

# ANALISA KERUSAKAN PADA TURBINE BUCKET YANG TERBUAT DARI MATERIAL NICKEL BASE ALLOY MAR-M-246

Yayan Herdayana Sulung T.

*Dari hasil pemeriksaan metalurgis terhadap turbine bucket nomor 120 dari stage 1 terlihat bahwa benda tersebut telah mengalami oksidasi dan hot corrosion, selain itu bucket tersebut telah mengalami deformasi / distorsi yang memperlihatkan indikasi adanya fenomena creep. Pemeriksaan dengan EDAX memperlihatkan bahwa material bucket adalah MAR-M-246, Cast Nickel Base Superalloys.*

*Pemeriksaan dengan EDAX menunjukkan bahwa bucket telah mengalami perbaikan dua kali dengan menggunakan coating masing-masing AlNi, ZrO dan adanya indikasi coating dengan menggunakan PtAl<sub>2</sub>. Pemeriksaan metalografis memperlihatkan adanya fasa sigma (CrCo) berbentuk plate / jarum, yang sangat getas dengan indikasi adanya peningkatan nilai kekerasan.*

*Telah terjadi kerusakan coating yang mengakibatkan teroksidasinya karbida / dan terjadi reaksi sulfida masing-masing pada batas butir yang menyebabkan timbulnya micro-crack. Hal ini menunjukkan bahwa turbine bucket telah terekspose panas dengan temperatur sekitar 570-1093 C.*

*Akibat mekanisme kerusakan yang terjadi, maka turbine bucket tersebut memiliki kehandalan yang sangat rendah. Untuk mengembalikan pada kondisi semula perlu dilakukan reparasi dengan welding (rebuilding) yang dilanjutkan dengan proses heat treatment untuk menurunkan tegangan sisa hasil welding sekaligus mengembalikan sifat mekanik kepada kondisi semula sesuai disain.*

**KATA KUNCI:** Superalloys, Nickel base alloy, Analisa kegagalan, Turbine bucket

## PENDAHULUAN

Dalam peningkatan kualitas sesuai kebutuhan, suatu material selalu mengalami perubahan dan perbaikan. Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya tuntutan kebutuhan teknologi. Untuk memenuhi kebutuhan yang semakin tinggi persyaratan kerja maka material superalloys sebagai pilihan yang sesuai.

Sekarang ini telah banyak ditemukan berbagai macam trade marks dari superalloys. Salah satu contohnya adalah jenis MAR-M, yang merupakan hasil dari Trade Marks of Martin Marietta Corporation.

Salah satu contoh aplikasi material superalloys adalah : Turbine bucket, Combustion Cans, turbin disks (Wheels), Vanes dan komponen mesin turbin lainnya, seperti pada gambar 1<sup>(1)</sup>

Material Superalloys dikelompokkan menjadi tiga kelas utama dan dua kelas tambahan.

Kelompok Superalloys yang dimaksud adalah<sup>(1,2)</sup> :

1. Nickel base Superalloys

2. Cobalt base Superalloys

3. Iron base Superalloys

Dan dua kelas tambahannya adalah<sup>(1)</sup> :

1. Chromium base Superalloys

2. Nickel-iron Superalloys, dimana kelas ini hampir mirip dengan jenis Nickel base Superalloys.

Dalam penelitian ini hanya disajikan material Superalloys jenis Nickel base Superalloys, tipe MAR-M-246. Material ini biasa dipakai pada turbine bucket, karena MAR-M-246 memiliki sifat tahan aus, tetap stabil pada temperatur relatif tinggi, dan mempunyai kuat tarik yang bagus pula.

Penelitian terhadap material MAR-M-246, berawal dari timbulnya kerusakan / kegagalan suatu komponen turbin gas. Komponen yang mengalami kerusakan tersebut adalah turbine bucket.

Menurut informasi dari pemakai turbin gas ini memiliki kekuatan (power) 22 MW, dengan kecepatan putaran (speed) 5100 rpm (design), dan

temperatur operasi pada thermocouple adalah 1150 C, dimana temperatur masuknya 567 C serta tekanan (pressure) sebesar 12 bar.

Sedangkan kerusakan turbine bucket terjadi setelah komponen ini beroperasi 7000 jam, dimana sebelumnya komponen ini telah diperbaiki sebanyak dua kali.

Pengamatan turbine bucket ini dikonsentrasikan pada bucket nomor 120 dalam stage I, dasar pertimbangan pengambilan lokasi pengamatan ini, karena pada bucket ini kerusakan paling parah, sehingga pengambilan contoh (sample) pada lokasi ini cukuplah memenuhi persyaratan analisa kerusakan (failure analysis).

Disamping itu pula, ada suatu alasan yang mendasari yakni : bucket yang diidentifikasi tidak diperbolehkan dilakukan pengujian yang sifatnya merusak, karena bucket tersebut akan diperbaiki (repaired) dan digunakan lagi. Sehingga semua pengujian termasuk uji komposisi kimia, uji kekerasan (Hv), struktur mikro tidak boleh bersifat merusak, kecuali pada ujung bucket (bucket tip) sejauh 3 mm, yang mana daerah ini mengalami kerusakan yang paling parah.

Dengan melakukan penelitian, terhadap komponen turbine bucket yang rusak ini diharapkan berguna untuk :

1. Memberikan informasi kerusakan yang terjadi pada turbine bucket jenis mesin turbin gas.
2. Memberikan gambaran tentang mekanisme kerusakan yang terjadi pada turbine bucket ini.
3. Menentukan langkah pencegahan (preventive) terhadap kerusakan yang serupa / sama pada material MAR-M-246.
4. Mengetahui sejauhmana kerusakan yang dialami oleh bucket.
5. Mempelajari rekomendasi berkenaan dengan pembaharuan, perbaikan ataupun penggantian

Penelitian ini mempunyai keterbatasan, sehubungan dengan bucket yang diidentifikasi tidak diperbolehkan dilakukan pengujian yang sifatnya merusak, termasuk uji komposisi kimia, uji kekerasan (Hv), struktur mikro, kecuali pada daerah dibagian ujung bucket (bucket tip) sejauh 3 mm, hal ini diizinkan karena daerah ini mengalami kerusakan paling parah.

Dengan adanya keterbatasan ini maka, sangatlah berpengaruh terhadap analisa metalurgi, terutama menyangkut umur sisa yang dikaitkan dengan fenomena metalurgi yang terjadi pada lokasi turbine bucket.

Faktor lain adalah sulitnya mendeteksi komposisi kimia, karena dimensi contoh (sample) yang diberikan relatif kecil, sehingga haruslah diperiksa oleh EDAX (Energy Dispersive Analysis X-ray).

Berkaitan dengan hal tersebut, maka dalam proses pengamatan dan pengujian dilakukan langkah sebagai berikut :

1. Melakukan pengamatan Visual, dengan memakai kamera optik.
2. Melakukan pengujian komposisi kimia pada bagian bucket tip oleh EDAX.
3. Memeriksa komposisi lapisan (coating), komposisi karbida, dan komposisi presipitat oleh EDAX guna menentukan sifat fisik dan sifat mekanik material yang dikaitkan dengan mekanisme kerusakan yang terjadi.
4. Melakukan uji kekerasan (Hv) pada bucket tip.

#### **METODE PENELITIAN**

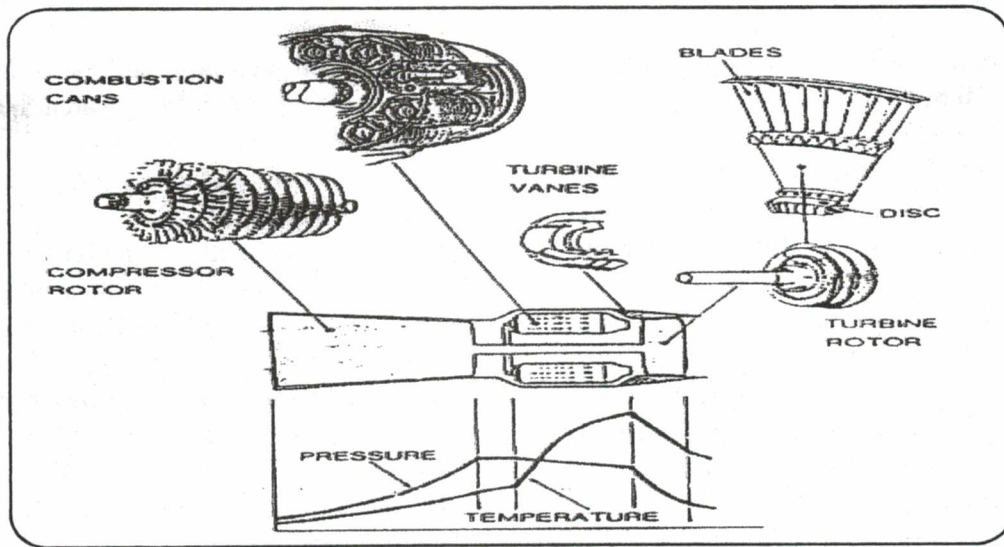
Langkah – langkah dalam penelitian ini dimulai dari pencarian informasi kondisi operasi turbine bucket di lapangan, pemeriksaan secara visual, pemeriksaan struktur mikro, pengujian kekerasan, dan pemeriksaan komposisi kimia dengan menggunakan EDAX. Dibawah ini disajikan skema proses penelitian yang dilakukan secara terinci, lihat gambar 2.

#### **DATA DAN PEMBAHASAN**

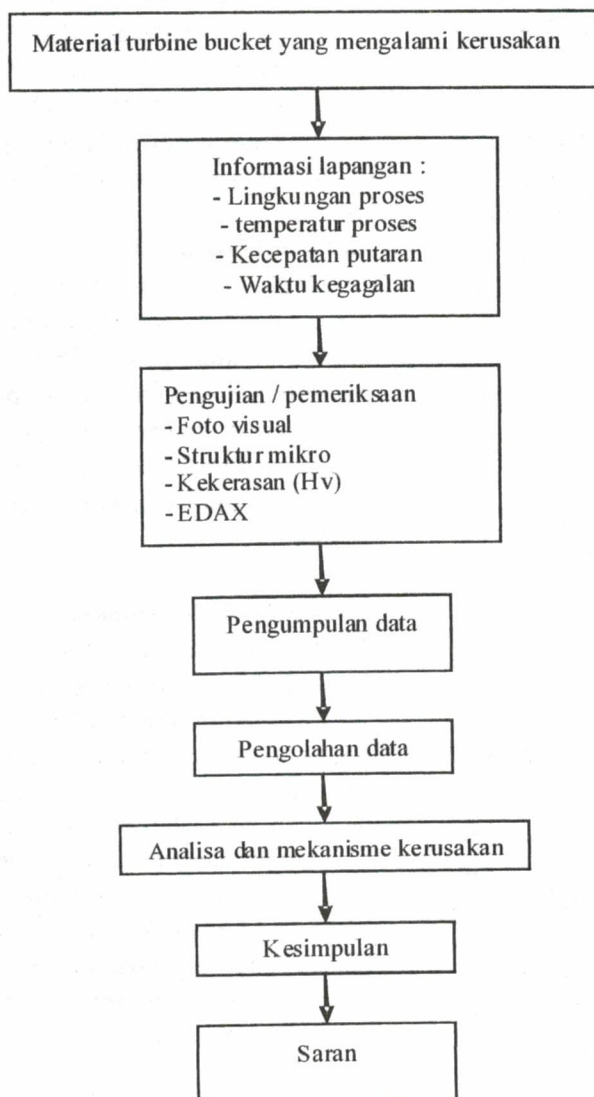
##### **Pemeriksaan secara visual**

##### **1. Indikasi Proses Manufaktur dari Turbin Bucket**

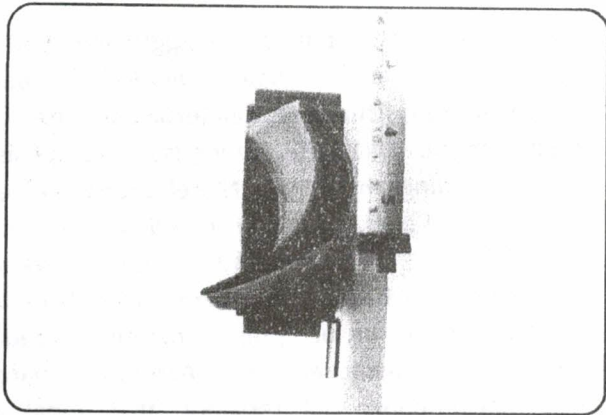
Hasil pemeriksaan secara visual seperti tampak pada gambar 3 di bawah ini tampak adanya rongga ditengah turbine bucket. Tujuan dibuat rongga ditengah ini adalah sebagai pendingin (air cooling) agar turbine bucket tersebut tidak mengalami over heating. Fungsi lainnya yaitu untuk mengurangi berat turbine bucket, karena bila turbine bucket berbentuk pejal, maka turbine bucket tersebut akan lebih berat sehingga memiliki gaya sentrifugal yang jauh lebih tinggi.



Gambar 1. Komponen Mesin Turbin gas

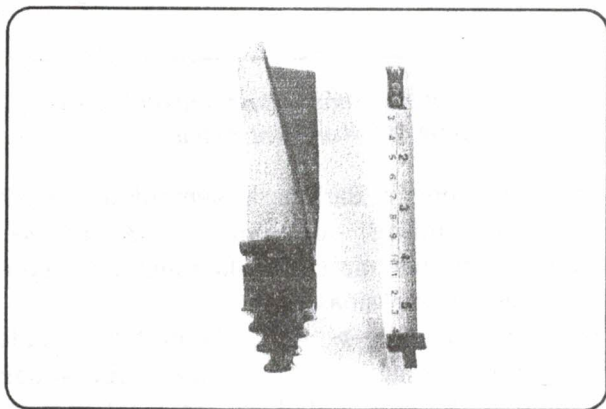


Gambar 2 Skema proses penelitian



Gambar 3. Rongga dalam turbin

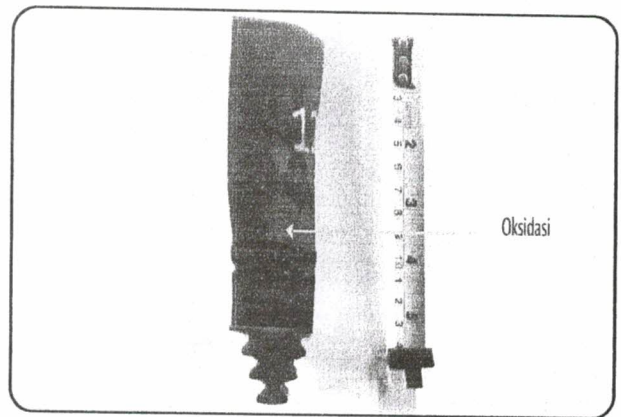
Karena adanya rongga di turbine bucket tersebut, hal ini memberikan indikasi bahwa pembuatannya dilakukan dengan menggunakan proses investment casting dengan sistim coring. Sebab jika pembuatannya menggunakan proses forging, maka untuk membuat rongga akan sangat sulit, karena ketipisan dan kemiringan bentuk sangat rumit (gambar 4). Informasi proses pembuatan akan membantu dalam menentukan komposisi kimia pada bucket apakah termasuk keluarga wrought alloy atau cast alloy.



Gambar 4 Kemiringan dan ketipisan turbine bucket

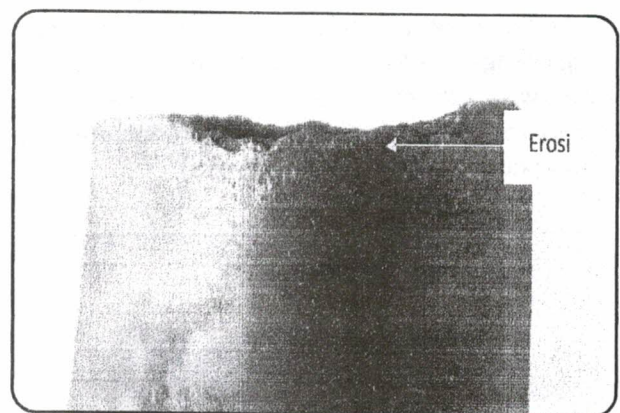
## 2. Indikasi Terjadi Oksidasi dan Erosi

Dari gambar 5, 6 dan 7 terlihat indikasi adanya oksidasi diseluruh permukaan turbine bucket. Hal ini terlihat sangat jelas yang ditandai dengan warna coklat hitam akibat turbine bucket tersebut beroperasi pada temperatur tinggi ( $T > 567$  C).



Gambar 5. Terlihat oksidasi diseluruh permukaan

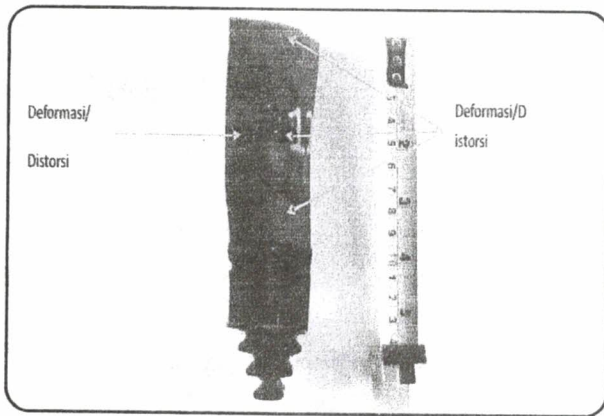
Pada gambar dibawah terlihat bagaimana coating teroksidasi akibat beroperasi pada temperatur tinggi, hal ini bila terjadi terus menerus dengan waktu yang lama akan mengakibatkan menipisnya coating yang selanjutnya akan menyebabkan beroperasinya mekanisme kerusakan lainnya seperti terjadi oksidasi dan erosi pada logam induk (base metal) melalui batas butir.



Gambar 6. Bagian yang terjadi oksidasi & erosi

## 3. Indikasi Terjadinya Creep atau Deformasi Plastik

Hasil pengamatan visual, menunjukkan adanya fenomena creep dibagian concave dan convex turbine bucket, akibat beroperasi pada temperatur tinggi dan tegangan akibat gaya sentrifugal yang bergerak secara terus menerus dalam waktu yang lama

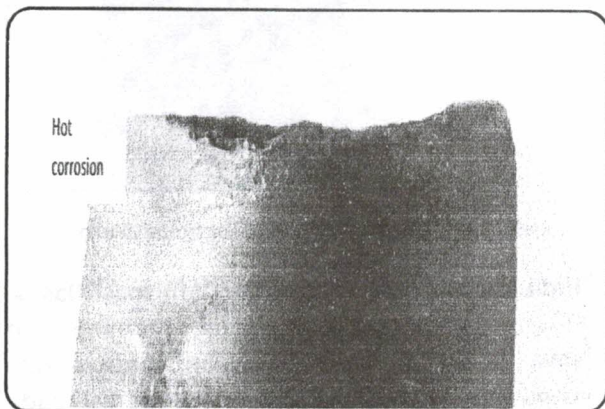


Gambar 8. Tampak terjadinya Deformasi

Creep menyebabkan turbine bucket terdeformasi atau terdistorsi menyimpang dari kondisi awal (original material geometri).

#### 4. Indikasi Terjadinya Korosi Temperatur Tinggi (Hot Corrosion)

Dari gambar 9 dibawah ini nampak terjadinya korosi temperatur tinggi (hot corrosion) diujung turbine bucket. Hal ini terjadi karena turbine bucket tersebut beroperasi pada temperatur tinggi yang mengakibatkan lapisan coating terbakar dan habis, yang akhirnya base metalpun mengalami hot corrosion. Terlihat pengelupasan material setebal 2-3 mm akibat korosi ini (hot corrosion).



Gambar 9. Tampak Hot Corrosion Terjadi di Bagian Ujung

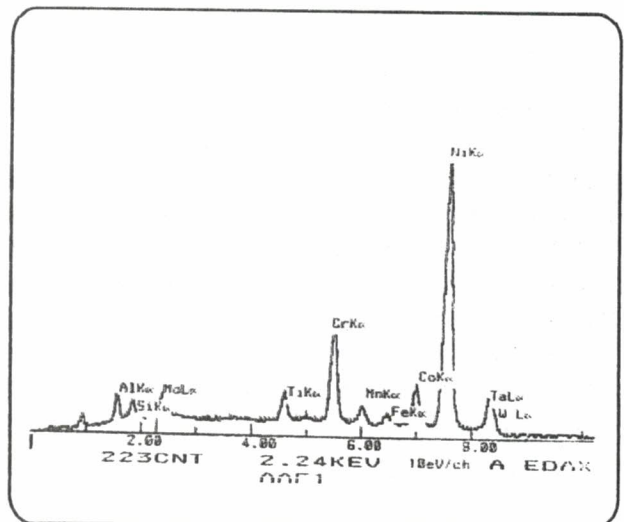
**Pemeriksaan komposisi kimia, kekerasan dan struktur mikro**

##### 1. Pemeriksaan Komposisi Kimia

##### 1.1 Logam dasar (Base Metal)

Hasil pemeriksaan komposisi kimia base metal menggunakan Energy Dispersion Analysis X-Ray (EDAX) terlihat pada Gambar 10 dan Tabel 1

dibawah ini. Pertimbangan penggunaan EDAX dilakukan karena pada benda uji disyaratkan tidak boleh dilakukan uji merusak, dan terbatasnya benda uji (spesimen). Bila hasil pemeriksaan komposisi kimia dibandingkan dengan Nickel Brand Name, maka material bucket tersebut mendekati ke jenis MAR-M-246<sup>(3)</sup>. Karena semua unsur yang terkandung dari hasil pemeriksaan masuk kepada spesifikasi unsur-unsur yang terkandung pada alloy MAR-M-246 kecuali unsur Aluminium yang agak menyimpang. Hal tersebut akan dibahas berikut ini



Gambar 10. Plot Intensitas Vs Besar Energi Emisi X-ray (EDAX) dari unsur pada Bucket

Unsur aluminium dari hasil pemeriksaan lebih kecil dibanding dengan MAR-M-246, kemungkinan berkurangnya aluminium tersebut akibat terjadinya oksidasi

$2Al + 3/2 O_2 \longrightarrow Al_2O_3$ . Hal ini terjadi pada temperatur tinggi, dimana awal keberadaan aluminium terletak pada base metal tetapi pada saat oksidasi berdifusi keluar ke atas membentuk  $Al_2O_3$ <sup>(3)</sup>. Kemungkinan lainnya adalah unsur Aluminium terikat membentuk fasa gamma prime sebagai presipitat penguat.

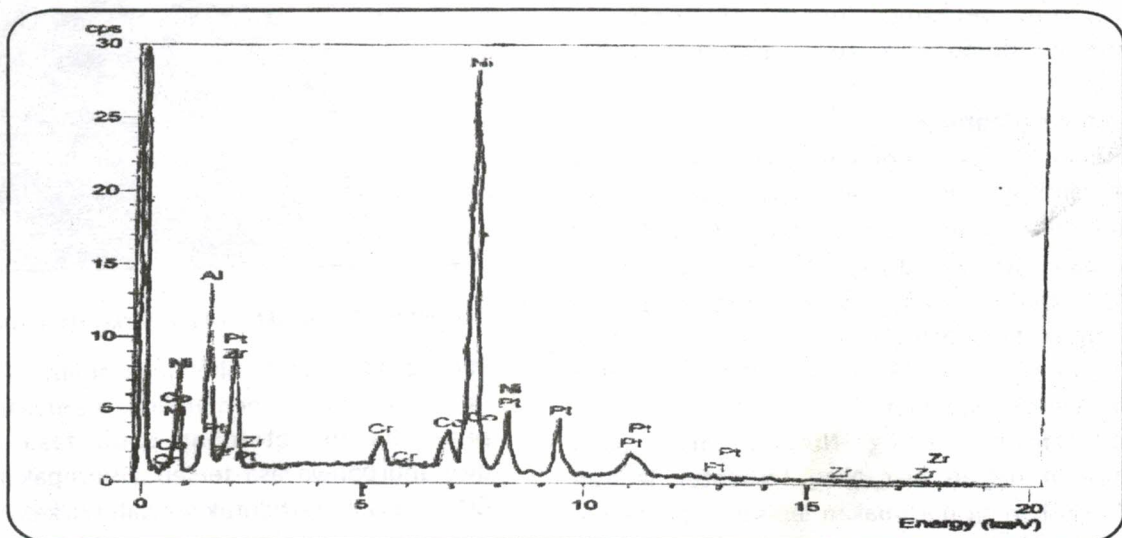
Untuk unsur karbon di material MAR-M-246 kandungan karbonnya 0,15 %, namun dari hasil pengujian EDAX unsur karbon tidak terdeteksi. Hal ini terjadi karena spektrum energi atom karbon diluar range detektor X-Ray sehingga unsur tersebut tidak muncul. Unsur-unsur Mo, Cr, Co, Ta dan W bereaksi dengan karbon membentuk fasa-fasa

**Tabel 1. Hasil Pemeriksaan Komposisi Kimia (% mass)**

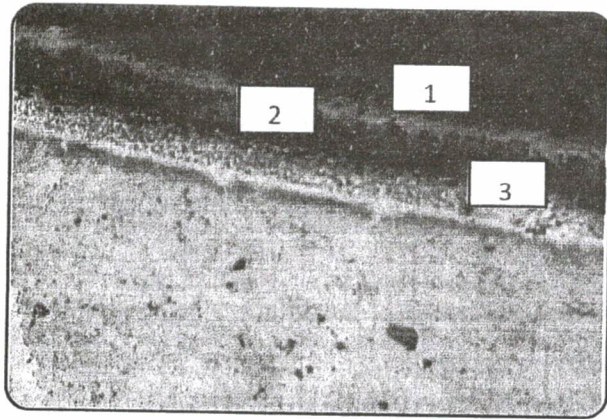
Unsur	Cr	Co	Ti	Mo	Si	Al	Co	Ta	Fe	Mn	W	Ni
Bucket Hasil Pemeriksaan	9,76	8,7	2,12	2,44	0,16	1,52	8,47	0	1,93	0,76	10,89	61,64
MAR-M-246	9,0	10,0	1,5	2,5	-	5,55	10,5	1,5	-	-	10	60

**Tabel 2. Komposisi Kimia Coating pada Turbine bucket**

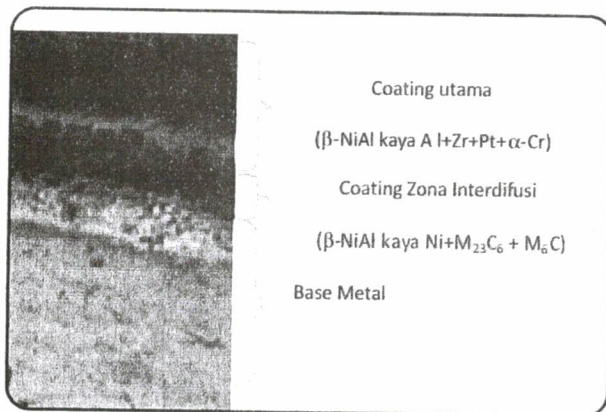
Lokasi tembak 1							
Unsur	Ni	Al	Zr	Cr	Co	Pt	S
% mass	48.89	22.48	14.31	2.25	3.98	7.87	0.21
Lokasi tembak 2							
Unsur	Ni	Al	Zr	Cr	Co	Pt	S
% mass	62.91	19.31	1.43	3.68	5.61	0.23	0.37
Lokasi tembak 3							
Unsur	Ni	Al	Zr	Cr	Co	Pt	S
% mass	26.22	34.64	14.77	10.29	7.32	6.03	0.73



*Gambar 11. Plot Intensitas Vs Besar Energi Emisi X-Ray (EDAX) dari unsur pada coating turbine bucket (lokasi tembak 1)*



Gambar 12. Penampakan Posisi Tembak Coating pada Turbine bucket



Gambar 13. Profile Coating Menuju Base Metal pada Turbine Bucket

karbida yang berfungsi meningkatkan kekuatan dan ketahanan panas <sup>(1)</sup>. Untuk unsur krom dan alumunium berfungsi untuk perlindungan permukaan membentuk lapisan pasive  $Cr_2O_3$  dan  $Al_2O_3$  <sup>(2)</sup>.

### 1.2 Lapisan (Coating)

Pengujian dengan menggunakan EDAX untuk mengidentifikasi jenis coating menunjukkan bahwa coating pada turbine bucket adalah -NiAl. Tabel 2 dan gambar 11 dan 12 berturut-turut memperlihatkan komposisi kimia coating dan penampakan coating pada turbine bucket, sedangkan gambar 13 memperlihatkan profile coating menuju base metal.

Dengan melihat coating -NiAl ini, maka pada permukaan bagian luar akan terbentuk lapisan oksida  $Al_2O_3$  yang merupakan lapisan yang sangat protektif namun rentan terhadap spalling akibat siklik termal. Namun demikian pada pemeriksaan

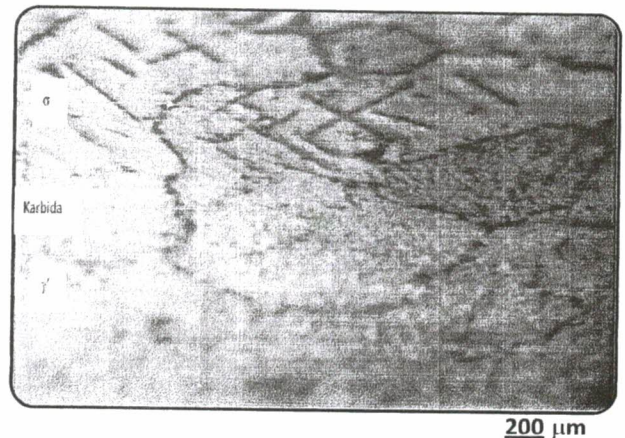
komposisi kimia terdapat unsur Zr yang menunjukkan adanya kemungkinan bucket pernah mengalami pelapisan dengan Zirconium Oksida. Pada pengujian juga muncul platinum (Pt) dan Silicon (Si) yang

ditambahkan untuk meningkatkan ketahanan coating aluminide terhadap degradasi pada temperatur tinggi. Ditemukannya unsur sulfur (S) dan chloride (Cl) mengindikasikan adanya produk hot corrosion, atau disebut juga dengan sulfidation, pada zona coating.

### Pemeriksaan Struktur Mikro

#### 1. Struktur Mikro Base Metal

Struktur mikro base metal sudu turbin memperlihatkan tipikal struktur mikro pada nickel-base superalloy yang sudah terekspos pada temperatur tinggi dengan waktu lama (Gambar 14). Pada gambar tersebut terlihat fasa ' pada butiran, karbida pada batas butir dan fasa sigma yang berbentuk jarum (plate). Fasa ' adalah presipitat berbentuk sferoidal yang merupakan senyawa intermetalik  $Ni_3Al$  dengan Ti dan berbagai unsur terlarut lainnya. Selama operasi fasa ini dapat membentuk lapisan pada batas butiran disekeliling karbida. Karbida pada batas butiran merupakan fasa yang keras dan merupakan senyawa  $Cr_{23}C_6$  <sup>(1)</sup>.



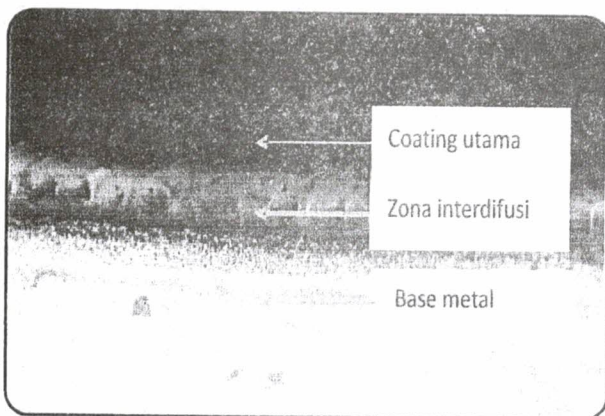
Gambar 14. Struktur Mikro Nickel Base superalloys

Pada gambar 14 terlihat juga adanya fasa yang berbentuk pelat memanjang. Berdasarkan hasil penembakan setempat pada fasa tersebut, diketahui bahwa fasa tersebut merupakan senyawa CrCo. Fasa ini terbentuk setelah bucket mengalami pemaparan pada selang temperatur antara 540 – 980 C. Fasa ini tidak diharapkan muncul karena

sifatnya yang getas, sehingga menurunkan sifat ulet dan memperpendek rupture life.

## 2. Struktur mikro lapisan (Coating)

Dari gambar 15 terlihat dengan sangat jelas bahwa turbine bucket terdiri dari coating utama, zona interdifusi dan base metal. Berdasarkan pengujian untuk Nickel-based superalloy ini jenis coatingnya adalah aluminide. Coating tersebut berfungsi sebagai pelindung terhadap oksidasi dan hot corrosion. Sedangkan lapisan kedua yaitu interdifusi aluminide dengan base metal.



200 μm

Gambar 15. Lapisan Aluminide, Lapisan Interdifusi dan Base Metal.

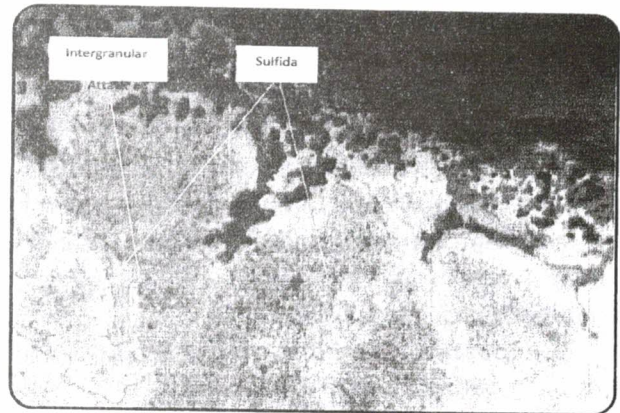


200 μm

Gambar 16. Intergranular Attack

Gambar 16 menunjukkan Intergranular attack pada batas butir yang pada akhirnya micro crack ini dapat menjalar dan menghasilkan instabilitas di batas butir sehingga menyebabkan meningkatnya kemungkinan kegagalan komponen. Hal ini terjadi akibat oksidasi yang terus-menerus. Gambar 17 memperlihatkan terjadinya oksidasi yang

menyerang permukaan serta karbida pada batas butir akibat rusaknya coating. Penampakan lain adalah adanya produk hot corrosion (sulfida) sebagaimana diperlihatkan pada gambar 17 hal ini dibuktikan dari hasil penembakan EDAX pada titik tersebut, dimana ditemukan 36,53 % unsur sulfur (S).



400 μm

Gambar 17. Oksidasi pada batas butir dan sulfida

## Pemeriksaan Kekerasan / Uji Mekanik Material

Pada Tabel 3 dibawah, ditampilkan harga dari kekerasan bucket tip sebagai berikut:

Tabel 3. Harga kekerasan (Hv)

Lokasi Pengujian	Nilai kekerasan (Hv)		
	1	2	3
A	447	441	441
B	447	400	435

Dari hasil microhardness testing dengan Vickers dari tiga titik pengujian secara in-situ, ditemukan nilai kekerasan pada bucket tip adalah, rata-rata 440 HV (atau ekuivalen dengan 420 BHN). Jadi kekerasan tersebut menunjukkan kondisi material yang telah beroperasi selama 7000 jam. Sedangkan data sifat mekanik kondisi awal tidak didapatkan, sehingga untuk data uii tarik material awal hanya berorientasi kepada data empirik (literatur). Hal ini dikarenakan tidak memungkinkan dilakukan pengujian, maka informasi dapat diambil secara empirik bahwa untuk MAR-M-246 pada suhu 25 C kekuatan tariknya adalah 140 Ksi atau equivalent dengan kekerasan Vickers, 290 atau 220 BHN-lihat lampiran. Dari data diatas terlihat pada spot tersebut (bucket tip) ada peningkatan nilai kekerasan setelah 7000



jam beroperasi. Kemungkinan hal ini ada hubungannya dengan terbentuknya fasa sigma yang dapat menyebabkan penggetasan (embrittlement) pada material, kekuatan meningkat ( $\sigma_{UTS}$ ,  $\sigma_{YS}$ , BHN) tetapi keuletan turun ( $\epsilon$  %). Implikasi hal tersebut terhadap kehandalan (performance) turbine bucket akan dijelaskan pada bagian selanjutnya.

## Mekanisme kerusakan dan kehandalan (performance) bucket

### 1. Mekanisme Kerusakan Turbine Bucket

Pada saat beroperasi turbine bucket mengalami suhu tinggi dan gaya sentrifugal yang tinggi melebihi komponen lainnya dalam turbin gas. Oleh sebab itu secara alamiah mereka memiliki umur pakai adanya berbagai mekanisme kerusakan yang beroperasi terjadi pada kondisi seperti itu.

Pada dasarnya terdapat tiga kategori jenis kerusakan pada turbine bucket, yakni <sup>(1,3)</sup>:

1. Akibat aspek lingkungan : oksidasi dan korosi suhu tinggi
2. Akibat aspek mekanik : mulur (creep), thermal fatigue, interaksi fatigue-creep, thermal shock, dan sebagainya.
3. Akibat instabilitas metalurgis : pengkasaran / coarsening fasa  $\gamma$ , pembentukan fasa sigma ( $\sigma$ ) / pengkasaran / pembentukan karbida  $M_{23}C_6$  dan MC pada batas butir, incipient melting, serta pembentukan fasa-fasa lainnya yang lebih stabil.

### 2. Kerusakan Akibat Faktor Lingkungan

Pada sample as received (as-coated), lapisan coating adalah NiAl. Akibat pemaparan pada temperatur tinggi yang oksidatif maka terbentuklah lapisan diatas NiAl yaitu  $Al_2O_3$ . Hal tersebut merupakan hasil reaksi antara oksigen dan Aluminium pada coating. Selanjutnya pada siklus termal lapisan terluar ini dapat mengalami spalling sehingga dibebberapa bagian terlihat terkelupas. Di sisi lain di daerah yang terkelupas dapat mengalami kekurangan Aluminium yang mengakibatkan terjadinya reaksi antara oksigen dengan nickel dan chrome yang menghasilkan lapisan NiO dan  $Cr_2O_3$  disusul dengan pembentukan fasa  $\delta$  dan  $\gamma'$  dibawah NiO dan  $Cr_2O_3$  (bentuknya seperti pulau yang memanjang menuju kearah bawah). Dari sinilah kemudian oksidasi menyerang kearah (intergranular

attack) dalam sebagaimana yang kita lihat pada gambar 17 (serangan parah berwarna hitam). Akibat adanya kerusakan coating tersebut terjadilah serangan atau penetrasi pada batas butir grain boundary merupakan daerah dengan energi tinggi (kurang stabil) dibandingkan dengan matrix. Jika pada saat yang bersamaan terdapat tegangan yang bekerja maka retak akan menjalar dengan lebih cepat.

Berdasarkan pengamatan mikroskopik dan pengujian komposisi kimia, terbukti turbine bucket telah mengalami hot corrosion (gambar 16 dan 17). Kerusakan akibat hot corrosion ini memiliki tingkat yang lebih parah dibandingkan oksidasi dan menyerang pada daerah setempat. Lapisan oksida yang protektif dan rusak pada lingkungan korosif yang berasal dari bahan bakar dan udara bakar. Bahan bakar yang mengandung sulfur dengan alkali dapat membentuk sulfat atau sulfur oksida dan membentuk deposit di permukaan bucket. Fenomena ini merupakan proses oksidasi yang dipercepat yang terjadi ketika lapisan scale oksida protektif terdegradasi atau rusak akibat deposit garam, dan lapisan tersebut tidak mampu terbentuk kembali. Fenomena ini secara umum terjadi pada selang temperatur 871–1093 C.

### 3. Kerusakan Akibat Faktor Mekanik (External Loading, Strain Rate)

Berdasarkan informasi, bahwa temperatur operasi turbin bucket adalah sekitar 567 C, sedangkan bucket ini (material Nickel Base Alloy) diduga beroperasi sekitar sampai dengan 1093 C. Maka hal ini menyebabkan material mengalami fenomena creep. Gambar 4 memberikan indikasi adanya creep dari bentuk deformasi plastik atau distorsi dari turbine bucket. Proses creep ini merupakan peristiwa progresif dan berjalan dengan waktu. Untuk pembuktian lebih dalam, memerlukan pemeriksaan struktur mikro dibagian terjauh dari bucket yang mendekati row. Fenomena creep secara mikroskopis akan ditandai dengan lahir dan tumbuhnya kekosongan (voids initiation and growth) pada batas butir. Namun karena pada sampel tidak mungkin dilakukan uji merusak melebihi 3 mm, pemeriksaan metalografi tidak dapat dilakukan untuk memverifikasi fenomena ini. Fatigue adalah fenomena kegagalan material akibat

dikenai beban cyclic / fluktuatif. Pada kasus turbine bucket yang berperan dalam low cycle fatigue (LCF) dengan fluktuasi tegangan atau regangan plastis yang cukup tinggi. Pada turbine blade fatigue bisa disebabkan oleh stress cyclic akibat :

- i) fluktuasi gaya sentrifugal
- ii) fluktuasi thermal.

Fatigue akan menyebabkan terjadinya inisiasi retak (crack) pada material, yang seterusnya, retakan ini akan merambat sesuai dengan besar dan arah pembebanan.

Pada turbin bucket yang diperiksa tidak terlihat adanya indikasi fatigue, namun bisa jadi pada bucket yang lain terdapat kerusakan akibat faktor ini. Observasi lapangan (workshop) yang dilakukan memperlihatkan adanya perambatan retak / crack akibat fatigue (dan creep) pada vane tip (trailing edge) dan komponen stator lainnya. Hal ini memberikan indikasi adanya fluktuasi thermal akibat proses shut-down dan start-up (on & off) dari mesin turbin yang mungkin dilakukan terlalu sering.

#### 4. Kerusakan akibat Instabilitas Faktor Metalurgis

Perubahan faktor metalurgis yang terjadi jika ada, dapat mempengaruhi sifat mekanik dan akibatnya menurunkan kehandalan (performance) bucket pada operasi berikutnya.

Hasil pengamatan struktur mikro benda uji Nickel Base Superalloy terlihat fasa ' pada butiran, karbida pada batas butir dan fasa sigma yang berbentuk jarum (plate) seperti terlihat pada gambar 14. Setelah beroperasi selama 7000 jam terjadi pembentukan fasa sigma (CrCo). Hal ini memberikan indikasi bahwa pada spot tersebut telah terekspos pada suhu operasi sekitar 570 C s/d 980 C. Kehadiran fasa dan morfologi fasa seperti ini akan menurunkan keuletan dan ketangguhan material.

Selanjutnya pada batas butir terlihat adanya pertumbuhan karbida / pembesaran karbida. Namun karena tidak ada benda uji original sebelum dipakai, maka struktur mikro hasil pengujian, secara kuantitatif, tidak dapat dibandingkan. Tetapi bila mengamati karbida yang terjadi di posisi yang jauh dengan permukaan dibandingkan dengan posisi di dekat permukaan, tampak sangat jelas bahwa karbida di dekat permukaan mengalami oksidasi (gambar 17).

Oksidasi karbida dapat berpengaruh pada stabilitas batas butir sehingga menurunkan kekuatan terhadap creep-rupture<sup>(3,1)</sup> karena seperti yang difahami, creep adalah fenomena batas butir. Selanjutnya dari micrograph tidak terlihat adanya indikasi incipient melting (pelelehan setempat pada batas butir).

Semua perubahan metalurgi yang terjadi diatas akibat hukum termodinamika yakni pada suhu tertentu dan waktu yang cukup lama fasa-fasa yang hadir cenderung berubah menjadi sesuatu fasa yang lebih stabil. Untuk mengembalikan kepada kondisi semula (ukuran, morfologi, dan distribusinya), maka pada material tersebut harus dilakukan heat treatment, yakni : solution heat treatment dan precipitation aging / hardening .

#### 5. Kehandalan Turbine Bucket

Performance bucket sangat ditentukan oleh laju kerusakan yang terjadi yang pada akhirnya menentukan umur sisa dari bucket tersebut. Tidak seperti komponen stasionary (vane / nozzles) dimana umur pakainya dikendalikan oleh perambatan retak (crack growth), komponen rotasi seperti blade / bucket umur pakainya dikendalikan oleh inisiasi retak (crack initiation). Ini artinya, jika ditemukan inisiasi retak baik akibat korosi / oksidasi, ataupun akibat fatigue dan creep, maka bucket harus segera direfurbish / direparasi.

Adanya lingkungan yang korosif (hot corrosion) menyebabkan proses oksidasi dipercepat sehingga lapisan oksidasi protektif tidak mampu terbentuk kembali. Kondisi ini tentunya mempercepat kegagalan turbine bucket sejalan dengan pemaparan selama operasi turbine. Dengan kombinasi antara temperatur tinggi dan lingkungan yang korosif, turbine bucket akan mengalami kerusakan yang parah pada daerah korosi setempat dan kehilangan berat.

Tanpa adanya informasi tentang creep voids development pada batas butir, kurva standard dari creep rupture, sifat fatigue pada material MAR-M-246 (baik data original maupun setelah beroperasi selama 7000 jam) sangat sukar, atau kalau boleh mengatakan tidak mungkin, untuk menentukan secara presisi umur sisa dari bucket tersebut. Namun dari analisa retakan dapat diharapkan bahwa retak akibat korosi / oksidasi dapat menjalar dalam waktu yang relatif cepat. Dengan kata lain

bucket memiliki kehandalan yang rendah atau memiliki resiko yang tinggi untuk gagal / fail.

Untuk meningkatkan performance pada saat operasi nanti, maka bucket harus sedemikian rupa di repair dengan mengacu pada prosedur teknis standard. Seperti antara lain; pada saat melakukan pengelasan filter material yang digunakan harus memiliki komposisi kimia sedekat mungkin dengan paduan MAR-M-246.

Sifat mekanik yang diperoleh melalui uji kekerasan memberikan indikasi telah terjadi pengerasan dan kemungkinan besar penggetasan (sekurang-kurangnya pada spot / daerah material yang ditest). Hal tersebut bisa jadi mewakili sifat mekanik dari seluruh bucket, namun bisa saja sifat mekanik dari satu lokasi ke lokasi lain pada bucket tersebut berbeda secara signifikan akibat adanya thermal gradien. Terlepas dari semua itu, setelah proses welding pada bucket perlu dilakukan proses heat treatment. Tujuan dari heat treatment ini, diantaranya, adalah untuk :

1. Menurunkan tegangan sisa yang mungkin hadir akibat proses welding.
2. Mengembalikan fasa yang terbentuk kembali berdifusi kedalam matriks gamma membentuk solid solution strengthening.
3. Menghilangkan fasa sigma yang memiliki sifat merugikan.

Menutup microvoids yang mungkin hadir pada butir (hal ini dilakukan dengan teknik Hot Isostatic Pressing / HIP).

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

1. Pemeriksaan metalurgis terhadap turbine bucket nomor 120 dari stage 1 memperlihatkan bahwa benda tersebut telah mengalami oksidasi dan hot corrosion, selain itu bucket tersebut telah mengalami deformasi / distorsi yang memperlihatkan indikasi adanya fenomena creep.
2. Pemeriksaan dengan EDAX memperlihatkan bahwa material bucket adalah MAR-M-246, Cast Nickel Base Superalloy.
3. Pemeriksaan dengan EDAX menunjukkan bahwa bucket telah mengalami perbaikan dua kali dengan menggunakan coating masing-masing AlNi, ZrO dan adanya indikasi coating dengan menggunakan platinum (PtAl<sub>2</sub>).

4. Pemeriksaan metalografis memperlihatkan adanya fasa sigma CrCo berbentuk plate / jarum, yang sangat getas dengan indikasi adanya peningkatan nilai kekerasan.
5. Telah terjadi kerusakan coating yang mengakibatkan teroksidasinya karbida / dan terjadi reaksi sulfida masing-masing pada batas butir yang menyebabkan timbulnya micro-crack.
6. Dari pengamatan no 1 s/d 6 diatas menunjukkan bahwa turbine bucket telah terekspos suhu 570 – 980 C.
7. Akibat mekanisme kerusakan yang terjadi turbine bucket memiliki kehandalan yang sangat rendah.

### Saran

1. Untuk kembali pada kondisi semula perlu dilakukan reparasi dengan welding (rebuilding), selanjutnya filler yang cocok dengan komposisi kimia MAR-M-246.
2. Perlu dilakukan proses heat treatment untuk menurunkan tegangan sisa hasil welding dan mengembalikan sifat mekanik kepada kondisi semula.
3. Untuk Material MAR-M-246, dapat digunakan dengan route sebagai berikut<sup>(11)</sup>:
  - i) Solution heat treating pada temperatur 1220 C selama 2 jam dan dilanjutkan dengan pendingin udara / air cooling.
  - ii) Precipitation hardening (aging) dengan 870 C selama 24 jam dilanjutkan dengan pendinginan udara / air cooling.
4. Kembali melakukan evaluasi metalurgis pada bucket yang sudah diperbaiki (repaired) untuk memastikan adanya diffusion bonding dan tidak adanya retak, khususnya hairline crack pada HAZ, dan kembalinya fasa-fasa penguat pada matrix struktur mikro.

### Saran Teknis untuk Operasi Turbin

Jika, oleh satu sebab dan hal lainnya, material tidak dilapis (coated) dengan aluminida (aluminide), maka untuk meningkatkan ketahanan terhadap hot corrosion / sulfidation dan oksida pada saat turbin gas beroperasi nanti, disarankan untuk melakukan kontrol yang ketat pada bahan bakar (fuel) dengan membatasi komposisi pengotor

sebagai berikut :

1. Kandungan Sulfur (S) < 1%
2. Kandungan Sodium dan Potasium (Na + K) dibawah 0,6 ppm
3. Kandungan Vanadium (V) < 0,5 ppm.

Selain itu, penambahan dengan sedikit Magnesium (Mg) pada bahan bakar (fuel) sebagai inhibitor dapat mengurangi serangan hot corrosion atau sulfidation.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Sim, C. T, and Hogel, W.C, " The Superalloys", general electric company, John Wiley & Sons Publisher, New York, 1971
2. Sim, C.T, and Stoloff, N.S, and Hagel, W.C. "Superalloys II", high temperature materials for aerospace and Industrial power, John Wiley & Sons Publisher, New York, 1987.
3. Donachie, M. J and Donachie, S. J. " Superalloys a technical guide", 2ed, ASM International, 2002.
4. Voort, G. F. V, "Materials Science and engineering series (Metallography : Principle and Practice)", Mc Graw-Hill, 1984.