



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PENGARUH PENINGKATAN TEMPERATUR
OVERHEAT TERHADAP PERTAMBAHAN PANJANG
CACAT, STRUKTUR MIKRO DAN NILAI KEKERASAN
PADA MATERIAL *TURBINE BLADE*
*NICKEL BASED SUPERALLOY***

SKRIPSI

**BUNGA PUSPITA
0606074672**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PENGARUH PENINGKATAN TEMPERATUR
OVERHEAT TERHADAP PERTAMBAHAN PANJANG
CACAT, STRUKTUR MIKRO DAN NILAI KEKERASAN
PADA MATERIAL *TURBINE BLADE*
*NICKEL BASED SUPERALLOY***

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik (S.T.)**

**BUNGA PUSPITA
0606074672**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Bunga Puspita

NPM : 0606074672

Tanda Tangan :

Tanggal : 21 Juni 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Bunga Puspita
NPM : 0606074672
Program Studi : Metalurgi dan Material
Judul Skripsi :

**STUDI PENGARUH PENINGKATAN TEMPERATUR
OVERHEAT TERHADAP PERTAMBAHAN PANJANG
CACAT, STRUKTUR MIKRO DAN NILAI KEKERASAN
PADA MATERIAL *TURBINE BLADE*
*NICKEL BASED SUPERALLOY***

Telah berhasil dipertahankan di hadapan dewan penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar sarjana Teknik pada Program Studi Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dwi Marta Nurjaya, ST., MT (.....)

Penguji : Badrul Munir, Ph.D (.....)

Penguji : Dr. Ir. Myrna Ariati, MS (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 07 Juli 2010

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb

Puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan berkah, rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Studi Pengaruh Peningkatan Temperatur *Overheat* Terhadap Pertambahan Panjang Cacat, Struktur Mikro dan Nilai Kekerasan pada Turbin Blade Nickel Based Superalloy”** dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik program studi Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Dalam menyelesaikan penulisan Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan banyak bantuan, bimbingan, dorongan, dan petunjuk dari berbagai pihak. Oleh sebab itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan dan terima kasih kepada :

1. Dwi Marta Nurjaya, S.T, M.T. selaku dosen pembimbing,
2. Ir. Madila Awalini, M.Sc., Afyannajat, S.T. dan Ahmad Sahid, S.T. selaku pembimbing dari PT. Nusantara Turbin dan Propulsi (PT. NTP) yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk \mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
3. Ayahanda dan Ibunda, kakak-adik, saudara/i dan keluarga yang telah mendukung dengan memberikan bantuan material dan immaterial.
4. Sahabat dan teman-teman Metalurgi 2006, khususnya Hamzah Basari selaku rekan penelitian.
5. Pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan namanya.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini jauh dari kesempurnaan, untuk itu kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sangat penulis harapkan untuk perbaikan dimasa yang akan datang dan bermanfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, Juni 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademika Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Bunga Puspita

NPM : 0606074672

Program Studi : Metalurgi dan Material

Departemen : Metalurgi dan Material

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**STUDI PENGARUH PENINGKATAN TEMPERATUR
OVERHEAT TERHADAP PERTAMBAHAN PANJANG
CACAT, STRUKTUR MIKRO DAN NILAI KEKERASAN
PADA MATERIAL *TURBINE BLADE*
*NICKEL BASED SUPERALLOY***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak bebas royalti noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis atau pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 21 Juni 2010

Yang menyatakan

(Bunga Puspita)

ABSTRAK

Nama : Bunga Puspita
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : **Studi Pengaruh Peningkatan Temperatur *Overheat* Terhadap Pertambahan Panjang Cacat, Struktur Mikro dan Nilai Kekerasan pada *Turbin Blade Nickel Based Superalloy***

Material uji merupakan turbine blade yang merupakan komponen engine gas turbin pesawat yang diaplikasikan pada temperature tinggi diperkuat dengan mekanisme pengendapan. Dalam aplikasinya pada engine pesawat, *turbine blade* terekspos suhu 548°C – 1044°C. Namun tidak jarang pada sistem mengalami kondisi *over temperature* yang disebut *overheat*. Setelah dilakukan penelitian tentang pengaruh temperatur *overheat* pada temperatur 900 °, 1000 °, 1100 °, 1200 °C dengan waktu tahan selama 1 jam, didapatkan hasil adanya perubahan struktur mikro, pertambahan panjang cacat dan peningkatan kekerasan.

Kata kunci :

material *nickel base superalloy*, *over temperature*, pengerasan pengendapan, turbin blade

ABSTRACT

Name : Bunga Puspita
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Title : **Study of Increased Overheat Temperature on Defect Propagation, Microstructure and Hardness Number of Nickel Based Superalloy Turbine Blade**

Sample of this research is a turbine blade that is applied in gas turbine which is in high temperature condition, strengthened by precipitation hardening mechanism. In service, it is frequently exposed temperature 548°C – 1044°C and sometimes above that point, called overheat. Research has been done by heating the sample with increased temperature from 900 to 1200 °C and the result was investigated. it obtained microstructure change, defect propagation and increased hardness number.

Keyword:

Nickel Based Superalloy, Overheat, Precipitation Hardening, Turbine Blade

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Material Superalloy.....	6
2.2. Klasifikasi Superalloy.....	9
2.2.1. Iron Base Superalloy.....	9
2.2.2. Kobalt Base Superalloy.....	9
2.2.3. Nikel Base Superalloy.....	9
2.3. Aplikasi Material Superalloy.....	10
2.4. Fasa yang terdapat pada Superalloy.....	10
2.4.1. γ and γ' phase.....	10
2.4.2. Karbida.....	11
2.4.3. Gamma Double Prime.....	13
2.4.4. Borida.....	13
2.4.5. Fasa TCP.....	13
2.5. Nikel Base Superalloy.....	14
2.6. Turbin Gas dan Turbin Blade.....	15

2.6.1. Turbin Gas.....	15
2.6.2. Turbin Blade.....	16
2.7. Pertumbuhan Butir.....	20
2.8. Kekerasan Nikel Base Superalloy.....	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1. Bahan Penelitian.....	23
3.2. Alat Penelitian.....	23
3.3. Prosedur Penelitian.....	24
3.4. Persiapan Benda Uji.....	25
3.5. Pemanasan Benda Uji.....	25
3.6. Pendinginan Cepat.....	25
3.7. Pengamatan Pelebaran Cacat.....	25
3.8. Pengamatan Struktur Mikro Benda Uji.....	26
3.8.1. Persiapan Benda Uji.....	26
3.8.2. Pengamatan Metalografi.....	27
3.9. Pengujian Kekerasan.....	27
BAB IV HASIL PENELITIAN	
4.1. Pengamatan Komposisi.....	28
4.2. Pengamatan Pelebaran Cacat.....	30
4.3. Pengamatan Struktur Mikro.....	32
4.4. Pengamatan Kekerasan.....	42
BAB V KESIMPULAN.....	45
DAFTAR PUSTAKA.....	46
LAMPIRAN.....	48

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Skema Gas Turbine	2
Gambar 2.1. Tabel Periodik	6
Gambar 2.2. Tabel Efek Paduan pada <i>Superalloy</i>	7
Gambar 2.3. Struktur Kristal dari Gamma	10
Gambar 2.4. Struktur Kristal dari Gamma Prime	11
Gambar 2.5. Bentuk Karbida	12
Gambar 2.6. Fasa pada <i>Nikel base Superalloy</i>	12
Gambar 2.7. Fasa TCP	13
Gambar 2.8. <i>Turbine Section</i>	16
Gambar 2.9. <i>Turbine Blade</i>	17
Gambar 2.10. Skema Komponen dan Aksesoris Turbin Blade.....	18
Gambar 2.11. Jenis Kegagalan pada Turbine Blade.....	19
Gambar 2.12. Diagram Fasa.....	22
Gambar 3.1. Sampel Penampang Atas 10x10 mm.....	24
Gambar 3.2. Penampakan Permukaan Turbine Blade.....	25
Gambar 3.3 Hasil Mounting Sampel.....	25
Gambar 4.1. Kurva Perhitungan Lebar Cacat.....	30
Gambar 4.2. Hasil SEM Penampakan Fasa Sampel Awal 350x.....	34
Gambar 4.3. Hasil SEM Penampakan Fasa Sampel Awal 500x.....	34
Gambar 4.4. Hasil Mikrostruktur tanpa pemanasan perbesaran 200x.....	36
Gambar 4.5. Hasil Mikrostruktur tanpa pemanasan perbesaran 500x.....	36
Gambar 4.6. Hasil Mikrostruktur pemanasan 900 ⁰ c perbesaran 200x.....	37
Gambar 4.7. Hasil Mikrostruktur pemanasan 900 ⁰ c perbesaran 500x.....	37
Gambar 4.8. Hasil Mikrostruktur pemanasan 1000 ⁰ c perbesaran 200x.....	38
Gambar 4.9. Hasil Mikrostruktur pemanasan 1000 ⁰ c perbesaran 500x.....	38
Gambar 4.10 Hasil Mikrostruktur pemanasan 1100 ⁰ c perbesaran 200x.....	39
Gambar 4.11 Hasil Mikrostruktur pemanasan 1100 ⁰ c perbesaran 500x.....	39
Gambar 4.12 Hasil Mikrostruktur pemanasan 1200 ⁰ c perbesaran 200x.....	40
Gambar 4.13 Hasil Mikrostruktur pemanasan 1200 ⁰ c perbesaran 500x.....	40
Gambar 4.14. Kurva Kekerasan Benda Uji Nikel Base Superalloy.....	43

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Komposisi <i>Nikel base Superalloy</i>	28
Tabel 4.2. Perhitungan Lebar Cacat.....	30
Tabel 4.3. Proses Etsa dan Zat Etsa benda uji	32
Tabel 4.4. Kekerasan Benda Uji.....	42



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Penelitian

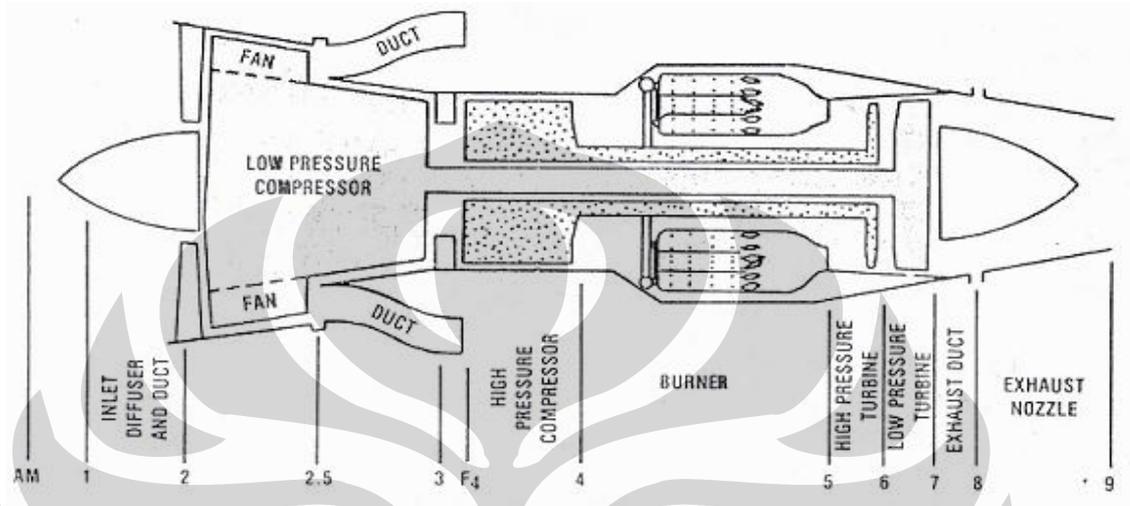
Pada perkembangan industri *aircraft* yang sangat cepat membutuhkan kemampuan peralatan yang tinggi. Kemampuan peralatan ini sangat dipengaruhi oleh desain, kondisi operasi dan pemilihan material. Pada industri *aircraft* memiliki banyak komponen yang tersusun secara sistematis. Jenis komponen itu diantaranya adalah turbin blade. Turbin blade merupakan bagian komponen dari mesin engine pesawat yang terekspose pada temperatur tinggi, yang akan mengakibatkan perubahan struktur mikro bila terjadi *overheat*. Dalam aplikasinya pada engine pesawat, *turbine blade* terekspos suhu $548^{\circ}\text{C} - 1044^{\circ}\text{C}$ [1]. Namun dalam operasinya, tidak jarang sistem mengalami kondisi *over temperature* yang biasa disebut *overheat*. *Overheat* terjadi karena beberapa hal antarlain: tersumbatnya saluran sistem pendingin yang terdapat pada *turbine section* dan kesalahan prosedur operasi[2].

Sistem mesin turbin gas propulsi turbofan merupakan pengembangan dari sistem propulsi turbojet dan propeller untuk meningkatkan efisiensi propulsi dengan menurunkan kecepatan jet tetapi tidak sama dengan kecepatan pesawat terbang dan juga menambah jumlah aliran masa udara masuk melalui fan, sehingga didapat gaya dorong dan efisiensi propulsi yang besar [3][4].

Mesin turbofan JT8D adalah mesin yang cukup populer digunakan untuk propulsi pesawat terbang Boeing 727, Boeing 737, DC9, dan MD80. Mesin ini merupakan mesin dengan poros ganda untuk tekanan rendah dan tekanan tinggi. Tekanan rendah dengan enam tingkat kompresor dan rasio tekanan 4,3 digerakkan oleh tiga tingkat turbin. Tekanan tinggi dengan tujuh tingkat kompresor dan rasio tekanan 4 digerakkan oleh satu tingkat turbin [5].

Salah satu komponen dalam engine pesawat adalah turbin blade yang terdapat pada sistem gas turbin. Turbin blade berfungsi untuk mentransformasikan sejumlah besar energi kinetik dari gas buang hasil pembakaran menjadi sejumlah usaha mekanis yang mampu menggerakkan kompresor dan peralatan lainnya.

Sehingga turbin blade memiliki stress terbesar dari sistem engine pesawat. Turbin blade engine pesawat ini dibuat dari material yang memiliki ketahanan pada temperatur tinggi. Sehingga material yang biasa digunakan dalam turbin blade adalah jenis superalloy.



Gambar 1.1. Skema Gas Turbine [4]

Nickel based superalloy merupakan material yang paling banyak digunakan pada temperatur tinggi. Namun penggunaan material ini pada temperatur yang sangat tinggi dapat mengakibatkan perubahan mikrostruktur,

salah satunya diakibatkan oleh *overheat*, yang dapat mempengaruhi sifat mekanik dari material tersebut.

Kandungan paduan dalam *superalloy* sangat menentukan kemampuan dari material tersebut. Paduan yang dimiliki dari *superalloy* dapat mempengaruhi sifat mekanis dengan pembentukan fasa dan endapan yang relatif stabil pada temperatur tinggi. Berdasarkan mekanisme kegagalan pada temperatur tinggi, struktur material dengan ukuran butir yang lebih besar tahan terhadap *creep rupture*. Selama pemanasan atau dalam kondisi temperatur tinggi, butir akan mengalami pertumbuhan butir dan penambahan kekuatan pada temperatur tinggi.

Pada *Nickel based superalloy*, paduan memberikan pengaruh dalam mengontrol besar butir austenit dan memberikan kekuatan temperatur tinggi dengan dengan membentuk endapan pada butir dan mengalami migrasi batas butir dalam pertumbuhan butir selama pemanasan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, peneliti melakukan suatu penelitian untuk mengetahui fenomena pengaruh temperatur pemanasan terhadap kekerasan material pada temperatur tinggi yang diamati dengan melihat kondisi struktur mikro dari *Nickel based superalloy* dengan perbandingan nilai kekerasan dan mengamati penambahan panjang cacat *dent* pada pemanasan dengan temperatur 900 °, 1000 °, 1100 °, 1200 °C.

1.2. Perumusan Masalah

Pada material uji *nickel base superalloy* yang diaplikasikan pada salah satu komponen dari turbin gas yaitu turbin blade yang diproduksi oleh PT X. Turbin blade ini menggunakan mekanisme penguatan dengan cara pengerasan pengendapan, yang dioperasikan pada temperatur tinggi. Dalam aplikasinya pada engine pesawat, *turbine blade* terekspos suhu 548°C – 1044°C[3]. Namun dalam operasinya, tidak jarang sistem mengalami kondisi *over temperature* yang biasa disebut *overheat*. *Overheat* terjadi karena beberapa hal antaralain: tersumbatnya saluran sistem pendingin yang terdapat pada *turbine section* dan kesalahan prosedur operasi yang dapat mengalami kegagalan dan *reject* dikarenakan pengaruh dari temperatur *overheat* dapat menurunkan sifat mekanik dari material tersebut [2].

Untuk mengetahui pengaruh dari temperatur *overheat* tersebut, maka peneliti melakukan suatu penelitian. Peneliti melakukan pemanasan pada material uji dengan kenaikan temperatur dari kondisi awal dan kondisi diatas temperatur operasi normal. Dengan pemanasan tersebut, dapat diamati kondisi struktur mikro dari *nickel base superalloy* dan diamati pula kekerasan material uji dengan menggunakan metode *rockwell*.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan Penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Mengamati panjang cacat *dent* pada *Nickel based superalloy* selama pemanasan pada temperatur 900 °, 1000 °, 1100 °, 1200 °C.
- Mengamati struktur mikro pada *Nickel based superalloy* selama pemanasan pada temperatur 900 °, 1000 °, 1100 °, 1200 °C.
- Mengamati nilai kekerasan *Nickel based superalloy* sebelum dan sesudah pemanasan pada temperatur 900 °, 1000 °, 1100 °, 1200 °C.

1.4. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian dilakukan di Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Ruang lingkup penelitian ini adalah sebagai berikut: Menggunakan material *Nickel based superalloy* sebagai benda uji.

Tabel 1.1. Komposisi *Nickel based superalloy Turbine Blade*

Elemen	Ni	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	Fe	Co	Ti	Al
(%wt)	58.2	0.11	0.13	8.74	5.52	6.03	0.302	11.2	0.424	>7
	Nb	W	V	C	S	Hf	Mg	Ta	Zr	
	0.0232	1.72	0.226	<0.002	0.0443	0.02	0.0298	0.12	0.0781	

Penelitian dilakukan dengan menggunakan parameter proses berikut :

- a. Kondisi awal sampel (Tanpa perlakuan panas).
- b. Temperatur 900°, 1000°, 1100°, 1200°C.
- c. Waktu tahan yang digunakan sama yaitu 1 jam.
- d. Media Quench yang digunakan adalah air.
- e. Pengamatan Endapan dan elemen penyusunnya dengan menggunakan SEM dan EDX.
- f. Pengujian kekerasan material uji menggunakan *Rockwell test*.

1.5. Sistematika Penulisan

Penulisan hasil penelitian ini dibagi dalam beberapa bab yang saling berhubungan. Adapun urutan dalam penulisan laporan ini terlihat pada uraian dibawah ini :

Bab 1 : Pendahuluan

Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang penelitian, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan penelitian.

Bab 2 : Tinjauan Pustaka

Pada bab ini diuraikan tentang studi literatur yang berkaitan dengan penelitian skripsi ini.

Bab 3 : Metodologi Penelitian

Pada bab ini berisi prosedur penelitian, daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

Bab 4 : Hasil dan Pembahasan

Bab ini berisi data-data hasil penelitian dan analisa dari hasil penelitian tersebut yang dibandingkan dengan hasil dari studi literatur

Bab 5 : Penutup

Bab ini berisikan kesimpulan akhir berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian ini

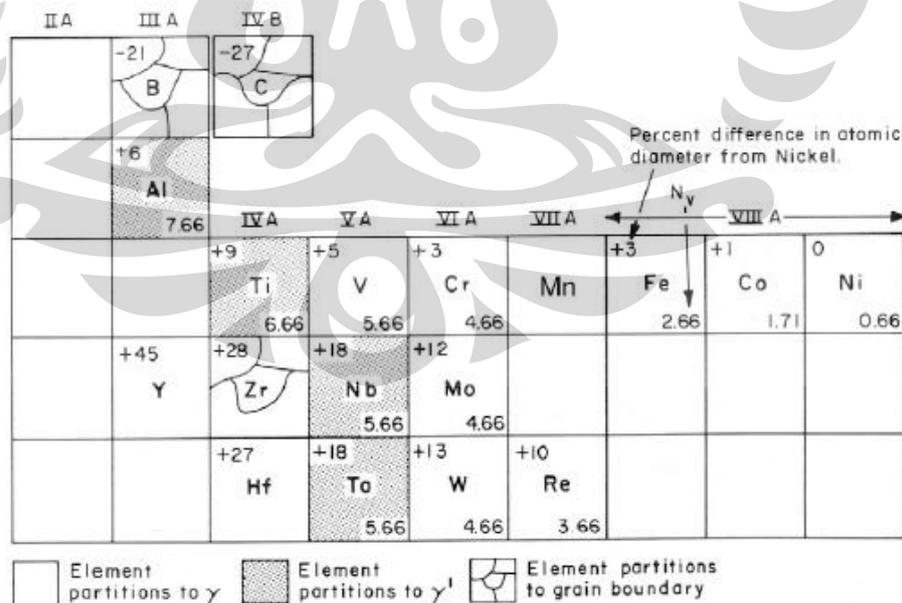
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Material *superalloy*

Superalloy dikembangkan untuk penggunaan pada temperatur tinggi dengan kemampuan strukturnya dari degradasi akibat beroperasi pada temperatur tinggi [6]. *Superalloy* umumnya digunakan pada temperatur diatas 540⁰C. Pada umumnya digunakan jenis *nickel based superalloy* memiliki struktur FCC. *Superalloy* merupakan kombinasi dari kekuatan temperatur tinggi, ketahanan terhadap lingkungan seperti nitridasi, karburisasi, oksidasi, dan sulfidasi serta memiliki ketahanan *creep* yang tinggi serta memiliki kestabilan metalurgi [7]. Sifat tersebut dapat dikontrol dengan melakukan kombinasi komposisi penyusun dan proses pembuatannya seperti perlakuan panas.

Paduan utama dari *superalloy* adalah nikel, kobalt, nikel-besi, yang mana dapat dilihat pada sistem periodik pada golongan VIII.



Gambar 2.1. Tabel Periodik [1]

Superalloy difokuskan pada penambahan unsur paduan untuk mendapatkan sifat yang diinginkan.

Gambar 2.2. Tabel Efek paduan pada *superalloy* [2]

Effect (a)	Fe-Base	Co-Base	Ni-Base
1. <i>Solid-solution strengthening</i>	Cr, Mo	Nb, Cr, Mo, Ni, W, Ta	Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta
2. <i>Carbide form :</i>	Ti	Ti	W, Ta, Ti, Mo,
<i>MC type</i>	.....	Cr	Nb
<i>M₇C₃ type</i>	Cr	Cr	Cr
<i>M₂₃C₆ type</i>	Mo	Mo, W	Cr, Mo, W
<i>M₆C type</i>			Mo, W
3. <i>Carbonitrides :</i>	C, N	C, N	
<i>M(CN) type</i>			C, N
4. <i>Promotes general precipitation of carbides</i>	P Al, Ni, Ti	..........	..........
5. <i>Forms γ' Ni₃ (Al, Ti)</i>			Al, Ti
6. <i>Retards formation of hexagonal (Ni₃Ti)</i>	Al, Zr	.....	.....
7. <i>Raises solvus temperature of γ'</i>	.....	.....	Co
8. <i>Lowers solvus temperature of γ'</i>	Al, Ti, Nb	Al, Mo, Ti(b), W, Ta	Cr
9. <i>Hardening precipitates and/or intermetallics</i>	Cr	Al, Cr, Ta	Al, Ti, Nb Al, Cr, Ta
10. <i>Oxidation resistance</i>	La, Y	La, Y, Th	
11. <i>Improves hot corrosion resistance</i>	Cr	Cr	La, Th Cr
12. <i>Sulfidation resistance</i>			
13. <i>Enhance creep-rupture properties by grain-boundary morphology changes.</i>	B	B, Zr	B(c), Zr
14. <i>Improves intermediate-temperature ductility</i>	..... .....	..... Ni ₃ Ti	B, C, Zr
15. <i>Causes grain-boundary segregation</i>			.....
16. <i>Facilities working</i>			
(a) <i>Not all of these effects necessarily occur in a given alloy</i>			
(b) <i>Hardening by precipitation of Ni₃Ti also occur if sufficient Ni is present.</i>			
(c) <i>If present in large amounts, borides are formed</i>			

Superalloy dapat dikuatkan dengan mekanisme penguatan seperti [8]:

1. Penguatan Larutan Padat (*Solid Solution Strengthening*)

Larutan padat adalah campuran homogen dalam keadaan padat. Penguatan larutan padat terjadi jika atom dengan ukuran yang berbeda ditambahkan sebagai paduan pada saat pembentuk material *superalloy*. Elemen penyusun dalam penguatan larutan padat adalah krom, molibdenum, dan tungsten.

2. Endapan karbida dan borida (*Carbide and boride precipitation*)

Pada *Nikel based superalloy*, untuk mendapatkan kekuatan tinggi dapat dihasilkan dari endapan *gamma prime* yang mengendap dalam matriks austenit. Unsur seperti Aluminium, titanium dan niobium merupakan pembentuk endapan *gamma prime* yang mengendap selama proses perlakuan panas dari *superalloy*. Variasi waktu dan temperatur perlakuan panas *superalloy* merupakan parameter penting dalam mengontrol dan mengoptimalkan ukuran serta distribusi dari endapan.

3. Pengerasan regangan (*Strain Hardening*)

Endapan karbida dan borida dapat dihasilkan dari sejumlah kecil unsur karbon dan boron yang ditambahkan pada material *superalloy*. Endapan karbida dan borida terdistribusi pada butir dan batas butir. Formasi dari karbida memberikan pengaruh pada peningkatan kekuatan pada *superalloy*. Primary karbida dibentuk oleh unsur krom, tantalum, molibdenum dan tungsten.

4. Pengerasan endapan (*Precipitation Hardening*)

Beberapa material *superalloy* dapat memiliki kekuatan yang tinggi tanpa pembentuk *gamma prime* precipitate. Hal ini didasari oleh perlakuan mekanis yang dapat meningkatkan kekuatan.

2.2. Klasifikasi *superalloy* [6]

2.2.1. Iron Base *superalloy*

Iron base superalloy adalah jenis *superalloy* dengan unsur Fe yang dominan dan unsur krom dan Nikel yang cukup signifikan. *Iron base superalloy* dapat dikuatkan dengan mekanisme kekuatan pembentukkan karbida atau endapan intermetalik serta larutan padat. Endapan intermetalik yang terbentuk adalah *gamma prime* dengan konfigurasi $Ni_3(Al,Ti)$ dan kadar nikel lebih dari 20%. *Iron base superalloy* dapat digunakan pada temperatur diatas $540^{\circ}C$.

Pada proses pembuatannya, ada penambahan beberapa unsur untuk penguatan seperti nikel, aluminium, titanium dan niobium. Penambahan unsur karbon memberikan pengaruh dalam peningkatan kekuatan *iron base superalloy*. Karbon akan membentuk karbida yang akan mengendap dalam butir dan batas butir. Penambahan unsur krom, nikel dan mangan dapat memberikan efek ketahanan oksidasi.

2.2.2. Kobalt Base *superalloy*

Kobalt base superalloy adalah jenis *superalloy* dengan unsur penyusun utama kobalt dengan penambahan unsur paduan lain yang cukup signifikan. Penguatan material kobalt *base superalloy* ini dengan proses pembentukkan larutan padat dan karbida. Jenis material kobalt *base* ini diantaranya Hayness 188, S-816, MP-35N, dan Satellite 6B.

2.2.3. Nickel base *superalloy*

Nickel base superalloy adalah jenis *superalloy* dengan unsur penyusun utama *nickel* dan penambahan unsur paduan seperti krom, kobalt, besi, molibdenum, tungsten, dan tantalum. Kadar nikel sekitar 30-70% dan krom sekitar 30%. Kombinasi nikel dan krom ini memberikan ketahanan oksidasi yang sangat baik pada temperatur tinggi. Jenis penguatan pada material *nikel base superalloy* adalah pembentukkan larutan padat dan endapan intermetalik fasa

kedua. Endapan intermetalik ini dihasilkan oleh unsur penyusun yang terdiri dari aluminium, titanium, dan niobium [9].

2.3. Aplikasi Material *superalloy* [10]

Penggunaan material *superalloy* sangat luas, umumnya digunakan pada temperatur tinggi dan daerah yang rentan terhadap korosi. Diantaranya :

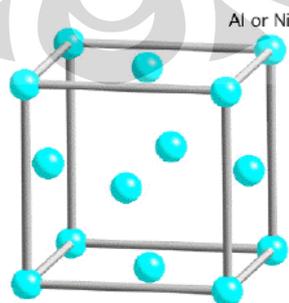
- Industri pesawat terbang : baut, ruang pembakaran (*chamber*), *casings*, *blades*, *vans*, *thrust reverses*, *shaft*, *afterburner*, *cases*, *burner cans*, sistem pembuangan.
- Industri power plant : baut, *blades*, *stack gas reheaters*.
- Reciprocoating engines* : *turbochargers*, *valve seat insert*, *hot plugs*, katup pembuangan.
- Industri logam : *dies*, *casting dies*, peralatan pengerjaan, *oven*, *exhaust fan*.
- Aplikasi medis : peralatan dokter gigi, peralatan-peralatan internis.

2.4 Fasa yang terdapat pada struktur mikro *superalloy* adalah [1]:

2.4.1. γ and γ' phase

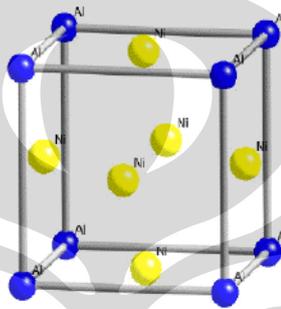
Ada dua fasa kesetimbangan secara umum yang terdiri dari gamma (γ) dan gamma prime (γ'). Kedua fasa memiliki struktur fcc, mempunyai dimensi kisi yang identik dan juga orientasi yang sama. Sehingga kedua fasa adalah koheren.

Fasa γ adalah non magnetik. Biasanya mengandung larutan padat seperti kobalt, Fe, krom, molibdenum dan tungsten. Dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. struktur kristal dari gamma (γ) [11]

Pada matriks nikel, endapan gamma prime (γ') terbentuk dengan konfigurasi $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$. Endapan ini merupakan fasa intermetalik yang memiliki kestabilan yang baik karena energi permukaan yang rendah. Dapat dilihat pada gambar 2.4. Aluminium dan titanium adalah komponen utama untuk terjadinya endapan pada fraksi volume yang tinggi di dalam matriks. Paduan lainnya seperti kromium, hafnium, niobium dan tantalum dapat termasuk kedalam fasa γ' . Sepanjang batas butir terdapat **lapisan tipis γ'** yang berfungsi meningkatkan ketahanan terhadap peristiwa *creep rupture*.



Gambar 2.4. Struktur kristal dari gamma prime (γ') [11]

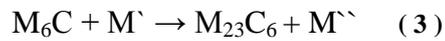
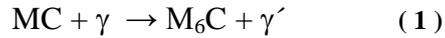
2.4.2. Karbida

Penambahan kandungan karbon sekitar 0.05-0.2% yang dikombinasikan dengan paduan yang reaktif dan refraktori, seperti titanium, tantalum, dan hafnium akan terbentuk karbida (seperti: TiC , TaC , atau HfC). Selama pemanasan karbida ini mulai terdekomposisi dan berbentuk lower karbida seperti M_{23}C_6 dan M_6C . Pada *nikel base superalloy*, jenis karbida yang sering ditemukan adalah MC , M_6C , M_7C_3 , dan M_{23}C_6 (dimana M adalah logam pembentuk karbida). Karbida jenis MC berbentuk kotak dan terdistribusi secara acak namun tidak diinginkan berada dalam struktur. Karbida jenis M_6C berbentuk kotak, terbentuk pada batas butir dan berfungsi untuk mengontrol ukuran butir. Paduan pada karbida ini adalah pada umumnya molibdenum, tungsten, kromium, kobalt, dan tantalum. Karbida jenis M_7C_3 berada pada batas butir dan menguntungkan jika berbentuk sebagai partikel sendiri.

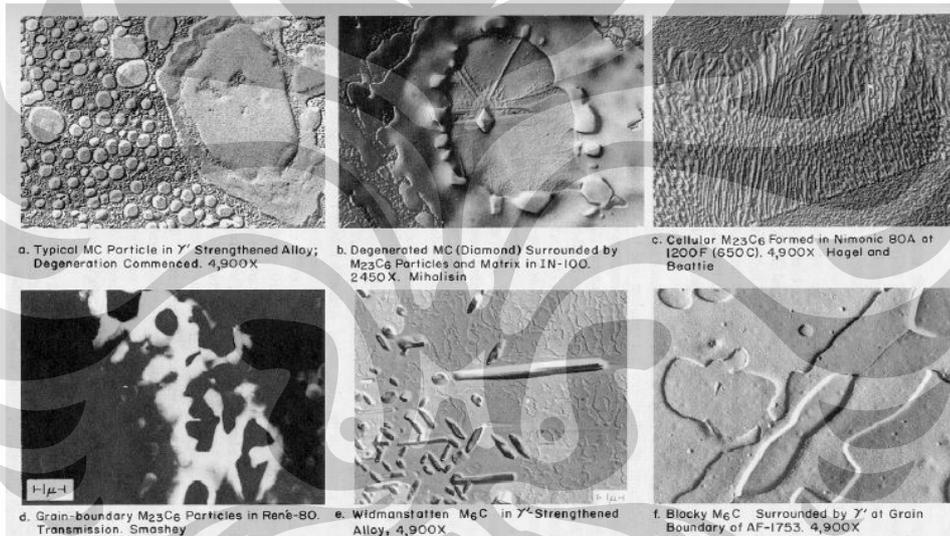
M_{23}C_6 memiliki kecenderungan mengendap pada batas butir. Paduan pada karbida ini adalah kromium, besi, tungsten dan molibdenum. Ketika M_{23}C_6

terbentuk di dalam batas butir, kandungan kromium di dalam matriks akan berkurang dan kelarutan untuk γ' akan meningkat di daerah tersebut.

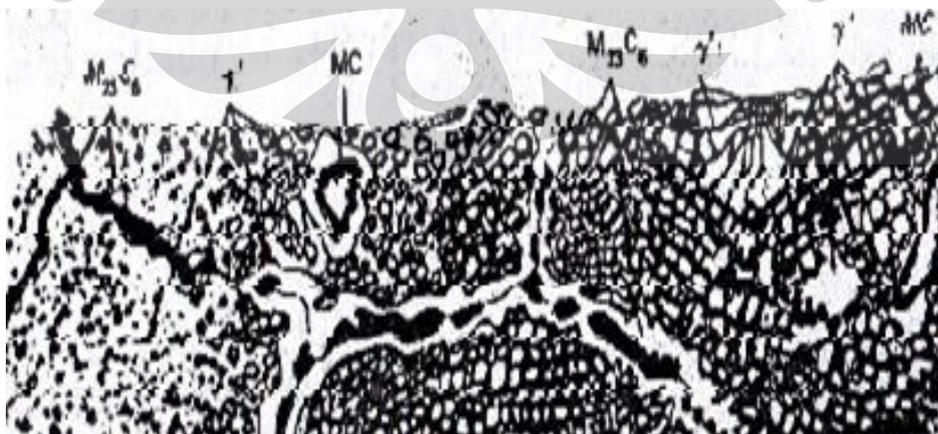
Formula untuk pembentukan pada karbida adalah :



M' dan M'' dapat disubstitusikan dengan kromium, kobalt, nikel atau molibdenum. Semua jenis karbida ini memiliki struktur kristal fcc dan meningkatkan *rupture strength* pada temperatur tinggi. Beberapa bentuk dari karbida dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Bentuk karbida [11]



Gambar 2.6. Fasa pada Nickel base Superalloy [8]

2.4.3. Gamma Double Prime

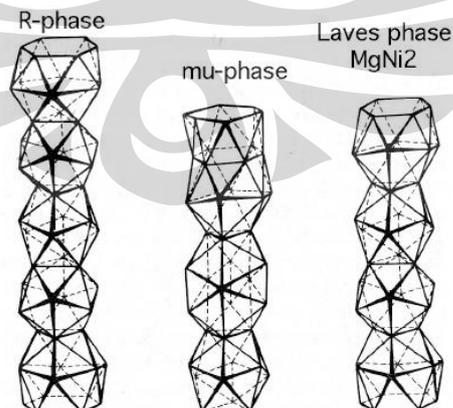
Gamma double prime memiliki struktur BCT yang koheren dengan komposisi Ni_3Nb . Adanya *gamma double prime* berfungsi sebagai agen penguat pada *nikel base superalloy*. Namun endapan ini tidak stabil sehingga dapat berubah menjadi *gamma prime* dan fasa delta pada penggunaan dalam waktu yang lama yang mengakibatkan penurunan kekuatan secara tajam [6].

2.4.4. Borida

Borida adalah partikel yang keras, berbentuk kotak dan berada pada batas butir dengan konfigurasi M_3B_2 . Borida terbentuk karena adanya penambahan unsur boron untuk peningkatan *creep-rupture nickel based superalloy* [9].

2.4.5. Fasa TCP

Fasa TCP terbentuk akibat komposisi yang tidak tepat, sehingga dapat menyebabkan retak atau kegagalan yang prematur dan menimbulkan *brittle failure* selama proses pemanasan. Struktur pada fasa TCP terdiri dari atom yang close-packed pada lapisan dengan jarak interatomik yang relatif besar satu dengan yang lain. Karakteristiknya seperti lapisan sandwich dengan atom yang besar. Dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.7. fasa TCP [11]

Sedangkan fasa γ' adalah close-packed di seluruh arah dan dikenal dengan *geometrically close-packed* (GCP). Paduan mengandung logam transisi seperti tantalum, niobium, kromium, tungsten atau molybdenum, yang sebagian besar paduan *violable*. Bentuk umum dari TCP adalah fasa σ , μ dan Laves.

Fasa σ seperti plate dan keras memiliki komposisi tipe dari $(Cr,Mo)_x(Ni,Co)_y$, memiliki 30 atom tiap sel, strukturnya mirip dengan karbida $M_{23}C_6$ dan sebagian besar bentuk yang tak diinginkan. Inisiasi retak disebabkan oleh bentuk dan kekerasan pada fasa yang mengakibatkan brittle failure. Fasa σ juga bertanggung jawab pada kependekkan umur *creep rupture*. Fasa μ memiliki komposisi yang sama seperti fasa σ dengan paduan utamanya molibdenum dan kobalt. Struktur dari fasa μ mirip dengan karbida jenis M_6C dan memiliki 13 atom per sel.

Fasa laves memiliki komposisi dengan tipe jenis AB_2 seperti $MoCo_2$ dan $TaCo_2$, yang dapat berdampak negatif pada keuletan tarik dan sifat creep pada temperatur tinggi. Biasanya semua jenis TCP memiliki struktur plate yang berdampak buruk pada sifat mekanik seperti keuletan dan *creep rupture*. TCP berpotensi dalam meningkatkan kekuatan γ dan γ' , meskipun menurunkan kekuatan creep dan dapat mengakibatkan inisiasi retak dikarenakan *brittle nature* dari TCP.

2.5. *Nickel Base superalloy* [6]

Karakteristik utamanya adalah kestabilan fasa yang tinggi dari matriks nikel berstruktur fcc dan kemampuan untuk dikuatkan dalam rekayasa. Dimana matriks nikel dapat diperkuat dengan penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*), endapan karbida atau dengan pengerasan pengendapan.

Nikel based superalloy dapat dikuatkan dengan penguatan secara solid solution dan precipitation. Penguatan solid solution superalloy seperti Hastelloy dapat digunakan pada burner dan aplikasi combustion dalam gas turbine.

Nickel based superalloy adalah sebagian besar paduan nikel yang mengandung kromium, aluminium, titanium, B, zirkonium, karbon, molibdenum, wolfram, tantalum, hafnium, dan niobium.

Kromium dan aluminium sangat penting untuk ketahanan oksidasi. Unsur-unsur pembentuk karbida yaitu karbon, kromium, molibdenum, wolfram, karbon, niobium, tantalum, titanium dan hafnium. Unsur-unsur kobalt, besi, kromium, niobium, tantalum, molibdenum, tungsten, vanadium, titanium dan aluminium adalah termasuk penguatan solid solution, diantara fasa γ dan γ' .

Nikel yang merupakan elemen terbesar merupakan matriks dalam mekanisme larutan padat, yang dikenal dengan sebutan gamma (γ) atau terkadang dikenal dengan matriks *austenite*. Fasa kedua selain mekanisme presipitasi adalah karbida dan partikel oksida yang terdispersi yang memberikan keunggulan pada material ini. Produk komersil Nickel base superalloy antara lain Inconel, Incoloy, Hastelloy, Nimonic dan MAR-M.

2.6. Turbin Gas dan Turbin Blade

2.6.1. Turbin Gas

Pengertian dari turbin gas adalah sistem mesin penggerak *propulsi* pada pesawat terbang. Salah satu tipe dari turbin gas adalah JT8D yang dikategorikan jenis turbofan. JT8D ini memiliki dua jenis yaitu JT8D-7 dan JT8D-8, keduanya memiliki perbedaan pada daya dorong. Dimana JT8D-7 memiliki daya dorong pada saat *take off* sebesar 14000 pound sedangkan JT8D-8 memiliki daya dorong sebagai 14500 pound pada suhu 29⁰C. Komponen dari JT8D adalah sebuah kompresor yang terdiri dari 13 stage secara terpisah, sebuah ruang pembakaran, dan sebuah turbin yang terdiri dari empat stage. Aliran pada JT8D ini termasuk aliran aksial. JT8D memiliki mesin yang sudah dilengkapi dengan sebuah *full length annulat fan discharge duct*.

Secara garis besar, spesifikasi dari JT8D adalah:

- Tipe : turbofan Axial-flow,
- Tipe ruang bakar : can – Annular
- Jumlah ruang bakar : 9, yang tersusun seperti arah jarum jam

(clockwise direction)

Tipe Kompresor : Dua buah spool yang terdiri atas 13 stages, front fan atau baling depan, kompresor tekanan rendah N1 dengan enam stages dan Kompresor tekanan tinggi N2 dengan tujuh stage.

100% N1 = 8589 RPM

100% N2 = 12245 RPM

Pressure ratio (Rasio tekanan): 15,8 : 1

Tipe turbin : 4 stage, terpisah, memiliki stage pertama bertekanan tinggi N2 dan stage ke-2,3 dan ke -4 bertekanan rendah N1.

Berat QEC : 3950 lbs (1800 kg)

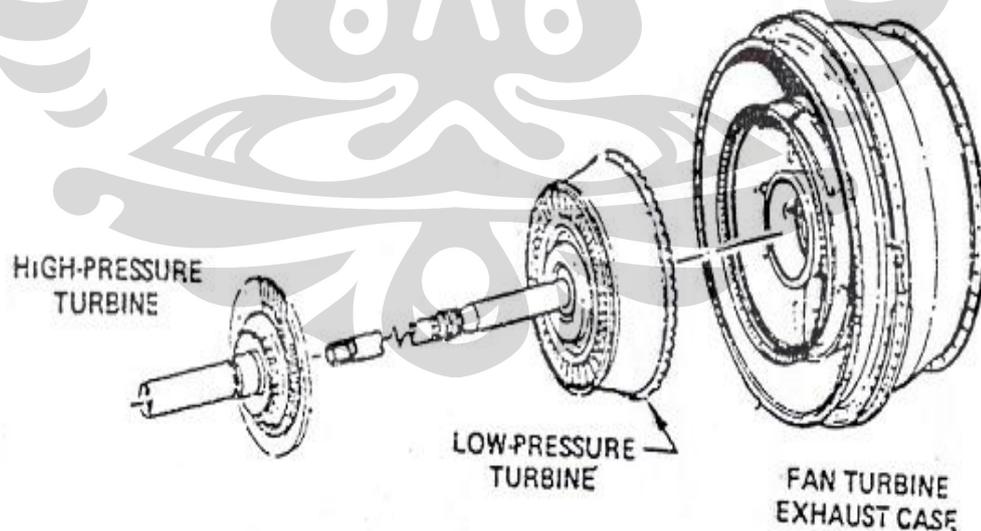
Panjang QEC : 17,3 ft (5,25 m)

Diameter max. : 4,5 ft (1,37 m)

Aliran Udara : basic engine : 180 lbs/detik

Fan : 190 lbs/detik

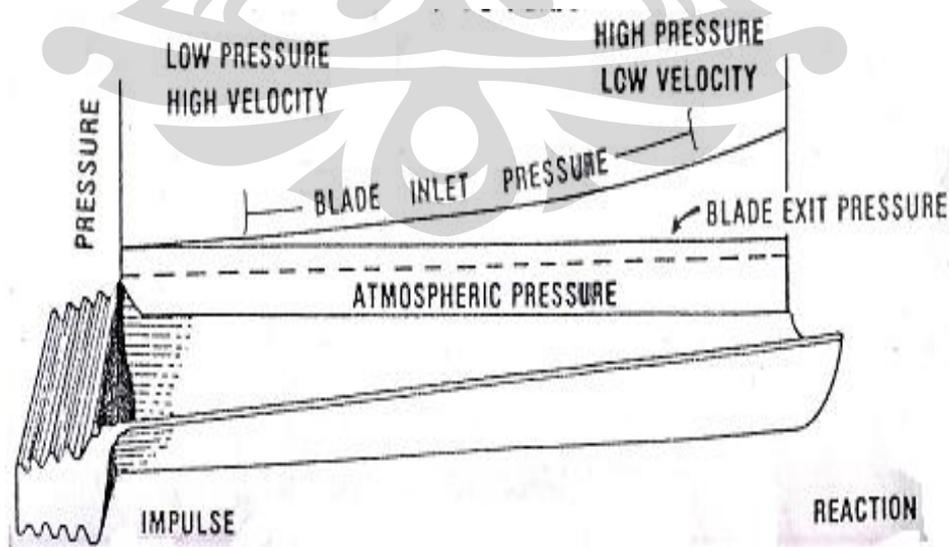
Bagian Mesin : ada 6 seksi secara umum yakni air inlet (masuknya udara), kompresor, turbin, Pembuangan (Exhaust), accessories drives, dan Fan discharge.



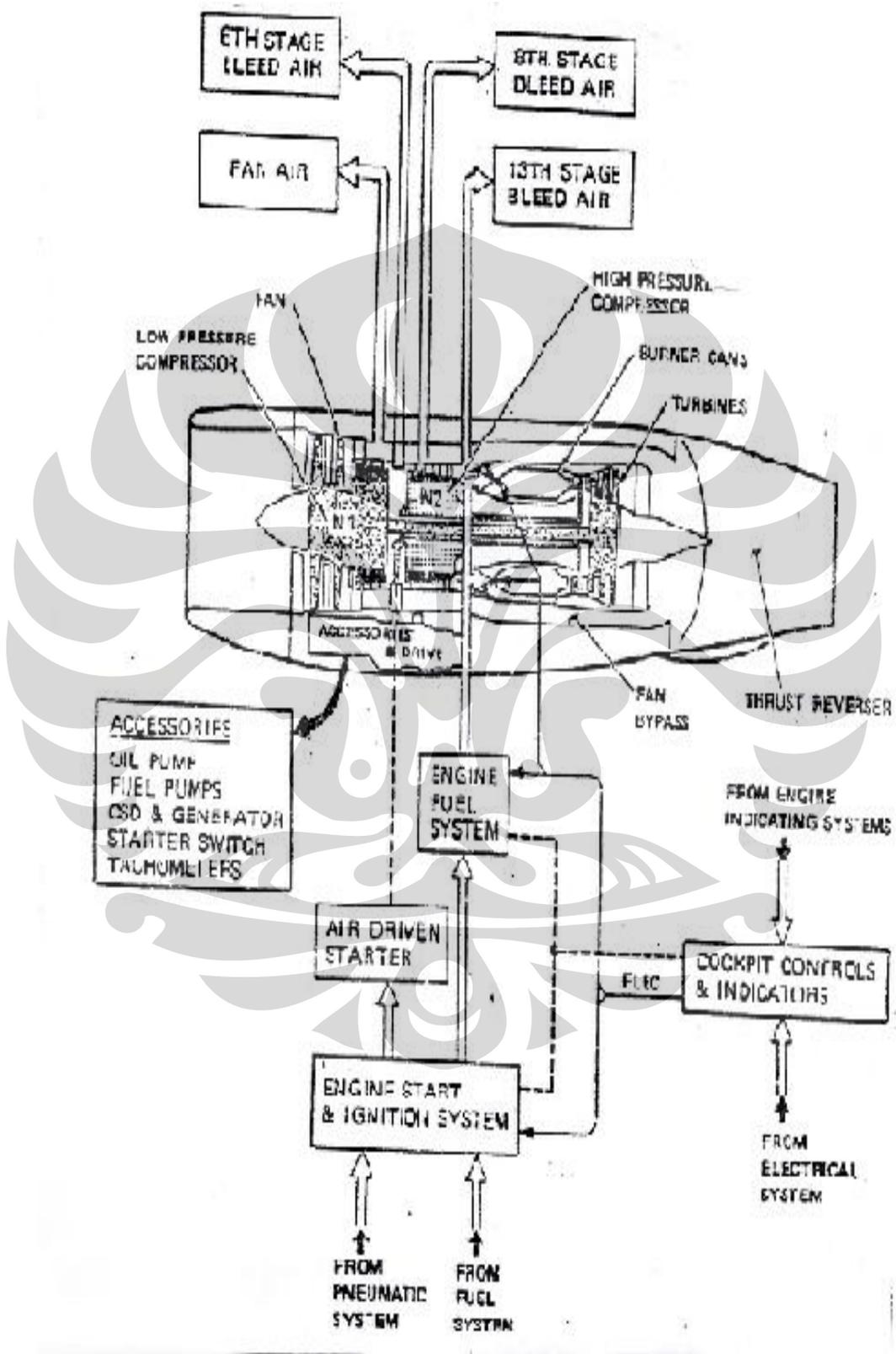
Gambar 2.8. Turbine Section dari kiri ke kanan: High Pressure Turbine – Low Pressure Turbine[12]

2.6.2. Turbin Blade

Turbine blade terangkai dalam *turbine section* pada sistem *gas turbine*. *Turbin section* berada tepat setelah *combuster section* yang berfungsi mentransformasikan sejumlah besar energi kinetik dari gas buang hasil pembakaran menjadi sejumlah usaha mekanis yang mampu menggerakkan kompresor dan *accessories*. Berdasarkan fungsinya, sebagian besar energi yang dihasilkan dari ruang bakar diabsorpsi oleh komponen – komponen di *turbine section*, khususnya *turbine blade*. Akibatnya, unit ini merupakan komponen yang memiliki *stress* terbesar dari sistem *engine* pesawat terbang [13]. Dapat dilihat pada gambar 2.9.

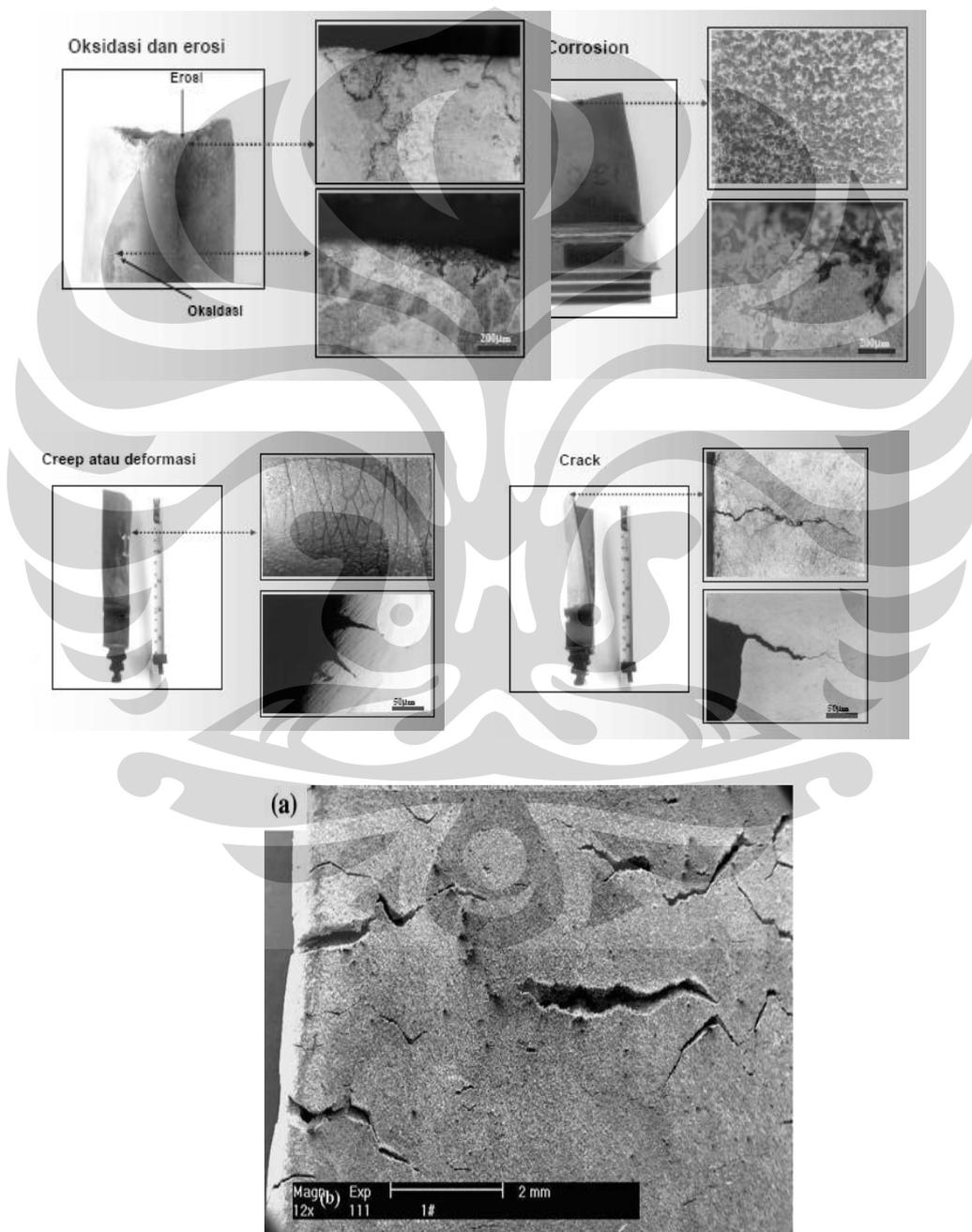


Gambar 2.9. Turbine blade[2]
 polikristal(kiri), columnar(tengah), dan kristal tunggal(kiri)



Gambar 2.10. Skema komponen dan aksesoris turbin gas [14]

Jenis kegagalan pada turbin blade yaitu oksidasi, korosi temperatur tinggi, erosi, *creep*, dan *crack*. Dapat dilihat pada gambar 2.9. Peristiwa oksidasi, sulfidasi, *crack*, *creep* kerap terjadi pada material yang diaplikasikan atau terekspos pada temperatur tinggi. Fungsi temperature, beban stress, dan waktu serta elemen paduan menjadi faktor utama terjadinya peristiwa tersebut.



Gambar 2.11. Jenis kegagalan pada turbin blade [15]

2.7. Pertumbuhan Butir

Secara umum, pertumbuhan butir terdiri dari pertumbuhan butir normal dan pertumbuhan butir abnormal. Pertumbuhan butir sangat penting dalam ilmu metalurgi karena sifat mekanis dan elektrik dari suatu struktur material bergantung pada struktur mikro yang dikarakterisasikan pada ukuran butir dan distribusinya.

Pertumbuhan butir normal dikarakterisasikan oleh distribusi ukuran butir yang tidak berubah akibat perubahan waktu. Sedangkan pertumbuhan butir abnormal dikarakterisasikan oleh pertumbuhan butir dengan laju yang cepat dan terjadi konsumsi butir lain, sehingga memberikan sifat mekanis yang tidak diinginkan.

Untuk mengetahui mekanisme pertumbuhan butir, ada beberapa aspek penting yaitu prediksi pertumbuhan butir dan hal yang mengontrol laju pertumbuhan butir tersebut. Studi mengenai mekanisme pertumbuhan butir telah banyak dilakukan oleh peneliti sehingga ada beberapa kaidah dalam pertumbuhan butir. Diantaranya [12] :

1. Pertumbuhan butir terjadi dengan migrasi batas butir, tidak dengan koalisi butir seperti yang terjadi pada tetes air.
2. Migrasi batas butir adalah tidak kontinu dan arah pembentukan butir dapat berubah secara tiba-tiba.
3. Butir mungkin tumbuh pada salah satu sisinya sedangkan sisi lain mengalami penyusutan.
4. Laju konsumsi butir berkali-kali menjadi lebih cepat ketika butir tersebut menghilang.
5. Kurva batas butir yang terkonsumsi bergerak ke arah pusat butir tersebut.
6. Jika batas butir merupakan satu fasa bertemu dengan butir lain yang mempunyai sudut batas butir selain 120^0 , butir akan berusaha dengan kondisi tersebut akan dikonsumsi sehingga sudut akan mendekati 120^0 .

Pertumbuhan butir dapat terjadi pada semua material polikristalin tapi fenomena ini dapat dijelaskan dengan baik pada material yang mengalami rekristalisasi setelah mengalami pengerjaan. Idealnya pertumbuhan butir tersebut adalah pertumbuhan butir yang normal dimana pertumbuhan hanya dikendalikan oleh jumlah total dari energi pada permukaan batas butir.

Pertumbuhan butir terjadi setelah proses rekristalisasi primer terjadi, dimana butir yang mengalami regangan telah hilang sehingga material akan memiliki energi yang lebih rendah dengan menurunkan luas total dari permukaan butirnya. Bila proses pemanasan berlangsung baik, atas butir ternyata menjadi lurus sehingga mengakibatkan butir yang lebih besar menjadi besar dan butir yang lebih kecil menyusut dan menghilang [16]. Karena butir cenderung stabil dengan membentuk sudut 120° , sehingga butir yang kurang atau lebih dari enam sisi tidak mungkin berada dalam kesetimbangan.

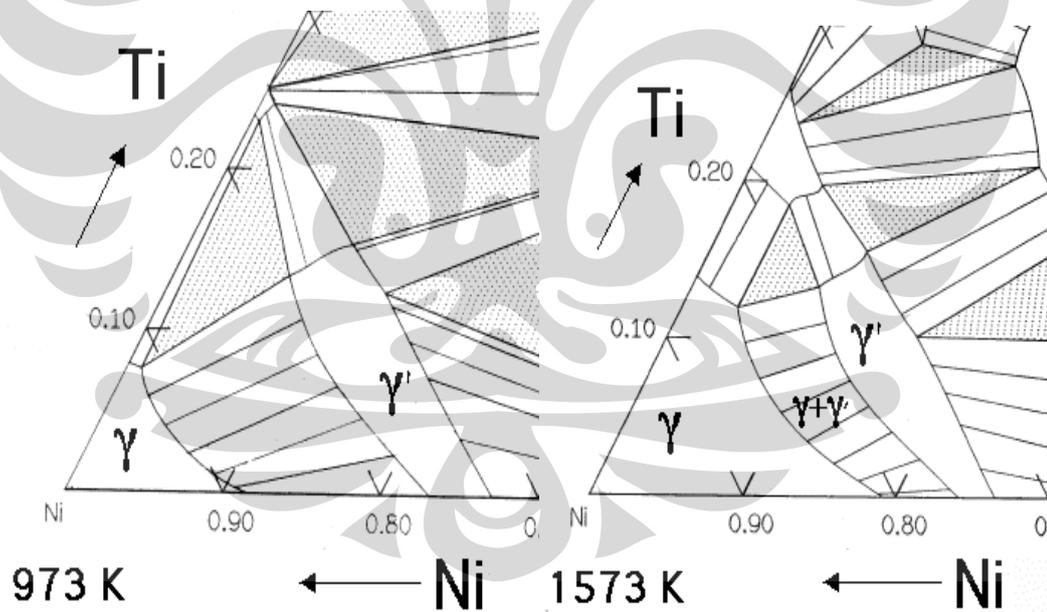
Pada peningkatan temperatur. Atom-atom sangat mobile sehingga butir dengan jumlah sisi kurang dari enam akan cenderung menyusut karena pengaruh gaya tegangan permukaan batas butir sedangkan butir yang memiliki batas butir lebih banyak cenderung untuk tumbuh. Fenomena ini terjadi pada pertumbuhan butir abnormal.

Batas butir memiliki tegangan permukaan karena atomnya memiliki energi bebas yang lebih tinggi dari atom-atom yang terdapat dalam butir. Sehingga untuk mengkompensasi perbedaan energi tersebut, maka material polikristalin akan berusaha mengurangi luas permukaan batas butir [17].

Untuk melihat fenomena pertumbuhan butir sebagai akibat pengaruh energi dan tegangan batas butir, pertumbuhan butir juga dipengaruhi oleh adanya endapan atau adanya partikel fasa kedua (*second phase partikel*). Dengan adanya partikel fasa kedua, pertumbuhan butir dalam hal ini dilihat dari ukuran butirnya, akan terhalang bahkan berada dalam keadaan konstan. Partikel atau endapan fasa kedua ini bertindak sebagai penghalang migrasi batas butir selama pemanasan sehingga pertumbuhan butir terhalang.

2.8. Kekerasan Nickel Base Superalloy

Kekerasan elemen Nikel dalam bentuk murni hanya 700 MPa (203HB) [18] atau setara dengan ~20 HRC. Kekerasan nikel base superalloy didapat dari pengaruh paduan antara elemen mayor dan elemen minor yang bersifat menguatkan dan mengeraskan seperti titanium (Ti), molibdenum (Mo), tantalum (Ta), tungsten (W) dan sebagainya[7]. Sampel benda uji ini merupakan jenis polikristalin pada aplikasi turbin blade dibuat dengan proses pengecoran (*casting*). Sehingga dengan proses pembuatan secara pengecoran mempunyai keunggulan daripada proses yang lain yaitu memiliki kekuatan yang tinggi dan ketahanan pada temperatur tinggi, dengan mekanisme penguatan jenis pengerasan dengan mekanisme larutan padat (substitusi atom – atom dalam mekanisme pertahanan deformasi), *precipitation and carbide hardening* atau pengerasan material melalui mekanisme presipitat, *Precipitation hardening* melalui pembentukan fasa gamma γ' Ni₃Ti dan Ni₃Al dan karbida MC, M₆C, M₂₃C₆, M₇C₃ (M representatif logam dan C untuk Karbon) [10].



Gambar 2.12. Fasa *gamma* (γ) dan *gamma prime* berubah setelah temperatur meningkat (γ') [19]

Diagram fasa diatas menggambarkan bahwa elemen Ti yang merupakan presipitat γ' Ni₃Ti pada awalnya memiliki volume fraksi V_f yang cukup besar. Seiring dengan meningkatnya temperatur hingga 1573 K sebagian presipitat tersebut larut menjadi fluida membentuk $\gamma+\gamma'$ dan koherensi dengan γ .

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Bahan Penelitian

Benda uji yang digunakan sebagai bahan penelitian adalah potongan *turbin blade nickel based superalloy*. Bahan ini digunakan sebagai turbin.

Pada penelitian ini, benda uji penelitian merupakan turbin yang masih baru tetapi hanya kesalahan dimensi.

3.2. Alat Penelitian

Penelitian turbin blade *nikel based superalloy* ini menggunakan alat yang dimiliki oleh Laboratorium Metalografi dan Perlakuan Panas di Departemen Metalurgi dan Material FTUI, Depok.

Peralatan untuk preparasi sampel benda uji untuk perlakuan panas:

1. Gergaji
2. Gerinda
3. Amplas

Peralatan untuk pengujian komposisi benda uji:

1. Spectroscopy chemical composition analysis machine

Peralatan untuk perlakuan panas benda uji:

1. Dapur pemanas *Carbolite*, kapasitas sampai 1600⁰C
2. Tang
3. Wadah untuk *Quenching*

Peralatan untuk pengamatan fasa

1. SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

Peralatan untuk pengamatan pertambahan panjang dent

1. Mikroskop ukur

Peralatan untuk preparasi benda uji dan pengamatan metalografi:

1. Amplas
2. Mesin Amplas Ecornet III
3. Mesin poles *non ferrous Union*
4. Mikroskop optik dan foto struktur mikro

Peralatan untuk pengamatan kekerasan

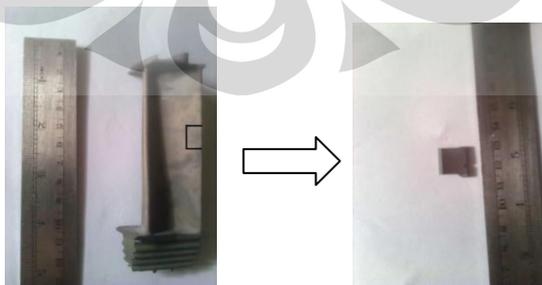
1. *Rockwell hardness testing machine*

3.3. Prosedur Penelitian

Penelitian dilakukan sesuai dengan langkah prosedur pengujian yang berurutan. Pengujian diawali dari persiapan benda uji, pemanasan benda uji, pendinginan, kemudian dilanjutkan dengan preparasi benda uji metalografi, pengamatan metalografi, dan pengujian kekerasan.

3.4. Persiapan Benda Uji

Dari potongan turbin blade nikel base superalloy bagian tepi yang permukaannya datar, benda uji dipreparasi dengan dimensi area 10 x 10 mm. Pada sampel benda uji dilakukan pemberian dent menggunakan cut wheel dengan panjang cacat 3 mm.



Gambar 3.1. Sampel penampang atas 10x10mm

3.5. Pemanasan Benda Uji

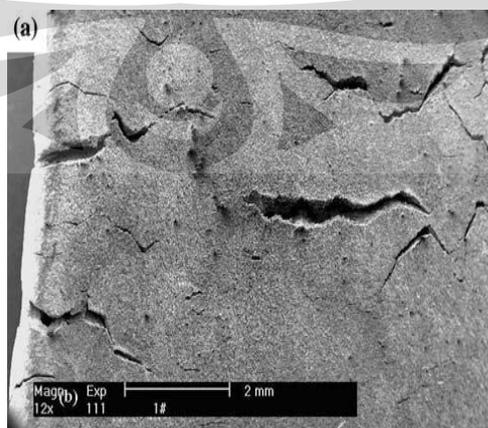
Pemanasan benda uji dilakukan dengan variasi temperatur yang berbeda temperatur 900, 1000, 1100, dan 1200⁰C dengan waktu tahan yang sama yaitu 1 jam. Pemanasan benda uji dilakukan dalam dapur *Carbolite* di Laboratorium Metalografi dan Perlakuan Panas di Departemen Metalurgi dan Material FTUI, Depok.

3.6. Pendinginan Cepat

Setelah dipanaskan pada temperatur dan waktu yang diinginkan, benda uji dicelupkan ke dalam media pendingin yaitu air. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan kondisi benda uji pada temperatur dan waktu tersebut.

3.7. Pengamatan Pertambahan panjang Cacat

Pengamatan pertambahan panjang cacat pada material uji *nickel based superalloy* dilakukan preparasi sampel terlebih dahulu dengan pemotongan material uji. Setelah dipotong sesuai ukuran, tahap selanjutnya dilakukan pembuatan cacat buatan dengan menggunakan *cut wheel* dan selanjutnya dilakukan pemanasan pada material uji selama 1 jam pada temperatur 900⁰, 1000⁰, 1100⁰, 1200⁰C, dan pada kondisi tanpa dilakukan pemanasan. Setelah dilakukan pemanasan, panjang cacat buatan pada material uji dilakukan pengukuran dengan menggunakan mikroskop ukur.



Gambar 3.2. penampakan permukaan *turbine blade* yang mengalami kegagalan berupa crack[2]

Pengamatan pertambahan panjang cacat *dents* buatan hasil pemanasan dilakukan dengan membandingkan antara panjang *dent* awal (l_1) dengan *dent* hasil pemanasan (l_0). Pengukuran pertambahan panjang cacat *dent* ini menggunakan mikroskop ukur. Seluruh proses pengamatan pertambahan panjang cacat dilakukan di Laboratorium Metalografi dan Perlakuan Panas di Departemen Metalurgi dan Material FTUI, Depok.

3.8. Pengamatan Struktur Mikro Benda Uji

3.8.1. Persiapan benda uji untuk pengamatan metalografi

Persiapan benda uji dilakukan agar mendapatkan struktur mikro benda uji sebaik mungkin. Dimana tahapannya adalah *mounting*, amplas, poles, dan proses etsa.



Gambar 3.3. Hasil mounting sampel

Mounting dilakukan untuk memudahkan penanganan benda uji pada proses selanjutnya. Setelah *di mounting*, dilakukan proses pengamplasan dari amplas ukuran kasar sampai halus. Setelah mendapatkan permukaan yang rata maka dilakukan proses pemolesan. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan permukaan yang mengkilap dan bebas dari goresan dengan kain poles dan alumina. Tahap selanjutnya adalah proses etsa, untuk mendapatkan struktur mikro dari benda uji dengan proses korosi terkendali. Zat etsa yang digunakan adalah asam oksalat dan aquades. Proses etsa yang digunakan pada nikel base superalloy adalah elektroetching atau elektroetsa.

Untuk proses persiapan benda uji dilakukan di Laboratorium Metalografi dan Perlakuan Panas di Departemen Metalurgi dan Material FTUI, Depok.

3.8.2. Pengamatan metalografi

Pengamatan metalografi benda uji dilakukan dibawah mikroskop optik sehingga didapatkan struktur mikro benda uji. Kemudian dilakukan pengambilan gambar struktur mikro dari benda uji untuk dilakukan analisa penelitian ini. Untuk pengamatan metalografi dilakukan di Laboratorium Metalografi dan Perlakuan Panas di Departemen Metalurgi dan Material FTUI, Depok.

3.9. Pengujian Kekerasan

Setelah dilakukan pengambilan gambar mikrostruktur benda uji, tahap berikutnya adalah mendapatkan data kekerasan benda uji melalui pengujian kekerasan. Metode pengujian kekerasan yang dilakukan peneliti adalah metode Rockwell Hardness.

Pada pengujian kekerasan dengan metode *rockwell*, alat yang digunakan adalah mesin uji *digital Rockwell Hardness* tipe HRC yakni *indenter* atau beban penjejak berupa *diamond* 150kgf dengan waktu tahan (penjejakan) selama 5 detik[9]. Penjejakan dilakukan pada tiga daerah yang berbeda sehingga didapatkan data yang representatif. Hasil atau angka kekerasan ditampilkan pada layar penunjuk secara otomatis setelah waktu penjejakan selesai. Pengujian kekerasan dengan metode *rockwell* tipe HRC ini mengacu pada ASTM E18: *Standard Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*.

Untuk proses dilakukan di Laboratorium Metalografi dan Perlakuan Panas di Departemen Metalurgi dan Material FTUI, Depok.

BAB IV

HASIL & PEMBAHASAN

4.1 Pengamatan Komposisi Benda Uji *Nikel Based Superalloy*

Tabel 4.1. Komposisi *Nikel-based Superalloy*

Komposisi	Ni	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	Fe	Co	Ti	Al
(%wt)	58.2	0.11	0.13	8.74	5.52	6.03	0.302	11.2	0.424	>7
	Nb	W	V	C	S	Hf	Mg	Ta	Zr	
	0.0232	1.72	0.226	<0.002	0.0443	0.02	0.0298	0.12	0.0781	

Pada tabel 4.1, dapat diketahui komposisi dari material uji *Nikel based superalloy*. Material uji terlebih dahulu dilakukan preparasi sampel dengan cara dipotong sesuai dengan ukuran yang diinginkan menggunakan alat potong berupa *cut wheel*. Pengujian komposisi dari material uji dilakukan di Laboratorium *Center of Material Processing and Failure Analysis (CMPFA)* di Departemen Metalurgi dan Material FTUI. Metode pengujian komposisi menggunakan *Spectroscopic Chemical Analysis*.

Berdasarkan tabel 4.1, unsur-unsur yang dominan selain nikel (58,2%) adalah Kobalt (11,2%), Kromium (8,74%), Aluminium (>7%), Tembaga (6.03%), Molibdenum (5,52%), dan Wolfram (1,72%). Sedangkan unsur-unsur minor yaitu

Titanium (0,424%), Besi (0,302%), Vanadium (0,226%), Mangan (0,13%), Tantalum (0,12%), Silikon (0,11%), Zirkonium (0,0781%), Sulfur (0,0443%), Magnesium (0,0296%), Niobium (0,0232%), Hafnium (0,2%), dan Carbon (<0,002%).

Semua elemen yang terkandung dalam material uji, baik elemen mayor ataupun elemen minor memiliki peranan yang penting terhadap sifat fisik dan sifat mekanis suatu material benda uji nikel based superalloy. Unsur nikel merupakan elemen penstabil gamma pada temperatur ruang dengan struktur fcc dan bersifat non magnetik. Nikel dapat berfungsi sebagai matriks karena memiliki unsur yang dominan.

Elemen seperti kobalt, kromium, molibdenum, wolfram dan besi, dapat sebagai elemen pembentuk fasa γ .

Kandungan titanium, aluminium dan silikon pada benda uji, dapat membentuk konfigurasi gamma prime dengan senyawa $Ni_3(Ti, Al, \text{ atau } Si)$.

Kandungan karbon, molibdenum atau kromium pada benda uji, dapat membentuk senyawa karbida seperti Cr_xC_y dan Mo_xC . Kromium merupakan elemen ketiga terbesar dalam komposisi nikel base superalloy. Sehingga elemen kromium memiliki peranan dalam ketahanan oksidasi dengan membentuk Cr_2O_3 pada permukaan material, tetapi oksidasi dapat dicegah dengan dilakukan *coating* pada *blade*.

Kandungan kobalt dalam paduan nikel base superalloy ini merupakan elemen kedua terbesar pada hasil komposisi, memiliki peranan dalam penguat dalam penguatan larutan padatan. Selain itu kobalt dapat berfungsi sebagai ketahanan oksidasi, ketahanan sulfidasi dan meningkatkan temperatur pelarutan gamma prime γ' . Dimana elemen kobalt, besi, kromium, niobium, tantalum, molibdenum, tungsten, vanadium, titanium dan aluminium merupakan *solid solution strengthener*, dalam fasa γ dan γ' .

Kandungan tembaga dalam paduan nikel base superalloy berperan dalam ketahanan korosi dan fatik, memiliki konduktivitas listrik dan thermal yang baik serta umumnya bersifat non magnetik.

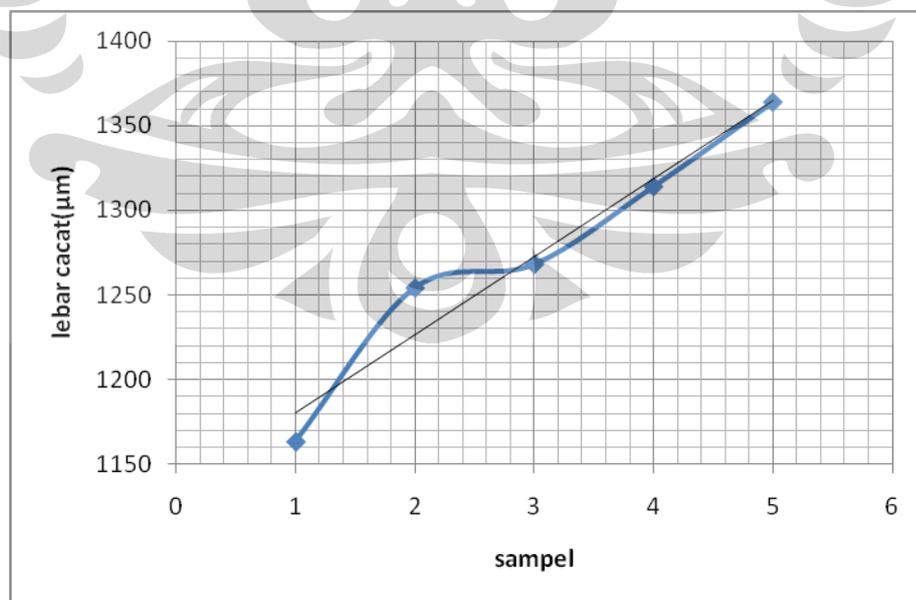
Adanya elemen boron, zirkonium, dan hafnium dalam paduan nikel dapat memodifikasikan terbentuknya karbida batas butir. Meskipun hafnium

berkontribusi dengan membentuk γ - γ' eutectic pada *cast alloy*, untuk meningkatkan keuletan.

4.2 Pengamatan Pertambahan panjang Cacat (*Crack* buatan)

Tabel 4.2. Perhitungan Panjang Cacat

Kondisi Pemanasan	Waktu (Jam)	Panjang Cacat
Kondisi awal	-	1.163 ± 4
Pemanasan temperature 900 ⁰ C	1	1.254 ± 8
Pemanasan temperature 1000 ⁰ C	1	1.268 ± 7
Pemanasan temperature 1100 ⁰ C	1	1.314 ± 8
Pemanasan temperature 1200 ⁰ C	1	1.364 ± 6



Gambar 4.1. Kurva perhitungan panjang cacat sebelum dan sesudah pemanasan

Pada gambar tabel 4.2, dapat dilihat hasil dari perhitungan panjang cacat buatan. Pengamatan pertambahan panjang cacat pada material uji *nickel based superalloy* dilakukan preparasi sampel terlebih dahulu dengan pemotongan material uji. Setelah dipotong sesuai ukuran, tahap selanjutnya dilakukan pembuatan cacat buatan dengan menggunakan *cut wheel* dan selanjutnya dilakukan pemanasan pada material uji selama 1 jam pada temperatur 900⁰, 1000⁰, 1100⁰, 1200⁰C, dan pada kondisi tanpa dilakukan pemanasan. Setelah dilakukan pemanasan, panjang cacat buatan pada material uji dilakukan pengukuran dengan menggunakan mikroskop ukur di Laboratorium Departemen Metalurgi & Material FTUI.

Hasil perhitungan panjang cacat pada tabel 4.2 mengalami peningkatan pertambahan panjang cacat seiring dengan peningkatan temperatur sebelum dan sesudah dilakukan pemanasan. Sehingga selisih dari peningkatan panjang cacat awal (l_0) dengan panjang cacat setelah dilakukan pemanasan (l_i) dengan temperatur 900⁰ (l_1), 1000⁰ (l_2), 1100⁰ (l_3), 1200⁰C (l_4) selama 1 jam yaitu selisihnya sebesar $\Delta_1=0.5 \mu\text{m}$, $\Delta_2=1.34 \mu\text{m}$, $\Delta_3=2.22\mu\text{m}$, dan $\Delta_4=3.68\mu\text{m}$. dengan persentase selisih panjang cacat awal (l_0) dengan panjang cacat setelah pemanasan (l_i) adalah 0.77%, 2.06%, 3.39%, dan 5.55%. Pada material uji nikel base superalloy dapat diketahui bahwa dari hasil pengamatan pertambahan panjang cacat ini terlihat selisih yang tidak terlalu besar, sehingga material uji nikel base superalloy yang diaplikasikan pada turbin blade sangat sesuai pada temperatur tinggi.

Data dari hasil perhitungan panjang cacat pada tabel 4.2, diplot kedalam kurva 4.1. Pada kurva tersebut terlihat adanya garis linier dan adanya peningkatan pertambahan panjang cacat pada material uji sebelum dan sesudah dilakukan pemanasan. Pertambahan panjang cacat ini disebabkan peningkatan temperatur dimana energi panas semakin besar dapat memicu pergerakan stress ke titik energi yang lebih rendah, sehingga dislokasi mudah bergerak. Dimana semakin besar %elongasi seiring dengan kenaikan temperature, *tensile strength* dan *yield strength* cenderung menurun, yang dikenal dengan keuletan atau *ductile*. *Ductility* merupakan ukuran kekuatan material menahan deformasi dari fracture[13].

4.3 Pengamatan Struktur Mikro Benda Uji *Nikel-based Superalloy*

Pada pengamatan struktur mikro material uji *Nikel-based Superalloy* dilakukan preparasi sampel, selanjutnya material uji di *mounting*, pengamplasan, pemolesan dan di etsa. Proses pengetsaan material uji menggunakan metode *electroetching* agar batas butir terserang dan muncul dalam pencitraannya. Proses pengamatan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Departemen Metalurgi & Material FTUI.

Detail dari proses etsa, zat etsa, dan waktu etsa dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3. Proses etsa dan zat etsa benda uji pada kondisi pengujian

No	Benda Etsa	Proses Etsa	Zat Etsa	Waktu Etsa
1.	kondisi awal (tanpa perlakuan pemanasan)	Electroetching Tegangan 8 volt	15gr H ₂ C ₂ O ₄ Dalam 50ml aquades	10-15 detik
2.	Pemanasan 900 ⁰ C dalam waktu 1 jam	Electroetching Tegangan 8 volt	15gr H ₂ C ₂ O ₄ Dalam 50ml aquades	10-15 detik
3.	Pemanasan 1000 ⁰ C dalam waktu 1 jam	Electroetching Tegangan 8 volt	15gr H ₂ C ₂ O ₄ Dalam 50ml aquades	10-15 detik
4.	Pemanasan 1100 ⁰ C dalam waktu 1 jam	Electroetching Tegangan 8 volt	15gr H ₂ C ₂ O ₄ Dalam 50ml aquades	10-15 detik
5.	Pemanasan 1200 ⁰ C dalam waktu 1 jam	Electroetching Tegangan 8 volt	15gr H ₂ C ₂ O ₄ Dalam 50ml aquades	10-15 detik

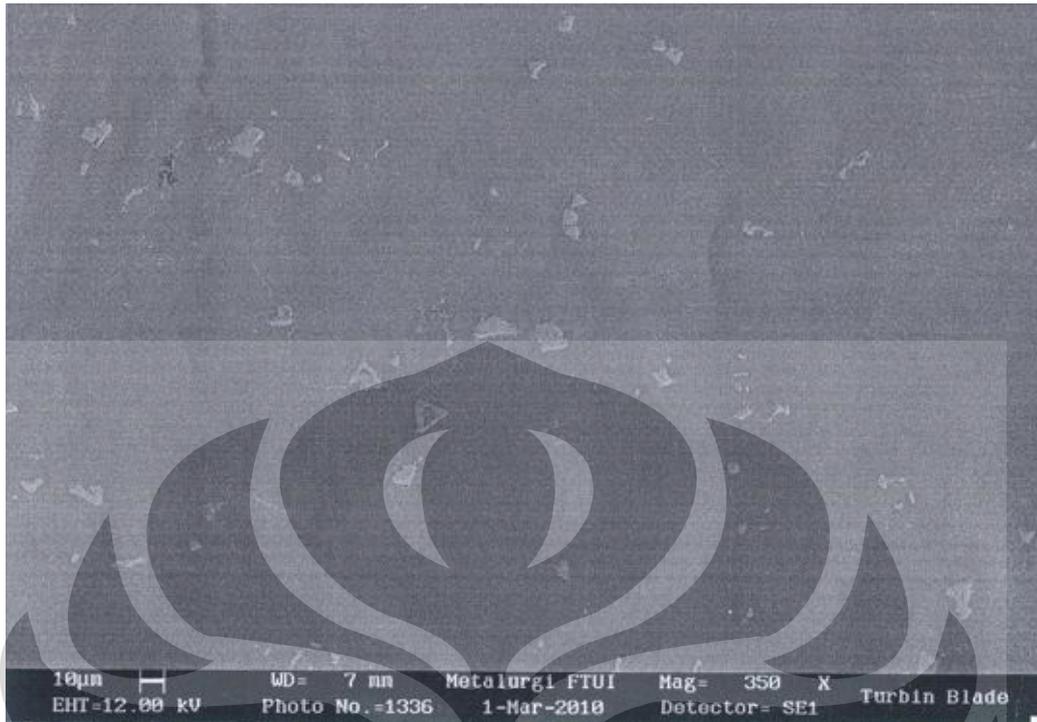
Hasil pengamatan struktur mikro adalah sebagai berikut:

Pada pengamatan struktur mikro dan pengambilan gambar struktur mikro yang melibatkan fasa dari material uji ini menggunakan mikroskop optik dan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

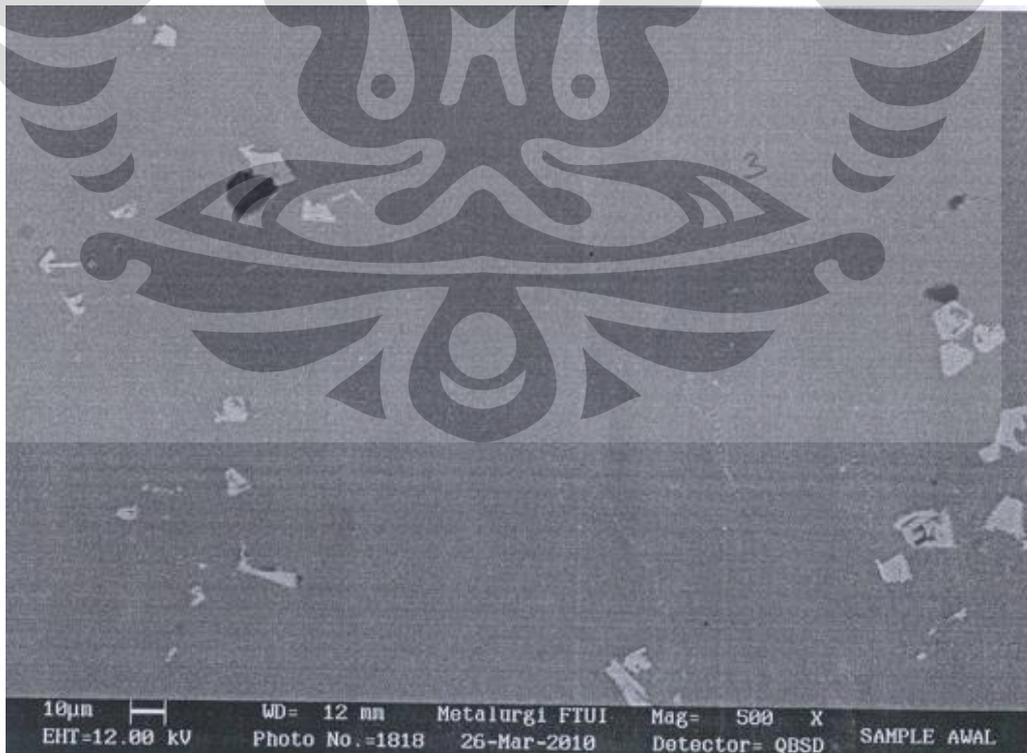
Material uji merupakan material yang terkategori sebagai material yang sulit diserang batas butirnya melalui etsa kimia, oleh karena itu digunakan *electroetching* agar batas butir terserang dan muncul dalam pencitraannya, dilakukan di laboratorium Metalografi dan Perlakuan Panas di departemen Metalurgi dan Material FTUI.

Pengamatan struktur mikro untuk pengambilan gambar struktur mikro dengan mikroskop optik diambil dengan perbesaran 200x dan 500x. Sedangkan untuk pengambilan gambar pada *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan pada perbesaran 350x dan 500x.

Material uji yang diamati struktur mikronya adalah sebelum dan sesudah dilakukan pemanasan pada temperatur 900⁰, 1000⁰, 1100⁰, dan 1200⁰C. Secara detail dapat dilihat gambar hasil pengamatan struktur mikro dan hasil SEM pada gambar 4.2 s/d gambar 4.3.



Gambar 4.2. Penampakan fasa sampel awal pembesaran 350x dengan alat bantu SEM



Gambar 4.3. Penampakan fasa sampel awal pembesaran 500x

dengan alat bantu SEM

Analisa Pengamatan SEM

Pada gambar 4.1 dan 4.2 terlihat hasil penampakan dari benda uji tanpa perlakuan pemanasan. Menurut hasil dari SEM, Persentase dari masing-masing unsur terdiri dari fasa matriks dan fasa kedua (gumpalan berwarna abu-abu), diantaranya yaitu:

Fasa matriks : Nikel (72,85%), kobal (7,61%), Krom (5,12%), Aluminium (4,86%), Tantalum (4,16%), Molibdenum (3,13%), Titanium (1,31%) dan Karbon (0,97%) dan elemen lainnya hingga menjadi 100%.

Fasa kedua : Nikel (75,59%), Kobal (6,74%), Krom (5,71%), Aluminium (4,71%), Molibdenum (3,50%), Titanium (1,10%), Karbon (1,09%), Si (0,96%) dan O (0,54%).

Dengan mengetahui elemen-elemen penyusun benda uji dan persentase dari uji SEM, unsur nikel memiliki persentase terbesar yang dapat berfungsi sebagai matriks gamma. Selain itu, nikel dapat berperan sebagai penstabil gamma pada temperatur ruang dengan struktur fcc Sedangkan unsur lain juga memiliki peranan yang penting seperti pembentuk precipitate seperti $Ni_3(Al,Ti)$ serta adanya unsur carbon dapat membentuk senyawa karbida seperti MC , M_6C dan $M_{23}C_6$ serta Cr_7C_3 .

Pada hasil SEM diatas terdapat unsur O dengan persentase 0,54% yang berfungsi dalam pembentukan senyawa oksida untuk mempermudah proses pengecoran (*casting*).

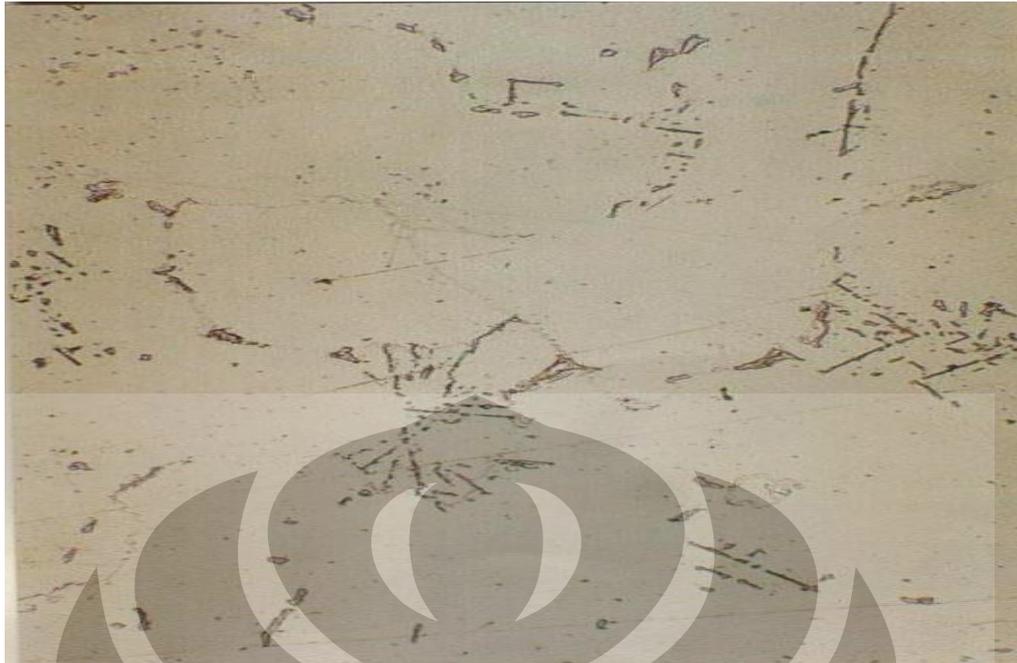
Sehingga dengan adanya pembentukan precipitate dalam benda uji, maka mekanisme pengerasan jenis presipitate ada dalam benda uji khususnya presipitate gamma prime.



Gambar 4.4 Hasil Struktur mikro sampel benda uji dengan tanpa pemanasan pada pembesaran 200x



Gambar 4.5 Hasil Struktur mikro sampel benda uji dengan tanpa pemanasan pada pembesaran 500x



Gambar 4.6. Hasil Struktur mikro sampel benda uji dengan pemanasan 900⁰C pada pembesaran 200x

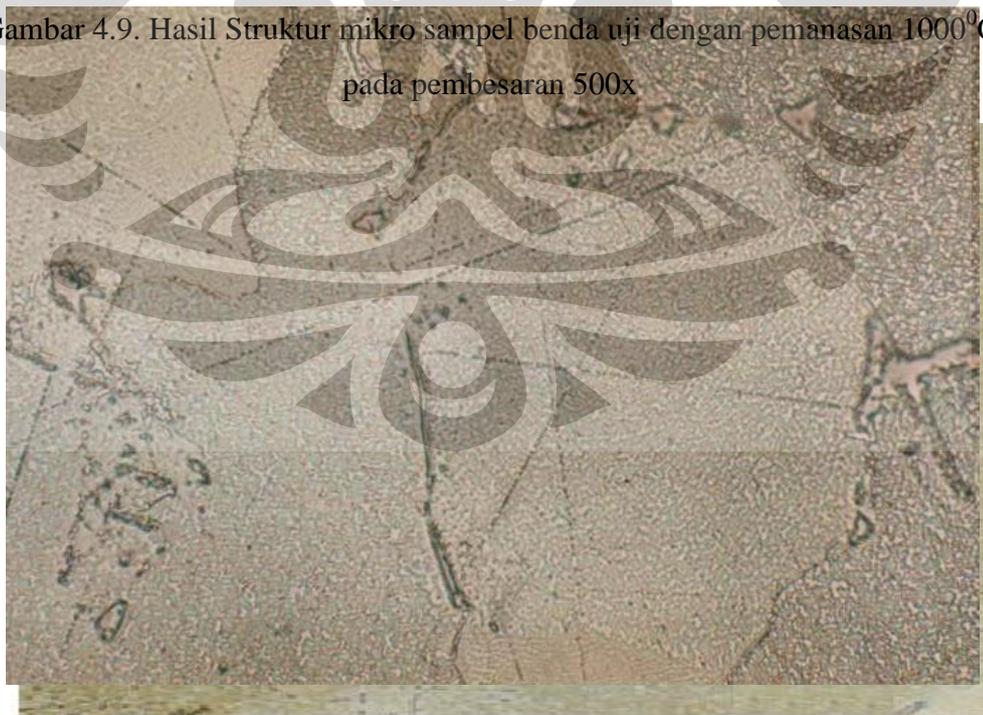


Gambar 4.7. Hasil Struktur mikro sampel benda uji dengan pemanasan 900⁰C

pada pembesaran 500x



Gambar 4.8. Hasil Struktur mikro sampel benda uji dengan pemanasan 1000⁰C pada pembesaran 200x



Gambar 4.9. Hasil Struktur mikro sampel benda uji dengan pemanasan 1000⁰C pada pembesaran 500x

Gambar 4.10. Hasil Struktur mikro sampel benda uji dengan pemanasan 1100°C
pada pembesaran 200x



Gambar 4.11. Hasil Struktur mikro sampel benda uji dengan pemanasan 1100°C
pada pembesaran 500x



Gambar 4.12. Hasil Struktur mikro sampel benda uji dengan pemanasan 1200⁰C pada pembesaran 200x



Gambar 4.13. Hasil Struktur mikro sampel benda uji dengan pemanasan 1200⁰C pada pembesaran 500x

Analisa Pengamatan Struktur Mikro

Pada gambar hasil struktur mikro dengan masing-masing perbesaran 200x dan 500x, dapat terlihat adanya perubahan struktur mikro seiring dengan kenaikan temperatur.

Pada gambar 4.3 dan 4.4, dengan perbesaran 200x dan 500x pada kondisi awal (tanpa perlakuan pemanasan), terlihat struktur mikro dengan nikel sebagai matriks. Serta pada batas butir dapat terlihat endapan berbentuk karbida. Pada gambar 4.3 dengan perbesaran 200x dapat dilihat batas butir yang panjang.

Pada gambar 4.5 dengan perbesaran 200x dan gambar 4.6 dengan perbesaran 500x pada temperatur 900⁰c, dapat dilihat perubahan struktur mikro dari kondisi awal (tanpa perlakuan pemanasan). Pada batas butir terlihat adanya partikel karbida tipe $M_{23}C_6$ yang mirip seperti rantai sedangkan di dalam butir terlihat adanya endapan karbida tipe M_6C , serta terdapat matriks γ [18].

Pada gambar 4.7 dengan perbesaran 200x dan gambar 4.8 dengan perbesaran 500x pada temperatur 1000⁰c, mulai terlihat perubahan struktur mikro yang signifikan dari kondisi awal (tanpa perlakuan pemanasan). Batas butir pada temperatur 1000⁰c ini tampak lebih halus dan membentuk endapan karbida yang homogen, halus dan menyebar merata. Sehingga memiliki efek untuk meningkatkan ketahanan terhadap *creep*. biasanya pada temperatur tinggi.

Pada gambar 4.9 dengan perbesaran 200x pada temperatur 1100⁰c, terlihat sekali perubahan struktur mikro yang sangat signifikan. Pada temperatur 1100⁰c, tampak terjadinya pengkasaran butir (*coarsening*) dari gamma prime menjadi gamma + gamma prime. Serta adanya fasa karbida pada batas butir.

Pada gambar 4.11 dengan perbesaran 200x pada temperatur 1200⁰c, terlihat endapan yang larut dalam butir dan batas butir. Serta terjadinya represipitat dengan ukuran yang homogen dan halus. Dengan ukuran yang halus, dislokasi akan mudah bergerak dan berakibat pada kekuatan material suatu benda uji tidak akan optimal.

Dari penjelasan singkat tentang hasil struktur mikro pada benda uji nikel based superalloy dapat diketahui bahwa pada saat pemanasan, batas butir menjadi lebih lurus yang dapat menyebabkan butir yang lebih kecil menyusut dan butir yang lebih besar akan tumbuh. Faktor penting yang dapat mengendalikan proses

ini adalah tegangan permukaan batas butir. Tegangan permukaan yang dimiliki batas butir diakibatkan oleh adanya energi bebas yang dimiliki atom-atom pada batas butir dibanding energi bebas yang dimiliki oleh atom dalam butir itu sendiri. Oleh karena itu, untuk mengurangi energi tersebut, sebuah polikristalin akan cenderung mengurangi luas area batas butir hal ini menyebabkan perubahan ukuran butir. Perubahan ukuran butir menyebabkan perubahan jumlah sisi butir. Butir dengan jumlah sisi kurang atau lebih dari enam sisi itu tidak setimbang.

Sedangkan endapan karbida pada batas butir berfungsi untuk mengontrol ukuran butir. Sehingga efektif dalam mengontrol laju pertumbuhan butir yang baru dikarenakan endapan karbida dapat menghalangi migrasi dari batas butir pada saat butir itu tumbuh.

Kenaikan temperatur dapat menyebabkan perubahan struktur mikro yang signifikan. Serta adanya endapan yang menyebar merata di batas butir. Seiring dengan peningkatan temperatur endapan tersebut akan mengalami pengkasaran atau dikenal dengan pengkasaran butir (*coarsening*). Dengan perubahan yang signifikan dapat mempengaruhi sifat fisis dan mekanik suatu material uji. Sehingga pada aplikasi turbin blade, temperatur overheat sangat berbahaya.

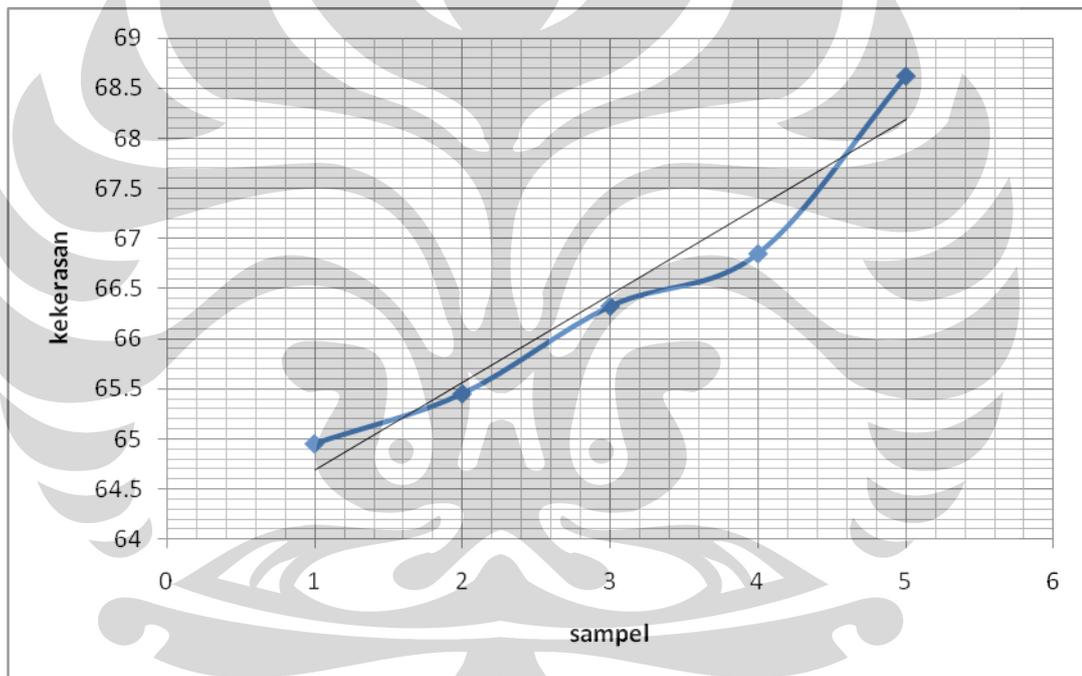
4.4 Pengujian kekerasan benda uji *Nickel-based Superalloy*

Tabel 4.4. Kekerasan benda uji *Nickel-based superalloy* sebelum dan sesudah pemanasan.

Kondisi Pemanasan	Waktu (Jam)	Harga Kekerasan
Kondisi awal	-	64,95 ± 0,256
Pemanasan temperature 900 ⁰ C	1	65,450 ± 0,097
Pemanasan temperature 1000 ⁰ C	1	66,325 ± 0,308
Pemanasan temperature 1100 ⁰ C	1	66,850 ± 0,233
Pemanasan temperature 1200 ⁰ C	1	68,625 ± 0,426

Pada tabel 4.4, merupakan hasil perhitungan kekerasan material uji dengan menggunakan metode *Rockwell hardness* HRC yang mengacu pada ASTM E18, dengan pembebanan sebesar 150kgf yang dijejak menggunakan intan (*cone diamond*). Hasil perhitungan kekerasan material uji dilakukan sebelum dan sesudah pemanasan material uji dengan temperatur 900⁰, 1000⁰, 1100⁰, dan 1200⁰C. Metode HRC dipakai karena *Nikel based superalloy* mempunyai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan baja. Baja kategori *hardened toolsteel* yang merupakan material yang sangat keras memiliki kekerasan HRC 55-62 [10].

Hasil perhitungan pada tabel 4.4, dapat diplot ke dalam kurva kekerasan material uji yang dapat dilihat pada gambar 4.5.



Gambar 4.14. Kurva kekerasan benda uji *Nickel base superalloy* sebelum dan sesudah pemanasan

Analisa Kekerasan

Pada gambar 4.5 kurva kekerasan material uji, terlihat adanya peningkatan kekerasan sebelum dan sesudah pemanasan. Dengan pengujian kekerasan yang menggunakan metode *rockwell* yang beridentor intan. Pada gambar 4.4 hasil pengujian kekerasan material uji, sebelum dan sesudah dilakukan pemanasan dengan temperatur 900, 1000, 1100, dan 1200⁰C.

Kita mengetahui bahwa ketahanan *creep* bergantung pada kecepatan dislokasi di dalam struktur kristal. Adanya fasa gamma prime $[\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})]$ sebagai pembawa dislokasi. Penguatan oleh γ' sangat berhubungan dengan fraksi volume pada γ' dan ukuran partikel dari γ' . Mekanisme penguatan terjadi dengan dilakukan pemotongan partikel γ' oleh dislokasi sampai kekerasan maksimal (*peak hardness*). Sehingga kekuatan meningkat seiring dengan peningkatan fraksi volume pada γ' .

Selain itu dapat disebabkan adanya fasa kedua yang mengalami pengkasaran (*coarsening*) dari butir γ' *coarse* lalu menjadi $\gamma + \gamma'$ dengan kata lain $V_f \gamma'$ *coarse* tereduksi, yang berakhir dengan represipitasi dengan ukuran yang homogen dan halus sehingga meningkatkan $V_f \gamma'$.

Hal ini dapat dibuktikan pada hasil foto mikro terlihat batas butir mulai tidak terlihat dan presipitate semakin halus dan homogen. Sehingga kesamaan struktur kristal dan tingkat homogenitas yang tinggi membuat fasa ini tidak diragukan lagi dapat mengisi dislokasi sehingga ikatan struktur material kuat. Oleh karenanya pada Nickel base superalloy, kekerasan akan meningkat dengan adanya pertumbuhan ukuran partikel presipitat yang merupakan fungsi temperature dan waktu[10].

Peningkatan nilai kekerasan yang cukup signifikan seiring dengan peningkatan temperatur pemanasan, disebabkan adanya endapan pada batas butir. Presipitat yang dibentuk oleh Aluminium dan atau Titanium yang bergabung dengan Nikel awalnya bersifat γ' metastabil sebelum selanjutnya berubah, berkembang dan mempengaruhi struktur mikro fasa akibat terekspos temperatur yang meningkat selama aplikasi. Setelah mendekati kelarutannya, presipitat ini akan lebih stabil dan bersifat menguntungkan[10].

BAB V

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang sudah dijelaskan sebelumnya, peneliti dapat menyimpulkan beberapa permasalahan yang sudah dijelaskan secara padat dan ringkas, yaitu:

1. Pelebaran cacat pada benda uji nikel base superalloy selama proses pemanasan dengan temperatur 900 °, 1000 °, 1100 °, 1200 °C dan waktu tahan selama 1 jam, mengalami peningkatan lebar cacat dari lebar cacat awal (l_0) dengan lebar cacat setelah dilakukan pemanasan (l_i) yaitu $\Delta_1=0.5 \mu\text{m}$, $\Delta_2=1.34 \mu\text{m}$, $\Delta_3=2.22\mu\text{m}$, dan $\Delta_4=3.68\mu\text{m}$ Hal ini dikarenakan energi panas (peningkatan temperatur) dapat memicu pergerakan stress ke titik energi yang lebih rendah sehingga dapat menyebabkan pelebaran cacat.
2. Unsur paduan pada tabel 4.1. komposisi nikel based superalloy, memberikan pengaruh pada struktur mikro selama dilakukan pemanasan dengan temperatur 900 °, 1000 °, 1100 °, 1200 °C dan waktu tahan selama 1 jam. Seperti adanya endapan berbentuk senyawa karbida, gamma prime ataupun endapan partikel lainnya. Endapan ini berpengaruh pada pertumbuhan batas butir dan memperlambat pertumbuhan butir.
3. Peningkatan temperatur pemanasan pada temperatur 900 °, 1000 °, 1100 °, 1200 °C dan waktu tahan selama 1 jam, menghasilkan peningkatan nilai kekerasan dengan nilai kekerasan sebesar 64.95, 65.45, 66.325, 66.85, 66.625. Hal ini dikarenakan larutnya endapan seiring peningkatan temperatur.

DAFTAR PUSTAKA

1. Bradley, Elihu F, “*Superalloy: A Technical Guides*” ASM International, USA, 1998.
2. ASM, “*Alloying: Understanding the Basic*”, ASM International, USA, 2001.
3. Gianella, Stefano, “*Appunti Materiali Aeronautici e Aerospaziali*”, 2007, Università degli studi di Trento
4. N.S. Stoloff, Wrought and P/M Superalloys, in *Properties and Selection: Irons, Steels, and High- Performance Alloys*, Vol 1, 10th ed., *Metals Handbook*, ASM INTERNATIONAL, 1990, p 950-977
5. Lee Schmerling, Ron Munson, “*Superalloys, The Conduit Summer*”, 2003, USA.
6. Metal Handbook, Vol.1, “*Properties and Selection: Iron, Steels, and High Performance Alloy*”, ASM International, USA, 1991.
7. ASM Handbook, “*Heat Resistance Material*”, ASM, USA, 1991.
8. www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/nickel.html
9. Otis, E Charles. 1979. *Aircraft Gas Turbine Powerplant*. Wyoming: Aviation Maintenance Publisher Inc
10. JT8D Engine: Maintenance Training Manual book 1 of 2, PT. NTP Bandung
11. Smith, William F.; Hashemi, Javad (2001), *Foundations of Material Science and Engineering* (4th ed.), McGraw-Hill, p. 229,
12. Meier Mike, “*Kinetics of Grain Growth*”, Departement of Chemical Engineering and Materials Science, University of California, 2004.
13. Smallman, RE, terj “*Metalurgi Fisik Modern*”, Gramedia, Jakarta, 1991, Ed IV.
14. Metal Handbook, Vol.9, “*Metallography and Microstructures*”, ASM International, USA, 2004.
15. Davis, Joseph R (2000). “*Uses of Nickel*”. *ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys*. ASM International. pp. 7–13
16. Suharno, Bambang. Materi Ajar: Baja Paduan Tinggi dan Paduan Super. 2008/2009.
17. Otis, E Charles. *Aircraft Gas Turbine Powerplant*, International Standardbook, USA, 1989.

18. Treager, Irwin. *Aircraft Gas Turbine Engine Technology*, 2nd edition, USA, 1979.
19. Gordon, C Oates. *Aerothermodynamics of gas turbin and rocket propulsion*, AIAA Education series, AIAA Inc., USA, 1984.
20. *ASM international, Ni and Ni Alloys in heat resistant material*, Van Nostrand Reinhold Co,ltd, UK, 1987.

