

Analisa Pengaruh Variasi Pre-Weld Heat Treatment dan Aging Post Weld Heat Treatment pada Sambungan Las Aluminium 6061 terhadap Kekuatan Tarik dan Struktur Makro

Tin Rachmatullah, Herman Pratikno, dan Hasan Ikhwan
Departemen Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: hermankelautan@gmail.com

Abstrak—Alumunium 6061 merupakan alumunium dengan komposisi paduan Al-Mg-Si sebagai paduan utama yang sering digunakan untuk material struktur lepas pantai dikarenakan kekuatan yang tinggi, ductility baik dan ketahanan korosi yang baik juga sifat mekanisnya ditingkatkan dengan cara heat treatment. Tujuan dari paper ini adalah untuk menunjukkan bagaimana pengaruh variasi perlakuan heat treatment berupa preheating dan aging post weld heat treatment pada sambungan las alumunium 6061 dengan proses GTAW terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro dengan elektroda ER 5356. Adapun variasi suhu preheat adalah 80°C, 100°C, dan 120°C dan variasi suhu aging post weld heat treatment 180°C dan 260°C. Hasil penelitian didapatkan spesimen dengan perlakuan preheat 120°C dan aging post weld heat treatment 260°C memiliki ultimate strength terbesar yaitu 246,74 MPa dan yield strength sebesar 125,21 MPa. Serta HAZ terpanjang dimiliki spesimen perlakuan preheat 120°C dan aging PWHT 260°C dengan lebar HAZ sepanjang 3,5 mm.

Kata Kunci—Alumunium 6061, preheating, Aging, Post Weld Heat Treatment, Gas Tungsten Arc Welding.

I. PENDAHULUAN

DALAM beberapa tahun terakhir industri lepas pantai menjadi semakin tertarik pada penggunaan bahan ringan karena dianggap menawarkan manfaat potensial dalam hal mengurangi berat dan juga biaya fasilitas produksi bangunan lepas pantai. Paduan aluminium khususnya telah menerima banyak perhatian. Paduan aluminium untuk aplikasi struktural memberikan sejumlah keunggulan dibandingkan dengan baja karbon diantaranya kombinasi dari *low density* dengan kekuatan sedang. Selain itu, juga memiliki sifat ketahanan korosi yang tinggi mengarah pada pengurangan biaya perawatan dengan menghilangkan pengecatan. Aluminium menawarkan potensi terbesar untuk penghematan berat dan biaya adalah pada area struktur topside [1].

Paduan aluminium dikelompokkan menjadi 2 yaitu *heat-treatable* dan *non heat-treatable* aluminium seri 6XXX termasuk dalam paduan aluminium *heat treatable* dikarenakan memiliki kandungan Mg dan Si [2]. , aluminium seri ini banyak digunakan untuk industri lepas pantai diantaranya adalah fabrikasi kapal, *oil and gass pipe*, dan turbin angin lepas pantai. Dalam proses fabrikasi penyambungan aluminium seri 6XXX disarankan untuk menggunakan *Tungsten Inert Gas* (TIG) dan *Metal Inert Gas* (MIG) karena penerapannya yang relatif lebih mudah dan

ekonomi [3]. Namun pada proses pengelasan aluminium memiliki kecenderungan mengalami distorsi, karena tegangan sisa yang muncul akibat proses pengelasan sehingga akan menurunkan sifat mekanik sambungan las. Selain itu aluminium juga rentan mengalami *hot crack* khususnya pada paduan aluminium-magnesium-silicon [4].

Alumunium seri 6000 merupakan paduan yang akan memberi respon ketika diberi perlakuan panas (*heat treatable*), maka dari itu untuk meningkatkan sifat mekanis dari sambungan las aluminium maka dilakukan *heat treatment*. Perlakuan berupa pengaplikasian *preheat* sebelum dilakukan proses pengelasan dan aging *post weld heat treatment* (PWHT). Proses *preheating* dilakukan untuk memperlambat laju pendinginan, menghilangkan kelembaban dan mengurangi resiko *crack* [5]. Perlakuan aging dapat meningkatkan kekuatan material dengan membentuk presipitasi Mg₂Si dengan suhu yang tepat [5].

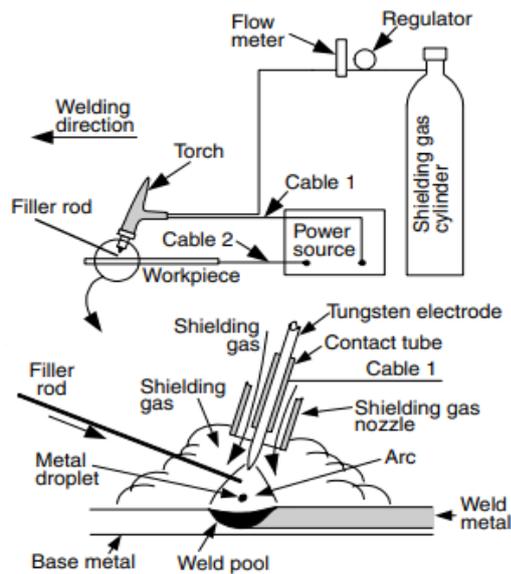
Untuk mengetahui pengaruh dari pengaplikasian *preheating* dan aging PWHT terhadap kekuatan tarik dan struktur makro dalam penelitian tugas akhir ini dirancang sambungan *single V* paduan aluminium seri 6061 (AA6061) hasil *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). Dengan variasi suhu *preheating* 80°C, 100°C, dan 120°C dan variasi suhu aging PWHT 180°C dan 260°C.

II. METODOLOGI PENELITIAN

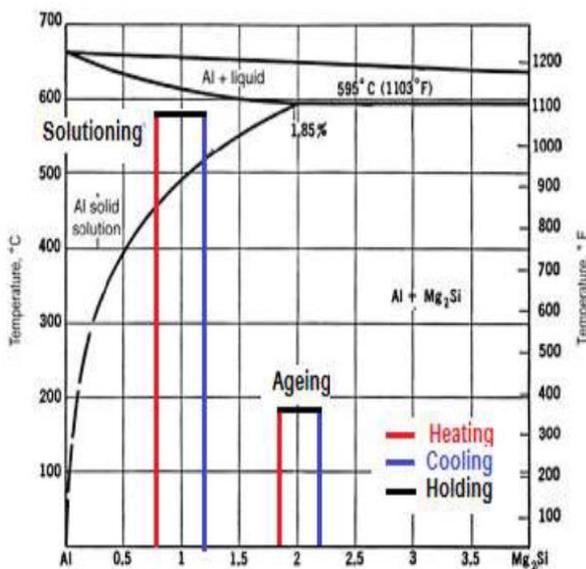
Terdapat beberapa tahapan dalam melakukan penelitian ini Tahap pertama adalah studi literatur di lakukan dengan mempelajari jurnal dan buku yang relevan dengan topik penelitian. Selanjutnya merencanakan *Welding Procedure Specification* (WPS) sesuai dengan variable-variabel yang telah ditentukan. Lalu menyiapkan material dan alat untuk selanjutnya dilakukan prosedur pengelasan sesuai dengan desain WPS sebelum dilakukan pengelasan material terlebih dahulu diberi perlakuan panas (*preheating*). Setelah terbentuk sambungan las material tersebut diberi perlakuan panas berupa aging *Post Weld Heat Treatment* (PWHT). Tahap terakhir adalah membentuk sambungan las menjadi spesimen uji sesuai standard uji yang digunakan untuk selanjutnya di uji mekanik untuk mendapatkan kekuatan sambungan dan uji metalografi untuk mengetahui perilaku struktur makro dari sambungan las.

A. Aluminium 6061

Paduan aluminium seri 6061 mengandung silikon dan magnesium dengan persentase Si 0,4%-0,8% dan Mg 0,8%-



Gambar 1. Skema pengelasan GTAW.

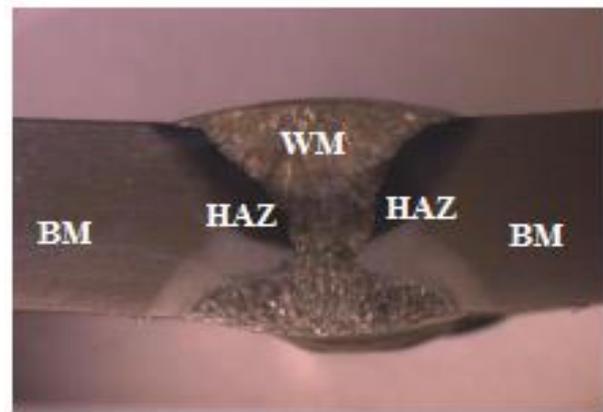


Gambar 2. Diagram fasa paduan Aluminium-Mg-Si.

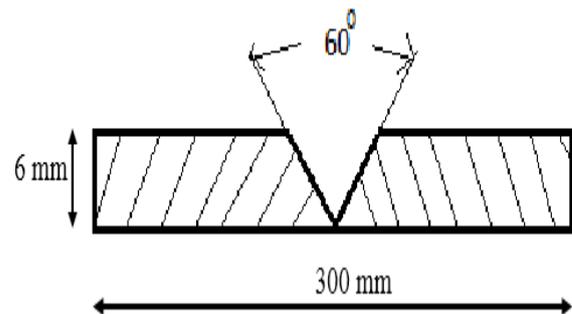
1,2%, kandungan tersebut apabila memenuhi proporsi yang diperlukan sebesar 1,73:1 untuk pembentukan magnesium silisida (Mg_2Si) sehingga membuat paduan ini memiliki mampu diberi perlakuan panas [6]. Paduan aluminium 6061 adalah yang paling serbaguna dari kelompok yang dapat diolah panas yang memiliki ketahanan korosi yang baik yang digunakan dalam aplikasi transportasi dan structural.

B. Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

Gas tungsten arc welding (GTAW) adalah proses las busur yang menggunakan busur antara tungsten elektroda (non konsumsi) dan titik pengelasan. Proses ini digunakan dengan perlindungan gas dan tanpa penerapan tekanan. Proses ini dapat digunakan dengan atau tanpa penambahan filler metal. Keunggulan dari proses GTAW adalah tidak menghasilkan slag dan hasil lasan bersih karena tidak menimbulkan spatter [7]. Filler metal yang digunakan untuk menyambung aluminium seri 6061 dengan proses GTAW adalah ER 5356 dan ER4043 [3]. Ilustrasi pengelasan GTAW dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 3. Ilustrasi spesimen uji makro.



Gambar 4. Bentuk Sambungan Single V-Groove.

Tabel 1. Deskripsi Spesimen pengujian

Spesimen	Variasi Perlakuan Panas
O	Spesimen tanpa heat treatment
A1	Preheat 80°C dan Aging PWHT 180°C
B1	Preheat 80°C Aging PWHT 260°C
A2	Preheat 100°C dan Aging PWHT 180°C
B2	Preheat 100°C dan Aging PWHT 260°C
B2	Preheat 100°C dan Aging PWHT 260°C
A3	Preheat 120°C dan Aging PWHT 180°C
B3	Preheat 120°C dan Aging PWHT 260°C

C. Preheating

Preheat merupakan pemanasan sebelum pengelasan yang dilakukan pada suhu dibawah suhu rekristalisasi *preheating* bisa saja menggunakan *gas burner, oxy-gas flame, electric blanket*, pemanasan induksi, atau pemanasan di *furnace* [8]. Alasan utama dilakukan *preheat* adalah memperlambat laju pendinginan pada logam las dan logam dasar, memungkinkan hidrogen dapat terdifusi keluar sehingga mengurangi potensi retak, dan meningkatkan ketangguhan logam [6].

D. Precipitation Hardening (Aging)

Precipitation hardening atau penguatan prestipitasi adalah suatu proses paduan aluminium diberi panas, proses ini terdiri dari dua langkah yaitu *solution treatment* paduan dipanaskan diantara garis *solvus* dan *liquidus* diantara suhu 460°C -540°C dan ditahan hingga terbentuk larutan padat yang homogen [9]. Proses *solution* menyebabkan elemen paduan akan larut kedalam larutan padat apabila paduan di *quenching* maka akan didapat paduan padat homogen yang dibentuk. Proses selanjutnya adalah *quenching* tujuannya untuk menjaga agar paduan tetap satu fasa dengan cara mendinginkan dengan cepat.

Tabel 2.
Hasil uji tarik spesimen Non Heat treatment

Spesimen	Hasil Uji Tarik			
	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Rata-Rata Yield (MPa)	Rata-Rata Ultimate (MPa)
O1	88.16	167.81		
O2	84.08	165.88	87.73	167.66
O3	90.94	169.28		

Tabel 3.
Hasil uji tarik spesimen preheat 80°C dan aging 180°C

Spesimen	Hasil Uji Tarik			
	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Rata-Rata Yield (MPa)	Rata-Rata Ultimate (MPa)
A1.1	88.81	186.98		
A1.2	90.94	185.59	90.85	186.70
A1.3	92.79	187.53		

Tabel 4.
Hasil uji tarik spesimen preheat 100°C dan aging 180°C

Spesimen	Hasil Uji Tarik			
	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Rata-Rata Yield (MPa)	Rata-Rata Ultimate (MPa)
A2.1	111.36	204.06		
A2.2	113.45	201.85	111.80	203.85
A2.3	110.58	205.65		

Tabel 5.
Hasil uji tarik spesimen preheat 120°C dan aging 180°C

Spesimen	Hasil Uji Tarik			
	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Rata-Rata Yield (MPa)	Rata-Rata Ultimate (MPa)
A3.1	120.10	222.64		
A3.2	118.73	220.43	120.48	220.94
A3.3	122.62	219.74		

Proses selanjutnya adalah *aging* atau penuaan paduan ditahan pada suatu temperature tertentu dibawah garis solvus selama beberapa waktu tertentu. Proses aging dibagi dua macam penuaan alami (*natural aging*) dan penuaan buatan (*artificial aging*). Penuaan alami (*natural Aging*) adalah penuaan untuk paduan aluminium yang di aging dalam keadaan dingin. *Natural aging* berlangsung pada temperatur ruang antara 15°C–25°C dan waktu penahanan 5 sampai 8 hari. Penuaan buatan (*artificial aging*) adalah penuaan untuk paduan aluminium yang di aging dalam keadaan panas. *Artificial aging* berlangsung pada temperatur antara 100°C–200°C dan dengan lamanya waktu penahanan antara 1 sampai 24 jam [10]. Diagram fase dari aluminium dapat dilihat pada Gambar 2.

E. Uji Makro

Pengujian makro tes bertujuan untuk melihat bentuk makro material daerah lasan sesuai dengan *ASTM E3-01*, agar bentuk dari lasan dapat terlihat maka permukaan material harus halus dengan dilakukan proses *machining*, *grinding*, dan *polishing*. Dari hasil tes makro ini dapat diketahui *visual* kualitas lasan dan bentuk lasan. Pengujian makro pada proses pengelasan sangat perlu dilakukan, pada pengujian makro akan mendapat gambaran seberapa dalam penetrasi dan seberapa lebar *HAZ*. Selain itu akan mengidentifikasi cacat

Tabel 6.
Hasil uji tarik specimen preheat 80°C dan aging 260°C

Spesimen	Hasil Uji Tarik			
	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Rata-Rata Yield (MPa)	Rata-Rata Ultimate (MPa)
B1.1	121.29	217.22		
B1.2	116.54	213.85	117.35	215.62
B1.3	114.21	215.78		

Tabel 7.
Hasil uji tarik spesimen preheat 100°C dan aging 260°C

Spesimen	Hasil Uji Tarik			
	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Rata-Rata Yield (MPa)	Rata-Rata Ultimate (MPa)
B2.1	120.36	230.43		
B2.2	119.45	226.60	119.88	228.07
B2.3	119.83	227.17		

Tabel 8.
Hasil uji tarik spesimen preheat 120°C dan aging 260°C

Spesimen	Hasil Uji Tarik			
	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Rata-Rata Yield (MPa)	Rata-Rata Ultimate (MPa)
B3.1	127.53	249.68		
B3.2	122.24	247.82	125.21	246.74
B3.3	125.86	242.73		

Tabel 9.
Lebar HAZ pada setiap spesimen

Spesimen	Lebar HAZ (mm)
<i>Non Heat Treatment</i>	
<i>Preheating 80°C dan Aging 180°C (A1)</i>	1,6
<i>Preheating 80°C dan Aging 260°C (B1)</i>	1,8
<i>Preheating 100°C dan Aging 180°C (A2)</i>	2,5
<i>Preheating 100°C dan Aging 260°C (B2)</i>	2,6
	3,4
<i>Preheating 120°C dan Aging 180°C (A3)</i>	
<i>Preheating 120°C dan Aging 260°C (B3)</i>	3,5

yang ada pada lasan tersebut Foto makro dimaksudkan untuk mengetahui bentuk dan batas antara daerah las, daerah *HAZ*, logam induk, las bagian luar dan lasan bagian dalam di sisi lain di daerah *HAZ* adalah daerah yang sangat penting, dimana daerah yang mempertemukan daerah logam las dan logam induk, maka kekuatan sambungan juga sangat ditentukan oleh daerah ini [11].

III. HASIL DAN DISKUSI

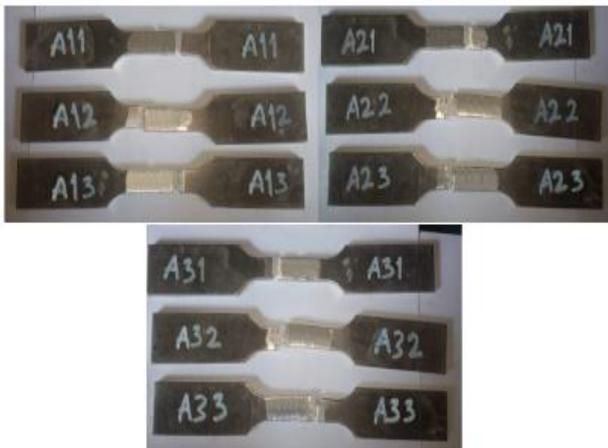
A. Prosedur Pengelasan

Pada penelitian ini menggunakan *Welding Procedure Specification* sebagai berikut:

- Spesifikasi Material : Aluminium Seri 6061
- Dimensi : 300 mm x 150 mm x 6 mm
- Tipe Sambungan : *Single V– Groove*
- Posisi Pengelasan : 1G
- Filler Metal* : ER 5356
- Dia. *Filler Metal* : Ø 3.2 mm
- Arus : AC
- Jumlah Layer : 3 Layer
- Metode Pembersihan : *Grinding*
- Shielding Gas* : Argon 99,99%



Gambar 5. Spesimen Non Heat Treatment Tensile Test Result.



Gambar 6. Hasil uji tarik spesimen Aging 180°C.



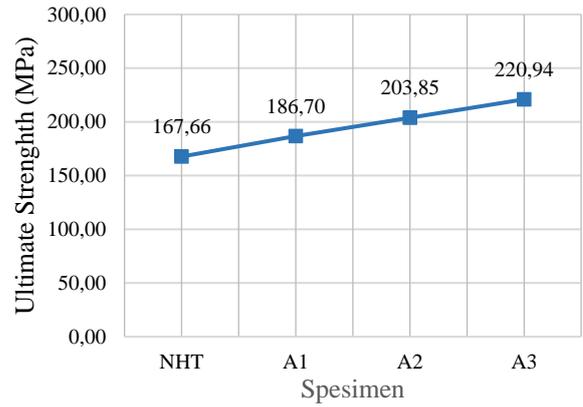
Gambar 7. Hasil uji tarik spesimen Aging 260°C.

- k. Gas Flow Rate : 20 L/menit
- l. Preheating : 80°C, 100°C dan 120°C.
- m. Aging PWHT : 180°C and 260°C

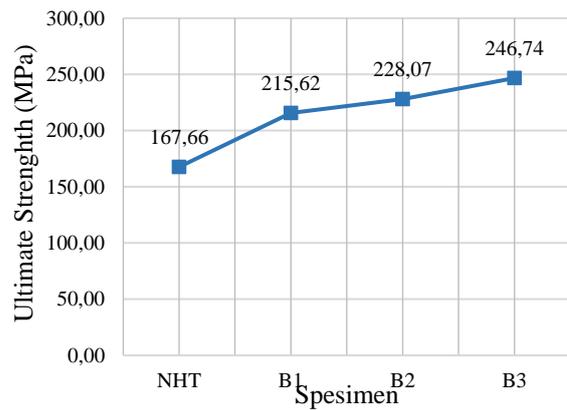
Ilustrasi spesifikasi kampuh dapat dilihat pada Gambar 3 dan keterangan spesimen pada Tabel 1.

B. Pengujian Tarik

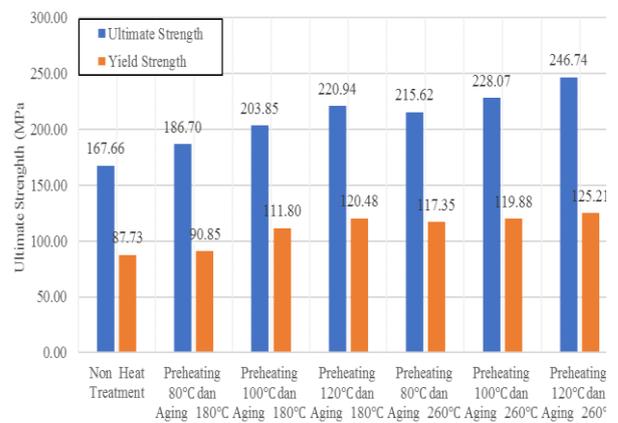
Standar yang digunakan dalam pengujian tarik adalah AWS[D1.2 dimana kriteria penerimaan hasil pengujian tarik apabila kekuatan tarik lebih besar dari kekuatan tarik minimum yang telah ditetapkan kekuatan tarik dari aluminium 6061 dengan perlakuan panas adalah 165 MPa dan lokasi putus berada pada base metal. Pada penelitian ini dilakukan 3x uji tarik untuk mendapatkan rata-rata nilai kekuatan tarik disetiap spesimen. Tabel 2-9 merupakan detail



Gambar 8. Grafik hasil pengujian tarik spesimen dengan Aging 180°C.



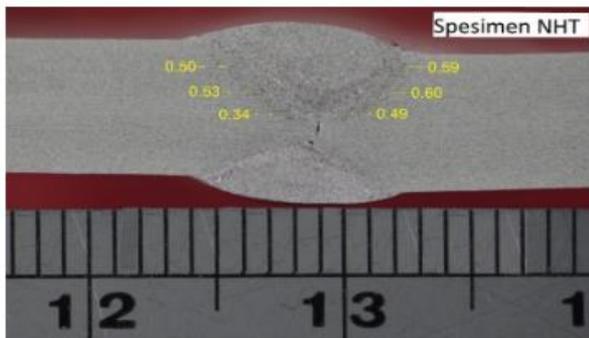
Gambar 9. Grafik hasil uji tarik spesimen dengan suhu 260°C.



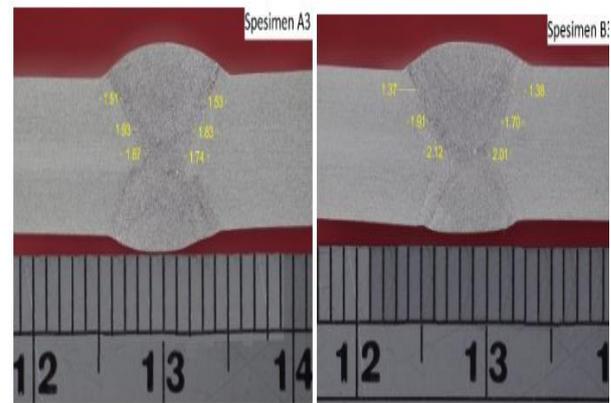
Gambar 10. Grafik hasil uji tarik seluruh specimen.

dari hasil pengujian tarik berupa nilai ultimate strength dan yield strength pada ketujuh spesimen. Gambar 3-10 merupakan visual dari spesimen telah dilakukan uji tarik.

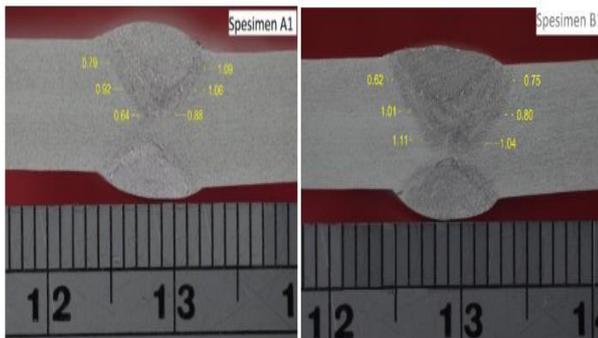
Hasil ultimate strength yang didapat pada ketujuh spesimen menunjukkan hasil uji tarik telah melebihi standar yang artinya keseluruhan spesimen lolos uji tarik. Berdasarkan grafik pada Gambar 7-8 dapat dilihat penggunaan suhu aging yang berbeda menunjukkan *trendline* yang sama, yaitu semakin meningkat. Hal ini ditunjukkan dengan semakin bertambahnya suhu *preheat* nilai kekuatan tarik juga semakin meningkat. sesuai dengan penjelasan [12] bahwa pengaplikasian *preheat* dapat meningkatkan kekuatan dan ketangguhan hasil pengelasan serta mengurangi resiko terjadinya *crack*. Selain itu pada Gambar 9, grafik menunjukkan dengan bertambahnya suhu aging kekuatan tarik juga semakin meningkat hasil yang sama juga diperoleh



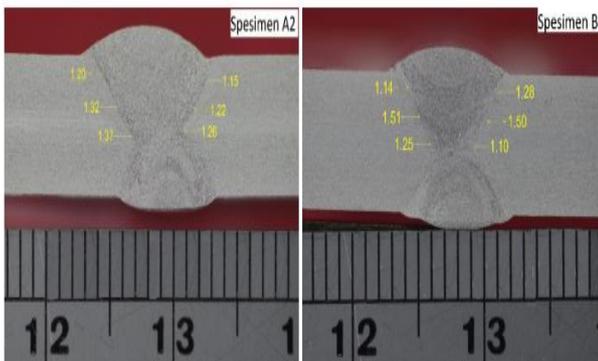
Gambar 11. Foto Struktur Makro spesiemen tanpa heat treatment.



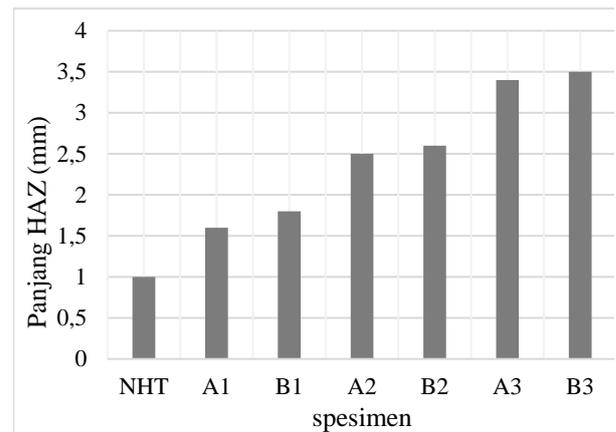
Gambar 14. Foto Struktur Makro specimen A3 dan specimen B3.



Gambar 12. Foto Struktur Makro spesimen A1 dan spesimen B1.



Gambar 13. Foto Struktur Makro specimen A2 dan specimen B2.



Gambar 15. Lebar Daerah HAZ.

pada penelitian yang dilakukan oleh [13]. Sehingga dapat disimpulkan perlakuan *preheat* dan *aging PWHT* mempengaruhi kekuatan tarik. Pada temperature *preheat* 80°C dan *aging PWHT* 180°C kekuatan tarik meningkat 10,2%, pada temperature *preheat* 80°C dan *aging PWHT* 260°C kekuatan tarik meningkat 22,24%, pada temperature *preheat* 100°C dan *aging PWHT* 180°C kekuatan tarik meningkat 17,75%, pada temperature *preheat* 100°C dan *aging PWHT* 260°C kekuatan tarik meningkat 26,48%, pada temperature *preheat* 120°C dan *aging PWHT* 180°C kekuatan tarik meningkat sebesar 24,12%, dan peningkatankekuatan tarik tertinggi adalah pada temperature *preheat* 120°C dan *aging PWHT* 260°C peningkatan mencapai 32,05%.

C. Pengujian Makro

Foto struktur makro, dilakukan dengan perbesaran 7x dengan menggunakan DSLR untuk melihat HAZ (*Heat Affected Zone*), *base metal*, dan *Weld Metal*. Dari pengujian makro didapatkan area-area yang terbentuk selama proses pengelasan seperti lebar HAZ yang terjadi pada spesimen. Selain itu, fungsi dari pengujian makro adalah untuk mengetahui cacat las yang ada di dalam hasil pengelasan Pada hasil foto makro, didapatkan lebar HAZ terbesar adalah pada

spesimen B3, spesimen dengan perlakuan *preheat* 120°C dan *Aging PWHT* 260°C sepanjang 3,5 mm. kemudian diikuti dengan spesimen A3 dengan lebar HAZ sepanjang 3,4 mm, Spesimen B2 dengan lebar HAZ sepanjang 2,6 mm, Spesimen A2 dengan lebar HAZ 2,5 mm, spesimen A1 1,6 mm dan B1 yaitu 1,8 mm. Sedangkan lebar HAZ terkecil dimiliki oleh spesimen *non-heat treatment* yaitu sepanjang 1 mm.

Dari data tersebut Berdasarkan data lebar HAZ yang didapat dari hasil uji makro tampak perbedaan luasan dari HAZ, perbedaan tersebut dipengaruhi oleh perlakuan *preheat* yang diberikan semakin tinggi temperature yang diberikan penetrasi yang terjadi. Menurut Kou, S. 2003 pengelasan aluminium rentan mengalami cacat *hot crack* dan porositas pada ke-6 spesimen yang diberikan perlakuan *preheat* keseluruhan tidak memiliki cacat las, cacat *incomplete fusion* sebesar 1.02 mm ditemukan pada spesimen yang tidak diberikan perlakuan *preheat* adanya cacat dapat mengurangi kekuatan dari sambungan las [14]. Semua spesimen terbebas dari retak las, dapat disimpulkan pengaplikasian *preheat* dapat meminimalisir terjadinya cacat las dengan mengurangi laju pendinginan dari material.

Dapat disimpulkan perlakuan *preheat* mempengaruhi lebar HAZ semakin bertambah suhu *preheat* lebar HAZ juga ikut bertambah, Sedangkan pengaplikasian *aging PWHT* tidak terlalu berpengaruh pada lebar HAZ terbukti perbedaan lebar HAZ dengan perlakuan *aging* yang berbeda tidak memiliki perbedaan yang signifikan dikarenakan *aging PWHT* dilakukan ketika material sudah dingin. Untuk lebih lengkapnya data lebar HAZ dapat dilihat pada Tabel 9.

Sedangkan gambar hasil uji makro dapat dilihat pada Gambar 12-15. kenaikan lebar HAZ pada spesimen dapat dilihat pada Gambar 15.

D. Hubungan Antara Uji Tarik dan Uji Makro

Dari pengujian tarik dan pengamatan makro, dapat dilihat bahwa perbedaan suhu *preheat* dan *aging* yang digunakan dalam pengelasan sangat mempengaruhi hasil pengelasan. Pada seluruh spesimen dengan perlakuan panas tidak ditemukan cacat las pada ketiga daerah hasil las, dan kekuatan tarik cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya suhu *preheat* dan *aging* *pwht* dan daerah patahan berada di base metal. Sedangkan pada spesimen tanpa perlakuan panas memiliki hasil uji tarik terendah hal ini dikarenakan ditemukannya cacat las berupa *incomplete fusion* pada *weld metal* hal ini menyebabkan daerah patahan ada di *weld metal* sehingga mengurangi kekuatan dari lasan.

Pada pengamatan makro dengan bertambahnya suhu *preheat* HAZ akan semakin lebar, hal yang sama juga terjadi pada kekuatan tarik semakin bertambah suhu *preheat* kekuatan tarik juga ikut bertambah. Hal ini dikarenakan dengan bertambahnya suhu pemanasan akan meningkatkan penetrasi pada saat proses pengelasan sehingga daerah HAZ menjadi lebar menyebabkan kekuatan las semakin besar.

Jadi, pada kedua pengujian ini dapat dilihat bahwa semakin besar pengaplikasian suhu perlakuan panas *preheat* akan menambah panjang dari HAZ, serta dapat meminimalisir terjadinya cacat las dan mendapatkan hasil lasan yang terbaik. Sedangkan variasi suhu *aging* tidak memberi pengaruh pada lebar HAZ hal ini dikarenakan perlakuan *aging* dilakukan ketika lasan sudah dingin.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Dari hasil penelitian mengenai pengaruh variasi temperature *preheat* dan *aging* *PWHT* terhadap pengelasan GTAW material Aluminium seri 6061, didapatkan kesimpulan, yaitu: (1) Pada hasil uji tarik pengelasan dengan perlakuan *preheat* dan *aging* dengan suhu tertinggi menghasilkan kekuatan tarik paling tinggi, hasil pengelasan menggunakan suhu *preheat* 120°C dan *aging* *PWHT* 260°C menghasilkan *ultimate strength* sebesar 246,74 MPa dan *yield strength* sebesar 125,21 MPa; (2) Pada pengamatan makro-, semakin tinggi suhu *preheat* yang digunakan maka HAZ semakin panjang dan mengurangi potensi cacat las. Pada spesimen dengan *preheat* 120°C memiliki lebar HAZ terbesar yaitu 3,5 mm; (3) Dari semua hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi pengaplikasian suhu *preheat* dan *aging* akan menambah kekuatan tariknya.

Dengan bertambah lebarnya HAZ membuktikan penetrasi proses pengelasan semakin dalam dan lasan semakin kuat. Serta pengaplikasian *preheat* dapat meminimalisir terjadinya cacat las.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis sangat berterimakasih kepada *welding center* PPNS, Laboratorium pengecoran Teknik Mesin FTI ITS, dan PT.Robutech yang telah membantu penulis dalam mengerjakan penelitian Tugas Akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. M. Stannard, E. J. Adlington, and M. J. Bayley, "Design implications on the use of aluminum offshore," in *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, May 1989, vol. 1989-May, pp. 253–260, doi: 10.4043/6147-ms.
- [2] R. Rochman, P. Hariyati, and C. Purbo, "Karakterisasi sifat mekanik dan pembentukan fasa presipitat pada aluminium alloy 2024 – T 81 akibat perlakuan penuaan," *Mekanika*, vol. 8, no. 2, pp. 165–171, 2010.
- [3] A. American and N. Standard, *Structural Welding Code Aluminium*, 6th ed. SA: American Welding Society (AWS) D1 Committee on Structural Welding, 2014.
- [4] P. Kah, E. Hiltunen, and J. Martikainen, "Investigation of hot cracking in the welding of aluminium alloys (6005 & 6082)," in *63rd Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding 11-17, 2010*, no. July, pp. 373–380.
- [5] D. Radaj, *Heat Effect of Welding Temperature Field, Residual Stress, and Distortion*, 1st ed. Berlin ;;New York: Springer-Verlag, 1992.
- [6] C. Meng, "Effect of preheating condition on strength of AA6060 aluminium alloy for extrusion," Auckland University of Technology, 2010.
- [7] H. Wiryosumarto and T. Okumura, "Teknologi pengelasan logam," *Pradya Paramita*, 2000.
- [8] A. F. D. Yasfi, "Analisis pengaruh aplikasi *preheat* dan *post weld heat treatment* pada panalisis pengaruh aplikasi *preheat* dan *post weld heat treatment* pada pengelasan aluminium 5083 propeller shaft bracket menggunakan metode pengelasan *gma* terhadap sifat mekanis dan meta," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.
- [9] W. F. Smith, *Foundations of Materials Science and Engineering*, vol. 72953586. New York: McGraw-Hill Science, 1993.
- [10] Krishna Pal Singh Chauhan, "Influence of heat treatment on the mechanical properties of aluminium alloys (6xxx series): a literature review," *Int. J. Eng. Res.*, vol. V6, no. 03, pp. 386–389, 2017, doi: 10.17577/ijertv6is030301.
- [11] A. A. Islamy, N. P. Ariyanto, and A. Wibowo, "Pengaruh variasi heat input proses gas metal arc welding berdasarkan distribusi kekerasan dan lebar heat affected zone," Batam Polytechnics.
- [12] R. S. Funderburk, "Key Concepts In Welding Engineering (Fundamentals of Preheat)," *Weld. Innov.*, vol. XIV, no. 2, pp. 16–17, 1997.
- [13] M. Kumar, M. M. Baloch, M. I. Abro, S. A. Memon, and A. D. Chandio, "Effect of artificial aging temperature on mechanical properties of 6061 aluminum alloy," *Mehran Univ. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 38, no. 1, pp. 31–36, 2019, doi: 10.22581/muet1982.1901.03.
- [14] K. Sindo, *Welding Metallurgy. New Jersey*, 2nd ed. Garsington Road, Oxford: Blackwell Science, 2011.