

## Analisis kegagalan pada blade turbin PLTU 400 MW

### *Failure analysis on turbine blade of PLTU 400 MW*

Win Hendrawan<sup>1\*</sup>, Meilinda Nurbanasari<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Program Studi Teknik Mesin, Universitas Kebangsaan Republik Indonesia, Bandung, Jl. Terusan Halimun No.37, Bandung, Jawa Barat, Indonesia, 40263

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional, Bandung, Jl. P.H.H Mustofa No.23, Bandung, Jawa Barat, Indonesia, 40124

\*E-mail: [winhendrawan@ukri.ac.id](mailto:winhendrawan@ukri.ac.id)

Article Submit: 07/01/2023

Article Revision: 23/01/2023

Article Accepted: 26/01/2023

**Abstrak.** Blade turbin PLTU 400 MW ditemukan dalam keadaan patah. Kondisi ini diketahui pada saat major inspection dilakukan, dimana turbin sudah beroperasi selama 35 tahun. Patah pada blade sudah terjadi cukup lama sehingga terbentuk kerak oksidasi pada area patahan. Blade tersebut terletak pada tingkat Low Pressure (LP) Turbin. Material blade adalah Stainless Steel 17-4 PH. Analisis kegagalan dilakukan untuk mengetahui penyebab patah pada blade sehingga tidak terulang kembali dan mendapatkan rekomendasi untuk operasi turbin selanjutnya. Metodenya dengan melakukan verifikasi material blade, investigasi kegagalan dengan pemeriksaan visual dan fraktografi. Hasil dari investigasi menunjukkan bahwa kegagalan yang terjadi bukan berasal dari material blade. Penyebab patah diinisiasi oleh cacat pada leading edge karena benturan benda asing atau *Foreign Object Damage* (FOD). Pada saat penelitian ini dilakukan FOD tersebut belum bisa diidentifikasi wujudnya. Pada area blade yang patah terdapat bukti berupa *beachmark*, sehingga patah yang terjadi adalah patah fatigue. Perawatan berkala dengan interval yang lebih pendek perlu dilakukan untuk mencegah kegagalan terulang.

**Kata kunci:** Analisis kegagalan; blade turbin; 17-4PH; patah fatigue; FOD

**Abstract.** The 400 MW PLTU's broken turbine blade was discovered. The turbine had been in operation for 35 years when a thorough checkup revealed this issue. The blade's fracture has existed long enough for an oxidation crust to develop there. The Low Pressure (LP) Turbine level is where the blade is situated. Blade is made of 17-4 stainless steel. Failure analysis is done to determine the root causes of broken blades in order to prevent them from happening again and to obtain recommendations for future turbine operations. Verifying the blade material, failure investigation by visual inspection, and fractography are the steps in the procedure. The investigation's findings demonstrated that the failure was unrelated to the blade material. A flaw in the leading edge caused by foreign object damage is what starts the fracture (FOD). The FOD could not yet be identified when this study was being done. There is evidence of a beachmark in the location of the fractured blade, indicating that the fracture is a fatigue fracture. To stop failures from happening again, periodic maintenance at closer intervals is required.

**Keywords:** failure analysis, turbine blade, 17-4PH, fatigue fracture, FOD

## 1. PENDAHULUAN

Blade adalah komponen penting dalam sebuah turbin uap pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), yang bertugas mengubah energi dari uap dengan temperatur dan tekanan tinggi menjadi gerakan putar poros turbin [1][2], [3]. PLTU memanfaatkan energi panas dari pembakaran batu bara lalu mengubah fluida kerja (air) sehingga menjadi uap jenuh kering. Uap jenuh kering ini akan digunakan untuk memutar blade turbin [4]. Konversi energi yang dilakukan oleh blade turbin adalah mengubah energi kinetik uap menjadi energi mekanik sebagai penggerak mula bagi generator listrik untuk menghasilkan tenaga listrik [5]. Material blade diketahui terbuat dari *Stainless steel* 17-4 PH. *Stainless steel* adalah logam paduan berbasis besi yang mengandung setidaknya 10,5% kromium dan



maksimum 1,2% karbon. Baja tahan karat ini mengandung nikel sebagai elemen paduan utama lainnya, dengan kandungan hingga 38%, ditambah elemen paduan dan stabilisator lainnya. Kandungan kromium membuat baja tahan terhadap karat [6][7][8][9]. *Stainless steel* diklasifikasikan menjadi lima kelompok: austenitik, martensitik, feritik, austenitik-feritik (*dupleks*), dan *Precipitation Hardening* (PH). *Precipitation hardening stainless steels* (PHSS) adalah paduan dari besi-kromium-nikel dengan penambahan satu atau lebih elemen penguatan presipitasi seperti aluminium, titanium, tembaga, niobium dan molibdenum [10].

Kegagalan pada *blade* turbin menyumbang proporsi terbesar. Patah akibat *fatigue* adalah jenis kegagalan *blade* turbin yang paling umum. Hal ini dikarenakan kondisi dan lingkungan kerja *blade* yang sangat ekstrim, pada temperatur dan tekanan yang tinggi. Ketika *blade* patah, patahan sering terjadi di tengah dan di *root blade* [11]. Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sebagian besar dari kegagalan *blade* terkait dengan *fatigue*, retak korosi tegangan, dan *corrosion fatigue* [12][13]. Dari penelitian lain menunjukkan bahwa pada *blade* turbin uap paling sering terjadi kegagalan adalah pada bagian LP terutama pada baris terakhir. Hasil investigasinya menunjukkan bahwa sudu turbin uap LP yang gagal telah mengalami kelelahan korosi akibat efek gabungan dari erosi kavitasi dan *fatigue*/ kelelahan [14]. Hasil penelitian lainnya pada *blade* turbin LP menunjukkan bahwa inisiasi retakan dan perambatan retakan terjadi dalam siklus yang lebih sedikit pada kondisi resonansi. Ketika retakan muncul, hal itu menyebabkan perubahan kekakuan sudu dan jika selain itu, sudu bekerja dalam kondisi resonansi, frekuensi alaminya dan bahan sudu mengurangi kekuatan lelehnya [13][14].

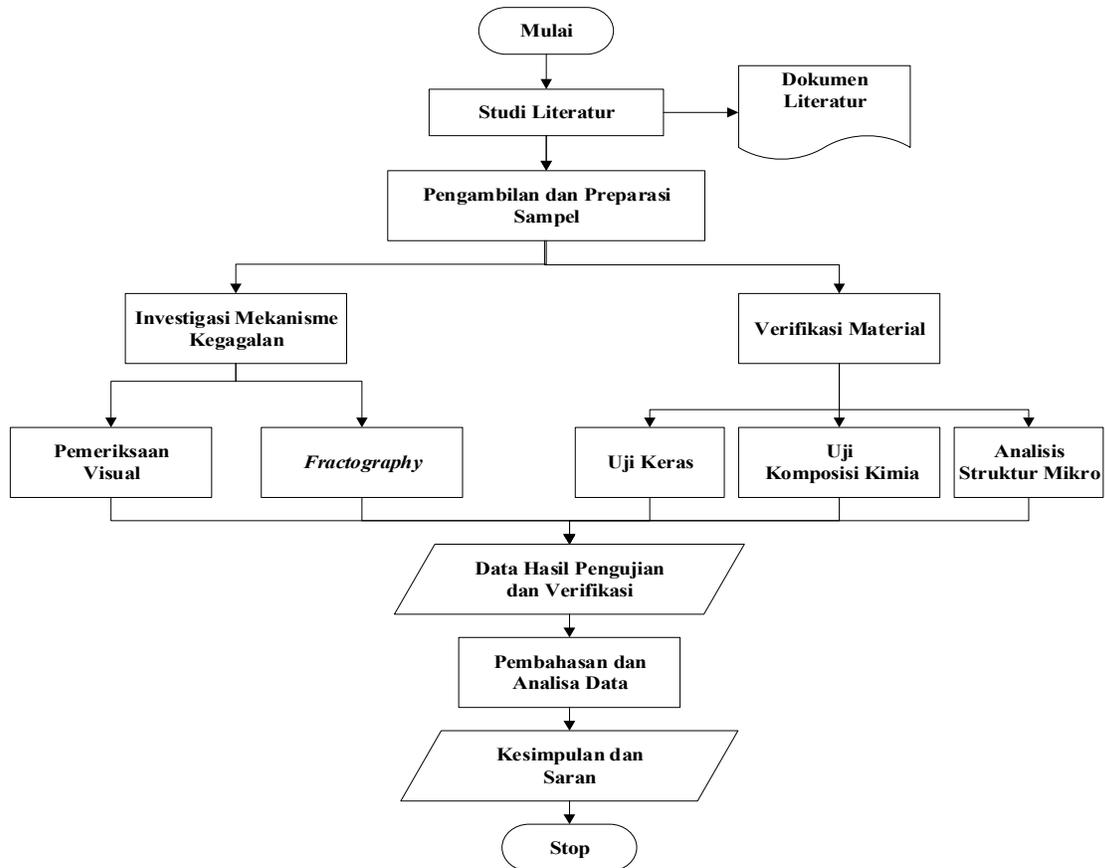
Turbin uap ini memiliki kapasitas 400 MW, dengan tipe *Tandem Compound Double Exhaust*. Terdiri dari 3 tingkat yaitu *High Pressure (HP) Turbine*, *Intermediate Pressure (IP) Turbine* dan *Low Pressure (LP) Turbine* [15]. Turbin pada tingkat LP terdiri dari 2 buah yaitu LP 1 dan LP 2. Pada saat turbin berhenti beroperasi untuk dilakukan pemeliharaan pada tingkat LP 1, ditemukan satu buah *blade* yang mengalami patah. Posisi *blade* yang patah tersebut masih terpasang pada tenon dan belum terlepas dari posisinya. Selanjutnya tenon dipotong untuk mengambil *blade* tersebut, sehingga tersisa bagian bawah sampai kaki/*root*-nya. Pada saat pelepasan sisa *blade* yang patah dilakukan dengan bantuan proses las. Hal ini yang membedakan dengan penelitian sebelumnya, setelah diamati kedua bagian permukaan patahan sudah tertutup oleh kerak oksidasi, diasumsikan patah sudah terjadi cukup lama dan *blade* tersebut sudah beroperasi selama 35 tahun. Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan mekanisme kegagalan, melakukan analisis penyebab terjadinya patah sehingga tidak terulang kembali dan menentukan rekomendasi untuk operasi turbin selanjutnya.

## 2. METODE

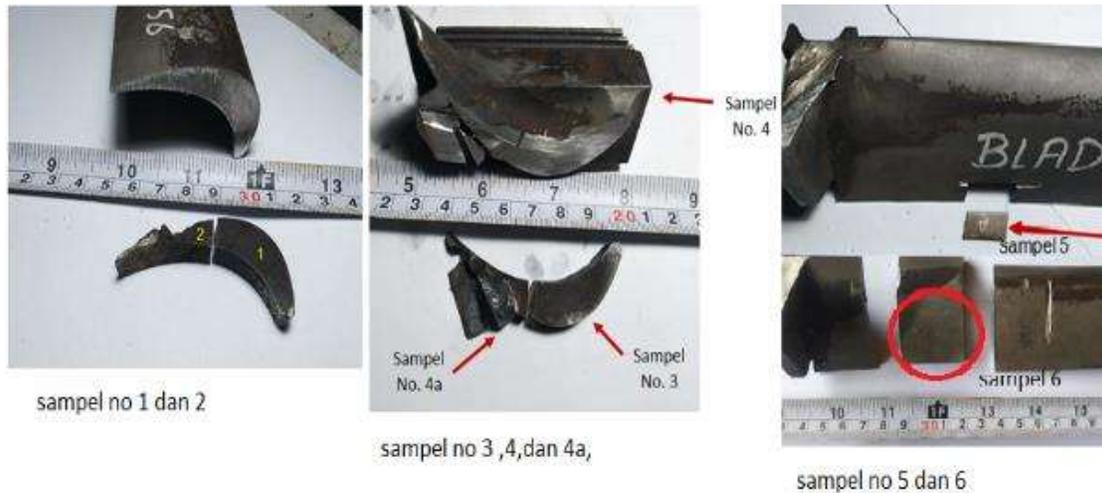
Metode penelitian terdiri atas dua kategori yaitu verifikasi jenis material *blade* dan analisis kegagalan pada *blade* yang patah. Verifikasi material *blade* dilakukan berdasarkan pengujian komposisi kimia, analisis struktur mikro dan uji keras. Analisis kegagalan dilakukan dengan pengujian inspeksi visual, fraktografi menggunakan mikroskop optik dan *Scanning Electron Microscope (SEM)*. Diagram alir penelitian dapat pada [Gambar 1](#).

Pengambilan sampel uji untuk menganalisis permukaan patahan diambil dari badan *blade* yang gagal sebanyak 2 sampel. Sampel no. 3, 4 dan 4a diambil dari permukaan patahan kaki *blade*, sepanjang area patahan dan kemudian dipotong lagi menjadi dua bagian dan diberi notifikasi sebagai sampel no.3 dan 4a. Sampel no. 5 masih diambil dari badan *blade* yang mengalami kegagalan sedangkan sampel no. 6 diambil dari *blade* yang berbeda tetapi masih dalam satu barisan LP Turbin dimana kondisinya tidak mengalami patah, semuanya dapat dilihat pada [Gambar 2](#). Sampel no.4a tidak dilakukan pengujian apapun karena mengalami proses las (pada saat pelepasan dari *disk*), sehingga tidak layak uji karena sudah mengalami perubahan fasa. Proses pembersihan kerak dengan bahan kimia dilakukan pada sampel no 1, 2 dan 3 untuk membantu pengamatan visual area patah.

Untuk melakukan uji verifikasi material, uji komposisi kimia menggunakan mesin uji *ARL 3460 Optical Emission Spectrometer (OES)*. Uji keras menggunakan mesin uji FR-100e metode *Micro vickers* dengan beban 300 Gram dan *dwellling time* 15 detik, dilakukan pada sepuluh titik yang berbeda.



Gambar 1. Diagram alir penelitian



Gambar 2. Lokasi pengambilan sampel

Analisis struktur mikro (ASM) dengan menggunakan mikroskop optik (Olympus GX-71) sampel di etsa dengan larutan vilela untuk menampilkan mikrostrukturnya dan dilihat dengan pembesaran 100 x dan 200 x. Selanjutnya untuk analisis kegagalan dilakukan inspeksi visual dengan bantuan kamera digital biasa dengan pembesaran sampai 4x serta Fraktografi dengan bantuan mikroskop optik dan alat *Scanning Electron Microscopy (SEM) Hitachi SU3500 with EDAX Octane Pro* yang dioperasikan pada 3.00 kV.



### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian terhadap sampel uji yang telah diambil dari *blade* yang mengalami kegagalan (dapat dilihat pada **Gambar 3**) adalah sebagai berikut:



**Gambar 3.** (a) lokasi kegagalan terjadi, (b) *blade* yang patah (tanda panah).

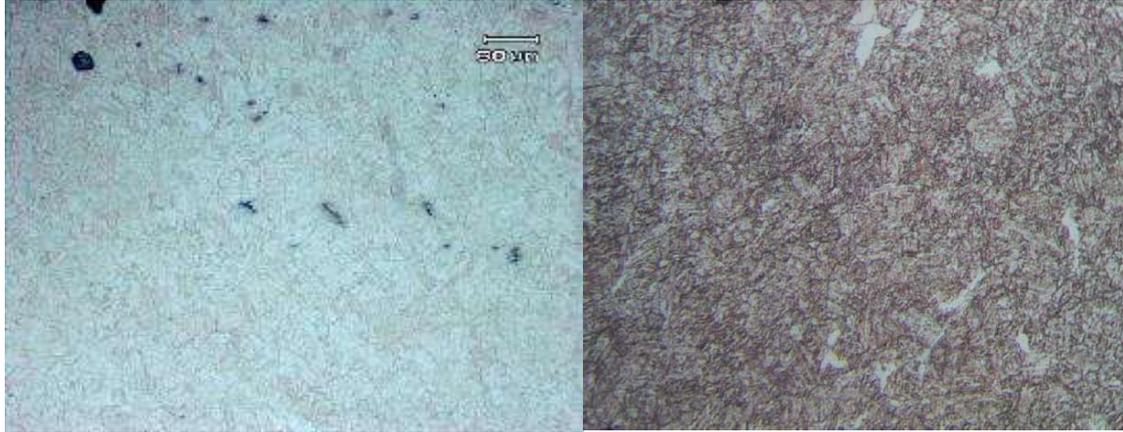
#### 3.1 Verifikasi jenis material *blade*

Verifikasi jenis material *blade* adalah berdasarkan pada hasil, uji komposisi kimia, uji keras dan analisis struktur mikro. Uji komposisi kimia dilakukan pada dua jenis sampel dari *blade* patah dan *blade* yang tidak patah, kemudian hasilnya dibandingkan dengan spesifikasi dari material AISI 630. Hasil uji komposisi kimia pada *blade* ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Hasil uji komposisi kimia pada kedua *blade* menunjukkan bahwa kedua *blade* sudah memenuhi spesifikasi teknis sesuai standar 17-4 PH atau ekuivalen dengan AISI 630. Kemudian hasil pengujian kekerasan terhadap sampel uji menghasilkan harga kekerasan rata-rata yaitu 331 HV. Untuk mendukung hasil pengujian komposisi kimia (**Tabel 1**), dilakukan analisis struktur mikro pada material *blade* patah yang dapat dilihat pada **Gambar 4**.

**Tabel 1.** Hasil uji komposisi kimia (% berat) [5].

	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Cu
Standar 17-4 PH AISI 630	0,07 (max)	1 (max)	0,03 (max)	0,04 (max)	1 (max)	3 - 5	15- 17,5	3-5
Hasil uji Blade patah	0,043	0,33	0,003	0,021	0,451	4,50	15,94	3,74
Hasil uji Blade yang tidak patah	0,042	0,36	0,002	0,021	0,469	4,45	15,90	3,64

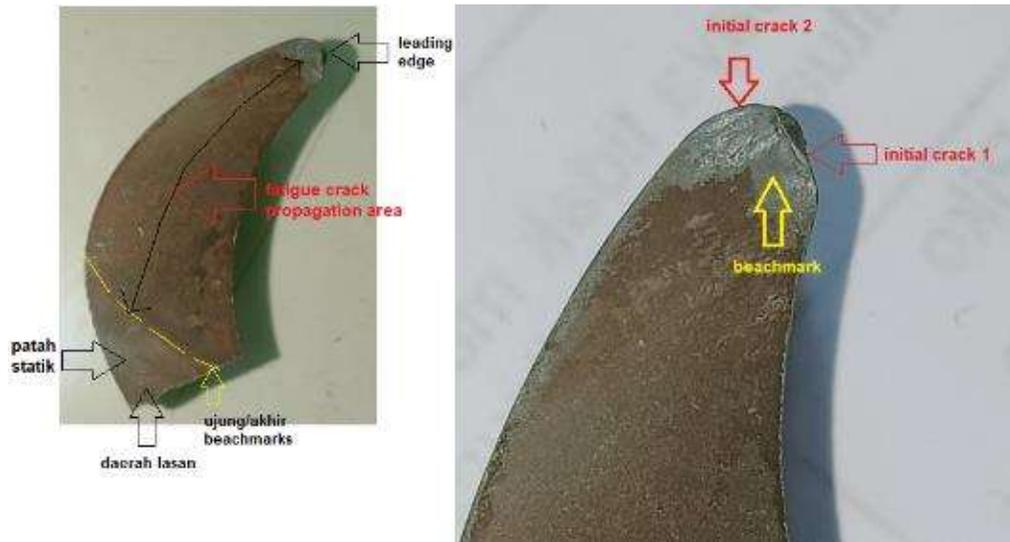


**Gambar 4.** Struktur mikro blade

Analisis struktur mikro pada **Gambar 4 (sebelah kiri)** menunjukkan material blade patah tersebut memiliki fasa *tempered martensite* dan tidak ada anomali. **Gambar 4 (sebelah kanan)** jenis material yang sama, dengan menggunakan pembesaran optik yang lebih besar [16]. Hasil ini menunjukkan bahwa material yang diuji memiliki ciri sama dengan struktur mikro material *Stainless steel 17-4 PH*. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, uji verifikasi material menunjukkan bahwa kegagalan yang terjadi pada *blade* tidak berkaitan dengan material yang digunakan. Dengan demikian penggunaan material *blade* yaitu *Stainless Steel 17-4 PH*, berdasarkan data dari manufaktur turbin sudah sesuai.

### 3.2 Analisis kegagalan.

Inspeksi secara visual pada permukaan patahan menggunakan bantuan kamera ditunjukkan pada **Gambar 5** yang memperlihatkan dengan jelas area patah statik dan area propagasi atau penjalaran patah statik. *Beachmark* pada area patah *fatigue* masih dapat terlihat walaupun tidak tampak jelas akibat tertutupi oleh oksida/kerak yang tebal. *Initial crack* (retak awal) terdeteksi pada *leading edge* dan terdapat lebih dari satu titik/lokasi.

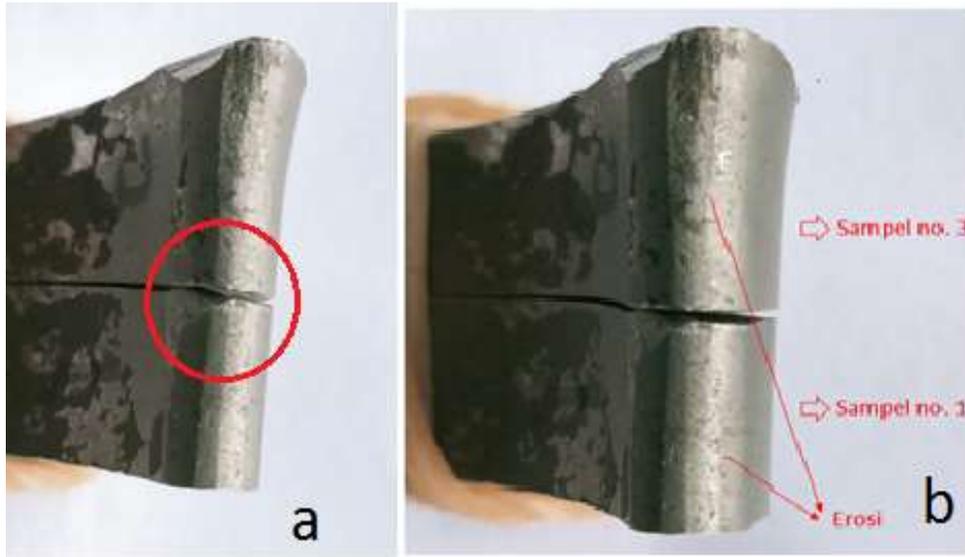


**Gambar 5.** Fraktografi permukaan patahan sampel 1.

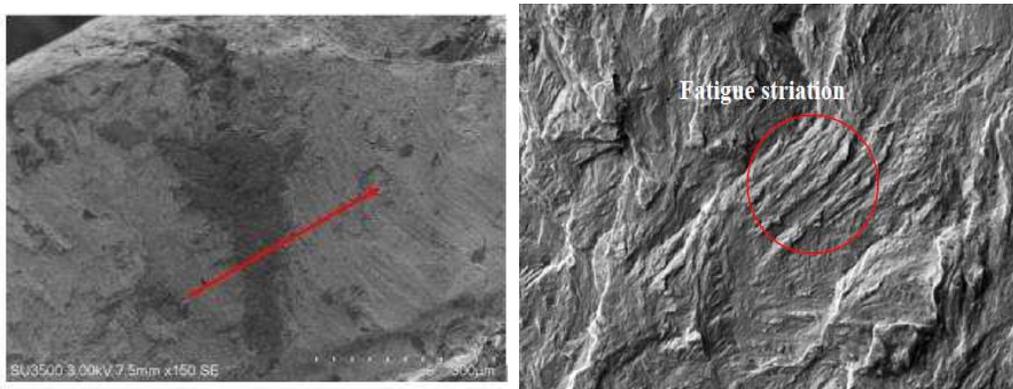
Kegagalan diawali dengan adanya benturan pada *leading edge* (*initial crack 1* dan *2*) oleh partikel asing atau *Foreign Object Damage (FOD)*. *Initial crack* yang terjadi akibat benturan dan beban dinamis yang bekerja pada *blade* menyebabkan retak berpropagasi. Sejalan dengan waktu, propagasi retak menimbulkan celah yang kemudian akan terisi oleh kondensat sehingga menyebabkan terjadi



proses oksidasi (ditunjukkan dengan warna hitam pada permukaan patahan blade). Permukaan hitam akibat oksidasi tersebut dengan waktu yang lama menyebabkan *beachmark* tidak tampak jelas/tidak mudah dikenali. Akan tetapi adanya permukaan patahan yang halus (bisa dilihat *crack propagation area* pada **Gambar 5**) menunjukkan bahwa blade mengalami patah *fatigue*. Benturan akibat FOD pada *leading edge* dapat dilihat pada Gambar 6. (a) dan (b) *leading edge* yang mengalami erosi. Penelitian dengan material *blade* yang sama 17-4 PH dan [17] untuk lokasi kegagalan yang sama di LP turbin dapat diambil sebagai pembandingan untuk mengetahui bagaimana terjadinya patah *fatigue* yang diinisiasi oleh korosi [10], walaupun pada penelitian ini tidak ditemukan korosi yang seperti itu.



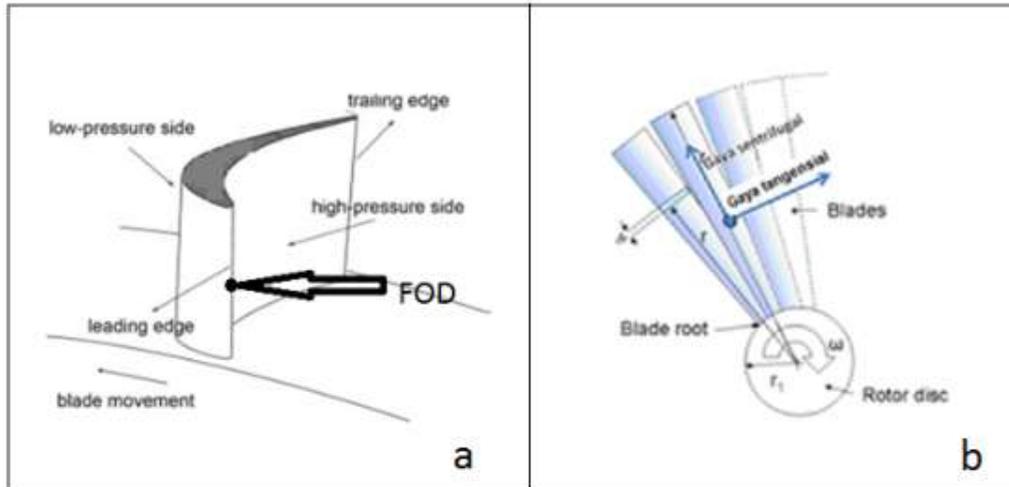
**Gambar 6.** a. Lokasi benturan akibat FOD (lingkaran merah) b. Erosi pada area *leading edge*



**Gambar 7.** Hasil SEM menunjukkan striasi (garis halus) ditunjukkan tanda panah

*Initial crack* seperti ditunjukkan pada **Gambar 6** diduga akibat terbentur benda asing yang menimbulkan cacat pada *leading edge* sehingga terjadi turbulensi lokal. Turbulensi lokal meningkatkan laju erosi pada area tersebut. Selain itu adanya benturan akibat FOD menyebabkan area pada *leading edge* yang semula *smooth* dengan *drag force* yang rendah menjadi tidak *smooth* (cacat) sehingga terjadi peningkatan *drag force*. Selanjutnya pengamatan dilakukan pada area patah menggunakan SEM pada **Gambar 7** (sebelah kiri) hasil pengambilan gambar pada area *fatigue crack propagation* memperlihatkan adanya striasi (garis halus) yang ditunjukkan tanda panah. **Gambar 7** (sebelah kanan) diambil dari penelitian [10] yang menunjukkan *fatigue striation*, menggunakan SEM dengan pembesaran 500 X. Kemudian pada **Gambar 8** a menunjukkan aliran uap yang mengenai *blade*, uap mengalir dari *leading edge* menuju ke *trailing edge* sehingga menyebabkan *blade* bergerak ke arah seperti yang ditunjukkan. Titik yang ditunjukkan oleh tanda panah merupakan lokasi benturan

akibat benda asing (yang belum bisa diidentifikasi wujudnya), dimana area tersebut merupakan sisi yang mendapat tekanan yang tinggi dari uap.



**Gambar 8.** (a) Profil *blade* dan lokasi FOD [18] (b) Gaya yang bekerja pada *blade* [17][16]

Gaya-gaya yang bekerja pada *blade* [18] adalah sebagai berikut (**Gambar 8.b**):

- a) *Centrifugal force*
- b) *Centrifugal bending*
- c) *Steady steam bending*
- d) *Unsteady centrifugal forces* akibat vibrasi lateral dari *shaft*
- e) *Alternating bending (Unsteady bending forces)*

Gaya-gaya yang bersifat tetap (*steady force*) yaitu (a), (b), (c) jarang menjadi faktor utama penyebab kegagalan *blade* kecuali terjadi *overload* pada saat turbin beroperasi. Umumnya, penyebab utama kegagalan *blade* adalah akibat *unsteady force* (d) dan *alternating bending* (e). *Alternating bending* terjadi karena *unsteady steam force*, *blade resonance* dan vibrasi rotor (torsional dan aksial). *Unsteady bending forces* seringkali menyebabkan *blade* mengalami kegagalan *fatigue*. FOD merupakan penyebab terjadinya *initial crack*, dimana *unsteady bending forces* yang berperan mempercepat propagasi retak.

#### 4. SIMPULAN

Dari penelitian yang sudah dilakukan dapat disimpulkan bahwa verifikasi jenis material *blade* berdasarkan hasil uji komposisi kimia, analisis struktur mikro dan uji keras menunjukkan material *blade* adalah jenis baja tahan karat 17-4 PH yang ekuivalen dengan AISI 630. Patah pada *blade* disebabkan oleh *Foreign Object Damage (FOD)* yang membentur sisi *leading edge* dan menimbulkan *initial crack*. Beban dinamis yang diterima *blade* menyebabkan *crack* berpropagasi dan akhirnya mengalami patah. Patah yang terjadi merupakan akibat *fatigue*, dengan ciri adanya *beachmark* pada area patah setelah diperiksa dengan SEM. Hal ini diperkuat dengan umur operasi yang sudah lama sehingga material *blade* mengalami kelelahan atau *fatigue*. Dalam hal ini perlu ditelaah lebih mendalam tentang FOD yang menjadi penyebab kegagalan. Pada penelitian ini belum dapat mengidentifikasi dengan jelas terkait dengan FOD tersebut. Rekomendasinya adalah turbin masih dapat dilanjutkan untuk beroperasi setelah dilakukan penggantian komponen yang rusak, namun proses inspeksi perlu dilakukan lebih teliti dengan jangka waktu lebih pendek mengingat umur *blade* sudah melampaui umur ekonomisnya agar jika terjadi *crack* dapat segera terdeteksi

#### REFERENSI

- [1] S. Rani, A. K. Agrawal, and V. Rastogi, "Case Studies in Engineering Failure Analysis Failure



- analysis of a first stage IN738 gas turbine blade tip cracking in a thermal power plant,” *Chem. Phys. Lipids*, vol. 8, 2017.
- [2] D. Ziegler, M. Puccinelli, B. Bergallo, and A. Picasso, “Investigation of turbine blade failure in a thermal power plant,” *Case Stud. Eng. Fail. Anal.*, vol. 1, no. 3, 2013, doi: 10.1016/j.csefa.2013.07.002.
- [3] L. K. Bhagi, P. Gupta, and V. Rastogi, “A Brief Review on Failure of Turbine Blades, DOI: 10.13140/RG.2.1.4351.3768,” *Proc. STME-2013 Smart Technol. Mech. Eng.*, no. October, pp. 1–8, 2013, doi: 10.13140/RG.2.1.4351.3768.
- [4] A. D. Wibowo, S. Tinggi, T. Muhammadiyah, and J. Barat-indonesia, “Online Blade Washing Analysis on Gas Turbine Performance in Power Plants,” vol. 6, no. 3, pp. 209–220, 2021, doi: 10.22219/jemmmme.v6i3.18140.
- [5] M. Nurbanasari and Abdurrachim, “Crack of a first stage blade in a steam turbine,” *Case Stud. Eng. Fail. Anal.*, vol. 2, no. 2, 2014, doi: 10.1016/j.csefa.2014.04.002.
- [6] A. P. Tschiptschin and C. R. F. Azevedo, “Failure analysis of turbo-blower blades,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 12, no. 1, pp. 49–59, 2005, doi: 10.1016/j.engfailanal.2004.05.001.
- [7] F. P. Brennan, “Fatigue and Fracture Mechanics Analysis of Threaded Connections,” no. September, 1992.
- [8] *Material Characterization*.
- [9] Ć. Diana and B. Fakić, “Review Of The Development Of Research In The Design Of Semi Austenitic Stainless Steel 17-7ph,” *J. Trends Dev. Mach. Assoc. Technol.*, vol. 17, no. May, 2013.
- [10] Y. Wei *et al.*, “Analysis on corrosion fatigue cracking mechanism of 17-4PH blade of low pressure rotor of steam turbine,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 118, 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104925.
- [11] D. Zhang and Y. H. Xie, “Study on service life of last stage blade with damped structure in large power steam turbine,” in *Advanced Materials Research*, 2008, vol. 44–46, doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.44-46.803.
- [12] L. K. Bhagi, P. Gupta, and V. Rastogi, “Fractographic investigations of the failure of L-1 low pressure steam turbine blade,” *Case Stud. Eng. Fail. Anal.*, vol. 1, no. 2, 2013, doi: 10.1016/j.csefa.2013.04.007.
- [13] D. N. Adnyana, “Corrosion Fatigue of a Low-Pressure Steam Turbine Blade,” *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 18, no. 1, 2018, doi: 10.1007/s11668-018-0397-5.
- [14] J. A. Rodríguez *et al.*, “Fatigue of steam turbine blades at resonance conditions,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 104, 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.05.027.
- [15] E. Saito, N. Matsuno, K. Tanaka, S. Nishimoto, R. Yamamoto, and S. Imano, “Latest Technologies and Future Prospects for a New Steam Turbine,” *Mitsubishi Heavy Ind. Tech. Rev.*, vol. 52, no. 2, p. 39, 2015.
- [16] Z. Mazur, R. Garcia-Illescas, J. Aguirre-Romano, and N. Perez-Rodriguez, “Steam turbine blade failure analysis,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 15, no. 1–2, 2008, doi: 10.1016/j.engfailanal.2006.11.018.
- [17] N. Hoyle and E. Flow, “Royal Academy of Engineering : Renewable Power,” *Wind Turbine Power Calc.*, vol. 1, no. 1, 2009.
- [18] H. G. Naumann, “STEAM TURBINE BLADE DESIGN OPTIONS: HOW TO SPECIFY OR UPGRADE,” 1982.