

NOZEL

Jurnal Pendidikan Teknik Mesin

Jurnal Homepage: <https://jurnal.uns.ac.id/nozel>



ANALISIS METALOGRAFI SAMBUNGAN LAS DENGAN SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM) DAN TENSILE TEST MENGGUNAKAN BAHAN PADUAN SUPER DENGAN METODE TIG BERBASIS NIKEL

Agus Taryono¹, Suharno¹, Yuyun Estriyanto¹

Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, FKIP, Universitas Sebelas Maret Surakarta
Jl. Ahmad Yani 200 Pabelan, Kartasura.

E-mail : kunaugust@gmail.com

Abstract

The objective from this research is to find (1) plane blade turbin condition in microstructure based super alloy with nikel in normal condition; (2) tensile strength of the plane blade turbin from result repair in maksimum using method Tungsten Inert Gas (TIG) welding is criteria to apply and fulfill a condition as repair method damage. The experiment is used in this research. A super alloy nikel (Ni) as population in this research and purposive sampling is used to taking sample technique, normal condition in a super alloy nikel (Ni), TIG welding result with variation flux steam welding. Descriptive comparative methods analysis is used to data analysis. The research result show that : (1) surface microstructure observation have characteristic strong and stern appearance on super alloy material in normal condition; (2) flux stream variation and same material TIG welding from super alloy with materials nikel use a artificially filler in experience welding process have different of elongisitas and maksimum tensile strength; (3) the best material to use flux steam 70 A is material super alloy with nikel use filler rod was finding in this research.

Keywords: Metalography, TIG, Superalloy, SEM, Tensile Test

A. PENDAHULUAN

Dalam 20 tahun terakhir ini terjadi kemajuan teknologi yang sangat pesat. Kemajuan teknologi terjadi di berbagai bidang, beberapa bidang yang mengalami dampak dari kemajuan teknologi diantaranya adalah bidang pengetahuan maupun bidang industri. Kedua bidang tersebut merupakan sedikit contoh dari bidang-bidang yang mengalami

perkembangan yang pesat akibat kemajuan teknologi. Dalam dunia industri perkembangan teknologi sangat besar pengaruhnya, dimana banyak dikembangkan berbagai produk, alat dan juga material untuk semakin mempermudah manusia dalam menjalani kehidupan.

Salah satu fokus penelitian ini adalah penemuan dalam bidang material,

material yang akan dibahas adalah material yang memiliki kemampuan khusus yaitu bahan paduan super berbasis nikel. Alasan pemilihan material tersebut sebagai bahan penelitian karena material dengan jenis ini kurang dikenal oleh masyarakat umum tetapi sebenarnya banyak peralatan-peralatan vital yang ada di sekitar kita yang menggunakan jenis material ini. Salah satu bentuk aplikasi material ini adalah pada turbin pesawat terbang dan pembangkit listrik.

Melihat begitu vitalnya penggunaan bahan paduan berbasis nikel ini maka berbagai penelitian dilakukan untuk benar-benar mengetahui dan memahami bagaimana sebenarnya bentuk dan kemampuan material ini. Hal tersebut dilakukan guna melakukan pengembangan terhadap material ini ke depannya maupun sebagai sumber pengetahuan baru mengenai material ini. Salah satu langkah untuk mengetahui bagaimana kondisi dari material ini, maka dilakukan pengujian metalografi.

Dengan pengujian metalografi akan bisa diketahui bagaimana kondisi benda yang sebenarnya secara mendetail karena akan bisa diteliti bagaimana struktur mikro dari suatu spesimen. Dengan pengetahuan mengenai metalografi bahan paduan super berbasis nikel ini pengembangan yang

lebih terarah akan bisa dilakukan. Pengembangan tersebut dilakukan dengan tujuan agar perusahaan atau industri bisa meminimalisir waktu perbaikan dan biaya perbaikan. Komponen turbin pesawat umumnya dalam proses perbaikannya harus dilakukan keluar negeri sehingga memakan waktu dan biaya yang terlalu banyak, alternative lainnya adalah melakukan penggantian komponen yang berdampak sama yaitu mahal nya harga komponen pengganti.

Salah satu bentuk metode perbaikan pada kerusakan terutama patahnya sudu turbin adalah dengan melakukan proses pengelasan dengan metode TIG (*Tungsten Inert Gas*). Namun dalam penelitian ini metode las TIG yang dilakukan menggunakan *filler* yang berasal dari bahan sejenis (menggunakan turbin lain yang sejenis yang sudah tidak bisa diperbaiki) atau bisa dikatakan dengan melakukan rekayasa *filler rod*.

Setelah dilakukan penyambungan tentunya perlu dilakukan pengujian lebih mendalam terutama terkait dengan sambungan tersebut. Pengujian terhadap sambungan tetap diperlukan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan dari material hasil dari proses perbaikan tersebut. Salah satunya adalah dengan melakukan pengujian tarik.

Dengan data tersebut maka akan bisa ditentukan apakah perbaikan dengan jalan penyambungan material paduan super berbasis nikel yang memakai metode las TIG dengan *filler* material yang serupa bisa diaplikasikan secara nyata. Jika memang mendukung untuk dilakukan maka diharapkan akan mampu memenuhi kriteria material yang sesuai dengan kebutuhan serta tidak membahayakan. Dengan pengujian metalografi terhadap turbin dan pengujian tarik terhadap metode perbaikan las TIG yang dilakukan, maka diharapkan akan diperoleh pengetahuan yang baru mengenai material paduan super berbasis nikel yang bisa berguna ke depannya.

B. METODE

Penelitian Penelitian ini dilakukan di beberapa lokasi yang terpisah dikarenakan untuk beberapa pengujian harus dilakukan ditempat yang berbeda-beda. Tempat pengujian tersebut antara lain:

1. Komposisi kimia diketahui dengan melakukan pengujian di PT. ITOKOH CEPERINDO, Klaten.
2. Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) dilakukan di Lembaga Pengujian dan Penelitian Terpadu (LPPT), Universitas Gajah Mada (UGM), Yogyakarta.

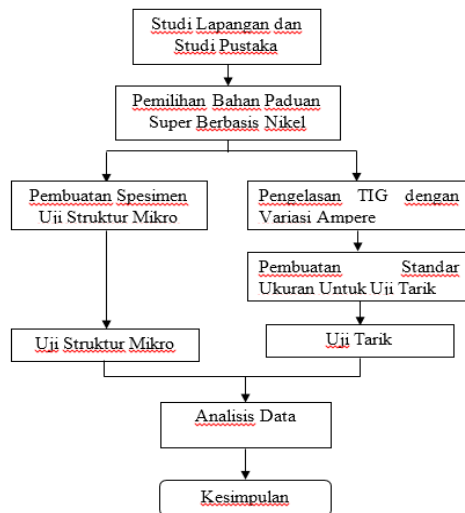
3. Proses pengelasan dan persiapan spesimen dilakukan di Bengkel Apink Teknik, Karanganyar.

4. Pengujian Tarik dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik D3 Teknik Mesin, Sekolah Vokasi, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.

Sudu turbin pada pesawat terbang yang menggunakan material bahan paduan super dengan penambahan nikel digunakan pada penelitian ini. Jenis paduan super berbasis nikel yang di uji diduga merupakan jenis metal rene. Penelitian eksperimen dilakukan pada penelitian ini. Pengumpulan data yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan metode kuantitatif eksperimental. Komposisi kimia dan SEM yang diujikan dilakukan pada bagian sirip turbin pesawat terbang. Untuk pengujian tarik dilakukan pada hasil pengelasan bahan paduan super berbasis nikel yang menggunakan metode pengelasan TIG dan *filler* yang direkayasa dari komponen sudu turbin yang sama. Dan standar spesimen yang digunakan adalah JIS (*Japan International Standard*).

Prosedur Penelitian

Gambar 1 menunjukkan tahapan penelitian yang dilakukan.



Gambar 1. Prosedur Penelitian

C. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Deskripsi Data

Hasil Uji Komposisi Kimia

Berikut ini merupakan hasil pengujian komposisi yang dilakukan terhadap spesimen uji yang berupa bahan paduan super berbasis nikel.

Tabel 1. Tabel Daftar Komposisi Kimia Spesimen Bahan Paduan Super Berbasis Nikel.

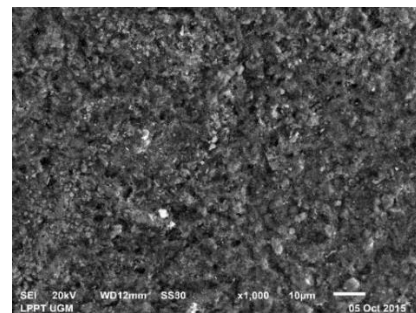
No.	Unsur	Pengukuran		Rata-rata (Avg)
		1	2	
1	Ni	63,65629	63,77968	63,71798
2	C	0,12271	0,11852	0,12062
3	Si	0,01323	0,01223	0,01273
4	S	0,00863	0,00866	0,00864
5	P	0,00684	0,00675	0,00679
6	Mn	0,02134	0,02140	0,02137
7	Cr	12,44353	12,54354	12,49353
8	Mo	1,97272	1,92511	1,94892
9	V	0,056	0,056	0,056
10	Cu	0,02652	0,02604	0,02628
11	W	4,34443	4,21637	4,28040
12	Ti	4,08322	4,02516	4,05419
13	Co	9,07336	9,07492	9,07492
14	Al	4,19567	4,21147	4,20357
15	B	0,01208	0,01194	0,01201
16	Nb	0,02710	0,02677	0,02693
17	Mg	0,01252	0,01220	0,01236
18	Fe	0	0	0
19	Sn	0,00285	0,00277	0,00281

Hasil Uji Metalografi Dengan SEM

Setelah diperoleh data hasil pengujian komposisi kimia selanjutnya dilakukan pengujian metalografi permukaan spesimen dengan menggunakan mikroskop elektron. Hasil pengujian SEM terhadap spesimen uji ditunjukkan pada gambar 2 hingga gambar 5 :

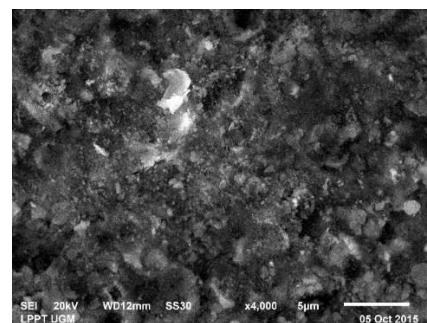
1) Titik A

a) Perbesaran 1000 kali :



Gambar 2. Struktur mikro Perbesaran 1000 kali pada titik A.

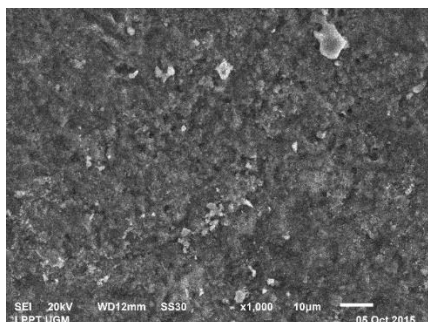
b) Perbesaran 4000 kali :



Gambar 3. Struktur Mikro Perbesaran 4000 kali pada titik A.

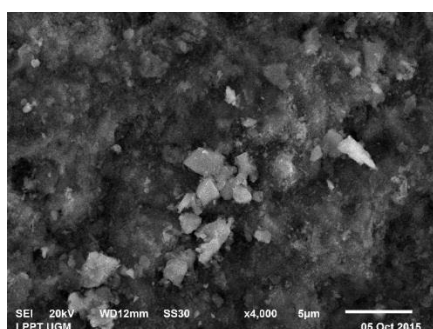
2) Titik B

a) Perbesaran 1000 kali :



Gambar 4. Struktur Mikro Perbesaran 1000 pada titik B.

b) Perbesaran 4000 kali :



Gambar 5. Struktur Mikro Perbesaran 4000 kali pada titik B.

Hasil Uji Tarik

Pengujian selanjutnya yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengujian tarik. Pada penelitian ini pengujian tarik dilakukan terhadap hasil dari sambungan las yang menggunakan bahan paduan super dengan tambahan nilek pada metode TIG (*tungsten inert gas*) dan *filler* yang direkayasa dari bahan yang sama. Pada penelitian ini digunakan standar uji tarik JIS dengan rincian ukuran spesimen uji pada tabel 2 berikut.

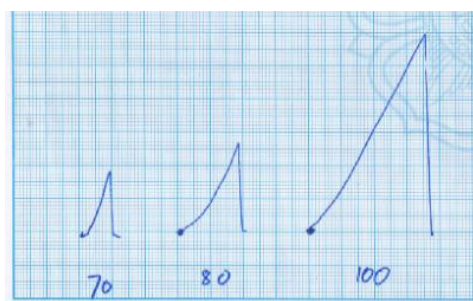
Tabel 2 Spesifikasi Ukuran Spesimen Dengan Standar JIS Z2201

<u>Pengelasan dengan arus 70 A</u>	<u>Pengelasan dengan arus 80 A</u>	<u>Pengelasan dengan arus 100 A</u>
T = 2,5 mm	T = 3 mm	T = 3 mm
W = 5 mm	W = 6 mm	W = 6 mm
A = T x W = 2,5 x 5 = 12,5 mm ²	A = T x W = 3 x 6 = 18 mm ²	A = T x W = 3 x 6 = 18 mm ²
L = 4√A = 4 x 3,5 = 14 mm	L = 4√A = 4 x 4,2 = 16,8 mm	L = 4√A = 4 x 4,2 = 16,8 mm
P = 1,2 x L = 1,2 x 14 = 16,8 mm	P = 1,2 x L = 1,2 x 16,8 = 20,16 mm	P = 1,2 x L = 1,2 x 16,8 = 20,16 mm

Setelah ukuran spesimen yang akan di uji disesuaikan dengan standar yang digunakan, selanjutnya masuk ketahapan pengujian tarik. Pada penelitian ini pengujian tarik dilakukan terhadap tiga spesimen yang berbeda. Perbedaan masing-masing spesimen terletak pada arus yang digunakan saat melakukan pengelasan. Arus yang digunakan adalah 70, 80, dan 100 ampere. Dan hasil pengujian tarik pada ketika spesimen tersebut ditunjukkan pada gambar 6 dan dapat dilihat hasil datanya tabel 3.

Tabel 3 Hasil Uji Tarik

No.	Arus	Tebal (mm)	Lebar (mm)	σ (MPa)	ε (%)
1	70 A	3.35	4.70	245.16	6.78
2	80 A	3.80	5.80	234.12	9.94
3	100 A	3.85	5.70	555.02	16.12



Gambar 6. Uji Tarik

Pembahasan

Analisis Hasil Uji Komposisi Kimia

Berdasarkan hasil pengujian komposisi kimia yang dilakukan di PT. Itokoh Ceperindo diperoleh hasil yang menunjukkan tiga unsur yang paling dominan yaitu Ni (63,71798 %), Cr (12,49353 %), dan Co (9,07492 %). Ketiga unsur yang dominan itu selanjutnya dimasukkan dalam situs <http://matweb.com> untuk mengetahui jenis paduan super spesimen uji. Hasilnya menunjukkan bahwa spesimen uji diduga merupakan jenis paduan super berbasis nikel Metal Rene 95:

Tabel 4 Komposisi Kimia Metal Rene 95.

Unsur	Hasil Pengukuran
Al	3,3 – 3,7 %
B	0,0060 – 0,015 %
C	0,040 – 0,090 %
Cr	12 – 14 %
Co	7,0 – 9,0 %
Mo	3,3 – 3,7 %
Ni	59,325 – 65,424 %
Nb	3,3 – 3,7 %
Ti	2,3 – 2,7 %
W	3,3 – 3,7 %
Zr	0,030 – 0,070 %

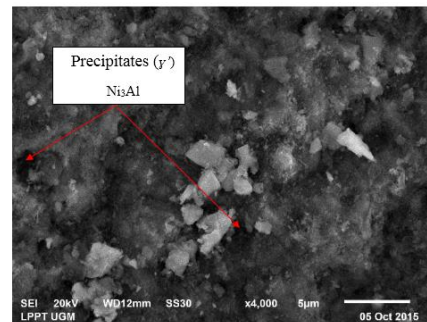
Dari hasil tersebut terlihat nilai Ni, Cr, dan Co pada spesimen uji mendekati spesifikasi dari metal Rene 95. Dari hasil pengujian tersebut bisa diketahui bahwa sudu turbin pesawat terbang ini memiliki kandungan unsur Ni yang tinggi mencapai 63% yang membuat spesimen memiliki ketahanan terhadap *high thermal condition*, ketahanan

oksidasi dan thermal fatigue, serta memiliki fracture toughness yang tinggi.

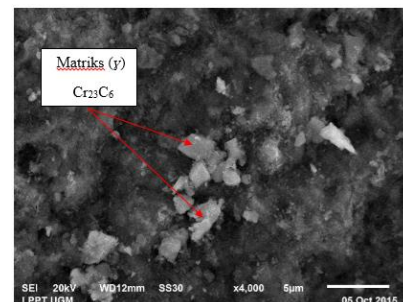
Menurut Smallman, 1999: 273, hasil pengujian yang menunjukkan logam paduan yang terdiri dari matriks nikel yang mengandung krom, titanium, aluminium dan kobalt yang larut termasuk dalam paduan Nimonic dan akan menghasilkan struktur dengan matriks penguatan larutan-padat atau precipitation hardening.

Analisis Hasil Uji Metalografi Permukaan

Dari hasil pengujian struktur yang dilakukan terhadap spesimen menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan perbesaran 1000x dan 4000x diperoleh hasil yang menunjukkan adanya ikatan precipitates dan matriks pada permukaan logam.



Gambar 7. Penyebaran Precipitates (γ')

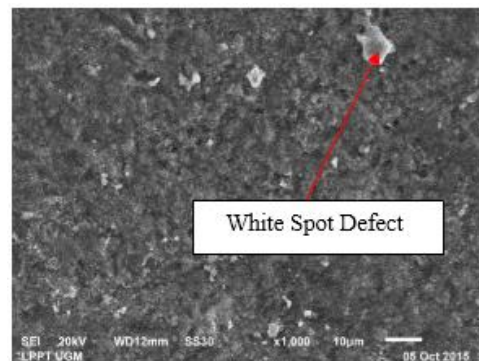


Gambar 8. Penyebaran Matriks (γ)

Matriks terlihat berwarna terang pada gambar 8, yang mana menunjukkan bahwa struktur matriks γ merupakan struktur yang dominan. Di dalam matriks γ diduga terbentuk ikatan unsur Cr_{23}C_6 . Dengan adanya ikatan unsur Cr_{23}C_6 membuat spesimen uji bersifat keras dan getas. Karbida Cr_{23}C_6 memiliki peran penting dalam penguatan dengan menghambat pergerakan dislokasi. Struktur lain yang terlihat pada permukaan spesimen uji yang berupa fasa γ' precipitates yang ditampilkan pada gambar berupa titik-titik hitam yang juga tersebar di antara fasa γ yang berwarna terang. Diduga pada bagian yang berwarna gelap (γ' precipitates) mengandung banyak unsur aluminium (Al) dan titanium (Ti). Dimana dalam fasa γ' precipitates terbentuk ikatan unsur Ni_3Al yang mana dengan adanya ikatan unsur ini akan membuat spesimen uji memiliki sifat yang ulet. Semakin besar dan merata persebaran fasa γ' precipitates akan membuat spesimen uji memiliki keuletan yang tinggi pula.

Selain pembentukan struktur mikro yang tampak pada permukaan spesimen uji, terlihat pula munculnya *white spot defect* pada permukaan. Pembentukan *white spot defect* ini umumnya terjadi akibat oksidasi pada permukaan spesimen uji., dimana hal tersebut sangat sesuai dengan kondisi

penggunaan spesimen uji sebagai sudu turbin pesawat yang mana lingkungan kerja dari spesimen uji merupakan tempat yang rawan untuk terjadinya oksidasi.



Gambar 9. *White Spot Defects*

Analisis Hasil Uji Tarik

Dari hasil pengujian tarik yang telah dilakukan terhadap hasil sambungan las bahan paduan super berbasis nikel dengan filler bahan sejenis dan variasi arus 70, 80, dan 100 A. Diperoleh hasil seperti Tabel 5.

Tabel 5 Hasil Uji Tarik

No.	A	T (mm)	L (mm)	σ (MPa)	ϵ (%)
1	70 A	3.35	4.70	245.1	6.78
2	80 A	3.80	5.80	234.1	9.94
3	100 A	3.85	5.70	555.0	16.12

Nilai pengujian tersebut selanjutnya dibandingkan dengan kondisi awal spesimen tanpa kerusakan.

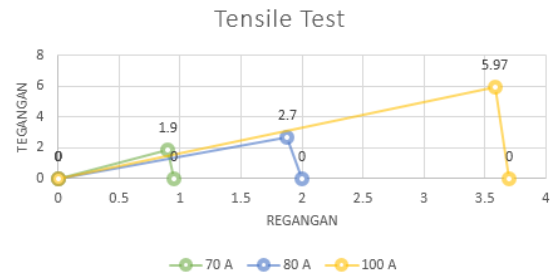
Tabel 6. Standar Uji Tarik Metal Rene 95

Pengujian Mesin	Hasil Pengukuran
Tegangan Tarik	210 MPa (Suhu 650°C)
Maksimum	240 MPa (Suhu 23°C)
Tegangan Mulur	160 MPa (Suhu 650°C)
	180 MPa (Suhu 23°C)

Hasil dari perbandingan antara spesimen hasil pengelasan dengan spesimen yang masih pada kondisi normal menunjukkan bahwa hasil pengelasan TIG yang dilakukan menggunakan arus 70 A dan 100 A menghasilkan sambungan yang memenuhi syarat tegangan tarik maksimal, dimana pada kondisi normal bahan tersebut memiliki tegangan tarik maksimal sebesar 240 MPa pada kondisi suhu kamar (23 °C). Sementara hasil pengujian pada hasil las yang menggunakan arus 70 A dan 100 A diperoleh hasil tegangan tarik maksimumnya sebesar 245,16 MPa dan 555,02 MPa. Berdasarkan hasil tersebut maka pengelasan dengan arus 70 A dan 100 A memenuhi syarat sebagai proses perbaikan terhadap kerusakan yang membutuhkan proses pengelasan.

Dari hasil pengamatan hasil uji tarik pada spesimen uji terlihat terjadinya patahan saat benda mencapai tegangan maksimum (σ_u) yaitu saat garis pada grafik mencapai titik tertinggi kemudian terjadi penurunan seketika. Proses terjadinya patahan seketika saat spesimen uji menerima pembebanan tarik maksimum menimbulkan tegangan geser maksimum yang memicu terjadinya dislokasi, sehingga patahan yang terjadi pada spesimen uji tarik merupakan patahan

getas. Hal tersebut diperkuat dengan tidak adanya *cup* dan *cone* pada permukaan patahan, selain itu patahan yang terjadi membentuk sudut 90° terhadap sumbu normal.



Gambar 14. Perbandingan Uji Tarik

Selanjutnya setelah melalui perhitungan tegangan tarik maksimum, hasil pengelasan diperhitungkan keuletannya. Dengan pengujian tarik bisa diketahui seberapa besar nilai keuletan dari suatu benda. Pada penelitian ini perhitungan yang digunakan adalah dengan teknik presentase perpanjangan (*elongation*). Berdasarkan perhitungan yang dilakukan diperoleh hasil yang ditunjukkan pada tabel 7.

Tabel 7. Presentase Elongasi Spesimen Uji

No.	Arus (A)	ϵ (%)
1	70	6.78
2	80	9.94
3	100	16.12

Presentase tersebut jika dituliskan pada angka, sehingga pertambahan panjang yang terjadi dari kondisi awal adalah pada hasil pengelasan 70 A terjadi petambahan

panjang 3,86 mm, pada arus 80 A terjadi pertambahan panjang 4,97 mm, dan pada arus 100 A terjadi pertambahan panjang sebesar 8,06 mm.

Berdasarkan hasil tersebut diketahui bahwa pengelasan dengan arus 70 A memiliki tingkat keuletan yang sesuai dengan kebutuhan penggunaan specimen, karena pertambahan panjangnya (elongasi) paling rendah dibanding arus 80 A dan 100 A yang dipakai pada saat pengelasan. Dari perhitungan tegangan maksimum serta elongasi yang terjadi maka dapat diambil kesimpulan bahwa dengan arus pengelasan 70 A akan diperoleh hasil yang baik dari kedua faktor tersebut, sehingga bisa menjadi alternatif perbaikan kerusakan pada sudu turbin pesawat terbang.

D. PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan serta pembahasan hasil analisis, diuraikan simpulan sebagai berikut :

1. Material paduan super yang berbasis Nikel (Ni) pada kondisi normal telah memiliki sifat yang kuat serta keras, terlihat dari hasil pengamatan struktur mikro permukaan pada kondisi normal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyebaran fasa matriks γ yang memberi sifat kuat dan keras dari bahan paduan super berbasis Nikel

(Ni) terjadi secara merata pada permukaan atau bisa dikatakan mendominasi permukaan material. Sementara penyebaran fasa γ' precipitates cenderung lebih sedikit dibandingkan fasa γ . Dari kondisi tersebut bisa diambil sebuah kesimpulan bahwa dengan dominasi dari matriks γ yang diduga mengandung unsur $Cr_{23}C_6$ yang tersebar merata mengakibatkan bahan paduan super dengan tambahan nikel memiliki kekerasan dan kekuatan yang tinggi serta ketahanan yang baik terhadap korosi. Sementara fasa γ' precipitates yang diduga mengandung unsur Ni_3Al membuat bahan paduan super berbasis nikel memiliki keuletan yang baik.

2. Material paduan super berbasis Nikel (Ni) yang mengalami proses pengelasan dengan menggunakan filler rod yang direkayasa dari bahan sejenis dan penerapan variasi kuat arus pengelasan TIG memiliki nilai tegangan maksimum dan elongisitas yang berbeda-beda. Perbedaan nilai arus ini mempengaruhi banyak hal salah satunya adalah pembentukan struktur mikronya. Hal tersebut terlihat dari nilai tegangan maksimum bahan pada kondisi normal mencapai

240 MPa sementara setelah dilakukan pengelasan terjadi perubahan besarnya tegangan maksimum pada arus 70 A diperoleh nilai 245 MPa, arus 80 A diperoleh nilai 234 MPa, dan pada arus 100 A diperoleh nilai 555MPa. Hal tersebut sejalan dengan penyebaran fasa γ yang terjadi yang mana pada hasil pengelasan 100 A terlihat terjadi penyebaran fasa terlihat terjadi penyebaran fasa γ yang sangat dominan sementara pada kondisi pengelasan 80 A penyebaran dari fasa γ kalah dominan dibanding fasa γ presipitat. Fasa γ matriks merupakan struktur utama penyokong kekuatan.

Hasil penelitian menunjukkan pengujian pengelasan yang menggunakan filler rod untuk bahan paduan super dengan tambahan nikel (Ni) dengan konsisi maksimum pada arus 70 A yang menghasilkan tegangan maksimum dengan lebih dari normal dan menunjukkan paling rendah nilai elongasi bila dibandingkan pengelasan dengan arus 80 A dan 100 A. Nilai elongasi dari pengelasan dengan arus 70A hanya sebesar 6% saja. Dari kondisi tersebut tentunya sesuai dengan kebutuhan perbaikan bahan paduan super berbasis nikel yang dalam hal ini merupakan bahan utama pembuat sudu turbin, yang pada

pengaplikasiannya dibutuhkan kekuatan serta elongasi yang kecil.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan implikasi yang telah dilakukan serta untuk bahan pertimbangan penelitian selanjutnya yang, relevan maka disampaikan saran-saran sebagai berikut :

1. Diperlukan pendalaman terkait struktur mikro pada bahan paduan super berbasis nikel yaitu dengan menggunakan SEM-EDX (Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive X-Ray) agar pengamatan yang lebih baik serta fenomena yang ada pada struktur mikro bisa teramati.
2. Perlu dilakukan penerapan PWHT pada hasil sambungan las untuk mengetahui apakah hasil pengelasan tersebut bisa lebih ditingkatkan lagi agar diperoleh hasil sambungan yang terbaik.
3. Saat proses pengujian perlu diperhatikan persiapan baik dari perlakuan mekanik yang dilakukan serta keakuratan ukuran standar spesimen pengujian agar diperoleh nilai pengujian yang akurat.
4. Untuk penelitian selanjutnya direkomendasikan menggunakan pengujian struktur mikro yang lebih

lengkap seperti SEM-EDX dan melakukan teknik pengelasan jenis lain agar diperoleh hasil yang lebih jelas dan rinci serta menambah alternatif langkah perbaikan.

DAFTAR PUSTAKA

Anrial, H. (2014). *Metalurgi Fisik*. Yogyakarta: Andi Offset.

An Intriduction to Electron Microscopy. (2010). Jerman: FEI Booklet.

Courtney, T.H. (2009). *Mechanical Behavior, Testing and Manufacturing Properties of Materials*. Columbia: Waveland Press.

Ekwan Prasetyo, *Material superalloy*, diakses melalui laman <http://ekwanprasetyo.blogspot.co.id/>

2014/09/material-super-alloy.html pada tanggal 28 Januari 2016.

JIS. (1998). *JIS Handbook Z2201*. Jepang: JIS.

JEOL Ltd. (2011). *SEM: Scanning Electron Microscope A to Z*. Tokyo: JEOL Ltd.

R-Tech *Welding Equipment*. (2010). *Guide to TIG Welding*. United Kingdom.

Reed, R.C. (2006). *The Superalloys Fundamentals and Applications*. New York: Cambridge University Press.

Sugiyono. (2013). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Bandung: Alfabeta

Zipperian, D.C. (2011). *Metallographic Handbook*. Arizona: PACE Technologies.