b)

Pertumbuhan butir dan pengurangan porositas c) Pertumbuhan butir [14]

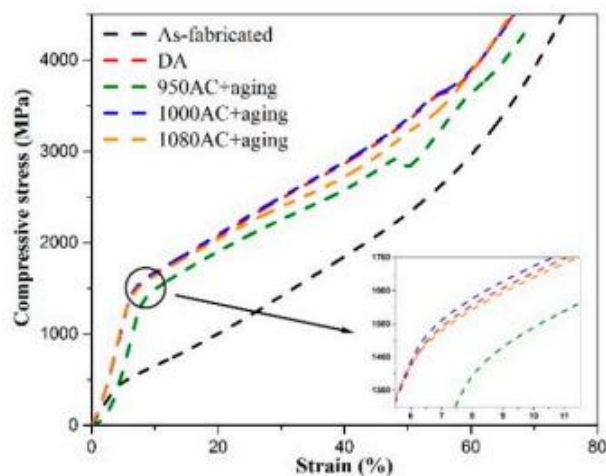
2.4 Pengaruh Temperatur *Solution Treatment* dan *Aging* Terhadap Sifat Mekanik

Dalam penelitian Yan, 2019 dilakukan serangkaian proses *heat treatment* yang dilakukan pada paduan Inconel 718 yang difabrikasi menggunakan *spark plasma sintering* (SPS). Untuk mengetahui pengaruh temperatur *solution treatment* dan *aging* terhadap sifat mekanik maka dilakukan uji kekerasan *vickers* dan uji tekan.



Gambar 2.7 Nilai Kekerasan *Vickers* Paduan Inconel 718 Hasil SPS [15]

Untuk mengevaluasi ketahanan temperatur tinggi dari paduan Inconel 718 hasil SPS, uji kekerasan *vickers* dilakukan pada temperatur kamar dan *aging* pada temperatur 650°C. Gambar 2.7 menunjukkan nilai rata-rata kekerasan dan kesalahan diperoleh dengan minimal 10 lekukan pada setiap sampel. Dibandingkan dengan sampel *solution treatment* 950°C + *aging*, kekerasan sampel *soluton treatment* 1000°C + *aging* meningkat karena adanya kandungan endapan γ''/γ' yang lebih besar. Kekerasan sampel *solution treatment* 1080°C + *aging* menunjukkan penurunan yang nyata terutama disebabkan oleh pengerasan butiran selama perlakuan larutan. Tren kekerasan pada *aging* 650°C konsisten dengan yang ada pada *room temperature*. Seperti yang disajikan pada Gambar 2.7, kekerasan mikro menurun untuk semua sampel saat diuji pada *aging* 650°C . Pengurangan kekerasan tersebut disebabkan oleh efek pelunakan termal yang biasa diamati pada paduan. Namun, pengurangan kekerasan berada dalam nilai yang terbatas menunjukkan bahwa paduan Inconel 718 hasil SPS dapat mempertahankan sifat mekanik yang baik pada suhu 650°C.



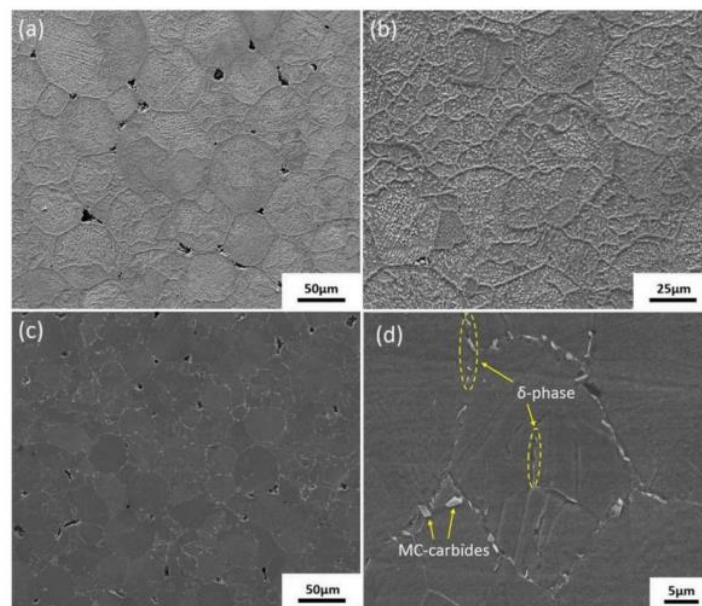
Gambar 2.8 Kurva *Stress-Strain* Paduan Inconel 718 Hasil SPS [15]

Berdasarkan Gambar 2.8 kekuatan luluh sampel yang tidak dilakukan *heat treatment* jauh lebih rendah dibandingkan sampel yang diberi *heat treatment*. Perlu dicatat bahwa tidak ada kerusakan patah yang terlihat setelah uji tekan paduan SPS Inconel 718. Sampel dengan temperatur *solution treatment* 1000°C + *aging* menunjukkan kekuatan luluh tertinggi yaitu sebesar 1463 MPa. Namun, pada sampel dengan temperatur *solution treatment* 950°C + *aging* menunjukkan sifat tekan minimum pada sampel yang dilakukan *heat treatment*. Dibandingkan dengan sampel *solution treatment* 950°C + *aging*, nilai tekan luluh pada sampel *solution treatment* 1000 + *aging* meningkat sebesar 9%. Nilai kekuatan tekan sampel pada sampel *solution treatment* 1080°C + *aging* lebih rendah dibandingkan dengan sampel *solution treatment* 1000°C yang dapat dianggap berasal dari ukuran butir sampel penuaan 1080°C + *aging* yang lebih besar [15].

2.5 Pengaruh Temperatur *Solution Treatment* dan *Aging* Terhadap Struktur Mikro

Inconel 718 merupakan superalloy berbasis Ni-Fe yang banyak diaplikasikan pada lingkungan yang memiliki temperatur tinggi, salah satu contohnya yaitu pada mesin turbin. Baik larutan padat ataupun penguatan presipitasi merupakan langkah yang dapat dilakukan untuk memperkuat mekanisme. Serbuk inconel 718 dengan ukuran partikel rata-rata sebesar 30 μm digunakan sebagai *raw material*. Kemudian dilakukan proses *sintering* menggunakan metode *spark plasma sintering* (SPS) dengan temperatur 1200°C, *heating rate* sebesar 100°C / menit dan di-*holding* selama 10 menit. Pada waktu yang bersamaan, diterapkan gaya uniaksial hingga 16

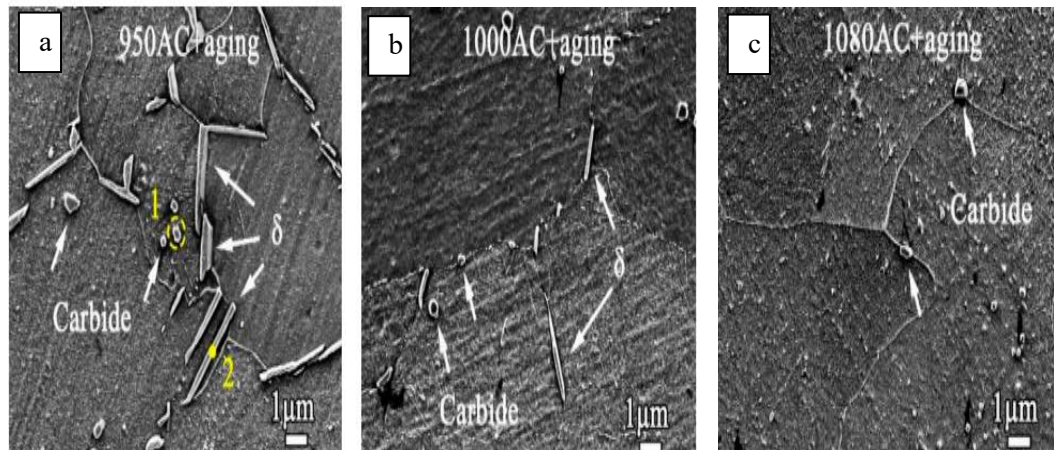
kN pada *graphite die* pada awal *sintering* dan menurun secara bertahap pada proses pendinginan. Setelah sampel dilakukan proses *sintering*, sampel dilakukan *solution treatment* pada temperatur 950°C dengan *holding time* selama 1 jam dilanjutkan dengan proses *double aging* pada temperatur 720°C dan 620°C masing-masing *holding time* selama 8 jam.



Gambar 2.9 SEM Paduan SPS Inconel 718 (a,b) Sebelum dan (c,d) Setelah *Heat Treatment* [16]

Mikrograf SEM dari paduan SPS Inconel 718 Gambar 2.9 (a dan b) menunjukkan gambar struktur mikro padat dan butiran halus. Dapat dilihat bentuk beberapa partikel serbuk lebih kecil berubah pada *neck* untuk mendapatkan densitas yang tinggi. Karena tingginya tekanan pada titik kontak dan intensifikasi arus listrik secara lokal kepadatan pada *neck*, permukaan partikel menjadi rata dan pemadatan selesai dalam beberapa menit. Gambar 2.9 (c dan d) menunjukkan struktur mikro

dari paduan Inconel 718 yang dilakukan *solution treatment* dan *aging*. Setelah *double aging*, fasa δ acicular dan MC-karbida kotak diendapkan di sekitar batas butir yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 (d). Sebagai perbandingan, struktur mikro sampel setelah *solution treatment* dan *aging* menunjukkan pori-pori lebih sedikit dan lebih kecil dibandingkan yang tidak dilakukan *heat treatment*. Dapat juga dilihat bahwa butirannya lebih halus terbentuk setelah dilakukan *heat treatment*. Ukuran butir rata-rata sampel sebelum dan sesudah perlakuan panas diukur menjadi 12 μm dan 9 μm , masing-masing dengan sebaran ukuran butir berkisar antara 9,2- masing-masing 20,2 μm dan 6–13,7 μm . Baik γ' maupun γ'' memiliki endapan tidak diamati pada gambar SEM yang dapat dianggap berasal dari ukuran partikel skala kecilnya [16].



Gambar 2.10 SEM Paduan Inconel 718 a) 950°C *solution treatment* + *aging*, b) 1000°C *solution treatment* + *aging*, c) 1080°C *solution treatment* + *aging* [15]

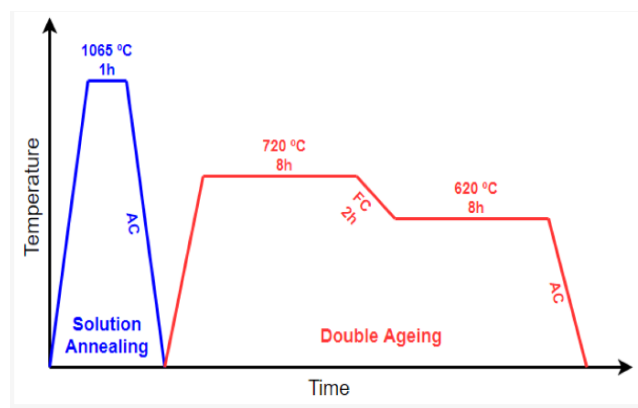
Gambar 2.10 merupakan hasil penelitian Yan (2019) menyajikan gambar SEM dengan perbesaran tinggi dari Paduan SPS Inconel 718. Pada Gambar 2.10 a)

sampel 950°C *solution treatment + aging* terdapat beberapa fasa kecil diendapkan di sepanjang batas butir. Untuk sampel 950°C *solution treatment + aging* terdapat kandungan fasa δ besar dan ukurannya lebih besar jika dibandingkan sampel 1000°C *solution treatment + aging*. Hal tersebut dikarenakan laju presipitasi pada fasa δ paling tinggi yaitu sekitar 900°C. Pada Gambar 2.10 b) sampel 1000°C *solution treatment + aging*, jumlah dan panjang fasa δ berkurang. Fasa γ'' pada sampel 1000°C *solution treatment + aging* jelas lebih padat jika dibandingkan dengan fasa pada sampel penuaan 950°C *solution treatment + aging* yang secara langsung dapat meningkatkan kekerasan sampel dan kekuatan tekan. Pada Gambar 2.10 c) sampel 1080°C *solution treatment + aging* tidak terdapat fasa δ berbentuk jarum yang dapat ditemukan karena 1080°C melebihi solvus fasa δ (yaitu sekitar 1050°C). Akibatnya, pertumbuhan butir tidak dapat dibatasi oleh fasa batas butir δ . [15].

2.6 Mekanisme *Heat Treatment* Inconel 718

Perlakuan panas (*heat treatment*) merupakan proses kombinasi antara proses pemanasan atau pendinginan dari suatu logam atau paduannya dalam keadaan padat untuk mendaratkan sifat-sifat tertentu. Untuk mendapatkan hal tersebut maka kecepatan pendinginan dan batas temperatur sangat mempengaruhi [17]. Secara umum, perlakuan panas (*heat treatment*) dilakukan agar dapat memodifikasi struktur mikro material sehingga dapat meningkatkan sifat mekanik yang salah satunya adalah kekerasan. Pada proses akhir *heat treatment*, struktur mikro yang didapatkan akan mempengaruhi sifat yang didapatkan. Sedangkan, terbentuknya

struktur mikro ini selain dipengaruhi oleh komposisi kimia dari material juga dipengaruhi oleh kondisi awal material tersebut dan proses *heat treatment* yang diterima. Hal tersebut dapat tercapai apabila memperhatikan parameter yang mempengaruhinya [18]. Parameter yang dapat mempengaruhinya dapat berupa temperatur pemanasan, lama waktu pemanasan, dan media pendingin yang digunakan.



Gambar 2.11 Skematik Ilustrasi Proses *Heat Treatment* Inconel 718 [19]

Heat treatment biasanya dilakukan dengan tungku argon atau vakum dengan skematik seperti pada Gambar 2.11 dimana titik embun rendah dan seringkali dengan zona panas yang seluruhnya terbuat dari logam untuk menghindari perubahan warna. *Solution annealing* pada temperatur 925°C - 1100°C dengan *aging treatment* yang sesuai dianggap sebagai perlakuan panas yang optimal untuk inconel 718 dimana kombinasi umur pecah, umur pecah takik, dan keuletan pecah menjadi perhatian terbesar [19]. Kekuatan tarik dan luluh suhu ruangan tertinggi juga dikaitkan dengan perlakuan ini. Selain itu, karena butiran halus yang dikembangkan menghasilkan kekuatan leleh yang paling tinggi.

2.6.1 *Solution Treatment*

Solution treatment merupakan proses pemanasan yang dilakukan dengan tujuan agar dapat melarutkan satu atau lebih unsur paduan dalam matriks dan membentuk satu fasa tanpa terjadinya peleburan. Proses tersebut mengakibatkan pemisahan endapan paduan yang ada sebelumnya sehingga larut dan menyebabkan paduan yang homogen. Dengan menggunakan *solution treatment*, paduan logam dipanaskan dengan temperatur yang cukup tinggi dibawah temperatur leburnya sesuai jenis material dan paduannya lalu dilakukan pencelupan cepat [20]. Setelah dilakukan pencelupan, material akan mengalami *aging* alami apabila didiamkan pada temperatur ruang dan *aging* buatan apabila dipicu dengan proses *heat treatment* tambahan. Dalam proses ini fasa kedua berpresipitasi.

2.6.2 *Quenching*

Quenching dilakukan dengan tujuan agar mencegah terjadinya pemisahan fasa kedua yang terjadi yang disebabkan dari proses *solution treatment*. *Quenching* memiliki prinsip kerja dengan cara mendinginkan logam yang telah dipanaskan dalam *furnace* ke dalam media pendingin. Proses pendinginan dilakukan secara cepat dari temperatur yang panas ke temperatur yang lebih rendah, secara umum mendekati temperatur ruang. Hal tersebut dilakukan dengan tujuan agar dapat mempertahankan atom yang larut dalam *solid solution* dan mempertahankan kekosongan atom sebagai tempat difusi atom-atom membentuk klaster atom saat *aging*. Apabila proses *quenching* tidak dilakukan secara cepat maka akan menyebabkan terbentuknya fasa lain

intermetalik dan *vacancies* akan terisi dengan atom yang lain dan proses difusi akan menjadi sulit [21].

2.6.3 Aging

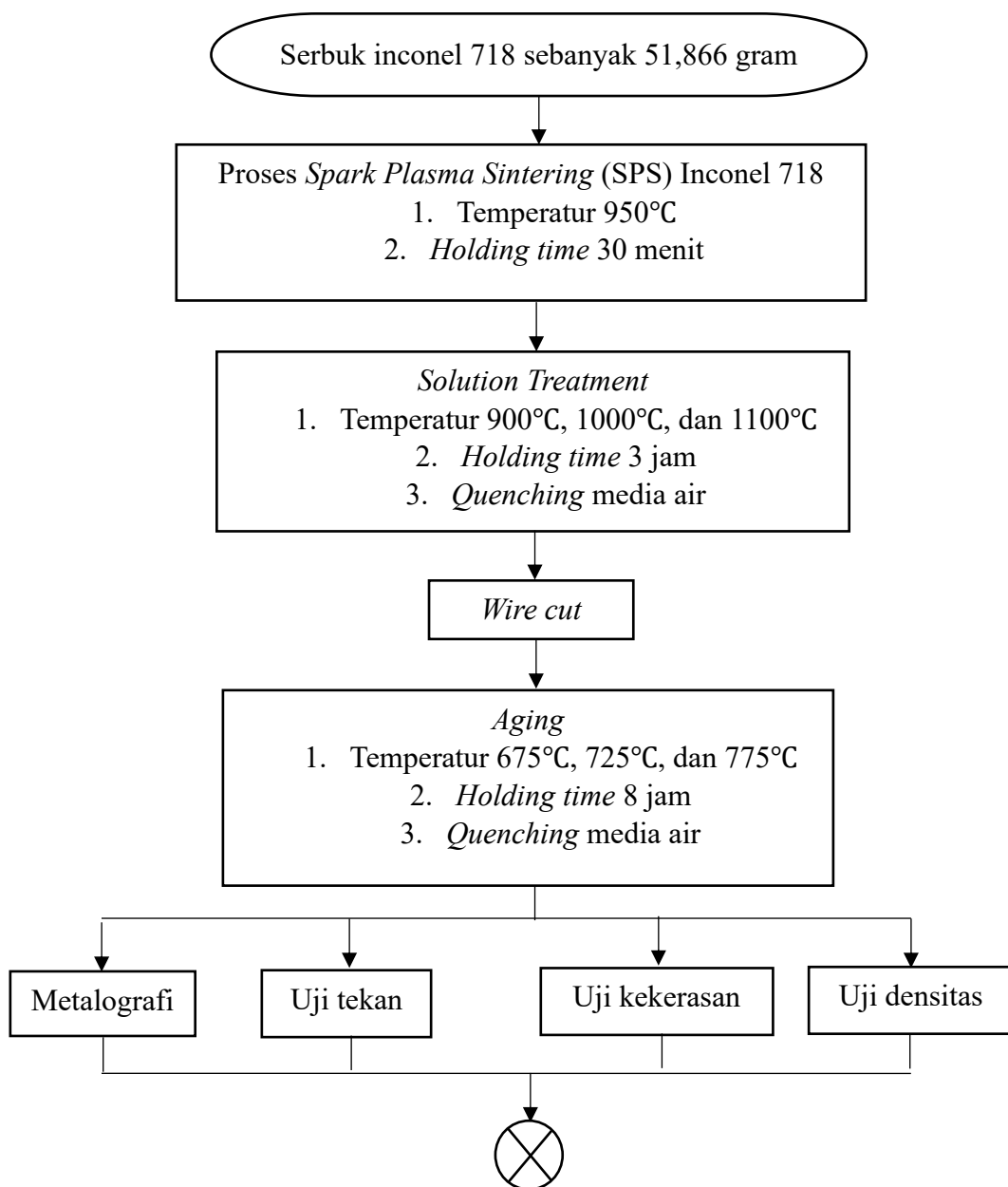
Setelah dilakukan *solution treatment* dan *quenching* maka dilanjutkan dengan proses *aging*. *Aging* (penuaan) merupakan proses penuaan dengan cara memanaskan kembali hingga temperatur tertentu kemudian ditahan selama beberapa saat dan dilanjutkan pendinginan secara lambat dengan temperatur ruang. Secara umum, *aging* dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu penuaan alami (*natural aging*) dan penuaan buatan (*artificial aging*). *Natural aging* merupakan sebuah proses penuaan alami menggunakan temperatur ruang dan waktu penuaan dilakukan minimal 48 hari. Sedangkan, *artificial aging* merupakan metode yang dilakukan untuk mempercepat laju pertumbuhan presipitat dan mengakibatkan sifat mekanik aluminium dapat disesuaikan karena adanya pertumbuhan presipitat selama proses *aging*. Sifat mekanik suatu material yang dilakukan proses *artificial aging* sangat bergantung kepada kombinasi temperatur dan lama proses *heat treatment* [22].

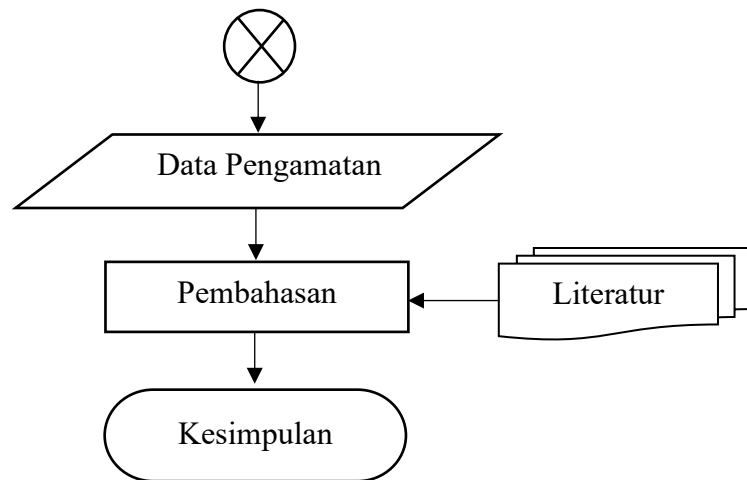
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut ini merupakan diagram alir penelitian yang akan menunjukkan tahapan-tahapan dalam penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat-alat yang digunakan

Berikut ini merupakan alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini.

- a. Alat Pelindung Diri
- b. Alat Uji Kekerasan *Vickers*
- c. Alat *Universal Testing Machine*
- d. Cetakan (*die* dan *punches*)
- e. *Crucible*
- f. Furnace MTI
- g. Gunting
- h. Jangka Sorong
- i. Mikroskop Optik
- j. Mesin *Grinding*
- k. Mesin *Polishing*

- l. Mesin *Wire Cut*
- m. Mesin *Spark Plasma Sintering* (SPS) Fuji SPS-625
- n. Sarung Tangan
- o. *Stopwatch*
- p. Tang
- q. Timbangan Digital
- r. Wadah Kaca

3.2.2 Bahan-bahan yang digunakan

Berikut ini merupakan bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini:

- a. Alkohol Teknis
- b. Ampelas 80, 120, 240, 400, 800, 1000, 1200, dan 1500 *mesh*.
- c. *Diamond Paste*
- d. *Graphite Paper*
- e. Label
- f. Serbuk Inconel 718
- g. Spidol
- h. Tissue

3.3 Prosedur Penelitian

Berikut ini merupakan prosedur penelitian yang dilakukan pada penelitian ini antara lain:

1. Preparasi Sampel

Dalam penelitian ini menggunakan *raw material* berupa serbuk inconel 718 sebanyak 51,866 gram. Untuk proses *sintering* memerlukan cetakan yang terdiri dari *graphite die* dan *graphite punch*. Cetakan yang dipakai memiliki lebar diameter sebesar 30 mm dan ketebalan sebesar 5 mm. *Graphite die* memiliki bentuk silinder tanpa alas dan penutup sehingga *graphite punch* memiliki fungsi sebagai alas dan untuk menutupi bagian atas dari *graphite die*. Sebelum serbuk dimasukkan ke dalam *graphite die*, dibutuhkan *graphite paper* yang digunakan sebagai selimut dalam *graphite die*, sebagai alas dan penutup atas dari *graphite die*. *Graphite paper* dipotong dengan bentuk persegi panjang sebagai selimut bagian dalam *graphite die* dan bentuk lingkaran sebagai alas dan penutup atas *graphite die*. Kemudian serbuk inconel 718 sebanyak 51,866 gram dimasukkan ke dalam *graphite die*.

2. Proses Spark Plasma Sintering

Pada penelitian ini proses *sintering* dilakukan menggunakan alat *spark plasma sintering* (SPS) Fuji SPS-625 seperti pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3.2 *Spark Plasma Sintering* (SPS) Fuji SPS-625

Untuk mengatur posisi *graphite spacer* dapat diatur pada layar monitor Z-axis control seperti pada Gambar 3.3. Tombol UP digunakan untuk menaikkan posisi *graphite spacer* bagian bawah ke atas. Sedangkan, tombol DOWN digunakan untuk menurunkan posisi *graphite spacer* bagian atas ke bawah. Posisi kedua *graphite spacer* diatur pada layar Z-axis control. Jika pada layar Z-axis control menunjukkan angka 0,00 maka menandakan posisi cetakan dan *graphite spacer* dalam keadaan rapat.



Gambar 3.3 Spark Plasma Sintering Monitor Controlling

Dengan menggunakan alat *spark plasma sintering* ini dapat mengatur tekanan kompaksi, perlakuan temperatur, dan vakum dalam satu proses. Parameter proses *spark plasma sintering* pada penelitian ini menggunakan tekanan sebesar 16 kN dan *heating rate* sebesar 50°C / menit. Adapun sampel yang akan dibuat pada penelitian ini adalah sebanyak tiga sampel seperti pada Gambar 3.4. Setiap sampel masing-masing diberikan temperatur SPS sebesar 950°C dengan *holding time* selama 30 menit. Proses SPS ini memiliki hasil akhir berupa padatan dengan bentuk silinder yang memiliki tinggi rata-rata sebesar ± 5 mm.



Gambar 3.4 Hasil Proses SPS Sampel Inconel 718

Produk hasil SPS paduan Inconel 718 dipotong menggunakan teknologi *wire cut* dimana 1 sampel dipotong menjadi 15 bagian untuk dilakukan berbagai pengujian, adapun hasil pemotongan *wire cut* dapat dilihat pada Gambar 3.5 berikut.



Gambar 3.5 *Wire Cut* Hasil Proses SPS

Berikut merupakan jumlah sampel yang akan dilakukan proses *solution treatment* dan *aging* dengan menggunakan variasi temperatur *solution treatment* dan *aging* untuk pengujian struktur mikro dan sifat mekanik yang dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Sampel yang Digunakan Untuk Pengujian

No.	Temperatur (°C)
1	ST 900 A 675
2	ST 900 A 725
3	ST 900 A 775
4	ST 1000 A 675
5	ST 1000 A 725
6	ST 1000 A 775
7	ST 1100 A 675
8	ST 1100 A 725
9	ST 1100 A 775

3. Pengamatan Metalografi

Metalografi dilakukan untuk mendapatkan struktur makro dan mikro dari suatu logam dengan tujuan agar material tersebut dapat dianalisa sifat ataupun karakteristiknya. Untuk pengamatan struktur mikro yang terbentuk dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik. Proses dimulai dengan sampel di-*mounting* menggunakan resin dan *hardener* agar memudahkan dalam proses *grinding* dan *polishing* pada permukaan sampel nantinya. Proses *grinding* dan *polishing* dilakukan menggunakan alat yang dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.6 Proses *Grinding* dan *Polishing*

Selanjutnya dilakukan proses pengamplasan (*grinding*). *Grinding* dilakukan untuk mereduksi material suatu permukaan dengan gerakan abrasif. Saat meratakan permukaan sampel harus diiringin dengan air yang mengalir dengan tujuan agar permukaan sampel tidak menghasilkan panas yang terlalu tinggi dan mencegah terjadinya kerusakan pada permukaan sampel. Pada penelitian ini dilakukan proses *grinding* menggunakan kertas amplas dengan ukuran 80, 120, 240, 400, 800, 1000, 1200, dan 1500 *mesh*. Kemudian proses dilanjutkan ke dalam proses pemolesan (*polishing*) menggunakan cairan *diamond paste* dengan ukuran 3,0 μm . *Polishing* dilakukan untuk menghaluskan permukaan sampel hingga tidak memiliki goresan dan mengkilap seperti cermin. Permukaan sampel tidak boleh bergelombang dan kasar karena dikhawatirkan cahaya dari mikroskop akan memantul secara acak terhadap sampel yang akan diamati sehingga ketika mengamati struktur mikronya akan sulit dilakukan. Setelah proses *polishing*, proses dilanjutkan ke dalam proses etsa. Etsa (*etching*) dilakukan untuk mengikis batas butir secara selektif dengan metode pencelupan ke dalam larutan

pengetsa terhadap permukaan sampel agar detail struktur mikro yang diamati dapat dilihat secara jelas. Proses *etching* dilakukan menggunakan bahan berupa 5 ml H_2SO_4 , 8 gr CrO_3 , dan 85 ml H_3PO_4 sesuai dengan ASTM E407 dan hasil akhirnya dapat dilihat pada Gambar 3.7 berikut.



Gambar 3.7 Sampel Inconel 718 Setelah *Etching*

Setelah proses-proses untuk metalografi dilakukan, dilanjutkan dengan pengamatan metalografi dilakukan menggunakan mikroskop optik seperti pada Gambar 3.8. Pengamatan dilakukan menggunakan perbesaran 200 untuk setiap sampel. Dengan menggunakan mikroskop optik ini dapat dilihat batas butir, ukuran butir, dan bentuk struktur material.



Gambar 3.8 Mikroskop Optik

4. Pengujian Densitas

Hasil SPS paduan inconel 718 yang telah menjadi padatan (*bulk*) dilakukan uji densitas dengan menggunakan timbangan digital yang dilengkapi dengan kit pengukur densitas yang memungkinkan pengukuran massa dan volume secara otomatis. Timbangan ini menggunakan metode archimedes, yang melibatkan pengukuran berat di udara dan di dalam air untuk menghitung volume material yang dapat dilihat pada Gambar 3.9. Paduan ditimbang menggunakan timbangan digital dan aquades digunakan yang memiliki fungsi sebagai cairan imersi. Untuk melakukan uji densitas ini memerlukan timbangan, gelas beaker, kawat tipis. Timbangan digunakan untuk mengukur massa benda di udara dan di dalam air. Gelas beaker digunakan untuk merendam sampel sepenuhnya. Kawat tipis digunakan untuk menahan dan menimbang sampel di dalam air.



Gambar 3.9 Alat Uji Densitas

5. Pengujian Kekerasan *Vickers*

Uji kekerasan dilakukan untuk mengetahui ketahanan suatu material terhadap deformasi pada permukaan material. Uji kekerasan pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode *Vickers*. Uji kekerasan *vickers* merupakan salah satu metode uji kekerasan yang menggunakan indenter intan yang berukuran kecil dan memiliki ukuran geometri dengan bentuk dengan beban 1-120 kgf. Pembebanan terhadap material dilakukan selama 12 detik dengan pengambilan data di 5 titik pada permukaan material. Kondisi bebas dari bidang, regangan, tegak lurus pada sumbu indenter yang diberikan pada permukaan sampel. Indenter diturunkan secara perlahan <1 mm dengan kondisi bebas dari getaran. Permukaan sampel uji akan membentuk persegi dengan panjang diagonal 1 dan diagonal 2 saat indenter diberikan pada permukaan sampel uji. Selanjutnya, saat indenter piramida sampai pada permukaan sampel akan terlihat condong ke dalam dan membentuk sudut 136° . Alat *Micro vicker hardness* dapat dilihat pada Gambar 3.10 berikut.



Gambar 3.10 *Micro Vickers Hardness* HM-200

6. Pengujian Tekan

Uji tekan dilakukan untuk menentukan kekuatan tekan serta kemampuan suatu material agar pulih setelah diberikan gaya tekan dalam jangka waktu tertentu. Sampel dijepit di antara dua pelat tekanan dan ditekan di bawah gaya yang meningkat. Uji tekan dilakukan hingga paduan mengalami retak. Gaya berupa kurva direkam pada monitor komputer yang telah terkoneksi dengan alat uji tekan. Kemudian gaya dicatat sebagai fungsi kompresi spesimen, perekaman kurva selama pengujian (*geometry-dependent*) kemudian diubah menjadi diagram tegangan tekan *geometry independent*. Uji tekan dilakukan dengan menggunakan alat *universal testing machine* seperti pada Gambar 3.11 berikut.



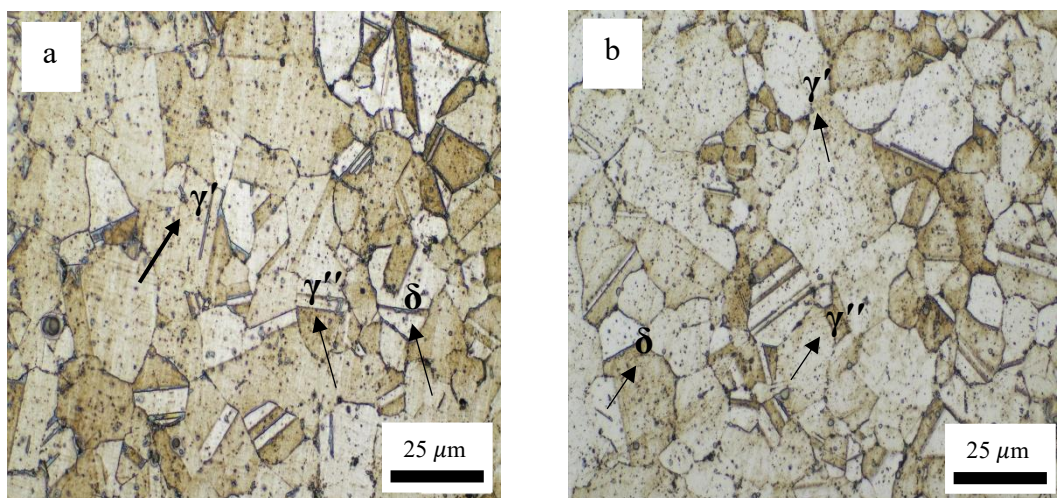
Gambar 3.11 Alat *Universal Testing Machine*

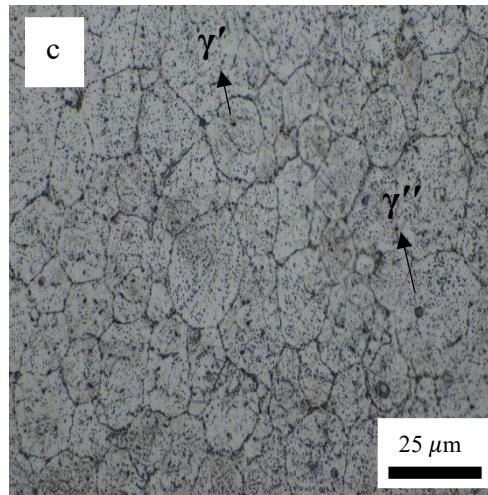
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengamatan Metalografi

Gambar dibawah menunjukkan paduan Inconel 718 dalam keadaan *spark plasma sintering* (SPS) bahwa serbuk telah mencapai kepadatan yang baik dan tidak ditemukan residu pori. Pada struktur mikro Inconel 718 dalam keadaan SPS, sejumlah kecil endapan muncul di batas butir. Setelah *solution treatment* dan *aging*, terdapat perubahan nyata pada struktur mikro yang sebagian besar terkonsentrasi pada batas butir. Gambar OEM Inconel 718 dengan temperatur *aging* 675°C, 725°C, dan 775°C dengan *holding time* 8 jam disajikan pada gambar dibawah dimana terdapat batas butir matriks γ memiliki beberapa endapan. Berdasarkan hal tersebut, butiran tidak tumbuh berlebihan seiring dengan peningkatan temperatur dan waktu *aging* [23]. Sejumlah besar ukuran butir terdistribusi secara merata pada batas butir dan menjadi kasar secara bertahap seiring dengan peningkatan temperatur *aging* dari 675°C menjadi 775°C selama 8 jam.

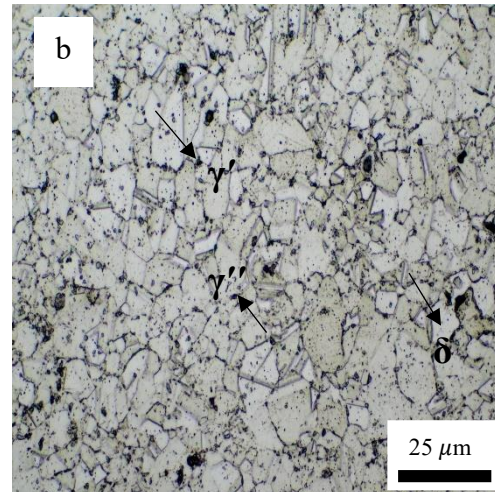
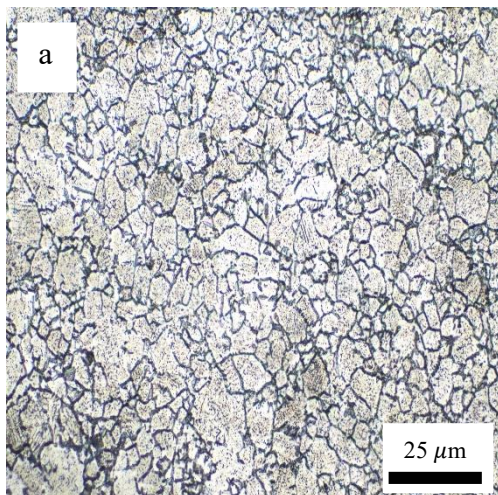


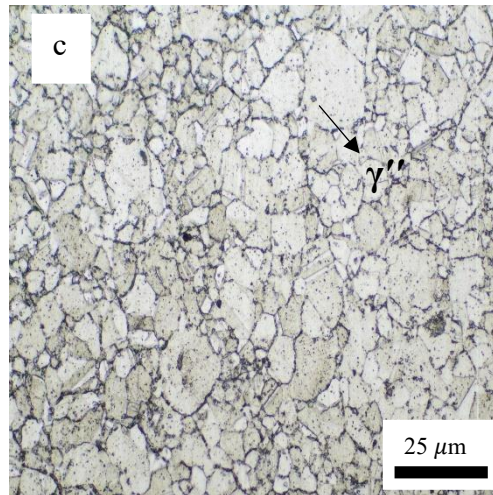


Gambar 4.1 Hasil OEM Inconel 718 Temperatur *Solution Treatment* a)900°C +
aging 675°C, b)900°C + aging 725°C, c)900°C + aging 775°C

Gambar diatas merupakan sampel Inconel 718 yang dilakukan *solution treatment* pada temperatur 900°C kemudian dilakukan *aging* dengan variasi temperatur 675°C, 725°C, dan 775°C. Pada *solution treatment* dengan temperatur 900°C presipitat γ' dan γ'' hanya sebagian kecil yang terlarut, sehingga presipitat yang telah terbentuk sebelumnya masih ada dalam jumlah yang relatif besar, namun dalam ukuran yang mungkin lebih besar dan tidak seragam. Selain itu, fasa delta (δ) masih banyak yang tersisa pada batas butir. Fasa γ' (gamma prime) merupakan fasa penguat utama yang terbentuk selama proses aging. Sedangkan, fasa γ'' (gamma double prime) berfungsi dalam penguatan utama melalui presipitasi dan fasa δ (delta) berperan dalam mengontrol ukuran butir dan menghambat pertumbuhan butir selama proses pemanasan. Proses *solution treatment* tersebut bertujuan untuk mendapatkan solusi padat homogen yang akan digunakan untuk presipitasi fasa-fasa penguat selama *aging*.

Pada Gambar 4.1 a, sampel Inconel 718 dengan temperatur *solution treatment* 900°C + *aging* 675°C terjadi pembentukan fasa γ'' yang optimal dengan bentuk cakram dan terdistribusi secara merata dalam matriks dan terjadi pembentukan fasa γ' yang berbentuk kubus atau hampir bulat dan memiliki ukuran lebih kecil dari fasa γ'' serta fasa δ mulai terbentuk pada batas butir. Pada Gambar 4.1 b, sampel Inconel 718 dengan temperatur *solution treatment* 900°C + *aging* 725°C terjadi pembentukan fasa γ'' dan γ' secara merata serta memiliki ukuran yang lebih besar dan juga fasa δ mulai terbentuk pada batas butir. Pada Gambar 4.1 c, sampel Inconel 718 dengan temperatur *solution treatment* 900°C + *aging* 775°C terjadi pembentukan fasa γ'' dan γ' yang memiliki ukuran lebih besar lagi dibandingkan dengan temperatur *aging* sebelumnya dan fasa δ muncul terdistribusi pada batas butir.

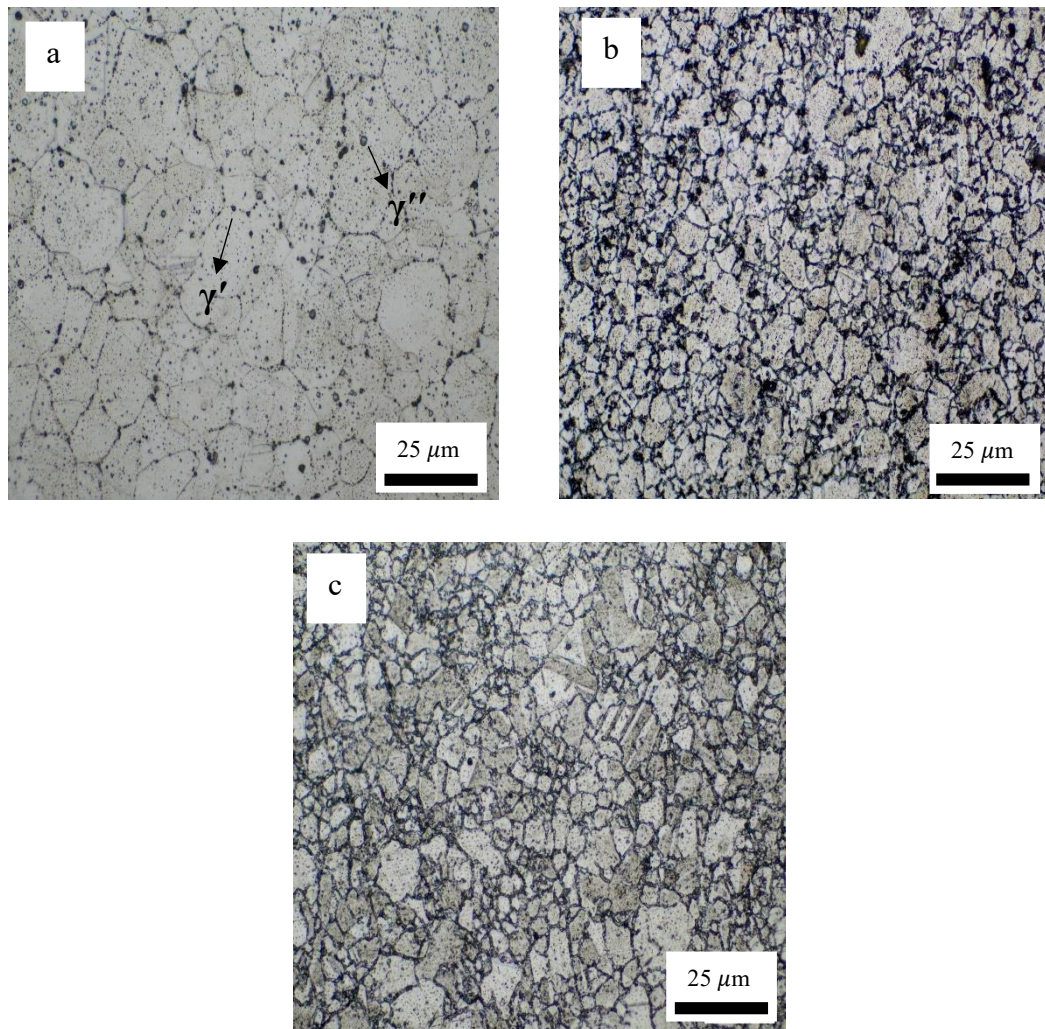




Gambar 4.2 Hasil OEM Inconel 718 Temperatur *Solution Treatment* a)1000°C + *aging* 675°C, b)1000°C + *aging* 725°C, c)1000°C + *aging* 775°C

Gambar diatas merupakan sampel Inconel 718 yang dilakukan *solution treatment* pada temperatur 1000°C kemudian dilakukan *aging* dengan variasi temperatur 675°C, 725°C, dan 775°C. *Solution treatment* dengan temperatur 1000°C dilakukan agar fasa γ (austenit) menjadi homogen dengan pelarutan fasa γ' dan γ'' . Pada temperatur 1000 °C, kondisi mikrostruktur berada di titik optimal antara penghilangan sebagian besar presipitat penguat (γ' dan γ'') tanpa melarutkannya sepenuhnya, yang memberikan penguatan presipitasi yang cukup. Pada saat yang sama, fasa delta (δ) juga terlarut sebagian, sehingga material memiliki kekuatan batas butir yang baik, yang semuanya berkontribusi terhadap kekerasan yang lebih tinggi. Pada Gambar 4.2 a, sampel Inconel 718 dengan temperatur *solution treatment* 1000°C + *aging* 675°C terjadi pembentukan fasa γ'' berbentuk cakram kecil dengan distribusi yang merata dan fasa γ' berbentuk kubus dengan distribusi

yang seragam. Pada Gambar 4.2 b, sampel Inconel 718 dengan temperatur *solution treatment* 1000°C + *aging* 725°C terjadi pembentukan fasa γ'' dengan bentuk seperti cakram dan fasa γ' dengan ukuran yang lebih besar dan juga fasa δ mulai terbentuk pada batas butir. Pada Gambar 4.2 c, sampel Inconel 718 dengan temperatur *solution treatment* 1000°C + *aging* 775°C terjadi pembentukan fasa γ'' dan γ' yang memiliki ukuran lebih besar lagi dibandingkan dengan temperatur *aging* sebelumnya dan fasa δ masih ditemukan.



Gambar 4.3 Hasil OEM Inconel 718 Temperatur *Solution Treatment*

a) 1100°C + *aging* 675°C, b) 1100°C + *aging* 725°C, c) 1100°C + *aging* 775°C

Gambar diatas merupakan sampel Inconel 718 yang dilakukan *solution treatment* pada temperatur 1100°C kemudian dilakukan *aging* dengan variasi temperatur 675°C, 725°C, dan 775°C. *Solution treatment* dengan temperatur 1100°C dilakukan untuk melarutkan fasa γ' , γ'' , dan δ yang ada dalam matriks γ . Pada temperatur 1100°C, sebagian besar fasa presipitat, seperti γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$) dan γ'' (Ni_3Nb), serta fasa delta (δ) yang sering muncul di batas butir, larut lebih baik ke dalam fasa matriks γ (fasa nikel). Hal ini menghasilkan struktur mikro yang lebih homogen dan bebas dari presipitat yang menghalangi gerakan dislokasi. Pada Gambar 4.3 a, sampel Inconel 718 dengan temperatur *solution treatment* 1100°C + *aging* 675°C terjadi pembentukan fasa γ'' dan fasa γ' berukuran sangat kecil dan tersebar merata. Pada Gambar 4.3 b, sampel Inconel 718 dengan temperatur *solution treatment* 1100°C + *aging* 725°C terjadi pembentukan fasa γ'' dan γ' dengan ukuran yang sedikit lebih besar. Pada Gambar 4.3 c, sampel Inconel 718 dengan temperatur *solution treatment* 1100°C + *aging* 775°C terjadi pembentukan fasa γ'' dan γ' yang memiliki ukuran lebih besar lagi dibandingkan dengan temperatur *aging* sebelumnya.

Pertumbuhan butir secara signifikan terjadi pada temperatur *solution treatment* 1100°C dibandingkan dengan temperatur *solution treatment* 900°C dan 1000°C terlepas dari laju pendinginan. Hal tersebut dikarenakan 1100°C merupakan temperatur yang cukup tinggi (tetapi kurang dari suhu likuasi NbC yaitu 1176°C) untuk proses pertumbuhan butir [24]. Pertumbuhan butir ini dikaitkan dengan penurunan regangan pada bagian tengah butir yang mengakibatkan rendahnya nilai kekerasan. Penurunan regangan ini disebabkan karena menurunnya

kerapatan dislokasi karena dislokasi cenderung bermigrasi ke arah batas butir dan hal ini dapat dikonfirmasi dengan adanya deretan lubang etsa dan lubang-lubang ini mewakili lokasi dislokasi tepi [25].

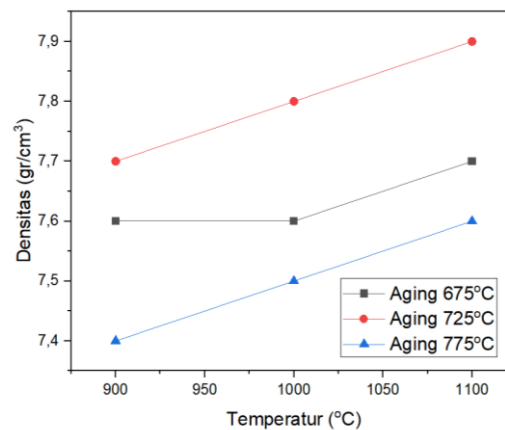
4.2 Hasil Pengujian Densitas

Dengan menggunakan alat *density* meter dan prinsip Archimedes didapatkan hasil nilai densitas aktual paduan Inconel 718 dari beberapa temperatur *solution treatment* dan *aging* pada tabel Tabel 4.1. Uji densitas dilakukan dengan sampel yang telah dilakukan *solution treatment* dengan variasi temperatur 900°C, 1000°C, 1100°C dan *aging* dengan variasi temperatur 675°C, 725°C, 775°C. Berikut merupakan hasil nilai densitas aktual paduan Inconel 718 dari variasi temperatur *solution treatment* dan *aging* yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Nilai Densitas Aktual Inconel 718

Temperatur (°C)	Densitas (gr/cm ³)
ST 900 A 675	7.6
ST 1000 A 675	7.6
ST 1100 A 675	7.7
ST 900 A 725	7.7
ST 1000 A 725	7.8
ST 1100 A 725	7.9
ST 900 A 775	7.4
ST 1000 A 775	7.5
ST 1100 A 775	7.6

Berdasarkan Tabel 4.1 didapatkan nilai densitas aktual tertinggi pada temperatur *solution treatment* 1100°C + *aging* 725°C yaitu 7.9 gr/cm³ dan densitas terendah pada temperatur *solution treatment* 900°C + *aging* 775°C yaitu 7.4 gr/cm³. Data hasil pengujian densitas pada tabel diatas dapat diplot dalam grafik perbandingan hasil uji densitas terhadap temperatur *solution treatment* dan *aging* pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Hasil Uji Densitas Inconel 718

Nilai densitas teoritis juga dapat dihitung untuk mendapatkan nilai densitas relatif dari paduan Inconel 718. Nilai densitas relatif dapat diperoleh dengan perhitungan sebagai berikut.

$$\text{Persentase densitas} = \left(\frac{\text{Densitas aktual}}{\text{Densitas teoritis}} \right) \times 100\% \dots \dots \dots (4.1)$$

Inconel 718 memiliki nilai densitas teoritis sebesar 8.19 gr/cm³ sehingga didapatkan nilai densitas relatif paduan Inconel 718 dengan variasi temperatur *solution treatment* dan variasi temperatur *aging* pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Nilai Densitas Relatif Inconel 718

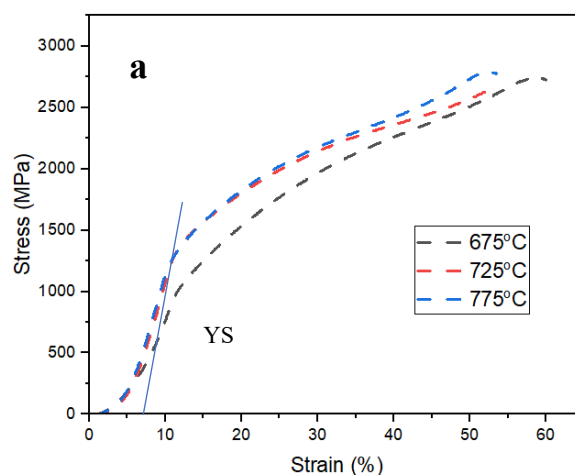
Temperatur (°C)	Densitas (%)
ST 900 A 675	92,8
ST 1000 A 675	92,8
ST 1100 A 675	94
ST 900 A 725	94
ST 1000 A 725	95,2
ST 1100 A 725	96,4
ST 900 A 775	90,3
ST 1000 A 775	91,6
ST 1100 A 775	92,8

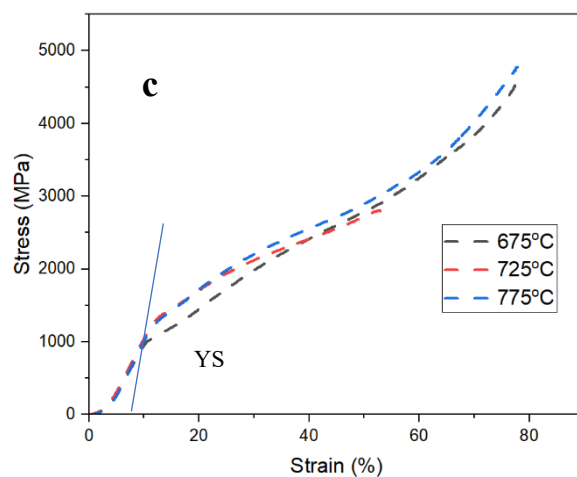
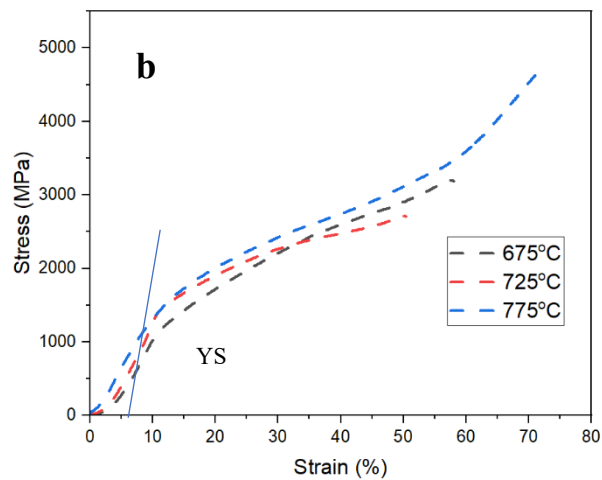
Berdasarkan Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa nilai densitas relatif tertinggi pada temperatur *solution treatment* 1100°C + *aging* 725°C yaitu 96,4% dan nilai densitas relatif terendah pada temperatur *solution treatment* 900°C + *aging* 775°C yaitu 90,3%. Nilai densitas pada temperatur *aging* 775°C cenderung menurun yang disebabkan karena banyaknya porositas yang muncul pada permukaan sampel. Apabila nilai densitas suatu material menurun maka nilai porositasnya meningkat ataupun sebaliknya. Berdasarkan nilai densitas relatif yang diperoleh, dapat dilihat bahwa paduan Inconel 718 dengan variasi temperatur *solution treatment* dan variasi temperatur *aging* pada penelitian ini dapat dikatakan belum menjadi paduan yang sempurna karena apabila nilai densitas relatif dibawah 98% dapat diindikasikan

masih memiliki porositas dan dapat mempengaruhi sifat mekanik dari material tersebut.

4.3 Hasil Pengujian Tekan

Kurva *stress-strain* diilustrasikan pada Gambar 4.5. Sedangkan, nilai *fracture stress* dan *yield stress* tercantum pada tabel 4.3. Berdasarkan hasil uji tekan didapatkan tidak ada kerusakan patah yang terlihat. Namun, pada sekitar 48% - 57% regangan, tegangan tumbuh perlahan atau menurun seiring dengan peningkatan regangan pada kurva *stress-strain* yang telah dilakukan *solution treatment* dan *aging*. Diperkirakan bahwa selama tahap ini, sejumlah besar retakan dimulai dan mulai menyebar ke seluruh permukaan sampel. Setelah tahap tersebut, kemiringan kurva *stress-strain* berubah secara nyata akibat efek *hardening* [16]. Berdasarkan hal tersebut, nilai tegangan diambil sesuai pada tahap yang tumbuh perlahan atau menurun sebagai kekuatan tekan utama sampel.





Gambar 4.5 Nilai Kuat Tekan Inconel 718 dengan Variasi Temperatur

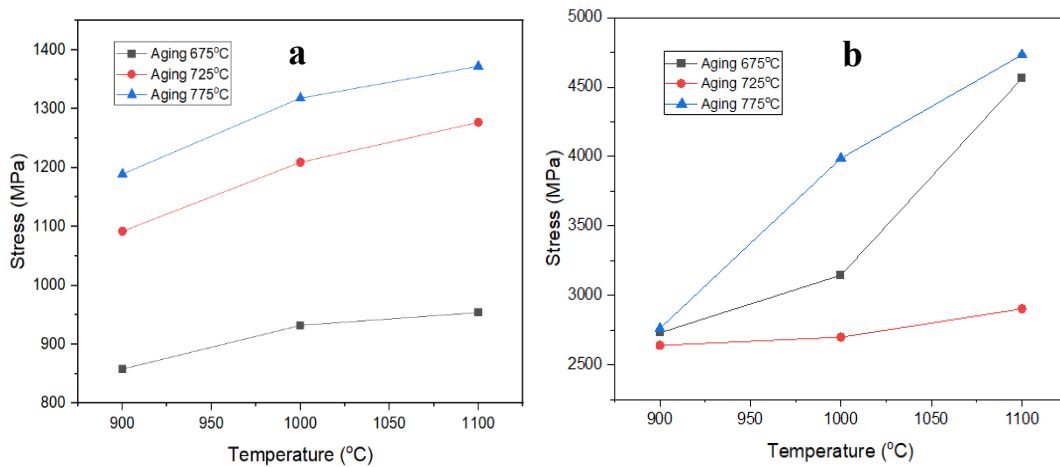
Aging dan Solution Treatment a)900°C, b)1000°C, c)1100°C

Berdasarkan Gambar 4.5 diatas merupakan kurva *stress-strain* setelah sampel diberikan variasi temperatur *solution treatment* dan *aging*. Karena plastisitas kompresi yang sangat baik dari paduan Inconel 718 yang diproses menggunakan *spark plasma sintering* (SPS) tidak terdapat kegagalan kompresi yang jelas. Pada gambar diatas setelah menambah temperatur *aging*, kekuatan tarik material tidak

mengalami perubahan yang nyata. Namun, kemiringan kurva *stress-strain* sampel pada tahap elastis menjadi lebih kecil yang menunjukkan bahwa material tersebut elastis plastis. Modulus material menurun dan deformasi akibat beban eksternal menjadi lebih jelas tetapi kekuatan luluh sampel tidak meningkat secara signifikan. Nilai *fracture stress* dan *yield stress* dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Hasil Uji Tekan Inconel 718

Temperatur (°C)	<i>Fracture Stress</i> (MPa)	<i>Yield Stress</i> (MPa)
ST 900 A 675	2731	858
ST 900 A 725	2641	1092
ST 900 A 775	2762	1189
ST 1000 A 675	3146	932
ST 1000 A 725	2700	1209
ST 1000 A 775	3987	1318
ST 1100 A 675	4563	954
ST 1100 A 725	2904	1277
ST 1100 A 775	4732	1372



Gambar 4.6 a) Nilai *Yield Stress* Inconel 718 b) Nilai *Fracture Stress* Inconel

718

Setelah dilakukan *solution treatment* dan *aging*, kekuatan luluh paduan Inconel 718 meningkat secara signifikan karena adanya pengendapan fasa penguatan γ'' dan γ' . Pada Gambar 4.6 a) menyajikan nilai *yield stress* yang merupakan batas beban maksimum yang dapat diterima material sebelum mengalami deformasi plastis permanen, pada sampel dengan *solution treatment* 1100°C + *aging* menunjukkan nilai *yield stress* tertinggi yaitu 1372 MPa. Hal tersebut dikarenakan pada temperatur *solution treatment* 1100°C memberikan matriks γ yang homogen dari fasa sekunder yang dapat mengurangi kekuatan. Berdasarkan Gambar 4.6 b) menyajikan nilai *fracture stress* yang merupakan beban maksimum yang dapat diterima material sebelum mengalami kegagalan total atau patah, pada sampel *solution treatment* 900°C + *aging* menunjukkan nilai *fracture stress* paling minimum. Sedangkan, pada sampel dengan *solution treatment* 1100°C + *aging* menunjukkan nilai *fracture stress* tertinggi yaitu 4732 MPa. Hal tersebut

dikarenakan pada temperatur *solution treatment* 1100°C, sebagian besar fasa presipitat, seperti γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$), γ'' (Ni_3Nb), dan fasa delta (δ) yang sering muncul di batas butir, larut lebih baik ke dalam fasa matriks γ (fasa nikel). Hal tersebut menghasilkan struktur mikro yang lebih homogen dan bebas dari presipitat yang menghalangi gerakan dislokasi, sehingga memungkinkan material untuk mengembangkan kekuatan tekan yang lebih tinggi. Dapat dilihat juga bahwa pada temperatur *aging* 775°C memiliki nilai *yield stress* dan *fracture stress* paling tinggi. Hal tersebut dikarenakan presipitasi fasa penguat γ' dan γ'' terdistribusi lebih merata dalam seluruh matriks sehingga memberikan penguatan yang lebih efektif. Distribusi yang baik dari presipitat ini membantu meningkatkan resistansi terhadap deformasi plastis dan menghasilkan nilai *yield stress* dan *fracture stress* yang lebih tinggi.

Paduan Inconel 718 yang dilakukan *aging* pada temperatur 600°C hingga 750°C memiliki kekuatan yang relatif tinggi yang disebabkan adanya endapan seperti NbC, fasa δ , dan lainnya. Sifat mekanik dari paduan Inconel 718 yang diproses menunjukkan hubungan yang erat dengan endapan. Endapan terpisah sepanjang batas butir dengan peningkatan temperatur *aging* dari temperatur 600°C menjadi 700°C sehingga dapat meningkatkan kekuatan sekaligus menurunkan keuletan. Namun, ketika suhu *aging* ditingkatkan hingga 750°C, kekuatannya sedikit menurun yang dapat dijelaskan oleh butiran yang semakin kasar seiring dengan peningkatan temperatur [23].

4.4 Hasil Pengujian Kekerasan *Vickers*

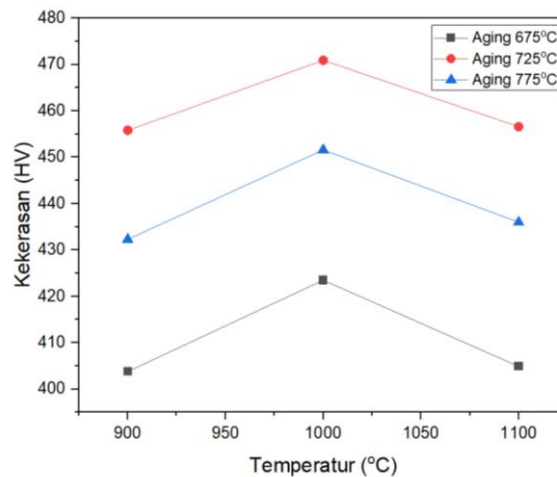
Pengujian dengan menggunakan *Vickers Microhardness* dilakukan dengan tujuan agar dapat mengetahui tingkat nilai kekerasan dari sampel yang di-*solution treatment* pada temperatur 900°C, 1000°C, dan 1100°C dengan variasi temperatur *aging* pada temperatur 675°C, 725°C, dan 775°C.

Tabel 4.4 Hasil Uji *Vickers* Inconel 718

Temperatur (°C)	Hardness (HV)
ST 900 A 675	403,8
ST 1000 A 675	423,5
ST 1100 A 675	404,9
ST 900 A 725	455,8
ST 1000 A 725	470,9
ST 1100 A 725	456,6
ST 900 A 775	423,3
ST 1000 A 775	451,6
ST 1100 A 775	436

Pada Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa pada sampel yang di-*solution treatment* pada temperatur 900°C, 1000°C, dan 1100°C dengan variasi temperatur *aging* pada temperatur 675°C, 725°C, dan 775°C didapatkan nilai kekerasan berkisar antara 403,8 – 470,9 HV. Berdasarkan tabel diatas didapatkan nilai kekerasan tertinggi pada sampel yang di-*solution treatment* pada temperatur 1000°C + *aging* 725°C dengan nilai kekerasannya 470,9 HV. Sedangkan, nilai terendah pada 900°C + *aging*

625°C dengan nilai kekerasannya 403,8 HV. Data hasil pengujian kekerasan *vickers* pada tabel diatas dapat diplot dalam grafik perbandingan hasil uji kekerasan *vickers* terhadap temperatur *solution treatment* dan *aging* pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Hasil Uji Kekerasan Vickers Inconel 718 dengan Variasi Temperatur *Solution Treatment* dan *Aging*

Untuk mengevaluasi tingkat nilai kekerasan dari Inconel 718 maka dilakukan uji kekerasan *vickers* dengan pembebanan terhadap material dilakukan selama 12 detik dengan pengambilan data di 5 titik pada permukaan material. Gambar diatas menunjukkan nilai rata-rata kekerasan yang diperoleh dari 5 titik pada setiap sampel. Dibandingkan dengan sampel *solution treatment* 1100°C, nilai kekerasan sampel *solution treatment* 1000°C lebih meningkat karena pada temperatur 1000 °C, kondisi mikrostruktur berada di titik optimal antara penghilangan sebagian besar presipitat penguat (γ' dan γ'') tanpa melarutkannya sepenuhnya, yang memberikan penguatan presipitasi yang cukup. Pada saat yang bersamaan, fasa delta (δ) juga terlarut sebagian sehingga material memiliki kekuatan batas butir

yang baik dan berkontribusi terhadap nilai kekerasan yang lebih tinggi. Nilai kekerasan pada sampel *solution treatment* 1100°C menunjukkan penurunan yang nyata karena disebabkan oleh pengerasan butiran selama proses *solution treatment* [15]. Pada sampel *solution treatment* 900°C memiliki nilai kekerasan paling rendah namun masih dapat mempertahankan sifat mekanik yang baik.

Setelah dilakukan *solution treatment* dan *aging*, nilai kekerasan dan sifat tekan meningkat secara signifikan karena pengendapan fasa γ'' dan γ' selama proses *aging*. Namun, pengendapan fasa δ dan karbida dapat mempengaruhi perilaku pengendapan fasa γ''/γ' dan juga sifat mekaniknya. Perlu dicatat bahwa δ -Ni₃ Fasa Nb memiliki komposisi unsur yang sama dengan fasa γ'' dan fasa γ' dapat berubah menjadi δ selama *heat treatment* [29]. Pada konsentrasi Nb tertentu, pengendapan fasa δ akan memakan atom Nb sehingga dapat menyebabkan penurunan kandungan γ'' . Sejumlah besar fasa δ yang diendapkan dalam paduan merugikan sifat mekanik sampel karena dapat bersaing dengan elemen Nb dengan fasa γ'' . Sementara itu, jumlah δ yang tepat pada batas butir dapat menahan pertumbuhan butir, sehingga bermanfaat untuk meningkatkan sifat mekanik [27].

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada temperatur *solution treatment* 1100°C, sebagian besar fasa presipitat, seperti γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al, Ti})$), γ'' (Ni_3Nb), dan fasa delta (δ) yang sering muncul di batas butir, larut lebih baik ke dalam fasa matriks γ (fasa nikel). Hal tersebut menghasilkan struktur mikro yang lebih homogen dan bebas dari presipitat yang menghalangi gerakan dislokasi, sehingga memungkinkan material untuk mengembangkan kekuatan tekan yang lebih tinggi.
2. Pada temperatur *aging* 775°C memiliki nilai *yield stress* dan *fracture stress* paling tinggi. Hal tersebut dikarenakan presipitasi fasa penguat γ' dan γ'' terdistribusi lebih merata dalam seluruh matriks sehingga memberikan penguatan yang lebih efektif. Namun, nilai densitas pada temperatur *aging* 775°C cenderung menurun yang disebabkan karena banyaknya porositas yang muncul pada permukaan sampel.
3. Setelah dilakukan *solution treatment* dan *aging*, nilai kekerasan dan sifat tekan meningkat secara signifikan karena terjadi pengendapan fasa γ'' dan γ' selama proses *aging*.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat dilakukan untuk penelitian selanjutnya antara lain:

1. Melakukan variasi temperatur *sintering* dalam proses *spark plasma sintering* untuk mengetahui produk hasil *sintering* yang lebih baik terhadap sifat mekanik material.
2. Menggunakan media *quenching* selain air untuk mengetahui hasil pengaruh *heat treatment* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Marques, A., Cunha, Â., Bartolomeu, F., Silva, F. S., & Carvalho, Ó, “Inconel 718 produced by hot pressing: optimization of temperature and pressure conditions. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,” 2023.
- [2] Johari, N., Ibrahim, R., Ahmad, M. A., Suleiman Ahmad, M. J., & Talib, A. R. A, “The effect of sintering temperature on physical properties of sintered inconel 718 for potential aerospace industry application,” *Advanced Materials Research*, 879, 139–143, 2014.
- [3] Rusianto , T., “Hot Pressing Metalurgi Serbuk Aluminium Dengan Variasi Suhu Pemanasan,” *Jurnal Teknologi*, 2(1), pp. 89- 95, 2009.
- [4] M. Gendre, A. Maître, G. Trolliard, “A study of the densification mechanisms during spark plasma sintering of zirconium (oxy-)carbide powders,” *Acta Mater.* 58 2598–2609, 2010.
- [5] A.H.R. Sirkin, E.E. Vicente, “Segregation in Stellite Powders Produced by the Plasma Rotating Electrode Process,” *Mater. Sci. Eng., A* 262 64-69, 1999.
- [6] Kuo, C. M., Yang, Y. T., Bor, H. Y., Wei, C. N., & Tai, C. C, “Aging effects on the microstructure and creep behavior of Inconel 718 superalloy,” *Materials Science and Engineering: A*, 510–511(C), 289–294, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.04.097>
- [7] Hosseini, E., & Popovich, V. A, “A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718,” In *Additive Manufacturing* (Vol. 30). Elsevier B.V, 2009.
- [8] Anbarasan, N., Gupta, B. K., Prakash, S., Muthukumar, P., Oyyaravelu, R., Kumar, R. J. F., & Jerome, S, “Effect of Heat Treatment on the Microstructure

and Mechanical Properties of Inconel 718,” *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 7716–7724, 2018.

- [9] M. Khoshghadam-Pireyousefan, A. Mohammadzadeh, A. Heidarzadeh, and D. Brabazon, ”Fundamentals of Spark Plasma Sintering for Metallic, Ceramic, and Polymer Matrix Composites Production,” no. April 2020, Elsevier Ltd.
- [10] Subrahmanyam, R. V. S., Koona, R., & Pujari, S. R., “EDMED Inconel 718 using powder metallurgy (P/M) sintered electrode made with nano and micron sized powders,” *Engineering Review*, 40(3), 52–64, 2020.
- [11] Jiang, R., Song, Y. D., & Reed, P. A., “Fatigue crack growth mechanisms in powder metallurgy Ni-based superalloys—A review,” *International Journal of Fatigue*, 141, 2020.
- [12] Huang, W., Yang, J., Yang, H., Jing, G., Wang, Z., & Zeng, X., “Heat treatment of Inconel 718 produced by selective laser melting: Microstructure and mechanical properties,” *Materials Science and Engineering: A*, 750, 98–107, 2019.
- [13] Suwanda, T., “Optimilasi Tekanan Kompaksi, Temperatur dan Waktu Sintering terhadap Kekerasan dan Berat Jenis Aluminium pada Proses Pencetakan dengan Metalurgi Serbuk,” Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik UMY, 2006.
- [14] Levasseur, D., & Brochu, M., “Supersolidus Liquid Phase Sintering Modeling of Inconel 718 Superalloy,” *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 47(2), 869–876, 2016.
- [15] Yan, S., Wang, Y., Wang, Q., Zhang, C., Chen, D., & Cui, G., “Enhancing mechanical properties of the spark plasma sintered inconel 718 alloy by controlling the nano-scale precipitations,” *Materials*, 12(20), 2019.

- [16] Yan, S., Wang, Q., Chen, X., Zhang, C., & Cui, G, “Fabrication of highly compact Inconel 718 alloy by spark plasma sintering and solution treatment followed by aging,” *Vacuum*, 163, 194–203, 2019.
- [17] Jinoop, A. N et al, “Mechanical and microstructural characterization of Inconel 718 alloy fabricated using direct metal laser sintering,” *Journal of Materials Processing Technology*, 2019.
- [18] Jambor, M., Bokuvka, O., & Novy, F, “*Transformasi Fasa pada Basis Nikel Superalloy Inconel 718 selama Pembebanan Siklik pada Suhu Tinggi*,” 2017.
- [19] Li, X., Shi, J. J., Cao, G. H., Russell, A. M., Zhou, Z. J., Li, C. P., & Chen, G. F, “Improved plasticity of Inconel 718 superalloy fabricated by selective laser melting through a novel heat treatment process,” *Materials and Design*, 180, 2019.
- [20] Thomas, A., El-Wahabi, M., Cabrera, J. M., & Prado, J. M, “High temperature deformation of Inconel 718,” *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1–3), 469–472, 2006.
- [21] Marques, A. C., Cunha, Â., Silva, F., Bartolomeu, F., & Carvalho, Ó, “*Inuence of the temperature and pressure on densication, physical and mechanical properties of Inconel 718 produced by Hot Pressing*,” 2022.
- [22] Slama, C., & Cizeron, G, “Aging of the Inconel 718 alloy between 500 and $750 \pm \text{C}$,” 2015.
- [23] An, X. L., Zhou, L., Zhang, B., Jj, Chu, C. L., Han, L. Y., Gy, H., & Chu, P. K, “Inconel 718 treated with two-stage solution and aging processes: Microstructure evolution and enhanced properties,” *Materials Research Express*, 6(7), 2019.
- [24] F. J. Humphreys and M. Hatherly; ‘Recrystallization and related annealing phenomena,’ Elsevier. 1995.

- [25] George Dieter; Mechanical Metallurgy, McGraw Hill. 1986.
- [26] Azadian, S.; Wei, L.-Y.; Warren, R, “Delta phase precipitation in Inconel 718. Mater. Charact,” 53, 7–16, 2004.
- [27] Nunes, R.M.; Pereira, D.; Clarke, T.; Hirsch, T.K, “Delta Phase Characterization in Inconel 718 Alloys Through X-ray Diffraction,” ISIJ Int. 55, 2450–2454, 2015.
- [28] Jiang, J., Gu, H., Li, B., Zhang, J., & Gu, Y, “Effect of Solution Treatment on Mechanical Properties of Inconel 718 Alloy Formed by SLM” Journal of Physics: Conference Series, 2679(1), 2024.
- [29] Zhang, H.; Li, C.; Liu, Y.; Guo, Q.; Huang, Y.; Li, H.; Yu, J, “Effect of hot deformation on γ ” and δ phase precipitation of Inconel 718 alloy during deformation&isothermal treatment,” J. Alloys Compd. 716, 65–72, 2017.

LAMPIRAN A
CONTOH PERHITUNGAN

Lampiran A. Contoh Perhitungan

A.1 *Wire Cut* Inconel 718

Diketahui: Luas lingkaran = 450 mm²

Luas persegi = 25 mm²

$$\text{Banyaknya persegi dalam lingkaran} = \frac{\text{Luas lingkaran}}{\text{Luas persegi}}$$

$$= \frac{450}{25}$$

$$= 18 \text{ buah}$$

A.2 Densitas Teoritis Inconel 718

Diketahui: Massa = 100 gram

Volume = 12,21 cm³

$$\text{Densitas Inconel 718} = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}}$$

$$= \frac{100}{12,21}$$

$$= 8,19 \text{ g/cm}^3$$

LAMPIRAN B
DATA PENELITIAN

Lampiran B. Data Penelitian

Tabel B.1 Hasil Uji Densitas Inconel 718

Temperatur (°C)	Densitas (gr/cm ³)
	7.6
ST 900 A 675	7.5
	7.7
	7.6
ST 1000 A 675	7.6
	7.5
	7.8
ST 1100 A 675	7.7
	7.7
	7.7
ST 900 A 725	7.7
	7.8
	7.7
ST 1000 A 725	7.8
	7.8
	8.0
ST 1100 A 725	7.7
	7.8

Tabel B.1 (Lanjutan)

Temperatur (°C)	Densitas (gr/cm ³)
ST 900 A 775	7.4
	7.3
	7.4
	7.5
ST 1000 A 775	7.6
	7.5
	7.7
ST 1100 A 775	7.5
	7.6

Tabel B.2 Hasil Uji *Vickers* Inconel 718

Temperatur (°C)	<i>Hardness</i> (Hv)
ST 900 A 675	390
	420
	401,4
	423,5
ST 1000 A 675	420
	427
	393
ST 1100 A 675	416
	405,7

Tabel B.2 (Lanjutan)

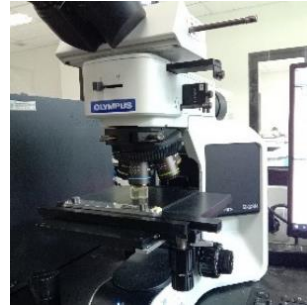
Temperatur (°C)	<i>Hardness</i> (Hv)
	455,8
ST 900 A 725	450
	461,6
	475
ST 1000 A 725	472,7
	465
	450
ST 1100 A 725	456,6
	463,2
	415
ST 900 A 775	430
	425
	452
ST 1000 A 775	448,5
	454,3
	420
ST 1100 A 775	438
	450

LAMPIRAN C
GAMBAR ALAT DAN BAHAN

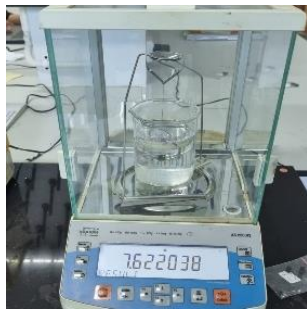
Lampiran C. Gambar Alat dan Bahan



Gambar C.1 *Spark Plasma Sintering (SPS) Fuji SPS-625*



Gambar C.2 Mikroskop Optik



Gambar C.3 Alat Uji Densitas



Gambar C.4 *Micro Vickers Hardness HM-200*



Gambar C.5 *Alat Universal Testing Machine*



Gambar C.6 *Furnace MTI*



Gambar C.7 Tabung Gas Argon



Gambar C.8 *Crucible*



Gambar C.9 Serbuk Inconel 718



Gambar C.10 Tang