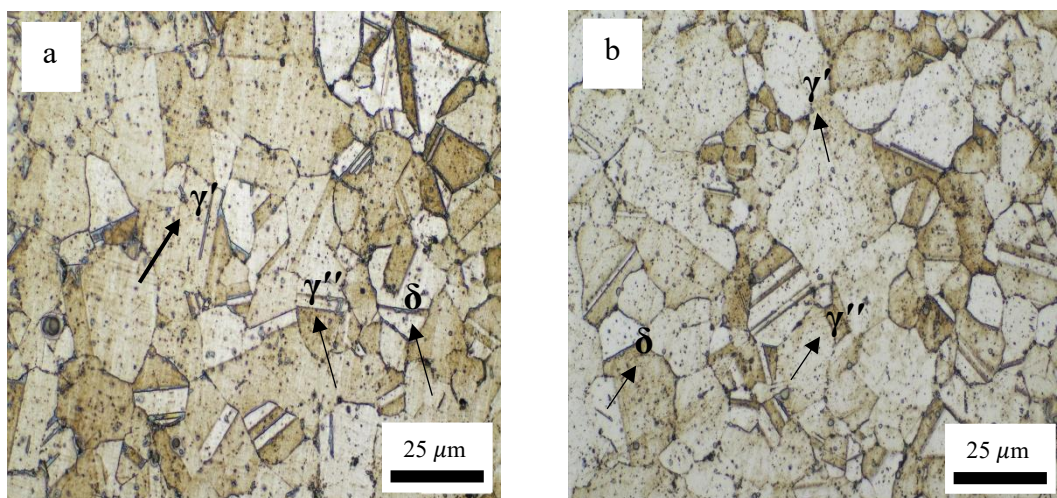


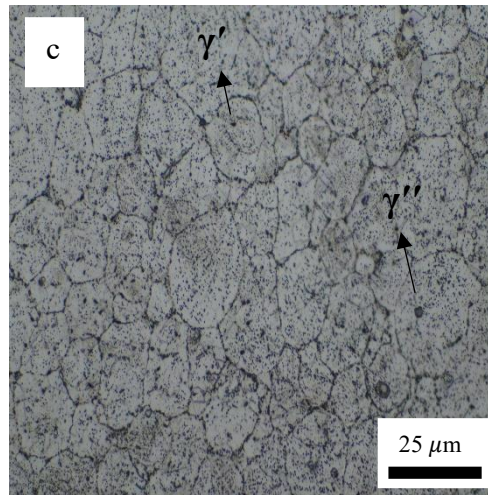
BAB IV

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.

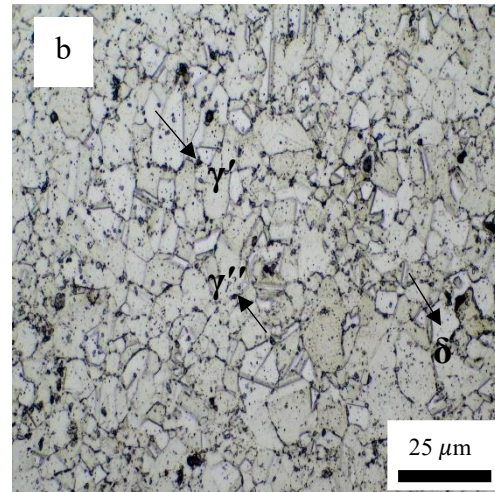
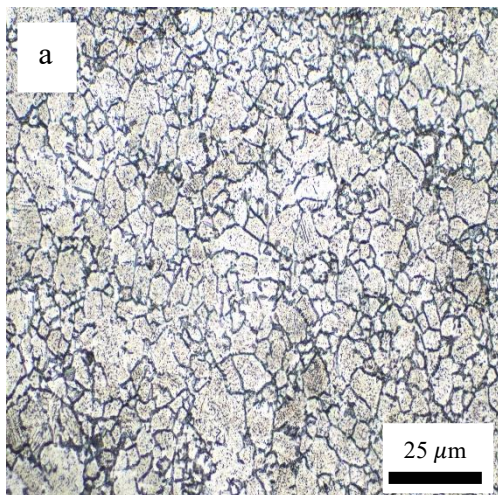


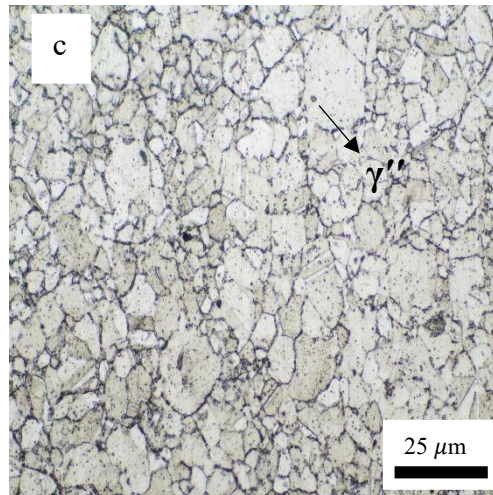


Gambar 4.1 Hasil OEM Inconel 718 Temperatur *Solution Treatment* a)900°C +
aging 675°C, b)900°C + aging 725°C, c)900°C + aging 775°C

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.

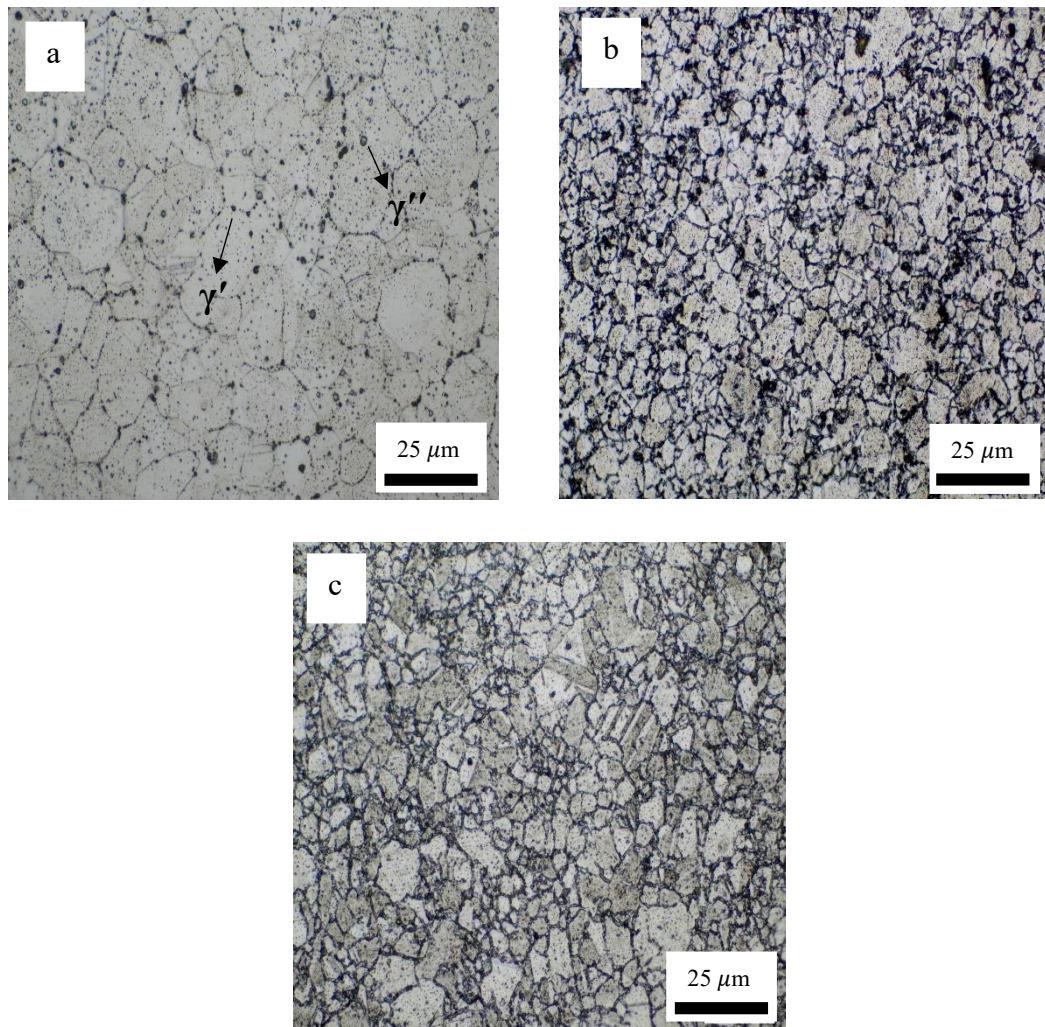




Gambar 4.2 Hasil OEM Inconel 718 Temperatur *Solution Treatment* a)1000°C + aging 675°C, b)1000°C + aging 725°C, c)1000°C + aging 775°C

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].

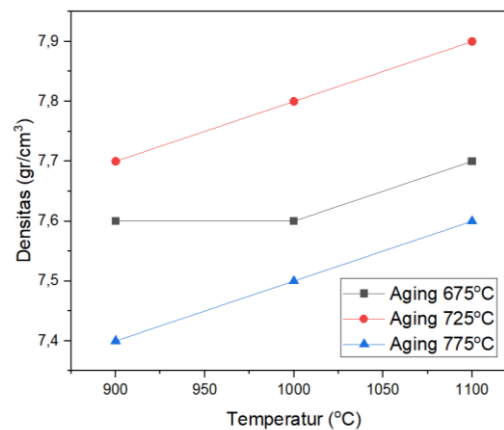
4.2 Hasil Pengujian Densitas

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

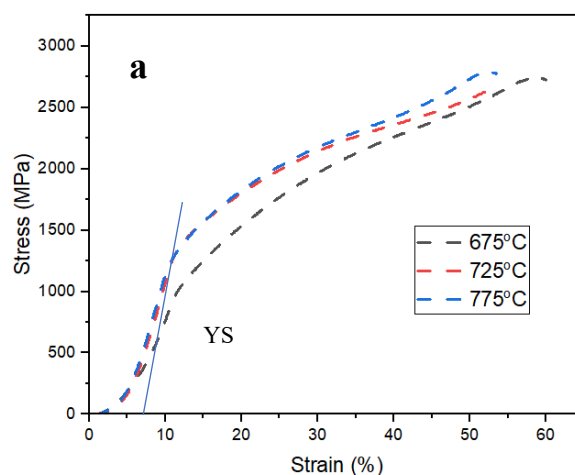
Temperatur (°C)	Densitas (%)
ST 900 A 675	92,8
ST 1000 A 675	92,8
ST 1100 A 675	94
ST 900 A 725	94
ST 1000 A 725	95,2
ST 1100 A 725	96,4
ST 900 A 775	90,3
ST 1000 A 775	91,6
ST 1100 A 775	92,8

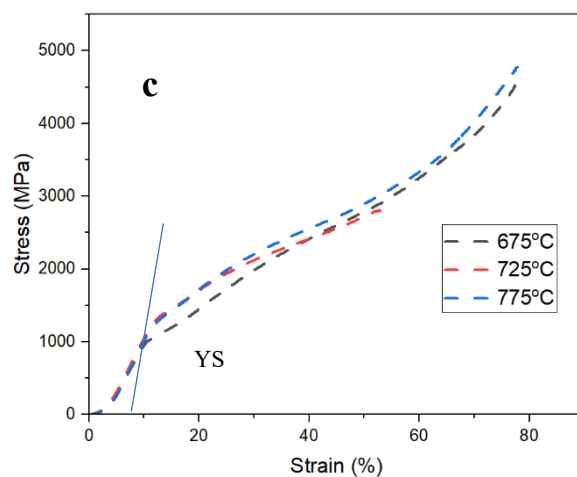
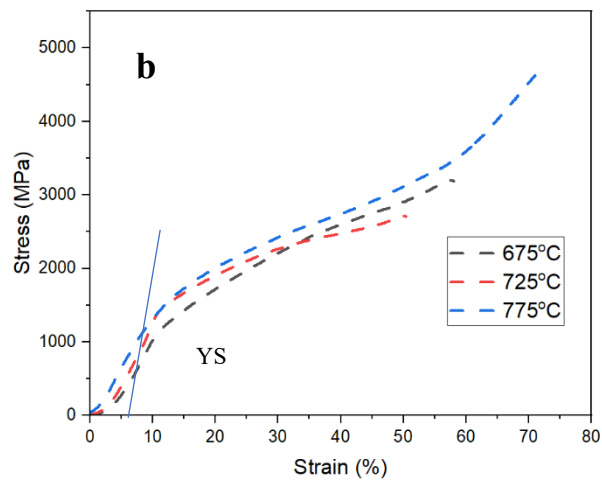
Berdasarkan Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa nilai densitas relatif tertinggi pada temperatur *solution treatment* 1100°C + *aging* 725°C yaitu 96,4% dan nilai densitas relatif terendah pada temperatur *solution treatment* 900°C + *aging* 775°C yaitu 90,3%. Nilai densitas pada temperatur *aging* 775°C cenderung 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

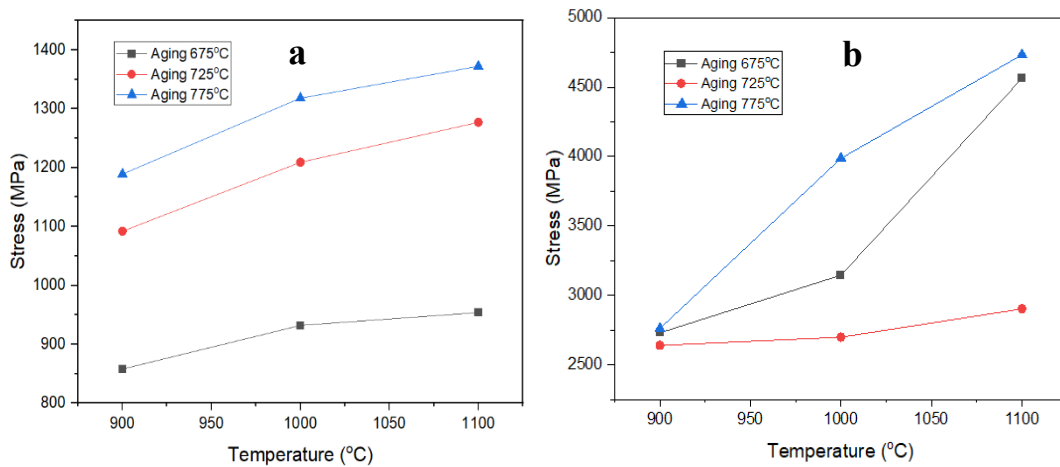
Aging dan Solution Treatment a)900°C, b)1000°C, c)1100°C

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*

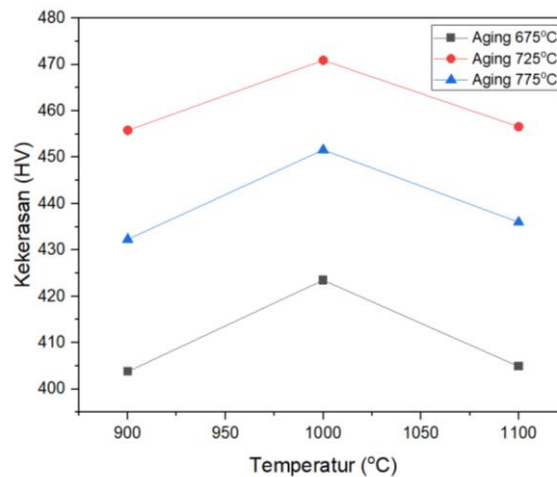
Pengujian dengan menggunakan *Vickers Microhardness* dilakukan dengan tujuan agar dapat mengetahui tingkat nilai kekerasan dari sampel yang di-*solution treatment* pada temperatur 900°C, 1000°C, dan 1100°C dengan variasi temperatur *aging* pada temperatur 675°C, 725°C, dan 775°C.

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].