

## Studi Pengaruh Variasi Partikel *Shotpeening* terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis pada Aluminium Paduan

Wartono<sup>1</sup>  
Rivan Muhfidin<sup>2</sup>  
Eka Yawara<sup>3</sup>  
Sumpena<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup>Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Jl. Babarsari, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia.

<sup>4</sup>Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Proklamasi 45, Jl. Proklamasi No.1, Babarsari, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia.

<sup>1</sup>Korespondensi penulis: wartono@itny.ac.id

**Article Info:** Received: April 24, 2025 Accepted: June 03, 2025 Available online: June 04, 2025

**DOI:** 10.30588/jeemm.v9i1.2189

**Abstract:** The objective of this research is to find out the effect of shotpeening particle variations on the microstructure, tensile strength, and impact strength of friction stir welding (FSW) joints. In the weld metal area after the material is subjected to friction stir welding (FSW), the material will experience softening and a decrease in mechanical properties compared to the raw material. The shotpeening process on the weld metal surface is expected to improve mechanical properties, because the weld metal surface will experience repeated pressure from the shotpeening particles as a forging effect. Friction welding (FSW) is carried out on materials made of 6061 aluminum alloy and the material has a thickness of 3 mm, with butt joint welding. The friction welding process uses an Aciera brand milling machine, the feeding speed on the machine is set to 18 mm / minute and the spindle rotation is 910 rpm. Shotpeening particles use steel ball and aluminum oxide, namely S 230, Al 24, Al 54. The results of microstructure testing show that the forging effect of shotpeening causes deformation in the surface layer to a depth of 700  $\mu\text{m}$ . The results of tensile testing on FSW joints with variations in shotpeening particles: S 230, Al 24, Al 54 show the optimum tensile strength in shotpeening with Al 54 particles of 208 MPa, and the results of impact testing show the optimum impact price in shot peening with S 230 particles of 0.57 J / mm<sup>2</sup>.

**Keywords:** Aluminum, friction stir welding, shotpeening, tensile strength, impact strength.

**Abstrak:** Dalam penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh variasi partikel *shotpeening* terhadap struktur mikro, kekuatan tarik, dan kekuatan impak sambungan dengan pengelasan gesek (*friction stir welding* / FSW). Pada daerah *weld metal* setelah material dilakukan pengelasan gesek (FSW), material akan mengalami pelunakan dan penurunan sifat mekanis dibanding *raw material*. Proses *shotpeening* pada permukaan *weld metal* diharapkan mampu memperbaiki sifat mekanis, karena permukaan *weld metal* akan mengalami tekanan berulang dari partikel *shotpeening* sebagai efek tempa (*forging*). Pengelasan gesek (FSW) dilakukan pada material dari aluminium paduan 6061 dan material mempunyai tebal 3 mm, dengan pengelasan jenis *butt joint*. Proses pengelasan gesek menggunakan mesin frais (*Milling machine*) merk Aciera, kecepatan pemakanan (*feeding speed*) pada mesin diatur tetap sebesar 18 mm/menit dan putaran spindel sebesar 910 rpm. Partikel *shotpeening* menggunakan *steel ball* dan aluminium oxide yaitu S 230, Al 24, Al 54. Hasil pengujian struktur mikro menunjukkan efek tempa (*forging*) dari *shotpeening* menyebabkan deformasi pada lapisan permukaan hingga kedalaman 700  $\mu\text{m}$ . Hasil pengujian tarik pada sambungan FSW dengan variasi partikel *shotpeening* : S 230, Al 24, Al 54 menunjukkan kekuatan tarik optimum pada *shotpeening* dengan partikel Al 54 sebesar 208 MPa, dan hasil pengujian *impact* menunjukkan harga *impact* optimum pada *shotpeening* dengan partikel S 230, sebesar 0,57 J/mm<sup>2</sup>.

**Kata Kunci :** Aluminium, *friction stir welding*, *shotpeening*, kekuatan tarik, kekuatan impak.

## I. Pendahuluan

Aluminium mempunyai sifat ringan, kuat, tahan korosi dan dapat dibentuk dalam lembaran atau balok batangan. Aluminium dapat dimanfaatkan dalam beberapa keperluan, misalnya material untuk konstruksi atau pemesinan, seperti konstruksi kapal laut, komponen otomotif, dan konstruksi pesawat terbang (Van Vlack, L.H., 1991). Sambungan dengan proses pengelasan sudah banyak digunakan untuk keperluan elemen mesin dan konstruksi mesin, karena biaya produksi dapat diturunkan dan kekuatan konstruksi dapat ditingkatkan (Wiryo sumarto H., Okumura T., 2008).

Metode penyambungan material untuk aluminium salah satunya dapat menggunakan pengelasan gesek (*Friction stir welding / FSW*). *FSW* merupakan metode terbaru dari pengelasan gesek yang dikenal dalam teknik penyambungan pada kondisi padat atau logam las tidak mencair (*solid-state process*) (Thomas, 1991). Metode pengelasan gesek secara konvensional dapat dilakukan dengan gesekan memutar tool dan memberi tekanan pada logam dengan gaya aksial. Proses pengelasan gesek (*FSW*) menggunakan bantuan *tools* (*pin* dan *shoulder*) yang berputar pada kecepatan spindel tertentu dan gerak pemakanan (*feeding*) tertentu, sehingga material mengalami pelunakan. *FSW* sudah banyak digunakan secara luas dan lebih menguntungkan dari pada teknik penyambungan lainnya. Beberapa kelebihan dari pengelasan gesek (*FSW*) dibandingkan las *TIG* atau *MIG* yaitu: bahan tambah (*filler*) tidak dibutuhkan, percikan / asap tidak terjadi, distorsi tidak ada, penyusutan rendah, peralatan yang digunakan sederhana dan rendah biaya operasional serta tidak membutuhkan *welder* yang bersertifikat. Kelebihan lainnya yaitu mampu mengelas beberapa material yang sulit dilas, termasuk menyambung jenis aluminium yang berbeda (*dissimilar joint*). Sedangkan *FSW* juga memiliki kekurangan yaitu pada daerah *HAZ* (*Heat Affected Zone*), *TMAZ* (*Thermomechanically Affected Zone*), dan daerah logam las (*weld metal*) mengalami pelunakan karena rekristalisasi sewaktu proses *stirring*, sehingga dapat mempengaruhi kemampuan bahan untuk menerima gaya dari luar. Untuk menaikkan kekuatan tarik dan kekuatan impak pada daerah *weld metal*, permukaan *weld metal* mendapat perlakuan *shot peening*. (Ishak, 2011). *Shotpeening* adalah proses menembakan butiran material (partikel *shot peening*) berbentuk bola baja (*steel ball*) atau *aluminium oxide* pada daerah lasan (*weld metal*) dengan tekanan tinggi, bertujuan untuk menaikkan sifat mekanis material. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi hasil *shotpeening* adalah faktor manusia, udara bertekanan untuk menembakan butiran material, ukuran butiran *shotpeening*, lamanya waktu penembakan, dan jarak nozel ke permukaan *weld metal* (Wartono, 2012).

Dari uraian tersebut diatas, maka dipandang perlu melakukan penelitian tentang “Pengaruh variasi partikel *shotpeening* terhadap struktur mikro dan sifat mekanis sambungan *friction stir welding (FSW)* Pada Aluminium Paduan 6061”.

## II. Bahan dan Metode Penelitian

Artikel ini berdasarkan pada hasil pengelasan gesek dan *shotpeening* serta penelitian terkait yang dilakukan sesuai dengan pedoman atau prosedur berikut:

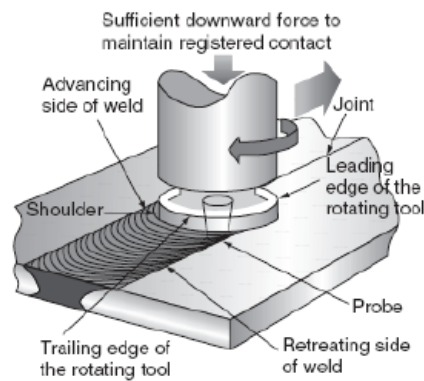
### 1. Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah aluminium paduan seri 6061 yang tersusun dalam bentuk lembaran dan memiliki dimensi panjang 300 mm, lebar 200 mm, dan tebal 3 mm.

### 2. Proses Pengelasan dan Parameter Las

Pengelasan dengan metode *friction stir welding (FSW)*, menggunakan mesin *milling* Aciera dengan putaran spindel 910 rpm dan kecepatan pemakanan (*feeding speed*) pada mesin diatur tetap sebesar 18 mm/menit.

Cara kerja pengelasan gesek (*FSW*) ditampilkan dalam gambar 1, sedangkan parameter-parameter untuk pengelasan dapat dilihat dalam tabel 1.



Gambar 1. Cara Kerja Pengelasan gesek (FSW) (Mandal, 2005).

Tabel 1. Parameter-parameter Pengelasan

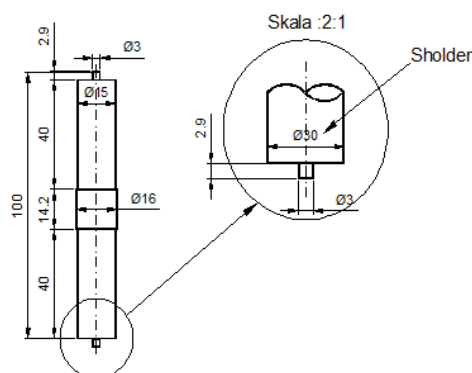
Putaran Tools (Shoulder) (rpm)	Kecepatan Pemakanan (mm/mnt)	Pengaturan Turunnya Tool (mm)	Ukuran Tool (mm)
910	18	0,2	Diameter Shoulder 15 mm Diameter Pin 3 mm, Panjang Pin 2,9mm

### 3. Sudut Kemiringan Tool

*Shoulder* diatur dengan sudut kemiringan ( $\theta$ ) antara 2 derajat – 4 derajat terhadap sumbu vertikal diatas permukaan benda kerja.

### 4. Bentuk Tool

Proses pengelasan gesek memakai alat yang terbuat dari bahan HSS, dengan diameter *shoulder* sebesar 15 mm dan diameter *pin* sebesar 3 mm, serta sudut kemiringan *shoulder* 3 derajat. Jenis sambungan las yang digunakan adalah *Butt Joint*. Desain alat dapat dilihat pada gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Desain alat (Rai R., dkk, 2011).

### 5. Proses Shotpeening

*Shotpeening* dilakukan pada sambungan *FSW*, dengan menembakkan partikel *shotpeening* pada permukaan plat secara berulang. Menurut Wagner (2000), Partikel *shotpeening* dapat menggunakan bola baja S 230 dan aluminium oxide Al 24 serta Al 54. Ukuran bola baja S 230 berdiameter  $\text{Ø} \leq 800 \mu\text{m}$ , sedangkan aluminium oxide Al 24 berukuran sekitar 700 - 1000  $\mu\text{m}$  dan aluminium oxide Al 54 berukuran sekitar 200 - 300  $\mu\text{m}$ . Penembakan terjadi pada tekanan udara 6 bar, jarak nozzle dan permukaan pelat 100 mm, dan diameter nosel 10 mm.

### 6. Pengujian-pengujian

a. Uji Struktur Mikro

Uji struktur mikro dilakukan di bawah mikroskop optik seperti Gambar 3 di bawah.

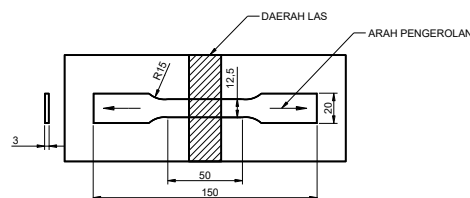


Gambar 3. Mikroskop optik.

Pengujian makro dan struktur mikro dilakukan secara horizontal dalam hasil pengelasan. Pekerjaan termasuk memotong, mengamplas, memoles dan mengetsa. Cairan hidro fluoride (HF) digunakan untuk mengetsa, kemudian bahan diambil gambar struktur-mikronya dengan peralatan mikroskop optik.

b. Uji Tarik

Uji tarik hasil pengelasan gesek (*FSW*) dilakukan sebanyak 3 buah spesimen pada masing-masing variabel proses pengelasan dan *raw material* sebagai pembanding diuji tarik sebanyak 3 buah sampel. Pembuatan sampel untuk pengujian tarik sesuai spesifikasi standar seperti gambar 4 dibawah.



Gambar 4. Spesimen Uji Tarik mengacu ASTM E8M.

Persamaan yang digunakan dalam uji tarik sebagai berikut:

Tegangan Tarik maksimum (*Engineering Stress*):

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Regangan Bahan (*Engineering Strain*):

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

keterangan,

$\sigma$  = Tegangan tarik ( $\frac{N}{m^2}$ , Pa)

$\varepsilon$  = Regangan (%)

F = Beban (N)

A<sub>0</sub> = Luas penampang sebelum pengujian (mm<sup>2</sup>)

L<sub>0</sub> = Panjang sampel sebelum pengujian (mm)

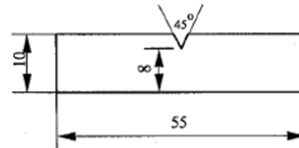
L = Panjang sampel setelah pengujian (mm)

Pengujian dilakukan untuk membandingkan kekuatan tarik antara *base material* dan material setelah mengalami proses pengelasan gesek (*FSW*). Dengan demikian, diharapkan dapat diperoleh

pemahaman yang lebih baik mengenai sifat mekanis dari benda uji, termasuk kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan perpanjangan.

### c. Uji Impak

Pengujian impak sambungan *FSW non-shotpeening* dan *FSW shotpeening* dilakukan dengan menguji masing-masing variasi partikel *shotpeening*, menggunakan tiga spesimen untuk setiap variabel. Sebagai perbandingan, juga dilakukan pengujian pada *base metal* yang terdiri dari tiga spesimen. Pembuatan spesimen uji impak sesuai pada spesifikasi standar yang ditunjukkan dalam Gambar 5 di bawah.



Gambar 5. Spesimen Uji Impak standar ASTM E23, Type A

Uji impak ini mempunyai tujuan untuk mengetahui ketangguhan bahan / kemampuan suatu bahan di dalam menyerap energi sebelum rusak / patah.

#### a. Energi patah dihitung dengan persamaan:

$$W = G \times R (\cos \beta - \cos \alpha)$$

keterangan:

W = energi patah material (Joule)

G = Berat bandul (N)

R = Jarak bandul ke titik pusat putaran (m)

$\beta$  = sudut bandul setelah menumbuk material ( $^{\circ}$ )

$\alpha$  = sudut bandul mula-mula ( $^{\circ}$ )

#### b. Kekuatan impak dihitung dengan persamaan:

$$a = \frac{w}{h \times b}$$

keterangan:

a = kekuatan impak material ( $J/mm^2$ )

w = energi terserap material (J)

h = tebal material uji (mm)

b = lebar material uji (mm).

### III. Hasil dan Pembahasan

#### 1. Uji Komposisi

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur-unsur pada spesimen uji. Data hasil pengujian komposisi kimia dapat dilihat pada tabel 2 di bawah.

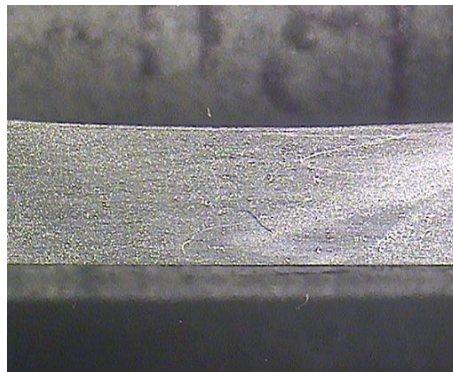
Tabel 2. Hasil Uji Komposisi

Al	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Ti	Cr	Zn
93,15	0,64	1,0	0,06	0,2	0,19	0,07	0,15	0,05

Unsur yang paling dominan dalam paduan aluminium ini adalah Al (93,15 %), diikuti oleh Mg (1,0 %) dan Si (0,64 %) yang masuk dalam paduan Al-Mg-Si. Sementara itu, paduan lain yang terdapat dalam aluminium dapat dikatakan sangat sedikit.

## 2. Uji Struktur Makro dan Mikro

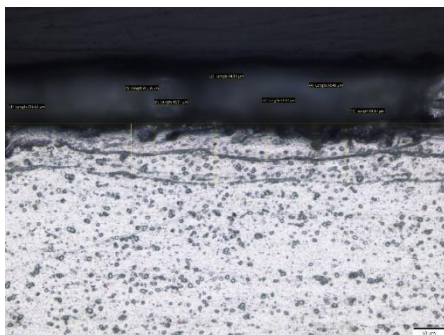
Pengambilan foto struktur makro dalam perbesaran 10x di daerah *weld metal* sambungan gesek (*FSW*) ditunjukkan dalam gambar 6 di bawah.



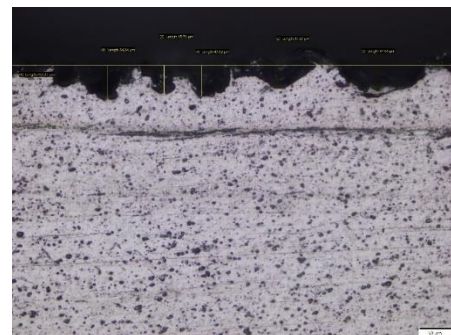
Gambar 6: Foto struktur makro dalam perbesaran 10x

Struktur makro logam las proses *FSW* masih terlihat adanya garis batas. Hal ini merupakan indikasi bahwa ikatan sambungan proses *FSW* yang dihasilkan masih kurang baik (*leak of bonding*) sehingga akan mempengaruhi sifat mekanik.

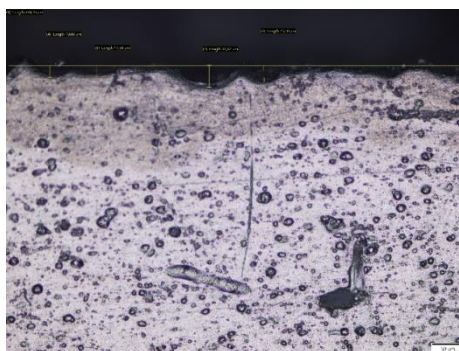
Gambar 7 di bawah, menampilkan struktur mikro yang diperbesar 200 kali pada area permukaan *weld metal* pengelasan *FSW*, yang melalui proses *shotpeening* dengan partikel *shot* berjenis S 230, Al 24, Al 54.



(a)



(b)



(c)

Gambar 7: Foto struktur mikro pada logam las *FSW* setelah di *shotpeening* (a) S 230, (b) Al 24, (c) Al 54

Gambar 7 di atas menampilkan foto struktur mikro di daerah permukaan logam las (*weld metal*) setelah di *shotpeening*, pada daerah tersebut mengalami deformasi (perubahan bentuk) di lapisan atas permukaan material. Proses tempa (*forging*) yang dilakukan melalui teknik *shotpeening* di atas permukaan material, menyebabkan kerapatan dislokasi mengalami peningkatan, terutama di area batas

butirnya. *FSW* yang mendapat *shotpeening* dengan partikel S 230, Al 24, Al 54 masing-masing mengalami deformasi hingga kedalaman 700  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ , dan 200  $\mu\text{m}$ .

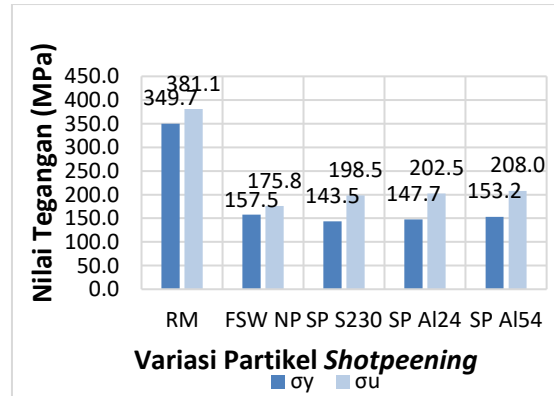
Di bagian logam las (*weld metal*), tepatnya di area bawah lapisan permukaan *shot*, terjadi proses penghalusan butir yang disebabkan oleh rekristalisasi. Fase yang terbentuk terdiri dari  $\alpha$ -Al dan Al-Si-Mg. Area yang berwarna terang menunjukkan keberadaan fase  $\alpha$  (aluminium), sedangkan area yang berwarna gelap menunjukkan adanya fase Al + Mg<sub>2</sub>Si, yang merupakan senyawa aluminium - silicon - magnesium (Al-Si-Mg) dalam bentuk presipitat. Rata-rata ukuran butir yang terbentuk mencapai 10  $\mu\text{m}$ , dan kristal yang dihasilkan memiliki bentuk *equiaxed*.

Pada area *heat affected zone (HAZ)* mengalami perubahan bentuk butiran yang cenderung membesar. Disampingnya area *HAZ* merupakan area *TMAZ (thermomechanically affected zone)* yang terlihat jelas dengan adanya garis batas antara *HAZ* dan *weld metal*.

Daerah *TMAZ* merupakan daerah transisi antara material dasar dan daerah logam las (*weld metal*), dimana daerah ini terjadi deformasi plastis akibat dari putaran *tool* dan dari pengaruh panas pada waktu proses pengelasan *FSW*.

### 3. Uji Tarik

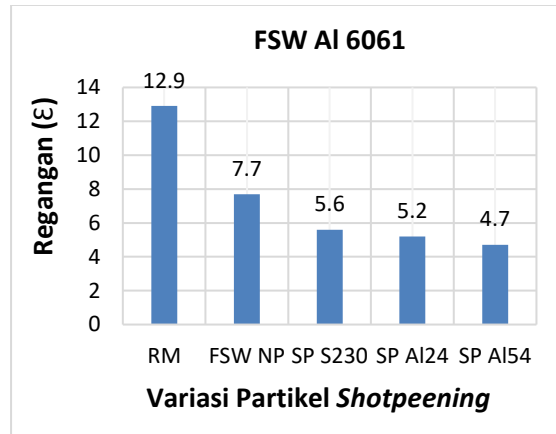
Aluminium paduan 6061, setelah melalui proses penyambungan *Friction Stir Welding (FSW)*, memiliki dimensi 300 mm x 200 mm x 3 mm. Beberapa sambungan *FSW* kemudian dilakukan perlakuan *shotpeening* dengan variasi jenis partikel. Selanjutnya, kedua jenis sambungan dibuat spesimen uji tarik pada sambungan *FSW non-shotpeening* dan sambungan *FSW shotpeening*, masing-masing banyaknya 3 buah. Spesimen untuk pengujian tarik mengikuti standar ASTM E8M. Melalui pengujian tarik ini, kita dapat memperoleh informasi mengenai sifat mekanik bahan, termasuk tegangan maksimum dan keuletannya. Hasil dari pengujian tarik tersebut dapat dilihat pada Gambar 8 di bawah ini:



Gambar 8: Grafik tegangan vs variasi partikel shotpeening

Gambar 8 di atas menampilkan grafik tegangan yang mencakup beberapa variasi partikel *shot peening*. Hasil uji tarik menunjukkan bahwa pengelasan gesek (*FSW*) menghasilkan penurunan tegangan Tarik jika dibandingkan *raw material*. Penurunan ini disebabkan oleh distribusi tegangan sisa yang tidak seimbang pada permukaan material. Akibatnya tegangan sisa tekan yang ada tidak mampu mengimbangi tegangan tarik pada material, saat mengalami beban tarik statis dari luar. Sedangkan pengelasan *FSW* dengan proses *shotpeening* menggunakan partikel *shotpeening* yang bervariasi dari S 230, Al 24, dan Al 54 menunjukkan peningkatan kekuatan tarik yang signifikan, yaitu sebesar 12,91 %, 15,18 %, dan 18,31 %.

Peningkatan kekuatan tarik terjadi akibat meningkatnya kerapatan dislokasi, terutama pada batas butir. Seiring berjalannya proses deformasi dan bertambahnya waktu penembakan, akan terjadi slip silang serta penggandaan dislokasi. Hal ini akan menyebabkan terbentuknya daerah dengan kerapatan dislokasi yang tinggi selama proses *shotpeening* berlangsung.



Gambar 9: Grafik regangan vs variasi partikel shot peening

Gambar 9 menampilkan grafik yang menunjukkan hubungan antara regangan dan variasi partikel shotpeening. Grafik tersebut memperlihatkan peningkatan kekuatan tarik, di mana proses *shotpeening* mampu mengurangi keuletan dan kekakuan bahan mengalami peningkatan. Hal ini dapat dilihat dari penurunan nilai regangan ( $\epsilon$ ). Namun, pemberian *shotpeening* yang berlebihan akan mengakibatkan material menjadi getas.

#### 4. Uji Impak

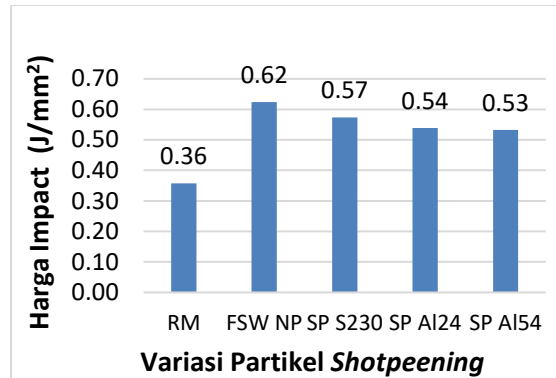
Kekuatan impak dapat diukur dengan menggunakan peralatan uji impak. Pengujian ini bermaksud untuk mengukur ketangguhan atau kemampuan material dalam menanggung beban. Pengujian impak dilakukan dengan metode Charpy, yang mengacu pada standar ASTM E 23, *type A*. Dalam pengujian ini, panjang lengan ayun 0,8 meter dengan berat palu sebesar 20 kilogram. Hasil dari uji impak tersebut disajikan dalam tabel 3 di bawah ini.

Tabel 3. Hasil pengujian impak dengan variasi partikel shotpeening.

Al	Partikel Shot Peening	Energi Terserap (J)	Harga Impact ( $J/mm^2$ )
6061	RM	8,37	0,36
	FSW NP	13,90	0,62
	SP S 230	13,03	0,57
	SP Al 24	12,50	0,54
	SP Al 54	12,20	0,53

Gambar 10 di bawah ini menampilkan grafik nilai impak *versus* variasi partikel *shotpeening*. Hasil uji impak menunjukkan bahwa proses pengelasan gesek (*FSW*) meningkatkan nilai impak sebesar 26 % dibandingkan *base material*.





Gambar 10: Harga impact vs variasi partikel shotpeening.

Pada sambungan *FSW* yang melalui proses *shotpeening* dengan variasi partikel *shot* S 230, Al 24, dan Al 54, terlihat adanya penurunan kekuatan impact yang signifikan. Penurunan kekuatan impact tercatat sebesar 0,57 J/mm<sup>2</sup> untuk jenis partikel S 230, 0,54 J/mm<sup>2</sup> untuk jenis partikel Al 24, dan 0,53 J/mm<sup>2</sup> untuk jenis partikel Al 54.

#### IV. Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan atas data hasil uji foto struktur mikro, uji tarik, dan uji impact yang berkaitan dengan pengaruh variasi partikel *shotpeening* pada aluminium paduan Al-Mg-Si, dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Hasil uji struktur mikro menunjukkan bahwa efek tempa (*forging*) oleh partikel *shotpeening* pada permukaan benda, akan meningkatkan kerapatan dislokasi terutama pada batas butirnya. *FSW* yang mendapat *shotpeening* dengan partikel S 230, Al 24, Al 54 masing-masing mengalami deformasi hingga kedalaman 700  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ , dan 200  $\mu\text{m}$ .
2. Pengelasan *FSW* menyebabkan penurunan tegangan tarik dibandingkan *raw material* menjadi sebesar 175,8 MPa, sedangkan pengelasan *FSW* dengan proses *shotpeening* menggunakan partikel *shotpeening* yang bervariasi dari S 230, Al 24, dan Al 54 mengalami kenaikan nilai kekuatan tarik yang signifikan, yaitu sebesar 198,5 MPa, 202,5 MPa, dan 208 MPa, hal ini menunjukkan ada peningkatan kekuatan tarik sebesar 12,91 %, 15,18 %, dan 18,31 %. *Shot peening* dapat mengurangi keuletan dan juga dapat meningkatkan kekakuan material. Namun, jika diterapkan secara berlebihan proses *shotpeening* ini dapat mengakibatkan material menjadi getas.
3. Hasil uji impact menunjukkan bahwa proses pengelasan gesek (*FSW*) mengalami kenaikan nilai impact dibandingkan *raw material* menjadi sebesar 0,62 J/mm<sup>2</sup> berarti ada peningkatan sebesar 26 %. Sedangkan *FSW* dengan proses *shotpeening* yang bervariasi mulai dari S 230, Al 24, dan Al 54, mengalami penurunan kekuatan impact sebesar 0,57 J/mm<sup>2</sup> untuk jenis partikel S 230, 0,54 J/mm<sup>2</sup> untuk jenis partikel Al 24, dan 0,53 J/mm<sup>2</sup> untuk jenis partikel Al 54.

#### Ucapan Terima Kasih

Puji dan rasa syukur dipanjatkan kepada Allah SWT atas rahmat-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan penelitian ini. Kami juga ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam penelitian ini, terutama kepada Laboratorium Material Teknik Mesin S1 UGM Yogyakarta, IST Akprind Yogyakarta, dan Laboratorium Polman Ceper Klaten.

#### Daftar Pustaka

Ishak, 2011, "Pengaruh *Sandblasting* dan *Electropolishing* Terhadap Kekasaran Permukaan, Kekerasan, Struktur Mikro dan Ketahanan Korosi Baja Tahan Karat AISI 316 L", Teknik Mesin, UGM, Yogyakarta.

Mandal, 2005, "*Aluminum Welding*", 2nd ed., Narosa Publishing House, New Delhi.

- Rai R., De A., Bhadeshia H.K.D.H., and Debroy T., 2011, "Review: *Friction Stir Welding Tools*", Vol. 16, No. 4, Jurnal Science and Technology of Welding and Joining, University of Cambridge.
- Riswanda, 2011, "Studi Komparasi Sifat Mekanik dan Korosi Sambungan Las Tak Sejenis Aluminium Paduan 5083 dan 6061-T6 pada Proses Las TIG dan FSW", Teknik Mesin, UGM, Yogyakarta.
- Van Vlack, L.H., 1991, "Ilmu dan teknologi Bahan (Ilmu Logam dan Bukan Logam)", Erlangga, Jakarta.
- Wagner L., Dorr T., Hilpert M., Beckmerhagen P., Kiefer A., 2000, "*Influence of Shot Peening on Fatigue Performance of High-Strength Aluminium and Magnesium Alloys*", The 7th International Conference on Shot Peening, Institute of Precision Mechanics, Warsaw, Poland.
- Wartono, 2012, Pengaruh *Shotpeening* terhadap Sifat Mekanis dan Laju Perambatan Retak Fatik Sambungan *Friction Stir Welding* Pada Aluminium Seri 5083
- Wirjosumarto H., Okumura T., 2008, "Teknologi Pengelasan Logam", PT Pradnya Paramita, Jakarta.
- Thomas W., 1991, "*Friction Stir Welding*", The Welding Institute.