

Analisis Kegagalan Retak dan Teknologi Perbaikan Sudu Turbin Jenis Inconel 792 pada Pesawat Terbang

Suharno¹, Arif Sugiyanto², Yuyun Estriyanto¹, dan Budi Harjanto¹

¹ Universitas Sebelas Maret Surakarta

² PT.Garuda Maintenance Facilities Jakarta

E-mail: myharno@yahoo.com

ABSTRAK

Penelitian untuk melakukan analisis terhadap kegagalan retak telah dilakukan pada sudu turbin dari *Auxiliary Power Unit (APU)* pesawat terbang. Bahan sudu turbin adalah paduan super Inconel 792. Pengujian yang dilakukan meliputi inspeksi visual, pengujian komposisi kimia, fractography, pengujian kekerasan, dan metalografi. Hasilnya menunjukkan bahwa patah dimulai dari celah dan retak makro dan kemudian menjalar/merambat menjadi retak terbuka di permukaan. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh mekanisme retak panas selama perbaikan las sebelumnya. Kandungan Aluminium dan Titanium yang tinggi pada logam las, menjadikan material menjadi rapuh, hal ini ditunjukkan oleh fitur intergranular dibandingkan dengan aspek pembelahan transgranular menunjukkan bahwa keuletan pada lasan rendah. Dibandingkan dengan sudu yang tidak rusak (gagal), ukuran butir dari sudu turbin yang rusak adalah sangat berbeda menunjukkan eksposisi terhadap panas baik dari siklus termal pengelasan atau lingkungan operasi normal pada suhu tinggi. Teknik perbaikan lebih lanjut dikembangkan berdasarkan keberhasilan *PQTR* yang di uji dengan kekerasan mikro, destructive dan non destructive test. Untuk tujuan ini maka dipilih las *GTAW* yang diikuti dengan solution dan aging treatment.

Kata kunci: Paduan super, perbaikan pengelasan, fractography, metalografi, analisis kegagalan.

ABSTRACT

The failure analysis has been performed on fractured blade of turbine wheel assembly of an Auxiliary Power Unit (APU). The turbine wheel is made of as-cast nickel-base superalloy Inconel 792. To support the analysis, laboratory practices including visual inspection, photography, stereomicroscopy, chemical composition testing, fractography, hardness testing, and metallography were conducted. Thermo-mechanical fatigue, overheating, hot corrosion, and creep are beyond the conclusion of the failure mode. The evidence shows that the fracture maybe initiated from fissures and macrocracks and then propagated to become an open-surface crack. It may come from hot cracking mechanism during previous weld repair. In addition to high content of Aluminum and Titanium in weld metal, the brittleness shown by the intergranular features compared to the transgranular cleavage facets indicate that the weldment ductility is low. Compared to unfailed blade, grain size of the failed blade is markedly different showing exposition to heat either from welding thermal cycle or abnormal operating environment at elevated temperature. Further repair scheme is developed based on successful PQTR from microhardness, nondestructive, and destructive testing. Thus, GTA Welding followed by Solution and Aging Treatment is chosen.

Keywords: Superalloy, weld repair, fractography, metallography, failure analysis

PENDAHULUAN

Secara umum sebuah sudu turbin yang digunakan dalam unit penambah daya atau Auxiliary Power Unit (APU) pada pesawat terbang apabila telah bekerja selama 857 jam TSI (Waktu Sejak Terpasang), dilakukan penyelidikan untuk menge-

tahui performa dari mesin tersebut [1]. Pemeriksaan terhadap APU dilakukan secara menyeluruh apabila ada indikasi suara yang tidak normal. Biasanya hasil pemeriksaan secara menyeluruh terhadap suara yang tidak normal tersebut dapat diketahui bahwa roda turbin ditemui aus, ada kerusakan, dan bahkan terjadi hingga ujung dari sudu hilang

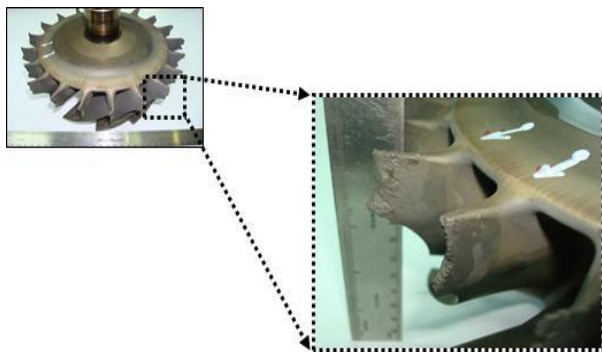
karena patah (*cuil*). Roda turbin pesawat terbang yang mengalami kegagalan kebanyakan terbuat dari bahan paduan super (*superalloy*) jenis Inconel 792 [1]. Menurut Pedoman Pemeliharaan Pesawat, kecepatan turbin nominal roda 41,000 rpm, kecepatan operasi biasanya 101,3%-102,5%, dan temperatur operasi antara 566°C - 650°C [2].

Gambar 1 menunjukkan diagram skematik sistem kerja dari APU (pandangan atas) dan gambaran umum dari semua sudu turbin yang mengalami kegagalan dan sampling dari dua ujung roda turbin untuk dilakukan pemeriksaan metalurgi. Konstruksi APU terdiri dari dua bagian yaitu kompresor sentrifugal dan roda turbin yang berputar pada poros utama [3].

Tentu saja dalam kasus-kasus khas dari kegagalan, biasanya kerusakan bermula dari sudu/pisau *undeformed* kemudian berdampak pada pisau-pisau yang berdekatan sehingga mengakibatkan cacat. Gambar 1 menunjukkan bukti dari kedua kegagalan pada pisau yaitu cacat pisau dan pisau *undeformed*. Jumlah *undeformed* dan *deformed* masing-masing adalah 5 bilah (25%) dan 15 pisau (75%). Dalam semua kasus, cacat gerigi pisau bersumber dari pisau *undeformed* sebagai dampak objek massal pada suhu operasi yang tinggi. Pisau bergerigi mengalami cacat plastis pada arah radial.

Atas dasar permasalahan di atas maka dapat ditentukan sebuah hipotesis bahwa sudu turbin mengalami tegangan plastis-elastis yang berulang-ulang sebagai akibat dari pemanasan dan pendinginan selama periode *start-up* dan *shut-down*. Akibatnya, kelelahan siklus rendah merupakan pertimbangan penting [4]. Mengenai sifat pembebanan, suhu lingkungan, dan bahan Inconel 792, modulus kegagalannya adalah kelelahan termo-mekanis, korosi panas, pecah creep, dan kegagalan *over heating* [5].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui penyebab utama kegagalan retak sudu turbin pada pesawat terbang. Setelah diketahui penyebab kerusakan, maka data penyebab kerusakan tersebut akan dijadikan rekomendasi untuk melakukan rekayasa teknologi perbaikan pada sudu turbin yang mengalami kerusakan.



Gambar 1. Gagal dan Aus Ujung Sudu Roda Turbin karena Retak

METODE PENELITIAN

Bahan yang dipakai pada riset ini adalah sudu turbin wheel *Auxiliary Power Unit* yang dipakai oleh pesawat Garuda Indonesia Boeng 737 yaitu material *superalloy* jenis Inconel 792 berkode 3842360-1. *Filler metal* yang dipakai menggunakan jenis 5837 AMS (Inconel 625), pengelasan satu sisi, DCEN 30-35 polaritas A. Pengujian yang dilakukan meliputi uji komposisi kimia, metalografi, dan uji kekerasan.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah: Quantitative Metallography Tool, Model RAX Vision MM-10A from Rax Inc. milik, mesin gerinda dan poles, mesin SEM (Stereo Microscope) Model Olympus DP10 dengan lensa Olympus SZPT & SZ60. Micro Hardness Tester model Shimadzu HVM-2 dan Macro Hardness Tester merk Mitutoyo AR-10. Sehubungan dengan bahan baku *nickel-based superalloy* sebagai bahan dasar Inconel 792 yang sulit untuk dapat dibeli maka spesimen uji tes akan dibuat langsung dari roda turbin yang memiliki 20 sudu. Jumlah specimen adalah 16 buah yang berbentuk plat (1.6mm X 20mm X 100mm). Specimen yang dibuat disiapkan dari sudu yang masih dalam kondisi baik, yang penyiapannya dengan menggunakan mesin EDM merk Sodik. Sambungan las mengacu pada standar AWS D17.1 dan AWS B2.1. dan jenis pengelasan yang akan digunakan adalah pengelasan jenis *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dengan sambungan tumpul (*lap joint*). Sebelum melakukan uji destruktive dan non distructive, terlebih dahulu dilakukan uji visual dan metalografi untuk mengetahui geometri sambungan.

Karena retak panas sebagai faktor penyebab kerusakan pada *blade* seperti yang dijelaskan dalam referensi sebelumnya [4], maka siklus perlakuan panas akan dirancang sedemikian rupa sehingga mendapatkan penelitian yang terbaik untuk mengurangi kecenderungan retak panas. Ada tiga siklus perlakuan panas yang akan dirancang sebagai kombinasi dari pemanasan mula (*preheat*) yaitu *Solution Treatment* (ST), GTAW, dan PWHT (*Post Weld Heat Treatment*) dengan *Solution Treatment* dan *Aging Treatment* (ST+AT). Dengan demikian, siklus perlakuan akan dilaksanakan secara berturut-turut adalah ST + GTAW + ST + AT, GTAW + ST + AT, dan hanya GTAW. Rincian dari kedua siklus perlakuan panas pertama dan kedua ditampilkan dalam Gambar 3, sedangkan siklus ketiga tidak ditampilkan untuk kesederhanaan karena hanya GTAW. *Solutions Treatment* dilakukan di tungku vakum tinggi pada temperatur 1120 °C dengan waktu tahan (*holding time*) selama 4 jam kemudian diikuti dengan pendinginan kejut di dalam gas argon sampai dengan temperatur kamar. Sedangkan *Aging Treatment* dilakukan pada tempe-

ratur pemanasan pertama 1080 °C dengan waktu tahan (*holding time*) selama 4 jam kemudian diikuti dengan pendinginan kejut (*quenching*) dengan gas argon. Untuk memperbaiki butir struktur mikronya maka dilakukan pemanasan kedua pada temperatur 845 °C dan waktu tahan 24 jam, kemudian diikuti dengan pendinginan udara.

HASIL DAN PEMBAHASAN

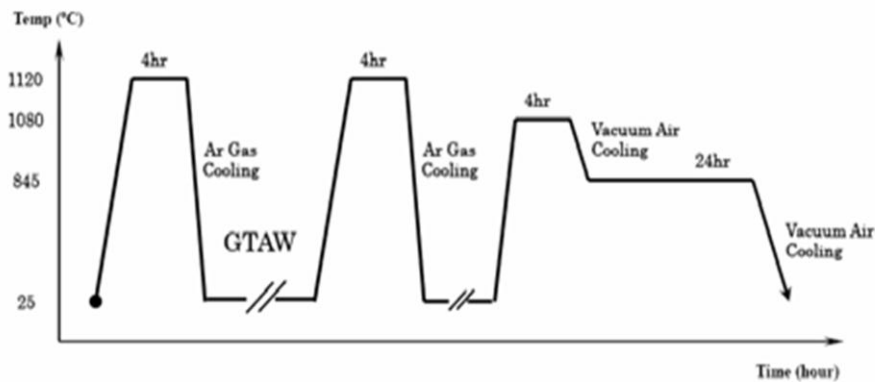
Uji komposisi kimia dimaksudkan untuk mengetahui kandungan unsur-unsur kimia yang terdapat di dalam sudu turbin. Hal ini perlu dilakukan agar dapat dipastikan bahwa material yang diuji adalah sudu turbin berbahan dasar nikel (inconel 792). Selain itu, dengan uji komposisi kimia dapat dilihat unsur kimia tertentu yang mungkin berpengaruh signifikan terhadap material. Hasil uji komposisi kimia disajikan pada Tabel 1. Berdasarkan Table 1, diketahui bahwa logam las (setelah dilakukan perbaikan dengan las sebelumnya) mengandung Aluminium (Al) dan Titanium (Ti) yang

tinggi. Material dengan kandungan Al dan Ti yang tinggi memang terbukti rentan terhadap retak panas secara.Semakin tinggi kandungan keduanya, semakin rendah mampu lasnya [6].

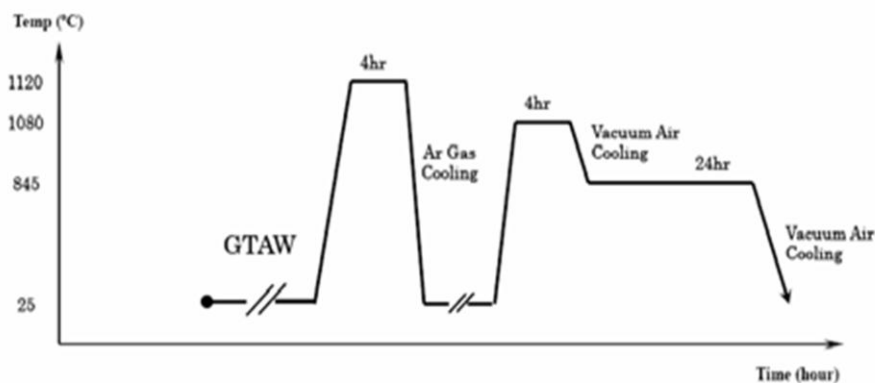
Tabel 1. Komposisi Kimia Logam Induk dan Logam Las pada Inconel 792

No	<i>Sudu turbin inconel 792</i>			
	Base Metal		Weld Metal	
	Unsur Kimia	Kandungan (%) berat	Unsur Kimia	Kandungan (%) berat
1	C	0,2	C	2,23
2	Ni	60	Ni	71,91
3	Cr	13	Cr	15,23
4	Co	9	Co	-
5	Mo	2	Mo	-
6	Fe	-	Fe	2,26
7	Al	3,2	Al	2,59
8	B	0,02	B	-
9	Ti	4,2	Ti	3,28

Gambar 3 memperlihatkan tampilan patah pada ujung permukaan arah radial. Gambar ter-



Treatment #1 Heat treatment cycle by solution annealing, GTA Welding, and re-solution annealing and precipitation aging treatment for 3ea test coupon



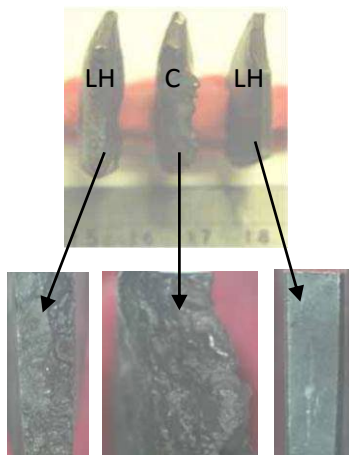
Treatment #2 GTA Welding followed by heat treatment cycle by solution annealing and precipitation aging treatment for 3ea test coupon

Gambar 2. Perlakuan Panas untuk Rekayasa Perbaikan Sudu Turbin

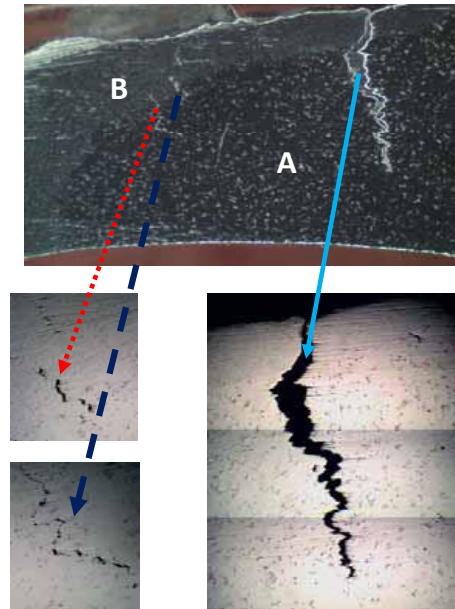
sebut menunjukkan kondisi sudu yang telah retak, pecah, dan cacat plastis. Gambar sebelah kiri (LH) menunjukkan permukaan sudu dengan sedikit deformasi, sisi pusat (RKT) menunjukkan cacat permukaan dengan deformasi plastis, sedangkan RH adalah sisi sudu bagian ujung yang normal. Pada bagian LH dan RKT jelas menunjukkan retak kecil bercabang yang tajam di sepanjang bagian. Tampilan gambar pada RH menunjukkan retak jenis intergranular. Tidak ada indikasi gradasi nyata yang menunjukkan tanda kegagalan akibat kelelahan. Hal ini menguatkan bahwa material (bagian yang ditampilkan) merupakan material dengan kemampuan las yang rendah

Uji struktur mikro dilakukan pada sudu turbin C (Gambar 3). Uji ini bertujuan untuk mengetahui jenis dan geometri cacat (Gambar 4). Hasilnya menunjukkan bahwa terdapat satu retak besar (macrocrack) dan dua retak mikro (microcracks). Panjang retak yang terukur masing-masing adalah 3578 μm , 1011 μm , 574 μm . Dari Gambar 4 juga terlihat adanya perbedaan yang sangat jelas antara daerah A dan B. Hal ini berarti antara daerah A dan daerah B ada perbedaan struktur mikro dan kemungkinan juga perbedaan komposisi kimia.

Berdasarkan Gambar 4, menunjukkan bahwa daerah antar A dan B merupakan *Heat Affected Zone* (HAZ). Pertemuan antara keduanya merupakan daerah garis fusi. Celah dan retakan diamati terutama di daerah garis fusi. Panas atau retak cair mungkin terjadi selama proses (fusi) pengelasan karena ukuran butir yang membesar. Retak cair sensitif terhadap jumlah dan lokasi yang menyebabkan terjadinya presipitasi fase kedua [6]. Bentuk ukuran butir jika dibandingkan dengan struktur mikro dendritik raw material dari sudu turbin memperlihatkan bentuk dendritik yang kasar dan tampak seperti tulang ikan (Gambar 5). Jenis ini biasanya disebut dengan dendritik tulang ikan.



Gambar 3. Struktur Makro Sudu Turbin. Ujung Sudu Sedikit Mengalami Deformasi (LH), ujung sudu yang rusak (C), dan sudu turbin yang tidak rusak. (Pembesaran 10X).



Gambar 4. Pembukaan Retak Makro, Garis Merah untuk LH, Garis Biru untuk RH



Gambar 5. Dendritik Kasar dan Struktur Tulang Ikan pada Sudu Turbin Unfailed (pembesaran 50X)



Gambar 6. Struktur Mikro dari the Undeformed (a), the Deformed (b), dan the Unfailed Blade (c), pembesaran 500X

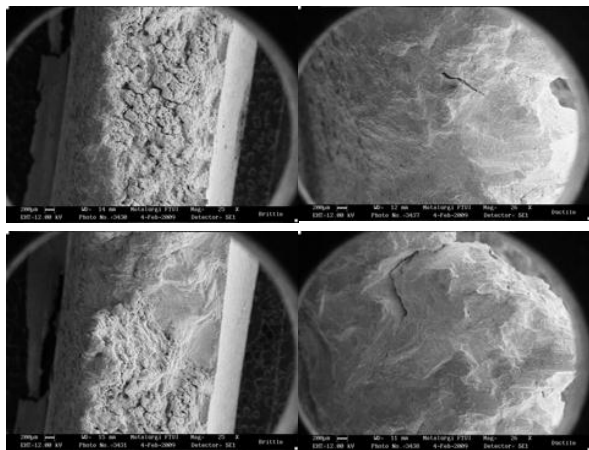
Struktur mikro dari sudu yang tidak cacat adalah dendritik kasar atau dendritik tulang ikan (Gambar 5), sedangkan struktur mikro pada sudu turbin yang cacat terdiri dari butir equi-axed (Gambar 6). Dendritik tulang ikan adalah dendrit yang khas sebagai struktur cor di mana solidifikasi tidak terganggu oleh rekristalisasi. Sedangkan butir equi-axed atau kristal poligonal mengkarakterisasi sebuah struktur mikro yang mengalami rekristali-

sasi. Bahan Inconel 792 memiliki susunan kristal gamma (γ') yang memiliki suhu cair antara 1100-1150 °C [6]. Dari Gambar 6 juga terlihat bahwa sudu yang cacat memiliki ukuran butir lebih besar dari pada sudu yang tidak cacat.

Gambar 7 menunjukkan satu set uji fractograph dengan SEM yang diambil dari sudu turbin yang cacat (LH) dan sudu turbin yang tidak cacat (RH). Uji ini menggunakan SEM dengan pembesaran 1000X. Hasilnya menunjukkan bahwa tampilan retak pada LH adalah jenis intergranular sedangkan pada RH adalah transgranular. Tampilan gambar yang merupakan bagian dari proses pemgerjaan pemesinan dapat menyebabkan terjadinya deformasi plastik pada bagian bawah permukaan [7].

Patah arah melintang terjadi di semua ujung sudu turbin pada ketinggian rata-rata 108 mm jauh dari pusat sudu turbin yang memiliki diameter keseluruhan 219 mm. Hal ini dapat dikatakan bahwa patah yang terjadi dihasilkan dari sudu yang berputar dan membentur yang berdekatan. Tegangan yang terjadi pada sudu itu terutama disebabkan oleh rotasi sentrifugal sudu. Fitur patah intergranular dibandingkan dengan aspek retak transgranular menunjukkan bahwa ketangguhan sudu undeformed (yang lebih tinggi kekerasan) lebih rendah dari pada ketangguhan sudu cacat (kekerasan lebih rendah).

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa ada perbedaan ukuran butir antara sudu yang tidak cacat dan yang cacat, serta terlihat adanya kesesuaian antara butir dendritik pada sudu yang tidak cacat dengan sifat mekanik dari sudu turbin (Gambar 6 dan 7). Pada ujung sudu turbin terlihat adanya dua bagian yang berbeda, dan di prediksi merupakan daerah las dan logam induk. Munculnya daerah tersebut merupakan bukti bahwa ujung sudu turbin telah mengalami perbaikan dengan teknik pengelasan yang dilakukan sebelumnya.



Gambar 7. Uji Fractografi pada Sudu Turbin untuk LH dan RH (Pembesaran 1000X)

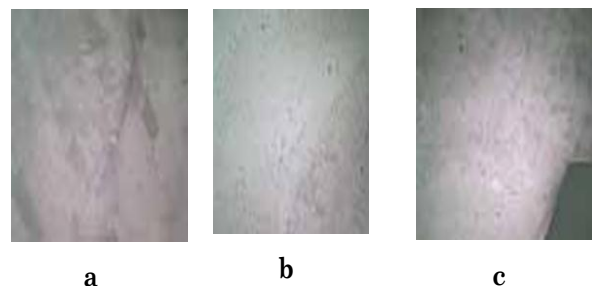
Retak makro dan cleavage diamati terdapat pada garis fusi atau HAZ (Gambar 5). Cacat las ini mungkin terjadi disebabkan oleh adanya retak panas selama proses pembekuan pasca pengelasan. Dari analisis terhadap struktur mikro yang ada dapat diperoleh bukti yang menunjukkan bahwa kekuatan sambungan las yang dilakukan sebelumnya adalah rendah.

Karena retak makro dan mikro (fisure) ditemukan selama pemeriksaan metalografi, maka hal yang harus diperhatikan untuk melakukan pengelasan superalloy adalah bahwa retak atau micro-fissuring mungkin terjadi di bawah permukaan dan tidak terdeteksi oleh uji dengan metode cairan penetran, selanjutnya fisur dan microcrack mungkin akan dapat terdeteksi dengan menggunakan x-ray.

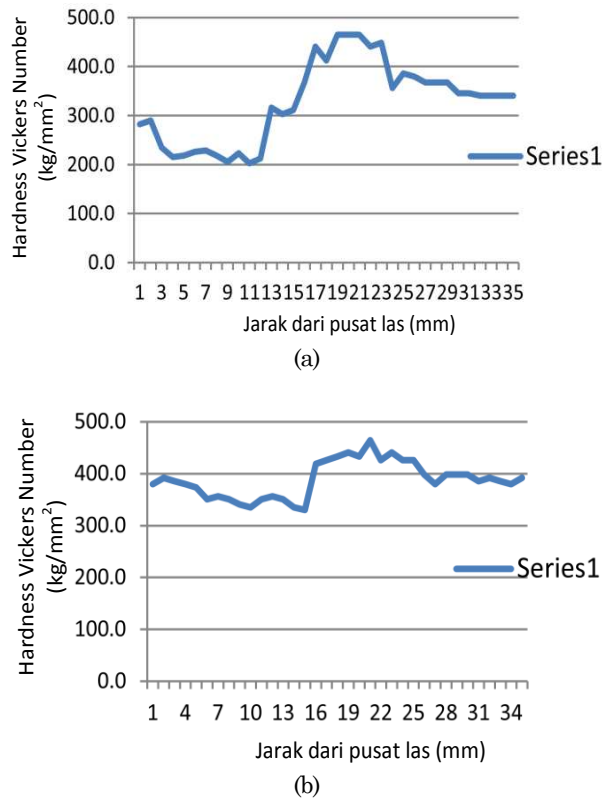
Berdasarkan analisis struktur mikro dan karakteristik kerusakan yang terjadi pada bahan sudu turbin inconel 729, maka pengembangan terhadap teknik perbaikan sudu turbin yang rusak dapat dilakukan. Pengembangan perbaikan difokuskan pada upaya melakukan perbaikan dengan teknik las yang tepat dengan diikuti perlakuan panas pasca pengelasan dengan tepat pula. Pada pengembangan perbaikan ini pengelasan menggunakan jenis GTAW yang disertai dengan satu set teknik perlakuan panas, Gambar 2.

Struktur mikro hasil pengembangan teknologi perbaikan pada sudu turbin inconel 729 adalah sebagaimana terlihat pada Gambar 8.

Uji kekerasan dilakukan setelah karakteristik material dan jenis kegagalan retak telah diketahui. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui distribusi kekerasan pada ujung sudu turbin setelah dilakukan perbaikan dengan pengelasan. Hal ini diarahkan agar dapat dibuat sebuah rancangan saran (rekomendasi) untuk melakukan perbaikan dengan pengelasan pada tahap selanjutnya. Hasilnya menunjukkan bahwa ada perbedaan yang cukup signifikan antara kekerasan pada material yang di beri PWHT dan yang non PWHT. Angka kekerasan yang diperoleh adalah berkisar antara kisaran 330-440 HVN. Dari angka kekerasan yang diperoleh terlihat bahwa kekerasan relatif pisau yang cacat lebih lunak dari dua yang lain.



Gambar 8. Perbedaan Struktur Mikro pasca PWHT, a. Daerah las, b. Daerah fusion line, dan c. Daerah HAZ



Gambar 9. Kekerasan pada Perbaikan dengan Las, a. non PWHT, b. dengan PWHT

Berdasarkan pengamatan struktur mikro dan kekerasan terlihat bahwa PWHT berhasil menyerasakan butir Kristal (Gambar 8) sehingga kekerasannya lebih merata (Gambar 9), dengan demikian proses perbaikan dengan teknik las hasil pengembangan dapat diterapkan pada perbaikan sudu turbin pesawat terbang.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan terhadap analisis kegagalan dan studi pengembangan perbaikan maka dapat diambil kesimpulan bahwa bahan dari sudu turbin yang dianalisis adalah termasuk jenis Inconel 792, yaitu bahan paduan super berbasis nikel.

Struktur mikro raw material dari bahan sudu turbin adalah dendritik atau tulang ikan. Peristiwa patah melintang yang terjadi pada daerah ujung disebabkan oleh fraktur seketika. Hal ini disebabkan oleh adanya benturan dari sudu undeformed ke arah sudu berdekatan yang menyebabkan kerusakan roda turbin. Penampilan fitur intergranular dibandingkan dengan aspek retak transgranular menunjukkan perbedaan ketangguhan dan keuletan antara sudu undeformed dan sudu cacat. Retak makro dan retak celah pada daerah fusion line dan HAZ disebabkan oleh adanya retak panas pada saat peristiwa pengelasan. Mengingat inconel 792 mengandung Al dan Ti yang ringgi, sementara unsur tersebut mengurangi kemampuan las, maka elektroda las dapat dipilih jenis inconel 625 yang memiliki Al dan Ti yang lebih rendah. Hasil siklus perlakuan panas (PWHT) terbukti dapat digunakan sebagai acuan dasar untuk teknik perbaikan pada sudu turbin yang mengalami kegagalan. Hal ini terlihat dengan adanya pemerataan kekerasan mikro sepanjang logam las, HAZ, dan logam dasar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Unknown, *Inspection Repair Manual (IRM)*, Honeywell Inc, Phoenix AZ, ATA 49-21-73, 603, 2007.
- [2] Unknown, *Maintenance Manual (MM)*, Seattle: Boeing Co, ATA 49-41-00, 1-5, ATA 49-00-00, 102, ATA 49-11-00, 207-213, 2008.
- [3] Unknown, *Maintenance Manual (MM)*, Phoenix: Honeywell Inc, ATA 49-20-00, 1-10, 2003.
- [4] Petrenec M., Obrtlík K., Polák J., and Man J., *Effect of Temperature on the Low Cycle Fatigue of Cast Inconel 792-5A*, Key Eng Mater, Vols. 345-346: 383-386, 2007.
- [5] Donachie M.J. and Donachie S.J. *Superalloys: A Technical Guide*, 2nd Edition, Materials Park OH: ASM Intl, 150-337, 2002.
- [6] Carter T.J., Common Failures in Gas Turbine Blades. *Eng Fail Anal*, Vol. 12: 237-247, 2005.
- [7] Bhushan B., *Principles and Application of Tribology*, Toronto: John Wiley and Sons, 496-509, 1999.