



UNIVERSITAS INDONESIA

**KAJIAN *CREEP* PADA *MIXING CHAMBER*
PUSAT LISTRIK TENAGA GAS
UNIT GAS TURBIN 4.2 DI MUARA TAWAR BEKASI**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

SKRIPSI

**HARDY PRASETIA
0405040309**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : HARDY PRASETIA

NPM : 0405040309

Tanda Tangan :

Tanggal : 7 Juli 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : HARDY PRASETIA
NPM : 0405040309
Program Studi : METALURGI DAN MATERIAL
Judul Skripsi : KAJIAN *CREEP* PADA *MIXING CHAMBER*
PUSAT LISTRIK TENAGA GAS
UNIT GAS TURBIN 4.2
DI MUARA TAWAR BEKASI

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir Andi Rustandi, MT (tanda tangan.....)

Penguji 1 : Ir Yunita Sadeli, M.Sc (tanda tangan.....)

Penguji 2 : Ir Sugiarto, MT (tanda tangan.....)

Ditetapkan di :

Tanggal : 7 Juli 2009

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Bpk Ir Andi Rustandi, MT, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Bpk Sugiarto, selaku pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (3) Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
- (4) Sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini;
- (5) dan Pihak lain yang tidak bisa saya sebutkan satu-persatu.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 7 Juli 2009

Penulis

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

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

Nama : HARDY PRASETIA
NPM : 0405040309
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

KAJIAN *CREEP* PADA *MIXING CHAMBER*
PUSAT LISTRIK TENAGA GAS
UNIT GAS TURBIN 4.2 DI MUARA TAWAR BEKASI

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 7 Juli 2009
Yang menyatakan

(Hardy Prasetia)

ABSTRAK

Nama : HARDY PRASETIA
Program Studi : Departemen Metalurgi dan Material
Judul : Kajian Creep pada Mixing Chamber Pusat Listrik Tenaga
Unit Gas Turbin 4.2 Di Muara Tawar Bekasi

Mixing Chamber merupakan komponen dalam turbin gas yang berfungsi sebagai penghubung antara *combustor* gas turbin dan *first stage nozzle* gas turbin. *Mixing chamber* juga berfungsi untuk mengarahkan dan membentuk aliran gas panas agar sesuai dengan ukuran *nozzle* dan *sudu-sudu* turbin gas. Adapun, penelitian ini untuk mengkaji adanya indikasi creep, penyebab terjadinya *creep*, dan mengetahui jenis *creep* yang terjadi. Dengan demikian, hasil ini dapat digunakan dalam merencanakan sistem evaluasi, dan apakah perlu diadakan major inspection atau tidak.

Mixing chamber dengan ASM specification number A516 gr 65 beroperasi pada temperatur berkisar 500-1100°C. Metodologi penelitian ini dengan menggunakan pengujian kekerasan skala *Vickers*, pengujian struktur mikro, pemeriksaan XRD dan XRF. Bagian *mixing chamber* yang mengalami kegagalan memiliki nilai kekerasan rata-rata 140VHN. Dari hasil pengujian struktur mikro terdapat adanya *intergranular cracking* pada *mixing chamber*. Hasil pemeriksaan XRD pada deposit bahan bakar treated terdapat adanya unsur *sulphur*. Diketahui unsur *sulphur* yang mengakibatkan penurunan ketahanan *creep* dan mengakibatkan adanya proses *sulfidisasi*. Sehingga adanya unsur *sulphur* merupakan penyebab terjadinya kegagalan *creep* pada komponen *mixing chamber*. Kegagalan *mixing chamber* juga dikarenakan ketidaksesuaian antara kondisi operasional dengan spesifikasi pemilihan material. Kegagalan yang terjadi pada *mixing chamber* merupakan kegagalan jenis *creep cavities*, ini bercirikan adanya *intergranular cracking*.

Kata Kunci:
Mixing Chamber, creep, cavities, deposit, intergranular cracking.

ABSTRACT

Name : Hardy Prasetya
Study Program: Department of Metallurgy and Materials
Title : Study of *Creep* on the *Mixing Chamber* of *Gas Power Plant Turbine-#4.2* at *Muara Tawar - Bekasi*

Mixing Chamber are *gas turbine* component as used to connect a *combustor* of a *gas turbine* to a first stage *nozzle gas turbine*. Addition that, *Mixing Chamber* deliberately design to face and to form hot gas flow so that to correspond with *nozzle* size and *turbine blade* *gas turbine*. This research is purposed to study presence indicate *creep*, study at the bottom of *creep*, and to know variety *creep* presence. Therefore, this result can used to plan evaluation system and whether needed major inspection or not.

Mixing Chamber with ASM specification number A516 gr 65 has temperature operation approximately 500-1100°C. This research methodology used hardness testing scale Vickers, microstructure testing, XRD, and XRF. Part of failure of *mixing chamber* has average grade hardness 140 VHN. Result of microstructure presence *intergranular cracking* and XRD testing on *deposit* fuel treated presence *sulphure*. Whereas *sulphure* will result decreases *creep resistance* and *sulphidation* process. Therefore, failure *creep* of *mixing chamber* is consequence presence of *sulphure* and not properly between material selection with condition occurred. Failure *creep* variety presence is *creep cavities*, its has feature presence of *intergranular cracking*.

Key words:

Mixing Chamber, creep, cavities, deposit, intergranular cracking.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH.....	2
1.3 BATASAN MASALAH.....	2
1.4 TUJUAN PENELITIAN.....	3
1.5 TEMPAT DAN WAKTU PELAKSANAAN.....	3
BAB II LANDASAN TAORI	
2.1 GAMBARAN UMUM PLTG.....	4
2.2 TATA LETAK PLTG.....	7
2.3 PRINSIP OPERASI PLTG.....	8
2.4 TURBIN GAS.....	10
2.5 <i>MIXING CHAMBER</i>	16
2.6 <i>CREEP</i>	17
2.7 <i>OVERHEATING</i>	24
2.8 SULFIDISASI.....	26

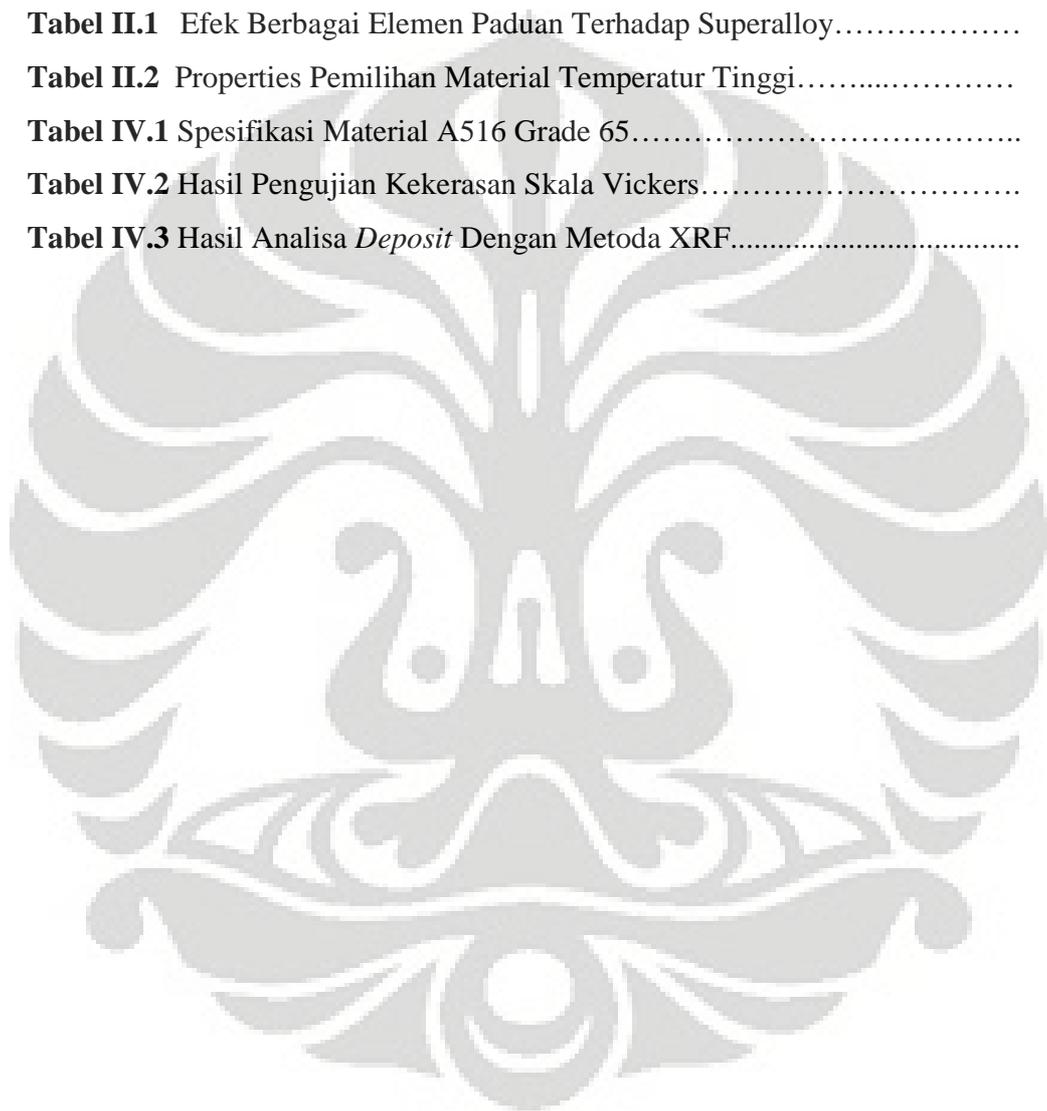
2.9 THERMAL BARRIER COATING.....	27
2.10 EFEK KONDISI TEMPERATUR TINGGI.....	27
2.11 <i>SUPERALLOY</i>	29
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 GARIS BESAR PENELITIAN.....	34
3.2 ALAT DAN BAHAN.....	35
3.3 ROSEDUR PENELITIAN.....	35
3.3.1PENGUMPULAN DATA DAN INFORMASI.....	35
3.3.2PENGAMATAN VISUAL.....	35
3.3.3PENGUJIAN KEKERASAN.....	36
3.3.4FOTO MAKRO DAN MIKRO.....	36
3.3.5PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA DEPOSIT.....	36
3.3.6PENGUJIAN XRD FUEL.....	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1HASIL PENGUJIAN.....	37
4.1.1HASIL PENGUJIAN KEKERASAN.....	38
4.1.2HASIL PENGUJIAN STRUKTUR MIKRO.....	39
4.1.3HASIL PEMERIKSAAN XRD.....	42
4.1.4HASIL KANDUNGAN DEPOSIT XRF.....	44
4.2PEMBAHASAN.....	45
BAB V KESIMPULAN	
5.1KESIMPULAN.....	48
DAFTAR PUSTAKA.....	49
LAMPIRAN	51

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar II.1 Sistem dan Siklus Kerja Brayton.....	4
Gambar II.2 Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Gas.....	5
Gambar II.3 Siklus Ideal Brayton.....	14
Gambar II.4 Sebuah system Turbin Gas.....	15
Gambar II.5 <i>Mixing Chamber</i> pada Turbin Gas.....	16
Gambar II.6 Tahapan <i>Creep</i>	18
Gambar II.7 Klasifikasi void umur <i>Creep</i>	19
Gambar II.8 Perubahan keadaan pada <i>Creep</i>	21
Gambar II.9 Pembentukan <i>Creep void</i> dan <i>cavities</i>	22
Gambar II.10 Representasi nukleasi <i>cavity</i>	22
Gambar II.11 Perkembangan <i>cavities series</i>	22
Gambar II.12 Mekanisme Sulfidisasi.....	25
Gambar II.13 Thermal Barrier Coating.....	27
Gambar II.14 Produk tipikal <i>hot corrosion</i>	28
Gambar IV.1 Pengambilan struktur mikro pada <i>Mixing Chamber</i> (L1).....	39
Gambar IV.2 Struktur mikro pada <i>Mixing Chamber</i> (L1).....	39
Gambar IV.3 Pengambilan struktur mikro pada <i>Mixing Chamber</i> (L2).....	39
Gambar IV.4 Struktur mikro pada <i>Mixing Chamber</i> (L2).....	39
Gambar IV.5 Pengambilan struktur mikro <i>Mixing Chamber</i> kanan (L1).....	40
Gambar IV.6 Struktur mikro <i>Mixing Chamber</i> kanan (L1).....	40
Gambar IV.7 Pengambilan struktur mikro <i>Mixing Chamber</i> (L2).....	40
Gambar IV.8 Struktur mikro daerah retak pada <i>Mixing chamber</i>	40
Gambar IV.9 Struktur mikro lokasi 2 pada daerah normal.....	41
Gambar IV.10 Hasil pemeriksaan 1 XRD pada deposit GT 4.2.....	42
Gambar IV.11 Hasil pemeriksaan 2 XRD pada deposit GT 4.2.....	42
Gambar IV.12 Hasil pemeriksaan 3 XRD GT 4.2 (<i>fuel deposit</i>).....	43

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel II.1 Efek Berbagai Elemen Paduan Terhadap Superalloy.....	30
Tabel II.2 Properties Pemilihan Material Temperatur Tinggi.....	33
Tabel IV.1 Spesifikasi Material A516 Grade 65.....	37
Tabel IV.2 Hasil Pengujian Kekerasan Skala Vickers.....	38
Tabel IV.3 Hasil Analisa <i>Deposit</i> Dengan Metoda XRF.....	44



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Spesifikasi Material.....	51
Lampiran 2 Klasifikasi Cavities.....	52
Lampiran 3 Daftar Pabrik Pembuat Turbin Gas.....	53
Lampiran 4 Perbandingan Antara Turbin Gas Dan Turbin Uap.....	54
Lampiran 5 Sistem Turbin Gas.....	55
Lampiran 6 Bagian <i>Combustion Chamber</i> Turbin Gas.....	56
Lampiran 7 Mesin Turbin Gas Tampak Atas.....	57

BAB I PENDAHULUAN

I.1 LATAR BELAKANG

Siklus PLTG dimulai dari pengambilan udara oleh *compressor*. Dalam *compressor* ini udara dimanfaatkan sehingga tekanannya naik. Udara ini dimasukkan kedalam *Combustion* atau ruang bakar bersama dengan bahan bakar (gas / bbm). Pembakaran menghasilkan gas bertekanan dan bersuhu tinggi (Suhu sekitar 2000 derajat celcius). Gas bertekanan inilah yang memutar turbin gas. Turbin berputar, generator ikut berputar dan listrik pun dihasilkan. Setelah memutar turbin, gas tersebut dibuang di atmosfer. Siklus selesai.

Selain sederhana, satu unit PLTG juga tidak memerlukan tempat terlalu luas. Proses pembangunannya juga relatif lebih cepat daripada unit pembangkit lain. Biaya pembangunannya pun relatif juga lebih murah. Hanya saja karena bekerja pada suhu dan tekanan tinggi, komponen-komponen dari PLTG yang disebut Hot Parts menjadi cepat rusak sehingga memerlukan perhatian yang serius. Belum lagi *hot parts* tersebut kebanyakan berharga sangat mahal sehingga biaya pemeliharaan PLTG sangat besar.

Pada siklus PLTG, yang seperti ini lazim disebut *Open Cycle*. Gas hasil pembakaran, masuk turbin, lalu dibuang. Suhu dan tekanan gas yang dibuang biasanya masih cukup tinggi. Berkisar antara 500 derajat celcius sehingga sebenarnya sayang jika langsung dibuang. Harusnya gas sepanas itu bisa untuk menguapkan air, lalu uapnya bisa digunakan untuk memutar turbin. Nah, atas pemikiran seperti itulah, muncul yang namanya PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap).

Kerusakan salah satu komponen pada PLTG akan menimbulkan kerugian yang besar diakibatkan terhentinya kegiatan produksi ketika proses perbaikan dilakukan disamping aspek-aspek lainnya. Contohnya kerusakan salah satu

komponen pada PLTG yaitu kerusakan pada *mixing chamber*. Adapun, penelitian ini bertujuan untuk meninjau adanya indikasi *creep* pada *mixing chamber*. Dimana dalam hal ini 33,000 hr sudah adanya indikasi *creep* dan ini menuntut adanya major inspection, dimana yang seharusnya major inspection dilakukan pada 66,000 hr. Selain itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui sebab-sebab mengapa terjadinya indikasi *creep* sehingga diharapkan data-data ini dapat dijadikan sebagai acuan untuk mencegah agar hal tersebut tidak terjadi lagi dikemudian hari.

I.2 PERUMUSAN MASALAH

Sebagai salah satu bagian dari proses perawatan dan pemantuan komponen PLTG di Pusat Listrik Tenaga Gas Unit GT 4.2 di Muara Tawar Bekasi yang difokuskan pada bagian komponen *mixing chamber*, perlu mengkaji adanya indikasi *creep* pada komponen tersebut. Hal ini berguna dalam merencanakan sistem evaluasi, inspeksi serta proses perbaikan pada komponen tersebut kedepannya apakah akan dilakukan *major inspection* atau tidak.

I.3 BATASAN MASALAH

1. Pengkajian adanya indikasi *creep* pada komponen *mixing chamber* dengan menggunakan metode insitu metalografi, Non-Destructive Test, dan Replication Test untuk mengamati mikrostruktur Pusat Listrik Tenaga Gas Unit GT 4.2 di Muara Tawar Bekasi.
2. Mengkaji penyebab adanya indikasi *creep* pada *mixing chamber* Pusat Listrik Tenaga Gas Unit GT 4.2 di Muara Tawar Bekasi.

I.4 TUJUAN PENELITIAN

1. Mempelajari adanya indikasi terjadinya *creep* pada komponen *mixing chamber* Pusat Listrik Tenaga Gas Unit GT 4.2 di Muara Tawar Bekasi.
2. Mempelajari jenis *creep* (*void* atau *cavity*) yang terjadi pada komponen *mixing chamber* Pusat Listrik Tenaga Gas Unit GT 4.2 di Muara Tawar Bekasi
3. Mempelajari penyebab terjadinya *creep* pada komponen *mixing chamber* Pusat Listrik Tenaga Gas Unit GT 4.2 di Muara Tawar Bekasi.

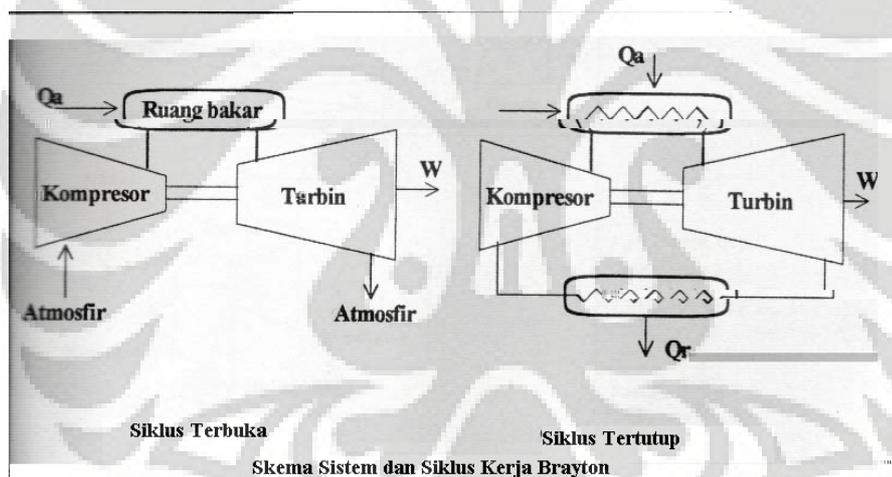
I.5 TEMPAT DAN WAKTU PELAKSANAAN

Kegiatan penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari Perusahaan Listrik Negara bagian Penelitian dan Pengembangan Duren Tiga. Data Sekunder diperoleh pada bulan Nopember 2008. Mengenai tempat dan waktu pelaksanaan pengujian-pengujian tepatnya tidak diketahui. Namun kondisi telah dilihat secara langsung pada komponen *mixing chamber* di Pusat Listrik Tenaga Gas Muara Tawar Bekasi pada bulan Nopember 2008.

BAB II LANDASAN TEORI

II.1 Pusat Listrik Tenaga Gas

Sistem PLTG menggunakan prinsip siklus Brayton yang dibagi atas siklus terbuka dan siklus tertutup. Pada siklus terbuka, fluida kerja adalah udara atmosfer dan pengeluaran panas di atmosfer karena gas buang dari turbin dibuang ke atmosfer. Gambar berikut menunjukkan sistem dan siklus kerja Brayton:



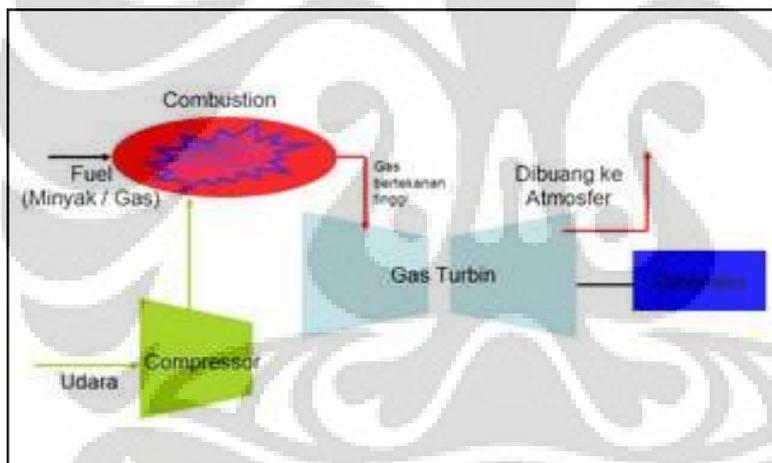
Gambar II.1. Sistem dan Siklus Kerja Brayton.

Diakses tanggal 12 Maret 2009. <http://majarimagazine.com/2009/02/gas-turbine-engine-part-1>.

Pusat pembangkit berfungsi untuk mengkonversikan sumber daya energi primer menjadi energi listrik. Untuk mendapatkan energi listrik dari energi primer dikenal 2 cara yaitu:

- 1) Pembangkit listrik yang konvensional, pembangkit untuk mendapatkan energi listrik dari energi primer menggunakan media perantara (turbin air, turbin uap, turbin gas, motor bakar).
- 2) Pembangkit listrik yang nonkonvensional, pembangkit untuk mendapatkan energi listrik dari energi primer langsung tanpa menggunakan media perantara.

Gas yang dimaksud yaitu yang memutar turbin PLTG bukanlah murni gas alam, melainkan gas hasil sebuah proses pembakaran. Perlu diketahui, bahan bakar PLTG tidak hanya gas alam saja, tetapi bisa menggunakan BBM misalnya HSD (*High Speed Diesel*) ataupun MFO (*Marine Fuel Oil*). Penjelasan lebih lengkap ada pada siklus PLTG dibawah ini.



Gambar II.2. Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Gas.

Diakses tanggal 12 Maret 2009.: <http://www.ccitonline.com/mekanikal/tiki-index.php?page=PLTG>.

Siklus PLTG dimulai dari pengambilan udara oleh *compressor*. Dalam *compressor* ini udara diolah sehingga tekanannya naik. Udara ini dimasukkan kedalam *Combustion* atau ruang bakar bersama dengan bahan bakar (gas / bbm). Pembakaran menghasilkan gas bertekanan dan bersuhu tinggi (Suhu sekitar 2000

derajat celcius). Gas bertekanan inilah yang memutar turbin gas. Turbin berputar, generator ikut berputar dan listrik pun dihasilkan. Setelah memutar turbin, gas tersebut dibuang di atmosfer. Siklus selesai.

Siklus PLTG memang sederhana. Selain sederhana, satu unit PLTG juga tidak memerlukan tempat terlalu luas. Proses pembangunannya juga relatif lebih cepat daripada unit pembangkit lain. Biaya pembangunannya-pun relatif juga lebih murah. Hanya saja karena bekerja pada suhu dan tekanan tinggi, komponen-komponen dari PLTG yang disebut *Hot Parts* menjadi cepat rusak sehingga memerlukan perhatian yang serius. Belum lagi hot parts tersebut kebanyakan berharga sangat mahal sehingga biaya pemeliharaan PLTG sangat besar.

PLTG, secara prinsip hampir sama dengan PLTU, hanya saja uapnya diganti dengan gas. Karena karakteristik uap dan gas secara umum berbeda, maka akan ada beberapa prinsip dasar yang berbeda antara turbin uap dan turbin gas, selain itu, gas yang dipakai dalam PLTG bisa dibilang lebih mudah untuk disiapkan daripada uap, sehingga sebuah PLTG bisa mulai berproduksi dari keadaan “dingin” dalam hitungan menit, sebut saja sekitar 10 menit sampai 30 menit, ini jauh lebih cepat dari apa yang bisa dilakukan oleh sebuah PLTU.

Satu hal yang menarik pada PLTG adalah gas yang keluar dari turbin biasanya masih cukup panas. Cukup panas sehingga bila di sebelah PLTG ada sebuah PLTU, maka gas hasil proses di PLTG masih dapat digunakan untuk memanaskan boiler kepunyaan PLTU. Inilah kemudian yang dikenal dengan sebutan *combine cycle*, sebuah Pembangkit yang terdiri dari PLTG dan PLTU.

Kembali pada siklus PLTG, siklus PLTG yang seperti ini sering disebut Open Cycle. Gas hasil pembakaran, masuk turbin, lalu dibuang. Suhu dan tekanan gas yang dibuang biasanya masih cukup tinggi. Berkisar antara 500 derajat celcius sehingga sebenarnya sayang jika langsung dibuang. Harusnya gas sepanas itu bisa untuk menguapkan air, lalu uapnya bisa digunakan untuk memutar turbin. Nah, atas

pemikiran seperti itulah, muncul yang namanya PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap).

Sistem PLTG menggunakan prinsip siklus *Brayton* yang dibagi atas siklus terbuka dan siklus tertutup. Pada siklus terbuka, fluida kerja adalah udara atmosfer dan pengeluaran panas di atmosfer karena gas buang dari turbin dibuang ke atmosfer.

Untuk meningkatkan efisiensi panas mesin *Brayton* sederhana dapat menggunakan alat pemanas ulang (Heat Recovery) yang disebut *regenerator* dan digunakan untuk memutar turbin uap. *Regenerator* adalah suatu penukar panas aliran lawan-arah, dimana panas dipindahkan dari gas buang ke gas buang kompresor. Sistem ini dikenal dengan teknologi *Combined Cycle*.

II.2 Tata Letak PLTG

Komponen utama PLTG terdiri atas beberapa peralatan yang satu dengan yang lainnya terintegrasi sehingga menjadi satu unit lengkap yang dapat dioperasikan sebagaimana mestinya.

Komponen-komponen PLTG diantaranya adalah^[10] :

- 1) Kompresor Utama
- 2) *Combustion Chamber*
- 3) Turbin Gas ([*gas turbine*](#))
- 4) *Load Gear*
- 5) *Generator dan Exciter*
- 6) Alat Bantu
- 7) Kontrol, Instrumentasi, dan Pengaman
- 8) Peralatan listrik
- 9) dll

II.3 Prinsip Operasi PLTG

Turbin gas suatu PLTG berfungsi untuk mengubah energi yang terkandung di dalam bahan bakar menjadi mekanis. Fluida kerja untuk memutar Turbin Gas adalah gas panas yang diperoleh dari proses pembakaran.

Proses pembakaran memerlukan tiga unsur utama yaitu :

- 1) Bahan Bakar
- 2) Udara
- 3) Panas

Dalam proses pembakaran ini bahan bakar disuplai oleh pompa bahan bakar (*fuel oil pump*) apabila digunakan bahan bakar minyak, atau oleh kompresor gas apabila menggunakan bahan bakar gas alam. Pada umumnya kompresor gas disediakan oleh pemasok gas tersebut. Udara untuk pembakaran diperoleh dari kompresor utama, sedangkan panas untuk awal pembakaran dihasilkan oleh *ignitor* (busi). Proses pembakaran dilaksanakan didalam *Combustion Chamber* (ruang bakar). Energi mekanis yang dihasilkan oleh turbin gas digunakan untuk memutar generator listrik, sehingga diperoleh energi listrik. Tentu saja untuk dapat berjalannya operasi PLTG dengan baik perlu dilengkapi dengan alat-alat bantu, kontrol, instrumentasi, proteksi, dan sebagainya^[11].

II.3.1. Kompresor Utama

Kompresor utama adalah kompresor aksial yang berguna untuk memasok udara bertekanan ke dalam ruang bakar yang sesuai dengan kebutuhan. Kapasitas kompresor harus cukup besar karena pasokan udara lebih (*excess air*) untuk turbin gas dapat mencapai 350 %. Disamping untuk mendapatkan pembakaran yang sempurna, udara lebih ini digunakan untuk pendingin dan menurunkan suhu gas hasil pembakaran.

II.3.2 Inlet Guide Vanes (IGV)

Pada kompresor berkapasitas besar, diisi udara masuk kompresor, yaitu pada inlet guide vanes dipasang variabel IGV, sedangkan pada kompresor berukuran kecil umumnya dipasang *Fixed Guide Vanes*. Variabel IGV berfungsi untuk mengatur volume udara yang dikompresikan sesuai dengan kebutuhan atau beban turbin. Pada saat Start Up, IGV juga berfungsi untuk mengurangi surge. Pada saat stop dan selama start up, IGV tertutup (pada unit tertentu, posisi IGV 34-48%), kemudian secara bertahap membuka seiring dengan meningkatnya beban turbin. Pada beban turbin tertentu, IGV terbuka penuh (83-92%). Selama stop normal IGV perlahan-lahan ditutup bersamaan dengan turunnya beban, sedangkan pada stop emergency, IGV tertutup bersamaan dengan tertutupnya katup bahan bakar.

II.3.3 Combustion Chamber (ruang bakar)

Combustion Chamber adalah ruangan tempat proses terjadinya pembakaran. Ada turbin gas yang mempunyai satu atau dua *Combustion Chamber* yang letaknya terpisah dari casing turbin, akan tetapi yang lebih banyak dijumpai adalah memiliki *Combustion Chamber* dengan beberapa buah *Combustion basket*, mengelilingi sisi masuk (inlet) turbin. Di dalam *Combustion Chamber* dipasang komponen-komponen untuk proses pembakaran beserta sarana penunjangnya, diantaranya:

1. *Fuel Nozzle*
2. *Combustion Liner*
3. *Transition Piece*
4. *Igniter*

5. *Flame Detektor*

II.4. Turbin Gas

Turbin Gas berfungsi untuk membangkitkan energi mekanis dari sumber energi panas yang dihasilkan pada proses pembakaran. Selanjutnya energi mekanis ini akan digunakan untuk memutar generator listrik baik melalui perantara Load Gear atau tidak, sehingga diperoleh energi listrik. Bagian-bagian utama Turbin Gas adalah^[10]:

- 1) Sudu Tetap
- 2) Sudu Jalan
- 3) Saluran Gas Buang
- 4) Saluran Udara Pendingin
- 5) Batalan
- 6) *Auxiliary Gear*

II.4.1. Prinsip Kerja Sistem Turbin Gas

Udara masuk kedalam kompresor melalui saluran masuk udara (*inlet*). Kompresor berfungsi untuk menghisap dan menaikkan tekanan udara tersebut, sehingga temperatur udara juga meningkat. Kemudian udara bertekanan ini masuk kedalam ruang bakar. Di dalam ruang bakar dilakukan proses pembakaran dengan cara mencampurkan udara bertekanan dan bahan bakar. Proses pembakaran tersebut berlangsung dalam keadaan tekanan konstan sehingga dapat dikatakan ruang bakar hanya untuk menaikkan temperatur. 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*)^[10].

Secara umum proses yang terjadi pada suatu sistem turbin gas adalah sebagai berikut^[10]:

1. Pemampatan (*compression*) udara di hisap dan dimampatkan
2. Pembakaran (*combustion*) bahan bakar dicampurkan ke dalam ruang bakar dengan udara kemudian di bakar.
3. Pemuaian (*expansion*) gas hasil pembakaran memuai dan mengalir ke luar melalui nozel (*nozzle*).
4. Pembuangan gas (*exhaust*) gas hasil pembakaran dikeluarkan lewat saluran pembuangan.

Pada kenyataannya, tidak ada proses yang selalu ideal, tetap terjadi kerugian-kerugian yang dapat menyebabkan turunnya daya yang dihasilkan oleh turbin gas dan berakibat pada menurunnya performa turbin gas itu sendiri. Kerugian-kerugian tersebut dapat terjadi pada ketiga komponen sistem turbin gas. Sebab-sebab terjadinya kerugian antara lain:

- 1) Adanya gesekan fluida yang menyebabkan terjadinya kerugian tekanan (*pressure losses*) di ruang bakar.
- 2) Adanya kerja yang berlebih waktu proses kompresi yang menyebabkan terjadinya gesekan antara bantalan turbin dengan angin.
- 3) Berubahnya nilai C_p dari fluida kerja akibat terjadinya perubahan temperatur dan perubahan komposisi kimia dari fluida kerja.
- 4) Adanya *mechanical loss*, dsb.

II.4.2 Klasifikasi Turbin Gas

Turbin gas dapat dibedakan berdasarkan siklusnya, konstruksi poros dan lainnya. Menurut siklusnya turbin gas terdiri dari:

- 1) Turbin gas siklus tertutup (*Close cycle*)
- 2) Turbin gas siklus terbuka (*Open cycle*)

Perbedaan dari kedua tipe ini adalah berdasarkan siklus fluida kerja. Pada turbin gas siklus terbuka, akhir ekspansi fluida kerjanya langsung dibuang ke udara atmosfer, sedangkan untuk siklus tertutup akhir ekspansi fluida kerjanya didinginkan untuk kembali ke dalam proses awal.

Dalam industri turbin gas umumnya diklasifikasikan dalam dua jenis yaitu :

- 1) Turbin Gas Poros Tunggal (*Single Shaft*)

Turbin jenis ini digunakan untuk menggerakkan generator listrik yang menghasilkan energi listrik untuk keperluan proses di industri.

- 2) Turbin Gas Poros Ganda (*Double Shaft*)

Turbin jenis ini merupakan turbin gas yang terdiri dari turbin bertekanan tinggi dan turbin bertekanan rendah, dimana turbin gas ini digunakan untuk menggerakkan beban yang berubah seperti kompresor pada unit proses.

II.4.3 Siklus-Siklus Turbin Gas

Tiga siklus turbin gas yang dikenal secara umum yaitu^[13]:

1) Siklus *Ericson*

Merupakan siklus mesin kalor yang dapat balik (*reversible*) yang terdiri dari dua proses isotermis dapat balik (*reversible isothermic*) dan dua proses isobarik dapat balik (*reversible isobaric*). Proses perpindahan panas pada proses isobarik berlangsung di dalam komponen siklus internal (*regenerator*), dimana efisiensi termalnya adalah : $\eta_{th} = 1 - T_1/T_h$, dimana T_1 = temperatur buang dan T_h = temperatur panas.

2) Siklus *Stirling*

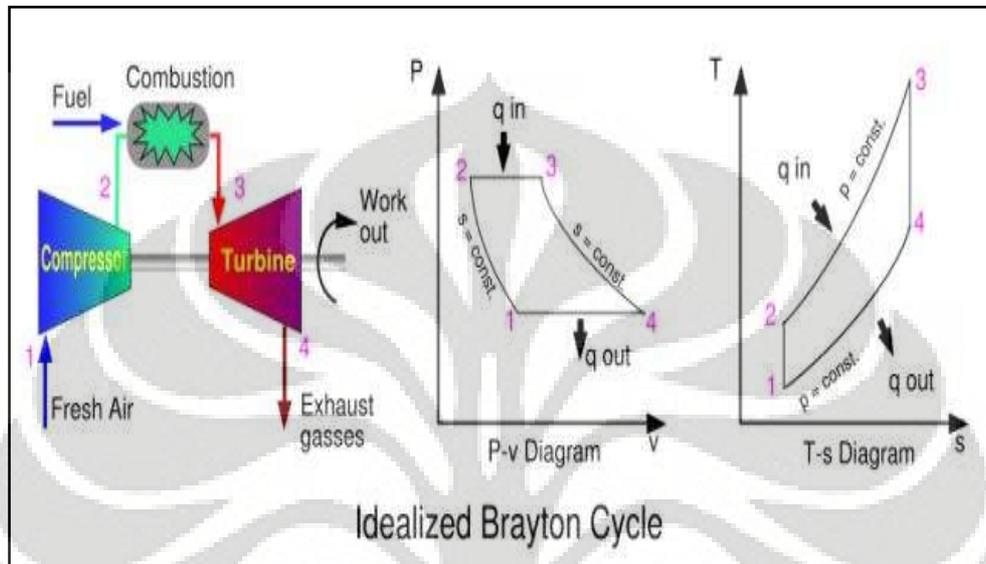
Merupakan siklus mesin kalor dapat balik, yang terdiri dari dua proses isotermis dapat balik (*isothermal reversible*) dengan volume tetap (*isokhorik*). Efisiensi termalnya sama dengan efisiensi termal pada siklus Ericson.

3) Siklus *Brayton*

Siklus ini merupakan siklus daya termodinamika ideal untuk turbin gas, sehingga saat ini siklus ini yang sangat populer digunakan oleh pembuat mesin *turbine* atau *manufacturer* dalam analisa untuk *performance upgrading*. Siklus Brayton ini terdiri dari proses kompresi isentropik yang diakhiri dengan proses pelepasan panas pada tekanan konstan. Pada siklus Bryton tiap-tiap keadaan proses dapat dianalisa secara berikut:

Proses 1 ke 2 (kompresi isentropik). Kerja yang dibutuhkan oleh kompresor: $W_c = m_a (h_2 - h_1)$. **Proses 2 ke 3**, pemasukan bahan bakar pada tekanan konstan. Jumlah kalor yang dihasilkan: $Q_a = (m_a + m_f) (h_3 - h_2)$. **Proses 3 ke 4**, ekspansi isentropik didalam turbin. Daya yang dibutuhkan turbin: $W_T = (m_a + m_f) (h_3 - h_4)$.

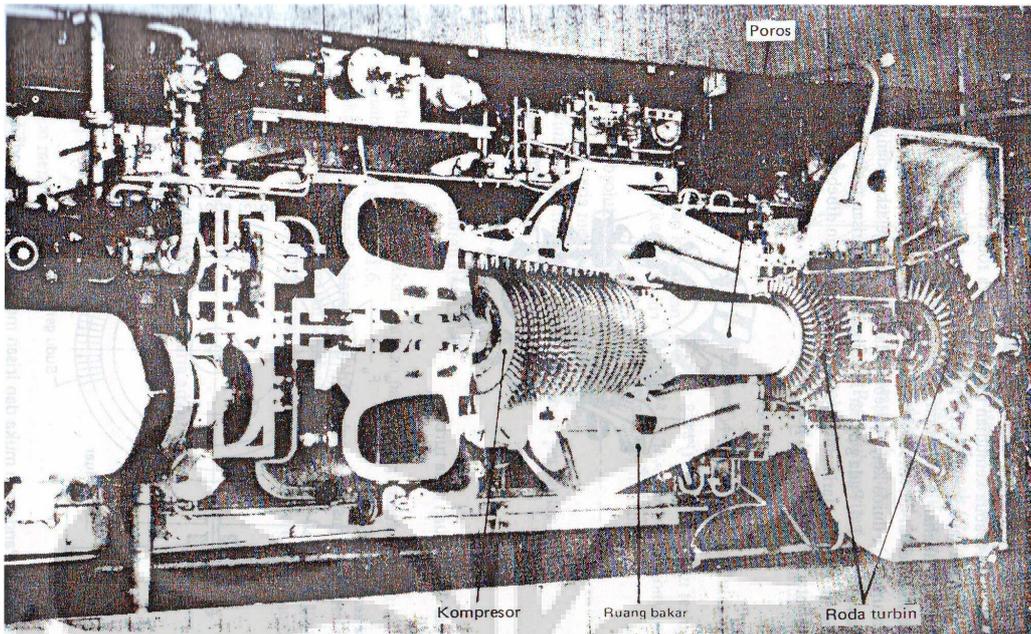
Proses 4 ke 1, pembuangan panas pada tekanan konstan ke udara. Jumlah kalor yang dilepas: $Q_R = (m_a + m_f)(h_4 - h_1)$



Gambar II.3. Siklus Ideal Brayton.

Diakses tanggal 12 Maret 2009. <http://majarimagazine.com/2009/02/gas-turbine-engine-part-1>

Untuk memperoleh gambaran yang jelas mengenai gas turbin, dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar II.4. Sebuah system Turbin Gas.

Gambar diperoleh dari: Wiranto, Arismunandar. *Penggerak Mula Turbin*. Bandung: Penerbit: ITB, 2004.

Turbin gas dalam operasinya terdiri dari beberapa komponen utama sebagai berikut^[10]:

1) *Kompresor*

Yang fungsi utamanya adalah mengkompresikan udara dan mengalirkan udara tersebut ke ruang bakar

2) *Ruang Bakar*

Berfungsi sebagai tempat pembakaran dan pemanasan udara hasil dari kompressor.

3) *Turbin*

Yang fungsi utamanya adalah merubah energi dari gas panas hasil dari ruang bakar menjadi energi mekanis.

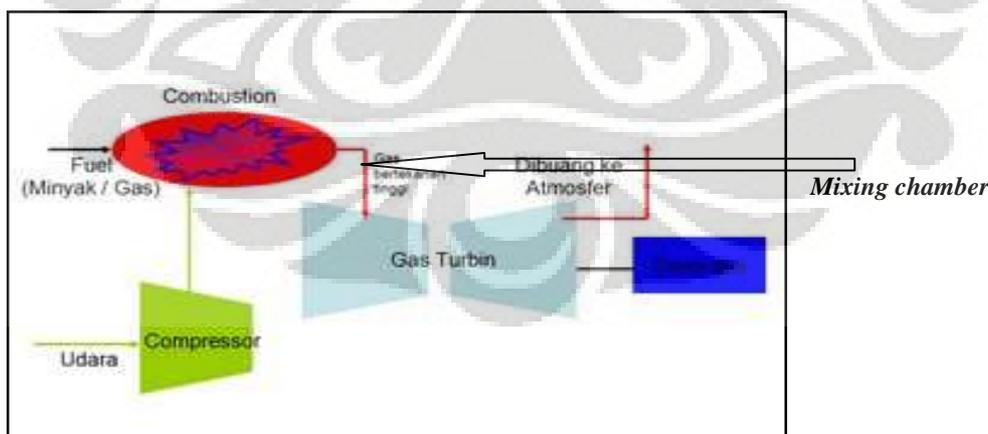
4) *Generator*

Yang fungsi utamanya adalah sebagai alat untuk merubah energi mekanis menjadi energi listrik.

II.5 *Mixing chamber*

Mixing chamber digunakan sebagai penghubung antara *combustor gas turbin* dan *stage gas turbin*, *Mixing chamber* umumnya memiliki *body tubular*, bagian *inlet* untuk menerima gas panas dari *combustor* dan bagian *outlet* untuk pelepasan gas^[12]. *Mixing chamber* memiliki frame, disekeliling bagian *outlet*, dan dua *mounting connector*. Temperatur gas pembakaran yang keluar dari ruang bakar (*combustion chamber*) menuju *mixing chamber* berkisar antara 500-1100°C^[7].

Mixing chamber atau *Transition Pieces*, berfungsi untuk mengarahkan dan membentuk aliran gas panas agar sesuai dengan ukuran *nozzle* dan sudu-sudu turbin gas^[12].



Gambar II.5. *Mixing chamber* pada Turbin Gas.

Diakses tanggal 12 Maret 2009.

[:http://www.ccitonline.com/mechanikal/tiki-index.php?page=PLTG](http://www.ccitonline.com/mechanikal/tiki-index.php?page=PLTG)

II.6 Creep

II.6.1 Definisi

Creep adalah suatu proses dimana terjadi aliran plastis dibawah pengaruh tegangan konstan yang diterapkan terhadap logam untuk periode yang lama. (*smallman*)^[9]

Creep adalah deformasi yang terjadi secara perlahan akibat adanya beban dan tergantung pada waktu. *Creep* dapat terjadi pada temperature rendah. Tetapi yang sangat jelas terlihat terjadi pada temperatur dekat pada titik cair, sekitar 30% hingga 60% dari titik cair, atau sekitar temperatur $T \geq 0,4T_m$. (*callister*)^[9]

II.6.2 Mekanisme Creep

II.6.2.1 Mekanisme *Creep* deformasi dapat dibagi menjadi empat, yaitu^[14]:

1) *Dislocation Glide*

Melibatkan pergerakan dislokasi sepanjang bidang slip (*slip planes*) dan melewati rintangan (*barriers*) dengan aktivasi termal (*thermal activation*). Terjadi tegangan tinggi (*high stress*).

2) *Dislocation Creep*

Melibatkan pergerakan dislokasi yang melewati rintangan (*barriers*) dengan difusi vakansi atau interstitials.

3) *Diffusion Creep*

Melibatkan aliran vakansi dan *interstitials* melewati kristal dibawah pengaruh tegangan (*stress*) yang diberikan.

Panjatan (*climb*) membantu terjadinya pelunakan material. Ujung dislokasi (*dislocations*) akan bergerak keluar pada satu *glide plane* dan kedalam yang lain melalui *vacancy-assisted climb*, bergerak keduanya.

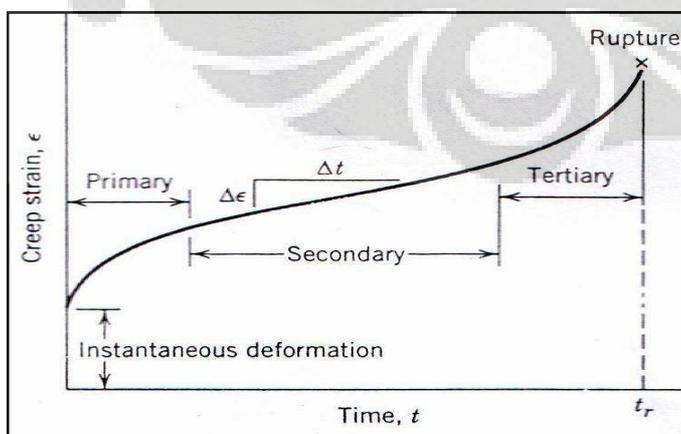
Pentingnya temperatur, panjatan (*climb*) mengambil pergerakan *vacancies* yang dapat berdiffuse ke tensile sisi ujung; dari sini, temperatur sangat penting pada *vacancies*, secara kasar diffuse ketika $T \geq 0,4T_{\text{melting}}$ [9].

- 1) Gerak panjat (*climb*) merupakan dislokasi sisi meninggalkan bidang luncurnya dengan melepaskan atau menyerap kekosongan.
- 2) Temperatur mengakibatkan terjadinya panjatan (*climb*).
- 3) Dislokasi dapat mengitari presipitat atau bergerak pada batas butir.
- 4) Dislokasi sisi akan dengan sendirinya melepaskan diri dengan gerak panjat. (energi aktivasi tinggi)
- 5) Atom dari batas butir berpindah dengan difusi.

II.6.2.2 Dislokasi pada *Creep*

- 1) Batas butir mampu saling meluncur satu sama lainnya atau menghasilkan kekosongan.
- 2) Aliran kekosongan dari permukaan dengan tegangan tarik longitudinal [9].

II.6.2.3 Tahapan *Creep*



Gambar II.6. Tahapan *Creep*.
Gambar diperoleh dari: ASM Metals Handbook Volume 9. *Metallography and Microstructure*. Ohio:ASM International, 1986.

Berdasarkan pada gambar 5 diatas bahwa tahapan *Creep* dapat dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu: primer, sekunder, dan tersier^[9].

1) Tahapan 1 (*primary creep*)

Pada tahap ini laju menurun secara kontinyu karena terjadi *strain hardening* pada material.

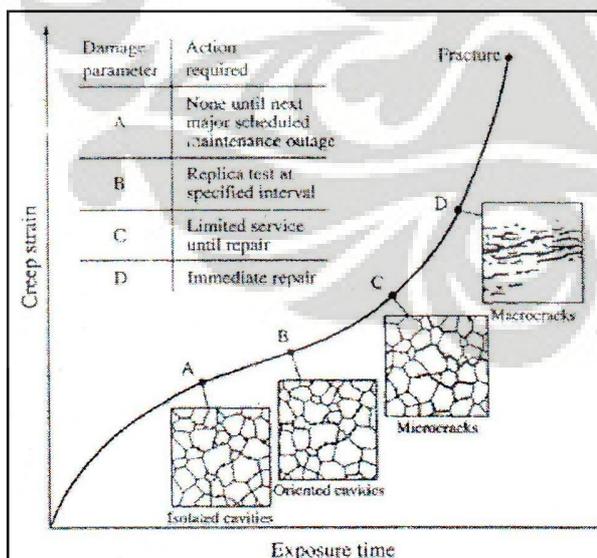
2) Tahapan 3 (*secondary steady-state creep*)

Tahapan ini merupakan tahapan paling penting dalam *creep* dan merupakan tahapan paling utama. Dimana laju *creep* konstan karena terjadi kompetisi antara *strain hardening* dan *recovery* pada material.

3) Tahapan 3 (*tertiary creep*)

Tahapan ini laju *creep* akan meningkat disebabkan oleh *intergranular cracking* dan pembentukan void hingga terjadi *creep rupture*.

II.6.3 Creep Void



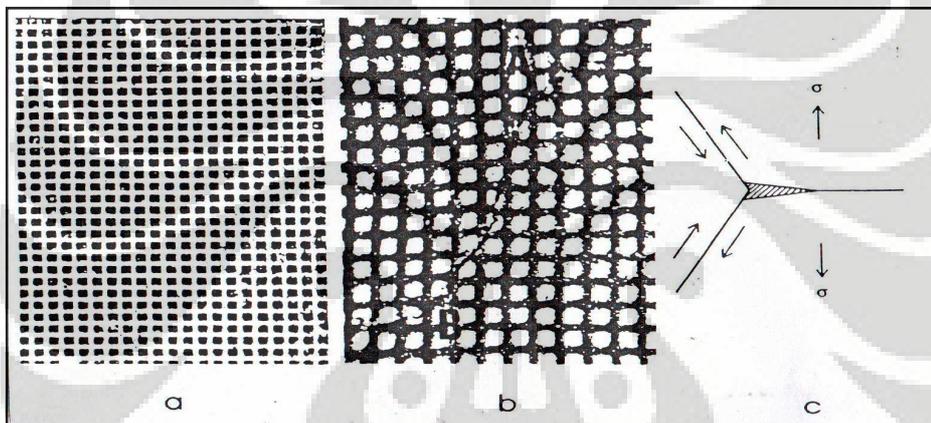
Gambar II.7. Pengkajian umur *creep* berdasarkan klasifikasi void^[1]. Gambar diperoleh dari: R Vismanathan, *Damage Mechanism and Life Assesment of High Temperature Components* (Ohio:ASM International, 1995)

Grafik diatas digunakan untuk mengevaluasi perubahan *void* pada komponen sebagai indikasi terjadinya *creep*. Grafik tersebut didapatkan melalui percobaan yang dilakukan oleh Neubaauer dan Wedel. Observasi ini dilakukan pada *steam pipe* di pembangkit listrik jerman. Mereka menghubungkan waktu yang dibutuhkan oleh void dalam suatu komponen plant untuk berubah dari satu tahapan ke tahapan berikutnya dengan mengkarakterisasi *evolusi void* pada steel dalam empat tahap. Yang pertama adalah *isolated void*, *oriented void*, *linked void (microcrack)*, dan *macrocrack*. Berdasarkan pengalaman ini, direkomendasikan hubungan antara empat tahapan void tersebut. Untuk kerusakan kelas A, maka tidak ada tindakan koreksi yang dibutuhkan. Sedangkan kerusakan kelas B yang terdiri dari *oriented void* membutuhkan inspeksi kembali dalam 1,5 sampai 3 tahun. Kemudian kelas C membutuhkan perbaikan atau pergantian dalam waktu 6 bulan. Dan terakhir, kerusakan kelas D membutuhkan perbaikan segera^[1].

Pada *triple point cracks* dapat dijelaskan dengan dasar, dibawah kondisi *creep* pada temperatur tinggi, butir-butir pada material polikristalin dapat bergerak relatif satu terhadap yang lainnya. Proses *shearing* sepanjang batas butir, disebut dengan *grain boundary sliding* yang seperti diilustrasikan pada gambar 6 dibawah. *Triple point cracks* dapat selanjutnya terbentuk dan tumbuh dengan cara seperti yang terdapat pada gambar 6(c), khususnya sliding pada batas butir mengalami *shear stress* yang dapat dengan mudah terjadinya konsentrasi stress yang cukup besar untuk mengakibatkan nukleasi cracks pada triple points, berlanjut dengan sliding menyebabkan *crack* tumbuh terutama sepanjang batas normal (*boundary normal*) hingga axis tegangan tarik (*tensile stress axis*).

Pergerakan relatif pada dua butir yang berdekatan dalam susunan *polikristalin* menghasilkan deformasi disekeliling butir-butir. Jadi sliding hanya dapat terjadi dengan deformasi butir, kecepatan grain boundary sliding, dan karena kecepatan *triple point crack* tumbuh, dan selanjutnya ditentukan oleh kecepatan *creep* secara keseluruhan.

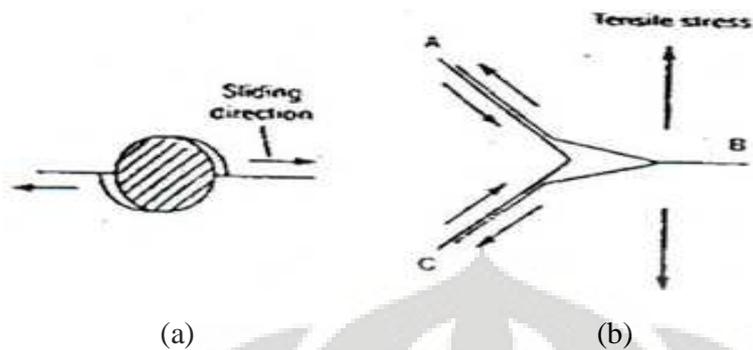
Pada pertumbuhannya, besarnya konsentrasi stress pada *triple point* harus tergantung pada shear stress pada batas sliding (*sliding boundaries*). Shear stress berhubungan dengan *creep* stress yang diterapkan. Akibatnya, harus ada batasan tegangan *creep* (*limiting creep stress*) dibawah konsentrasi stress pada *triple point* yang merupakan tidak cukupnya untuk proses *decohere (boundary)* dan *nukleasi triple points cracks*. Kecuali stress yang diterapkan lebih besar dari pada nilai batas, *triple point cracks* tidak akan terbentuk. Tentang hasil, *triple point cracks* yang diamati hanya pada stress yang relatif tinggi dan pada jangkauan (range) stress yang lebih rendah, kegagalan *intergranular* normalnya terjadi melalui *cavitation*^[5].



Gambar II.8 (a)Keadaan awal uniform jaringan pada permukaan specimen sebelum menjadi berubah menjadi *creep*, (b)Pergeseran yang terdapat sepanjang batas AB, (c)Arah pergeseran sepanjang batas harus dapat menaikkan panjang sampel dibawah pemberian tensile stress (σ)pergeseran batas butir selanjutnya menghasilkan perkembangan konsentrasi stress yang cukup untuk nukleasi crack pada *triple point junctions*^[5].

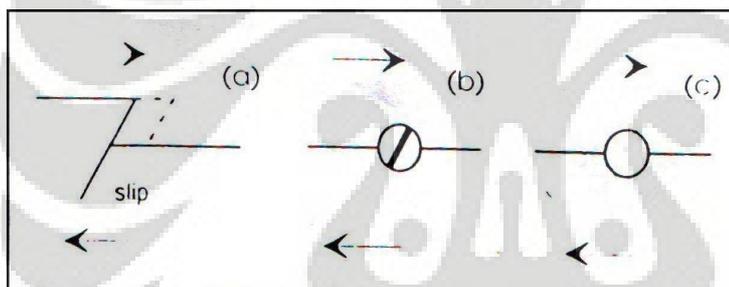
Gambar diperoleh dari: Evans, Wilshire, *Introduction Creep*. The Institute of - Materials Carlton House Terrace London SW1Y 5DB, 1993.

Gambar 7 dibawah ini menunjukkan *sliding* pada batas butir yang terjadi ketika proses *creep* berlangsung. Proses ini menggambarkan pembentukan *void* pada daerah sekitar inklusi yang terdapat pada batas butir, dan pembentukan *void* pada *triple point* yaitu daerah dimana ketiga butir bersentuhan.

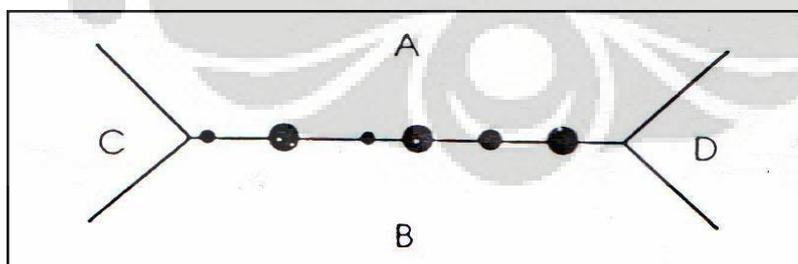


Gambar II.9. (a)Pembentukan creep cavities, (b)Pembentukan creep void.
 Gambar diperoleh dari: Evans, Wilshire, *Introduction Creep*. The Institute of -
 Materials Carlton House Terrace London SW1Y 5DB, 1993.

II.6.4 Creep Cavitation



Gambar II.10. skema representasi nukleasi cavity batas butir.^[5]
 Gambar diperoleh dari: Evans, Wilshire, *Introduction Creep*. The Institute of
 Materials Carlton House Terrace London SW1Y 5DB, 1993.



Gambar II.11. Seri cavities yang sedang berkembang pada batas dibawah tensile stress, σ . Jika cavities tumbuh melalui penyerapan vacancies dari sekeliling daerah batas butir, terdapat kesesuaian counterflow dari atom-atom. Plate atom-atom keluar pada batas butir, jacking butir

A dan B berpisah. Tetapi, butir A dan B bisa bergerak untuk mengakomodasi kenaikan volume setempat hanya pada kecepatan yang diizinkan pada *creep* diantara butir-butir, C dan D. pembatas ini (*constraint*) berperan penting terhadap kecepatan pertumbuhan cavity yang ditentukan dengan keseluruhan kecepatan *creep*^[5].

Gambar diperoleh dari: Evans, Wilshire, *Introduction Creep*. The Institute of Materials Carlton House Terrace London SW1Y 5DB, 1993.

Seperti pada *triple point cracking cavities* batas butir dianggap tergantung pada pergeseran batas butir. Dalam kasus ini, konsentrasi stress yang besar dapat menghasilkan dimana pergeseran dihalangi oleh *obstacles* kecil.

Pada umumnya, *obstacles* dipercaya berperan penting dalam pembentukan *cavities*

- 1) tahap pembentukan, dikatakan dimana slip band dalam satu butir berpotongan (*intersects*) dengan butir, pada gambar 8(a) atau
- 2) partikel-partikel *non-deformable* atau inklusi *hard* pada batas butir, dengan pembentukan *void* melalui keretakan partikel atau dengan *decohering* partikel atau *interface matriks*, pada gambar 8 (b) dan (c) berturut-turut^[5].

Suatu gambaran, pergeseran batas butir dipertanggungjawabkan tidak hanya untuk nukleasi tapi juga berlanjut untuk pertumbuhan *cavities*. Dengan kecepatan pergeseran yang dikontrol melalui kecepatan pada butir-butir yang dideformasi. Dalam hal yang berbeda, beberapa teori didasarkan pada ide, bahwa *cavities* telah mendekati *critical size*, pertumbuhan dapat terjadi melalui absorpsi *vacancies* dari sekeliling batas butir. Konsep ini dapat dijelaskan seperti berikut:

Anggap *cavities* berbentuk bola (*spherical*) dengan radius, r , pada batas normal terhadap tensile stress, σ . Pada beberapa jarak dari void, konsentrasi *vacancies* pada *boundary* adalah

$$C^+ \exp - [(q - \Omega\sigma)/kT] = C_0 \exp[\Omega\sigma/kT] \quad (\text{II.1})$$

Dimana:

Ω adalah volume vacancies

Q adalah energi pembentukan vacancies

C_0 adalah kesetimbangan konsentrasi vacancies dalam butir pada temp. T

II.7 Overheating

Overheating adalah terjadinya pemanasan disuatu lokasi dengan temperatur yang sangat tinggi, bisa mencapai ratusan derajat diatas normal, sehingga memicu terjadinya deformasi, atau peluluhan (*yielding*). Berdasarkan waktu terjadinya, *overheating* dapat dibedakan menjadi:

1) Short term overheating

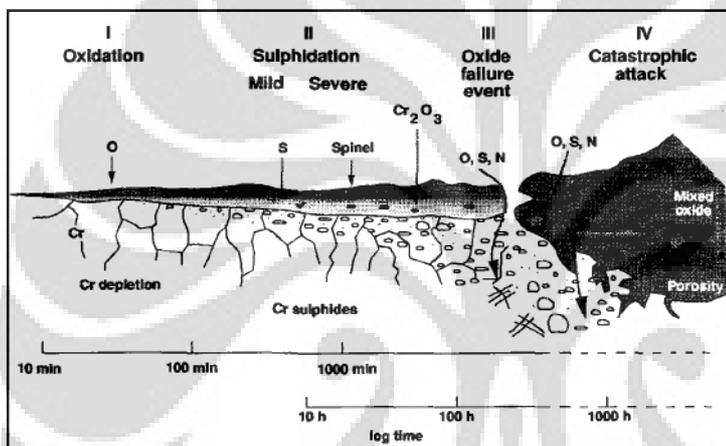
Merupakan terjadinya *overheating* dengan waktu yang singkat. Pada suatu lokasi tertentu terjadi pemanasan dengan temperatur yang tinggi yang dapat disebabkan antara lain oleh pengoperasian yang tidak sesuai dengan prosedur dimana temperatur operasi yang dijalankan melebihi temperatur desain yang disyaratkan, selain itu dapat juga disebabkan oleh kondisi-kondisi yang *abnormal* seperti adanya nyala atau jilatan api dari *burner* pada suatu lokasi tertentu yang dapat meningkatkan temperatur di lokasi tersebut, faktor lain adalah terbentuknya lapisan oksida pada bagian permukaan komponen sehingga akan mempengaruhi panas pada bagian tersebut dan menjadikan lapisan oksida tersebut merupakan lapisan yang sangat korosif. Pada kasus *overheating*. Pada kasus *overheating* yang disebabkan oleh adanya lapisan oksida ini maka dapat terjadi pengurangan ketebalan komponen tersebut dan akan meningkatkan regangan.

2) Long term overheating

Merupakan kondisi dimana terjadi akumulasi kenaikan temperatur pada permukaan dalam jangka waktu yang lama biasanya kegagalan akan terjadi setelah beberapa bulan atau beberapa tahun. *Overheating* tipe ini merupakan penyebab

terbanyak kegagalan dibandingkan tipe *overheating* yang lain karena komponen akan kehilangan banyak kekuatan pada temperatur tinggi. Walaupun tidak terjadi pengurangan ketebalan dari dinding, namun terjadi mekanisme *creep*. *Long term overheating* dapat disebabkan dari sisi yang terbentuk adanya deposit, scale.

II.8 Sulfidisasi



Gambar II.12. Mekanisme Sulfidisasi

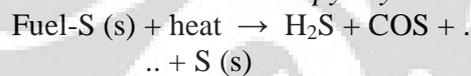
Gambar diakses 27 Juni 2009. <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/25/24/17/PDF/ajp-jp4199303C975.pdf>

Sulfidisasi disebabkan adanya difusi elemen paduan melalui lapisan oksida dan pembentukan sulphida stabil pada permukaan scale oksida. Disebabkan tekanan disosiasi yang tinggi dari sulphida, *rapid intergranular corrosion* dari substrate paduan ikut menyokong (Khanna 2002). Deposit yang kaya *sulphate*, seperti CrS and Al₂S₃, mungkin terbentuk dalam proses pembakaran dan ini akan menjadi cair pada temperatur diatas 600 °C. SO₃ bebas dalam cairan sulphat bertransformasi dari protective scale oksida menjadi logam sulphates, memisahkan permukaan scale (Schütze 1997). Pengotor (impurities) bahan bakar seperti: sodium, potassium, dan chlorine, seringkali mempercepat sulfidisasi. Umumnya, pengurangan lingkungan (sulphur dalam bentuk H₂S) lebih korosif dibandingkan oksidasi lingkungan (*sulphur*

dalam bentuk SO_2 atau SO_3). Biasanya, beberapa penggunaan logam (seperti besi, nikel, dan cobalt) sulphur merupakan pengoksidasi yang lebih agresif dibanding dengan oksigen, dengan order kecepatan reaksi yang besarnya lebih cepat dibandingkan kecepatan reaksi pada oksigen. Kecepatan reaksi tinggi dikarenakan difusi kisi lebih cepat dalam sulphides dibandingkan oxides. *Sulphides* memiliki deviasi yang lebih besar dari stoikometri seperti konsentrasi lebih tinggi pada cacat kisi. Kebanyakan logam (seperti besi, nikel, cobalt) membentuk titik lebur *eutectic* yang rendah dengan *sulphur*. Temperatur dimana kecepatan korosi sulfidisasi yang tertinggi tergantung pada logam. Kecepatan korosi meningkat seiring dengan peningkatan temperatur hingga mencapai nilai maksimum. Lebih dari itu, dengan peningkatan temperatur akan dihasilkan pengurangan kecepatan korosi.

Reaksi-reaksi

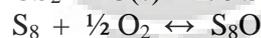
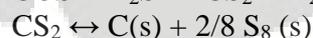
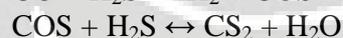
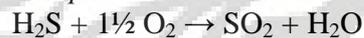
Fuel devolatilisation / "pyrolysis"



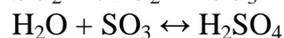
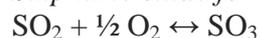
oxidation



Gas phase reactions



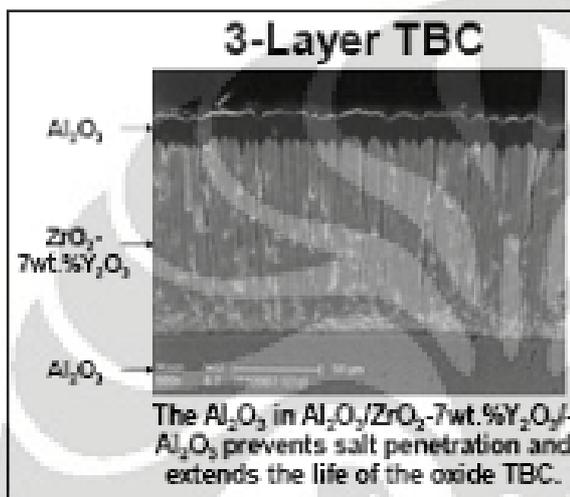
Sulphuric oxide formation



Chromium merupakan elemen paduan yang paling penting dalam menahan *sulfidisasi* (lebih baik 25% atau lebih dalam paduan). Elemen efektif lainnya dalam

memperbaiki ketahanan *sulfidisasi* adalah *silicon*, *cobalt*, *titanium*, dan *aluminium*. Penambahan *nickel* umumnya meningkatkan kerentanan terhadap *sulfidisasi*. Paduan *nickel* yang tinggi terutama sekali rentan terhadap serangan *sulfidisasi*^[15].

II.9 Thermal Barrier Coating



Berfungsi untuk menginsulasi dan melindungi material dari panas.

- 1) Mampu mereduksi temperatur logam dari 50-150°C.
- 2) Terdapat bagian top coat dan bon coat.
- 3) Top coat berfungsi sebagai thermal insulator (dengan material *yttria stabilized zirconia*).
- 4) Bond coat berfungsi sebagai perekat untuk lapisan keramik luar (menggunakan paduan yang kaya akan aluminium).

Gambar 2.13. Lapisan Thermal Barrier Coating

Gambar diakses 28 Juni 2009.

<http://www.indoflyer.net/forum/printable.asp?m=302378>

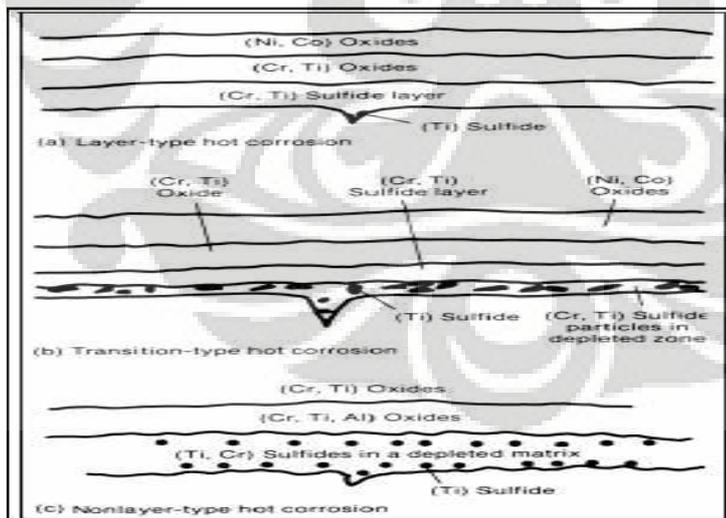
II.10 Efek Kondisi Operasi Temperatur Tinggi

Pada kebanyakan material, sifat mekanik bergantung pada temperatur. Kekuatan material umumnya menurun seiring dengan kenaikan temperatur.

Hot corrosion disebabkan oleh *deposit* garam (terutama sodium sulphate) pada komponen permukaan. *Deposit* mengakibatkan berubahnya potensial termodinamik lingkungan pada permukaan logam dibawah deposit dan akan meningkatkan aktifitas dari *sulphur*, hingga membuat formasi *oxide scale* lebih sulit. Khususnya, pada *hot corrosion* matrix menghabiskan *chromium*, yang diiringi dengan sulfide yang kaya akan chromium. Oleh karena itu ketahanan paduan *hot corrosion* berarti diperbaiki dengan penambahan *chromium*.

Garam kental atau *condensed salts* (komponen major Na_2SO_4 dan/atau K_2SO_4) rupanya dibentuk di dalam proses pembakaran. Sulphur berasal dari bahan bakar dan sodium berasal dari bahan bakar atau udara. Bahkan dalam jumlah yang sangat kecil dari sulphur dan sodium atau potassium dapat menyebabkan masalah korosi. Terdapat dua tipe hot corrosion, tipe non-layer (tipe1) pada temperatur diatas 760°C dan tipe layer (tipe2) dibawah 750°C . diantara kedua tipe tersebut merupakan terdapatnya *hot corrosion* tipe transisi. Tipe 1 hot corrosion memiliki karakteristik interface metal-scale yang halus dan kontinyu, presipitat *uniform-zone* kekosongan berisi partikel *sulfide* dibawah scale. Garam kental seringkali meleleh pada temperatur range temperatur tinggi pembentuk *hot corrosion*. Perbedaan tiga *tipe hot corrosion* dapat dilihat pada gambar dibawah ini. Dan ilustrasi tipikal produk korosi juga dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

Umumnya *hot corrosion* berjalan melalui dua tahap selama periode inkubasi kelajuan korosi lambat, berhubungan dengan pembentukan *oxide scale*. Tahap selanjutnya, protektif (pelindung) lapisan oksida menderita/mengalami *breakdown* deposit yang kaya akan sulphate. Jadi, penyerangan korosi dipercepat, menyebabkan cepatnya material terdegradasi^[4].



Gambar II.12. Skema ilustrasi produk tipikal korosi pada perbedaan tipe-tipe hot corrosion^[15].

Gambar diperoleh dari: Savolainen, Janne, at al, *Materials Selection for High Temperature Applications*. Helsinki University of Technology Department of Mechanical Engineering Laboratory of Engineering Materials Publications, Espoo 2005.

Temperatur tinggi *hot corrosion* menyebabkan penyerangan intergranular, partikel-partikel *sulfide denuded zone* (zona yang tergundulkan/kosong). Selain itu

hingga terjadi kehilangan material (*loss material*). *Hot corrosion* juga memiliki efek negatif yang kuat terhadap sifat mekanik material. Hal ini menurunkan terutama ketahanan *creep* dan *fatik*. *Hot corrosion* dapat dihindari melalui penurunan kuantitas atau jumlah impurities pada *flue gas*, menggunakan seperti material tahan korosi jika mungkin, dan melalui *coating* untuk meningkatkan ketahanan korosi.

Hot corrosion tergantung pada beberapa faktor. Faktor-faktor yang termasuk yaitu komposisi paduan, kondisi fabrikasi, pre-treatment paduan, kecepatan dan komposisi gas, komposisi dan kondisi garam, temperatur dan temperatur siklus, dan geometri specimen. Kelakuan korosi juga sangat dipengaruhi oleh erosi dan efek tegangan mekanik^[15].

II.10 Superalloy

Ciri perpaduan dasar

Paduan ini telah dikembangkan khusus untuk pemakaian temperatur-tinggi dan meliputi besi, kobalt, dan material berbasis nikel, meskipun kini sebagian besar paduan ini berbasis nikel. Paduan ini selama puluhan tahun, seperti pada gambar diatas, menampilkan transisi dalam perkembangan material rekayasa dari komposisi paduan dasar ke proses yang lebih di dominasi oleh pengendalian.

Pada paduan ini, γ' (Ni_3Al) dan γ'' (Ni_3Nb) adalah penguat utama dengan pengerasan-regangan kimia dan pengerasan-regangan koheren. Fasa γ' - Ni_3Al tertata merupakan fasa-kedua kesetimbangan baik dalam system Ni-Al maupun system Ni-Cr-Al dan merupakan fasa metastabil dalam system Ni-Ti dan system Ni-Cr-Ti; γ' hamper sesuai dengan matriks fcc. Kedua fasa ini memiliki parameter kisi yang hamper sama ($\approx 0,25\%$, bergantung pada komposisi) dan koherensi (energi antarmuka $\gamma_1 \approx 10\text{-}20 \text{ nJ m}^2$) menimbulkan laju pengasaran presipitat yang sangat rendah sehingga paduan mengalami penuaan-lewat sangat lambat meskipun temperature mencapai $0,7T_m$. Pada paduan yang mengandung Nb, terdapat fasa Ni_3Nb yang metastabil, tetapi meski tertata dan koheren, Ni_3Nb kurang stabil dibandingkan dengan γ' pada temperatur tinggi.

Sumber penguatan lain adalah pengerasan larutan-padat; Cr merupakan elemen utama, Co dapat ditambahkan hingga 20% dan Mo, W, dan Ta ditambahkan hingga mencapai 15%. Elemen tersebut juga larut dalam γ' sehingga efek pengerasan naik dua kali lipat. Penambahan Cr, sama halnya dengan Co, juga meningkatkan solvus γ' dan menurunkan energi salah-susun.

Pada pemakaian temperatur-tinggi, sifat batas butir sama pentingnya dengan penguatan oleh γ' dalam butir. Penguatan batas butir terutama terjadi karena presipitasi krom karbida dan karbida logam tahan api; penambahan sedikit Zr dan B memperbaiki morfologi dan stabilitas karbida tersebut. Sifat optimum dikembangkan

Pengaruh	Cr	Al	Ti	Co	Mo	W	B	Zr	C	Nb	Hf	Ta
Penguatan matriks	✓			✓	✓	✓						
Pembentuk- γ'		✓	✓							✓		✓
Pembentuk-karbida	✓		✓		✓	✓				✓	✓	✓
Penguatan batas butir							✓	✓	✓		✓	
Pembentuk kerak oksida	✓	✓										

Tabel II.1. Efek berbagai elemen paduan terhadap superalloy^[4].

melalui perlakuan panas tahap-ganda; tahap intermediate menghasilkan mikrostruktur batas butir yang terdiri dari partikel karbida yang diselubungi lapisan tipis γ' sesuai keinginan, dan tahap lainnya menghasilkan dua rentang ukuran γ' sehingga diperoleh kombinasi terbaik dari kekuatan pada temperatur intermediat maupun temperatur tinggi. Pada tabel diatas dapat diketahui efek berbagai elemen paduan.

Beberapa paduan berbasis-nikel memiliki kecenderungan untuk membentuk fasa- σ yang bersifat menggetaskan (berdasarkan komposisi FeCr) setelah pemakaian untuk kurun waktu lama. Komposisi mengalami perubahan dan unsure Ni yang menghambat pembentukan- σ digantikan unsure Cr, Mo, atau W yang mendorong pembentukan- σ . Kecenderungan ini telah diprediksi pada saat disain paduan; dengan teknik yang disebut Phacomp (komputasi fasa) berdasarkan *model pauling* mengenai *hibridisasi* elektron-3d dalam logam transisi. Sebagian orbital 3d membentuk hibrida dengan orbital p dan s serta membentuk ikatan metalik, sisanya membentuk orbital

tanpa-ikatan untuk mengisi sebagian lubang elektron dalam kulit- d , dan bertambah sesuai dengan seri transisi sehingga menghasilkan bilangan lubang elektron N_v untuk Cr(4,66), Mn(3,66), Fe(3,66), Co(1,71), dan Ni(0,66). Komputasi menunjukkan bahwa hubungan fasa γ/σ bergantung pada bilangan lubang rata-rata \bar{N}_v sesuai dengan:

$$\bar{N}_v = \sum_{i=1}^n m_i (N_v)_i$$

Dimana m_i adalah fraksi atomic elemen ke- i dari bilangan lubang electron N_v dan n adalah jumlah elemen dalam paduan. Limit stabilitas fasa- γ dicapai pada $\bar{N}_v \approx 2,5^{[4]}$.

Pengembangan superalloy berbasis Nikel

Penerapan utama superalloy adalah sebagai material turbin, mesin jet, meliputi cakram dan sudu. Semula cakram dibuat dari paduan *Inco 718* dan *Inco 901* dengan pengecoran ingot konvensional yaitu pengecoran ingot, billet tempa, dan cakram tempa. Paduan ini dikembangkan dari baja austenitik, yang masih dipakai untuk turbin industri, tetapi kemudian, dengan meningkatnya persyaratan kekuatan dan temperatur, digantikan oleh *Waspaloy* dan *Astroloy*. Paduan ini adalah paduan sudu turbin dengan perlakuan-panas untuk cakram yang telah disesuaikan dengan kebutuhan. Tetapi, material sudu didesain untuk menghadapi *creep*, sedangkan material cakram harus memiliki kekuatan tarik dikombinasikan dengan umur fatik-siklus-rendah untuk menghadapi perubahan tegangan selama siklus penerbangan. Untuk memenuhi persyaratan ini, *Waspaloy* diproses secara termomekanik (TMP) sehingga didapatkan butir ukuran-halus dan peningkatan kekuatan tarik sebesar 40%. Kekuatan tarik lebih-tinggi dibandingkan material sudu, tetapi terjadi penurunan ketahanan terhadap *creep*. Perbaikan sejenis untuk cakram diterapkan terhadap *Inco 901* dengan TMP. Paduan cakram berbasis-nikel lebih-tinggi mempunyai kekurangan berupa segregasi ingot berlebihan sehingga menyulitkan pengendalian ukuran butir. Pengembangan selanjutnya meliputi paduan yang diproses dengan metalurgi-serbuk. Serbuk dibuat dengan atomisasi gas dari aliran logam cair dalam lingkungan gas argon, disusul konsolidasi serbuk dengan HIP hingga mendekati bentuk yang diinginkan. Produk ini kurang tahan terhadap aplikasi tegangan Karena inklusi dalam

serbuk, sehingga, untuk memperoleh manfaat maksimum dari proses ini harus diproduksi material “ekstra bersih” dengan pelelehan berkas elektron atau pelelehan plasma.

Peningkatan mutu material turbin mula-mula dilakukan dengan menambah fraksi volume γ' dan mengubah *Nimonic 80A* menjadi *Nimonic 115*. Disayangkan, bahwa peningkatan (Ti + Al) justru menurunkan titik leleh, sehingga memperkecil rentang tempa dan mempersulit pemrosesan. Untuk memperbaiki kinerja oksidasi temperatur tinggi dan korosi temperatur-tinggi ditambahkan aluminida dan lapisan pelindung dan akhirnya berhasil dikembangkan *IN 738* dan *IN 939* dengan kekuatan korosi-panas yang lebih baik.

Peningkatan superalloy selanjutnya bergantung pada rute manufaktur alternatif, khususnya dengan menggunakan teknologi pengecoran mutakhir. Mula-mula pengecoran vakum diterapkan untuk mempertahankan kadar Ti dan Al yang tinggi tanpa penyusutan akibat oksidasi. Dengan (Ti + Al) sebesar 9-11%, dihasilkan fraksi volume γ' sebesar 70% dalam *IN 100 (Nimocast PK24)* yang tidak memerlukan penguatan larutan-padat tambahan sehingga tercapai pengurangan kerapatan.

Penambahan elemen dengan titik leleh tinggi seperti W meningkatkan kemampuan temperatur-tinggi akan tetapi merugikan dari segi kerapatan. *M200* mengandung 12%W dan 1%Nb tetapi sekitar 760°C keuletannya terbatas, dengan menambahkan *hafnium* keuletan dapat ditingkatkan. Keuletan yang lebih baik dan penurunan porositas yang cukup berarti terjadi akibat penambahan Hf. Oleh karena itu, Hf ditambahkan pada paduan lain (seperti: *Mar 001 (IN 100 + Hf)* dan *Mar 004 (IN 713 + Hf)* dan *M 002* yang mengandung 10%W, 2,5%Ta, dan 1,5%Hf).

Kegagalan *creep* diketahui berawal dibatas butir transvers, oleh karena itu, wajar apabila dilakukan usaha untuk menghilangkannya dalam sudu turbin demi meningkatkan kinerja. Hal ini dicapai dengan teknologi solidifikasi-terarah (DS), dalam hasil cor diperoleh butir kolumnar dengan arah sesuai arah pertumbuhan tanpa batas butir yang tegak lurus arah pertumbuhan. Dengan memasukkan pembatas geometri dalam cetakan atau dengan memanfaatkan kristal-benih, batas butir dapat dihilangkan sama sekali dan dihasilkan sudu berbentuk kristal tunggal.

Dengan tereliminasi batasan butir dengan sendirinya, pada superalloy tidak perlu ditambahkan elemen penguat seperti C, B, Zr, dan Hf. Tanpa elemen tambahan ini titik leleh meningkat sehingga dapat diterapkan perlakuan-panas pelarutan pada temperatur yang lebih tinggi yang mampu memperbaiki homogenitas komposisi kimia dan distribusi presipitat γ' yang lebih merata. Namun, yang perlu diperhatikan adalah pengendalian pertumbuhan dalam arah [100]. Penyebaran [100] dengan sumbu sudu menghasilkan *creep* intrinsic tinggi sehingga tegangan termal akibat gradien temperatur pada penampang sudu dapat dikurangi^[4].

	λ W/mK	T_{max} °C	T_m °C	σ_{ys} MPa	K_{IC} MPa \sqrt{m}	Price €/kg
Steels						
AISI 316L	13-17	750-925	1375-1400	170-310	112-278	3-5
AISI 310	11-16	1050-1150	1400-1500	205-310	117-228	5-7
AISI 446	19-23	1075-1175	1425-1510	275-350	72-122	2-4
Superalloys						
Inconel 625	9.9-10.7	882-982	1290-1350	365-434	120-150	15-23
Hastelloy X	9.1-27.2	1050-1200	1260-1355	320-400	120-150	10-21
Ceramics						
SiC	76.9-83.2	1500-1650	2300-2500	570-630	3-3.5	10-15
Si ₃ N ₄	31.7-34.3	1080-1230	2390-2500	952-1050	4.8-5.3	26-40
Al ₂ O ₃	18-20.5	1465-1535	2000-2100	330-350	3.33-3.67	7-11
Composites						
Al ₂ O ₃ matrix	16.3-29	1435-1845	2000-2100	480-798	2.9-5.4	37-75
C matrix	10-87	2000-2100	3200-3500	17-247	5.7-6.3	150-170

λ = thermal conductivity

T_{max} = maximum service temperature

T_m = melting range

σ_{ys} = yield strength (modulus of rupture is used for ceramics and composites)

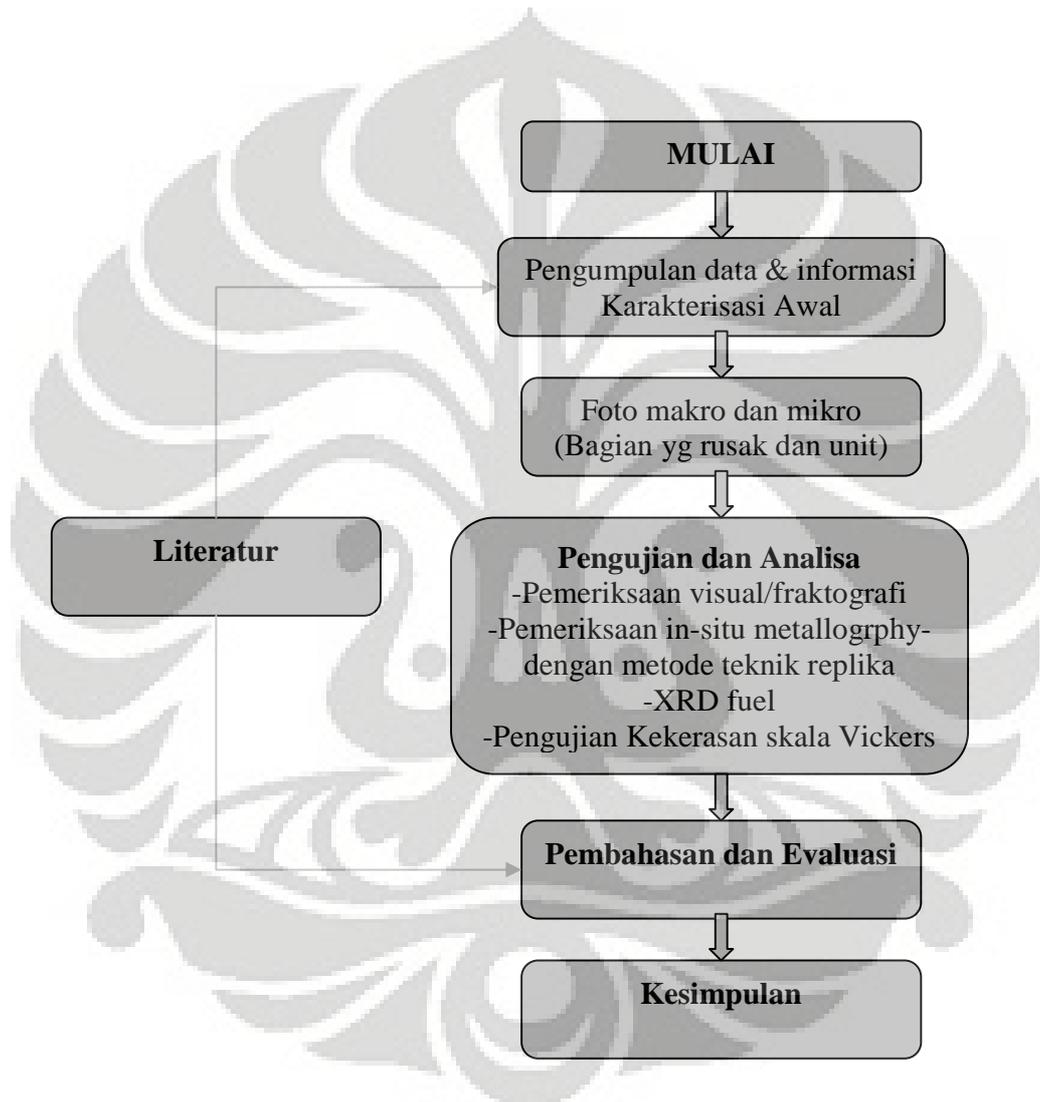
K_{IC} = fracture toughness

Tabel II.2. Properties pemilihan material temperatur tinggi.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Garis Besar Penelitian



III.2 Alat dan Bahan

Peralatan Dan Bahan Yang Digunakan^[8]:

- 1.Peralatan Grinding dan Polishing
- 2.Mikroskop Optik dan Kamera Digital
- 3.Equotip Hardness Tester
- 4.Bahan habis pakai seperti: kertas amplas dengan berbagai ukuran,diamant pasta dan bahan kimia untuk etsa;

Aqua regia : HCl 37% = 25 ml

HNO₃ 65% = 5 ml

Kalling Reagent : CuCl₂.2H₂O = 5 gr

HCl 37% = 40 ml

Aquades = 30 ml

III.3Prosedur Penelitian

III.3.1Pengumpulan Data dan Informasi

Pengumpulan data dan informasi yang diperlukan dilakukan dengan peninjauan langsung ke lapangan, berkonsultasi dengan pembimbing kami yang juga bertugas di bagian Penelitian dan Pengembangan PLN Duren Tiga, serta pengumpulan arsip-arsip yang dibutuhkan. Selain itu, informasi juga dikumpulkan dari hasil studi literatur.

III.3.2 Pengamatan Visual

Tahapan ini dilakukan dengan mengamati seluruh permukaan pada *transition piece* atau *mixing chamber* yang mengalami kerusakan. Selanjutnya, untuk menunjang hasil pengamatan dilakukan pemotretan. Adapun pengamatan visual ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kondisi-kondisi yang sebenarnya dari *mixing chamber* yang mengalami kerusakan.

III.3.3 Pengujian Kekerasan

Kekerasan mikro dari material yang telah direplika akan memberikan gambaran kesesuaian dari material yang digunakan dengan standardnya. Hasilnya akan digunakan untuk menganalisa dari kegagalan turbin gas pada *mixing chamber* dan bagian lainnya.

III.3.4 Pengujian foto mikro dan makro

Foto makro memberikan gambaran yang jelas daerah terjadinya kegagalan pada daerah *hot gas path* sedangkan foto mikro memberikan gambaran mikrostruktur terhadap proses yang dialaminya selama operasional turbin gas dilakukan.

III.3.5 Pengujian Komposisi Kimia Deposit

Komposisi kimia yang akan diuji pada material bertujuan untuk mengetahui kandungan kimia deposit yang terdapat pada *mixing chamber*.

III.3.6 Pengujian XRD fuel

Pengujian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui kandungan atau senyawa-senyawa yang terdapat pada deposit bahan bakar treated.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 Hasil Pengujian

IV.1.1 Spesifikasi Material

Dari data yang diperoleh spesifikasi material yang digunakan pada *mixing chamber* yaitu 17Mn4. Berdasarkan literatur yang diperoleh material 17Mn4 memiliki *equivalent* dengan material A516 grade 65. Oleh karena itu, material A516 grade 65 dapat dijadikan sebagai acuan literatur spesifikasi material

Spesifikasi material pada penelitian ini yaitu A 516 grade 65^[16]

	A516 Grade 60	A 516 Grade 65	A16 Grade 70
Tensile Strength (ksi)	60-80	65-85	70-90
Tensile Strength (MPa)	415-550	450-585	485-620
Yield Strength (ksi)	32	35	38
Yield Strength (MPa)	220	240	260
Elongation in 200mm (%)	21	19	17
Elongation in 50mm (%)	25	23	21
Max Thickness (mm)	205	205	205

	Composition (%)		
	A516 Grade 60	A 516 Grade 65	A16 Grade 70
Carbon (C) (Max)			
< 12.5mm Thick	0.21	0.24	0.27

> 12.5mm - < 50mm Thick	0.23	0.26	0.28
> 50mm - = 100mm Thick	0.25	0.28	0.30
> 100mm - < 200mm Thick	0.27	0.29	0.31
> 200mm Thick	0.27	0.29	0.31
Manganese (Mn)			
< 12.5mm Thick			
Heat Analysis	0.6-0.9	0.85-1.2	0.85-1.2
Product Analysis	0.55-0.98	0.79-1.3	0.79-1.3
> 12.5mm Thick			
Heat Analysis	0.85-1.2	0.85-1.2	0.85-1.2
Product Analysis	0.79-1.3	0.79-1.3	0.79-1.3
Phosphorous (P)(max)			
	0.035	0.035	0.035
Sulphur (S) (max)			
	0.035	0.035	0.035
Silicon (Si)			
Heat Analysis	0.15-0.4	0.15-0.4	0.15-0.4
Product Analysis	0.13-0.45	0.13-0.45	0.13-0.45

Tabel IV.1 spesifikasi material A516 grade 65

IV.1.2 Hasil Pengujian Kekerasan Skala Vickers

Hasil pemeriksaan disajikan dalam tabel berikut:

No	Lokasi	Kekerasan (HV)	Struktur mikro
GT 42 CC1 (sisi kiri)			
1	<i>Mixing chamber</i> (lokasi 1)	137, 137, 135	berupa Austenite dengan butir karbida menyebar merata pada butiran, kondisi stadium B
2	<i>Mixing chamber</i> (lokasi 2)	145, 143, 142,	berupa Austenite dengan butir karbida menyebar merata pada butiran, kondisi stadium B

GT 42 CC2 (sisi kanan)			
3	<i>Mixing chamber</i> (lokasi 1)	152, 156, 153	berupa Austenite dengan butir karbida menyebar merata pada butiran terjadi korosi piting, kondisi stadium B normal
4	<i>Mixing chamber</i> (lokasi 2)	143, 140, 137	berupa Austenite dengan bentuk retak intergranular, kondisi material stadium B

(tabel IV.2 Hasil Pengujian Kekerasan skala Vickers^[8])

IV.1.3 Hasil Pengujian Struktur Mikro



Gambar IV.1

Pengambilan struktur mikro pada *mixing chamber* (Lokasi 1)^[8].



Gambar IV.2

Struktur mikro berupa Austenite dengan butir chrome carbide, ditemukan adanya cacat akibat korosi piting pada butiran, etsa Aqua regia perbesaran 200X^[8]



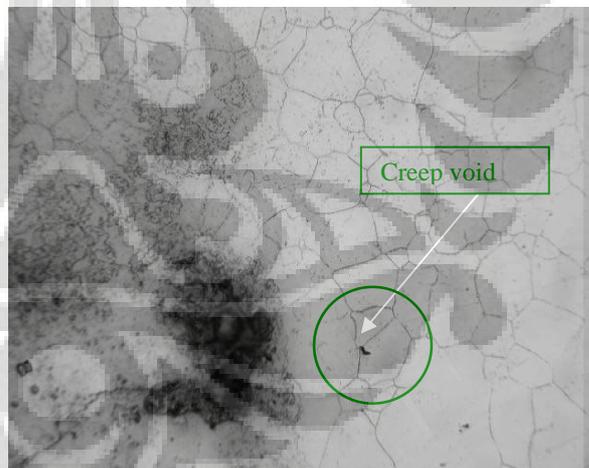
Gambar IV.3
Pengambilan struktur mikro pada *mixing chamber* (Lokasi 2)^[8].



Gambar IV.4
Struktur mikro berupa Austenite dengan butir chrome carbide, tidak ditemukan adanya void, *creep* atau cacat lainnya, etsa Aqua regia perbesaran 200X^[8]



Gambar IV.5
Pengambilan struktur mikro pada *CMixing chamber* sisi kanan (Lokasi 1)^[8].

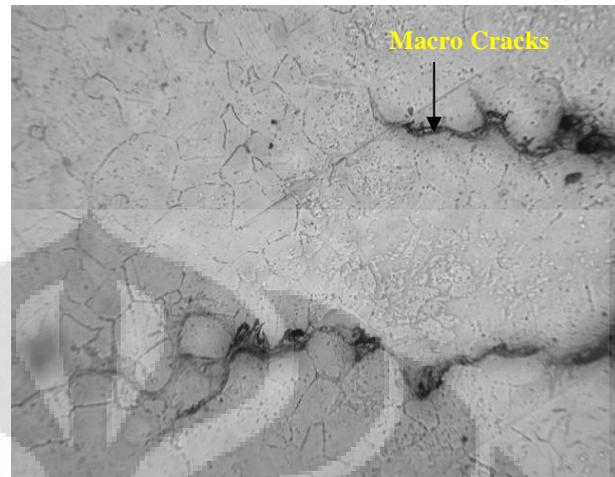


Gambar IV.6
Struktur mikro berupa Austenite dengan butir chrome carbide, ditemukan adanya cacat akibat korosi piting, etsa aqua regia perbesaran 200X^[8]



Gambar IV.7

Pengambilan struktur mikro pada *mixing chamber* (Lokasi 2) dekat Circume Weld - Air Cooler.^[8]



Gambar IV.8

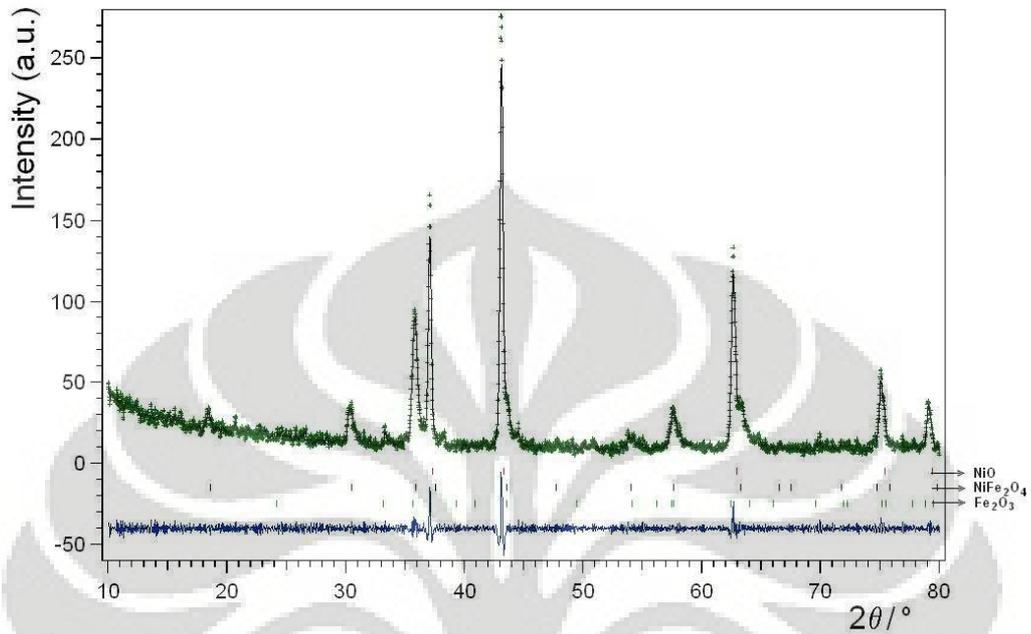
Struktur mikro daerah retak pada *Mixing chamber* berupa Austenite dengan retak intergranular, etsa Aqua regia perbesaran 100X^[8]



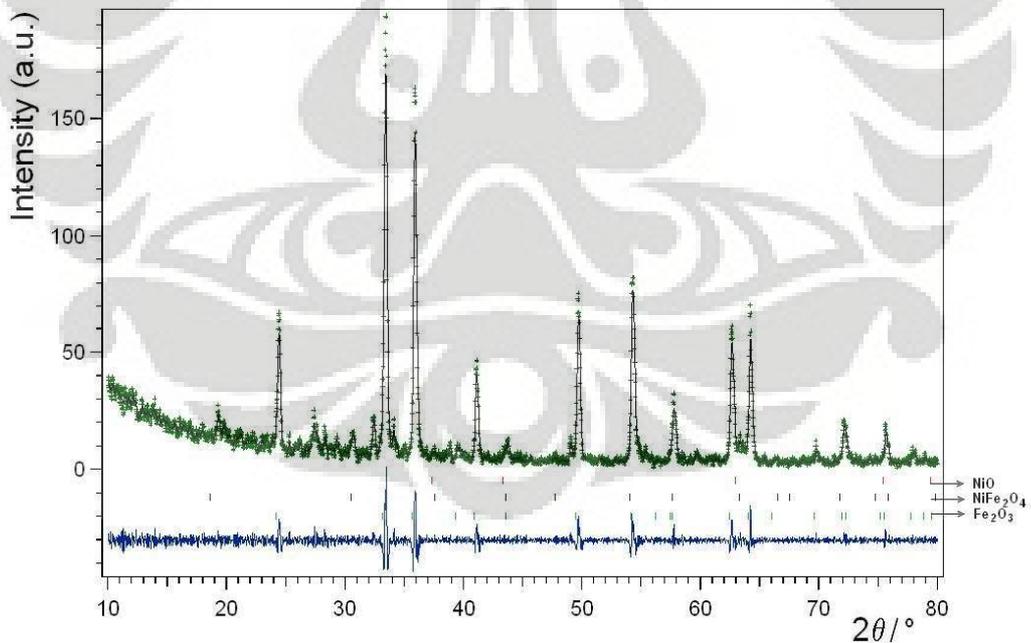
Gambar IV.9

Struktur mikro lokasi 2 pada daerah normal berupa Austenite dengan butir chrome carbide, etsa Aqua regia perbesaran 500X^[8]

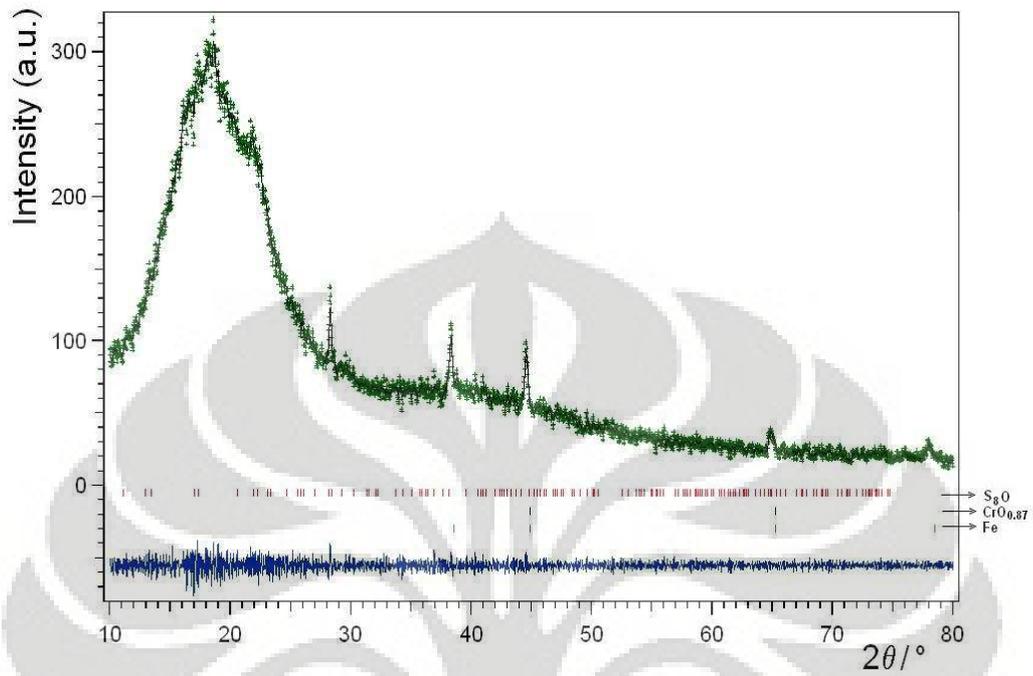
IV.1.4 Hasil Pemeriksaan XRD



Grafik IV.1 Hasil pemeriksaan XRD pada deposit GT 4.2 berupa senyawa NiO, NiFe_2O_4 , dan Fe_2O_3



Grafik IV.2 Hasil pemeriksaan XRD pada deposit GT 4.2 berupa senyawa NiO, NiFe_2O_4 , dan Fe_2O_3



Grafik IV.3 Hasil pemeriksaan XRD GT 4.2 pada deposit bahan bakar treated berupa senyawa S_8O , $CrO_{0.87}$ dan Fe

IV.1.5 Hasil Analisa kandungan unsur kimia pada deposit dengan metoda XRF

No.	Deposit	Fasa	Fraksi Massa (%)
1	HSD Treated	Amorphus Sulfur Oxide (S8O)	90,12
		Chromoiium Oxide (CrO0,87)	9,02
		Iron (Fe)	< 1
2	HSD Untreated	Amorphus Sulfur Oxide (S8O)	90,34
		Chromoiium Oxide (CrO0,87)	8,90
		Iron (Fe)	< 1
3	GT 3.1	Nikel Oxide (NiO)	75,39
		Nikel Iron Oxide (NiFe2O4)	19,54
		Iron Oxide (Fe2O3)	5,07
4	GT 3.2	Nikel Oxide (NiO)	76,08
		Nikel Iron Oxide (NiFe2O4)	16,39
		Iron Oxide (Fe2O3)	7,53
5	GT 3.3	Nikel Oxide (NiO)	79,48
		Nikel Iron Oxide (NiFe2O4)	12,52
		Iron Oxide (Fe2O3)	8,00
6.	GT 4.2	Nikel Oxide (NiO)	63,46
		Nikel Iron Oxide (NiFe2O4)	33,71
		Iron Oxide (Fe2O3)	2,84
7.	GT 4.3	Nikel Oxide (NiO)	73,63
		Nikel Iron Oxide (NiFe2O4)	18,84
		Iron Oxide (Fe2O3)	7,54

(Tabel IV.3 Hasil Analisa kandungan unsur kimia pada deposit dengan metoda XRF)

IV.2 Pembahasan

IV.2.1 Mekanisme Kegagalan dan Nilai Kekerasan

Terdapat empat faktor yang dapat menyebabkan kegagalan *creep* pada *mixing chamber* turbin gas yaitu: 1) temperatur, 2) stress, 3) start-stop, dan 4) bahan bakar. Kegagalan *Creep Void* terjadi karena adanya temperatur yang tinggi. Sedangkan kegagalan *Creep Cavities* terjadinya karena beban stress yang diberikan terlalu tinggi. Hal ini dikarenakan banyaknya jumlah start-stop yang dilakukan. Awalnya *Creep* terjadi karena gagalnya lapisan *Thermal Barrier Coating* pada *mixing chamber*. Sehingga gagalnya lapisan *Thermal Barrier Coating* berakibat pada naiknya beban temperatur yang dialami base material *mixing chamber* dan juga akan mengakibatkan kenaikan beban stress yang dialami base material *mixing chamber*. Hal ini juga dapat terjadi karena adanya proses sulfidisasi yang dapat mempercepat kegagalan *creep*. Kegagalan material ini juga dikarenakan material dasar yang digunakan hanya mampu tahan pada temperatur 550-6000C. Sedangkan material ini dioperasikan pada temperatur 600-8000C.

Bagian yang mengalami kegagalan memiliki nilai rata-rata kekerasan sebesar 140 VHN. Sedangkan pada bagian yang tidak mengalami kegagalan memiliki nilai rata-rata kekerasan sebesar 154 VHN. Dengan demikian, terdapat perbedaan nilai kekerasan antara bagian yang mengalami kegagalan dan tidak mengalami kegagalan (dapat dilihat pada tabel IV.1). Perubahan nilai kekerasan di bagian dekat yang gagal disebabkan bagian permukaan ini terjadi *super heat location* atau terjadi temperatur yang lebih panas dibandingkan permukaan lainnya. Hal ini dikarenakan adanya scale atau deposit pada bagian tersebut. Kemudian deposit tersebut mempunyai sifat konduktivitas panas yang rendah, tetapi mengakibatkan temperatur lebih tinggi dibanding posisi di bagian lain. Sehingga di bagian permukaan ini terlebih dahulu terserang kegagalan *creep*. Hal ini mengakibatkan percepatan pelunakan (*aging accelerated*) dibagian yang gagal. Hal ini terbukti dengan nilai kekerasan yang lebih rendah pada bagian yang mengalami kegagalan.

IV.2.2 Pengujian Strukturmikro

Hasil pemeriksaan struktur mikro untuk bagian *rupture* atau gagal tampak bintik bintik berwarna hitam, bintik hitam tersebut yaitu *cavity* atau rongga. Rongga ini terjadi akibat fenomena *creep*, dimana *mixing chamber* akibat dibebani tekanan dan temperatur yang tinggi dengan waktu yang lama. Apabila keadaan *creep* berlangsung lama, *micro cavity* semakin banyak dan bergabung menjadi *cavity* yang besar. Hal ini menjadi awal untuk terjadinya *failure* atau gagal.

Indikasi terjadinya *creep* dapat terlihat dari struktur mikro pada gambar IV.6 yaitu terdapatnya void. *Mechanic force* utama terjadinya *Creep Void* yaitu dari tingginya temperatur.

Kegagalan *Mixing chamber* ini dikarenakan tidak sesuainya antara temperatur yang terjadi dengan ketahanan temperatur penggunaan spesifikasi material *mixing chamber*. Spesifikasi material yang digunakan A516 gr 65. Terjadinya *Overheating* merupakan penyebab kegagalan *mixing chamber*. Dimana *Overheating* adalah terjadinya pemanasan disuatu lokasi dengan temperatur yang sangat tinggi, bisa mencapai ratusan derajat diatas normal, sehingga memicu terjadinya deformasi, atau peluluhan (*yielding*). Faktor terbentuknya *overheating* adalah lapisan oksida pada bagian permukaan komponen sehingga akan mempengaruhi panas pada bagian tersebut sehingga bagian ini memiliki temperatur yang lebih tinggi. Lapisan oksida tersebut merupakan lapisan yang sangat korosif. Adanya lapisan oksida pada komponen *mixing chamber* ini dapat dilihat pada tabel IV.2.

Kegagalan *creep* pada komponen *mixing chamber* ini merupakan kegagalan jenis *creep cavities* yaitu dengan adanya *intergranular cracking*. Hal ini dapat terlihat pada gambar IV.8.

IV.2.3 Hasil Pemeriksaan XRD

Terdapat adanya proses *sulfidisasi* pada komponen *mixing chamber*. Pada Hasil pemeriksaan XRD pada deposit bahan bakar treated (dapat dilihat pada grafik IV.3). Diketahui adanya senyawa S_8O $CrO_{0,87}$ dan Fe. Berdasarkan Literatur senyawa S_8O atau unsur *sulphur* dapat mengakibatkan penurunan ketahanan *creep* dimana sulphur ini berasal dari bahan bakar solar yang digunakan selama pengoperasian *mixing chamber*.

IV.2.4 Hasil Analisa kandungan unsur kimia pada deposit dengan metoda XRF

Pada tabel IV.2 Terdapat adanya fasa: *Amorphus Sulfur Oxide* (S_8O), *Chromium Oxide* ($CrO_{0,87}$), *Iron* (Fe) dengan fraksi massa berturut-turut 90,12% , 9,02% , <1%. Dengan demikian mengindikasikan adanya unsur sulphur dalam komponen *mixing chamber*. Mengenai adanya *Chromium Oxide*, mengindikasikan pengujian yang dilakukan dengan metode XRF merupakan pada lapisan coating TBC. Dimana Lapisan TBC terdiri dari: Lapisan dalam (*metallic bond coat*) dengan material MCrAlY dan lapisan luar (*top coat*) dengan material *yttria stabilized zirconia* dimana unsur Cr pada MCrAlY mengalami perubahan menjadi *Chromium Oxide*.

BAB V

KESIMPULAN

Kesimpulan

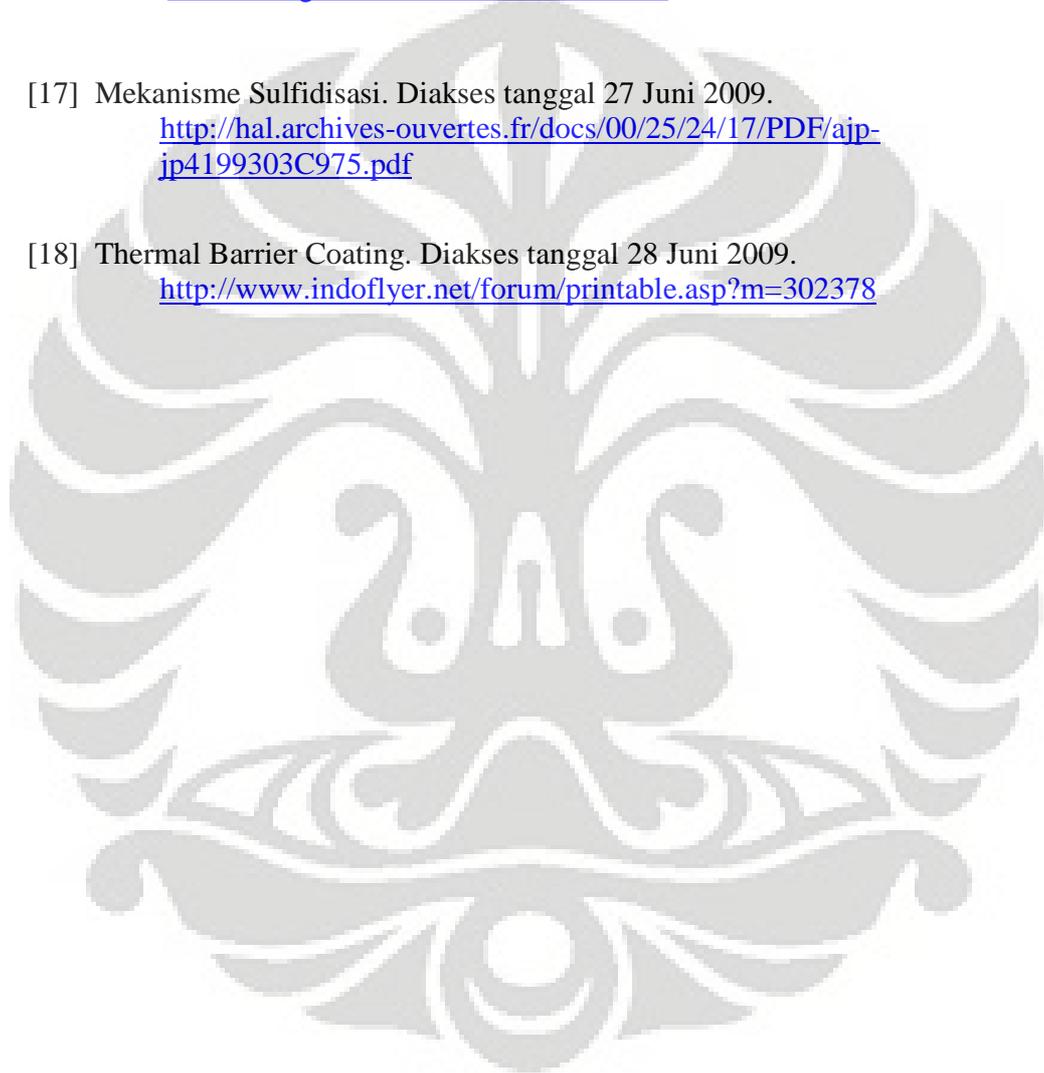
Dari pengujian, studi literatur, dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan berikut ini:

- 1) Pada material *mixing chamber* A516 grade 65 terdapat adanya indikasi *creep*.
- 2) Jenis *creep* yang terjadi yaitu *creep cavities*, ini bercirikan dengan adanya *intergranular cracking*
- 3) Kegagalan terjadinya *creep* disebabkan adanya *overheating* dan terdapat adanya proses *sulfidisasi* pada komponen *mixing chamber*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R Vismanathan, *Damage Mechanism and Life Assesment of High Temperature Components* (Ohio:ASM International, 1995)
- [2] ASM Metals Handbook Volume 9. *Metallography and Microstructure*. Ohio:ASM International, 1986.
- [3] Callister, William D, *Materials Science and Engineering an Introduction* (New-York: John Willey and Sons, 2003)
- [4] Smallman, Bishop, *Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material*. Jakarta: Erlangga, 1999.
- [5] Evans, Wilshire, *Introduction Creep*. The Institute of Materials Carlton House Terrace London SWIY 5DB, 1993.
- [6] Elihu, Bradley F, Ohio 44073, *Superalloys a Technical Guide*, USA: ASM-International Metal Park, OH 44073, 1989.
- [7] Wiranto, Arismunandar. *Penggerak Mula Turbin*. Bandung: Penerbit: ITB, 2004.
- [8] Sugiarto, *Laporan In-situ Metalografi*. Jakarta, 2008.
- [9] Zulfia, Anne. *Creep dan Fatigue*. Departemen Metalurgi dan Material, 2008.
- [10] Gas Turbin. Komponen Utama Gas Turbin. Diakses tanggal 12 Maret 2009.
: http://www.ccitonline.com/mekanikal/tiki-print_article.php?articleId=11
- [11] Prinsip operasi, tata letak, dan skema PLTG. Diakses tanggal 12 Maret 2009.
: <http://www.ccitonline.com/mekanikal/tiki-index.php?page=PLTG>
- [12] Transition Piece for Gas Turbine. Diakses tanggal 6 Juni 2009.
: <http://www.freshpatents.com/Transition-piece-for-gas-turbine-dt20070215ptan20070033941.php>
- [13] Klasifikasi dan siklus-siklus turbin gas. Diakses tanggal 12 Maret 2009.
: <http://majarimagazine.com/2009/02/gas-turbine-engine-part-1>
- [14] Udomphol, Tapany, *Creep and Stress Rupture*. Suranaree University of Technology. May-Aug 2007.

- [15] Savolainen, Janne, et al, *Materials Selection for High Temperature Applications*. Helsinki University of Technology Department of Mechanical Engineering Laboratory of Engineering Materials Publications, Espoo 2005.
- [16] Material A516. Diakses tanggal 15 Juni 2009.
<http://www.google.co.id/search?hl=id&q=max+service++temperature++use+A516+gr+65&btnG=Telusuri&meta=>
- [17] Mekanisme Sulfidisasi. Diakses tanggal 27 Juni 2009.
<http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/25/24/17/PDF/ajp-4199303C975.pdf>
- [18] Thermal Barrier Coating. Diakses tanggal 28 Juni 2009.
<http://www.indoflyer.net/forum/printable.asp?m=302378>



LAMPIRAN 1

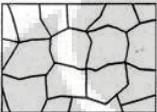
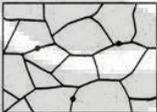
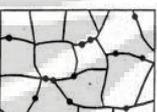
Spesifikasi Material

Spesifikasi Turbinenanlage <i>Specification Turbine Plant</i>		QST - GT V 94.2	Revision: 09	Blatt: 25 / 28 Page:
siehe Deckblatt see cover page		GT-Nr.: GT-No.:	800 486	
Qualitätsprüfblatt Quality Test Sheet		Q - Blatt Nr.: Q - Sheet No.:	800 486	GT.00.002.41
Brennkammer Combustion chamber Bleche Plates		Werkstoff: Material:		
intern dokumentierte Prüfung internal documented examination Stichprobe Spot check Protokoll Record Nachweis der Prüfung auf Arbeitsplan Performance of test confirmed of route chart Teilnahme SPG beim Lieferanten Participation SPG at supplier		16Mo3 / 17Mn4		
		Prüfung durchgeführt durch Examination performed by SIEMENS PG		
		Eingangskontrolle Entry inspection Fertigungskontrolle Process inspection Werkmontage Assembly in factory		
		Hersteller Manufacturer Dokumentation für Kunden Documentation for customer		

LAMPIRAN 2

Klasifikasi Cavities

Cavitation Damages Classification

	A	Clear	None
	B	Isolated Cavitations	Re-inspection after approx. 20.000 service hour
	C	Oriented Cavitations	Re-inspection after approx. 15.000 service hour
	D	Microcrack < 2 μm (NDE Non-Detectable)	Re-inspection after approx. 10.000 service hour
	E	Macrocrack > 2 μm (NDE Detectable)	Management must be informed immediately. Grinding to determine crack depth

LAMPIRAN 3

Daftar Pabrik Pembuat Turbin gas

Pabrik pembuat	Days MW	Putaran rpm	Bahan bakar	Perbandingan tekanan	Gas buang		Efisiensi termal, %	Keterangan	
					Laju aliran, kg/s	Temperatur C			
Roven Ltd. IS/60	60 hp	-	Dist. Oil	-	-	-	580	9,6	
Kawasaki Heavy Industries S1A -01	256 hp	1800	Dist. Oil	8	-	-	-	-	
Hiperno Suiza THM 11 02	3,90	7200		6,5	28	500		28	Tanpa regenerator
THM 1102 R	3,60	7200		6,5	28	510		36	Dengan regenerator
Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd. SB 30 C	5,4	9410		6,9	26	583		25	Tanpa regenerator
CB 30 C	7,5	9410		6,9	26	-		35	Siklus gabungan
FB 30 C	4,85	9410		6,9	26	-		33	Dengan regenerator
Orenda Industrial Gas Turbine OT - 270	8,415	7500		5,9	50	549		22	Tanpa regenerator
OT - 270	8,131	7500		5,9	50	320		33	Dengan regenerator
General Electric Company G 3142	10,2	6500	Dist. & Gas	7,1	52	526		25	
John Brown Engineering Gas Turbines Ltd. LM 2500	20,1	3000	Gas	18	65	499		36	
USSR, Energo Machine Eksperto GTN - 25 NZL	25	3900	-	12,5	175	386		22	
Rols - Royce Ltd. SK 55	48,5	3000	Gas	13	191	532		23	
BEC Brown Boveri & Co. Ltd. N ₂ 720	61,0	3000	N ₂	7	-	-		52	Siklus tertutup
Mitsubishi Heavy Industries MW 501 AA	63,9	3600	Gas	11	341	435		29	
Fiat Termomecanica Nucleare & Turbogas TG 50 LI	92,6	3000	Gas	12	393	505		23	
Stal - Laval Turbin AB GT 200	75	3000	Oil	16	350	454		33	
GASTEAM 250	227	3000	Oil	16	700	454		46	Siklus gabungan : 1 GT 200, 1 turbin uap, 1 Ketel gas buang
Westinghouse Electric Corp. W 1101 G	88,4	3000	Oil	12	369	538		30	
PACE 380	382,5	-	Oil	-	-	-		40	Siklus gabungan
Curtis Wright Corp. TEC 400	400	3000	-	18	1238	141		43	Siklus gabungan

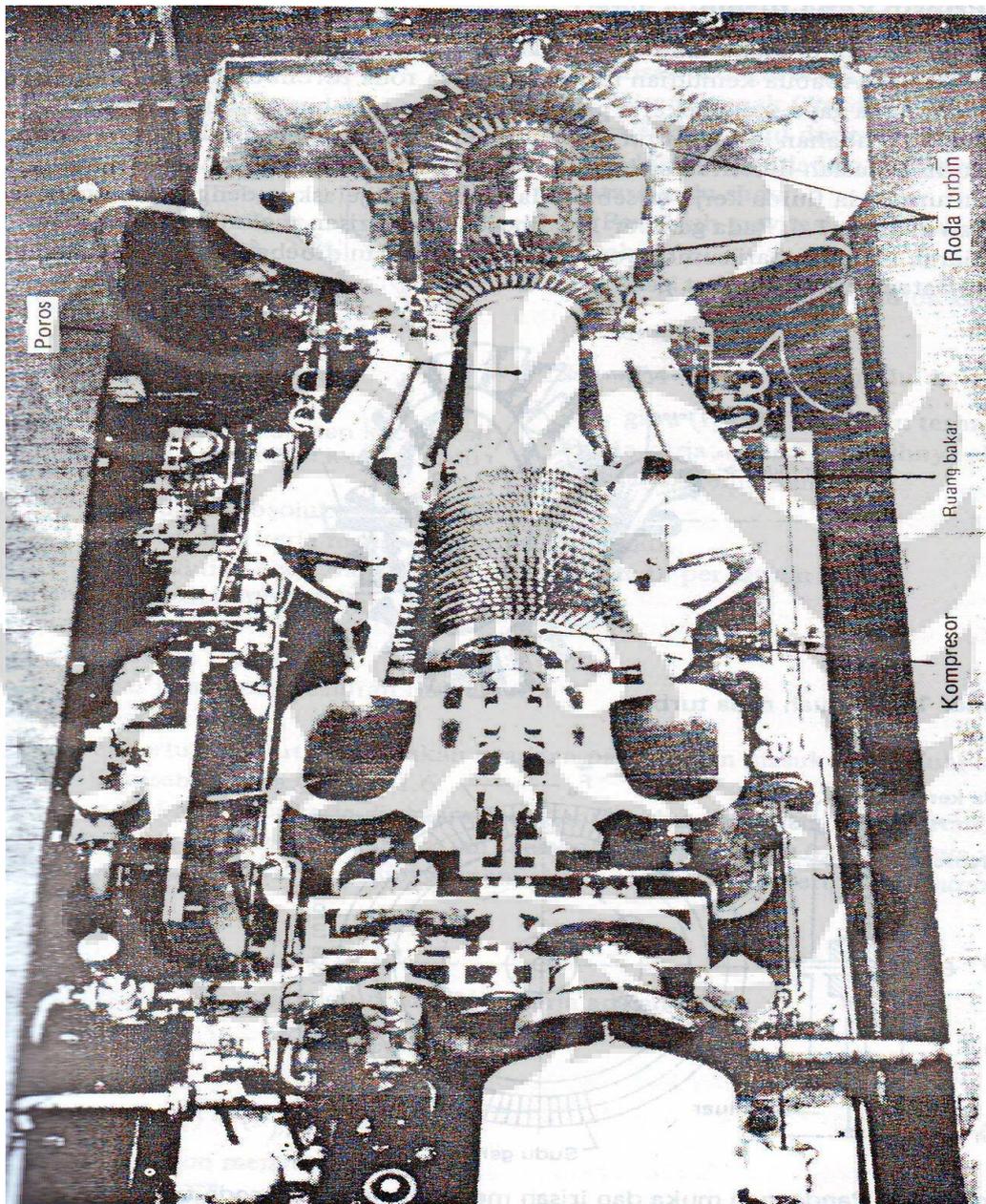
LAMPIRAN 4

Perbandingan antara Turbin Gas dan Turbin Uap

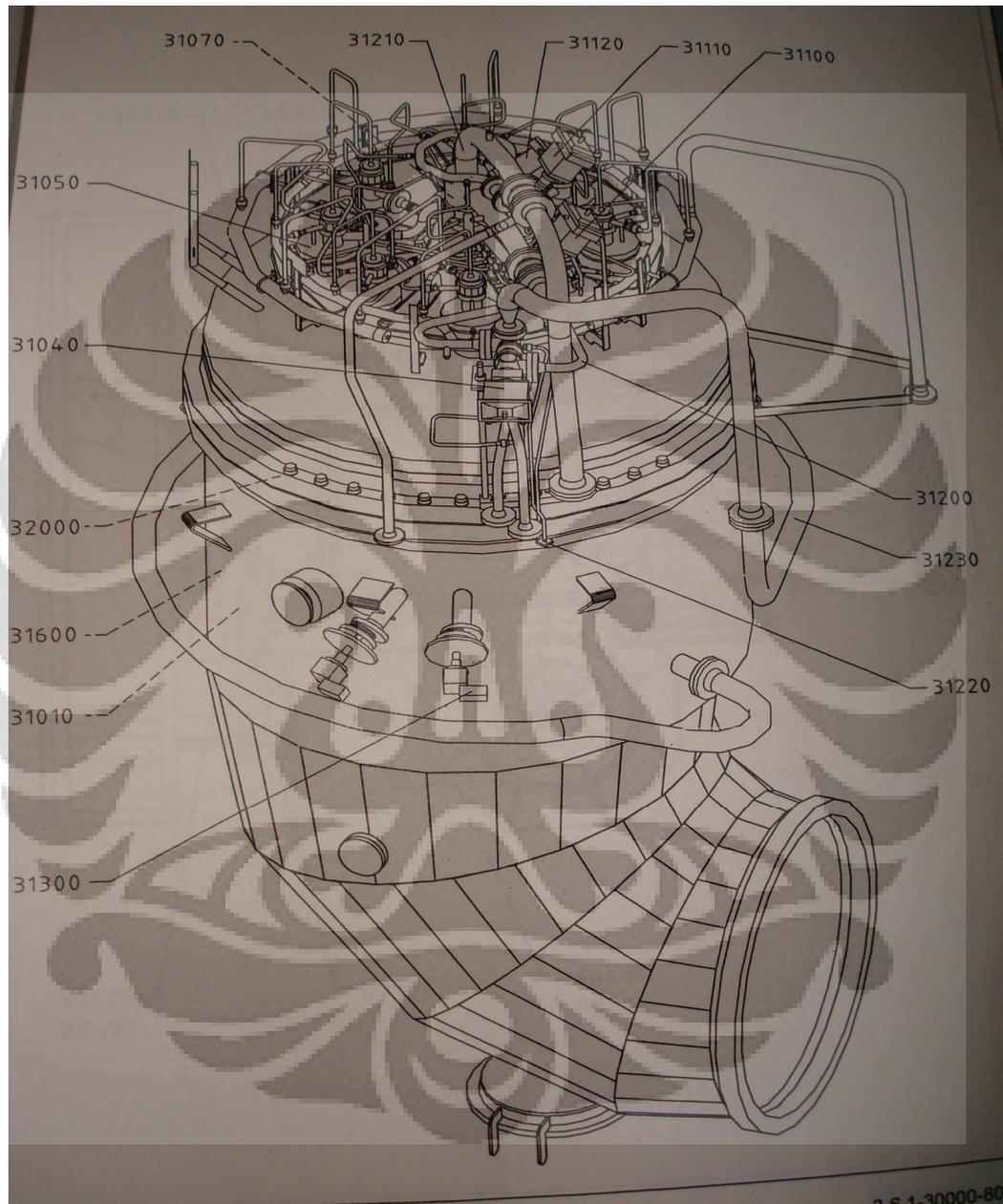
Parameter	Turbin gas	Turbin uap
Tekanan maksimum, P_{maks}	~4-10 Bar	240 Bar
Temperatur maksimum, T_{maks}	800-1300 °C	580 °C
Temperatur maksimum, P_{min}	1.0 Bar	0.04 Bar
Temperatur minimum, T_{min}	400-700 °C	20 °C
Penurunan entalpi, Δh	530 kJ/kg fluida kerja	1500 kJ/kg fluida kerja
Laju aliran fluida kerja, G	30-500 kg/s	Sampai 1000 kg/s
Jumlah tingkat	4-6	20-40
Daya poros, N	300 MW	600-1500 /MW
Putaran poros, n	3000-6000 RPM	
Efisiensi termal	25-30%	30-40%
Berat spesifik	1-3 kg/kW	
Volume instalasi	160 m ³ /MW	800-1500 m ³ /MW
Pendingin	Tidak memerlukan fluida pendingin (kecuali untuk pendinginan minyak pelumas dan hidrogen pendingin generator; ~500-800GPM pada 95 F)	Air pendingin kondensor ~ 100 x G _{uap} masuk kondensor
Biaya instalasi	150-350 \$/kW	300-1000 \$/kW

LAMPIRAN 5

Sistem Turbin Gas



LAMPIRAN 6

Bagian *Combustion Chamber* Turbin Gas

LAMPIRAN 7

Mesin Turbin Gas tampak atas

