

# ANALISIS KERUSAKAN PADA ROTOR TURBIN UAP KAPASITAS 3191 KW

## FAILURE ANALYSIS OF A 3191 KW STEAM TURBINE ROTOR

Apriardi Ihlas

Balai Besar Bahan dan Barang Teknik, Jl. Sangkuriang No. 14 Bandung  
Email: apriardi.ihlas@gmail.com

Diterima: 14 September 2016

Direvisi: 10 November 2016

Disetujui: 2 Desember 2016

### ABSTRAK

Korosi pada turbin uap yang menyebabkan penurunan kapasitas daya. Telah dievaluasi untuk mengetahui penyebab kerusakan agar kejadian serupa tidak berulang kembali. Untuk itu, dilakukan serangkaian pemeriksaan yang meliputi: pemeriksaan visual, komposisi kimia bahan, pemeriksaan makro dan mikro, dan juga *Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-ray spectroscopy* (SEM-EDS). Pemeriksaan visual menunjukkan lokasi korosi cenderung semakin parah pada radius terluar dekat sudu. Bentuk kerusakan berupa lubang-lubang yang berbentuk bulat.. Pemeriksaan EDS ditemukan unsur silikon sebagai penyusun senyawa silika, khususnya  $\text{SiO}_2$ . Senyawa keras yang berbentuk partikel halus ini diduga sebagai penyebab kerusakan melalui benturan yang akan menjadi inisiasi korosi lanjutan sebagai korosi lubang. Jadi, tipe kerusakan pada rotor turbin uap ini adalah korosi yang diakibatkan oleh deposit silika yang terbawa oleh uap boiler.

**Kata Kunci:** turbin uap, korosi, deposit silika, korosi lubang.

### ABSTRACT

*The failure by corrosion of a 3191 KW steam turbine rotor was investigated. The corrosion has occurred on a steam turbine which results in lowering power capacity. A series of examinations were conducted including: visual examination, chemical composition, macro and micro examination, and Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS). Visual examination showed the location of corrosion tend to be more severe on the outer side. It has been found breakages in the form of a round shape holes. On the EDS examination, it was discovered that the element of silicon as a compiler of silica compounds, especially  $\text{SiO}_2$ . A hard compound in the form of fine particles was suspected as the cause of damage through collision impact, which would be the initiation of further corrosion as pitting. Thus, the type of damage of this steam turbine's rotor, was the corrosion which caused by silica deposits carried away by the steam.*

**Keywords:** steam turbine, corrosion, silica deposits, pitting corrosion.

### PENDAHULUAN

Turbin uap adalah suatu penggerak mula yang mengubah energi dalam uap menjadi energi kinetik melalui *nozzle* dan diteruskan menjadi energi mekanik pada sudu yang memutar poros sebagai penggerak generator untuk menghasilkan energi listrik [1]. Kerusakan yang terjadi pada turbin uap akan mengakibatkan penurunan kapasitas daya. Beberapa kasus telah dilaporkan, diantaranya korosi, deposit, dan erosi yang menjadi penyebab kerusakan pada turbin uap

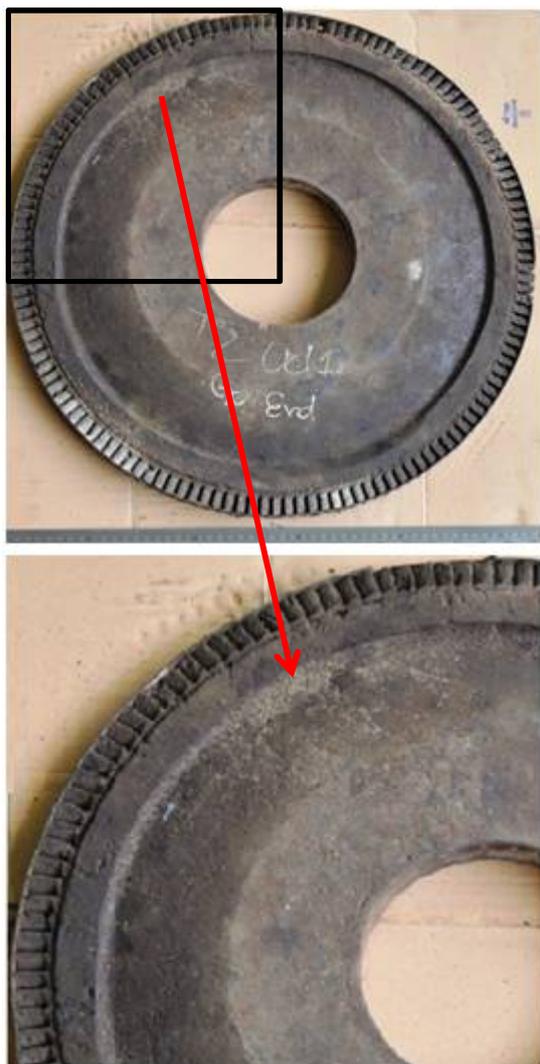
[2,3,4]. Korosi akibat deposit pada turbin uap umumnya berasal dari kualitas air boiler [5]. Berbagai wujud material pengotor yang berasal dari air umpan boiler dapat terbawa ke ruang turbin untuk menggerakkan sudu, yaitu terlarut, tidak terlarut, dan gas [5].

Salah satu material pengotor yang dapat larut terbawa uap adalah silika. Unsur ini dapat membentuk berbagai senyawa silika kompleks yang beragam yang dapat menempel pada permukaan rotor turbin [6,7]. Deposit silika menempel pada putaran tinggi sehingga akan

terjadi benturan. Selain itu gerakan sentrifugal juga mengakibatkan kecenderungan kerusakan berada di daerah pinggir. Mekanisme terjadinya korosi akibat keberadaan deposit silika yang terbawa dipelajari melalui serangkaian pemeriksaan dan pengujian.

Makalah ini melaporkan investigasi terhadap turbin uap yang telah mengalami korosi seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Kerusakan ini mengakibatkan penurunan kapasitas daya maksimum 3191 kW menjadi hanya 2000 kW setelah digunakan selama 8 tahun. Instalasi dilakukan pada bulan Januari 2006 dan kerusakan terjadi pada Mei 2014. Adapun kondisi lingkungan berada di ruangan tertutup dan tidak jauh dari laut, yaitu sekitar 500 m.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui penyebab utama kerusakan turbin uap tersebut. Selanjutnya hasil evaluasi digunakan untuk mengetahui cara mengantisipasi agar kerusakan serupa tidak terjadi lagi.



Gambar 1. Rotor Turbin Uap yang Rusak

## BAHAN DAN METODE

Penelitian ini dimulai terhadap informasi kronologi kejadian dan data teknis yang diberikan untuk memberi gambaran awal kerusakan. Selanjutnya dilakukan pemilihan jenis pemeriksaan dan pengujian sebelum melakukan pemotongan dan pembuatan spesimen uji. Spesimen uji diambil dari sudu turbin karena berhubungan langsung terhadap penurunan kapasitas daya rotor turbin.

Rangkaian pemeriksaan atau pengujian tersebut terdiri dari langkah-langkah berikut [8]:

- Pengamatan visual untuk melihat bentuk, warna dan lokasi kerusakan.
- Pengujian komposisi kimia sebagai verifikasi material komponen rotor turbin uap. Pemeriksaan komposisi kimia menggunakan metode spektro emisi yang dapat menentukan unsur-unsur termasuk karbon.
- Pemeriksaan metalografi untuk melihat perubahan struktur mikro. Selain itu juga melihat kontur dan deformasi yang terjadi pada permukaan. Pengujian ini mengikuti standar ASTM E 407-07[2015][9].
- Pemeriksaan SEM untuk mengetahui morfologi mikro permukaan korosi dan untuk mengetahui komposisi kimia produk korosi atau deposit yang menempel pada permukaan. Selain itu juga melihat fractografi mikro.

### Data Teknis

Informasi data teknis dan kondisi operasi rotor turbin uap adalah sebagai berikut.

Identitas barang	: Rotor turbin uap.
Daya	: 3191 kW
Material	
- Sudu turbin	: AISI 410 <i>heat treated</i>
- <i>disk</i> rotor turbin	: Tidak ada informasi
Tekanan	: 48 Bar
Temperatur	: 300°C
Tekanan keluar	: 3,2 Bar
Kecepatan normal	: 6500 RPM

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Pemeriksaan Visual

Pengamatan visual dimulai dengan gambaran keseluruhan secara umum komponen (Gambar 1). Terdapat tiga bagian utama, yaitu piringan (*disc*), *sudu*, dan *ring* di sisi terluar. Kondisi bagian *piringan (disc)* utama relatif

masih baik, namun semakin ke sisi terluar cenderung permukaannya semakin rusak (berdekatan dengan *sudu*). Bagian yang mengalami kerusakan paling parah adalah *sudu* beserta *ring*-nya. Bahkan sebagian sisi *ring* sudah tidak utuh atau lepas sebagian (Gambar 2). Peningkatan kerusakan juga terjadi pada celah sambungan antara *sudu* dan piringan. Jadi, tingkat kerusakan semakin parah pada sisi terluar.

Bentuk kerusakan secara umum adalah terbentuknya lubang-lubang yang tersebar pada hampir seluruh permukaan. Ukuran lubang tidak seragam, ada yang cenderung kecil (*pit*) dan sebagian cenderung besar (*rounded*). Kondisi permukaan diduga akibat benturan partikel padat sehingga mampu merusak lapisan pelindung baja tahan karat pada *sudu*.



Gambar 2. Kondisi Permukaan Rotor Turbin Uap yang Mengalami Korosi.

Pada sebagian permukaan komponen ditemukan daerah bercak berwarna putih, terutama pada sisi terluar yaitu di sebagian kecil permukaan *sudu* dan *guide ring*. Kondisi permukaan sekitar *sudu* terlihat jelas pada gambar 2. Namun tidak ada indikasi hubungan keberadaan bercak putih terhadap tingkat kerusakan. Bercak putih seperti kapur dan produk korosi itu sendiri akan diperiksa lebih jauh pada pengamatan SEM/EDS.

### Pengujian Komposisi Kimia

Pemeriksaan komposisi kimia dilakukan terhadap 2 bagian, yaitu: 1 spesimen pada piringan (*disc*), dan 2 spesimen pada *sudu*. Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan metoda Optical Emission Spectroscopy (OES)

untuk mengetahui kesesuaian spesifikasi material tersebut (Tabel 1 dan 2).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada umumnya nilai komposisi kimia *sudu* memenuhi syarat spesifikasi baja tahan karat AISI 410 *heat treated*, kecuali kandungan krom dan sulfur. Kedua *sudu* memiliki kandungan krom yang sedikit di bawah spesifikasi dan kandungan sulfur pada *sudu* pertama di bawah spesifikasi juga [10].

Tabel 1. Hasil Komposisi Kimia pada *Sudu* Turbin ( berat %)

Unsur	Sudu 1	Sudu 2	Spesifikasi(maks.)
			AISI 410 <i>heat treated</i>
C	0,133	0,119	0,15
Cr	10,820	10,980	11,5 – 13,5
Mn	0,313	0,314	1,0
P	0,022	0,026	0,04
S	0,010	0,008	0,03
Si	0,466	0,478	1,0
Ni	0,321	0,616	0,75

Tabel 2. Hasil Komposisi Kimia pada Piringan (*disc*) Turbin ( berat %)

Unsur	Piringan ( <i>disc</i> )	Spesifikasi
C	0,383	
Mn	0,867	
P	0,010	
S	0,007	
Si	0,286	-
Cu	0,118	
Ni	0,203	
Cr	0,930	
W	0,026	

Baja tahan karat AISI 410 termasuk kelompok baja tahan karat seri martensit. Struktur mikro baja tahan karat ini diperiksa secara metalografi.

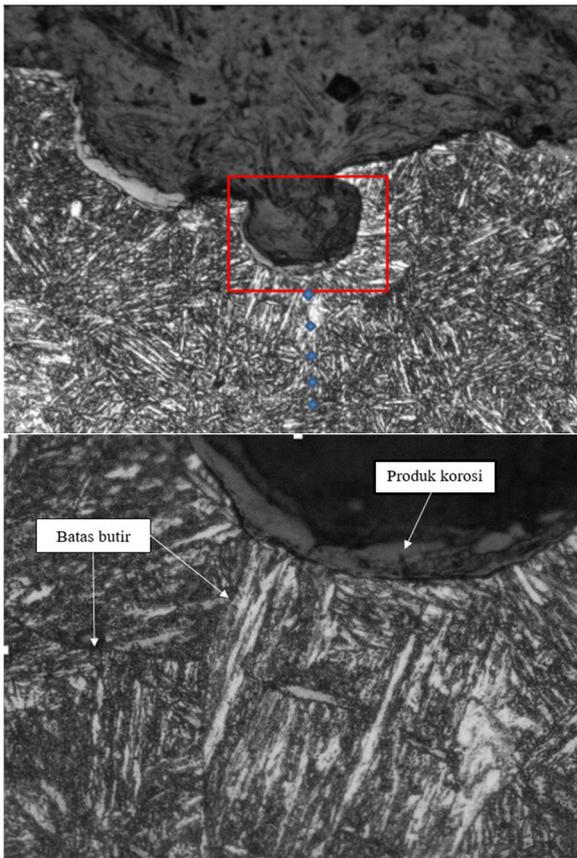
### Pemeriksaan Metalografi

Pemeriksaan metalografi dilakukan untuk melihat kondisi permukaan yang mengalami korosi lebih detail. Bentuk kerusakan, produk korosi dan deformasi yang terjadi akan diamati. Selain itu juga untuk verifikasi struktur mikro paduan logam *sudu* turbin.

Pemilihan dan penyiapan sampel dilakukan melalui serangkaian tahapan preparasi dilakukan, diantaranya: pemotongan, *mounting*, poles, dan

pemberian larutan etsa. Larutan etsa yang digunakan adalah *Marble's* [9]. Hasil foto struktur mikro dapat dilihat pada Gambar 3. Foto tersebut memperlihatkan struktur mikro sudu turbin adalah fasa martensit. Struktur mikro ini sesuai dengan spesifikasi material, yaitu baja tahan karat martensit AISI 410.

Permukaan sudu turbin pada arah melintang memperlihatkan kondisi permukaan yang tidak merata. Selain itu di beberapa lokasi ditemukan lobang yang relatif besar (kotak merah).



Gambar 3. Foto Struktur Mikro Penampang Melintang Permukaan Sudu Turbin yang Rusak. Pembesaran Gambar Pertama 200X dan Gambar Kedua 800X.

Permukaan sudu turbin pada arah melintang memperlihatkan kondisi permukaan yang tidak merata. Selain itu di beberapa lokasi ditemukan lobang yang relatif besar (kotak merah pada gambar 3). Bentuk lobang memberi dugaan bahwa permukaan mengalami benturan dari partikel yang memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibanding material sudu sehingga terdeformasi plastis. Produk korosi terlihat dengan jelas pada sebagian permukaan, terutama pada lembah/cekukan dengan ukuran yang relatif

besar. Retak mikro tidak ditemukan, sehingga indikasi korosi leleh tidak ditemukan [8].

Produk korosi cenderung lebih banyak ditemukan pada permukaan yang cekung dibandingkan bagian lain. Hal ini memberi dugaan bahwa produksi korosi pada bagian cekung lebih bersifat anodik karena kekurangan oksigen. Selain itu, produk korosi pada bagian cekung cenderung terlindungi oleh partikel-partikel yang tidak diinginkan yang terbawa oleh uap dalam ruang turbin.

### Pemeriksaan Kekerasan

Kondisi sifat mekanik pada daerah sekitar permukaan lubang diketahui melalui uji keras mikro Vickers. Uji keras dilakukan dengan beban 1 kgf (mikro). Gambar 3 bagian atas memperlihatkan lokasi kekerasan yang dilakukan terhadap spesimen struktur mikro pada arah melintang maupun memanjang dengan jarak antar titik adalah 0,1 mm dan dimulai dari lembah lubang.

Tabel 3. Hasil Uji Vickers pada Daerah Dekat Lubang

No.	Arah melintang	Arah memanjang
1	239	240
2	257	266
3	242	247
4	240	245
5	245	242

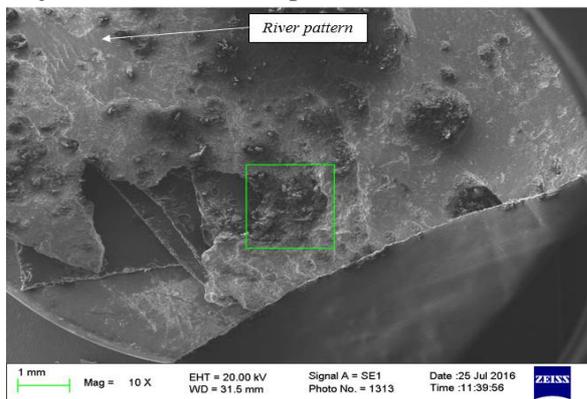
Terjadi peningkatan nilai kekerasan sedikit pada lokasi titik ke-2, namun tidak signifikan yang diduga akibat fenomena *strain hardening* karena menerima benturan partikel padatan asing [8].

### Pemeriksaan SEM dan EDS

Pemeriksaan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dilakukan terhadap bagian permukaan sudu yang mengalami kerusakan. Spesimen yang diperiksa adalah dua buah, yaitu sudu yang terdapat endapan berwarna putih dan tidak. Pemeriksaan ini dilakukan untuk mengetahui morfologi mikro permukaan. Bersamaan dengan pemeriksaan SEM, dilakukan pula pemeriksaan komposisi kimia secara semi kuantitatif terhadap produk korosi atau deposit yang menempel pada permukaan, yaitu EDS (*energy dispersive spectroscopy*). Merek peralatan SEM/EDS yang digunakan adalah ZEISS EVO pada 20 kV.

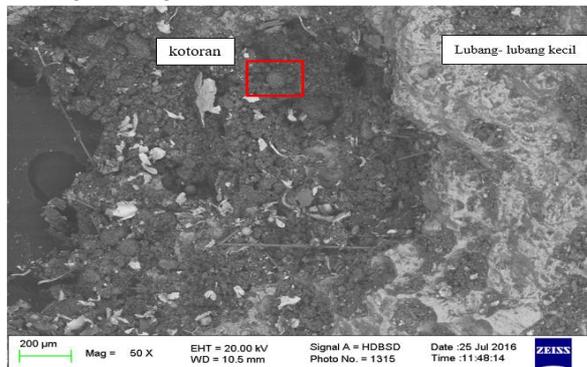
Pemeriksaan SEM dimulai dengan pembesaran relatif rendah dan *full area* untuk memberi gambaran umum yang diperlihatkan pada Gambar 4. Terlihat tipikal patahan *river pattern* pada beberapa tempat yang memberi petunjuk bahwa daerah tersebut mengalami patah getas. Indikasi yang memberi dugaan bahwa daerah tersebut telah mengalami benturan yang keras oleh partikel keras asing.

Selain itu juga ditemukan bercak-bercak pengotor yang tersebar merata dengan berbagai ukuran. Bercak tersebut diduga sebagai korosi pada permukaan sudu turbin. Pemeriksaan lebih lanjut dilakukan terhadap bercak korosi tersebut.



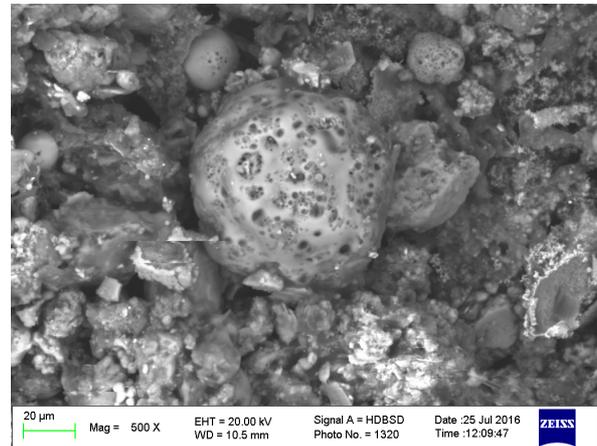
Gambar 4. Bercak-Bercak Korosi pada Permukaan Sudu Turbin yang Mengalami Korosi.

Kotak warna hijau merupakan *spot area* suatu bercak korosi yang membentuk lubang diperbesar oleh foto berikutnya, yaitu Gambar 5. Pada gambar tersebut terlihat dengan jelas bahwa permukaan penuh dengan pengotor, deposit atau pun produk korosi pada sisi kiri. Ditemukan banyak lubang-lubang yang terbentuk pada permukaan yang tidak tertutup pada sisi kanan. Jadi, di dalam suatu lubang masih ditemukan lubang-lubang kecil (*pit*).



Gambar 5. Kotoran, Deposit, Produk Korosi dan Lubang-Lubang Kecil Ditemukan pada Permukaan Sudu Turbin yang Rusak.

Kondisi permukaan yang ditutupi oleh kotoran atau endapan diperbesar yang diperlihatkan pada Gambar 6. Ditemukan berbagai bentuk dan ukuran butiran atau partikel asing. Seperti gambar sebelumnya, partikel yang berbentuk bola sangat mudah ditemukan. Kotak merah menjadi *spot area* untuk pemeriksaan komposisi kimia selanjutnya.



Gambar 6. Deposit yang Cenderung Berbentuk Bola.

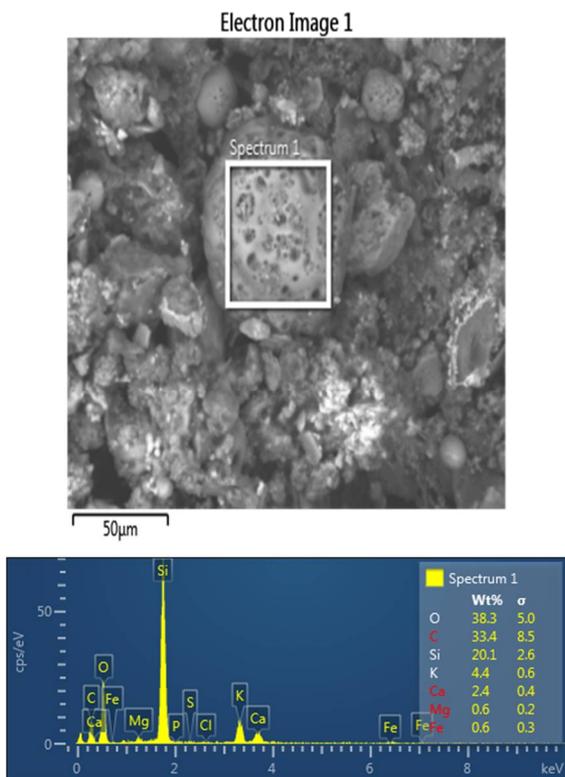
Pemeriksaan EDS dilakukan secara *spot area* pada bola yang terbesar tersebut. Hasil pemeriksaan pada daerah tersebut menunjukkan beberapa unsur yang dominan, yaitu oksigen (O), karbon (C), dan silikon (Si). Keberadaan unsur silikon yang dominan memberi dugaan keberadaan partikel silikon oksida ( $\text{SiO}_2$ ) sangat kuat, meskipun ada sebagian kecil mungkin dapat membentuk senyawa kompleks amorf silika lainnya, misalnya *calcium aluminum silicate hydroxide* [6].

Partikel silika memiliki kekerasan yang sangat tinggi, berbentuk bola, dan melebihi kekerasan material baja sudu. Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan bahwa ukuran partikel silika umumnya di bawah  $100 \mu\text{m}$ . Senyawa ini bersifat inert terhadap permukaan logam sehingga cenderung terdispersi [11,12].

Selain silika, ditemukan unsur kalium (K) dalam jumlah yang lebih kecil. Unsur ini dapat membentuk senyawa alkali (KOH) yang dapat juga menyebabkan korosi dengan mekanisme yang berbeda dengan silika. Namun pengaruhnya tidak sebesar silika.

Deposit silika diduga berasal dari air boiler. Senyawa silika  $\text{SiO}_2$  yang menempel pada permukaan boiler menguap dan terbawa ketika masuk ke dalam turbin. Berdasarkan data teknis,

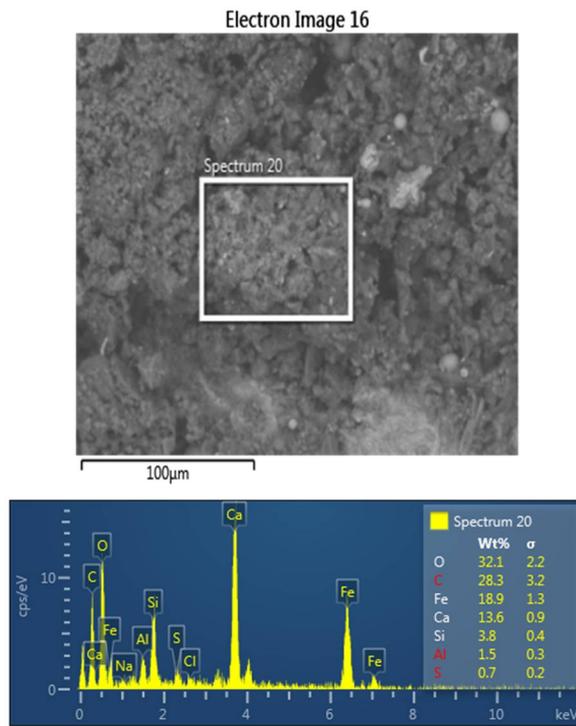
nilai tekanan *inlet steam* adalah 48 bar atau 696,2 psi. Berdasarkan penelitian, silika dapat menguap dalam *steam* ketika dioperasikan di atas 400 psi [6,7]. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya deposit silika pada turbin uap. Kelarutan silika meningkat dengan peningkatan temperatur. Ketika temperatur uap menurun melalui ekspansi turbin akan terbentuk deposit silika (kandungan maksimum kandungan silika pada kondisi uap adalah 0,02 ppm) [6,7].



Gambar 7. Foto SEM dan Analisa EDS pada Permukaan *Sudu* yang Terkorosi

Partikel  $\text{SiO}_2$  yang bersifat inert terhadap permukaan rotor turbin dapat membentur berulang-ulang. Senyawa keras ini terbawa uap dan membentur permukaan turbin secara sentrifugal berdasarkan gravitasinya menjadi inisiasi korosi lanjutan. Kondisi permukaan yang rusak akibat benturan partikel tersebut menyebabkan terjadinya potensial energi secara termodinamika [2,6]. Sebagian permukaan secara acak menjadi lebih anodik, misalnya karena tegangan sisa akibat benturan. Selain itu kandungan oksigen menjadi tidak seragam di mana daerah lubang atau celah menjadi lebih cepat mengalami korosi. Jadi, tipe kerusakan pada rotor turbin uap ini adalah korosi berbentuk lubang yang diakibatkan oleh deposit silika yang terbawa oleh uap turbin.

Pemeriksaan SEM/EDS dilakukan juga terhadap *sudu* turbin yang menempel bercak berwarna putih. Meskipun tidak ada perbedaan tingkat kerusakan dibandingkan terhadap bagian *sudu* lainnya, pemeriksaan kimia bercak putih perlu diketahui.



Gambar 8. Foto SEM dan Analisa EDS Pada Permukaan *Sudu* yang Terkorosi (area bercak putih)

Morfologi permukaan *sudu* bercak putih berbeda dengan pemeriksaan SEM sebelumnya. Bentuk deposit yang menempel cenderung seragam berbentuk agregat kasar. Bentuk morfologi ini menunjukkan indikasi keberadaan senyawa kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ). Selain itu, masih ditemukan deposit yang berbentuk bola dalam jumlah lebih sedikit. Hasil pemeriksaan EDS mendukung dugaan tersebut bahwa kandungan unsur kalsium meningkat tajam melebihi kandungan silikon. Kemungkinan silika tertutup oleh senyawa ini.

### KESIMPULAN

Berdasarkan pemeriksaan SEM/EDS yang telah dilakukan terhadap permukaan rotor turbin uap yang mengalami korosi dapat disimpulkan bahwa kerusakan akibat deposit silika  $\text{SiO}_2$ . Keberadaan partikel tersebut yang terbawa oleh uap boiler merusak permukaan turbin secara sentrifugal. Benturan partikel ini akan

menyebabkan terjadi perbedaan potensial energi pada permukaan sehingga memberi kondisi terjadinya korosi untuk berlanjut. Keberadaan senyawa kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) yang berwarna putih tidak menunjukkan pengaruh terhadap kerusakan akibat korosi pada rotor turbin. Kerusakan pada rotor turbin uap ini, khususnya sudu akan mengakibatkan penurunan kapasitas daya turbin tersebut.

## SARAN

Untuk menghindari atau minimalisasi terbentuknya deposit silika pada permukaan rotor turbin uap, perlu dilakukan sebagai berikut.

1. Minimalisasi kandungan silika dalam air umpan boiler mengingat lokasi yang hanya 500 m dari laut.
2. Melakukan pemeriksaan kemurnian uap, misalnya dengan mengacu pada ASTM D-1066-1997 (Reapproved 2001) *Standard Practice for sampling steam*.
3. Melakukan perawatan berkala secara kimia atau mekanik agar permukaan terhindar terbentuknya deposit yang tidak diinginkan tersebut

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan di Laboratorium Metalografi B4T atas kerjasama dan kesempatan yang diberikan dalam pemecahan kasus analisa kerusakan ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mukhopadhyay N, Chowdhury S, Das G, Chattoraj I, Das S, Bhattacharya D., *An investigation of the failure of low pressure steam turbine blades*. J Engineering Failure Analysis, Volume 5, hal. 181–193, 1998.
- [2] Otakar Jonas and Lee Machemer, *Steam Turbine Corrosion and Deposits Problems and Solutions*. Proceedings of The Thirty-seventh Turbomachinery Symposium, hal. 211 – 228, 2008.
- [3] Prem Baboo, *Cause and Prevention for Steam turbine Blade Scaling & Fouling*. National Fertilizer Ltd., India, 2016.
- [4] M. Choor, B, Valdez, and J. Ocampo, *Erosion-Corrosion in Industrial Steam Turbine*. Material Performance, 2009.
- [5] Sanders W., *Steam turbine path damage and maintenance*, Vol. 1 (February 2001) and 2 (July 2002). Tulsa, OK, USA: Pennwell Press, 2001.
- [6] *Steam Turbine Deposition, Erosion, and Corrosion*. GE Power & Water. Available: [https://www.gewater.com/handbook/boiler\\_water\\_systems/ch\\_18\\_Corrosion.jsP](https://www.gewater.com/handbook/boiler_water_systems/ch_18_Corrosion.jsP)
- [7] Bahadori, A., & Vuthaluru, H. B., 2010, *Prediction of silica carry-over and solubility in steam of boilers using simple correlation*. Applied Thermal Engineering (Vol. 30).
- [8] ASM International Hand Book Committee, Electronics File, *Failure Analysis and Prevention*, Vol. 11, ASM International, USA, 2002, hal. 827-867 dan 2879.
- [9] *American Society for testing and Material*, ASTM E 407-07[2015] : *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*.
- [10] Standar spesifikasi AISI 410 : (a) ASTM A 276 – 00a *Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes* dan (b) *JIS G 4303 Stainless Steel Bars*.
- [11] Kostas, D & Eleftheria N., *Inhibition and Growth Control of Colloidal Silica : Design Chemical Approach*. Material Performance, 2004.
- [12] Zhou, S., & Turnbull, A., *Steam Turbine Operating Conditions, Chemistry of Condensates, and Environment Assisted Cracking – A Critical Review*. NPL Report MATC (A) 95, May. 2002.

