



TUGAS AKHIR - TM 141585

**ANALISIS *REMAINING LIFE* SUDU TURBIN GAS
MW701D *STAGE 2* DARI PENGAMATAN
STRUKTUR MIKRO**

**SELVI KUSRINA PUTRI
NRP 2112 100 023**

**Dosen Pembimbing
Suwarno, ST., MSc., PhD.**

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016**



FINAL PROJECT - TM 141585

**REMAINING LIFE ANALYSIS OF GAS TURBINE BLADE
MW701D SECOND STAGE BY ITS MICROSTRUCTURE**

SELVI KUSRINA PUTRI
NRP 2112 100 023

Supervisor
Suwarno, ST., MSc., PhD.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2016

**ANALISIS REMAINING LIFE
SUDU TURBIN GAS MW701D STAGE 2
DARI PENGAMATAN STRUKTUR MIKRO**

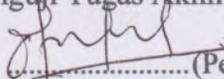
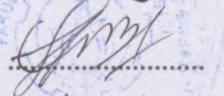
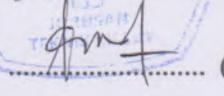
TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh November**

Oleh :

**SELVI KUSRINA PUTRI
Nrp. 2112 100 023**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Suwarno, ST., MSc., PhD.  (Pembimbing)
(NIP . 198005202005011003)
2. Indra Sidharta, ST., MSc.  (Penguji I)
(NIP . 198006192006041004)
3. Wahyu Wijanarko, ST., MSc.  (Penguji II)
(NIP . 198202092012121001)
4. Ika Dewi Wijayanti, ST., MSc.  (Penguji III)
(NIP . 198512022014042002)

**SURABAYA
JULI, 2016**

ANALISIS *REMAINING LIFE* SUDU TURBIN GAS MW701D STAGE 2 DARI PENGAMATAN STRUKTUR MIKRO

Nama Mahasiswa : Selvi Kusrina Putri
NRP : 2112100023
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Suwarno, ST., MSc., Ph.D

Abstrak

Sudu turbin merupakan komponen dari turbin gas yang berfungsi untuk mengkonversi energi kinetik menjadi energi mekanik yang digunakan untuk menggerakkan generator listrik. Sudu turbin gas MW701D stage 2 memiliki standard lifetime selama 72.000 Equivalen Operating Hours (EOH). Namun pada kenyataannya sudu turbin stage 2 digunakan hingga mencapai 72.331 EOH tanpa mengalami kegagalan. Dari permasalahan tersebut perlu dilakukan analisa terkait struktur mikro dan kekerasan dari komponen tersebut.

Investigasi diawali dengan melakukan pengamatan makro pada sudu turbin stage 2. Kemudian dilanjutkan dengan melakukan beberapa pengujian. Spectrometer digunakan untuk melakukan uji komposisi kimia. Lalu dilakukan pengujian metalografi untuk mengetahui kondisi struktur mikro pada material menggunakan mikroskop optis dan Scanning Electron Microscope (SEM). Serta pengujian kekerasan dengan menggunakan vickers hardness test dan micro hardness test untuk mengetahui perubahan kekerasan yang terjadi.

Remaining life sudu turbin dapat diprediksi dengan berdasar pada kondisi struktur mikro dan nilai kekerasan. Ditemukan adanya retak mikro pada daerah sekitar cooling holes yang menunjukkan adanya indikasi kegagalan. Selain itu ditemukan fasa Topological Closed Packed (TCP) dan karbida yang menyambung di batas butir. Hal ini membuat material menjadi getas. Ditemukan pula creep void yang menjadi

konsentrasi tegangan pada saat sudu turbin menerima beban operasi. Perubahan bentuk dari cubical menjadi spherical dan ukuran yang lebih kecil dari presipitat γ' juga ditemukan. Kondisi struktur mikro ini menjadi faktor yang memengaruhi remaining life sudu turbin. Dan dengan perhitungan didapatkan prediksi remaining life sebesar 10725 hours berdasarkan nilai kekerasannya dan sebesar 9042 hours berdasarkan metalografi.

Kata Kunci: sudu turbin, nickel based superalloy, remaining life

REMAINING LIFE ANALYSIS OF GAS TURBINE BLADE MW701D SECOND STAGE BY ITS MICROSTRUCTURE

Student Name : Selvi Kusrina Putri
NRP : 2112100023
Department : Teknik Mesin
Supervisor : Suwarno, ST., MSc., Ph.D

Abstract

Turbine blade is a component of a gas turbine that serves to convert the kinetic energy into mechanical energy which is used to drive an electric generator. Gas turbine blades MW701D second stage have standard lifetime over 72.000 Equivalent Operating Hours (EOH). But in fact, these turbine blade is used up to 72.331 EOH without any failure. Therefore, it needs to be analyzed related to microstructure, and hardness characteristic.

Investigation of turbine blade second stage starts macroscopically to know the turbine blade condition in macro scale. Then proceed to do some testing. Spectrometer is used to chemical composition test. Then, metallography testing to know microstructure condition of material by using optic microscope and Scanning Electron Microscope (SEM). Hardness testing by using Vickers Hardness Test and micro hardness to know the hardness changing of the component.

Remaining life of turbine blade can be predicted by microstructure condition and hardness number. Micro crack is found around the cooling holes of turbine blade which indicated any failure. Topological Closed Packed and continuous carbides also be found in grain boundaries. It makes the component to be brittle. Void is also found in grain boundaries which can make any stress concentration when the turbine is on operation. The shape changing from cuboidal into spherical and the size into smaller from precipitate γ' is also found as the effect of operation. That conditions be the factor which influence remaining life of turbine

blade. And by some calculation, get remaining life prediction 10715 hours depend on hardness number, and 9042 hours depend on metallography.

Key word: sudu turbin, nickel based superalloy, remaining life

KATA PENGANTAR

Ahamdulillah segala puji bagi Allah SWT karena hanya dengan rahmat dan petunjuknya akhirnya penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul: **Analisis Remaining Life Sudu Turbin Gas MW701D Stage 2 dari Pengamatan Struktur Mikro**. Penulis ingin berterima kasih kepada orang-orang di sekitar penulis yang ikut terlibat dalam penulisan tugas akhir ini. Secara khusus penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ayah, Ibu dan Kakak penulis yang selalu memberikan doa dan kasih sayangnya. Terima kasih atas dukungan baik secara moril maupun materil yang tiada henti selama ini.
2. Suwarno, ST., MSc., PhD selaku dosen pembimbing tugas akhir ini. Terima kasih untuk waktu, kritik dan saran serta motivasinya hingga terselesaikan tugas akhir ini.
3. Indra Sidharta, ST., MSc, Wahyu Wijanarko, ST., MSc, dan Ika Dewi Wijayanti, ST., MSc selaku dosen pembahas yang telah memberikan sarannya demi kesempurnaan tugas akhir.
4. Sahabat-sahabat tersayang: Janice, Ela, Sonny, Gagan yang selalu memberi semangat dan doanya bagi kelancaran pengerjaan tugas akhir.
5. Bella, Lintang, Ayu, Betari terima kasih sudah siap sedia menemaniku selama ini.
6. Fira, Ica, dan Fifi, partner in crime terima kasih sudah selalu setia mendukung dan membantu selama pengerjaan.
7. Umik bersaudara, Mbak Dewor, Mbak Iqo, Mbak Opi, Mbak Ateng, Pindra terima kasih sudah menjadi pelipur lara selama ini. See you on top.
8. Republik Metalurgi Raya: Tasa, Ifa, Amri. Sonny, Gani, Oxi, Ridho, Evelyn, Safaat, Lia, Mas Alvin, Mbak Scania, Mas Nyong, Mas Wira, dan yang lainnya terima kasih atas bantuan dan dukungan yang telah diberikan.
9. BPH Himpunan Mahasiswa Mesin 14/15 suwun banget rek setahun penuh perjuangannya.

10. Tim hura-hura: Alif, Adro, dan Fitroh terima kasih telah memberikan keceriaan disela-sela kesibukan.
11. Teman-teman M55: Muhtadi, Punjung, Risa, Didin, Dani, Valya, Wanda, Mila dan yang lainnya yang tidak bisa disebutkan satu-persatu terima kasih telah menemani perjuangan selama perkuliahan. Tetap jadi angkatan yang sangar ya rek!

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan tugas akhir kedepannya. Akhir kata penulis berharap agar tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi semua.

Surabaya, 1 Agustus 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II DASAR TEORI	
2.1 Prinsip Kerja Turbin Gas	5
2.2 <i>Turbine Blade</i>	7
2.3 <i>Superalloy</i>	8
2.4 Kegagalan pada Sudu Turbin	11
2.4.1 Oksidasi dan Korosi	12
2.4.2 <i>Creep</i>	12
2.4.3 <i>Fatigue</i>	15
2.4.3.1 Tahap Retak	16
2.4.3.2 Tahap Perambatan Retak	16
2.4.3.3 Patah Akhir	17
2.5 <i>Remaining Life</i>	17
2.5.1 Metalografi	18
2.5.2 Analisis Mulur/ <i>Creep</i>	20
2.5.3 Pengujian Kekerasan	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Sampel Material	23

3.2	Peralatan	23
3.3	Diagram Alir Penelitian	24
3.4	Langkah-Langkah Penelitian	26
	3.4.1 Pengamatan Lapangan	26
	3.4.2 Perumusan Masalah dan Tujuan	26
	3.4.3 Studi Literatur	26
	3.4.4 Pengamatan Makroskopis	26
	3.4.5 Pengujian Komposisi Kimia	26
	3.4.6 Pengujian Metalografi	26
	3.4.6.1 Persiapan Spesimen Metalografi	27
	3.4.6.2 Pengamatan Struktur Mikro	29
	3.4.7 Pengujian Kekerasan	29
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN		
4.1	Informasi Sudu Turbin	31
	4.1.1 Nama, Spesifikasi, dan Nomor Kodifikasi	31
	4.1.2 Unsur-Unsur Penyusun Material Sudu Turbin	32
4.2	Pengamatan Makroskopis	34
4.3	Pengamatan Mikroskopis	35
	4.3.1 Pengamatan Menggunakan Mikroskop Optis	36
	4.3.2 Pengamatan Menggunakan <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	40
4.4	Pengukuran Kekerasan	46
	4.4.1 <i>Micro Hardness Test</i>	46
	4.4.2 <i>Vickers Hradness Test</i>	47
4.5	Mulur/ <i>Creep</i>	49
4.6	Analisis <i>Remaining Life</i>	51
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	58
DAFTAR PUSTAKA		59
BIOGRAFI		61
LAMPIRAN		63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	a) Turbin Gas MW701D.....	2
	b) Turbin <i>blade stage 2</i>	2
	c) Turbin <i>blade stage 2</i> masih terpasang pada rotor	2
Gambar 2.1	Bagian-bagian Turbin Gas MW701DA.....	5
Gambar 2.2	Siklus Brayton untuk tahapan kerja turbin gas	7
Gambar 2.3	Berbagai Macam Bentuk Sudu Turbin (<i>Turbine Blade</i>).....	7
Gambar 2.4	Sudu Turbin <i>Scanning Electron Microscope Thermal Barrier Coating</i>	8
Gambar 2.5	Tampilan mikro dari 3 macam HPT <i>blade</i>	10
Gambar 2.6	Tiga tahapan mekanisme kegagalan mulur.....	13
Gambar 2.7	Kegagalan Sudu Turbin Akibat Adanya Void dan Kavitasi pada Batas Butir	14
Gambar 2.8	Model Pengintian retak oleh Wood	16
Gambar 2.9	Mekanisme perambatan retak	17
Gambar 2.10	<i>Larson Miller Parameter plot for Nickel Based Alloy</i>	21
Gambar 2.11	Grafik perbandingan kekerasan dan LMP	22
Gambar 3.1	Sudu turbin a)Tampak depan, b)Tampak belakang.....	23
Gambar 3.2	Diagram Alir Penelitian.....	24
Gambar 3.3	Bagian Sudu Turbin untuk Pengamatan Metalografi	28
Gambar 3.4	Bagian Sudu Turbin untuk Uji Kekerasan.....	30
Gambar 4.1	Skema Komponen Sudu Turbin Bertekanan Tinggi.....	32
Gambar 4.2	Turbine Blade a) Tampak Depan, b) Tampak Belakang, c) Tampak Atas, d) Tampak Bawah	34
Gambar 4.3	Bagian untuk metalografi.....	36
Gambar 4.4	Struktur Mikro Perbesaran 50x a) Tip, b) Root dan Perbesaran 2500x c) Tip, d) Root	37
Gambar 4.5	Distribusi <i>grain</i> pada <i>tip blade</i> dan <i>root blade</i>	38

Gambar 4.6	Continuous Carbides pada Tip Blade (Atas), Carbides dan Void pada Root Blade	41
Gambar 4.7	Fasa gamma prime (γ') pada material sudu Turbin	43
Gambar 4.8	Mikrostruktur In738LC (a)Baru, b)Digunakan 72331 EOH	44
Gambar 4.9	Retak Mikro pada Bagian <i>Tip blade</i>	45
Gambar 4.10	Titik Indentasi <i>Micro Hardness</i> pada Bagian. Tip (Atas), Root (Bawah).....	46
Gambar 4.11	Titik Indentasi <i>Vickers Hardness Test</i> Bagian <i>Tip Blade</i>	48
Gambar 4.12	Titik Indentasi <i>Vickers Hardness Test</i> Bagian <i>Root Blade</i>	48
Gambar 4.13	Grafik Tegangan Vs LMP Inconel 738 LC pada 800-900C	49
Gambar 4.14	Kontur Tegangan Maksimal pada Sudu Turbin	50
Gambar 4.15	Data Ekstrapolasi Tegangan Maksimal pada Grafik Tegangan Vs LMP.....	51
Gambar 4.16	Grafik Kekerasan Vs <i>Remaining Life</i>	53

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Kegagalan pada Komponen Turbin Gas	11
Tabel 2.2	Tahap Kegagalan Akibat Kavitas.....	15
Tabel 2.3	Klasifikasi Kerusakan Neubauer	19
Tabel 2.4	<i>Damage Level and Expended Life Fraction</i>	19
Tabel 4.1	Perbandingan Hasil Uji Komposisi Kimia dengan Komposisi Kimia Standar Material Inconel 738LC.....	32
Tabel 4.2	<i>Ultimate Tensile Strength</i> dan <i>Yield Strength</i> Inconel 738 LC.....	33
Tabel 4.3	Nilai Kekerasan dari <i>Micro Hardness Test</i> Bagian <i>Tip Blade</i>	47
Tabel 4.4	Nilai Kekerasan dari <i>Micro Hardness Test</i> Bagian <i>Root Blade</i>	47
Tabel 4.5	Nilai Kekerasan dari <i>Vickers Hardness Test</i> Bagian <i>Tip Blade</i>	48
Tabel 4.6	Nilai Kekerasan dari <i>Vickers Hardness Test</i> Bagian <i>Root Blade</i>	48
Tabel 4.7	Perhitungan <i>Remaining Life</i> Berdasarkan Nilai Kekerasan Bagian <i>Root Blade</i>	54
Tabel 4.8	Perhitungan <i>Remaining Life</i> Berdasarkan Nilai Kekerasan Bagian <i>Tip Blade</i>	55

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) merupakan siklus kombinasi antara Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Penggunaan turbin gas dan turbin uap pada pembangkit listrik berperan dalam meningkatkan efisiensi termalnya. Sehingga dengan penggunaan siklus kombinasi tersebut kebutuhan listrik yang semakin meningkat pesat dapat ditanggulangi.

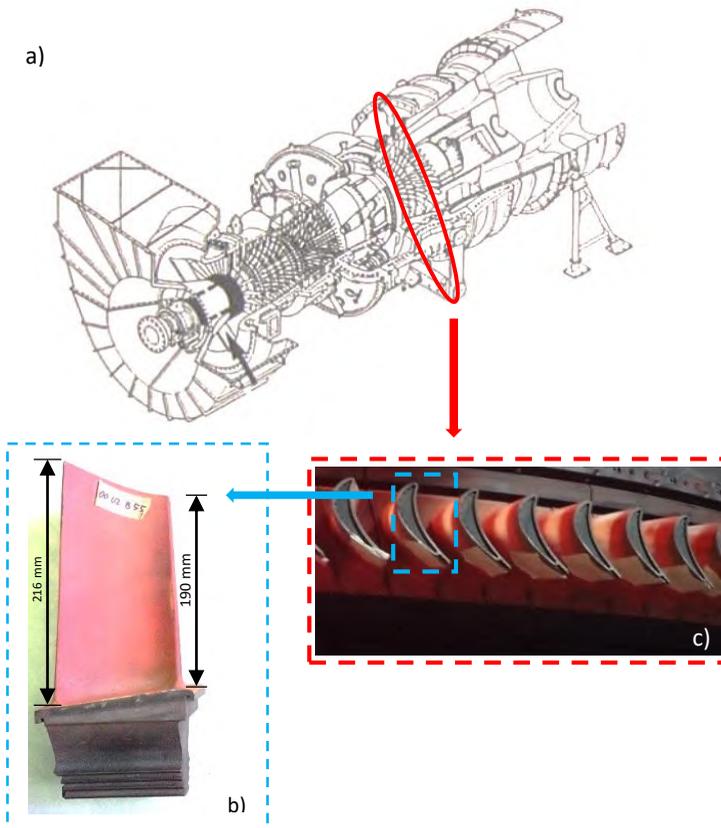
Dalam kegiatan pembangkitan listrik PLTGU, turbin gas memegang peranan penting sebagai komponen penggerak generator yang menghasilkan energi listrik. Oleh karena itu, kinerja dari turbin gas akan menjadi sorotan utama demi terjaganya stabilitas hasil pasokan energi listrik. Turbin gas yang digunakan adalah Turbin gas tipe MW701D.

Pada turbin gas tipe MW701D, sudu turbin (*turbin blade*) menjadi salah satu komponen penting yang berfungsi mengkonversi energi kinetik menjadi energi mekanik yang digunakan untuk menggerakkan poros generator. Pada turbin gas tipe MW701D terdapat 4 *stage* sudu turbin seperti pada gambar 1.1a dan setiap *stage* memiliki pengondisian yang berbeda. Perbedaan pengondisian temperatur yang bekerja pada sudu turbin tersebut akan sangat memengaruhi *useful lifetimenya*.

Useful lifetime itu sendiri adalah jangka waktu tertentu yang telah dirancang pada suatu komponen agar dapat bekerja sesuai dengan fungsinya. Komponen yang akan dibahas pada penelitian ini adalah sudu turbin *stage* 2 yang secara detail ditunjukkan pada gambar 1.1b dan 1.1c. Sudu turbin *stage* 2 ini dirancang untuk mampu bertahan dalam jangka waktu tertentu. Selain itu, rancangan tersebut juga dijadikan acuan dalam melakukan perawatan. Salah satu bentuk perawatan turbin gas tersebut adalah dengan melakukan penggantian komponen sudu turbin sesuai dengan prediksi umur yang telah diberikan. Sudu

turbin *stage 2* tersebut memiliki *standard lifetime* selama 72.000 *equivalent operation hours* (EOH). Dan pada kondisi nyata pengoperasiannya telah digunakan hingga mencapai 72.331 EOH tanpa mengalami kegagalan.

Berangkat dari permasalahan tersebut, maka akan dilakukan analisa tentang struktur mikro dan kekerasan dari sudu turbin *stage 2* setelah dilakukan ekstensi penggunaan.



Gambar 1.1 (a) Turbin Gas MW701D, (b) Turbin blade stage 2, (c) Turbin blade stage 2 masih terpasang pada

1.2 Rumusan Masalah

Sudu turbin *stage 2* pada gas turbin memiliki prediksi umur selama 72.000 EOH dan pada kondisi nyata telah dioperasikan selama 72.331 EOH. Hal tersebut dapat diartikan bahwa sudu turbin telah mengalami ekstensi penggunaan selama 331 EOH tanpa mengalami kegagalan hingga akhirnya dilakukan perawatan berupa penggantian komponen. Sehingga perlu dilakukan analisa indikasi kegagalan setelah dilakukannya ekstensi penggunaan dan mengestimasi *remaining life* dari sudu turbin gas MW701D *stage 2*.

1.3 Tujuan penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mendapatkan hasil analisa kondisi struktur mikro dan kekerasan setelah dilakukannya ekstensi penggunaan sehingga dapat mengestimasi *remaining life* dari komponen tersebut.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik dan mencapai tujuan yang diinginkan, maka diperlukan adanya batasan masalah yaitu bahwa kondisi operasional sesuai dengan standar yang telah ditentukan.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian yang dilakukan antara lain:

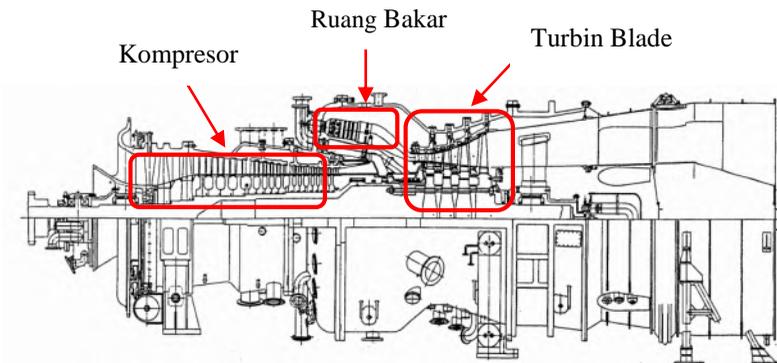
- a) Bagi dunia industri yang menggunakan sudu turbin, dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat dijadikan acuan atau pertimbangan dalam melakukan perawatan dan penggantian komponen yang bersangkutan.
- b) Bagi kalangan akademis terutama mahasiswa, dengan adanya penelitian ini diharapkan mampu mengaplikasikan dan memahami ilmu yang telah didapatkan untuk memecahkan permasalahan di dunia industri nyata.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II DASAR TEORI

2.1 Prinsip Kerja Turbin Gas

Turbin gas adalah suatu penggerak mula yang memanfaatkan gas sebagai fluida kerja. Di dalam turbin gas energi kinetik dikonversikan menjadi energi mekanik berupa putaran yang menggerakkan roda turbin sehingga menghasilkan daya yang memutar poros sebagai penggerak generator untuk menghasilkan energi listrik. Sistem turbin gas yang paling sederhana terdiri dari tiga komponen dasar yaitu kompresor, ruang bakar dan turbin blade (gambar 2.1). [1]



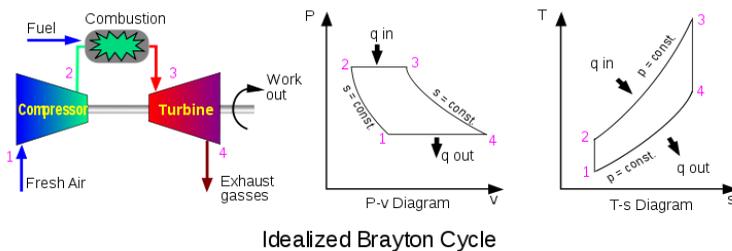
Gambar 2.1 Bagian-bagian Turbin Gas MW701DA [2]

Prinsip kerja turbin gas secara umum diawali dengan udara masuk ke dalam kompresor melalui saluran masuk udara (*inlet*). Kompresor ini berfungsi untuk menghisap dan menaikkan tekanan udara tersebut, akibatnya temperatur udara juga meningkat. Kemudian udara yang telah dikompresi ini masuk ke dalam ruang bakar. Di dalam ruang bakar diberikan bahan bakar sehingga bercampur dengan udara dan menyebabkan proses

pembakaran. Proses pembakaran tersebut berlangsung dalam keadaan tekanan konstan sehingga di dalam ruang bakar hanya terjadi peningkatan temperatur saja. Gas hasil pembakaran tersebut dialirkan ke turbin gas melalui suatu nozel yang berfungsi untuk mengarahkan aliran tersebut ke sudu-sudu turbin. Daya yang dihasilkan oleh turbin gas tersebut digunakan untuk memutar kompresornya sendiri dan memutar beban lainnya seperti generator listrik, dll. Setelah melewati turbin ini gas tersebut akan dibuang keluar melalui saluran buang (*exhaust*).

Secara umum proses yang terjadi pada suatu sistem turbin gas adalah sebagai berikut dimana diperjelas dengan gambar 2.2:

1. Pemampatan (*compression*): udara dihisap dan dimampatkan. Pada proses ini gas yang berupa udara luar dimampatkan hingga mencapai tekanan tertentu. Pemampatan udara ini juga akan menyebabkan kenaikan temperatur seperti yang ditunjukkan pada garis 1-2 Gambar 2.2.
2. Pembakaran (*combustion*): bahan bakar dicampurkan ke dalam ruang bakar dengan udara kemudian dibakar. Pada proses ini gas yang telah dimampatkan hingga memiliki tekanan tinggi dicampur dengan bahan bakar dan kemudian dibakar sehingga menghasilkan energi dan panas. Pada Gambar 2.2 proses ini ditunjukkan oleh garis 2-3.
3. Pemuaiian (*expansion*): akibat dari pembakaran gas pada proses sebelumnya. Volume gas akan naik secara drastis. Pada tahap inilah akan didapat aliran dari fluida (gas) yang memiliki energi kinetik. Dari Gambar 2.2 proses ini ditunjukkan oleh garis 3 dan 4.
4. Pembuangan gas (*exhaust*): gas hasil pembakaran dikeluarkan lewat saluran pembuangan. Pada proses ini disertai dengan penurunan temperatur gas.



Idealized Brayton Cycle

Gambar 2.2. Siklus Brayton untuk Tahapan Kerja Turbin Gas, Garis 1-2 untuk Kompresi, Garis 2-3 untuk Pembakaran, Garis 3-4 untuk Proses Ekspansi, dan Garis 4-1 untuk Pembuangan Gas Sisa[3]

2.2 Turbine Blade

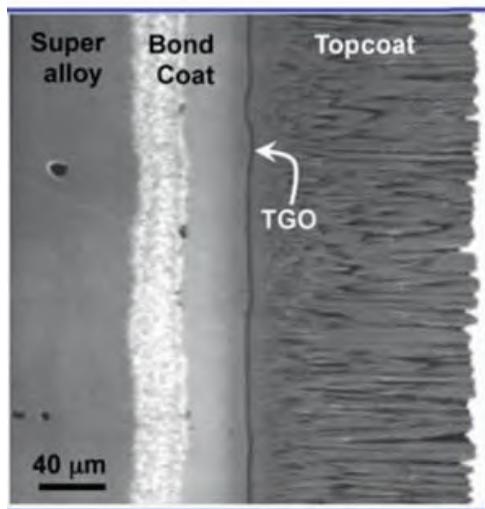
Turbine Blade atau sudu turbin adalah bagian turbin yang berbentuk bilah yang berotasi pada turbin dan berfungsi untuk mengkonversi energi kinetik menjadi energi mekanik yang digunakan untuk menggerakkan kompresor dan bagian lainnya seperti generator listrik. Prinsip kerja dari *turbine blade* dalam mengkonversikan energi adalah dengan mengakselerasikan gas panas yang berasal dari ruang pembakar (*combustion chamber*) melalui rotasi dari *turbine blade* itu sendiri. Pada generator industri, *turbine blade* digunakan sebagai motor penggerak alat-alat yang lainnya. Contoh berbagai macam bentuk *turbine blade* pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Berbagai Macam Bentuk Sudu Turbin (Turbine Blade)[4]

Sudu turbin *stage 2* yang diteliti memiliki desain yang telah disesuaikan dengan pengondisian operasinya. Sudu turbin tersebut dioperasikan pada temperatur 950°C dan berotasi pada putaran 3000 rpm. Sehingga dibutuhkan desain komponen yang dapat bertahan pada operasi dengan temperatur dan tegangan yang tinggi. Salah satu desainnya adalah dengan adanya penambahan *Thermal Barrier Coating*.

Coating pada sudu turbin memiliki beberapa fungsi. Selain memiliki fungsi sebagai tahan korosi dan tahan oksidasi, juga memiliki fungsi utama sebagai perlindungan panas. Dengan adanya perlindungan panas tersebut, temperatur yang mengenai *superalloy* sudu turbinnya lebih rendah antara 100-300°C. Desain *coating* pada sudu turbin dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Sudu Turbin Scanning Electron Microscope Thermal Barrier Coating [5]

2.3 Superalloy

Superalloy adalah paduan logam nikel (*nickel based*), besi – nikel, ataupun kobalt - nikel yang memiliki performa yang sangat

tinggi dibandingkan paduan logam biasa dan diaplikasikan pada temperatur di atas 1000°F (540°C). Keunggulan dari *Superalloy* adalah dalam hal kekuatan mekanik, ketahanan korosi, ketahanan *creep*, dan kualitas permukaan. Bahkan keunggulan-keunggulan tersebut juga berlaku pada lingkungan kerja dengan temperatur tinggi (> 1000 °C) sehingga cocok untuk diaplikasikan pada komponen turbin terutama pada bagian *High Pressure Turbine*.

Ni-Based Superalloy adalah *superalloy* dengan unsur Ni sebagai unsur dominannya yaitu pada umumnya lebih dari 40%. Berstruktur kristal FCC, nomor atom: 28, Ar: 58,71, Tm : 1455 °C, densitas : 8,89 g/cm³ adalah beberapa karakter yang dimiliki *Ni-Based Superalloy*. Logam nikel sebagai unsur dominan memiliki keunggulan yaitu ketangguhan dan keuletan tinggi, ketahanan yang tinggi terhadap korosi dan oksidasi, ketahanan yang tinggi terhadap temperatur tinggi maupun rendah. Berdasarkan sifat dasar tersebut, *Nickel Based Superalloy* juga memiliki sifat hampir sama sebagai akibat dari mendominasinya nikel. Namun kelemahan dari logam nikel adalah biaya produksinya yang tinggi dan tidak mudah bercampur dengan sembarang paduan sehingga diperlukan pemilihan yang cermat dalam menentukan komposisi paduan logam nikel.

Pada bagian *hot section path* seperti bagian sudu ataupun *vane*, teknik pembuatan *casting*/pengecoran sangat sesuai dilakukan. Terdapat beberapa jenis dari produk ini yaitu *Single Crystalline*, *Polycrystalline*, dan *Directionally Solidified (DS)*. *Single Crystalline* mengandung butiran yang seragam, *Polycrystalline* banyak mengandung butir dengan ukuran bermacam – macam sedangkan untuk produk DS banyak mengandung butiran dimana antar butiran tersebut tersambung satu sama lain secara paralel sehingga pola butirnya bisa juga disebut *Columnar Grain Directionally Solidified (CGDS)*. [6]



Gambar 2.5 Tampilan mikro dari 3 macam HPT Blade; polycrystaline (kiri), Columnar Grain Directinally Solidified (CGDS) (tengah), Single Crystal (kanan)[7]

Berikut adalah pembagian elemen serta fasa pembangun dari paduan *Nickel Based Superalloy* beserta unsur-unsur penyusunnya yang memiliki karakteristik dan pengaruh terhadap sifat-sifat yang dihasilkan [6]:

- Gamma (γ), merupakan matriks dari paduan *Nickel Based Superalloy* yang pada umumnya memiliki kandungan nikel (Ni), kobalt (Co), krom (Cr), molibdenum (Mo), dan tungsten (W) dengan kadar yang tinggi dari keseluruhan paduan.
- *Gamma Prime* (γ'), merupakan presipitat dari matriks Gamma (γ), yaitu berupa Ni_3X dengan X adalah unsur aluminium (Al) maupun titanium (Ti) sebagai komponen yang berikatan dengan Ni.
- Karbida, merupakan senyawa karbida yang terbentuk dari unsur karbon yang berikatan dengan unsur-unsur yang reaktif dan bersifat refraktori seperti titanium (Ti), tantalum (Ta), dan hafnium (Hf). Adapun jenis karbidanya berupa MC , M_{23}C_6 , dan M_6C .

- Borida, merupakan senyawa borida (M_2B_3) dengan M adalah unsur Mo, Ti, Cr, Ni, atau Cr.
- Borida, karbida, dan zirconium (Zr) pada batas butir.
- Fasa *Topological Close-Packed* (TCP). Fasa ini terbentuk akibat adanya paduan tertentu yang komposisinya tidak dikontrol dengan baik dan benar. Sehingga memungkinkan terbentuknya fasa atau presipitat yang tidak diinginkan.

2.4 Kegagalan Pada Sudu Turbin

Pada kondisi pengoperasian dengan tekanan tinggi dan temperatur tinggi, sudu turbin sangat rentan terjadinya kegagalan. Dengan adanya pengondisian tersebut menyebabkan terjadinya penurunan sifat mekanik. Jika dikombinasikan dengan tidak tepatnya material yang digunakan akan menyebabkan komponen tersebut semakin mudah mengalami kegagalan. Kegagalan yang sering terjadi pada sudu turbin adalah oksidasi dan korosi, *creep* dan *fatigue*. Tabel 2.1 menunjukkan beberapa komponen penting pada turbin gas dan kegagalan yang sering terjadi, salah satunya adalah pada sudu turbin.

Tabel 2.1 Kegagalan pada komponen Turbin Gas [9]

Components	Oxidation/ Corrosion	Creep	Fatigue
Turbin blade	■	■	■
Compressor blade	□	●	■
Inner Casing	■	■	□
Rotor Parts	●	●	□
Pressure casing	●	●	□

■ Significant contribution

□ Affect only local

● Irrelevant

2.4.1 Oksidasi dan Korosi

Dalam industri pembangkit listrik, salah satu kegagalan komponen dipengaruhi oleh laju korosi dan oksidasi. Korosi yang terjadi pada komponen dengan pengoperasian temperatur tinggi adalah korosi kering. Korosi kering ini terjadi akibat adanya reaksi kimia pada temperatur yang tinggi yang dapat merusak lapisan oksida yang bersifat protektif.

Lapisan oksida protektif terbentuk dari reaksi suatu material dengan oksigen atau gas lainnya. Mekanisme dari terbentuknya lapisan oksida diawali dengan adsorpsi oksigen pada material sehingga akan terbentuk oksida pada permukaannya. Lalu akan terjadi nukleasi dan pertumbuhan oksida yang membentuk lapisan yang bersifat protektif. Namun pada keadaan tertentu seperti adanya cacat mikro, kavitasi maupun porositas diantara lapisan oksida dan material menyebabkan terjadinya kerusakan lapisan oksida.

2.4.2 Creep

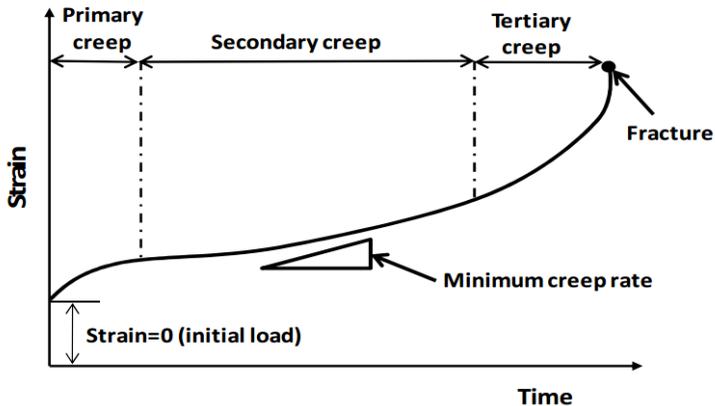
Creep adalah suatu kecenderungan suatu material untuk terjadi deformasi plastis di bawah pengaruh tegangan dan temperatur yang tinggi dalam kurun waktu yang lama. Jadi besarnya nilai *creep* sangat bergantung pada sifat material, waktu, temperatur, dan kondisi tegangan. Pada umumnya, *creep* terjadi pada temperature antara 0.4 – 0.6 kali temperatur lelehnya.

Terdapat tiga tahapan dalam peristiwa *creep* (gambar 2.6), yaitu:

- Tahap pertama: ketika beban mulai diberikan segera diikuti dengan terjadinya regangan sesaat sebesar ϵ . Kemudian laju regangan mulur akan semakin berkurang seiring dengan bertambahnya waktu. Tahap ini disebut dengan *primary creep*.
- Tahap kedua: laju regangan *creep* menjadi konstan, hal ini disebabkan karena terjadi kesetimbangan antara kecepatan proses *strain hardening* dengan *recovery*. Tahap ini adalah tahap yang paling penting dalam proses mulur, karena pada saat ini bahan mengalami laju mulur paling rendah dan konstan

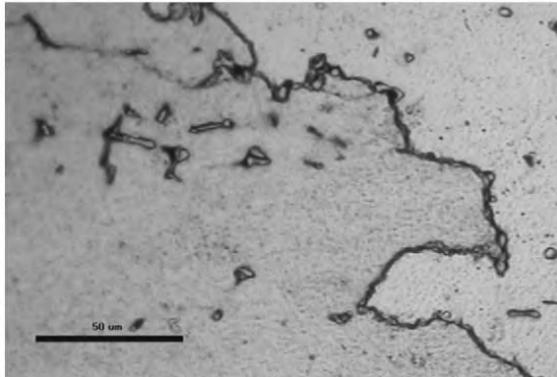
dalam waktu yang lebih lama. Tahap ini disebut juga dengan *steady state creep*.

- Tahap ketiga: terjadi penyempitan lokal (*necking*) hingga pada akhirnya laju *creep* bertambah besar sampai terjadi kerusakan. Tahap ini disebut dengan *tertier creep*. [9]



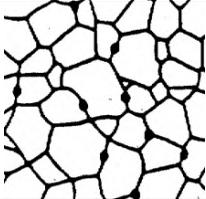
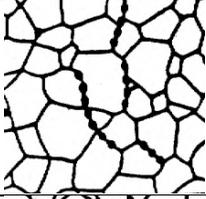
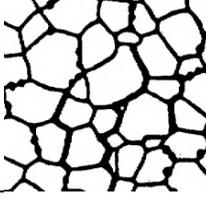
Gambar 2.6 Tiga Tahapan Mekanisme Kegagalan Mulur [9]

Pada komponen yang bekerja pada temperatur dan tegangan yang tinggi, kemuluran yang terjadi kerap disebabkan karena adanya kavitasi atau void pada bagian batas butir seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7. Terdapat empat tahap mekanisme kegagalan akibat kavitasi yang ditunjukkan pada tabel 2.2. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa pada tahap pertama, muncul titik-titik kavitasi pada batas butir. Dalam jangka waktu tertentu akan terbentuk kavitasi yang semakin banyak dan bersambung pada batas butirnya yang akan menyebabkan munculnya cacat retak mikro. Dengan pemberian tegangan yang terus-menerus maka menyebabkan terbentuknya retak makro yang akan berakhir pada kegagalan material.



Gambar 2.7 Kegagalan Sudu Turbin Akibat Adanya Void dan Kavitasi Pada Batas Butir [10]

Tabel 2.2 Tahap Kegagalan Akibat Kavitasasi [8]

Tahap	Struktur Mikro	Gambar
1	<i>Isolated Microcavities</i>	
2	<i>Oriented Microcavities</i>	
3	<i>Microcracks</i>	
4	<i>Macrocracks</i>	

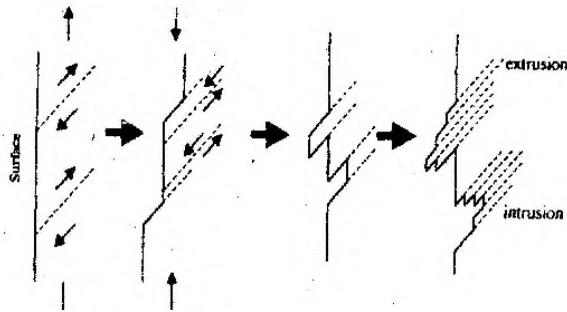
2.4.3 Fatigue

Kelelahan (*fatigue*) adalah suatu kerusakan yang terjadi akibat adanya pemberian tegangan secara berulang-ulang dimana tingkat tegangan yang diberikan jauh lebih rendah daripada tegangan yang diperlukan untuk mematahkannya. Kerusakan

karena kelelahan dapat terjadi akibat merambatnya retak/cacat secara perlahan dan bertahap.

2.4.3.1 Tahap retak awal

Awal retak biasanya dimulai dari permukaan. Hal ini terjadi karena permukaan menerima beban terbesar dan paling memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan. Fenomena awal retak, secara sederhana diberikan oleh Wood. Model pengintian retak oleh Wood ini dapat dilihat pada gambar 2.8.



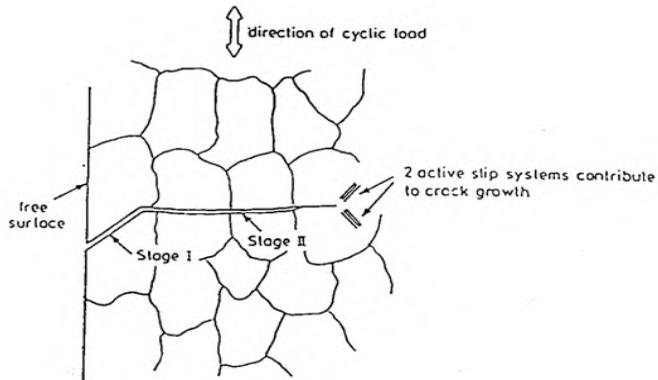
Gambar 2.8 Model Pengintian retak oleh Wood [11]

Pada beban tarik pertama, slip terjadi dengan membentuk permukaan bertingkat yang membentuk sudut 45° dengan sumbu tegangan. Hal ini akibat tegangan geser maksimal yang terjadi pada sudut tersebut. Pembebanan selanjutnya menyebabkan slip pada arah yang berlawanan. Slip ini terjadi pada bidang yang berdekatan dengan yang pertama. Dan selanjutnya merupakan proses pengulangan dalam pembebanan siklus yang sama.

2.4.3.2 Tahap perambatan retak

Perambatan retak pada suatu komponen terjadi jika tegangan maksimum pada ujung retakan berada di atas kekuatan material. Perambatan retak terjadi pada bidang slip dengan kecepatan lambat. Namun perambatan ini belum bisa dilihat secara makro. Peristiwa ini disebut perambatan retak tahap I.

Selanjutnya pertumbuhan retak tahap II sering ditandai dengan adanya striasi. Pada tahap ini pertumbuhan retak tegak lurus dengan tegangan tarik maksimum. Retakan mulai dapat dilihat dengan mata telanjang, oleh karena itu disebut dengan retak makro. Mekanisme perambatan retak dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Mekanisme Perambatan retak [11]

2.4.3.3 Patah akhir

Retak makro merambat sedikit demi sedikit dan bertambah panjang pada setiap siklus pembebanan yang selanjutnya menghasilkan keretakan yang semakin lama semakin panjang. Akhirnya penampang logam semakin kecil dan tidak lagi mampu mendukung beban yang diterima hingga akhirnya logam akan patah.

2.5 Remaining Life Assessment

Remaining Life Assessment (RLA) adalah suatu metode yang dilakukan untuk menentukan usai yang tersisa dari peralatan dengan menggunakan teknologi tertentu, tes, pengukuran, dan juga pengolahan operasi dan pemeliharaan data sehingga keputusan terbaik dalam pengelolaan aset lebih lanjut dapat diambil. Jika pada

suatu peralatan ditemukan adanya degradasi material atau adanya kerusakan pada saat dilakukannya *overhaul*, maka akan dilakukan pergantian sebagai bentuk antisipasi dari adanya kerusakan yang berdampak lebih besar. RLA dapat digunakan untuk mengetahui sisa usia suatu komponen sehingga dapat menghindarkan adanya pergantian dini pada komponen tersebut. Dengan begitu, RLA dapat digunakan sebagai acuan atau pertimbangan dalam melakukan *maintenance* sehingga dapat mereduksi biaya *maintenance* serta mereduksi *downtime*. Terdapat beberapa metode RLA, diantaranya adalah:

2.5.1 Metalografi

Metalografi merupakan disiplin ilmu yang mempelajari tentang karakteristik mikrostruktur suatu logam, paduan logam dan material lainnya serta hubungannya dengan sifat-sifat material. Penglihatan secara mikroskopis memungkinkan kita melihat besar kecilnya granul, batas granul, dan distribusi dari tiap fase yang semuanya sangat penting dalam menentukan struktur suatu logam. Struktur mikro itu sendiri dipengaruhi oleh komposisi kimia dari logam atau paduan logam tersebut serta proses yang dialaminya.

Untuk menentukan sisa usia berdasarkan uji metalografi, diperlukan analisa struktur mikro pada bagian kritisnya. Analisa tersebut dilakukan untuk mengetahui perubahan dari setiap struktur mikro baik dari pertumbuhan batas butir presipitat, degenerasi dari karbida, maupun terbentuknya struktur baru pada batas butirnya. Untuk material dengan operasi tegangan dan temperatur tinggi, perubahan struktur mikro yang sering terjadi adalah terbentuknya kavitasi. Dari analisa tersebut dapat dibandingkan dengan standar penelitian yang telah ada.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Neubauer, terdapat klasifikasi kerusakan yang dapat digunakan sebagai acuan standar penelitian yang ditunjukkan pada tabel 2.3 berikut.

Tabel 2.3 Klasifikasi kerusakan Neubauer [8]

Tingkat evolusi	Kondisi Struktur mikro hasil metalografi
0	Struktur mikro normal untuk komponen baru
1	Struktur mikro normal untuk kondisi perawatan awal
2	a) Terbentuk karbida pada batas butir b) Terbentuk kavitasasi pada batas butir c) Mulai terdistribusinya kavitasasi secara tidak teratur
3	a) Terbentuknya kavitasasi yang kontinyu pada batas butir b) Terjadi separasi pada batas butir
4	Retak mikro
5	Retak makro

Terdapat keterkaitan antara klasifikasi yang dibuat oleh Neubauer dengan sisa usia suatu komponen. Hasil metalografi yang dilakukan dapat digunakan sebagai acuan dalam menentukan tingkat kerusakan material tersebut dengan berdasar pada klasifikasi yang telah ada. Setiap tingkatan kerusakan memiliki nilai *expended life fraction* yang ditunjukkan pada tabel 2.4 yang nantinya akan digunakan sebagai perhitungan sisa usia suatu material.

Tabel 2.4 *Damage level and expended life fraction* [8]

<i>Damage level</i>	<i>Expended Life Fraction</i> ($\frac{t}{t_r}$)
1	0.181
2	0.442
3	0.691
4	0.889
5	1.000

Berdasarkan tabel *expended life fraction* yang telah ada, dapat ditentukan sisa usia suatu material dengan menggunakan pendekatan Wedel-Neubauer sebagai berikut[8]:

$$t_{rem} = t \left(\frac{t_r}{t} - 1 \right) \quad (1)$$

Dimana :

t_{rem}	=	<i>remaining life</i> (hr)
t	=	<i>operating time</i> (hr)
$\frac{t_r}{t}$	=	<i>1/expended life fraction</i>

2.5.2 Analisis Mulur / Creep

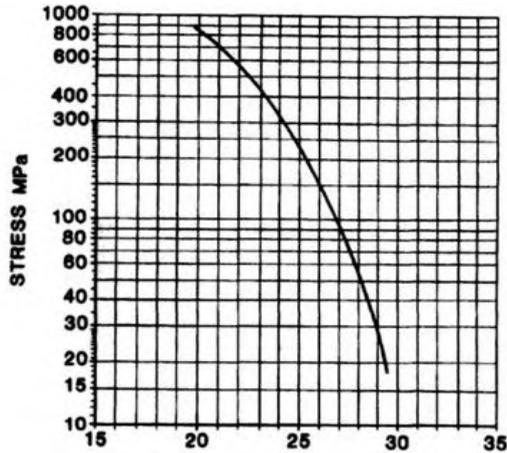
Usia suatu komponen dengan temperatur tinggi dapat dilakukan dengan menggunakan uji mulur yaitu menggunakan suatu pendekatan yang disebut sebagai *Larson Miller Parameter*. *Larson Miller Parameter* adalah suatu persamaan yang dapat digunakan untuk memprediksi usia sisa dari suatu komponen. Parameter ini dapat digunakan untuk menghitung sisa usia material yang dioperasikan pada temperatur tinggi dengan cara mengekstrapolasikan data hasil pengujian *accelerated creep*. Data pengujian *accelerated creep* didapatkan dari pengujian *creep* pada variasi suhu ataupun tegangan. Pengujian ini dilakukan agar mempercepat waktu putus spesimen. [12]

Larson Miller Parameter merupakan suatu persamaan yang menghubungkan antara suhu operasi dengan usia (*time to rupture*) yang dinyatakan dengan rumus matematika sebagai berikut:

$$LMP = T (C + \log t_r) \times 10^{-3} \quad (2)$$

dimana T adalah temperatur absolut (K), t_r adalah *rupture time* atau usia pakai suatu komponen sebelum dia mengalami kegagalan akibat *creep* dalam satuan jam (h), sedangkan C adalah konstanta bergantung jenis material dan berdasarkan penelitian nilai C berkisar antara 10 sampai dengan 40. Namun secara universal, nilai

C yang digunakan adalah 20. Contoh ekstrapolasi data uji *creep* pada gambar 2.8.



LMP

Gambar 2.10 Larson Miller Parameter plot for Nickel Based Alloy [12]

2.5.3 Pengujian Kekerasan

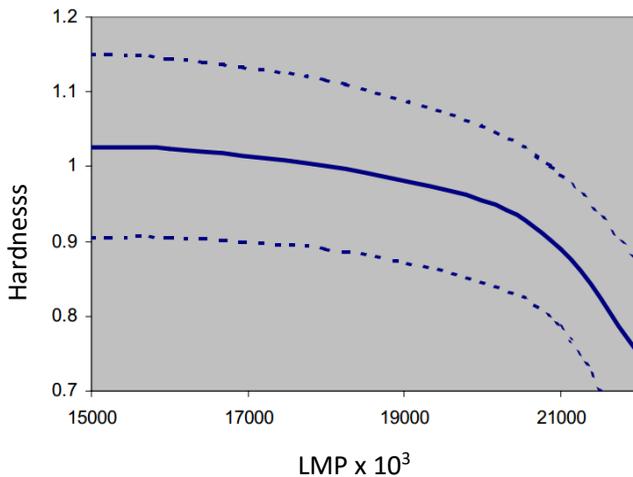
Pengujian kekerasan dilakukan dengan tujuan mengetahui nilai kekerasan pada suatu komponen. Komponen yang telah digunakan akan mengalami perubahan nilai kekerasan. Perubahan nilai kekerasan disebabkan karena komponen berada dalam operasi dengan temperatur dan tegangan yang tinggi.

Untuk mengetahui sisa usia dari suatu material, dapat pula digunakan metode uji kekerasan. Informasi dari hasil pengujian ini dapat digunakan sebagai data awal dalam menentukan sisa usia suatu material. Keterkaitan antara sisa usia dan kekerasan tersebut ditunjukkan pada pendekatan di bawah ini:

$$HV/HV_0 = a \cdot LMP + b \cdot LMP^2 + c \quad (3)$$

Dimana : HV = nilai kekerasan setelah penggunaan
 HV₀ = nilai kekerasan awal
 a, b, c = konstanta dengan nilai
 a (1.25 sampai 1.6) 10⁻³
 b (3.91 sampai 4.97) 10⁻⁸
 c (-8.94 sampai -11.99)

dari perolehan data tersebut, didapatkan grafik kekerasan dan LMP yang ditunjukkan pada gambar 2.11 berikut. Grafik tersebut digunakan sebagai acuan dalam menentukan sisa usianya.

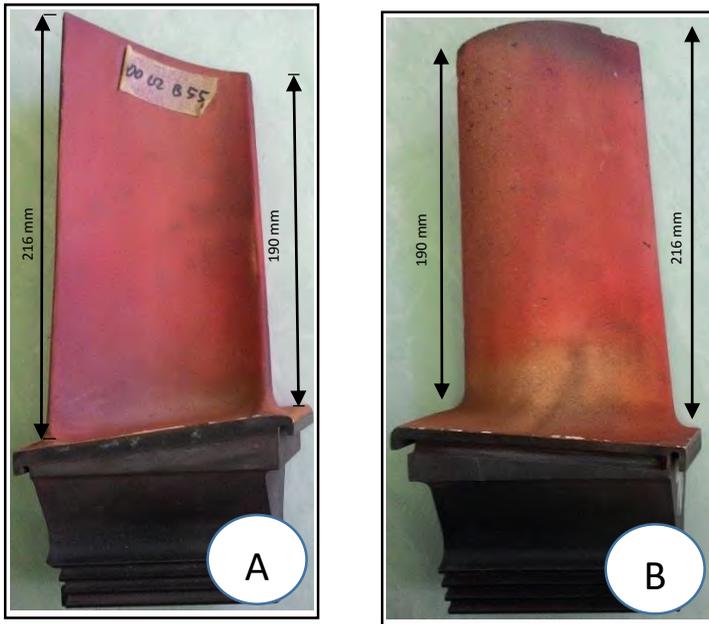


Gambar 2.11 Grafik perbandingan kekerasan dan LMP [8]

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Sampel Material

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah satu buah sudu turbin *stage 2* yang diambil dari turbin gas MW701D. Sudu turbin tersebut telah digunakan selama 72331 EOH



*Gambar 3.1 Sudu Turbin. (A) Tampak Depan,
(B) Tampak Belakang*

3.2 Peralatan

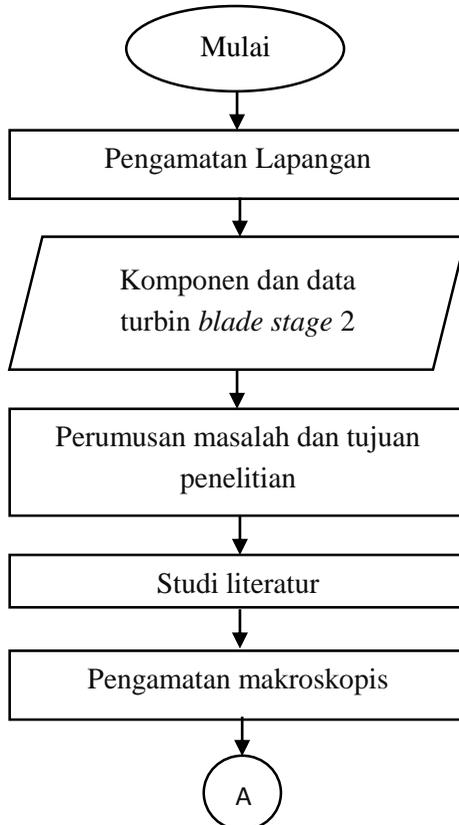
Peralatan yang digunakan untuk melakukan penelitian ini, antara lain:

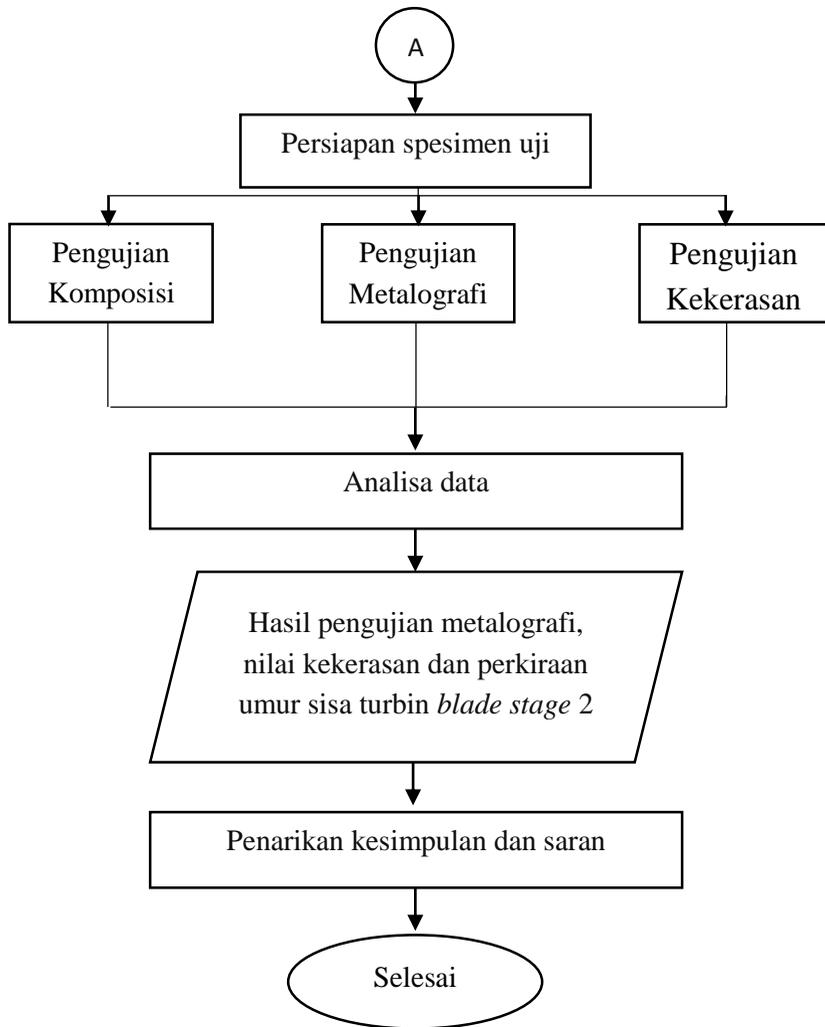
1. Penggaris dan jangka sorong

2. Kamera digital
3. Alat pemotong : *wirecut*
4. Mikroskop Optis
5. Perangkat *grinding*, *polishing*, dan *etching*
6. Alat uji komposisi kimia *spectrometer*
7. Alat uji *Vickers hardness* dan *micro hardness*
8. Mesin *Scanning Electron Microscope* (SEM)

3.3 Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian ini secara singkat digambarkan melalui diagram alir pada gambar 3.2 berikut:





Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

3.4 Langkah-langkah Penelitian

Pada tugas akhir ini, langkah-langkah yang dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian adalah sebagai berikut:

3.4.1. Pengamatan Lapangan

Pengamatan lapangan bertujuan untuk mencari informasi terkait permasalahan yang akan diteliti. Informasi tersebut bisa berupa *data sheet* maupun hasil pengamatan langsung di lapangan.

3.4.2 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Perumusan masalah dan penetapan batasan masalah dilakukan untuk memperjelas lingkup penelitian. Kemudian penetapan tujuan yang ingin dituju dari penelitian yang dilakukan.

3.4.3 Studi Literatur

Studi literatur merupakan proses ulasan terhadap buku dan jurnal yang mendukung dalam memberikan informasi tentang penelitian yang sejenis. Hal ini termasuk pengumpulan materi kuliah yang terkait untuk digunakan sebagai referensi atau pustaka.

3.4.4 Pengamatan Makroskopis

Pengamatan makroskopis dilakukan dengan menggunakan bantuan kamera digital. Pengamatan ini dilakukan untuk mendapatkan informasi kondisi dari material secara makro.

3.4.5 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui kandungan komposisi kimia yang terdapat pada komponen yang dianalisa. Pengujian komposisi ini dilakukan dengan menggunakan alat *Spectrometer Thermo ARL*.

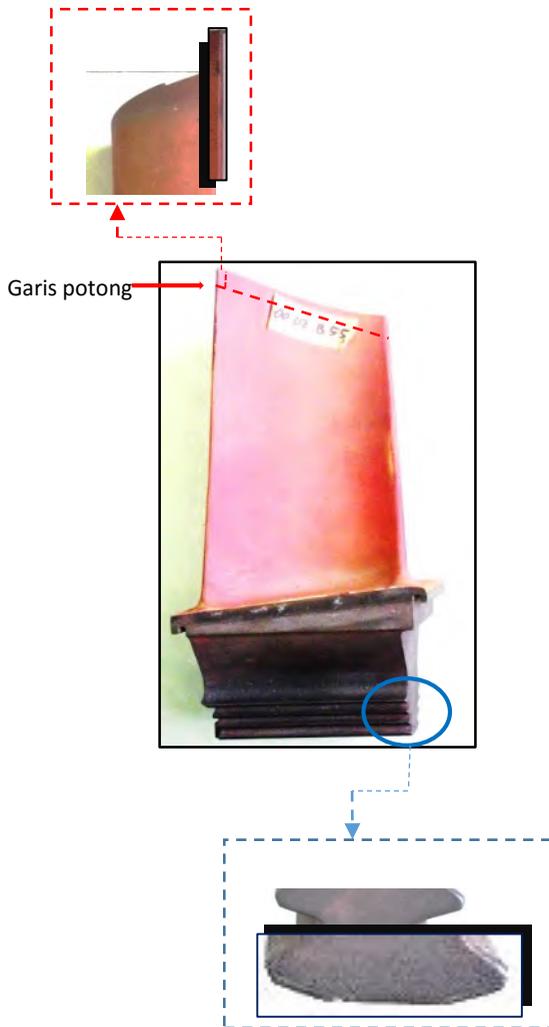
3.4.6 Pengujian Metalografi

Proses persiapan pengujian metalografi meliputi pemotongan spesimen, *grinding*, *polishing* dan *etching*. Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui kondisi struktur mikro yang terdapat pada material.

3.4.6.1 Persiapan Spesimen Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan pada 2 bagian sudu turbin yang ditunjukkan pada gambar 3.3. Tahap persiapan metalografi untuk spesimen dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Grinding*: Spesimen digosok pada mesin *grinding*, dari yang paling kasar bisa mulai dengan grit 80 sambil dialiri air. Setelah terjadi garis-garis goresan yang sejajar dan merata spesimen dicuci dengan air, dan kertas gosok diganti dengan grit yang lebih tinggi secara gradual yaitu 120, 240, 320, 400, 500, 600 dan seterusnya sampai pada grit 2000.
2. *Polishing*: Spesimen dipoles dengan ditekan pada permukaan piringan yang berputar. Piringan ini dilapisi kain penggosok yang telah ditambahkan *water based diamond* sehingga didapatkan permukaan spesimen yang mengkilap seperti cermin. Untuk membersihkan sisa-sisa *polishing powder* spesimen dicuci dengan air dan alkohol kemudian dikeringkan dengan *dryer* atau digosok dengan kain.
3. *Etching*: Permukaan spesimen dicelupkan kedalam larutan kimia (*etching reagent*). *Etching reagent* yang digunakan untuk spesimen ini adalah 20 ml HNO_3 dan 60 ml HCl dengan waktu 10-30 detik



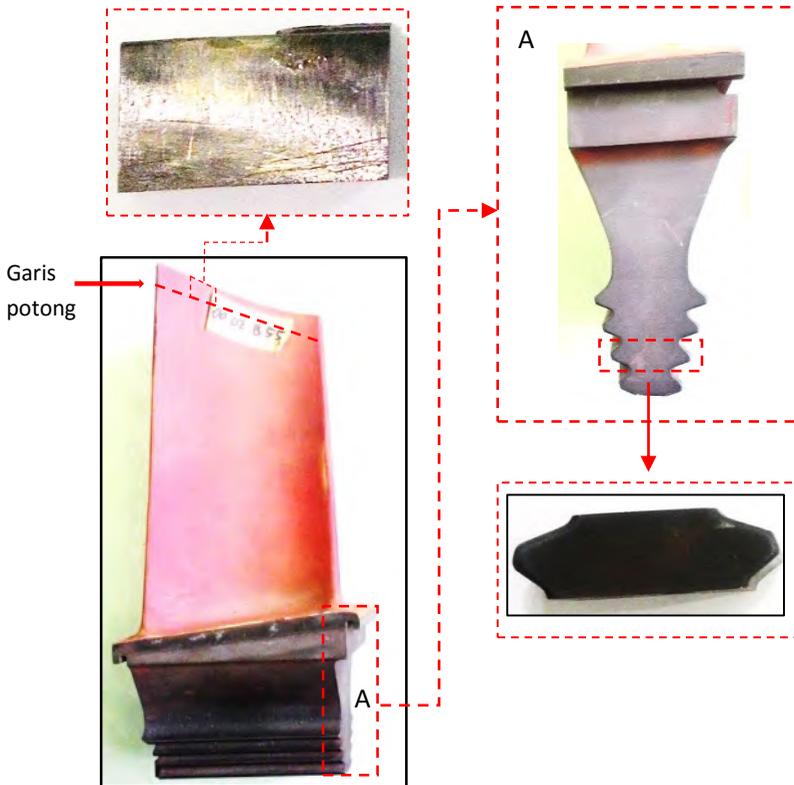
Gambar 3.3 Bagian Sudu Turbin untuk Pengamatan Metalografi

3.4.6.2 Pengamatan Struktur mikro

Pengamatan struktur mikro dilaksanakan dalam beberapa kali perbesaran dengan menggunakan mikroskop optis dan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Dari pengamatan tersebut akan didapatkan gambar mikro dengan perbesaran tertentu untuk diketahui struktur mikronya.

3.4.7 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan yang dilakukan adalah dengan menggunakan metode *Micro Hardness* dan *Vickers Hardness Test*. Pada pengujian mekanik ini bertujuan untuk mengetahui sifat mekanik antara komponen sudu turbin yang mengalami telah digunakan untuk selanjutnya dibandingkan dengan standar yang ada. Sebelum dilakukan uji kekerasan, diperlukan persiapan spesimen yaitu proses *grinding* dimana spesimen digosok pada mesin *grinding*, dari yang paling kasar bisa mulai dengan grit 80 sambil dialiri air. Setelah terjadi garis-garis goresan yang sejajar dan merata spesimen dicuci dengan air, dan kertas gosok diganti dengan grit yang lebih tinggi secara gradual yaitu 120, 240, 320, dan seterusnya sampai permukaan spesimen rata. Hal tersebut dilakukan pada kedua bagian sudu turbin yang akan diuji yang ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Bagian Sudu Turbin untuk Uji Kekerasan

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Informasi Sudu Turbin

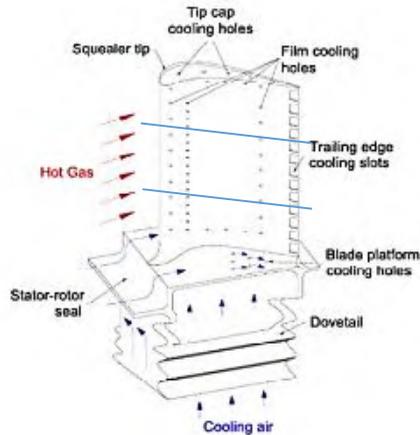
Adapun data-data mengenai komponen yang akan diteliti dalam studi analisa *remaining life* ini adalah sebagai berikut.

4.1.1 Nama, Spesifikasi, dan Nomor Kodifikasi

Komponen sudu turbin yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah jenis sudu turbin bertekanan tinggi dari gas turbin tipe MW701D pada *stage* kedua yang telah digunakan selama 72331 *Equivalent Operating Hours* (EOH) dan diambil secara acak dengan nomer serial 900U2 B55. Sudu turbin bekerja pada putaran 3000 rpm dan dengan temperatur kerja 950 °C. Bagian-bagian sudu turbin ditunjukkan pada gambar 4.1. Terdapat tiga daerah utama yaitu:

- A. *Tip region*: berfungsi untuk mengurangi kebisingan dan *losses*
- B. *Mid region*: berfungsi untuk menentukan besarnya gaya sentrifugal sudu turbin
- C. *Root region*: berfungsi sebagai penahan sudu turbin agar tidak lepas dari rotor disk.

Sudu turbin terbuat dari bahan *Nickel-Based Superalloy* dan cara pembuatannya yaitu dengan cara *investment casting*. Sudu turbin memiliki sistem pendingin berupa 15 lubang pendingin di dalam sudu serta *thermal barrier coating* pada permukaan sudu turbin.



Gambar 4.1 Skema komponen sudu turbin bertekanan tinggi [9]

4.1.2 Unsur-Unsur Penyusun Material Sudu Turbin

Pengujian komposisi kimia dilakukan pada material sudu turbin dengan mengambil bagian *root* sebagai sampel ujinya. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *Spectrometer Thermo ARL*. Hasil pengujian dibandingkan dengan komposisi kimia standar. Hasil perbandingan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Perbandingan Hasil Uji Komposisi Kimia Dengan Komposisi Kimia Standar Material Inconel 738 LC [13]

Komposisi	%	
	Hasil uji Spektrometer	ASM handbook
Ni	70.532	Bal
Cr	15.189	16
Co	1.86	8.5
Mo	1.497	1.7
Al	3.07	3.4

(lanjutan)

Ti	2.86	3.4
Ta	1.34	1.7
W	1.53	2.6
Zr	0.1	0.1
C	0.077	0.09
B	0.016	0.01
Nb	0.892	0.9
Si	0.073	Other
Mn	0.012	
S	0.004	
Cu	0.178	
Fe	0.656	
Pb	0.041	
Sn	0.025	

Setelah dilakukan perbandingan dengan komposisi kimia standar, sudu turbin memiliki komposisi kimia yang sesuai dengan material Inconel 738 LC. Hasil analisa dari spektrometer tidak sepenuhnya sama dengan standar yang ada. Namun sebagian besar masih dalam *range* standar yang sesuai.

- Sifat Mekanik

Adapun sifat mekanik dari material Inconel 738 LC berdasarkan standar adalah sebagai berikut:

Tabel 4.2 Ultimate Tensile Strength dan Yield Strength

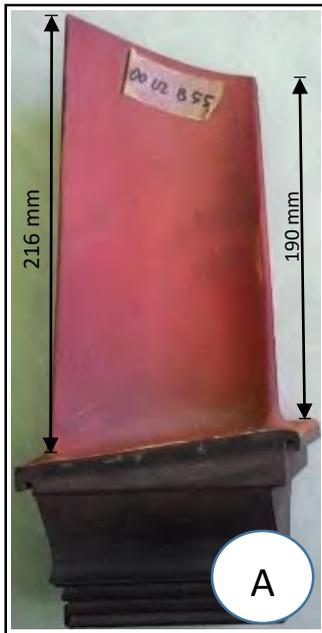
Inconel 738 LC [14]

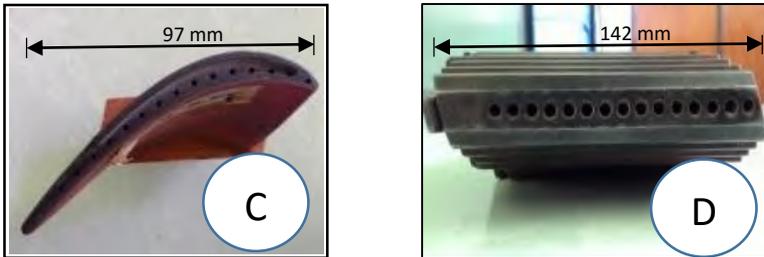
Alloy	Ultimate Tensile Strength					
	At 21 °C		At 760 °C		At 870 °C	
	Mpa	ksi	Mpa	ksi	Mpa	ksi
Inconel 738 LC	1095	159	965	140	770	112

Alloy	Yield Strength					
	At 21 °C		At 760 °C		At 870 °C	
	Mpa	ksi	Mpa	ksi	Mpa	ksi
Inconel 738 LC	950	138	795	115	550	80

4.2 Pengamatan Makroskopis

Pengamatan makro dilakukan untuk melihat kondisi keseluruhan dari sudu turbin yang diteliti. Gambar 4.2 menunjukkan kondisi dari sudu turbin.



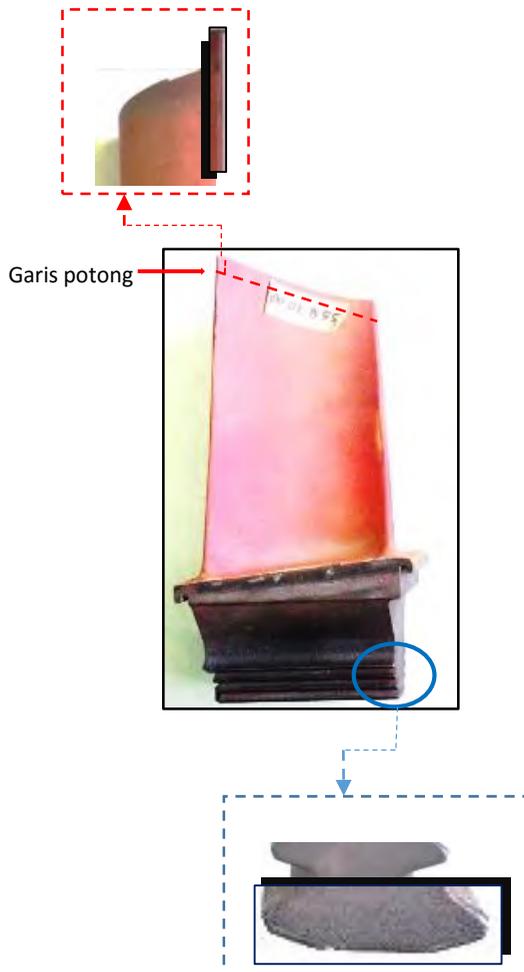


Gambar 4.2 Turbin Blade. (A) Tampak Depan, (B) Tampak Belakang, (C) Tampak Atas, (D) Tampak Bawah

Dari pengamatan makro yang dilakukan pada sudu turbin gas *stage* kedua tidak ditemukan cacat atau kerusakan yang terjadi akibat pengoperasian kerja selama 72.331 EOH. Sudu turbin tidak menunjukkan adanya indikasi kegagalan secara makro. Kondisi *thermal barrier coating* dari sudu turbin juga dalam keadaan utuh tanpa adanya pengelupasan.

4.3 Pengamatan Mikroskopik

Pengamatan mikroskopik pada sudu turbin dilakukan pada dua bagian yang berbeda yaitu pada bagian *tip blade* dan *root blade* seperti pada gambar 4.3. Pengamatan ini dilakukan untuk menganalisa struktur mikro dari sudu turbin pada material utamanya karena pada penelitian ini *coating* pada sudu turbin tidak dibahas. Standar langkah-langkah metalografi yang dilakukan meliputi pemotongan, *mounting*, *grinding* dan *polishing* dimana langkah tersebut sudah sesuai dengan standar yang ada yaitu ASTM E3.

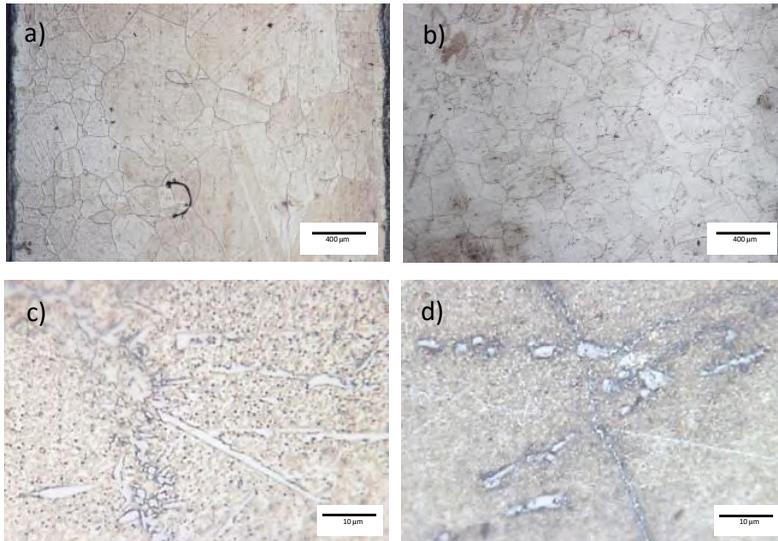


Gambar 4.3 Bagian Untuk Metalografi

4.3.1 Pengamatan menggunakan Mikroskop Optis

Pengamatan struktur mikro pada kedua bagian menggunakan mikroskop optis dilakukan dengan perbesaran mulai dari 50x hingga 2500x. Pada kedua sampel dilakukan penetsaan

dengan menggunakan 60ml HCl dan 20 HNO₃ [10]. Hasil pengamatan dapat dilihat pada gambar 4.4.



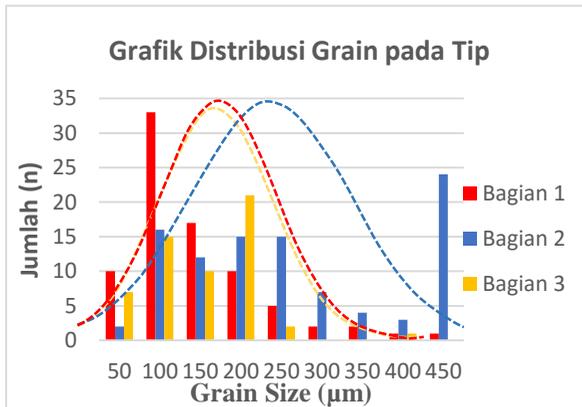
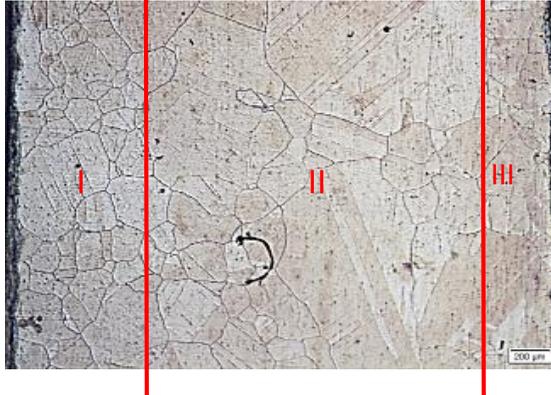
Gambar 4.4 Struktur Mikro Perbesaran 50x a) Tip, b) Root, dan Perbesaran 2500x c) Tip, d) Root

Pada hasil pengamatan yang dilakukan, terdapat perbedaan penampakan struktur mikro antara bagian *tip* dan *root*. Perbedaan tampak pada pengamatan dengan perbesaran 50x. Pada bagian *tip* menunjukkan adanya variasi ukuran butir pada daerah tepi dan tengahnya. Sedangkan pada bagian *root* tidak menunjukkan perbedaan ukuran butir yang signifikan. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.5.

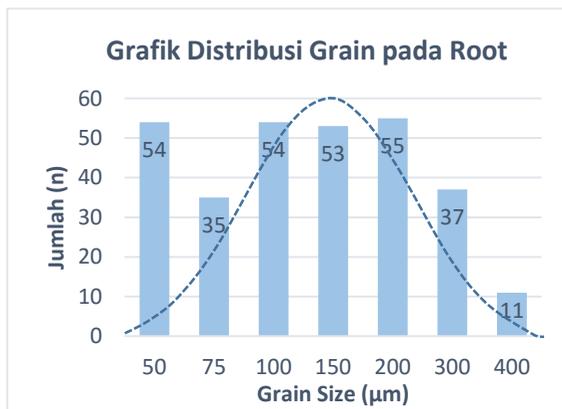
Penampakan struktur mikro yang didapatkan menunjukkan adanya beberapa fasa yang terbentuk. Fasa gamma (γ) pada paduan ini mengandung nikel, kobalt, krom molybdenum, dan tungsten. Fasa gamma prime (γ') sebagai presipitat berupa Ni₃X dimana X adalah unsur aluminium dan titanium ditemukan dengan bentuk

spherical. Sekain itu terdapat karbida berupa $M_{23}C_6$ dan M_6C serta fasa TCP yang membuat material menjadi getas.

a)



b)



Gambar 4.5 Distribusi Grain pada a) Tip Blade dan b) Root Blade

Pada gambar di atas dapat dilihat bahwa ukuran butir pada bagian *tip* bervariasi mulai dari $50\mu\text{m}$ hingga $450\mu\text{m}$. Pada daerah bagian tepi, butir cenderung memiliki ukuran lebih kecil dibandingkan daerah tengahnya. Sedangkan pada bagian *root* didapatkan penampakan ukuran butir yang hampir seragam.

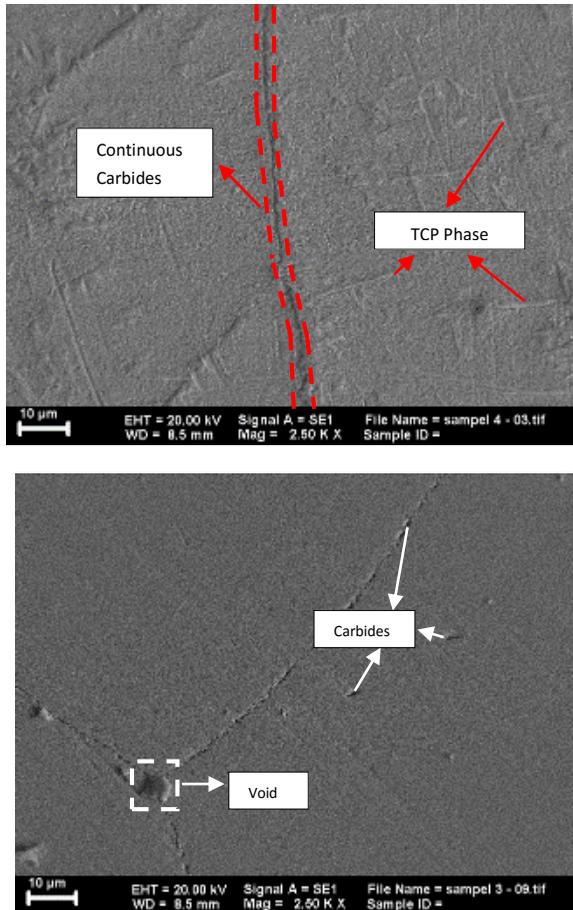
Untuk penampakan struktur mikro dengan perbesaran 2500x yaitu 4.3 c) dan d) menunjukkan adanya perbedaan pada jumlah karbidanya. Pada bagian *tip* menunjukkan adanya karbida pada batas butir dengan jumlah yang lebih banyak jika dibandingkan dengan pada bagian *root*.

Perbedaan penampakan terjadi akibat perbedaan temperatur kerja yang mengenainya. Bagian *tip* dikenai temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan bagian *root*. *Tip* adalah bagian dari sudu turbin yang terkena aliran udara panas dari *combuster chamber* secara langsung. Sedangkan *root* berada pada bagian *rotor disk* turbin, sehingga bagian ini tidak terkena aliran udara panas secara langsung. Temperatur pada hal ini berdampak pada pembentukan karbida dan *void* pada batas butirnya. Kondisi dengan temperatur yang semakin tinggi akan menyebabkan semakin tingginya pula laju difusi. Kekosongan pada susunan atom tersebut akan mengalami difusi ke arah batas butir. Jika hal tersebut berlangsung pada jangka waktu yang panjang akan menyebabkan munculnya *void* pada batas butir secara kontinyu. Difusi tidak hanya terjadi pada *vacancy* atomnya saja, tetapi juga terjadi pada atom-atom unsur penyusunnya. Atom unsur yang memiliki massa yang kecil akan lebih mudah mengalami difusi, contohnya karbon.

4.3.2 Pengamatan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Pengamatan dengan metode *Scanning Electron Microscope* (SEM) juga dilakukan pada bagian *tip blade* dan *root blade*. Pengamatan dengan metode ini dilakukan untuk mengetahui secara detil kondisi dari struktur mikro kedua bagian.

Hasil pengamatan yang didapatkan antara kedua bagian berbeda dengan hasil pengamatan dengan menggunakan mikroskop optis. Pada kedua bagian ditemukan adanya karbida dan *void* pada batas butirnya, hanya saja kuantitas antara keduanya yang berbeda.



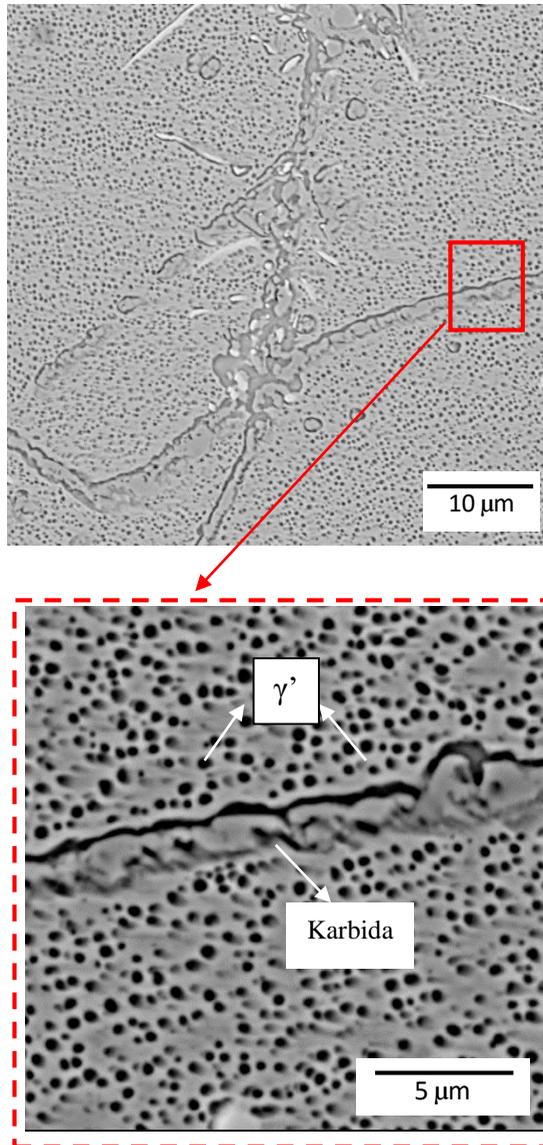
Gambar 4.6 Continuous Carbides pada Tip Blade (atas), Carbides dan Void pada Root Blade (bawah)

Penampakan struktur mikro pada bagian *tip blade* menunjukkan adanya karbida yang bersifat kontinyu. Munculnya karbida yang bersifat kontinyu akan menyebabkan material lebih mudah mengalami kerusakan. Pengaruh dari adanya karbida yang kontinyu pada material adalah menyebabkan material tersebut

menjadi lebih getas apabila diberikan tegangan. Pada *tip blade* juga ditemukan fasa *Topologically Close-Packed* (TCP). Fasa ini berasal dari adanya paduan tertentu yang komposisinya tidak dikontrol dan terpapar pada kondisi kerja dengan temperatur tinggi dalam jangka waktu yang panjang. Pengaruh adanya fasa ini adalah mengurangi ketahanan mulur pada material karena sifatnya yang getas[15].

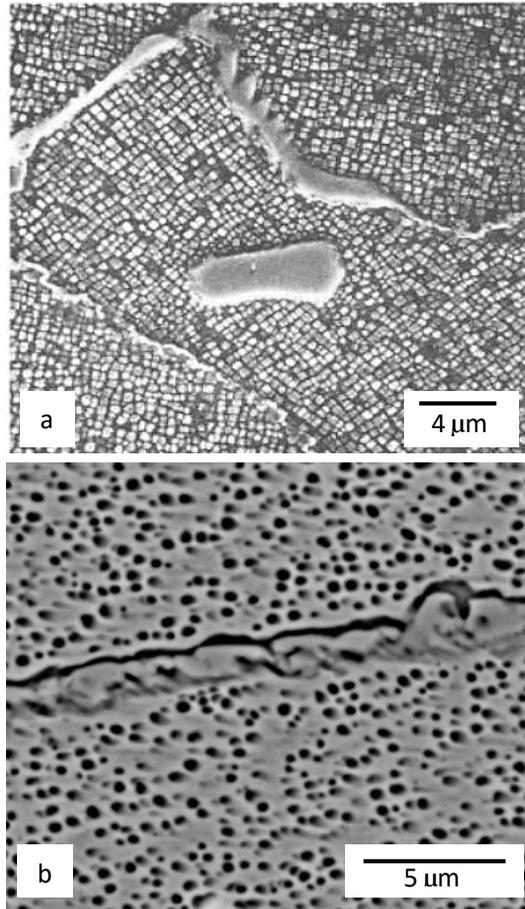
Sedangkan penampakan struktur mikro pada bagian *root blade* menunjukkan adanya karbida yang tidak bersambung. Karbida yang tidak bersambung pada batas butir akan menyebabkan material memiliki kekuatan yang lebih tinggi karena akan menghambat terjadinya *grain boundary sliding* ketika diberikan tegangan. Namun pada penampakan tersebut, terdapat *void* pada persimpangan tiga batas butir. Hal tersebut akan menyebabkan adanya pemusatan tegangan pada daerah di sekitar *void* sehingga membuat material menjadi lebih mudah rusak.

Fasa gamma prime (γ') juga ditemukan pada kedua sampel. Fasa γ' merupakan presipitat dari matriks Gamma (γ) yaitu berupa Ni_3X dengan X adalah unsur aluminium (Al) maupun titanium (Ti)[6]. Fasa ini memiliki bentuk *spherical* maupun *cubic*. Sedangkan besarnya ukuran bergantung pada waktu dan temperatur paparnya[18]. Fasa ini menjadi penguat utama pada paduan nikel karena dapat menghalangi terjadinya pergerakan dislokasi[19]. Fasa tersebut dapat dilihat pada gambar 4.7.



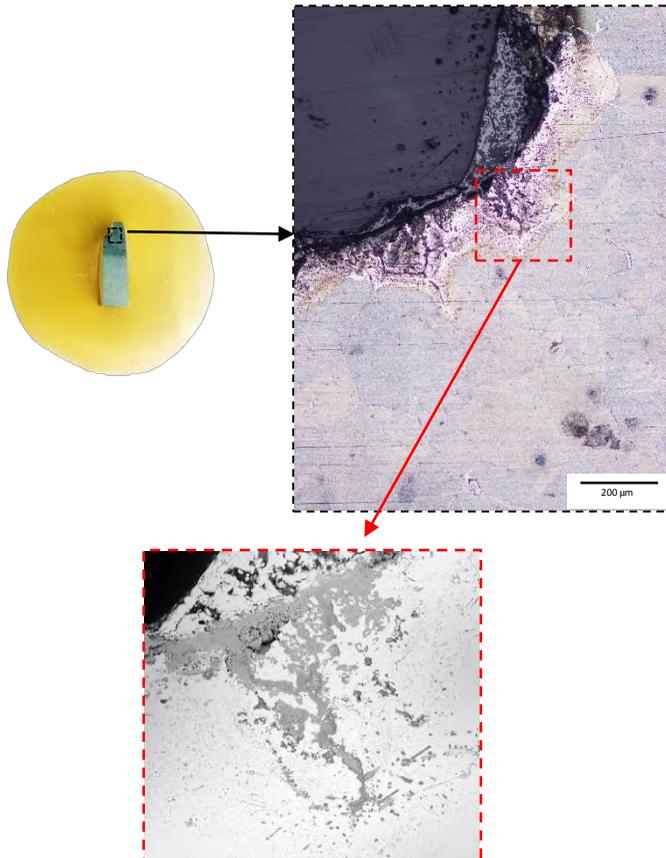
Gambar 4.7 Fasa gamma prime (γ') pada material sudu turbin

Pada hasil pengamatan di atas, ditemukan fasa γ' dengan bentuk *spherical*. Telah terjadi perubahan bentuk dan ukuran dari fase tersebut seiring dengan penggunaan komponen (gambar 4.8). Pada material yang baru, ditemukan fase γ' dengan bentuk *cubic*. Perubahan bentuk dari tersebut terjadi akibat adanya ketidakseimbangan kisi matriksnya.



Gambar 4.8 Mikrostruktur In738LC (a) baru [20] (b) digunakan 72331 EOH

Pada bagian *tip* ditemukan pula adanya retak mikro pada daerah sekitar *cooling holes*. Retak tersebut diawali pada daerah tepi *tip blade* dan menjalar menuju daerah tengah. Selain itu pada daerah sekitar retak mikro tersebut juga terdapat lubang-lubang kecil yang sangat memungkinkan menjadi awal munculnya retak makro. Penampakan struktur mikro tersebut bisa dilihat pada gambar 4.9.



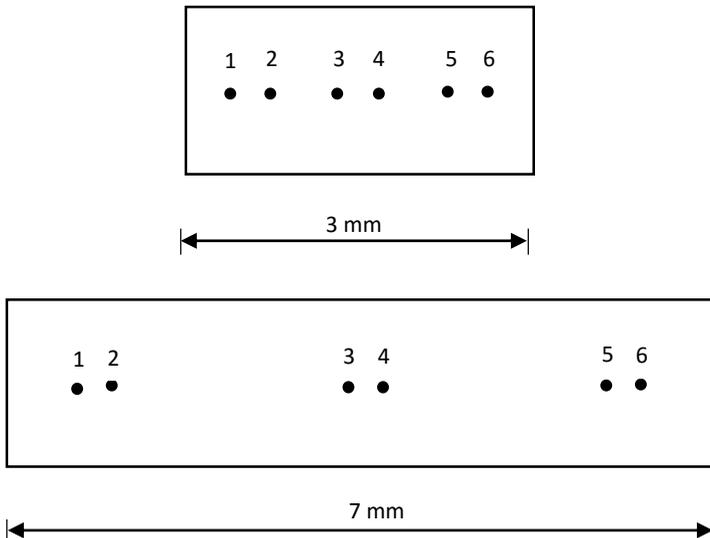
Gambar 4.9 Retak Mikro pada Bagian Tip Blade

4.4 Pengukuran Kekerasan

Pada tugas akhir ini pengujian kekerasan dilakukan dengan dua metode, yaitu metode *Vickers* dan *micro hardness*.

4.4.1 *Micro Hardness Test*

Pengujian kekerasan dengan metode *micro hardness* dilakukan untuk mengetahui kekerasan material secara mikro. Indentasi dilakukan pada bagian batas butir dan tengah *grain* pada tiga lokasi yang berbeda. Nomer indentasi ganjil menunjukkan lokasi indentasi pada batas butir, sedangkan nomer genap menunjukkan indentasi pada tengah *grain* (gambar 4.10).



Gambar 4.10 Titik Indentasi Micro Hardness pada Bagian Tip (atas), Root (bawah)

Tabel 4.3 Nilai Kekerasan dari Micro Hardness Test Bagian Tip Blade

Titik Indentasi	1	2	3	4	5	6
Kekerasan (HVN 1)	378.0	369.4	369.8	351.0	381.3	361.2

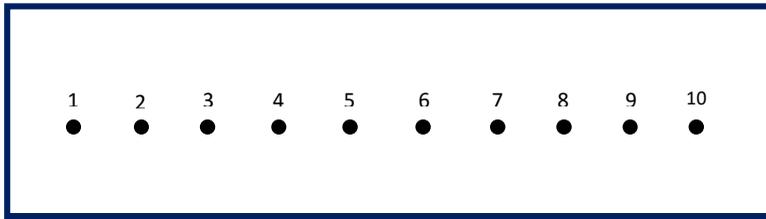
Tabel 4.4 Nilai Kekerasan dari Micro Hardness Test Bagian Root Blade

Titik Indentasi	1	2	3	4	5	6
Kekerasan (HVN 1)	376.8	362.3	379.0	369.4	372.2	370.0

Dari hasil pengujian *micro hardness* menunjukkan bahwa indentasi pada bagian batas butir memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan pada bagian tengah butir. Hal tersebut berlaku baik pada bagian *tip blade* maupun *root blade*. Tingginya nilai kekerasan menunjukkan bahwa terdapat karbida yang menumpuk pada daerah batas butirnya.

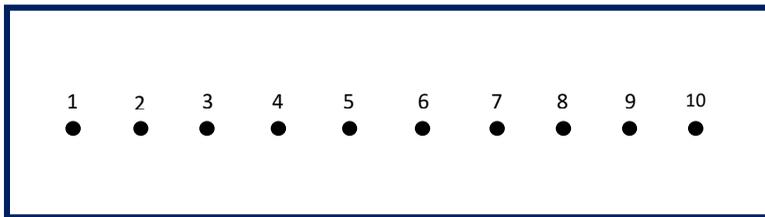
4.4.2 Vickers Hardness Test

Pengujian kekerasan dengan menggunakan metode Vickers dilakukan pada dua sampel yaitu bagian *root* dan bagian atas blade. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan sepuluh titik indentasi pada setiap sampelnya. Gambar 4.11 dan 4.12 menunjukkan lokasi indentasi pada setiap sampelnya. Sedangkan tabel 4.5 dan 4.6 menunjukkan nilai kekerasannya.



25 mm

Gambar 4.11 Titik Indentasi Vickers Hardness Test Bagian Tip Blade



25 mm

Gambar 4.12 Titik Indentasi Vickers Hardness Test Bagian Root Blade

Tabel 4.5 Nilai Kekerasan dari Vickers Hardness Test Bagian Tip Blade

Titik Indentasi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kekerasan (HVN 10)	390	383	383	390	383	390	390	390	383	390

Tabel 4.6 Nilai Kekerasan dari Vickers Hardness Test Bagian Root Blade

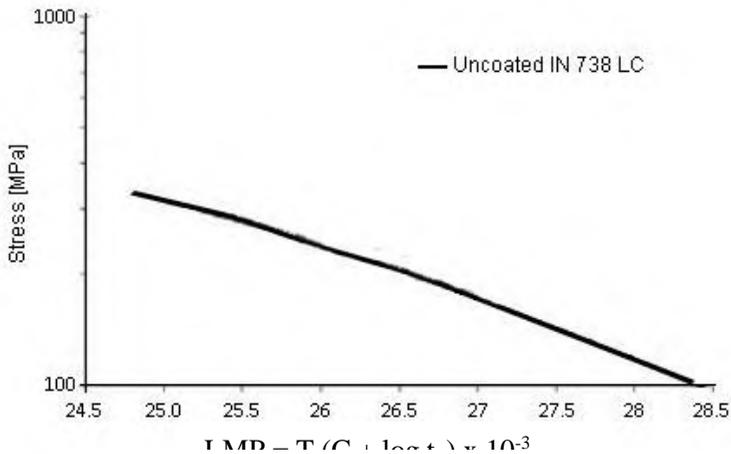
Titik Indentasi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kekerasan (HVN 10)	383	373	373	373	366	390	390	390	390	390

Dari hasil pengujian kekerasan dengan Vickers Hardness test menunjukkan tidak adanya trenline khusus dari nilai kekerasan pada kedua bagian sampel. Untuk sampel bagian atas menunjukkan nilai kekerasan terendah yaitu 366 HVN sedangkan nilai kekerasan tertinggi yaitu 390 HVN. Untuk bagian sampel root menunjukkan nilai kekerasan terendah yaitu 383 HVN sedangkan nilai kekerasan tertinggi yaitu 390 HVN.

4.5 Mulur/Creep

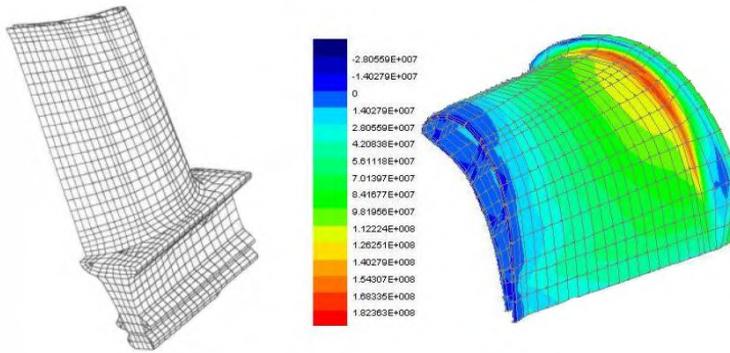
Dalam menganalisa *remaining life* dari suatu komponen, analisa mulur sering digunakan sebagai acuan. Pengujian mulur dilakukan untuk bisa mendapatkan grafik perbandingan antara tegangan dan *Larson Miller Parameter* (LMP). Dari nilai LMP ini nantinya akan didapatkan nilai *remaining life* suatu komponen.

Pengujian mulur telah dilakukan oleh Simona dkk [16] dengan pengondisian temperatur yang sama dengan sudu turbin *stage* kedua ini yaitu 800-950°C. Pengujian tersebut dilakukan pada 10 sampel pengujian dengan kondisi tegangan yang berbeda. Dari pengujian tersebut didapatkan grafik seperti pada gambar 4.13.



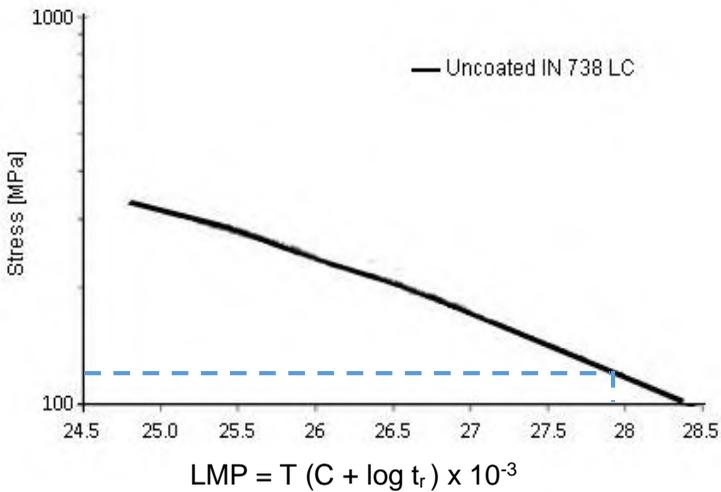
Gambar 4.13 Grafik Tegangan Vs LMP Inconel 738 LC pada 800-950°C [16]

Karena grafik tersebut merupakan grafik yang didapat dari pengujian material yang baru, maka tidak bisa diperoleh *remaining life* dari sudu turbin. Hanya bisa menganalisa kesesuaian antara umur prediksi dengan tegangan kerja yang diberlakukan. Besarnya tegangan yang diberikan pada pengoperasian sudu turbin dapat diketahui dari hasil simulasi tegangan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.14.



Gambar 4.14 Kontur Tegangan Maksimal pada Sudu Turbin [17]

Dari hasil simulasi di atas maka dapat diketahui tegangan yang bekerja pada sudu turbin. Tegangan maksimal terjadi pada daerah peralihan antara bagian sudu turbin atas dengan daerah *root*-nya. Tegangan minimal yang bekerja pada sudu turbin tersebut diketahui sebesar 14.03 MPa, sedangkan tegangan maksimal yang bekerja adalah sebesar 182.4 MPa. Nilai tegangan tersebut diekstrapolasi pada grafik tegangan vs LMP sehingga didapatkan nilai LMP untuk tegangan kerja yang sesuai (gambar 4.15).



Gambar 4.15 Data Ekstrapolasi Tegangan Maksimal pada Grafik Tegangan vs LMP

Grafik di atas merupakan grafik hasil ekstrapolasi data tegangan maksimal dari hasil simulasi yang dilakukan. Tegangan yang dimaksud adalah sebesar 182.4 MPa. Dari ekstrapolasi data tersebut didapatkan nilai LMP sebesar 27921. Dengan perumusan LMP seperti pada persamaan 2, dengan temperatur yang digunakan adalah sebesar 1123K, maka dapat diperoleh nilai T_r atau umur dari komponen. Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan nilai T_r sebesar 72924 *hours*. Jika hasil perhitungan tersebut dibandingkan dengan prediksi umur sudu turbin yang telah ada, dapat diketahui bahwa kondisi operasi baik dari temperatur maupun tegangan kerjanya telah sesuai dengan desain sudu turbinnya.

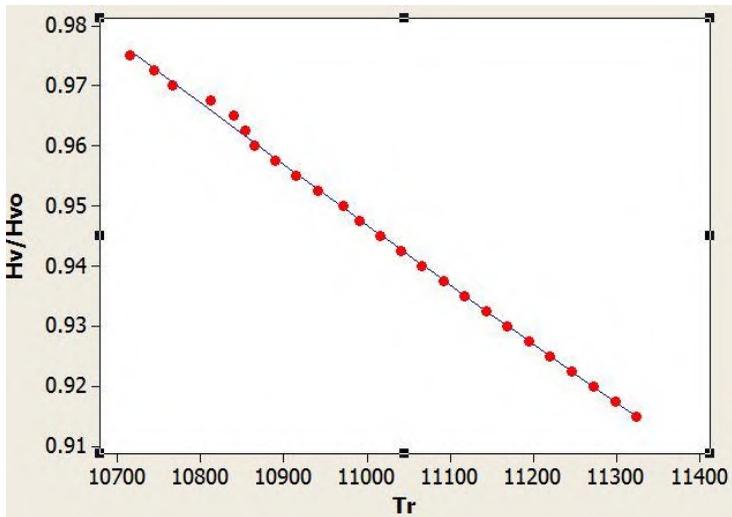
4.6 Analisis Remaining Life

Kegagalan pada sudu turbin yang paling sering terjadi disebabkan oleh *creep* dengan pola patahan intergranular [9],

sehingga untuk mengetahui *remaining life* dari sudu turbin bisa ditinjau dari sifat tahan mulurnya. Kegagalan *creep* yang terjadi salah satunya disebabkan oleh *grain boundary sliding*. Semakin besar area batas butir maka semakin banyak terjadi *grain boundary sliding*. Semakin banyak terjadi *grain boundary sliding* maka suatu komponen akan semakin mudah mengalami kerusakan akibat mulur. Sehingga dapat diketahui bahwa butir memiliki dampak pada *remaining life* yaitu semakin besar area batas butir menyebabkan semakin rendah ketahanan mulurnya, atau semakin besar ukuran butirnya maka semakin tinggi ketahanan mulurnya[21]. Jika dilihat dari distribusi butir pada sampel *tip* dan *root* seperti pada gambar 4.3, maka dapat diketahui bahwa daerah *root* memiliki sifat tahan mulur yang lebih tinggi karena ukuran dari butir yang lebih besar dan merata.

Ukuran dari presipitat γ' juga bisa digunakan untuk mengetahui sifat tahan mulurnya. Louis Thebaud, dkk melakukan dua percobaan dengan ukuran γ' yang berbeda yaitu *fine grain* (10 μm) dan *coarse grain* (350 μm). Berdasarkan percobaan yang dilakukannya, didapatkan kesimpulan bahwa semakin besar ukuran dari presipitat maka akan semakin tinggi pula ketahanannya terhadap kemuluran[22]. Jika dilakukan perbandingan ukuran γ' seperti pada gambar 4.5, ukuran γ' setelah dioperasikan cenderung lebih kecil dibandingkan dengan ukuran γ' pada komponen baru. Hal tersebut dapat diartikan bahwa, ketahanan mulur material setelah operasi mengalami penurunan.

Jika ditinjau dari nilai kekerasan, berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa pada daerah batas butir memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi. Daerah dengan area batas butir yang besar maka akan memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi pula jika dibandingkan dengan daerah yang area batas butirnya kecil. Perhitungan dengan persamaan 3 dilakukan untuk mengetahui pengaruh kekerasan terhadap ketahanan mulur dan didapatkan grafik seperti pada gambar 4.16.



Gambar 4.16 Grafik Kekerasan Vs Remaining Life

Gambar 4.16 menunjukkan hubungan antara kekerasan dengan *remaining life*. Nilai *remaining life* dimana pada grafik tersebut dinotasikan dengan Tr didapatkan dari nilai LMP seperti pada persamaan (2). Sehingga nilai Tr di atas dapat merepresentasikan sifat tahan mulur dari material. Berdasarkan perhitungan tersebut maka diketahui bahwa nilai kekerasan memiliki pengaruh pada ketahanan mulurnya yaitu semakin tinggi nilai kekerasan maka akan semakin rendah ketahanan mulurnya.

Untuk mengetahui nilai *remaining life* dari sudu turbin yang diteliti, digunakan dua metode yaitu dari pengamatan struktur mikro dan dari nilai kekerasannya. Berdasarkan hasil pengamatan serta mengacu pada tabel 2.3 tentang klasifikasi kerusakan Neubauer, maka kondisi dari struktur mikro sudu turbin dapat digolongkan pada tingkat evolusi 4. Tingkat evolusi empat ini ditandai dengan adanya retak makro pada komponen dan hal ini telah sesuai dengan hasil analisis yang telah dilakukan. Dari diketahuinya tingkat evolusi dari komponen, maka kita telah bisa

melakukan prediksi *remaining life* dengan berdasar pada persamaan (1). Nilai $\frac{t_r}{t}$ didapatkan dari tabel 2.4 tentang *Damage level and expended life fraction* yaitu sebesar $\frac{1}{0.889}$ atau sebesar 1.125 maka nilai *remaining life*:

$$t_{rem} = t \left(\frac{t_r}{t} - 1 \right)$$

$$t_{rem} = 72331 (1.125 - 1)$$

$$t_{rem} = 9042 \text{ hours}$$

Sedangkan dari hasil pengujian kekerasan dilakukan perhitungan *remaining life* dengan berdasarkan pada persamaan (3) dengan nilai $a = 1.35 \times 10^{-3}$, $b = 4,76 \times 10^{-8}$, dan $c = -9,6$. Dan untuk nilai HV_o dengan material dan aplikasi yang sama yaitu 400 HVN [8]. Perhitungan dilakukan untuk kedua bagian sampel yaitu pada bagian *tip* dan *root blade*. Hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel 4.8 untuk bagian *root* dan tabel 4.9 untuk bagian *tip*.

Tabel 4.7 Perhitungan Remaining Life Berdasarkan Nilai Kekerasan Bagian Root Blade

HVN	HV/HV0	LMP	Log Tr	Tr
390	0.975	26985.60	4.030	10715
383	0.958	26994.40	4.038	10889
383	0.958	26994.40	4.038	10889
390	0.975	26985.60	4.030	10715
383	0.958	26994.40	4.038	10889
390	0.975	26985.60	4.030	10715
390	0.975	26985.60	4.030	10715
390	0.975	26985.60	4.030	10715
383	0.958	26994.40	4.038	10889
390	0.975	26985.60	4.030	10715

Tabel 4.8 Perhitungan Remaining Life Berdasarkan Nilai Kekerasan Bagian Tip Blade

HVN	HV/HV0	LMP	log Tr	Tr
383	0.958	26994.40	4.038	10889
373	0.933	27004.80	4.047	11143
373	0.933	27004.80	4.047	11143
373	0.933	27004.80	4.047	11143
366	0.915	27012.00	4.053	11324
390	0.975	26985.60	4.030	10715
390	0.975	26985.60	4.030	10715
390	0.975	26985.60	4.030	10715
390	0.975	26985.60	4.030	10715
390	0.975	26985.60	4.030	10715

Tabel di atas merupakan tabel perhitungan dari nilai kekerasan hingga didapatkannya nilai *remaining life* untuk kedua sampel uji kekerasan. *Remaining life* pada tabel direpresentasikan dengan besarnya nilai Tr. *Remaining life* tertinggi didapatkan sebesar 11324 *hours* pada sampel bagian *tip* dan 10889 *hours* pada sampel bagian *root*. Nilai *remaining life* tertinggi didapatkan dari nilai kekerasan yang terendah. Sedangkan nilai *remaining life* terendah didapatkan dari nilai kekerasan tertinggi yaitu sebesar 10715 *hours* pada kedua sampel.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

	Tip blade	Root blade
100x	 Micrograph showing the tip blade of a plant stem at 100x magnification. The image displays a network of large, irregularly shaped cells with thick, brownish walls. A small scale bar in the bottom right corner indicates 100 µm.	 Micrograph showing the root blade of a plant stem at 100x magnification. The image displays a network of large, irregularly shaped cells with thick, brownish walls. A small scale bar in the bottom right corner indicates 100 µm.
200x	 Micrograph showing the tip blade of a plant stem at 200x magnification. The image displays a network of large, irregularly shaped cells with thick, brownish walls. A small scale bar in the bottom right corner indicates 50 µm.	 Micrograph showing the root blade of a plant stem at 200x magnification. The image displays a network of large, irregularly shaped cells with thick, brownish walls. A small scale bar in the bottom right corner indicates 50 µm.
500x	 Micrograph showing the tip blade of a plant stem at 500x magnification. The image displays a network of large, irregularly shaped cells with thick, brownish walls. A small scale bar in the bottom right corner indicates 20 µm.	 Micrograph showing the root blade of a plant stem at 500x magnification. The image displays a network of large, irregularly shaped cells with thick, brownish walls. A small scale bar in the bottom right corner indicates 20 µm.

Lanjutan

Root Blade	Tip blade	
 <p>A micrograph showing a cross-section of a root blade. The image displays a network of cells with distinct cell walls, stained in shades of purple and blue. A small white scale bar with the text "10 μm" is located in the bottom right corner of the image.</p>	 <p>A micrograph showing a cross-section of a tip blade. The image displays a network of cells with distinct cell walls, stained in shades of purple and blue. A small white scale bar with the text "10 μm" is located in the bottom right corner of the image.</p>	1000x

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan, diantaranya yaitu:

1. Dari pengamatan secara makro tidak ditemukan kerusakan pada sudu turbin, baik pada material utamanya maupun pada *coating*nya.
2. Indikasi kegagalan pada sudu turbin ditandai dengan ditemukannya retak mikro yang menjalar dari tepi menuju ke tengah pada daerah sekitar *cooling holes* bagian *tip blade*.
3. Pada pengamatan struktur mikro terdapat beberapa perbedaan antara sampel bagian *tip* dan bagian *root*. Dari sisi ukuran butir, didapatkan bahwa pada bagian *tip* memiliki ukuran butir yang bervariasi antara bagian tepi dan tengahnya. Sedangkan pada bagian *root* memiliki ukuran butir yang lebih seragam. Pada sampel bagian *tip*, ditemukan karbida yang bersifat kontinyu serta fasa *Topological Closed Packed* yang menyebabkan material memiliki sifat yang lebih getas. Sedangkan pada bagian *root*, ditemukan adanya karbida pada batas butir namun tidak bersifat kontinyu serta ditemukan adanya *void* pada persimpangan batas butir yang menyebabkan terjadinya pemusatan tegangan di sekitarnya.
4. Dari pengukuran kekerasan didapatkan bahwa terjadi perbedaan nilai kekerasan antara bagian batas butir dan tengahnya. Pada bagian batas butir memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan pada bagian tengahnya. Hal tersebut menunjukkan bahwa terdapat karbida yang lebih banyak pada batas butirnya.
5. Berdasarkan ekstrapolasi data dari nilai tegangan hasil simulasi pada grafik *Larson Miller Parameter*, diketahui

bahwa prediksi umur sudu turbin yang ada telah sesuai dengan kondisi operasi kerjanya.

6. *Remaining life* dari sudu turbin dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya ukuran butir, ukuran dari presipitat γ' , dan kekerasannya. *Remaining life* berbanding lurus dengan ukuran butir dan ukuran presipitat γ' -nya sedangkan berbanding terbalik dengan nilai kekerasannya.
7. Berdasarkan perhitungan terhadap nilai kekerasan dan metalografi yang dilakukan, didapatkan prediksi *remaining life* sudu turbin. *Remaining life* dari sudu turbin diperoleh sebesar 10715 *hours* berdasarkan nilai kekerasan maksimalnya. Dan berdasarkan metalografi diperoleh *remaining life* sebesar 9042 *hours*.

5.2 Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan adapun saran-saran yang bisa diberikan antara lain:

1. Sebaiknya dilakukan pencatatan data secara berkala sehingga terdapat histori data dari operasi sudu turbin secara lengkap.
2. Untuk mengetahui *remaining life* sebaiknya dilengkapi dengan pengujian mulur agar data yang dimiliki semakin valid.
3. Untuk penelitian selanjutnya, sebaiknya dilakukan analisa lebih lengkap terkait *coating* dari sudu turbin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Schenectady. 1987. **Gas Turbine Manual Book**. NY, USA: General Electric Company
- [2] Takahasi, Susumu, dkk. 1994. **Development and On-Site Test Operation of the MW-701DA Advanced Gas Turbine**. Jepang : Mitsubishi Heavy Industries, Ltd
- [3] <http://www.crazyengineers.com/forum/mechanical-civil-engineering/23569-inside-brayton->
- [4] <http://www.turbocare.com/gas-turbine-blades-buckets.html>
- [5] www.mrs.org/bulletin
- [6] Mazur Z, Luna-Ramirez A, Juarez-Islas JA, Campos-Amezcuca A. 2005. **Failure Analysis of A Gas Turbine Blade Made of Inconel 738LC Alloy**. Eng Fail Anal;12:474–86
- [7] J. Donachie, Matthew; J. Donachie, Stephen. 2002. **A Technical Guide of Superalloys**. Ohio, USA: ASM International
- [8] ECCC Recommendation - Volume 6. 2005. **Residual Life Assessment and Microstructure**. Italy: Piacenza
- [9] Eshati, Samir. 2012. **An Evaluation of Operation And Creep Life Of Stationary Gas Turbin Engine**. United Kingdom: Cranfield University
- [10] Huda, Zainul. 2008. **Metallurgical Failure Analysis For A Blade Failed In A Gas Turbine Engine Of A Power Plant**. Kuala Lumpur: Elsevier
- [11] Mutiarani, Aulia. 2013. **Studi Analisa Kegagalan Sudu Turbin Bertekanan Tinggi Pada Pesawat Terbang BOEING 737-400**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
- [12] Supriadi, Rustino Djoni. 2008. **Kajian Umur Sisa Komponen Turbin Gas Hot Gas After Burner dan Mixing Chamber Dari Power Plant**. Serpong: Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur

- [13] ASM Handbook Committee. 2002. **ASM Metals Handbook Vol. 1: Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys**. Ohio, Amerika: ASM International.
- [14] Nickel Development Institute. 1995. **High-Temperature High-Strength Nickel Base Alloys**. Inco Limited
- [15] K. Matuszewski, dkk. 2015. **Effect Of Ruthenium on the Precipitation of Topologically Close Packed Phases in NI-Based Superalloys of 3rd and 4th Generation**. Germany: Elsevier
- [16] Pospisilova, Simona, dkk. 2007. **Influence of Al-Si Layer To Structure And Properties On Inconel 713LC and 738LC**. Czech Republic: Brno University of Technology Institute of Materials Science and Engineering
- [17] Mirzaei, M; Karimi, R. 2000. **Stress Analysis And Life Assessment of A Gas Turbine Blade**. Tehran, Iran: Tarbiat Modarres University
- [18] ASM Handbook Committee. 1990. **ASM Metals Handbook Vol. 2: Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Material**. Ohio, Amerika: ASM International.
- [19] Thakur, Anurag. 1997. **Microstructural Responses of A Nickel Base Cast In-738 Superalloy to A Variety of Pre-Weld Heat Treatments**. Winnipeg, Manitoba: The University of Manitoba.
- [20] Koul, A.K, dkk. 1988. **Rejuvenation of Service-Exposed In 738 Turbine Blades**. Ontario, Canada: The Metallurgical Society.
- [21] <http://www.nationalboard.org>
- [22] Thebaud, Louis, dkk. 2015. **Relationships between Microstructural Parameter and Time-Dependent Mechanical Properties of a New Nickel-Based Superalloy**. Basel, Switzerland: MDPI

BIODATA PENULIS



Selvi Kusrina Putri lahir di Tuban, 4 Desember 1993, merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara dari pasangan Kuswandoyo dan Ety Yurina. Penulis mengawali pendidikan dasar di SDN Klangan 1 Bojonegoro pada tahun 2000 sampai 2006. Lalu pendidikan menengah di SMPN 1 Bojonegoro pada tahun 2006 sampai 2009. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMAN 1 Bojonegoro pada tahun 2009 sampai 2012. Ketertarikan penulis pada dunia keteknikan mendorong penulis untuk melanjutkan pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan mengambil jurusan favorit yaitu Teknik Mesin angkatan 2012 “M55” dengan NRP 2112100023.

Selama masa perkuliahan penulis banyak mendapat kesempatan dalam mengembangkan dan menggali potensi, baik dibidang akademik maupun non-akademik. Penulis aktif mengikuti kegiatan laboratorium Metalurgi yaitu sebagai asisten praktikum. Selain itu penulis juga aktif di Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) dengan menjabat sebagai Staf Departemen PSDM 2013-2014 dan Sekretaris umum 2014-2016. Bersamaan dengan menjabat sebagai staf HMM, penulis juga bergabung menjadi Pemandu FTI-ITS hingga akhir tahun 2015. Untuk informasi dan saran serta kepentingan penelitian, penulis dapat dihubungi melalui email selvikusrina@gmail.com