

## ANALISIS KEGAGALAN *IMPELLER* PENYEBAB KERUSAKAN POMPA AIR KAPAL LAUT

### IMPELLER FAILURE ANALYSIS CAUSES OF SENTRIFUGAL PUMP DAMAGE FROM SHIP UNIT

Eka Febriyanti, Sutarjo, Khairul Anwar

Perekayasa Pada Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur, BPPT  
Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang 15314  
Tel. (021)-7560539; Fax. (021)-7560538

e-mail : eka.febriyanti@bppt.go.id, sutarjodurrahman@yahoo.com, khairul.anwar@yahoo.com

#### Abstrak

*Impeller* merupakan bagian dari pompa sentrifugal yang digunakan untuk kapal laut dan telah mengalami korosi seragam secara signifikan setelah satu tahun pengoperasian. *Impeller* terbuat dari ASTM B198-13A, grade C87400 yang merupakan jenis *silicon brass*. Hasil pemeriksaan visual menunjukkan bahwa seluruh permukaan kecuali pada bagian yang dilindungi oleh cat mengalami proses korosi di seluruh permukaan. Sedangkan pemeriksaan SEM menunjukkan adanya *selective etching* fasa-fasa tertentu. Hal pemeriksaan tersebut juga dikonfirmasi dengan pemeriksaan metalografi dimana menunjukkan adanya *leaching* dari fasa yang kaya akan unsur Zinc mendekati zona terekspos. Oleh karena itu, mekanisme korosi yang terjadi mengarah pada *dezincification*. Analisis komposisi kimia dari *impeller* menunjukkan bahwa material *impeller* yang diperiksa merupakan jenis *silicon brass* yang tidak tahan terhadap serangan klorida dibandingkan *leaded red brass*. Dalam *rules klas/ marine klas* umumnya menggunakan material *leaded gunmetal bronze* yang mengacu pada spesifikasi ASTM B584-836 atau SAE 40 atau UNS C83600 atau lebih dikenal dengan *leaded red brass*. *Leaded red brass* mempunyai karakteristik seperti *machinability* yang sangat baik, ketahanan aus yang sangat baik pada pelumasan normal, serta ketahanan terhadap korosi, fatik, dan dampak yang baik. Selain itu, material ini juga memiliki kualitas permukaan yang sangat baik, konduktivitas yang baik, dan sekaligus tahan terhadap air laut. Oleh karena itu, material *leaded red brass* sering diaplikasikan pada produk *marine* <sup>1-3]</sup>.

Kata Kunci : Impeller, pompa, kapal laut, korosi, *dezincification*

#### Abstract

*An impeller that was part of a centrifugal pump used in potable ship was found to have experienced significant corrosion after only one year of service. The impeller was made from ASTM B198-13A, grade C87400 which is a silicon brass. The visual examination showed extensive metal loss on all surfaces. SEM examination showed selective etching of certain phases. This was confirmed with the metallographic examination which showed leaching of the zinc-rich phases close to the exposed surface. The corrosion mechanism was therefore found to be dezincification. A chemical analysis of the impeller material revealed that it was silicon brass and is not as resistant to chloride attack as leaded red brass. In rules klas/marine klas impeller generally uses leaded gunmetal bronze material refers to ASTM B584-836 spesification also called SAE 40 or UNS C93600. This grade is also known "leaded red brass". Leaded red brass offers characteristic such as excellent machinability, excellent wear resistant at normal lubrication, with good resistance to corrosion, fatigue, and impact. Moreover, this material has also anti frictional and excellent quality, good conductivity, and good corrosion resistance to*

seawater. Therefore, leaded red brass material is often applied to marine products<sup>1-3</sup>.

**Keywords:** *Impeller, pump, ship, corrosion, dezinfication*

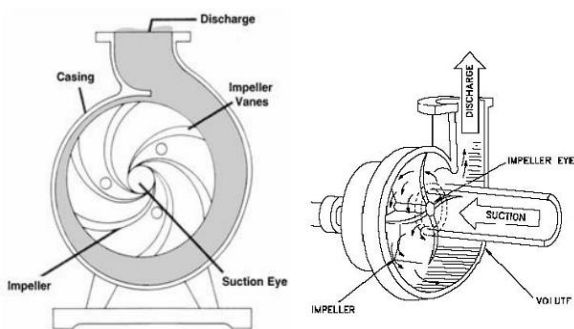
Diterima (received) : 13 Juni 2017, Direvisi (reviewed) : 8 Juli 2017, Disetujui (accepted) : 29 Juli 2017

## PENDAHULUAN

Pompa sentrifugal salah satu jenis *Variable Displacement Pump*. Prinsip kerja dari *Variable Displacement Pump* adalah volume air per menit yang dilewatkan tidak sama dengan volume air yang dihisap setiap menitnya. Pompa ini memiliki prinsip dimana perpindahan zat aliran didasarkan atas adanya gaya sentrifugal<sup>4</sup>.

Untuk dapat bekerja, pompa membutuhkan daya dari mesin penggerak pompa, dimana di dalam pompa fluida terjadi percepatan sedemikian rupa sehingga fluida tersebut mempunyai kecepatan mengalir keluar dari sudu-sudu. Kecepatan keluarnya fluida ini akan berkurang akibat perubahan kenaikan fluida yang dialirkan melalui sudu-sudu ke pipa outlet. Besarnya tekanan yang timbul tergantung pada besarnya kecepatan fluida<sup>5</sup>.

Pompa ini terdiri dari *impeller* yang dipasang pada sebuah poros berputar dalam rumah pompa (*casing*) atau rumah keong (*volute casing*) serta memiliki saluran masuk (*suction*) dan keluaran (*discharge*) fluida. *Impeller* yang berputar menimbulkan tekanan dalam air. Pada tengah *impeller*, air keluar melalui sudu-sudu dengan kecepatan yang diakibatkan adanya gaya sentrifugal sehingga arah aliran yang keluar dari *impeller* tegak lurus terhadap aliran yang menuju ke pusat sudu *impeller*<sup>6</sup>) seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1.  
Bagian-bagian pompa sentrifugal<sup>5</sup>

*Impeller* pada pompa merupakan bagian yang mengubah energi mekanik

(energi pada sudu-sudu *impeller*) diteruskan kepada daya pompa dan akibat adanya efisiensi karena perubahan arah aliran pada sudu-sudu *impeller*<sup>6</sup>).

## Kronologis

*Impeller* pompa sentrifugal dilaporkan mengalami kerusakan setelah 1 tahun pengoperasian. Pompa yang diteliti merupakan pompa ke-satu, dan merupakan pompa yang paling banyak digunakan dari ketiga sistem pompa yang didesain untuk menggerakkan kapal laut. Masalah pada pompa ditemukan ketika terdengar gangguan suara berlebih yang keluar dari pompa. Gambaran desain menyebutkan bahwa *impeller* terbuat dari material B198-13A Grade C87400 yaitu merupakan tipe (*silicon brass*) (82 Cu-0,5 Pb-14 Zn-3,5 Si)<sup>7</sup>.

Grade C87400 merupakan paduan kuningan hasil coran dan yang mempunyai tegangan tinggi (*high strength*) dan merupakan *solid solution strengthened*. Material *silicon brass* mengandung Zn  $\leq 20\%$  dan Si  $\leq 6\%$ . Selain itu material *cast silicon brass* memiliki ketahanan korosi yang sangat baik terutama pada lingkungan *aqueous* dan atmosferik. Namun, ketahanan korosi *silicon brass* pada lingkungan air laut (lingkungan klorida) lebih rendah dibandingkan *leaded red brass*. Konduktivitas paduan kuningan dari *silicon brass* lebih rendah dibandingkan paduan tembaga murni<sup>2-3</sup>.

Dalam *rules klas/marine klas* biasanya menggunakan material *leaded gunmetal bronze* yang mengacu pada spesifikasi ASTM B584-836 atau SAE 40 atau UNS C83600 atau lebih dikenal dengan *leaded red brass*. *Leaded red brass* mempunyai karakteristik seperti *machinability* yang sangat baik, ketahanan aus yang sangat baik pada pelumasan normal, serta ketahanan terhadap korosi, fatik, dan dampak yang baik. Selain itu, material *leaded red brass* juga memiliki kualitas permukaan yang sangat baik, konduktivitas yang baik, dan sekaligus tahan terhadap air laut. Oleh karena itu, material *leaded red brass* sering diaplikasikan pada produk *marine*<sup>1-3</sup>. Pada lingkungan *sea water* yang diatur dalam *rules klas/marine klas*, paduan kuningan

(paduan Cu-Zn) sering mengalami *dezincification*. *Dezincification* merupakan *selective dissolution* unsur Zn yang terjadi pada paduan kuningan (Cu-Zn) yang mempunyai kandungan Zn lebih dari 15% yang terekspos *aerated water* yang mengandung CO<sub>2</sub> dan klorida yang tinggi. *Dezincification* dapat diminimalisir dengan mengurangi agresivitas lingkungan (misalnya dengan *oxygen removal* atau dengan proteksi katodik, namun kedua metode tersebut tidak ekonomis. Biasanya menggunakan paduan yang kurang rentan terhadap *dezincification* seperti *red brass* (15% Zn) dan *admiralty metal* (70% Cu, 29% Zn, 1% Sn, dan 0,04% As). Bahkan untuk lingkungan yang sangat korosif dimana *dezincification* muncul atau untuk bagian-bagian kritis menggunakan *cupronickel* (70-90% Cu, 30-10% Ni)<sup>[8-9]</sup>.

Lalu, *impeller* yang rusak diuji dan diperiksa di laboratorium supaya akar penyebab kerusakan dapat ditemukan. Hal ini dilakukan untuk mempercepat proses perbaikan dan mencegah terjadinya kerusakan serta kerugian yang sama di pengoperasian selanjutnya.



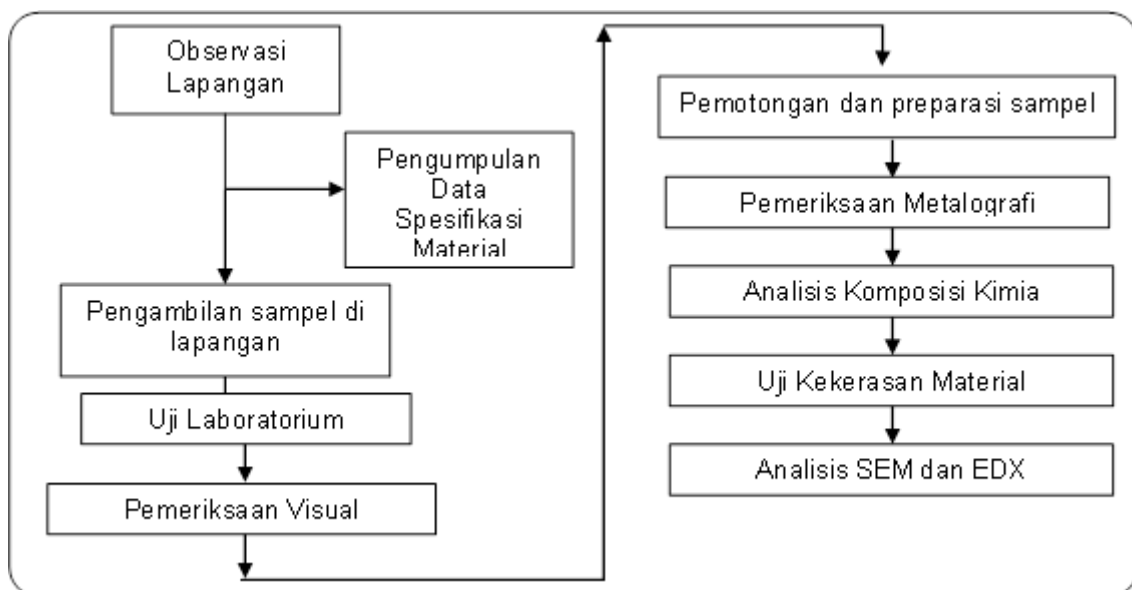
Gambar 2. *Impeller* yang Mengalami Korosi Seragam di Permukaan

### BAHAN DAN METODE

Metode penelitian terhadap *impeller* yang mengalami kerusakan perlu mengacu pada *Rules Klas* karena tergolong *marine use* yang digunakan dalam kapal.

Tahapan analisis kerusakan *impeller* menurut *rules klas/ marine klas* dari Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) terdiri atas pemeriksaan visual yang bertujuan untuk mengidentifikasi awal kerusakan seperti retak, deformasi, efek kavitasi, dll. Selanjutnya dilakukan pemeriksaan *non destructive* untuk mendeteksi adanya retak. Selanjutnya dilakukan analisis mikroskopik untuk mengidentifikasi proses kerusakan<sup>10)</sup>.

Di bawah ini merupakan tahapan analisis kerusakan terhadap *impeller* kapal yang mengacu pada *Rules Klas* (BKI) seperti dapat dilihat pada Gambar 3:



Gambar 3.

Diagram Alir Pemeriksaan dan Pengujian terhadap *Impeller* yang Mengalami Korosi Seragam

### Pemeriksaan Visual

Analisis visual dan pengamatan menggunakan mikroskop stereo (perbesaran 40x) dilakukan secara detail pada *impeller* yang diterima di laboratorium. Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa *impeller* pompa mengalami serangan korosi seragam (*uniform corrosion*) di seluruh permukaan<sup>11)</sup> seperti yang terlihat pada Gambar 4. Selain itu, permukaan sudu *impeller* pompa juga mengalami korosi *pitting* secara merata di bagian dalam maupun luar seperti yang terlihat pada Gambar 5.

Serangan korosi yang terjadi adalah serangan *uniform corrosion* dengan penampakan seperti busa (*spongy*) di daerah lainnya. Selain itu, daerah yang terserang korosi dan terkena *pitting* mengandung produk korosi berwarna "hijau" atau disebut "*green corrosion residu*"<sup>12)</sup>.



Gambar 4.  
Pemeriksaan *Impeller* yang Mengalami Korosi Seragam pada Permukaan

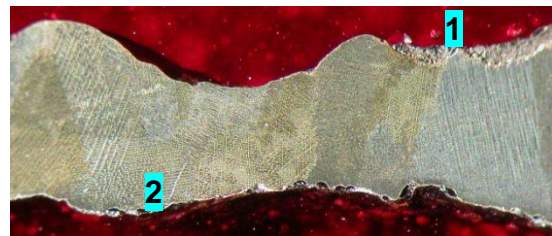


Gambar 5.  
Permukaan Sudu *Impeller* Pompa Mengalami Korosi *Piting* secara Merata di Bagian Luar maupun Dalam

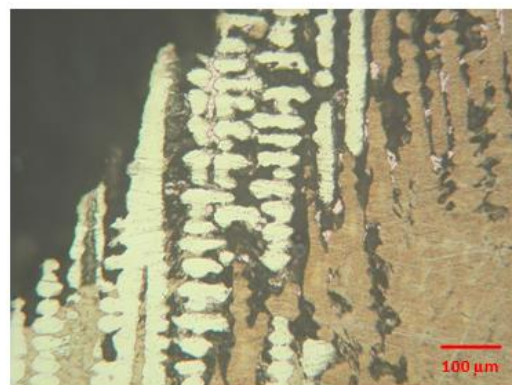
### Pemeriksaan Metalografi

Pemeriksaan metalografi dilakukan untuk mengetahui pengaruh serangan korosi terhadap struktur mikro *impeller*. Hasil pengamatan secara mikro menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 200x dan 500x yang dapat dilihat dari Gambar 6 sampai Gambar 9.

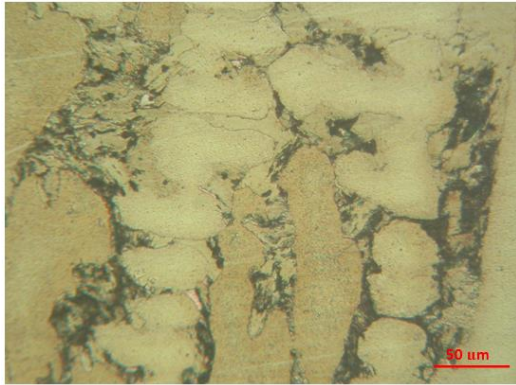
Pengambilan foto mikro etsa sampel metalografi terdiri atas 4 sampel yaitu sampel 1 dan 2 di daerah dinding sudu *propeller*, sampel 3 di lokasi sudu *lining edge*, dan sampel 4 di lokasi sudu *trilling edge*.



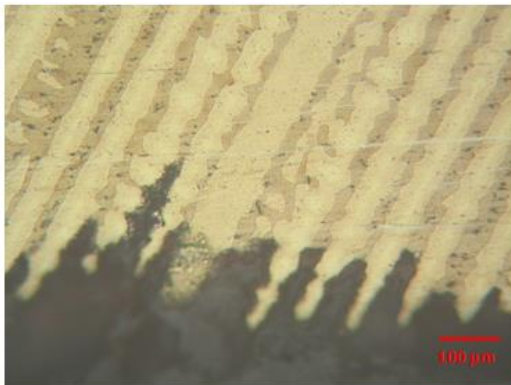
Gambar 6.  
Sampel 1 (Dinding Sudu Pengarah)



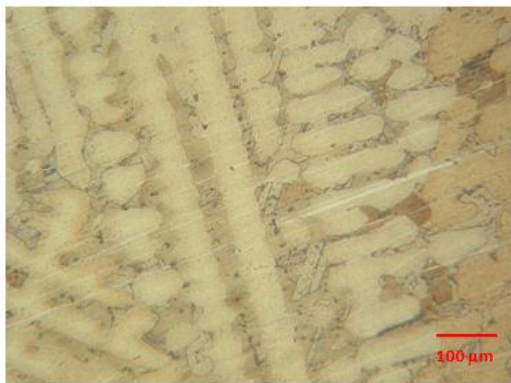
Gambar 7.  
Struktur Mikro Sampel 1, Lokasi 1 pada Dinding Sudu Daerah Tepi Material *Impeller* Zn-chill Cast berupa *segregated-a dendrites* dan Mengalami Serangan Korosi Melalui Batas Butir



Gambar 14.  
Struktur Mikro Sampel 3 bagian *Liding edge*  
Lokasi 2 pada daerah tepi

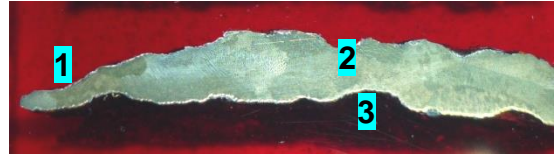


Gambar 15.  
Struktur Mikro Sampel 3 bagian *Liding edge*  
Lokasi 3 pada daerah tepi 4 berupa berupa  
*segregated- $\alpha$  dendrites* dan mengalami  
serangan korosi merata melalui batas butir

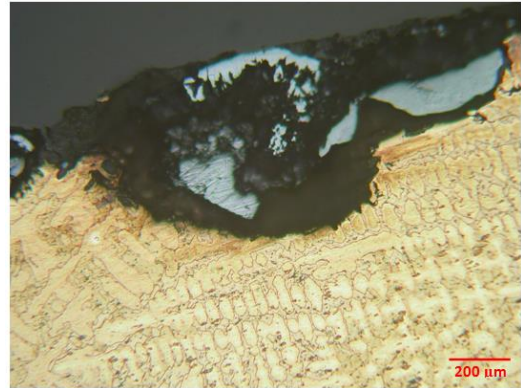


Gambar 16.  
Struktur Mikro Sampel 3 bagian *Liding edge*  
Lokasi 4 pada daerah tepi berupa berupa  
*segregated- $\alpha$  dendrites* dan mengalami  
serangan korosi merata melalui batas butir

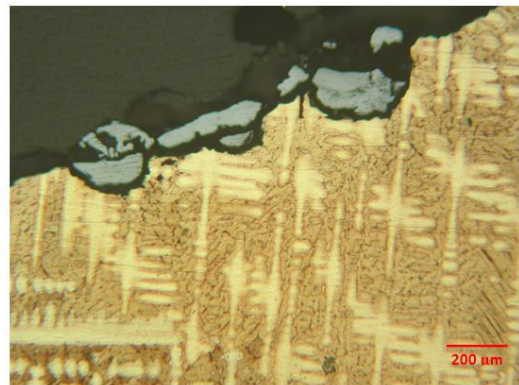
Untuk sampel 4 (sudu *trilling edge*) di lokasi 1, 2, dan 3 pada daerah tepi juga menunjukkan bahwa struktur mikro berupa *segregated- $\alpha$  dendrites*<sup>13)</sup> dan mengalami serangan korosi pitting<sup>11)</sup> dan merata melalui batas butir<sup>11)</sup> seperti yang terlihat pada Gambar 17 s/d Gambar 20.



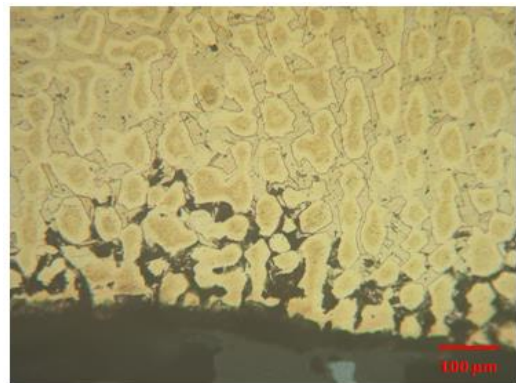
Gambar 17.  
Sampel 4 (Sudu *Trilling Edge*)



Gambar 18.  
Struktur Mikro Sampel 4 bagian *Trilling edge*  
Lokasi 1 pada daerah tepi berupa *segregated- $\alpha$  dendrites* dan mengalami serangan korosi pitting dan merata melalui batas butir



Gambar 19.  
Struktur Mikro Sampel 4 bagian *Trilling edge*  
Lokasi 2 pada daerah tepi



Gambar 20.  
Struktur Mikro Sampel 4 bagian *Trilling edge*  
Lokasi 3 pada daerah tepi

Hasil pemeriksaan metalografi pada sampel diambil dari *spongy area* pada permukaan *impeller*. Permukaan sampel yang di-*mounting*, dipoles, dan dietsa dengan  $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$ . Pemeriksaan metalografi menunjukkan bahwa permukaan lapisan pada kedalaman tertentu sangat berbeda dari hasil pengecoran. Pemeriksaan yang lebih detail pada permukaan lapisan ini seperti yang terlihat pada Gambar 6 s/d Gambar 20. Namun, fasa *zinc interdendritic* mengalami *selective etching*<sup>15)</sup> sehingga mempengaruhi performa dari logam.

### Analisis Komposisi Kimia

Sampel untuk analisis komposisi kimia diambil dari *impeller* pompa lalu diuji dengan *optical emission spectrometer* (OES). Hasil pengujian komposisi kimia material dari *impeller* dapat. Hasil uji menunjukkan bahwa material *impeller* yang diperiksa sesuai dengan standar material ASTM B198-13A (*silicon brass*) Grade C87400<sup>16)</sup> seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1.  
Hasil Uji Komposisi Kimia *Impeller*

Unsur / Elemen	<i>Impeller</i>	Standar ASTM B198- 13A Grade 87400
Fe	0,179	
Si	3,43	Max. 3,5
Mn	0,0106	
Cr	< 0,001	
Ni	0,0727	
Cu	80,4	Max. 82
Al	< 0,0010	
Ti	< 0,0010	
Zn	15,8	Min. 14
Ag	0,0249	
Sn	0,014	
Pb	< 0,20	Max. 0,5
Mg	< 0,0005	
Co	< 0,0020	
Cd	< 0,0020	

### Pengujian Kekerasan

Hasil uji kekerasan terhadap *impeller* dapat dilihat pada Tabel 2. Hasil uji menunjukkan bahwa untuk permukaan sampel 1, sampel 2, sampel 3, dan sampel 4 *impeller* memiliki nilai kekerasan masing-masing sekitar 124 – 146 HV, 130-141 HV, 114-131 HV, dan 117-131 HV. Nilai kekerasan yang diperoleh pada keempat sampel sesuai dengan standar ASTM B198-13A kecuali di beberapa titik pada sampel 1 dan Sampel 2 memiliki kekerasan standar ASTM B198-13A (80-137 HV)<sup>16)</sup>.



Gambar 21.  
Sampel 1 Uji Kekerasan *Impeller*



Gambar 22.  
Sampel 2 Uji Kekerasan *Impeller*



Gambar 23.  
Sampel 3 Uji Kekerasan *Impeller*



Gambar 24.  
Sampel 4 Uji Kekerasan *Impeller*

Tabel 2.  
Hasil Uji Kekerasan *Impeller*

No.	Nilai Kekerasan (HV)
<b>Sampel 1</b>	
1	146
2	141
3	132
4	133
5	124
<b>Rata-rata</b>	<b>135</b>
<b>ASTM B 198-13A</b>	<b>80-137</b>
<b>Sampel 2</b>	
1	137
2	135
3	132
4	141
5	130
<b>Rata-rata</b>	<b>135</b>
<b>ASTM B 198-13A</b>	<b>80-137</b>
<b>Sampel 3</b>	
1	131
2	123
3	114
4	120
5	127
<b>Rata-rata</b>	<b>123</b>
<b>ASTM B198-13A</b>	
<b>Sampel 4</b>	
1	117
2	
3	
4	
5	
<b>Rata-rata</b>	
<b>ASTM</b>	

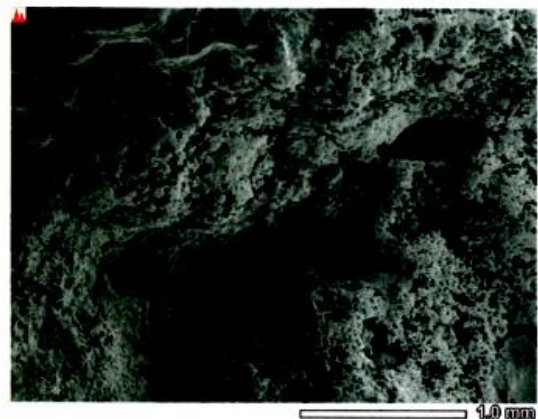
**B198-13A**

Sumber Data: Hasil pengujian dengan menggunakan alat Frank Finotest

**Analisis SEM dan EDX**

Sampel untuk analisis SEM (*Scanning Electron Microscope*) diambil dari daerah yang terkorosi pada permukaan *impeller* pompa. Pemeriksaan SEM menunjukkan bahwa *impeller* pompa telah mengalami serangan korosi merata dan telah tertutup produk korosi. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme *selective leaching* terjadi pada *silicon brass base metal*. *Selective leaching* tampak dari bentuk pola dendritik dari pengecoran seperti yang terlihat pada Gambar 25 s/d Gambar 27 dalam skala mikroskopik.

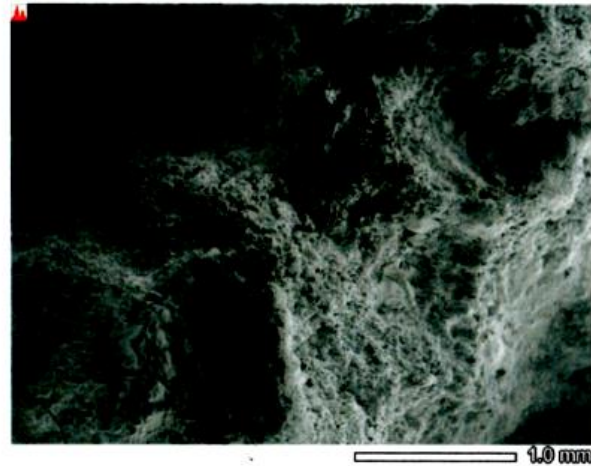
Sedangkan sampel "*green*" *corrosion residu* dari daerah *impeller* yang terkorosi dilakukan pemeriksaan menggunakan analisis semi-kuantitatif EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*). Hasil analisis menunjukkan bahwa "*green*" *corrosion residu* mengandung unsur Si, Fe, Cu, dan Zn masing-masing sebesar 0,55%; 1,17%; 52,56%; dan 2,61%; serta sejumlah unsur korosif yaitu ion Cl<sup>-</sup> sebesar 0,33% dan ion S<sup>2-</sup> sebesar 1,07%. Hasil analisis EDS seperti yang terlihat pada Tabel 3.



```

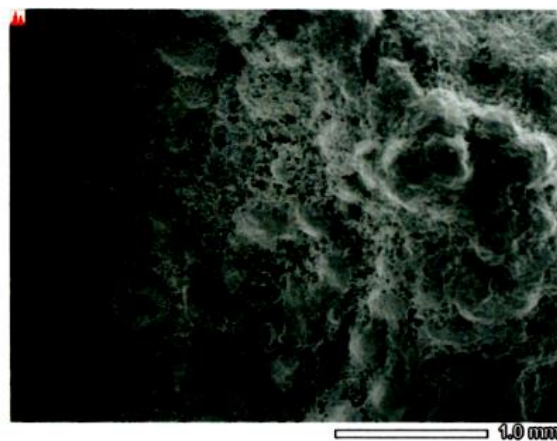
Title      : IMG1
-----
Instrument  : 6510(LA)
Volt       : 20.00 kV
Mag        : x 40
Date       : 2016/01/25
Pixel     : 512 x 384
    
```

Gambar 25.  
Hasil SEM dari Permukaan *Impeller* Pompa pada Posisi 1



Title	: IMG1
Instrument	: 6510(LA)
Volt	: 20.00 kV
Mag.	: x 35
Date	: 2016/01/25
Pixel	: 512 x 384

Gambar 26.  
Hasil SEM dari Permukaan *Impeller* Pompa pada Posisi 2



Title	: IMG1
Instrument	: 6510(LA)
Volt	: 20.00 kV
Mag.	: x 35
Date	: 2016/01/25
Pixel	: 512 x 384

Gambar 27.  
Hasil SEM dari Permukaan *Impeller* Pompa pada Posisi 3

Tabel 3.  
Analisis EDS pada Produk Korosi di  
Permukaan *Impeller*

No.	Nama Unsur	Kandungan Unsur (%) <sup>*</sup>
1	C	12,12
2	O	29,53
3	Si	0,55 <sup>**</sup>
4	S	1,07
5	Cl	0,33 <sup>***</sup>
6	Ca	1,29 <sup>**</sup>
7	Fe	1,17 <sup>**</sup>
8	Cu	52,56
9	Zn	2,61

<sup>\*</sup>Semi kuantitatif, nilai rata-rata dari 3 posisi pengukuran

<sup>\*\*</sup>Hasil pengukuran hanya terlihat pada 2 posisi dari 3 posisi pengukuran

<sup>\*\*\*</sup>Hasil pengukuran hanya terlihat pada 1 posisi dari 3 posisi pengukuran

## PEMBAHASAN

Hasil dari beberapa pemeriksaan, pengujian, dan analisis menunjukkan bahwa *impeller* pompa secara kimiawi terkorosi oleh kandungan ion klorin dan ion sulfur yang



jelas terlihat dari analisis EDS. Dalam beberapa literatur menunjukkan bahwa sejumlah kandungan ion klorin akan merusak *silicon brass*<sup>8-9,17-18</sup>). Analisis komposisi kimia menunjukkan bahwa *impeller* terbuat dari *silicon brass* (ASTM B198-13A Grade C87400). Logam *silicon brass* kurang tahan terhadap lingkungan yang banyak mengandung kandungan klorin dibandingkan *silicon red brass*. Sebagai tambahan, paduan tembaga dengan kandungan unsur Zinc melebihi 15% lebih rentan terhadap *dezincification* seperti yang terjadi pada kerusakan *impeller* pompa.

## SIMPULAN

Dari hasil observasi, pengamatan, dan analisis laboratorium serta pembahasan dapat disimpulkan bahwa penyebab kerusakan *impeller* pompa utamanya diperburuk oleh *dezincification*<sup>19-21</sup>) yang disebabkan karena kehadiran unsur korosif seperti ion Cl<sup>-</sup> dan S<sup>2-</sup> dalam air laut. Material yang digunakan untuk *impeller* yaitu ASTM B198-13A merupakan jenis *silicon brass* yang merupakan material yang tidak tahan terhadap serangan korosi dibandingkan *leaded red brass*.

## SARAN

Saran yang perlu dilakukan untuk mencegah terjadi kerusakan yang sama di masa mendatang yaitu mengganti material *impeller* dari jenis *silicon brass* menjadi *leaded red brass* yang lebih tahan terhadap serangan *dezincification*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ir. Sudarmadi, M.Eng., MSc. selaku Kepala B2TKS BPPT, Dr.Ing.H.Agus Suhartono selaku Kepala Bidang Kajian Material B2TKS, dan Sutarjo, ST, MM selaku Kepala Sub Bidang Analisis Kerusakan dan Umur Sisa untuk koordinasi dan pemberian ijin dalam menggunakan alat uji laboratorium.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Rules and Regulations for the Construction and Classification of Steel Ships: Part 1, Indian Register of Shippings, 2017.

2. *Standard Specification for Copper Alloy Sand Castings for General Applications, American Standard of Testing Material*, ASTM B584-14, 2014.
3. William D. Callister, *Fundamentals of Materials Science and Engineering 5th edition*, John Willey & Sons Inc., 2001.
4. Josifovic, Aleksandar, Jennifer J. Roberts, dkk, "Reducing the environmental impact of hydraulic fracturing through design optimisation of positive displacement pumps", Energy, 115, 2016, hal. 1216-1233
5. Lee, D.I., dan H.C.Lim, "Erosion-Corrosion Damages of Water Pump Impeller", International Journal of Automotive Technology, 10 (5), 2009, hal.629-634
6. Sharma, Pankaj, "Premature Failure of Ductile Iron Pump Impeller in Cooling Tower System", Journal Failure Analysis and Prevention, 14, 2006, hal. 303-306
7. Lee, Dong-Bok, dan Jae-Jin Moon, "The effect of small additions of Zr, Cr, Mg, Al, and Si on the oxidation of 6 : 4 brass", Metal and Materials International, 8 (2), 2002, hal. 327-332
8. M.G.Fontana, *Corrosion Engineering*, hal. 86-88, McGraw- Hill Book Company, New York, 1986.
9. Denny A. Jones, *Principle and Prevention of Corrosion*, Macmillan Publishing Company, New York, 1992.
10. Rules for The Classification and Construction, Part 1 : Seagoing Ships, Volume I, Biro Klasifikasi Indonesia, 2014.
11. Drach, Andrew, dkk, "Field studies of corrosion behaviour of copper alloys in natural seawater", Corrosion Science, 76, 2013, hal.453-464
12. Nady, H., M.M. El-Rabiei, dan M.Sany, "Corrosion Behaviour and electrochemical properties of carbon steel, commercial pure titanium, copper, and copper-aluminum-nickel alloy in 3,5% sodium chloride containing sulfide ions", Egyptian Journal of Petroleum, 2016.
13. Wang Y.H., dkk, "Microstructure and mechanical properties of columnar-grained copper produced by Ohno continous casting techniques", Material Science and Engineering A, 639, 2015, hal. 122-130 Du, X.S, dkk, "Inhibitive and mechanism of phosphates on the stress corrosion cracking of brass in ammonia solutions", Corrosion Science, 60, 2012, hal. 69-75

14. Bravenec, Edward V. dan J. Edgar Zapata, "*Metallurgical Failure Analysis of A Domestic Water Pump Impeller*", Engineering Failure Analysis, Vol. 1, No.1, 1994, hal. 29-34
15. Bauccio, Michael L., *ASM Metals Reference Handbook 3rd Edition*, hal.458-459, ASM International, Metal Park, Ohio , 1999.
16. *Failure Analysis and Prevention, Metal Handbook*, Vol. 11, 9th edition, hal. 187-221, and 632, American Society for Metals, Metal Park, Ohio, 1986.
17. *Corrosion, Metals Handbook, Vol. 13 9th edition*, hal. 131 dan 614, American Society for Metals, Metal Park, Ohio, 1986.
18. Kumar, Satendra, dkk, "*Effect of lead content on the dezincification behaviour of leaded brass in neutral and acidified 3,5% NaCl solution*", Materials and Chemistry and Physics, 105 (1), 2007, hal. 131-141
19. Troiani, H.E., dan A.Baruj, "*In situ optical microscopy study of a phase transformation induced by the dezincification of beta Cu-Zn*", Material Science and Engineering : A, 454-455 ,2007, hal. 441-445
20. Campanella, L., dkk, "*The effect of tin on dezincification of archaeological copper alloy*", Corrosion Science, 51 (9) , 2009, hal.2183-2191