

## **Analisis Hasil Lasan GTAW Setelah Proses Preheat Pada Material AA7075 Terhadap Stuktur Mikro, Kekuatan Tarik dan Kekerasan**

**Fakhri Sani Hibatullah<sup>1</sup>, Wartono<sup>2,\*</sup>, Nizam Effendi<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional  
Yogyakarta

Jl. Babarsari, Caturtunggal, Depok, Sleman, Yogyakarta 55281 Telp. (0274) 485390

\*Corresponding author: [wartomo@itny.ac.id](mailto:wartomo@itny.ac.id).

### **Abstract**

*This study aims to determine the effect of the preheat process with temperature variations of 190° C, 200° C and 210° C on the microstructure, tensile strength and hardness value of AA7075 aluminum alloy material after going through the GTAW welding process. This research will use the GTAW welding method and the AA7075 series aluminum alloy material with a thickness of 6 mm is used as the base metal to be joined. The purpose of this study was to determine the mechanical properties in the form of tensile strength, hardness, and microstructure formed by the preheat process with temperature variations of 190° C, 200° C and 210° C and each holding time of 30 minutes, 45 minutes and 60 minutes. with GTAW welding method to aluminum alloy AA7075. Based on the results of microstructure testing, it is stated that the grain shape of the weld metal has equiaxed shaped grains due to recrystallization due to welding heat, in the HAZ region it has large columnar shaped grains, and in the base metal area it is columnar in shape and is smooth and dense. Porosity occurs in non-preheated specimens, 190°C preheated and 200°C preheated. The highest tensile stress value was found in 210°C preheated specimens of 551.09 N/mm<sup>2</sup> with a yield stress of 546.26 N/mm<sup>2</sup> and the results of hardness testing with Vickers method shows the highest hardness value with a value of 286.11 Kg/mm<sup>2</sup> is found in the HAZ area of the 190°C preheat specimen due to the high heat input during welding which affects the grain size of the structure in the HAZ region to be finer.*

**Keywords:** *Welding, GTAW, Aluminium, AA7075, Preheat.*

### **Abstrak**

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh proses preheat dengan variasi temperatur 190° C, 200° C dan 210° C terhadap struktur mikro, kekuatan tarik dan nilai kekerasan material aluminium paduan AA7075 setelah melalui proses pengelasan GTAW. Penelitian ini akan menggunakan metode pengelasan GTAW dan material aluminium paduan seri AA7075 dengan tebal 6 mm digunakan sebagai logam dasar yang akan disambung. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui sifat mekanik berupa kekuatan tarik, kekerasan, dan struktur mikro yang terbentuk akibat proses preheat dengan variasi temperatur 190° C, 200° C dan 210° C dan masing – masing waktu penahanan 30 menit, 45 menit dan 60 menit dengan metode pengelasan GTAW terhadap aluminium paduan AA7075. Berdasar hasil pengujian struktur mikro menyatakan bahwa bentuk butir pada weld metal memiliki butiran berbentuk equiaxed akibat terjadi rekristalisasi karena panas pengelasan, pada daerah HAZ memiliki butir berbentuk columnar dengan ukuran besar, dan pada daerah base metal berbentuk columnar berukuran halus dan rapat. Porositas terjadi pada spesimen non preheat, preheat 190° C dan preheat 200° C. Nilai tegangan tarik tertinggi dimiliki oleh spesimen preheat 210° C sebesar 551,09 N/mm<sup>2</sup> dengan tegangan yield sebesar 546,26 N/mm<sup>2</sup> dan hasil

pengujian kekerasan dengan metode Vickers menunjukkan nilai kekerasan tertinggi dengan nilai 286,11 Kg/mm<sup>2</sup> terdapat pada area HAZ spesimen preheat 190° C yang dikarenakan masukan panas yang tinggi ketika pengelasan yang mempengaruhi ukuran butir struktur pada daerah HAZ menjadi lebih halus.

**Kata kunci:** Pengelasan, GTAW, Aluminium, AA7075, Preheat.

---

## PENDAHULUAN

Pada konstruksi aeronautika dan penerbangan, sebagian besar pengelasan yang dilakukan pada pesawat komersial diterapkan pada area *ducting* dan tubing bagian mesin jet dan pada tangki bahan bakar roket. Berdasarkan segi konstruksi, tangki bahan bakar roket memiliki peran penting dan material tangki bahan bakar roket menggunakan material aluminium paduan (Mendez, 2001). Aluminium dan aluminium paduan termasuk logam ringan yang memiliki kekuatan tinggi, keuletan yang baik pada kondisi yang dingin dan daya tahan korosi yang tinggi. Aluminium paduan seri 7xxx merupakan paduan penguatan endapan yang mengandung zinc (5.1 – 6.1 wt.%), magnesium (2.1 – 2.9 wt.%) dan tembaga (1.2 – 2.0 wt.%) sebagai elemen paduan utama (Kumar dkk, 2015).

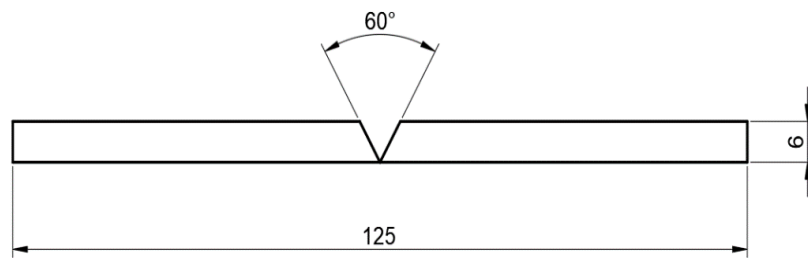
Penggunaan aluminium paduan seri 7xxx terus meningkat karena rasio kekuatan terhadap berat yang sangat baik dan ketahanan korosi yang cukup baik. Dibandingkan dengan baja, aluminium (Al) mempunyai sifat yang kurang baik dalam hal pengelasan. Pengelasan pada aluminium akan menimbulkan sifat yang kurang baik, aluminium paduan mudah teroksidasi dan membentuk aluminium oksida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang mempunyai titik cair yang tinggi. Karena sifat ini maka peleburan antara logam dasar dan logam las menjadi terhalang. Sifat yang kurang baik tersebut bisa diatasi dengan metode pengelasan *GTAW*, dengan metode pengelasan ini lapisan oksida yang terjadi pada permukaan logam aluminium yang menjadi masalah pengelasan, dipecah dan dibersihkan oleh busur listrik yang digunakan. Karena selama pengelasan terlindung oleh gas mulia maka permukaannya bersih dan menyebabkan terbentuknya sifat-sifat yang menguntungkan (Wirjosumarto & Okumura, 2000).

Pengelasan pada aluminium memiliki potensi cacat porositas pada logam las akibat adanya perbedaan kelarutan hidrogen dalam aluminium. Munculnya hidrogen ketika pengelasan, salah satunya berasal dari kelembaban tempat las yang juga dapat mempengaruhi tingkat kelembaban logam induk (Nurdin, 2017). Pencegahan yang dapat dilakukan untuk mengurangi kelembaban yaitu dengan proses *preheat* atau pemanasan awal pada logam induk sebelum pengelasan dimulai. Tujuan dari proses *preheat* selain untuk mengurangi kelembaban pada logam induk, proses *preheat* juga dilakukan ketika terdapat risiko terjadinya proses dan hasil las yang buruk ketika pengelasan dilakukan dalam keadaan dingin. Selain itu, proses *preheat* bertujuan memberi panas tambahan ke area pengelasan untuk membantu memaksimalkan fusi penuh dari lasan (Afrox, 2018).

## METODE PENELITIAN

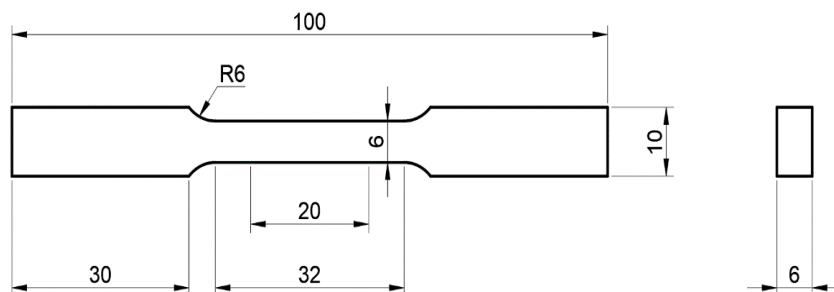
Tahap pertama penelitian ini dimulai dari penentuan judul untuk menentukan topik dan materi apa yang akan dibahas dalam penelitian ini. Judul pada penelitian ini adalah “Analisis Hasil Lasan *GTAW* setelah Proses *Preheat* pada Material AA7075 terhadap Struktur Mikro, Kekuatan Tarik dan Kekerasan”. Tahap selanjutnya ialah studi literatur, studi literatur dilakukan untuk mencari materi dan teori yang berhubungan dengan penelitian ini dan memudahkan dalam menentukan proses yang akan dilakukan selama penelitian. Materi yang dibutuhkan antara lain teori pengelasan *GTAW*, teori aluminium paduan seri AA7075, teori *preheat*, materi pengujian komposisi material, dan pengujian sifat mekanik material yang meliputi pengujian struktur mikro, uji kekerasan, dan pengujian tarik.

Setelah dilakukan studi literatur, langkah selanjutnya ialah pengujian komposisi material bertujuan untuk memastikan bawa unsur kimia yang terkandung dalam material yang akan diteliti sesuai dengan standar *Aluminium Association* yang berlaku. Pada pengujian komposisi material digunakan alat bernama *spectrometer*. Proses *preheat* merupakan langkah selanjutnya yang dilaksanakan dengan metode pemanasan langsung menggunakan *heater* sebelum pengelasan dimulai, nilai variasi temperatur *preheat* sebesar 190° C, 200° C dan 210° C dengan waktu penahanan (*holding time*) masing-masing 30, 45 dan 60 menit.. Tahap berikutnya merupakan proses pengelasan yang dilaksanakan dengan menggunakan metode pengelasan *GTAW* dengan arus AC sebesar 160 *Ampere*, gas *flow rate* 17 L/menit dengan *filler* AWS 5.10 / ER4043 Ø 1,6 mm, elektroda *Tungsten* Ø 2,4 mm. jenis sambungan *butt joint* kumpuh *single V groove* 60°, dan posisi pengelasan 1G.



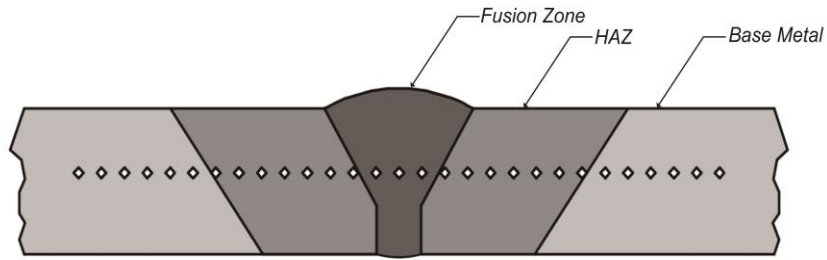
**Gambar 1.** Spesimen dengan *single V Groove* 60°

Spesimen yang digunakan pada penelitian yaitu aluminium paduan seri 7075 dengan dimensi spesimen pengelasan mengacu pada standar pengujian Tarik *ASTM E-8 M* dengan  $P \times l \times T$  sebesar 100 mm x 10 mm x 6 mm. Spesimen terdiri dari 9 buah, dibagi menjadi 3 spesimen untuk tiap parameter proses *preheat* dengan temperatur 190 °C, 200 °C dan 210 °C.



**Gambar 2.** Dimensi spesimen pengujian tarik sesuai *ASTM E-8 M*.

Setelah spesimen selesai dilas dan dibentuk sesuai standar pengujian maka akan dilanjutkan dengan proses pengujian material yang dilakukan untuk mengetahui nilai sifat mekanik material spesimen hasil pengelasan *GTAW*. Pengujian material pada penelitian ini meliputi pengujian struktur mikro, pengujian kekerasan dan pengujian tarik. Pengujian kekerasan dilakukan pada 3 daerah pengujian, meliputi daerah *fusion zone*, daerah *HAZ* (*Heat Affected Zone*) dan daerah *base metal*.



**Gambar 3.** Daerah pengujian kekerasan.

Tahap selanjutnya merupakan analisis data yaitu mengolah data-data yang sudah diperoleh ketika penelitian dengan merujuk pada materi yang terdapat pada referensi dan menampilkan data-data tersebut dalam bentuk grafik dan tabel yang dibuat dalam penulisan laporan. Setelah data selesai dianalisis, berikutnya dapat ditarik kesimpulan dari hasil pengolahan analisis data dan memberikan saran untuk pengembangan pada penelitian selanjutnya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Analisis Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia bertujuan untuk mengetahui unsur paduan yang terkandung dalam spesimen aluminium paduan dan memastikan bahwa aluminium paduan yang akan diteliti merupakan paduan seri 7075. Pengujian komposisi kimia dilakukan menggunakan alat spectrometer. Berikut hasil pengujian komposisi aluminium paduan dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil Pengujian Komposisi Kimia.

No	Unsur	W (% Berat)
1	Al	88,79
2	Zn	6,1127
3	Mg	2,8425
4	Cu	1,3302
5	Fe	0,2687
6	Cr	0,2438
7	Si	0,2426
8	Mn	0,1104
9	Ti	0,0512
10	Ni	0,0043
11	P	0,0013
12	Sb	0,0013
13	Sn	0,0005
14	Pb	0,0004
15	Ca	0
<b>Total</b>		<b>100</b>

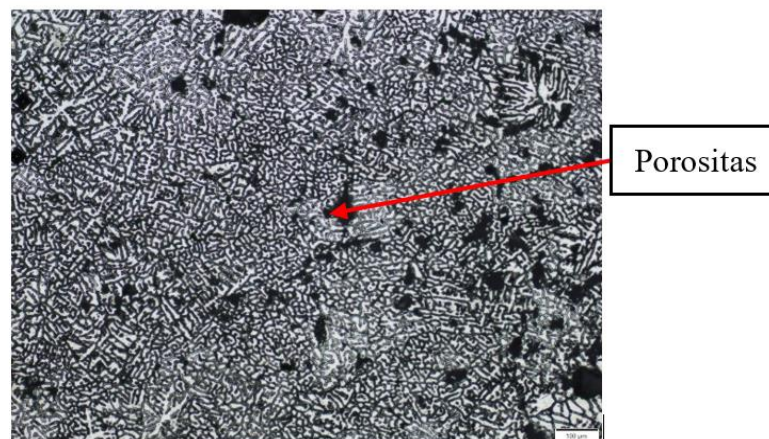
Perbandingan hasil pengujian komposisi aluminium paduan pada Tabel 4.1. dengan komposisi kimia standar *Aluminium Association* untuk aluminium paduan seri 7075, menyatakan bahwa aluminium paduan yang diuji merupakan aluminium paduan seri 7075. Komposisi unsur paduan utama aluminium paduan seri 7075 menurut standar *Aluminium Association* dapat dilihat pada Tabel 3.2.

**Tabel 2.** Kadar unsur paduan utama aluminium paduan seri 7075 standar *Aluminium Association* (Davis J.R., 2001).

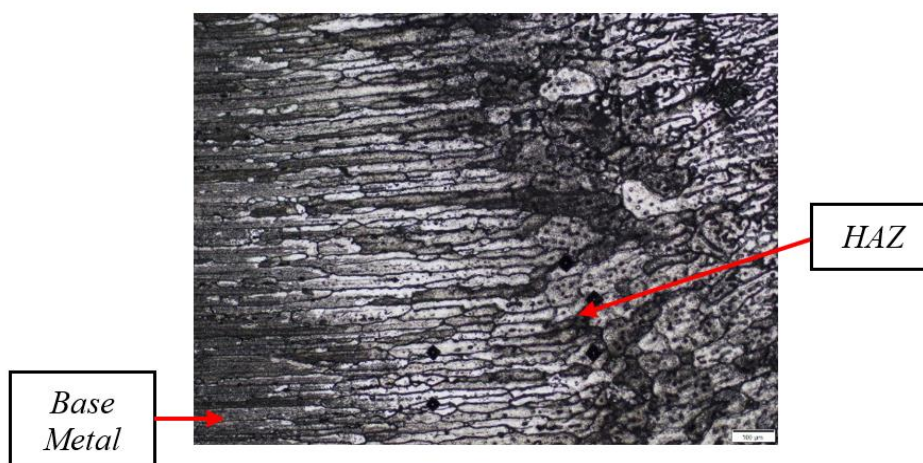
Unsur	%
Zn	5,6
Mg	2,5
Cu	1,6
Cr	0,23

### Analisis Hasil Pengamatan Struktur Mikro

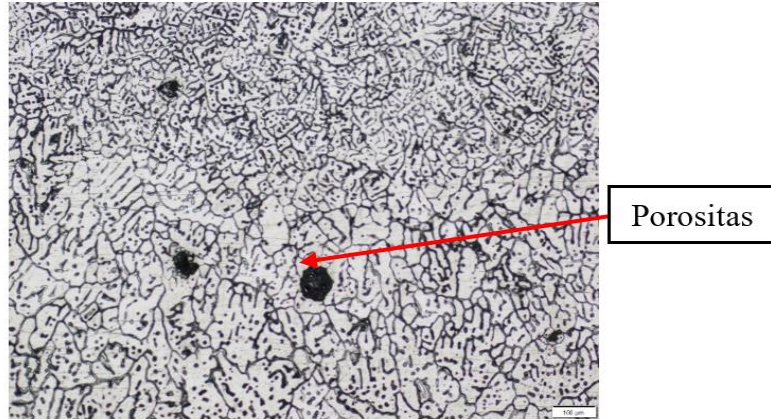
Hasil pengamatan struktur mikro pengelasan GTAW aluminium paduan 7075 tanpa melalui perlakuan *preheat* dan melalui perlakuan *preheat* dengan variasi temperatur 190° C, 200° C dan 210° C, dapat dilihat pada Gambar 4.1. sampai Gambar 4.8.



**Gambar 4.** Struktur mikro *weld metal* pengelasan *non preheat*



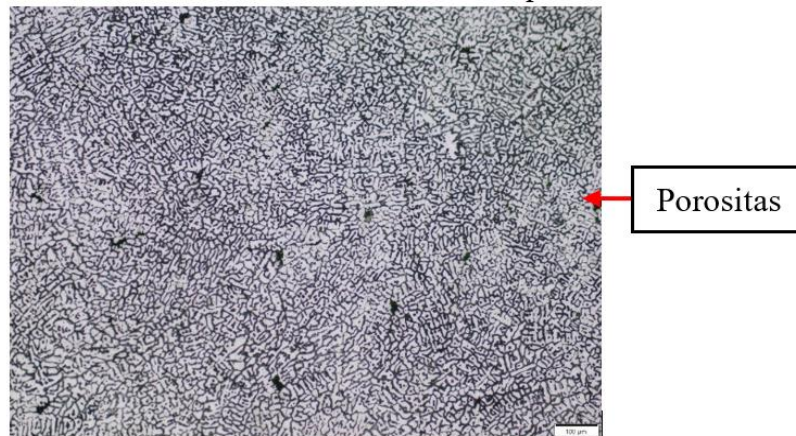
**Gambar 5.** Struktur mikro *base metal* dan *HAZ* pengelasan *non preheat*



**Gambar 6.** Struktur mikro *weld metal preheat 190° C*



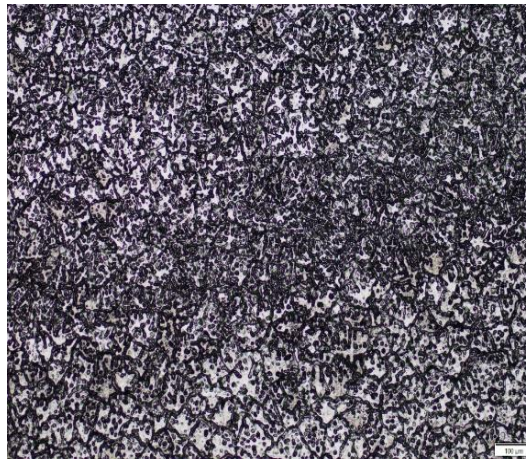
**Gambar 7.** Struktur mikro *base metal dan HAZ preheat 190° C*



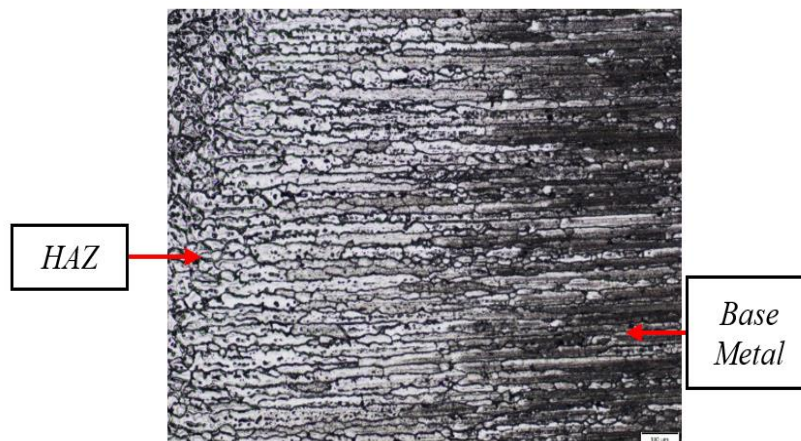
**Gambar 8.** Struktur mikro *weld metal preheat 200° C*



**Gambar 9.** Struktur mikro *base metal* dan *HAZ preheat 200° C*



**Gambar 10.** Struktur mikro *weld metal preheat 210° C*



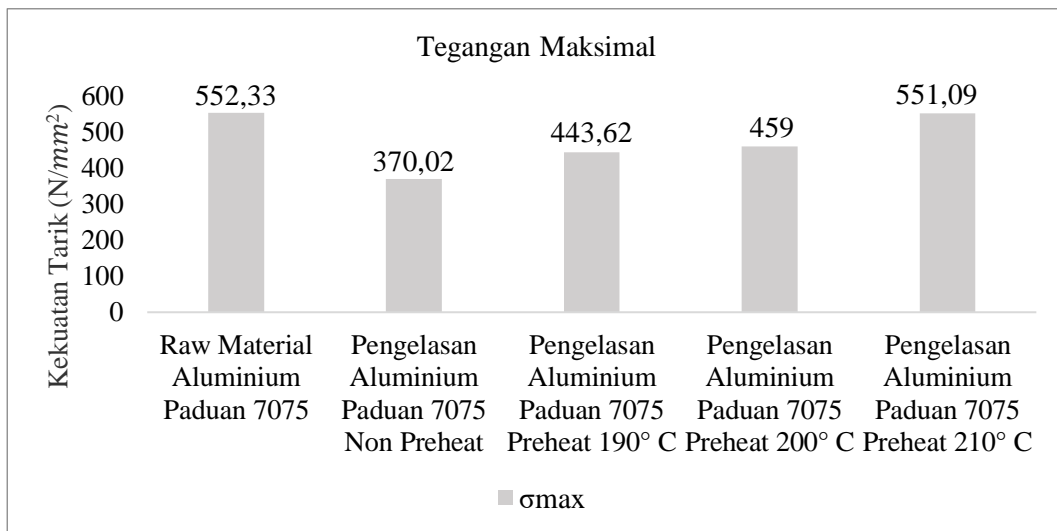
**Gambar 11.** Struktur mikro *base metal* dan *HAZ preheat 210° C*

Hasil pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 100X menunjukkan dari spesimen pengelasan *non preheat*, *preheat 190°* dan *preheat 200° C* memiliki porositas pada bagian *weld metal*. Pembentukan porositas dalam *weld metal* karena kelarutan hidrogen yang tinggi pada suhu tinggi dalam kondisi cair. Porositas adalah cacat yang sering ditemukan di *weld pool* fusi Aluminium paduan yang dilas yang dapat mengurangi sifat mekanik dari sambungan las (Dharma, 2021). Sedangkan pada spesimen

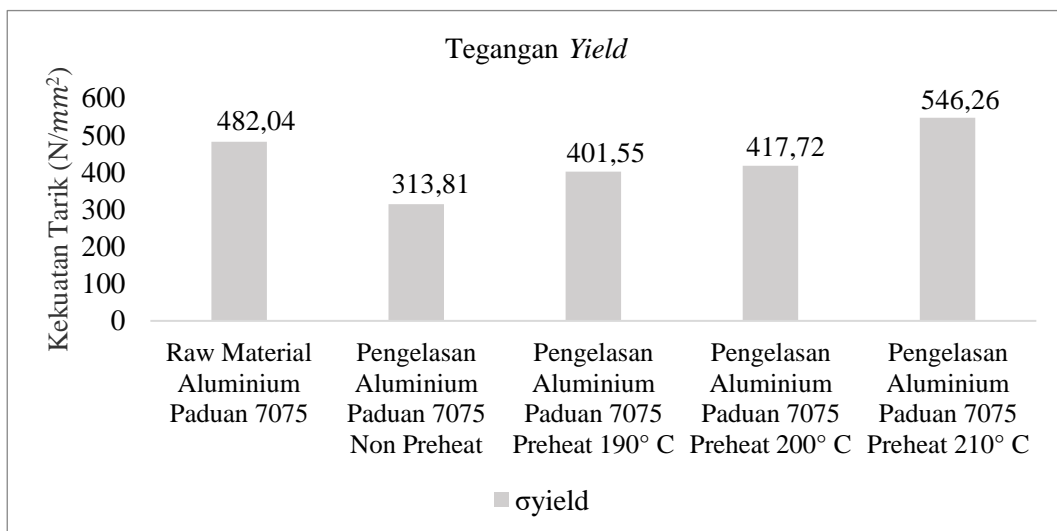
*preheat* 210° C tidak terlihat adanya porositas. Bentuk butir pada *weld metal* menunjukkan bahwa efek panas ketika pengelasan akan mengakibatkan rekristalisasi dan menghasilkan butiran halus ketika proses pengelasan di daerah fusi las. Sedangkan butiran pada daerah *HAZ* memiliki butir berbentuk *columnar* yang memiliki ukuran besar, dan pada daerah *raw material* terlihat ukuran butir *columnar* yang lebih halus dan rapat dibandingkan dengan ukuran butir pada daerah *HAZ*.

### Analisis Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik merupakan metode untuk mengetahui kekuatan (*tensile strength*) dari spesimen aluminium paduan 7075. Dimensi spesimen uji tarik menggunakan standar ASTM E8M, beban yang diterapkan 4000 kg dan uji tarik menggunakan *Servo Pulser*. di bawah ini dan hasil pengujian tarik spesimen *raw material* dan hasil pengelasan aluminium paduan 7075 terlihat pada Tabel 3.



**Gambar 12.** Histogram Tegangan Maksimal Hasil Pengujian Tarik Pengelasan Aluminium paduan 7075



**Gambar 13.** Histogram Tegangan Yield Hasil Pengujian Tarik Pengelasan Aluminium Paduan 7075

Dalam struktur las yang kompleks dengan metode penyambungan las fusi, kekuatan tarik menjadi sangat penting, dengan kekuatan tarik bisa memprediksi apakah struktur yang dilas dapat berfungsi dengan aman. Kurangnya fusi atau penetrasi, retakan,

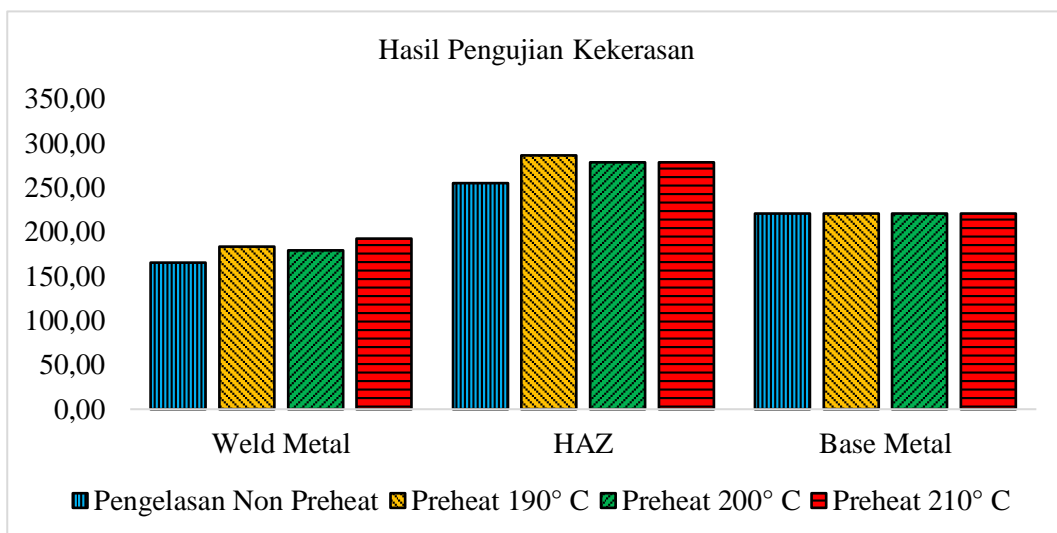


porositas, dan inklusi terak adalah cacat yang paling umum banyak ditemukan pada pengelasan yang mempengaruhi sifat tarik sebuah sambungan (Zhang dkk., 2019). Tušek dan Klobčar (2016) melakukan pengelasan *TIG* pada AA7075 - T6 disambung dengan metode *single V butt joint* dengan *filler* ER5183. Menunjukkan hasil bahwa *preheat* dengan temperatur 20° C dan 120° C menghasilkan retak panas dan *preheat* dengan temperatur 200° C dan 250° C memiliki kekuatan tarik yang paling baik. Maka dapat disimpulkan, temperatur *preheat* berpengaruh besar pada hasil pengelasan dan akan mempengaruhi hasil kekuatan tarik.

Berdasarkan Gambar 4.10. menunjukkan adanya peningkatan kekuatan tarik pada seluruh spesimen *preheat* dibandingkan dengan pengelasan aluminium paduan 7075 *non preheat* dengan nilai tahanan maksimal sebesar 370,02 N/mm<sup>2</sup> dan tahanan *yield* sebesar 313,81 N/mm<sup>2</sup>, angka kekuatan tarik tertinggi terjadi pada spesimen pengelasan aluminium paduan 7075 *preheat* 210° C dengan nilai tegangan maksimal sebesar 551,09 N/mm<sup>2</sup> dan tegangan *yield* sebesar 546,26 N/mm<sup>2</sup> sedangkan nilai kekuatan tarik spesimen *preheat* paling rendah terjadi pada spesimen *preheat* 190° C. Dari semua hasil pengelasan GTAW pada aluminium paduan 7075, hanya spesimen pengelasan aluminium paduan 7075 dengan *preheat* 210° C menghasilkan kekuatan tarik yang mendekati nilai kekuatan tarik *raw material* aluminium paduan 7075.

### Analisis Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan termasuk jenis pengujian *destructive test*, bertujuan untuk mengetahui nilai kekerasan aluminium paduan 7075 setelah melalui proses pengelasan GTAW dengan perlakuan *preheat* variasi temperatur 190°C, 200°C dan 210°C. Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode *Vickers* dengan pembebanan 200 g, *load time* 15 detik dan jarak injakan indenter 200 µm. Area pengujian kekerasan meliputi *weld metal*, *HAZ* (*Heat Affected Zone*) dan *base metal*. Adapun data hasil pengujian kekerasan dapat dilihat pada Gambar 14.



**Gambar 4.12.** Histogram Hasil Pengujian Kekerasan Pengelasan Aluminium Paduan 7075

Data pengujian Kekerasan *Vickers* dari hasil proses pengelasan disajikan pada gambar 4.7. Proses pengujian kekerasan di daerah *raw material* dari beberapa parameter pengelasan GTAW *non preheat* dan dengan perlakuan *preheat* temperature 190° C, 200° C dan 210° C memiliki nilai kekerasan yang sama, hal ini dikarenakan daerah *base metal* tidak terpengaruh panas secara langsung. Pada daerah ini dampak dari panas ketika pengelasan

yang terjadi relatif kecil sehingga tidak sampai merubah struktur butiran pada *base metal* dan nilai kekerasan cenderung sama.

Pengujian kekerasan pada daerah *HAZ* menunjukkan nilai kekerasan tertinggi dibandingkan dengan daerah *weld metal* dan *base metal*. Hal ini disebabkan karena daerah *HAZ* bersinggungan langsung dengan daerah *weld metal* akibatnya terkena masukan panas yang tinggi dan menyebabkan bentuk butir yang lebih halus terbentuk dan struktur yang lebih rapat (Putra, 2011). Kekerasan pada daerah *HAZ* spesimen *preheat* 190° C memiliki nilai paling tinggi dikarenakan masukan panas yang tinggi ketika pengelasan yang mempengaruhi ukuran butir struktur pada daerah *HAZ* menjadi lebih halus. Sedangkan pada *weld metal* memiliki kekerasan paling rendah diantara *HAZ* dan *base metal*, nilai kekerasan tertinggi bagian *weld metal* terdapat pada spesimen *preheat* 210° C, hasil kekerasan tersebut terlihat dari struktur mikro spesimen *preheat* 210° C memiliki butiran yang lebih halus dibandingkan spesimen *preheat* 190° C dan 200° C.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kandungan silikon (Si) pada aluminium *velg* mobil sedan X sebesar 13,11%, karena mengandung kadar silikon yang tinggi (diatas 12.2%) maka fasa yang terbentuk yaitu fasa *hypereutectic*. Sedangkan spesimen *ingot* aluminium daur ulang *velg* mobil sebesar 11,67%, karena mengandung silikon lebih rendah (11.7% sampai 12.2%) maka fasa yang terbentuk yaitu fasa *eutectic*.
2. Hasil pengamatan struktur mikro dapat disimpulkan, semakin tinggi temperatur *aging* ukuran butir aluminium semakin besar dan merata, sementara ukuran butir silikonnya semakin kecil dengan sebaran merata.
3. Hasil nilai kekerasan spesimen *velg* mobil X diperoleh nilai sebesar 75,746 kg/mm<sup>2</sup>, sedangkan spesimen *ingot* aluminium daur ulang *velg* mobil lebih rendah yaitu 62,594 kg/mm<sup>2</sup>. Hasil proses perlakuan panas dengan cara *artificial aging*, dimana nilai kekerasan yang diperoleh pada temperatur *aging* 170°C sebesar 66,0134 kg/mm<sup>2</sup>, temperatur 190°C sebesar 73,6314 kg/mm<sup>2</sup> dan temperatur 210°C sebesar 86,4172 kg/mm<sup>2</sup>. Hasil pengujian kekerasan disimpulkan bahwa semakin tinggi temperature *aging* nilai kekerasan semakin meningkat.
4. Kekuatan tarik tertinggi terjadi pada spesimen *velg* mobil X sebesar 192,98 MPa, sedangkan nilai kekuatan optimum terjadi pada spesimen *artificial aging* temperatur 170°C yaitu sebesar 121,87 MPa. Hasil pengujian tarik dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi temperatur *aging*, nilai kekuatan tarik semakin menurun.

## SARAN

Untuk lebih menyempurnakan penelitian ini di waktu yang akan datang maka disarankan untuk menambahkan unsur paduan seperti silikon (Si) dan unsur mangan (Mn) pada spesimen *ingot* aluminium daur ulang *velg* mobil untuk memperoleh hasil kekerasan dan kekuatan tarik mendekati spesimen *velg* mobil X.

## REFERENSI

- Alian, H., Safikno, F. A. (2018). Pengaruh temperatur dan waktu tahan pada proses *artificial aging* aluminium daur ulang terhadap kekerasan dan struktur mikro. Jurnal rekayasa mesin Vol. 18No. 2, Hal 79-84.
- ASM Handbook. (1990). *Metallorgraphy and Microstructures*. United State: Handbook Committee. Vol. 9.
- ASM Specialty Handbook. (1993). *Aluminium and Aluminium Alloys*. Ohio, USA.

- ASTM E8M Handbook*. (1924). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*<sup>1</sup>. American.
- Danhardjo, D, (2013), “ Analisis Sifat Mekanik Paduan Al-Si Pada *Cast piston* dan *Forged piston*” *Saintech: jurnal Penelitian dan Pengkajian Sains dan Teknologi*, 23(2).
- Davis, H.E., Troxell, G.E., Wiskocil, C.T. (1955). *The Testing and Inspection of Engineering Materias*. McGraw-Hill Book Company, New York, USA.
- Iswanto, E. H. (2012). Pengaruh Natural dan *Artificial Aging* Pada *Velg* Bahan A356.0. *IndustrialResearch Workshop and National Seminar 2012*. Hal 88-94.
- Pranata, M. D. E. (2016). Analisis Struktur Mikro Dan Sifat Mekanik Paduan Al 2014 Hasil Proses *Aging* Dengan Variasi Temperatur Dan Waktu Tahan. *Jurbal Furnace*, 2.
- Prasetyo, A. B. (2015). Aplikasi Metode Taguchi Pada Optimasi Parameter Pemesinan Terhadap Kekasaran Permukaan dan Keausan Pahat HSS Pada Proses Bubut Material ST 37. *Mekanik Vol 13 No 2*.
- Respati, H. Purwanto, M, S. Mauluddin. (2010). Pengaruh tekanan dan temperatur cetak terhadap sifat mekanik daur ulang aluminium. *Prosiding seminar nasional UNIMUS*. Hal 284-289.
- Simpson J. (1999). *Aluminium In the Construction Industry*. London: Kawneer.
- Surdia, T., Saito, S. (1999). *Pengetahuan Bahan Teknik*. PT Pradnya Paramitha. Jakarta.
- Totten, G. E. (2003). *Physical Metallurgy and Process handbook*. New York : Marcel Dekker, Inc