



Analisa Kegagalan Pada Disc Turbin Uap Penggerak Kompresor CO₂ Kapasitas 8000kw

Budiarto^a, Fathurrahman Santosa^b

Jurusan Teknik Mesin, Universitas Kristen Indonesia

Mayjen Sutoyo No.2, RT.9/RW.6, Cawang, Kec. Kramat jati, Kota Jakarta Timur., Jakarta, Indonesia

e-mail :fathur.santosa@yahoo.com

Abstrak

Pada industri pupuk salah satu turbin digunakan untuk menggerakkan kompresor yang berfungsi memampatkan fluida gas CO₂ untuk proses pembentukan karbonat. Turbin uap tersebut beroperasi pada kecepatan 11.019 rpm dengan uap yang masuk di sisi inlet 81,5 kg/cm²A dan temperatur uap air 480°C yang sudah beroperasi pada tahun 1998. Pada kegiatan turnaround tahun 2018 turbin dilakukan pembongkaran, saat proses inspeksi ditemukan crack pada bagian disc tingkat keempat. Guna lebih lanjut mengetahui penyebab kegagalan tersebut dilakukan investigasi berupa pengamatan dan pengujian pada bagian yang crack. Hasil yang diperoleh pada proses pengamatan inspeksi visual crack terjadi pada permukaan luar sisi saluran uap masuk dengan patahan membentuk pola beach mark tanda material mengalami fatigue, NDT penetrant test memperlihatkan rambatan crack dari bagian dalam alur sudu hingga permukaan luar disc, pengujian komposisi kimia dengan metode EPMA menunjukkan adanya penurunan kadar kandungan senyawa kimia Fe, Cr dan peningkatan O, C, S, P dan S hal ini menyebabkan logam teroksidasi, tidak tahan korosi, nilai kekerasan meningkat dan menurunnya keuletan serta ketangguhan terhadap beban impact, pengamatan makroskopis dan mikroskopis menggunakan SEI struktur yang dihasilkan berupa fase martensit temper yang secara keseluruhan ditutupi dengan skala oksidasi. Meskipun strukturnya masih terlihat, tetapi hasil pengujian kekerasan terdapat peningkatan yang signifikan sebesar 5,2% hingga 11,7% dari kekerasan yang ditentukan sebesar 233HV. Kesimpulannya bahwa awal terjadinya crack karena material tersebut fatigue. Crack tersebut membuat adanya celah yang menjadikan pengendapan senyawa kimia. Endapan yang muncul mengubah komposisi senyawa kimia sehingga terjadi oksidasi yang berujung pada peningkatan kekerasan yang membuat material tersebut getas menyebabkan crack menjalar.

Kata kunci: Turbin uap, Crack, Fatigue

1. Pendahuluan

Turbin merupakan mesin penggerak utama yang menggerakkan generator dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) [1]. Pemeliharaan dan kehandalan (maintenance and reliability) merupakan aktivitas yang berkaitan untuk mempertahankan peralatan sistem kerja mesin dalam kondisi baik untuk waktu tertentu sehingga tidak mengganggu proses produksi [3]. Pada industri pupuk sebagian turbin uap digunakan untuk menggerakkan pompa dan juga menggerakkan kompresor yang berfungsi untuk memampatkan fluida gas CO₂ yang akan digunakan dalam proses pembentukan karbonat [2].

Kerusakan pada turbin uap dalam beroperasi sering ditemui terutama pada bagian sudu namun kali ini kerusakan ditemui pada bagian disc tempat sudu duduk pada rotor hal ini cukup unik karena jarang ditemui. Pada umumnya, kerusakan pada turbin dapat dikelompokkan atas dua kategori: (a) fatigue, mencakup fatigue siklus rendah dan siklus

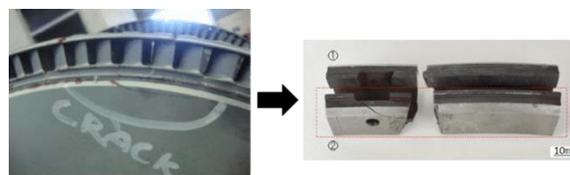
tinggi; dan (b) patah creep. (Naeem, 2008). Oleh sebab itu, perlu diketahui kerusakan-kerusakan yang terjadi pada turbin berikut mekanisme terjadinya.

Rotor turbin ini dioperasikan terus menerus sejak tahun 1998 dan turbin belum pernah dilakukan check internal steam turbine sejak pertama kali dioperasikan. Pada TA (Turn Around) 2018 dilakukan overhaul, ditemukan adanya keretakan pada disc turbin stage keempat. Kemudian, dilakukan penggantian rotor exservice dengan spare rotor. Untuk menganalisis akar penyebab retak disc rotor, investigasi detail akan dilakukan.

2. Metodologi

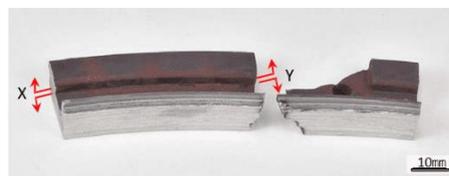
2.1 Material

Sebelum dilakukan pengamatan dan pengujian, sampel dipotong melalui proses permesinan dengan mengikuti standar pabrikan. Sampel dipotong menjadi beberapa bagian dengan tiga tahapan pemotongan.



Gambar 1. Pemotongan pada sampel pertama

Yang pertama sampel dipisahkan dari unit. Sampel yang pertama tersebut dilakukan proses pemotongan kembali agar bagian retakan dapat lebih terlihat.



Gambar 2. Sampel kedua

Sampel kedua dilakukan proses pemotongan kembali agar permukaan dalam retakan dapat terlihat.



Gambar 3. Sampel ketiga

2.2 Data Teknis

Turbin uap ini berjenis *Extraction Mixing Condensing Turbin*, turbin jenis ini merupakan gabungan dari dua jenis turbin yaitu *Extraction turbin* dan *Mixing(admission) turbin*.



Turbin ini juga termasuk dalam jenis multistage steam turbine dengan komposisi turbin impuls di bagian depan dan turbin reaksi di belakang yang terdiri terdiri atas 7 stage.

Dalam desain turbin ini kecepatan pada saat beroperasi yaitu 11.019 rpm yang menggunakan fluida kerja uap air (*steam*) dengan tekanan bagian *high pressure* di sisi *inlet* 81.5 kg/cm²A dan temperatur uap air 480°C yang mengerakkan sudu – sudu turbin setiap *stage*. Bagian *intermediate stage*, turbin mengekstraksikan uap air dengan tekanan 22.03 kg/cm²A dan temperatur 321°C untuk digunakan proses lain pada bagian ini disebut *extraction*. Pada *stage* akhir, terdapat penambahan *steam* dengan tekanan 4.03 kg/cm²A dan steam keluar menuju kondenser untuk didinginkan dan mengubah fase *steam* menjadi air dengan tekanan 0.13 kg/cm² *absolute* yang disebut dengan *exhaust*.

2.2 Pengamatan Visual

Masing-masing sampel yang sudah dipisahkan dilakukan pengamatan visual dengan mata telanjang secara menyeluruh dari sisi permukaan luar hingga permukaan dalam.

2.3 Pengujian Non Destruktif

Jenis pengujian non destruktif yang akan dilakukan yaitu uji penetrasi dengan referensi standar ASTM-E-165. Penetrasi yang digunakan magnaflux SKL SP2 dengan kontras warna *red eye* dengan menunggu hasil selama 15 menit selanjutnya sampel dibersihkan dengan cairan *remover* SKC S setelah itu cairan developer SKD S2 disemprotkan kembali ke seluruh permukaan luar, kemudian alur rambatan retakan akan terlihat.

2.4 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia menggunakan EPMA (*Electron Probe Micro Analyzer*) semi kuantitatif. Alat EPMA yang digunakan yaitu CSM JXA-8200 dengan spesifikasi tegangan 0,5 hingga 30 KeV, *vacuum mode* 7×10^{-4} Pa, *electron gun* tungsten filament, tipe sampel solid, elemen yang dapat dianalisis 6C hingga 92U, analisis sinar-X (perkiraan 1%) analisis dispersi panjang gelombang (% hingga ppm). Sampel yang dianalisa yaitu permukaan luar pada sampel pertama, permukaan dalam dekat area patahan, dan permukaan dalam material pada sampel ketiga.

2.5 Pengujian Struktur Mikro dan Makro

Pada pengujian makroskopis dan mikroskopis sampel tersebut diampelas halus hanya sebatas membersihkan kotoran yang timbul di permukaan. Proses *polishing* tersebut dilakukan secara manual tidak menggunakan mesin agar tidak terjadi induksi deformasi mekanis yang menyebabkan sampel tersebut berubuh struktur. Pengamatan tersebut menggunakan alat yang sama digunakan oleh EPMA dengan mode gambar yang diambil yaitu *scanning electron image* (SEI). Sampel makroskopis yang diamati pada bagian alur retakan sedangkan mikroskopis sampel yang diamati pada permukaan bagian dalam retakan.

2.6 Pengujian Kekerasan Material

Pengujian kekerasan dilakukan pada sampel bagian alur retakan dengan menggunakan metode *Hardness Vickers* (HV) dengan spesifikasi alat sebagai berikut :

Nama alat : Frank Finotest
Metode Uji : Hardness Vickers (HV)
Beban (P) : 0,1 Kgf
Sudut Identor : 136°
Waktu Uji : 10 detik
Temperatur Uji : 27,5 °C (Temperatur ruangan)
Standar Uji : SNI 19-0409-1989

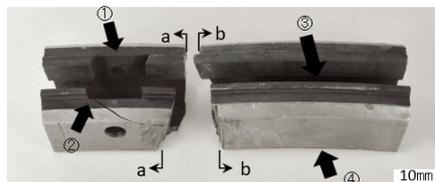
Sampel yang akan diuji yaitu pada permukaan bagian luar alur retakan.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengamatan dan pengujian dituangkan dalam bentuk pembahasan yang terperinci berikut ini.

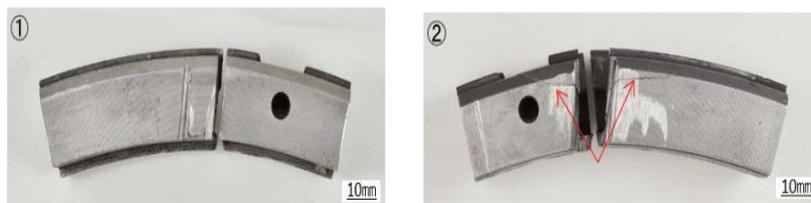
3.1 Pengamatan Visual

Jika dilihat secara keseluruhan permukaan luar retakan spesimen memiliki corak warna abu abu. Untuk mengetahui rambatan retakan *disc* tersebut harus dipisahkan kembali menjadi beberapa bagian.



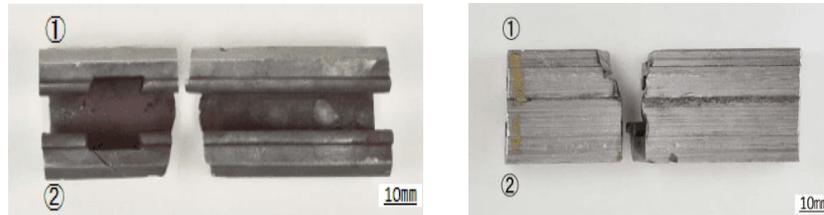
Gambar 4. Bagian *disc blade* integrasi yang dipisahkan

Disc tersebut dipisahkan menjadi dua bagian utama yaitu bagian a dan bagian b. Setelah dipisahkan permukaan masing-masing bagian akan diamati.



Gambar 5. Permukaan luar sisi saluran uap keluar (1) dan Permukaan luar sisi saluran uap masuk (2)

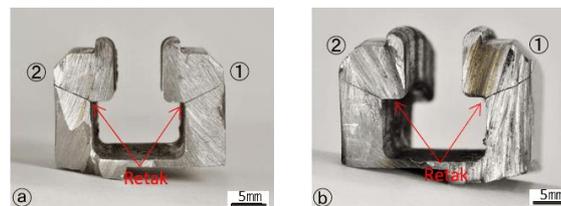
Pada permukaan luar sisi saluran uap keluar tidak terlihat rambatan retakan pada bagian a dan b di posisi atas. Pada permukaan luar sisi saluran uap masuk terlihat rambatan retakan pada bagian a dan b di posisi atas.



Gambar 6. Tampak atas dan bawah sisi duduk alur sudu

Pada tampak atas permukaan sisi alur sudu terdapat beberapa titik poros dan ada bagian yang berwarna abu-abu kecoklatan. Pada tampak bawah permukaan sisi alur sudu tidak terlihat ada retakan maupun titik korosi karena pada bagian tersebut bagian yang melalui proses permesinan.

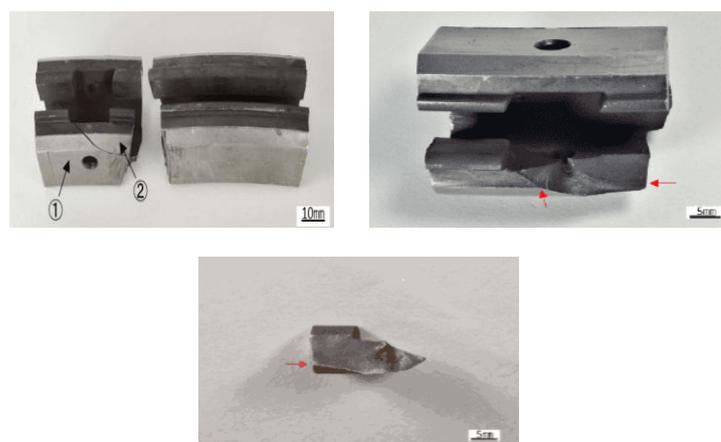
Selanjutnya bagian yang akan diamati yaitu tampak samping bagian a dan b.



Gambar 7. Sisi aksial bagian a dan b

Jika dilihat dari sisi aksial bagian a dan b, retakan merambat dari bagian dalam ke bagian luar, diperkirakan retakan tersebut kontak langsung dengan sudu turbin.

Selanjutnya pengamatan akan dilakukan lebih detail pada retakan yang mengalami patahan pada bagian a.



Gambar 8. Detail patahan permukaan luar sisi saluran uap masuk

Posisi patahan ada pada bagian paling atas permukaan retakan, terlihat busur seperti pola patahan *beach mark*.



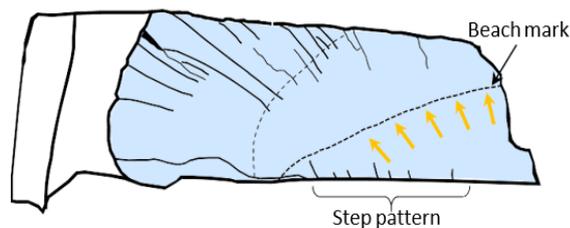
Gambar 9. Detail bagian y setelah dipisahkan

Permukaan bagian dalam setelah dipisahkan menunjukkan warna abu kecoklatan. Permukaan tersebut membentuk pola goresan radial pada bagian luarnya dan mendatar pada sisi sudut dari alur sudut. Pada bagian ujung retakan terdapat bentuk busur melingkar. Permukaan pada retakan dibersihkan agar pola-pola sudut retakan bisa terlihat dengan jelas.



Gambar 10. Permukaan retakan bagian dalam setelah dibersihkan

Terlihat setelah pembersihan memiliki warna abu-abu dan pola busur melingkar seperti *beach mark* diamati pada permukaan retakan setelah dibersihkan.



Gambar 11. Sketsa permukaan retakan

Selain itu, pola beberapa langkah diamati pada sisi alur sudu, yang merupakan sisi titik awal. Oleh karena itu, diperkirakan bahwa retakan yang terjadi dari berbagai sumber dan sudah berlangsung lama.

Bagian permukaan retakan yang mengalami patahan akan diamati lebih detail.



Gambar 12. Posisi permukaan retakan yang akan diamati detail

Permukaan retakan bagian dalam juga memiliki penampakan pola *beach mark* yang terbentuk dari sudut alur sudu di dekat bagian yang dipisahkan. Perkiraan posisi awal terjadinya retakan ditunjukkan pada posisi tersebut.

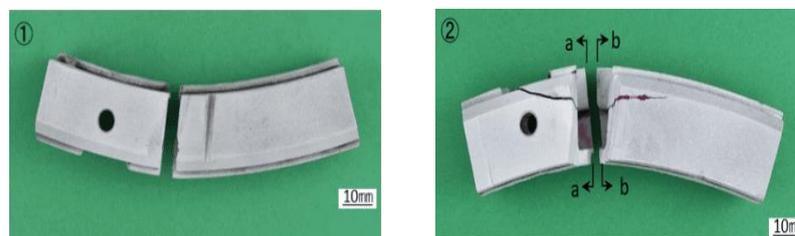


Gambar 13. Hasil perbesaran permukaan retakan

Jejak korosi berbentuk lubang porositas ditemukan pada permukaan alur sudu di dekat titik awal terjadinya retakan (garis putus-putus biru).

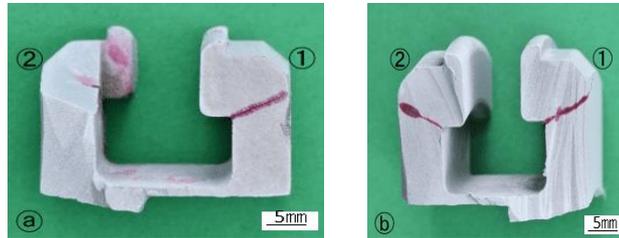
3.2 Pengujian *Non Destructive Test (NDT) Penetrant*

Cairan *penetrant* dan *developer* disemprotkan ke seluruh bagian permukaan luar sampel *disc*.



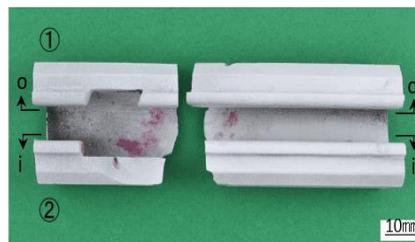
Gambar 14. Hasil *penetrant test* permukaan luar sisi saluran uap keluar (1) dan masuk (2)

Pada permukaan luar sisi saluran uap keluar tidak menunjukkan adanya retakan pada permukaan luar sisi saluran uap keluar dan tidak menunjukkan adanya area korosi. Sedangkan pada permukaan luar sisi saluran uap masuk hasil penetrant test menunjukkan adanya retakan.



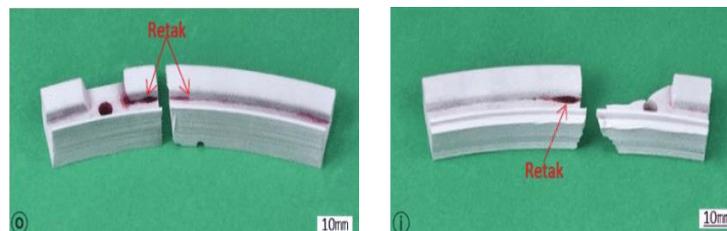
Gambar 15. Hasil *penetrant test* sisi aksial pada bagian a dan b

Tampak samping bagian a sisi saluran uap keluar, retakan muncul pada bagian dalam tetapi tidak merambat ke permukaan luar. Untuk sisi saluran uap masuk di bagian patahan yang berpola *beach mark* terjadi retakan kecil terlihat pada *penetrant* berwarna merah yang menyerap di beberapa titiknya. Sedangkan pada tampak samping bagian b sisi saluran uap masuk, retakan terjadi pada bagian dalam yang merambat ke permukaan luar dan retakan muncul di permukaan luar sisi saluran uap masuk. Untuk sisi saluran uap keluar retakan terjadi bagian dalam dan merambat ke permukaan luar tetapi retakan tidak muncul pada permukaan luar.



Gambar 16. Hasil *penetrant test* pada permukaan sisi dudukan alur sudu

Pada permukaan sisi dudukan alur sudu terlihat *penetrant* berwarna merah yang sudah disemprotkan menyerap di beberapa titik yang mengalami korosi yang sudah berpori-pori. Untuk mengetahui arah retakan pada bagian o dan i dudukan alur sudu kembali dipisahkan agar dilakukan penyemprotan *penetrant* juga.



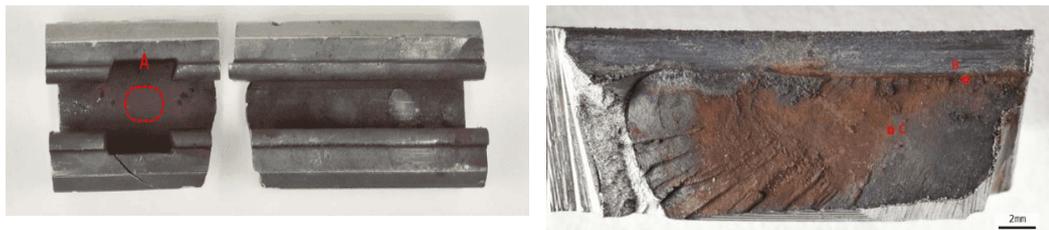
Gambar 17. Hasil *penetrant test* bagian o dan i permukaan dalam sisi saluran uap keluar

Hasil *penetrant test* pada bagian o permukaan dalam sisi saluran uap keluar keduanya menunjukkan retakan linier arah melingkar yang terdapat pada bagian dudukan *root blade*. Sedangkan pada gambar hasil penetrant test pada bagian i permukaan dalam sisi saluran uap masuk hanya salah satu pada bagian sebelah kiri (bagian b) yang menunjukkan retakan

linier arah melingkar dan terdapat pada bagian dudukan *root blade* juga, pada sebelah kanan (bagian a) tidak terlihat adanya retakan pada bagian dudukan *root blade* ataupun dibagian lainnya.

Diantara hasil penetrant test tersebut terlihat jelas pada bagian i sebelah kiri (bagian b) lebih pekat daripada bagian o sebelah kiri (bagian a) dan sebelah kanan (bagian b), yang artinya retakan tersebut paling dalam.

3.3 Pengujian Komposisi Kimia



Gambar 18. Posisi sampel yang diambil

Pengujian komposisi kimia ini diambil dari permukaan luar dudukan alur sudu (sampel A), permukaan dalam alur retakan (sampel B), dan permukaan dalam material dasar (sampel C).

Tabel 1. Hasil pengujian komposisi kimia dari sampel A,B, dan C

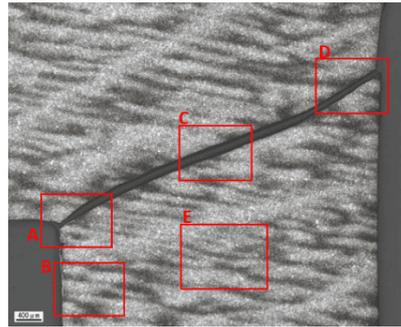
	elements(wt%)																				
	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Mo	Pb
A	21.0	24.4	2.3	0.2	0.1	5.2	0.2	0.6	–	–	1.2	–	–	0.7	0.4	40.5	0.7	1.5	0.8	–	–
B	9.6	23.6	0.9	0.2	0.5	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	–	0.6	0.5	56.6	0.6	1.9	1.2	0.6	0.4
C	1.8	29.2	0.5	0.2	0.4	0.9	0.3	0.1	0.1	–	0.4	0.2	0.1	0.6	0.6	60.7	0.7	0.9	2.0	0.3	–
Base metal 2-1(NiCrMo V)	0.25 ~ 0.33	–	–	–	–	0.15~ 0.35	≤0.015	≤0.015	–	–	–	–	0.05~ 0.15	1.00~ 1.50	0.35~ 0.65	Bal.	1.00~ 1.50	–	–	0.40~ 0.60	–

Selain unsur logam dasar, O, Na, Mg, Al, Ca, Cu, dan Zn terdeteksi pada semua sampel. Untuk unsur Cl, Ti, Mo hanya muncul pada sampel B dan C. Unsur K, Pb hanya muncul pada sampel B. Unsur C, Si, P, S terdeteksi naik dari unsur logam dasar pada semua sampel. Unsur Fe, Cr terdeteksi turun dari unsur logam dasar pada semua sampel. Unsur V tidak terdeteksi pada semua sampel sedangkan unsur Mo tidak terdeteksi hanya pada sampel A. Untuk unsur yang lainnya tidak ada perubahan yang signifikan.

3.4 Pengujian Struktur Makro dan Mikro

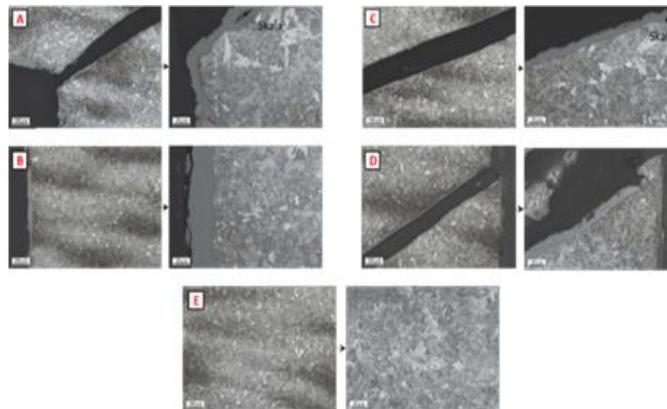
3.4.1 Pengujian Struktur Makro

Permukaan luar alur retakan bagian aksial tersebut akan dilakukan perbesaran 40x, 100x, 200x diamati agar struktur makroskopis dapat terlihat jelas.



Gambar 19. Bagian permukaan luar alur retakan yang akan diamati

Permukaan luar alur retakan bagian aksial tersebut akan dilakukan perbesaran 40x, 100x, 200x diamati agar struktur makroskopis dapat terlihat jelas.



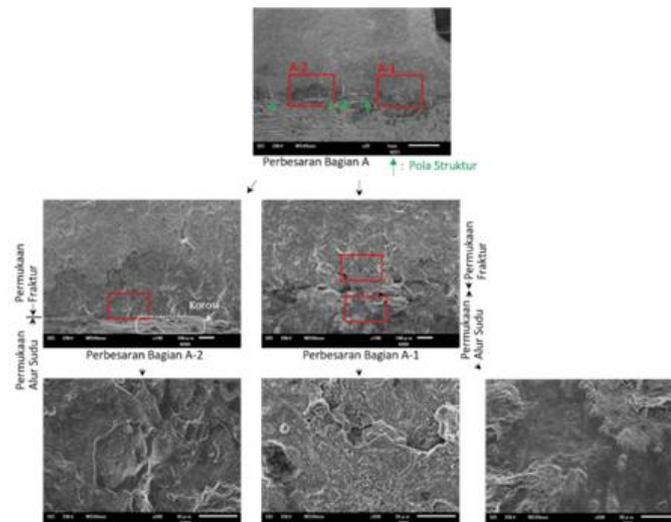
Gambar 20. Perbesaran 100x dan 200x bagian A,B,C,D, dan E permukaan luar alur retakan

Tidak terlihat adanya cacat intrinsik yang ditemukan pada keseluruhan bagian selain itu retakan yang terjadi tidak bercabang sedangkan skala oksidasi muncul sekitar 10 hingga 20 μ m dengan makro struktur berjenis martensit temper.

3.5 Pengujian Struktur Mikro



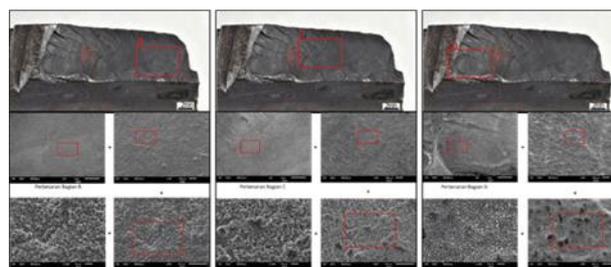
Gambar 21. Posisi bagian A permukaan retakan dalam yang akan diamati



Gambar 22. Perbesaran 20x sampai dengan 500x bagian A permukaan retakan dalam

Beberapa pola diamati di dekat titik awal (bagian A). Permukaan retakan titik awal A yang diperkirakan menjadi titik awal retakan setelah diamati pola tersebut secara keseluruhan ditutupi dengan skala oksidasi. Sulit untuk memahami detail morfologi permukaan retakan tersebut.

Pada titik awal A-1 dan A-2 yang pola langkah skala oksidasi terkelupas dengan logam dasar terbuka serta tidak ada jejak permukaan retakan yang tersisa. Pada perbesaran tanda korosi halus diamati pada sisi permukaan alur sudu namun tidak tampak bahwa retakan dihasilkan dari lubang korosi.



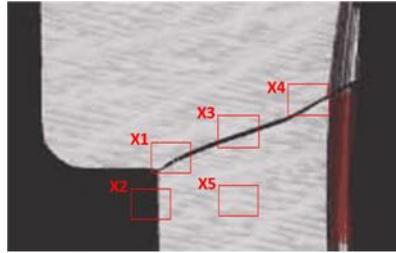
Gambar 23. Permukaan dalam retakan bagian B, C, D diamati serta dilakukan perbesaran 20x sampai dengan 1000x

Permukaan dalam retakan pada bagian datar (B) ditutupi dengan skala oksidasi dan detail morfologi permukaan retakan tidak dapat dipahami.

Permukaan dalam retakan di dekat batas antara bagian datar dengan bagian pola garis radial (C) ditutupi dengan skala oksidasi dan detail morfologi permukaan retakan tidak dapat dipahami.

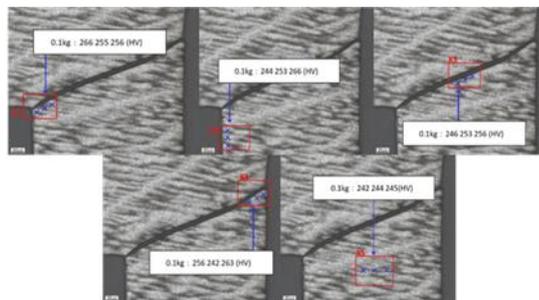
Permukaan retakan pada bagian garis radial terbentuk (D) ditutupi dengan skala oksidasi dan detail morfologi permukaan retakan tidak dapat dipahami.

3.6 Pengujian Kekerasan Material



Gambar 24. Bagian permukaan luar alur retakan yang akan dilakukan pengujian kekerasan

Terlihat pada gambar 22 permukaan luar alur retakan bagian aksial yang akan dilakukan pengujian kekerasan dengan beban 0,1kg.



Gambar 25. Hasil pengujian kekerasan pada posisi X1, X2, X3, X4, dan X5

Hasil pengujian kekerasan pada bagian X1 adalah 266HV, 255HV, 256HV sehingga rata rata hardness yang dihasilkan 259HV (11,7%). Hasil pengujian kekerasan pada bagian X2 adalah 266HV, 253HV, 244HV sehingga rata rata hardness yang dihasilkan 254HV (9,5%). Hasil pengujian kekerasan pada bagian X3 adalah 246HV, 253HV, 256HV sehingga rata rata hardness yang dihasilkan 252HV (8,7%). Hasil pengujian kekerasan pada bagian X4 adalah 256HV, 242HV, 263HV sehingga rata rata hardness yang dihasilkan 255HV (9,9%). Hasil pengujian kekerasan pada bagian X5 di 0,1kg adalah 242HV, 244HV, 245HV sehingga rata rata hardness yang dihasilkan 244HV (5,2%).

3.7 Pembahasan Hasil Pengamatan dan Pengujian

Pada inspeksi visual pada permukaan sisi saluran uap masuk terlihat retakan adanya retakan tetapi pada permukaan luar sisi saluran uap keluar tidak menunjukkan retakan. Selain itu permukaan patahan menunjukkan pola beach mark. Pada kondisi yang umum proses kelelahan ditandai dengan munculnya sejumlah cincin atau garis pantai (beach mark), proses ini muncul dimulai dari posisi kegagalan mulai terjadi dan terus bergerak ke dalam (Dieter, 1988). Bagian dalam permukaan retakan yang ditunjukkan gambar 4.x memiliki warna abu-abu kecoklatan menandakan material tersebut sudah mengalami oksidasi.



Dalam pengujian NDT Penetrant pada tampak samping sisi saluran uap masuk terlihat retakan merambat ke permukaan luar tetapi pada tampak samping sisi saluran uap keluar tidak terlihat retakan merambat ke permukaan luar. Hal ini menandakan bahwa sisi saluran uap masuk mengalami retakan yang paling parah. Pada bagian duduk alur sudu sisi saluran uap masuk dan sisi saluran uap keluar terdapat retakan linier melingkar. Diantara hasil penetrant test tersebut terlihat jelas pada bagian i memiliki warna lebih pekat daripada bagian o ditunjukkan pada gambar 15, yang artinya retakan pada bagian tersebut paling dalam.

Pengujian komposisi kimia menunjukkan adanya senyawa diluar logam dasar yang muncul seperti O, Na, Mg, Al, Ca, Cu, dan Zn terdeteksi pada semua sampel, unsur Cl, Ti, Mo hanya muncul pada sampel B dan C, unsur K dan Pb hanya muncul pada sampel B. Diantara senyawa kimia lain yang muncul, nilai unsur kandungan O paling tinggi yaitu sebesar 24,4% (sampel A) 23,6% (sampel B) 29,2% (sampel C) unsur kimia tersebut bersentuhan dengan permukaan logam dasar menandakan bawah logam dasar lembab dan sudah teroksidasi yang akan menyebabkan korosi.

Selain itu terjadi penurunan kandungan senyawa kimia dimana nilai unsur kandungan Fe dari 96,77%-94,87% menjadi 40,5% (sampel A), 56,6% (sampel B), 60,7% (sampel C) seharusnya kandungan Fe dalam logam tersebut *balance* atau menjadi kandungan utama yang tidak boleh kurang dari standarnya serta nilai unsur kandungan Cr dari 1%-1,5% menjadi 0,7% (sampel A), 0,6% (sampel B dan C) penurunan ini menyebabkan menurunnya tingkat ketahanan korosi.

Peningkatan kandungan senyawa kimia dengan nilai unsur kandungan C dari 0,25%-0,33% menjadi 21% (sampel A), 9,6% (sampel B), 1,8% (sampel C), unsur kandungan S yang seharusnya tidak boleh melebihi dari 0,015% menjadi 0,6% (sampel A), 0,2% (sampel B), 0,1% (sampel C) mempengaruhi sifat kekerasan yang menyebabkan logam menjadi getas. Selain itu kandungan P yang seharusnya terkontrol dengan nilai kandungan maksimal sebesar 0,015% menjadi 0,2% (sampel A), 0,3% (sampel B), 0,3% (sampel C) ditambah dengan naiknya kandungan unsur Si dari 0,15%-0,35% menjadi 5,2% (sampel A), 0,6% (sampel B), 0,9% (sampel C) menunjukkan bahwa terjadi penurunan keuletan dan ketangguhan terhadap beban impact.

Struktur makro yang teramati di dalam matriksnya secara umum terlihat martensit slats dalam bentuk morfologi yang sama sebagai ciri dari proses tempering. Dari semua pengamatan struktur makro yang dilakukan, tidak ditemukan indikasi impurities maupun cacat-cacat yang berlebihan didalam struktur mikronya. Selain itu, Meskipun 10 hingga 20 μ m ditutupi skala oksidasi dan kondisinya berumur, namun diindikasikan belum terjadi penebalan batas butir pada struktur mikronya sebagai tahap awal dari terjadinya fenomena creep dan fase tersebut masih sesuai dengan struktur pada material dasar yang artinya belum terjadi perubahan.

Pengamatan struktur mikro pada bagian A hingga bagian E secara keseluruhan permukaan retakan pola langkah ditutupi dengan skala oksidasi sehingga agak sulit untuk memahami detail morfologi permukaan retakan. Diperkirakan dari pola langkah, skala oksidasi mengakibatkan logam dasar terbuka dan muncul tanda korosi halus di beberapa bagian. Lubang korosi muncul pada sisi alur sudu tetapi pada bagian permukaan retakan belum muncul lubang korosi.

Hasil pengujian kekerasan pada bagian X1 dengan nilai 266HV, 255HV, 256HV, X2 dengan nilai 244HV, 253HV, 266HV, X3 dengan nilai 246HV, 253HV, 256HV, X4 dengan nilai 256HV, 242HV, 263HV, X5 dengan nilai 242HV, 244HV, 245HV, dari semua titik uji tidak menunjukkan nilai yang sama dari kekerasan material dasar sedangkan material mengalami kenaikan dengan nilai kekerasan sebesar 5,2%-11,7% dari spesifikasi kekerasan material dasar sebesar 233 HV. Kenaikan tersebut berbanding lurus



dengan kenaikan kandungan unsur kimia yang menyebabkan material menjadi lebih getas.

4. Kesimpulan

1. Hasil dari inspeksi visual pola patahan berbentuk *beachmark* dan permukaan dalam retakan membentuk pola radial berwarna abu-abu kecoklatan ini menunjukkan awal terjadinya retakan material tersebut mengalami *fatigue*.
2. Tanda material mengalami *fatigue* ditunjukkan juga dengan pengujian tes penetrasi, rambatan retak yang dihasilkan dari permukaan dalam ke permukaan luar yang artinya ada pengaruh beban di titik awal retakan.
3. Retakan tersebut membentuk celah sehingga ada unsur kimia lain diluar unsur kimia logam dasar yang terdeteksi seperti unsur O dengan nilai rata-rata 25,73% yang menyebabkan logam teroksidasi ditambah dengan adanya penurunan unsur kandungan Fe dari 96,77% menjadi 52,6% dan Cr dari 1,5% menjadi 0,6% sehingga tidak tahan terhadap korosi dan peningkatan unsur kandungan C dari 0,33% menjadi 10,8%, S dari maksimal 0,015% menjadi 0,3%, P dari maksimal 0,015% menjadi 0,27% dan Si dari 0,35% menjadi 2,23% akan menaikkan nilai kekerasan dan menurunnya keuletan serta ketangguhan terhadap beban impact
4. Pada pengamatan struktur makro meskipun 10 hingga 20 μ m ditutupi oksidasi tetapi fase martensit temper yang sesuai dengan struktur pada *base* material sedangkan struktur mikro secara keseluruhan mengalami oksidasi sehingga desain morfologi permukaan dalam retakan tidak dapat dipahami, oksidasi menyebabkan logam dasar terkelupas dengan tanda korosi halus muncul tetapi lubang korosi belum muncul pada permukaan retakan yang artinya oksidasi yang dihasilkan pada titik pengujian tersebut belum mengubah struktur makro dan mikro.
5. Ditinjau dari hasil kandungan senyawa kimia berbanding lurus dengan hasil pengujian kekerasan bahwa material tersebut mengalami peningkatan kekerasan sebesar 5,2%-11,7% dari 233 HV terbukti bahwa material tersebut menjadi lebih getas yang membuat *crack* menjalar.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Fakultas Teknik Undip yang telah memfasilitasi keberlangsungan jurnal ini.

Daftar Pustaka

- [1]. Muhammad Hasan Basri dan Alimuddin Sam, 2006, ANALISIS PRESTASI TURBIN GT-1510 BORSIG PADA UNIT UTILITY KALTIM I, Palu: Universitas Tadulako
- [2]. Budiawan I, Raharjo P, Prasetyo , Inspeksi Getaran Pada Turbin Uap Penggerak Pompa di Industri Pupuk, Bandung: Politeknik Negeri Bandung
- [3]. Muhamad Cahyadi, 2019, Analisa Kerusakan Sudu Turbin Uap Material Martensitic Stainless Steel 410 Pada Stage Terakhir, Tangerang Selatan: Universitas Pamulang
- [4]. Risdian Harsanda Putra, Analisa *Performance* Turbin Uap P2-TS-102 Unit Urea Pabrik 1A, Jogjakarta: Universitas Gadjah Mada



- [5]. Naeem M. T., S. A. Jazayeri, N. Rezamahdi, K. N. Toosi, 2008. *Failures Analysis of Gas Turbine Blades*. Proceed of the 2008 IAJC-IJME International Conference. (www.ijme.us/cd_08/PDF/120,_ENG_108.pdf)
- [6]. Haris Effendi, *Studi Kasus Kegagalan Material ASTM A335/P12 dalam Aplikasi Boiler Steam Pipe*, Depok: Universitas Indonesia
- [7]. Acep Wagiman, Gugun Gundara, *Study Kegagalan Akibat Korosi Pada Pipa Economizer*, Tasikmalaya: Universitas Muhammadiyah Tasikmalaya
- [8]. Johny Wahyu Adi Soedarsono, Sudarmono, *PENENTUAN KOROSI BATAS BUTIR DAN MEKANIK PADA PIPA KELUARAN PANAS (HOT LEG) REAKTOR DAYA*, Jakarta: Universitas Indonesia
- [9]. Apriardi Ihlis, *ANALISIS KERUSAKAN PADA ROTOR TURBIN UAP KAPASITAS 3191 KW*, Bandung: Balai Besar Bahan dan Barang Teknik
- [10]. *Handbook of Industrial Water Treatment*. Available: http://www.gewater.com/handbook/Introduction/ch_1_sourcesimpurities.jsp (Diakses tanggal 29 Juni 2021)
- [11]. MTT MHI Turbo-Techno Co. 1990. *Centrifugal Compressor & Steam turbine : Training Text Book for Maintenance Engineer, Disc No TR-8 rev B*. Hiroshima: MHI Training Center Turbo