



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisa Pengaruh Perbedaan Diameter Pin *Tool* Terhadap Kekuatan Tarik, Impak, Dan Mikrografi Pada Aluminium 6061 Dengan Metode Pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW)

Rizka Azhari Yulistiawan Faruq¹⁾, Sarjito Jokosisworo¹⁾, Eko Sasmito Hadi¹⁾

¹⁾Laboratorium Pengelasan

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*)}e-mail : rizkazhar14@gmail.com, jito_sar@yahoo.com, ekosasmitohadi@gmail.com

Abstrak

Dalam dunia perkapalan, aluminium 6061 banyak digunakan untuk konstruksi kapal. Pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW) menggunakan prinsip gesekan dari benda kerja yang berputar dengan benda kerja lain yang diam sehingga mampu melelehkan benda kerja yang diam dan akhirnya tersambung menjadi satu. Dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hasil tarik, impak, dan struktur mikrografi dengan *feed rate* 10 mm/menit dengan variasi diameter pin (6 mm, 7 mm, dan 8 mm) terhadap pengelasan FSW dengan jenis penyambungan *butt joint*. Hasil penelitian menunjukkan sambungan las FSW pada diameter 6 mm memiliki kekuatan uji tarik 85,82 MPa, regangan 10,89%, dan kekuatan uji impak 0,37 J. Pada diameter 7 mm memiliki kekuatan uji tarik 89,90 MPa, regangan 11,47%, dan kekuatan uji impak 0,38 J. Pada diameter 8 mm memiliki kekuatan uji tarik 143,17 MPa, regangan 13,71%, dan kekuatan uji impak 0,46 J. Hasil uji struktur mikrografi menunjukkan perubahan bentuk dan ukuran butir pertikel struktur mikro sehingga mempengaruhi sifat mekanik, dan pada diameter pin 8 mm memiliki tingkat kerapatan yang lebih baik dibandingkan diameter pin 7 mm, dan 6 mm. Hasil tersebut diakibatkan semakin lebar diameter pin pengelasan maka semakin lebar jalur pengelasan yang dihasilkan, serta semakin banyak aluminium yang dapat diaduk sifat mekaniknya semakin baik.

Kata Kunci : Aluminium 6061, Pengelasan FSW, Diameter pin, Tarik, Impak, Mikrografi

1. PENDAHULUAN

Aluminium merupakan logam ringan dan memiliki ketahanan korosi, hantaran listrik yang baik. Salah satu jenis aluminium adalah aluminium 6061. Aluminium jenis tersebut memiliki paduan antara *magnesium* (Mg) dan *silikon* (Si) yang memiliki sifat mekanik yang baik tanpa mengurangi hantaran listrik. Logam ini digunakan secara luas bukan saja untuk peralatan rumah tangga, tetapi juga digunakan untuk material pesawat terbang, otomotif, kapal laut, dan konstruksi bangunan [1]. Dalam dunia perkapalan, aluminium banyak digunakan untuk konstruksi, seperti pada bagian profil, plat alas, perpipaan dan tangki seperti tangki air tawar atau tangki bahan bakar. Saat ini untuk pembangunan kapal baru yang seluruh badan kapal menggunakan

aluminium di Indonesia masih pada batas kapal berukuran kecil saja.

Pada pengelasan *friction stir welding* (FSW) menggunakan prinsip memanfaatkan gesekan dari benda kerja yang berputar dengan benda kerja lain yang diam sehingga mampu melelehkan benda kerja yang diam tersebut dan akhirnya tersambung menjadi satu. Proses pengelasan dengan FSW terjadi pada kondisi padat (*Solid State Joining*). Proses pengelasan dengan FSW terjadi pada *temperature solvus*, sehingga tidak terjadi penurunan kekuatan akibat *over aging* dan larutnya endapan koheren. Karena *temperature* pengelasan tidak terlalu tinggi, maka tegangan sisa yang terbentuk dan distorsi akibat panas juga rendah. [2].

Pada pengelasan FSW terdapat beberapa parameter sifat mekanik yang dapat mempengaruhi hasil pengelasannya. Salah satu

ya adalah diameter pin *tool* karena mempengaruhi input panas yang dihasilkan saat pengelasan terjadi dan lebar hasil sambungan las. Semakin lebar diameter pin menyebabkan sifat mekaniknya semakin baik, hal ini dikarenakan aluminium yang di aduk oleh pin *tool* semakin banyak [3].

Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan kajian tentang “Pengaruh Diameter *Pin* Terhadap Kekuatan dan Kualitas *Joint Line* Pada Proses *Friction Stir Welding* Aluminium Seri 5083 Untuk *Pre-Fabrication Panel* Bangunan Atas Kapal”[3] dimana pada penelitian tersebut menggunakan diameter pin *tools*: 5 mm, 6 mm, dan 7 mm. Hasil pengujian tarik diperoleh bahwa rata - rata *ultimate strength* untuk pengelasan dengan menggunakan diameter pin *tool* 5 mm adalah 252.27 MPa, untuk diameter pin *tool* 6 mm adalah 285.65 Mpa dan pada diameter pin *tool* 7 mm adalah 246.39 Mpa. Dengan hasil ini dapat diketahui bahwa *ultimate strength* yang tertinggi adalah dengan menggunakan diameter pin *tool* 6 mm. Dan pada uji tekuk, hasil uji tekuk pada bagian *face* pada semua variasi diameter pin tidak terdapat adanya kegagalan, meskipun tertekuk sampai 180°, namun pada bagian *root* diameter pin 6 mm adalah yang paling lemah dengan rata-rata *open defect* pada sudut 11.5°.

Pada penelitian yang lain tentang “Analisa Pengaruh Perbedaan Kecepatan Putaran *Tool* Terhadap Kekuatan Tarik, Impak, Dan Mikrografi Pada Aluminium 6061 Dengan Metode Pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW)”[4] dimana penelitian tersebut menggunakan kecepatan putar 1640 RPM, 2620 RPM, dan 3820 RPM. Didapatkan hasil *ultimate strength* memiliki tegangan rata-rata 83,34 Mpa dan regangan rata-rata 5,93 % pada kecepatan putaran 1640 rpm. Pada kecepatan putaran 2620 rpm memiliki tegangan rata-rata sebesar 19,27 Mpa dan regangan rata-rata 3,41 %. Dan tegangan rata-rata 45,02 Mpa dan regangan rata-rata sebesar 3,65 % dimiliki pada kecepatan putaran 3820 rpm. Hasil pengujian impak pada hasil sambungan las dengan pengelasan FSW memiliki kekuatan harga impak rata-rata sebesar 0,23 J/mm² pada kecepatan putaran 1640 rpm. Harga impak rata-rata sebesar 0,13 J/mm² pada kecepatan putaran 2620 rpm. Dan pada kecepatan putaran tool 3820 rpm memiliki harga impak rata-rata 0,20 J/mm². Dan hasil pengujian mikrografi pada daerah HAZ, dan las (*stir zone*) pada tiap putaran *tool* memiliki ukuran butiran partikel yang lebih besar daripada *base metal*, itu disebabkan oleh pengaruh kecepatan putaran *tool*. Semakin besar putaran tool, maka semakin besar juga ukuran butir yang dihasilkan pada hasil pengelasan tersebut.

Dan pada penelitian yang lain tentang “Pengaruh Bentuk *Probe* Pada *Tool Shoulder* Terhadap Metalurgi Aluminium Seri 5083 Dengan Proses *Friction Stir Welding*”[5] dengan variasi bentuk segitiga, lingkaran dan segi empat. Hasil pengujian radiografi menunjukkan penggunaan variasi pin lingkaran (*straight cylindrical*) terdapat cacat di sepanjang pengelasan. Sedangkan pada pin segi empat (*square*) terdapat cacat di awal dan akhir pengelasan. Dan pada pin segitiga (*triangle*) tidak terdapat cacat pengelasan. Untuk pengujian makro etsa terdapat tunnel defect ketika menggunakan pin lingkaran (*straight cylindrical*) sementara pada pin segitiga (*triangle*) dan segi empat (*square*) tidak ditemukan cacat pengelasan. Untuk pengujian mikro etsa, penggunaan pin segi empat memiliki ukuran butir paling besar. Sedangkan pada penggunaan pin lingkaran (*straight cylindrical*) dan segitiga (*triangle*) perbedaaan ukuran butir tidak terlihat signifikan. Dari ketiga pengujian yang dilakukan didapati bahwa pin segitiga memiliki hasil yang terbaik, karena tidak terdapat cacat pengelasan dan ukuran butir lebih kecil sehingga memiliki nilai kekuatan (*strength*) tinggi

Oleh untuk itu penelitian ini memodifikasi lebar pin *tool* berbentuk silinder, dengan variasi lebar pin 6mm, 7mm, dan 8mm. *Tool* yang digunakan adalah material baja KNL 110 *Extra* yang dilakukan proses *hardening* sampai dengan 61 HRC. Setelah dilakukan pengelasan FSW, material aluminium 6061 akan dilakukan pengujian sambungan las terhadap nilai dari kekuatan uji impak (*impact test*) dan uji tarik (*tensile test*), dan melihat struktur material pada area pengelasan dengan mikrografi yang disebabkan oleh pengaruh diameter pin *tool*.

Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui hasil perbandingan kekuatan uji tarik, hasil karakteristik dan kekuatan uji impak, dan melihat hasil perubahan struktur mikro pada Aluminium 6061 setelah dilakukan pengelasan FSW dengan perbedaan diameter pin *tool*.

2. METODE

Tulisan ini disusun berdasarkan hasil percobaan *friction stir welding* dan pengujian dilakukan sesuai urutan/prosedur berikut ini.

2.1. Bahan

Bahan penelitian yang digunakan adalah material Aluminium 6061 yang di dapatkan dari galangan kapal aluminium dengan ketebalan 10 mm.

Tabel 1. Material Properti Aluminium 6061 [6]

| Alumunium 6061 | |
|-----------------------|------------------------|
| Poisson's Ratio | 0,33 |
| Modulus Of Elasticity | 68,9 GPa |
| Density | 2700 kg/m ³ |
| Yield stress | 276 MPa |
| Fatigue Strength | 633 MPa |
| Failure Strain | 0,39 |
| Tensile Strength | 324 MPa |

2.2. Las Friction Stir Welding (FSW)

Prinsip *friction stir welding* yang ditunjukkan pada gambar 1, dengan gesekan dua benda yang terus-menerus akan menghasilkan panas, ini menjadi suatu prinsip dasar terciptanya suatu proses pengelasan gesek. Pada proses *friction stir welding*, sebuah *tool* yang berputar ditekan pada material yang akan disatukan. Gesekan tool yang berbentuk silindris (*cylindrical shoulder*) yang dilengkapi pin/probe dengan material, mengakibatkan pemanasan setempat yang mampu melunakkan bagian tersebut. Tool bergerak pada kecepatan tetap dan bergerak melintang pada jalur pengelasan (*joint line*) dari material yang akan disatukan [7].

Pada pengelasan dengan metode *friction stir welding (FSW)* menggunakan mesin milling dengan variasi diameter pin 6 mm, 7 mm, dan 8 mm dan kecepatan *feed rate* 10 mm/menit. Dan sudut kemiringan *shoulder* yang digunakan adalah 2° terhadap sumbu tegak lurus pada permukaan benda kerja.

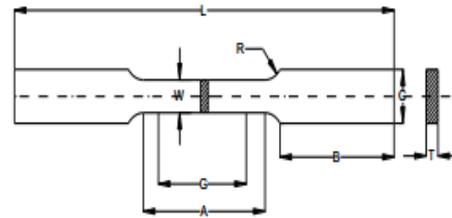


Gambar 1. Prinsip *Friction Stir Welding*

2.3. Pengujian Tarik

Pengujian tarik dapat menunjukkan beberapa fenomena perputahan ulet dan getas, perputahan ini dapat dilihat dengan mata telanjang. perputahan ulet umumnya lebih disukai karena bahan ulet dan tangguh dan memberikan peringatan lebih dahulu

sebelum terjadinya kerusakan. Sedangkan perputahan getas memiliki ciri-ciri yang berbeda dengan patah ulet, yaitu tidak ada atau sedikit sekali terjadi deformasi plastis pada material. Patahannya merambat sepanjang bidang. [8]



Gambar 2. Bentuk Spesimen Uji Tarik (ASTM E8/E8M-09) [8]

Keterangan :

| | |
|-------------------------------|-----------|
| Gage length (G) | : 50,0 mm |
| Length of reduced section (A) | : 57 mm |
| Width (W) | : 12,5 mm |
| Thickness (T) | : 10 mm |
| Radius of fillet (R) | : 12,5 mm |
| Overall length (L) | : 200 mm |
| Width of grip section (C) | : 20 mm |
| Length of grip section (B) | : 50 mm |

Rumus untuk mendapatkan nilai tegangan adalah:

$$\sigma = P / A_0 \quad (1)$$

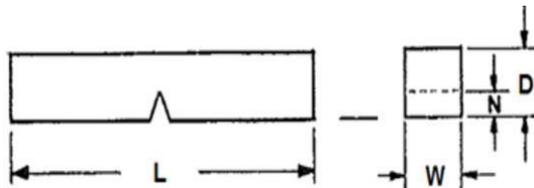
Dan rumus nilai regangan tarik adalah :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \% \quad (2)$$

Dimana, P adalah beban (N), A₀ adalah luas penampang awal (mm²), ΔL adalah selisih pertambahan panjang, L₀ adalah panjang mula-mula

2.4. Pengujian Impak

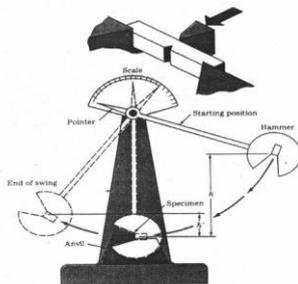
Informasi lain yang dapat dihasilkan dari pengujian *impact* adalah temperatur transisi bahan. Temperatur transisi adalah temperatur yang menunjukkan transisi perubahan jenis perputahan suatu bahan bila diuji pada temperatur yang berbeda-beda. Pada pengujian dengan temperatur yang berbeda-beda maka akan terlihat bahwa pada temperatur tinggi material akan bersifat ulet (*ductile*) sedangkan pada temperatur rendah material akan bersifat rapuh atau getas (*brittle*). [9]



Gambar 3. Bentuk Spesimen Impak (ASTM E23) [9]

Keterangan :

| | |
|--------------------|---------|
| Overall length (L) | : 55 mm |
| Width (W) | : 10 mm |
| Thickness (T) | : 10 mm |
| Notched Charpy | : 45° |



Gambar 4. Ilustrasi Skematis Pengujian Impak Dengan Benda Uji Charpy. [9]

Nilai Impak suatu bahan yang di uji dengan metode charpy diberikan oleh :

$$HI = E / A \quad (3)$$

Dimana, E adalah Energi yang diserap (J), A adalah Luas penampang dibawah takik (mm²)

2.5. Pengujian Mikrografi

Uji Mikrografi adalah suatu proses pengujian yang bertujuan untuk memperoleh gambar yang menunjukkan struktur mikro sebuah logam atau paduan. Pengujian mikrografi dimaksudkan untuk melihat perubahan struktur pada sebuah logam atau paduan setelah dilakukan pengelasan dari logam murni. [10]

2.6. Pelaksanaan Penelitian

Metode penelitian menggunakan hasil data pada saat dilakukan pengujian tarik, impact, dan struktur mikro. Tahapan yang dilakukan untuk memperoleh data yaitu : Pertama melakukan pembuatan pin *tools* sesuai dengan kebutuhan. Kedua melakukan pengelasan FSW dengan *milling machine* sebagai penggerak utama, dimana untuk pengelasan dilakukan di BPM DIKJUR Kota Semarang Jawa Tengah. Ketiga melakukan pembuatan spesimen, dimana untuk uji tarik menggunakan ASTM E8, dan uji impact menggunakan ASTM E23, dan uji mikrografi

menggunakan spesimen uji impact. Keempat melakukan pengujian tarik, impact, dan struktur mikro pada hasil pengelasan Aluminium 6061 di Laboratorium Bahan Teknik Universitas Gadjah Mada.

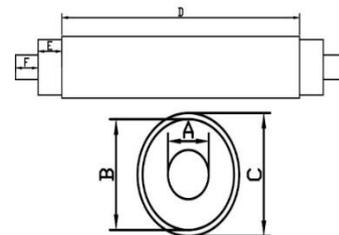
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pembuatan Spesimen

Material yang digunakan merupakan material aluminium 6061 tuang dalam bentuk ingot oleh karena itu harus dilakukan pemotongan terlebih dahulu. Proses pemotongan dilakukan dengan gerinda tangan agar dapat diperoleh dimensi yang diinginkan yaitu untuk uji tarik dengan panjang 210 mm, lebar 130 mm, tebal 10 mm sebanyak 3 buah, dan untuk uji impact dengan panjang 80 mm, lebar 60 mm, tebal 10 mm sebanyak 3 buah. Kemudian dihaluskan dan diratakan menggunakan mesin gerinda agar tidak ada celah saat melakukan pengelasan.

3.2. Pembuatan Pin Tools

Material *tools* adalah KNL extra 110. Material tersebut dibentuk berdasarkan rancangan yang telah dibuat dengan proses bubut dan dilanjutkan dengan melakukan *heat treatment* untuk mendapatkan kekerasan yang diinginkan (61 HRC).



Gambar 5. Dimensi *Tools*

Keterangan :

| | |
|---------------------------|-----------------|
| Material Pin | : KNL 110 Extra |
| Kekerasan | : 61 HRC |
| Diameter Pin (A) | : X, Y, Z mm |
| Diameter Probe (B) | : 18 mm |
| Diameter <i>Tools</i> (C) | : 20 mm |
| Panjang <i>Tools</i> (D) | : 70 mm |
| Panjang Probe (E) | : 10 mm |
| Panjang Pin (F) | : 9,6 mm |

3.3. Hasil Pengelasan

Dari proses pengelasan FSW didapatkan hasil sebagai berikut :

Tabel 2. Data Hasil Pengelasan

| Variasi Diameter Pin | Rotational Speed | Feed Rate | Tilt Angel | Hasil Pengelasan |
|----------------------|------------------|------------|------------|---|
| 6 mm | 1640 Rpm | 10mm/menit | 2° | Permukaan kurang halus Pengelasan cukup stabil Suhu yang dihasilkan ±333° C |
| 7 mm | 1640 Rpm | 10mm/menit | 2° | Permukaan kasar Pengelasan cukup stabil Suhu yang dihasilkan ±341° C |
| 8 mm | 1640 Rpm | 10mm/menit | 2° | Permukaan cukup halus Pengelasan cukup stabil Suhu yang dihasilkan ±360° C |

Dari ketiga variasi diameter pin, hasil spesimen pengelasan dengan menggunakan metode *Friction Stir Welding* (FSW) menghasilkan *heat input* berbeda beda karena ukuran diameter pin *tool* yang di penetrasikan pada spesimen juga berbeda.

3.4. Hasil Pengujian Tarik

Plat aluminium 6061 yang telah dilas FSW dibentuk spesimen sesuai standar ASTM E8. Dan proses pengujian tarik pada penelitian tugas akhir ini dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi Universitas Gajah Mada. Mesin yang digunakan untuk pengujian tarik ini adalah mesin “*ContraLab France*”.

3.4.1. Hasil Pengujian Tegangan Tarik

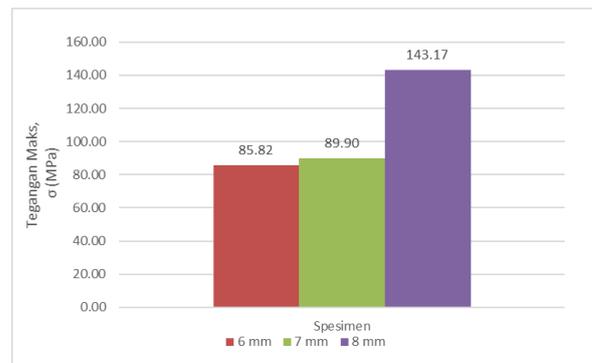
Dari pengujian yang telah dilakukan, maka didapatkan hasil sebagai berikut :

Tabel 3. Data Hasil Pengujian Tegangan Maks.

| Spesimen | Tebal (mm) | Lebar (mm) | P Max (N) | Max. σ (MPa) | Rata-rata, σ (MPa) |
|----------|------------|------------|-----------|---------------------|---------------------------|
| X1 | 10.14 | 13.01 | 10670 | 80.88 | |
| X2 | 10.02 | 12.94 | 10930 | 84.30 | 85.82 |
| X3 | 10.24 | 12.32 | 11640 | 92.27 | |
| Y1 | 10.20 | 12.74 | 11580 | 89.11 | |
| Y2 | 10.28 | 12.48 | 11770 | 91.74 | 89.90 |
| Y3 | 10.24 | 12.30 | 11190 | 88.84 | |
| Z1 | 10.20 | 13.08 | 18150 | 136.04 | |
| Z2 | 10.18 | 13.12 | 18510 | 138.59 | 143.17 |
| Z3 | 10.16 | 13.30 | 20930 | 154.89 | |

Keterangan :

- X1 = Diameter Pin *tool* 6 mm Spesimen 1
- X2 = Diameter Pin *tool* 6 mm Spesimen 2
- X3 = Diameter Pin *tool* 6 mm Spesimen 3
- Y1 = Diameter Pin *tool* 7 mm Spesimen 1
- Y2 = Diameter Pin *tool* 7 mm Spesimen 2
- Y3 = Diameter Pin *tool* 7 mm Spesimen 3
- Z1 = Diameter Pin *tool* 8 mm Spesimen 1
- Z2 = Diameter Pin *tool* 8 mm Spesimen 2
- Z3 = Diameter Pin *tool* 8 mm Spesimen 3



Gambar 6. Diagram Nilai Tegangan Maksimum

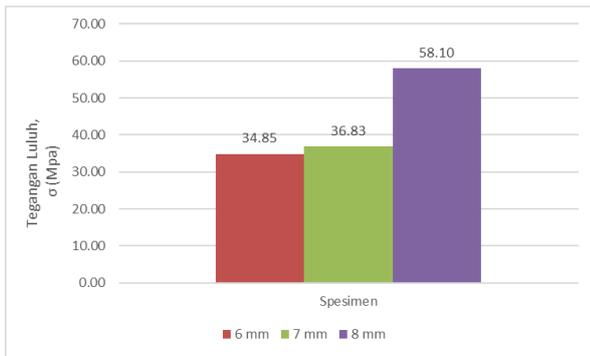
Dari pengujian yang telah dilakukan, hasil yang didapat pada tabel 3 pengujian tarik menunjukkan bahwa nilai kekuatan tarik maksimal yang dihasilkan dari pengelasan FSW (*Friction Stir Welding*) yang dilakukan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebesar 154,89 MPa pada diameter pin 8 mm spesimen 3, dan hasil kekuatan tarik terkecil yang dihasilkan adalah sebesar 80,88 mm pada diameter pin spesimen 1.

Nilai kekuatan tarik rata-rata dari tertinggi ke terendah yang dihasilkan dari sambungan las aluminium 6061 menggunakan las FSW (*Friction Stir Welding*) dengan variasi diameter pin *tool* yang dilakukan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebesar 143,17 MPa pada diameter pin *tool* 8 mm, 89,90 MPa pada diameter pin *tool* 7 mm, serta 85,82 MPa pada diameter pin *tool* 6 mm. Ini menunjukkan bahwa semakin lebar diameter pin berpengaruh pada lebar jalur pengelasan yang dihasilkan sehingga semakin baik sifat mekaniknya dalam hal ini adalah kekuatan tariknya yang menunjukkan keuletan suatu bahan.

Sebelum dilaksanakan pengujian tarik dilakukan terlebih dahulu pemeriksaan visual pada permukaan pengelasan, dan diameter 7 mm memiliki hasil las-lasan yang kurang baik. Terdapat sedikit *incomplete penetration* setelah dilakukan pengelasan adalah hal utama yang mengurangi hasil uji kekuatan tarik pada spesimen dengan diameter 7 mm tersebut.

Tabel 4. Data Hasil Pengujian Tegangan Luluh

| Spesimen | Tebal (mm) | Lebar (mm) | P luluh (N) | luluh, σ (MPa) | Rata-rata, σ (MPa) |
|----------|------------|------------|-------------|-----------------------|---------------------------|
| X1 | 10.14 | 13.01 | 4330 | 32.82 | |
| X2 | 10.02 | 12.94 | 4440 | 34.24 | 34.85 |
| X3 | 10.24 | 12.32 | 4730 | 37.49 | |
| Y1 | 10.20 | 12.74 | 4710 | 36.25 | |
| Y2 | 10.28 | 12.48 | 4728 | 36.85 | 36.83 |
| Y3 | 10.24 | 12.30 | 4710 | 37.40 | |
| Z1 | 10.20 | 13.08 | 7370 | 55.24 | |
| Z2 | 10.18 | 13.12 | 7510 | 56.23 | 58.10 |
| Z3 | 10.16 | 13.30 | 8490 | 62.83 | |



Gambar 7. Diagram Nilai Tegangan Luluh

Pengujian tarik menunjukkan bahwa nilai tegangan luluh yang dihasilkan dari pengelasan FSW (*Friction Stir Welding*) yang dilakukan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebesar 62,83 MPa pada diameter pin 8 mm spesimen 3, dan hasil kekuatan tarik terkecil yang dihasilkan adalah sebesar 32,82 mm pada diameter pin 6 spesimen 1.

Nilai kekuatan tegangan rata-rata dari tertinggi ke terendah yang dihasilkan dari sambungan las aluminium 6061 menggunakan las FSW (*Friction Stir Welding*) dengan variasi diameter pin *tool* yang dilakukan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebesar 58,10 MPa pada diameter pin *tool* 8 mm, 36,83 MPa pada diameter pin *tool* 7 mm, serta 34,85 MPa pada diameter pin *tool* 6 mm.

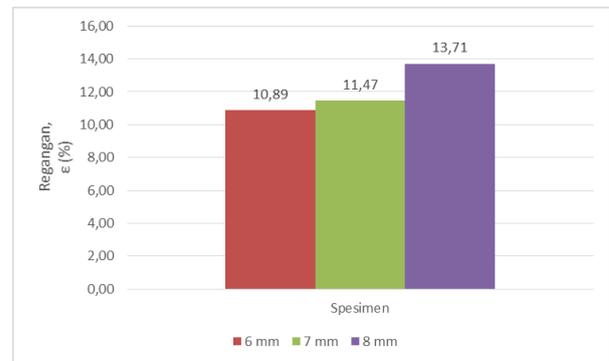
3.4.2. Hasil Regangan Tarik

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan pada penelitian tugas akhir ini, maka nilai regangan tarik maksimum yang dihasilkan dari sambungan las gesek atau *friction stir welding* pada aluminium 6061 adalah sebesar 15,08 % pada diameter pin 8 mm spesimen 1, dan hasil regangan tarik terkecil yang dihasilkan adalah sebesar 10,20 % pada diameter pin 7 mm spesimen 2.

Nilai regangan tarik rata-rata dari tertinggi ke terendah yang dihasilkan dari sambungan las aluminium 6061 menggunakan las FSW (*Friction Stir Welding*) dengan variasi diameter pin *tool* yang dilakukan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebesar 13,71 % pada diameter pin 8 mm, 11,47 % pada diameter pin 7 mm, serta 10,89 % pada diameter pin 6 mm. Nilai regangan akan berbanding lurus dengan hasil uji tariknya, maka semakin besar nilai tegangan semakin besar juga nilai regangannya.

Tabel 5. Data Hasil Pengujian Regangan Tarik

| Spesimen | LO (mm) | L1 (mm) | ΔL (mm) | Regangan, ϵ (%) | Rata-rata, ϵ (%) |
|----------|---------|---------|-----------------|--------------------------|---------------------------|
| X1 | 50.00 | 55.20 | 5.20 | 10.40 | |
| X2 | 50.00 | 55.24 | 5.24 | 10.48 | 10.89 |
| X3 | 50.00 | 55.89 | 5.89 | 11.78 | |
| Y1 | 50.00 | 55.78 | 5.78 | 11.56 | |
| Y2 | 50.00 | 55.10 | 5.10 | 10.20 | 11.47 |
| Y3 | 50.00 | 56.32 | 6.32 | 12.64 | |
| Z1 | 50.00 | 57.54 | 7.54 | 15.08 | |
| Z2 | 50.00 | 55.96 | 5.96 | 11.92 | 13.71 |
| Z3 | 50.00 | 57.06 | 7.06 | 14.12 | |



Gambar 8. Diagram Regangan Tarik

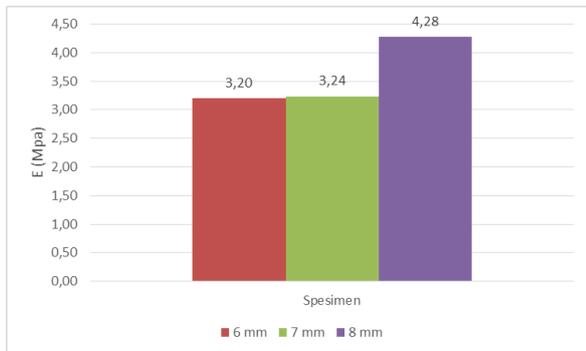
3.4.3. Hasil Modulus Elastisitas

Dari diagram hasil pengujian yang telah dilakukan, nilai modulus elastisitas tertinggi pada sambungan las aluminium 6061 terhadap pengelasan FSW (*Friction Stir Welding*) adalah sebesar 4,72 Mpa pada diameter pin 8 mm spesimen 2. Sedangkan nilai modulus elastisitas terendah pada sambungan las aluminium 6061 terhadap pengelasan FSW (*Friction Stir Welding*) dihasilkan pada diameter 7 mm spesimen 1 dengan nilai modulus elastisitas sebesar 3,16 MPa.

Nilai modulus elastisitas rata-rata tertinggi ke terendah yang dihasilkan pada sambungan las aluminium 6061 terhadap pengelasan FSW (*Friction Stir Welding*) adalah sebesar 4,28 Mpa pada diameter pin 8 mm; 3,24 Mpa pada diameter pin 7 mm; serta 3,20 Mpa pada diameter pin 6 mm. Dan dari hasil tersebut dapat membuktikan Hukum Hooke masih berlaku, bahwa besarnya perbandingan antara gaya dengan pertambahan panjang adalah konstan

Tabel 6. Data Hasil Modulus Elastisitas

| Spesimen | luluh, σ (MPa) | Regangan, ϵ (%) | E (MPa) | E rata-rata, (MPa) |
|----------|-----------------------|--------------------------|---------|--------------------|
| X1 | 32.82 | 10.40 | 3.16 | |
| X2 | 34.24 | 10.48 | 3.27 | 3.20 |
| X3 | 37.49 | 11.78 | 3.18 | |
| Y1 | 36.25 | 11.56 | 3.14 | |
| Y2 | 36.85 | 10.20 | 3.61 | 3.24 |
| Y3 | 37.40 | 12.64 | 2.96 | |
| Z1 | 55.24 | 15.08 | 3.66 | |
| Z2 | 56.23 | 11.92 | 4.72 | 4.28 |
| Z3 | 62.83 | 14.12 | 4.45 | |



Gambar 9. Diagram Nilai Modulus Elastisitas

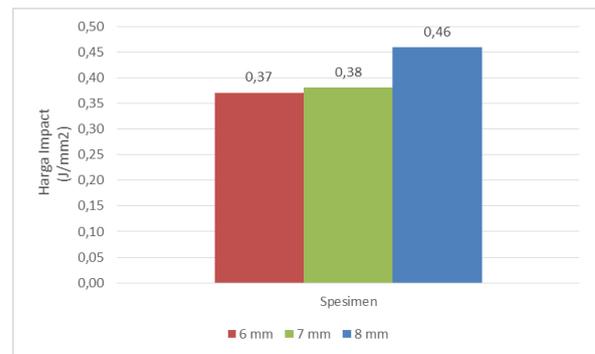
3.5. Hasil Pengujian Impak

Plat aluminium 6061 yang telah dilas FSW dibentuk spesimen sesuai dengan standar uji impak ASTM E23 di Laboratorium Bahan Teknik Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi Universitas Gajah Mada, Yogyakarta. Mesin yang digunakan untuk melakukan pengujian impak pada penelitian tugas akhir ini adalah mesin uji impak "Frank" dengan *notched* impak charpy.

Hasil yang diperoleh dari pengujian impak pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

Tabel 7. Data Hasil Uji Impak

| Spesimen | Lebar (mm) | Tinggi (mm) | Energi (J) | Harga Impact (J/mm ²) | Rata-Rata Harga Impact (J/mm ²) |
|----------|------------|-------------|------------|-----------------------------------|---|
| X1 | 10.14 | 9.24 | 36.00 | 0.38 | |
| X2 | 10.10 | 9.12 | 32.00 | 0.35 | 0.37 |
| X3 | 10.20 | 8.76 | 34.00 | 0.38 | |
| Y1 | 10.30 | 9.20 | 38.00 | 0.40 | |
| Y2 | 10.32 | 9.70 | 36.00 | 0.36 | 0.38 |
| Y3 | 10.38 | 8.56 | 34.00 | 0.38 | |
| Z1 | 10.14 | 9.40 | 42.00 | 0.44 | |
| Z2 | 10.44 | 9.30 | 42.00 | 0.43 | 0.46 |
| Z3 | 10.14 | 8.78 | 45.00 | 0.51 | |



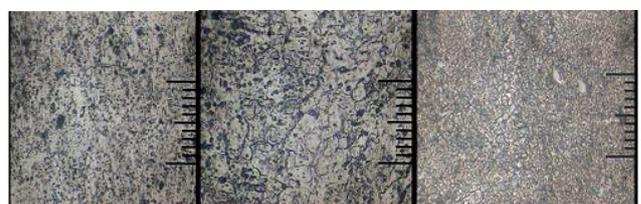
Gambar 10. Diagram Harga Impact

Dari diagram hasil pengujian yang telah dilakukan, harga impact tertinggi pada sambungan las aluminium 6061 terhadap pengelasan FSW (*Friction Stir Welding*) adalah sebesar 0,51 J/mm² pada diameter 8 mm spesimen 3. Sedangkan nilai impact terendah pada sambungan las aluminium 6061 terhadap pengelasan FSW (*Friction Stir Welding*) dihasilkan pada diameter 6 mm spesimen 2 dengan nilai modulus sebesar 0,35 J/mm². Nilai impact rata-rata tertinggi ke terendah yang dihasilkan pada sambungan las aluminium 6061 terhadap pengelasan FSW (*Friction Stir Welding*) adalah sebesar 0,46 J/mm² pada diameter 8 mm; 0,38 J/mm² pada diameter 7 mm; serta 0,37 J/mm² pada diameter 6 mm. Dari hasil tersebut diameter pin pengelasan berpengaruh pada sifat mekanik bahan, dalam hal ini adalah kemampuan bahan untuk menyerap suatu beban kejut, semakin lebar jalur pengelasan yang diakibatkan lebar diameter pin, semakin baik juga bahan untuk menahan beban kejut yang diberikan.

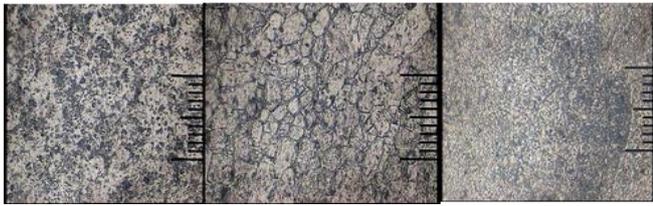
3.6. Hasil Pengujian Mikrografi

Untuk proses pengerjaan pengujian mikrografi terlebih dahulu material di amplas dengan amplas nomor 100, 200, 400, 600 dan 1000. Setelah proses pengamplasan hingga halus.

Maka material di poles dengan autosol hingga material yang sudah diampas menjadi mengkilap. Lalu proses dilanjutkan dengan pengetsaan. Untuk material aluminium standart etsa yang di gunakan adalah Larutan NaOH 50%. Hasil dari pengujian ini didapat beberapa hasil gambar struktur mikro. Dari hasil pengujian mikrografi didapatkan hasil yaitu:

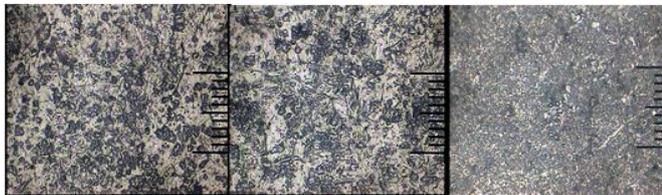


a) Daerah Las b) Daerah HAZ c) Daerah Base Metal
Gambar 11. Struktur Mikro Hasil Las FSW Diameter pin 6 mm



a) Daerah Las b) Daerah HAZ c) Daerah Base Metal

Gambar 12. Struktur Mikro Hasil Las FSW
Diameter pin 7 mm



a) Daerah Las b) Daerah HAZ c) Daerah Base Metal

Gambar 13. Struktur Mikro Hasil Las FSW
Diameter pin 8 mm

Dari gambar struktur mikro pada gambar 11, 12, dan 13, hasil dari sambungan las aluminium 6061 menggunakan pengelasan FSW (*Friction Stir Welding*) dengan variasi diameter pin *tool* terjadi perubahan struktur berupa ukuran dan bentuk butir partikel pada daerah HAZ (*Heat Affected Zone*), dan pengelasan. Pada daerah *base metal* memiliki ukuran butir yang kecil, karena pada daerah *base metal* tidak terkena pengaruh efek panas akibat dari pengelasan [11]. Dan pada daerah HAZ, butiran partikel mengalami perubahan bentuk dan ukuran butir lebih besar dibandingkan dengan daerah *base metal* seiring kenaikan diameter pin yang digunakan. Dan pada daerah *stir zone* mengalami perubahan bentuk dan ukuran partikel terlihat lebih besar daripada ukuran partikel yang ada di HAZ dan *base metal*. Hal ini disebabkan oleh suhu dan pergerakan rotasi dari *tool* pada saat pengelasan disekitar *stir zone*.

Berdasarkan hasil pengujian mikrografi, Semakin besar diameter pin yang digunakan maka ukuran butir partikel yang dihasilkan semakin besar dan rapat, itu disebabkan oleh beberapa faktor seperti masukan panas, laju pengelasan serta banyaknya aluminium yang di aduk, sehingga semakin besar diameter pin maka sifat mekaniknya juga semakin baik. Dan pada pin dengan diameter 8 mm memiliki tingkat kerapatan yang baik dibandingkan dengan diameter 7 mm, dan 6 mm dengan dibuktikan hasil foto mikro pada *stir zone* yang lebih menyatu.

3.7. Perbandingan Hasil Uji dengan Standar BKI

Pada hasil pengujian yang telah dilakukan, nilai kekuatan tarik pada sambungan las aluminium

6061 menggunakan pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW) dengan variasi diameter pin 6 mm, 7 mm, 8 mm, belum ada yang memenuhi standar nilai kuat tarik BKI. Menurut BKI pada "*Rules For The Classification and Construction, part 1 vol VI: Rules For Welding, Section 5: Welding Consumables and Auxillary Materials*", aluminium 6061 harus mempunyai standar nilai kuat tarik (*Tensile Strength*) ≥ 170 Mpa [12]. Nilai kekuatan tarik yang dihasilkan pada pengujian yang dilakukan pada sambungan las aluminium (FSW) 6061 pada diameter 6 mm memiliki kekuatan tarik rata-rata sebesar 85,82 Mpa, pada diameter 7 mm memiliki kekuatan tarik rata-rata sebesar 89,90 Mpa, dan pada diameter 8 mm memiliki kekuatan tarik rata-rata sebesar 143,17 Mpa.

Niali tarik mengalami penurunan pada sambungan las aluminium 6061 dibandingkan dengan standar BKI dapat diakibatkan karena kualitas pengelasan yang dihasilkan ketika proses pengelasan kurang maksimal. Hal ini dapat disebabkan karena beberapa faktor diantaranya penetrasi pin yang belum optimal saat pengelasan, heat input yang kurang maksimal, dan juga diameter pin yang belum sesuai. Oleh karena itu diperlukan ketelitian yang lebih, serta pengembangan penelitian tentang pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW) yang lebih baik agar hasil yang didapatkan bisa lebih maksimal.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis hasil pengujian tarik, dampak, dan mikrografi pada Aluminium 6061 setelah dilakukan pengelasan FSW (*Friction Stir Welding*) dengan perbedaan diameter pin *tool* yang dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada (UGM) Yogyakarta dapat ditarik kesimpulan untuk hasil pengujian tarik pada sambungan las dengan pengelasan FSW (*Friction Stir Welding*) memiliki tegangan rata-rata 143,17 Mpa dan regangan rata-rata 13,71 % pada diameter pin 8 mm. Pada diameter pin 7 mm memiliki tegangan rata-rata sebesar 89,90 Mpa dan regangan rata-rata 11,47 %. Dan tegangan rata-rata 85,82 Mpa dan regangan rata-rata sebesar 10,89 % pada diameter pin 6 mm. Ini menunjukkan bahwa semakin lebar diameter pin berpengaruh pada lebar jalur pengelasan yang dihasilkan sehingga semakin baik sifat mekaniknya dalam hal ini adalah kekuatan tariknya yang menunjukkan keuletan suatu bahan. Hasil pengujian dampak pada hasil sambungan las dengan pengelasan FSW memiliki kekuatan harga dampak rata-rata sebesar 0,46 J/mm² pada diameter pin 8 mm. Harga dampak rata-rata sebesar 0,38 J/mm² pada diameter pin 7 mm. Dan pada diameter pin 6

mm memiliki harga impak rata-rata 0,37 J/mm². Dari hasil tersebut diameter pin pengelasan berpengaruh pada sifat mekanik bahan, dalam hal ini adalah kemampuan bahan untuk menyerap suatu beban kejut, semakin lebar jalur pengelasan yang diakibatkan lebar diameter pin, semakin baik juga bahan untuk menahan beban kejut yang diberikan. Untuk hasil pengujian mikrografi pada daerah HAZ, dan las (*stir zone*) pada tiap putaran *tool* memiliki ukuran butir yang lebih besar daripada *base metal*, itu disebabkan oleh penetrasi pin *tool*. Semakin besar diameter *tool*, maka semakin besar dan rapat ukuran butir yang dihasilkan pada hasil pengelasan tersebut, sehingga sifat mekaniknya juga semakin baik.

Untuk penelitian selanjutnya agar dapat memperhatikan proses pengelasan, dalam melakukan pengelasan pencengkraman pada sisi plat aluminium harus benar-benar menekan plat, dan penetrasi pin juga harus diperhatikan karena berpengaruh pada hasil pengelasan. Serta selanjutnya diharapkan melakukan kajian tentang variasi terhadap diameter pin yang lebih besar dan sudut pin dari pengelasan FSW, karena hal itu juga sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Orang Tua dan Keluarga yang selalu mendukung dan mendoakan penulis, Bapak Sugeng selaku Kepala Lab Mesin BPM DIKJUR Kota Semarang, dan Bapak Lilik selaku Kepala Lab Bahan Teknik Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi UGM, serta teman-teman yang sudah membantu dalam penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Surdia and Shinroku, "Pengetahuan Bahan Teknik," Jakarta: Pradnya Paramita, 1992.
- [2] ASM, *Friction Stir Welding And Processing*, 2007.
- [3] Purwanto A. Wing Hendroprasetyo Akbar Putra, "Pengaruh Diameter Pin Terhadap Kekuatan dan Kualitas *Joint Line* Pada Proses *Friction stir welding* Aluminium Seri 5083 Untuk *Pre-Fabrication* Panel Bangunan Atas Kapal," pp. 1-6, 2013.
- [4] Majid. Amar Faruq Haidar, "Analisa Pengaruh Perbedaan Kecepatan Putaran *Tool* Terhadap Kekuatan Tarik, Impak, Dan Mikrografi Pada Aluminium 6061 Dengan Metode Pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW)," Semarang: Universitas Diponegoro, 2018.

- [5] Edward. Zulkifli, "Pengaruh Bentuk *Probe* Pada *Tool Shoulder* Terhadap Metalurgi Aluminium Seri 5083 Dengan Proses *Friction Stir Welding*," Surabaya : Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh November, 2013.
- [6] ASM Aerospace Specification Metals Inc, "ASM Material Data Sheet," 2018. [Online].Available:<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma6061t6>. [Accessed: 26-Jul-2018].
- [7] R. Nandan, T. Debroy, and B. H.K.D.H, "*Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties*, *Progress in Materials Science* 53," pp. 980–1023, 2008.
- [8] R. Setiaji, *Pengujian Tarik*. Jakarta: Laboratorium Metalurgi Fisik FTUI, 2009.
- [9] A. H. Yuwono, *Buku Panduan Praktikum Karakterisasi Material 1 Pengujian Merusak (Destructive Testing)*. Jakarta: Departemen Metalurgi Dan Material Fakultas Teknik UI, 2009.
- [10] ASM, "Metallography and Microstructure," vol. 9, 2004.
- [11] FX. A. Wahyudianto, M.N. Ilman, P.T. Iswanto, Kusmono, "Pengaruh Kecepatan Putaran *Tool* Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan dan Kekuatan Tarik Pada Sambungan Las FSW Tak Sejenis Antara AA5083 dan AA6061-T6," Yogyakarta: Departemen Teknik Mesin dan Industri UGM, 2015.
- [12] Biro Klasifikasi Indonesia, "*Rules for the Classification and Construction: Volume VI Rules for Welding*," Jakarta, 2013.