

Pengaruh Sudut Kemiringan *Pin Tool* dan *Feed rate Micro Friction Stir Welding Aluminium 1100*

(*The Effect of Pin Tool Tilt Angle and Feed rate Micro Friction Stir Welding Aluminum 1100*)

Muhammad Budi Nur Rahman^a, Aris Widyo Nugroho^a, Ramadhoni Fahmi Arianto Putra^a, Nur Indra Arfiansyah^a

^aDepartment of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta,
Jl Brawijaya, Tamantirto, Kasihan Bantul, Indonesia, Postal Code: 55183, Telp: +62 274 387656 Ext. 233
e-mail: budinurrahman@umy.ac.id

Kata kunci:

Mikro *Friction Stir Welding*; Aluminium 1100; *Feed rate*; Sudut Kemiringan; Kekerasan; Kekuatan Tarik.

ABSTRAK

Pengelasan plat tipis kurang dari 1 mm disebut dengan *micro friction stir welding* (μ FSW). Tujuan penelitian adalah mengetahui pengaruh variasi *feed rate* 66, 85, dan 120 mm/menit dan sudut kemiringan *pin tool* 0°, 1°, dan 2° pada μ FSW aluminium 1100 dengan kecepatan putaran *pin tool* 2280 rpm dan jenis sambungan *butt joint*. Pengamatan struktur mikro dan makro dengan mikroskop optic dilakukan untuk mendukung pengujian kekerasan mikro Vickers, dan pengujian tarik. Hasil pengamatan makro terdapat cacat lasan pada variasi *feed rate* yaitu cacat incomplete fusion. Semakin besar kecepatan *feed rate* dan sudut kemiringan *pin tool* maka nilai kekerasan daerah SZ semakin tinggi. Nilai kekerasan pada *feed rate* 120 mm/menit sebesar 63,83 VHN dan kemiringan sudut *pin tool* 2° sebesar 63,0 VHN. Kekuatan tarik hasil μ FSW semakin meningkat dengan bertambahnya kecepatan *feed rate* dan sudut kemiringan *pin tool* namun masih lebih rendah dari base metal. Kekuatan tarik pada *feed rate* 120 mm/menit sebesar 92,95 MPa dan pada sudut kemiringan 2° sebesar 110,26 MPa. Semakin cepat *feed rate* menyebabkan struktur mikro menjadi kecil karena pendinginan semakin cepat. Semakin besar sudut kemiringan menyebabkan struktur mikro menjadi padat. Hal ini menyebabkan nilai kekerasan dan kekuatan tarik semakin meningkat juga.

Keywords:

Micro Friction Stir Welding; Aluminum 1100; *feed rates*; *Tilt Angle*; *Hardness*; *Tensile strength*.

ABSTRACT

Welding of thin plates less than 1 mm is called micro friction stir welding (μ FSW). The aim of the study was to determine the effect of variations in feed rates of 66, 85, and 120 mm/min and pin tool tilt angles of 0°, 1°, and 2° on 1100 μ FSW aluminum with a pin tool rotation speed of 2280 rpm and the type of butt joint connection. Observation of micro and macro structures with an optical microscope was carried out to support the Vickers micro hardness test, and tensile testing. The results of macro testing showed that there were defects in the feed rate variations, namely incomplete fusion defects. The greater the speed of the feed rate and the angle of inclination of the pin tool, the higher the hardness value of the SZ area. The hardness value at a feed rate of 120 mm/min was 63.83 VHN and the slope of the pin tool 2o was 63.0 VHN. The tensile strength of μ FSW increases with increasing feed rate and pin tool tilt angle but is still lower than base metal. The tensile strength at a feed rate of 120 mm/min is 92.95 MPa and at an angle of 2o is 110.26 MPa. The faster the feed rate causes the microstructure to become smaller due to faster cooling. The greater the angle of inclination causes the microstructure to become denser. This causes the value of hardness and tensile strength to increase as well.

1. PENDAHULUAN

Aluminium adalah material logam *non-ferrous* paling banyak digunakan karena banyak memiliki sifat yang menguntungkan mudah dibentuk dengan berbagai proses. Paduan aluminium ada yang *heat-treatable* namun ada juga yang *non heat-treatable* sehingga memiliki sifat yang bervariasi. Aluminium lebih sulit dilas karena adanya lapisan oksida di permukaannya. Teknik pengelasan aluminium yang banyak dilakukan menggunakan las busur antara lain las MIG (*Metal Inert Gas*) dan TIG (*Tungsten Inert Gas*). Las MIG adalah las busur dengan elektrode terumpan yang sama dengan *base metal* dilindungi gas *inert*,

memiliki efisiensi yang tinggi dan biaya yang cukup rendah. Las TIG menggunakan elektroda tungsten untuk membuat busur listrik yang banyak digunakan untuk pengelasan logam yang reaktif terhadap oksigen seperti magnesium, titanium, aluminium, dan pelat tipis [1].

Aluminium seri 1100 sering pakai pada dunia industri khususnya pada penggunaan *heat exchanger*, perpipaan dan *pressure vessel*. Hal ini disebabkan karena aluminium memiliki koefisien muai yang besar dan reaktif terhadap udara yang menyebabkan mudah terbentuknya lapisan oksida (Al_2O_3) sehingga temperatur cair yang dihasilkan lebih tinggi dari aluminium murni. Panas yang berlebih ini menyebabkan rentan terjadi cacat seperti porositas, distorsi dan *crack* pada metode penyambungan GTAW dan GMAW. Untuk mengatasi masalah ini maka proses *Friction Stir Welding* (FSW) bisa digunakan sebagai solusi untuk mengatasi masalah cacat yang terjadi pada aluminium akibat proses penyambungan terjadi di bawah temperatur logam cair aluminium. FSW merupakan pengelasan tanpa adanya tambahan bahan dan suhu kerja saat berlangsungnya pengelasan tidak melewati titik lebur dari material benda kerjanya. *Friction stir welding* (FSW) adalah salah satu metode pengelasan *solid-state* yang dikembangkan oleh *The Welding Institute* (TWI) pada tahun 1991, mempunyai beberapa keunggulan seperti tidak memerlukan *filler*, memiliki kualitas sambungan tinggi, deformasi yang kecil, dll. Prinsip kerja pada FSW adalah dengan memanfaatkan adanya gaya gesek dari gesekan antara *tool* dengan benda kerja. *Tool* yang berputar melaju dengan kecepatan yang tetap sepanjang jalur lasan di antara dua plat benda kerja yang dilakukan proses pengelasan. Gesekan yang terjadi antara benda kerja dan *tool* akan menimbulkan panas yang dapat melunakkan material kerja kemudian *pin* ditekan dan ditarik sesuai dengan daerah yang akan dilas [2]. *Micro Friction Stir Welding* (μ FSW) merupakan hasil dari pengembangan pengelasan *friction stir welding* untuk diaplikasikan pada penyambungan material dengan ukuran ketebalan 1000 μ m atau kurang, di mana pada awal penemuannya *Friction stir welding* lebih difokuskan pada penelitian material yang memiliki ketebalan lebih besar dari 1 milimeter dengan perbedaan variasi parameter proses dan variasi desain *tool*. Keuntungan dari pengelasan metode FSW dan μ FSW adalah tidak perlu menggunakan gas pembungkus dan *flux* [Harsanto]. Dengan perkembangan teknologi dan meningkatnya kebutuhan dalam industri, penelitian tentang teknologi FSW dikembangkan lebih lanjut ke arah *micro friction stir welding* (μ FSW). μ FSW digunakan di bidang industri manufaktur seperti penerbangan, otomotif, mikroelektronika, dll. Oleh karena itu, μ FSW sebagai teknologi terobosan dalam proses manufaktur, memiliki prospek aplikasi yang luas [3]. Salah satu material yang sedang dikembangkan dalam pengelasan mikro *Friction Stir Welding* ini adalah aluminium, karena dari sifat-sifat aluminium ini yang khusus digunakan dalam dunia industri. Material ini juga dapat digunakan dalam bidang yang sangat luas seperti untuk keperluan material kapal laut, pesawat terbang, mobil, konstruksi bahkan untuk peralatan rumah tangga. Seiring dengan perkembangan tersebut maka perlu dilakukan penelitian agar penyambungan aluminium tersebut lebih mudah dan memiliki kekuatan yang optimal.

Hasil sambungan pengelasan FSW aluminium 6061-T6 pada tipe penyambungan *butt joint* dengan *feed rate* 29 mm/menit, kecepatan putar *tool* 1500 rpm, menggunakan diameter *pin* 6 mm menghasilkan sifat mekanik dan struktur mikro yang lebih baik dibandingkan menggunakan diameter *pin* 8 mm dan 10 mm. Nilai kekerasan dan kekuatan tarik dengan diameter 6 mm tersebut adalah 70,27 HVN dan 144 MPa. Spesimen yang dilas dengan diameter *pin* 10 mm terdapat cacat las berupa void (rongga) kecil pada bagian permukaan lasan [4].

Kekuatan tarik dan kekerasan pengelasan FSW pada Aluminium AA1100 dengan variasi *feed rate* nilainya lebih rendah dibandingkan logam induknya. Cacat void/rongga/lubang pada *stir zone* karena ujung *pin* tidak mengalami gesekan dengan logam induk sehingga tidak mampu memanaskan dan melelehkan logam induk dengan baik. [5]. Rendahnya kekuatan tarik disebabkan karena perubahan struktur mikro menjadi lebih kecil akibat pemanasan logam dan menjadi getas. Selain itu bisa juga karena adanya cacat wormholes yang akan menginisiasi retak pada pembebanan tarik sehingga terjadi kegagalan lasan. [6].

Hasil pengelasan μ FSW aluminium seri 6061-T6, menunjukkan bahwa struktur mikro material mengalami rekristalisasi pada daerah *stir zone* (SZ). Rekristalisasi ini menyebabkan pembentukan butir di daerah lasan. Pada daerah SZ bentuk butir memiliki kepadatan yang tinggi sedangkan pada daerah TMAZ memiliki kepadatan butir yang lebih rendah. Hal ini disebabkan adanya pengaruh temperatur dan

regangan saat proses pengelasan. Tingkat temperatur dan regangan pada daerah TMAZ lebih rendah dibanding pada daerah SZ oleh karena itu pengaruh terhadap mikro strukturnya relatif lebih rendah. Pada daerah SZ butiran yang terjadi akibat proses rekristalisasi memiliki bentuk yang seragam. Mikro struktur pada daerah SZ yang telah mengalami rekristalisasi menghasilkan bentuk butir yang seragam dan rapat menyebabkan meningkatnya kekerasan pada sambungan las. [7]

Hasil pengujian tarik pada pengelasan μ FSW aluminium seri AA6XXX dengan kecepatan putar *tool* 1700 rpm, *feed rate* 25 mm/min dan ketebalan plat 440 μ m menunjukkan sambungan lap *joint* lebih tinggi dibandingkan sambungan *butt joint*, walaupun masih di bawah kekuatan tarik base material. Berdasarkan hasil uji kekerasan maka diketahui bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan antara kekerasan dari *butt joint* dan lap *joint* (8).

Pengelasan plat aluminium AA 1100 dan ketebalan 400 μ m dengan μ FSW pada kecepatan putar *pin tool* 8000 rpm menunjukkan kekuatan tarik semakin rendah dengan kenaikan *feed rate* 30, 50, 70 mm/menit. Kekuatan tarik pada *feed rate* 30 mm/menit sebesar 61.31 MPa sedangkan pada *feed rate* 70 mm/min yaitu sebesar 43,455 MPa. Hasil pengujian tarik dari pengelasan μ FSW menunjukkan masih di bawah kekuatan base metal dan bersifat getas di mana tidak adanya necking pada saat pengujian. Patahan terjadi di daerah *weld nugget zone*, hal ini menunjukkan ikatan pengelasan masih lemah karena panas yang dihasilkan tidak mampu meleburkan material dan tidak mempengaruhi daerah HAZ [9].

Kekuatan tarik hasil pengelasan μ FSW aluminium *alloys* 1100 dengan ketebalan plat 300 μ m menunjukkan bahwa dengan *feed rate* 50 mm/menit dan kecepatan putar 10.000 rpm mempunyai kekuatan tarik sebesar 41.218 MPa. Nilai kekerasan tertinggi sebesar 71,5 VHN pada kecepatan *feed rate* 70 mm/min di daerah *Weld Nugget Zone* dan terendah sebesar 53,2 VHN pada *feed rate* 30 mm/min. Apabila kecepatan *feed rate* semakin tinggi maka ukuran butir struktur mikro di daerah WNZ akan semakin besar dan presipitat $FeAl_3$ yang tersebar semakin kasar dan banyak saat mengalami proses *stirring*. Pada TMAZ partikel $FeAl_3$ lebih sedikit daripada daerah WNZ akibat defleksi akibat proses *stirring* WNZ. [10].

Hasil pengelasan μ FSW dipengaruhi oleh beberapa parameter antara lain diameter *pin tool*, kecepatan putar *pin tool*, geometri *pin tool*, kecepatan *feed rate*, dan sudut kemiringan *pin tool*. Penelitian pengaruh sudut kemiringan *pin tool* dan kecepatan *feed rate* belum banyak dilakukan. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui hubungan laju pemakanan (*feed rate*) *tool* dan sudut kemiringan *pin tool* terhadap kekerasan, kekuatan tarik, dan struktur mikro dan makro pada pengelasan μ FSW aluminium seri AA 1100.

2. METODE PENELITIAN

Material yang digunakan dalam penelitian adalah aluminium alloy 1100 yang memiliki komposisi seperti Tabel 1 dengan dimensi 120 x 60 x 0.8 mm. Aluminium seri 1100 bersifat ringan, tahan korosi dan penghantar panas dan listrik yang baik. AA 1100 sering digunakan pada bagian heat exchanger, perpipaan, kapal laut dan dunia industri.

Tabel 1. Kandungan unsur Aluminium AA1100

Unsur	Al	Mg	Si	Fe	Mn	Zn	Cr
Kandungan (%)	99	0,62	0,44	0,34	0,06	0,04	0,02

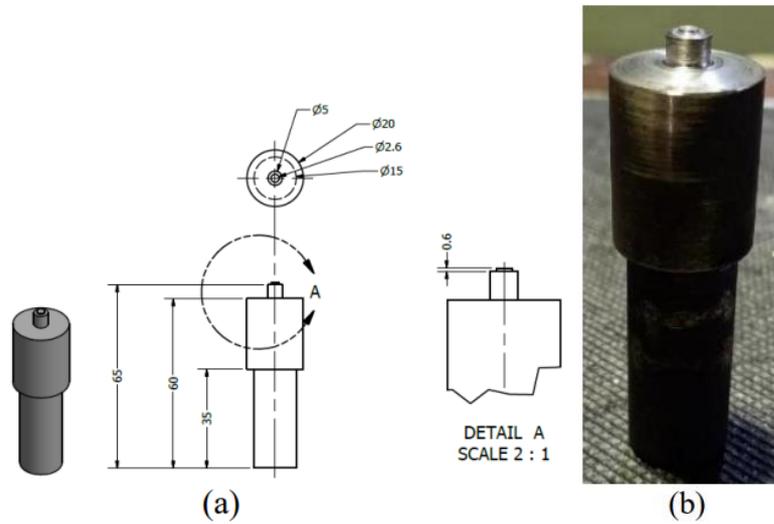
Pin tool dibuat dari baja karbon tinggi ST 90 dan diquenching untuk meningkatkan kekerasan *pin tool*. Design dan bentuk *pin tool* yang digunakan seperti pada Gambar 1.

Proses pengelasan μ FSW aluminium *butt joint* menggunakan mesin milling vertical dengan kecepatan putar *pin tool* 2280 rpm, variasi sudut kemiringan *pin tool* 0°, 1°, dan 2°, dan variasi kecepatan *feed rate* 66, 85, dan 120 mm/menit. Pengamatan struktur mikro hasil pengelasan μ FSW menggunakan mikroskop optic Olympus model BX53M, untuk mengetahui struktur mikro pada *stir zone* (SZ), thermo mechanically affected zone (TMAZ), heat affected zone (HAZ), dan base metal (BM).

Pengujian mikro Vickers dilakukan untuk menguji kekerasan daerah pengelasan. Vickers *Hardness* Number (VHN) adalah hasil bagi dari beban (gf) yang digunakan dengan luas permukaan tekan (indentasi) dari indenter intan berbentuk piramida dengan sudut 136° (mm²). Pembebanan indentasi sebesar 50 gf ditahan 10 detik dengan jarak indentasi 250 μ m. Persamaan untuk menghitung nilai kekerasan yaitu:

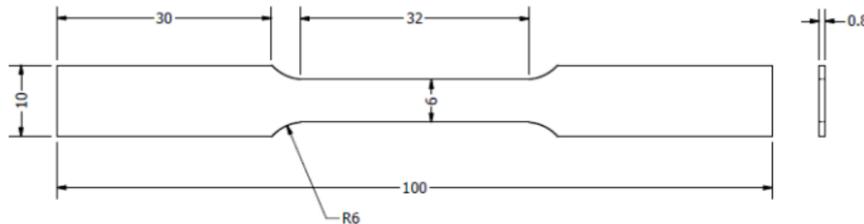
$$VHN = \frac{2P \sin(\theta/2)}{d^2} = \frac{1,854P}{d^2} \quad (1)$$

Di mana: VHN = Vickers *Hardness Number* (gf/mm²), P = Beban (gf), θ = Sudut piramida intan (136°), dan d = Diagonal rata-rata indenter (mm).



Gambar 1. a. Design pin Tool, b. Pin Tool

Pengujian tarik menggunakan standar ASTM E8 [10] dengan geometri spesimen uji seperti Gambar 2.



Gambar 2. Spesimen Uji Tarik ASTM E8

Sifat-sifat Tarik diperhitungkan dengan persamaan.

Tegangan:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \tag{2}$$

Regangan:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \tag{3}$$

Modulus Elastisitas

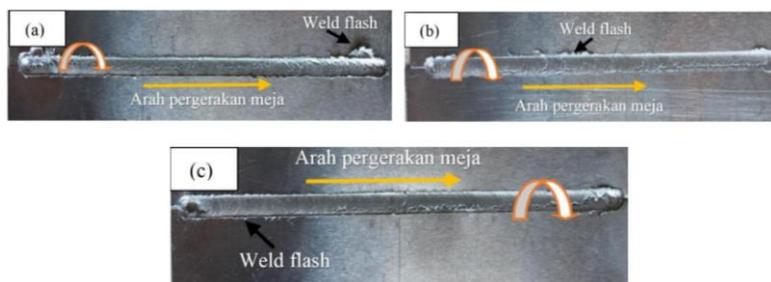
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{F \cdot L_0}{A_0 \cdot \Delta L} \tag{4}$$

Di mana: σ = Tegangan (MPa), F = beban yang diberikan (N), A_0 = luas penampang melintang (mm²), ε = regangan, ΔL = pertambahan panjang (mm), L_0 = panjang awal (mm), L_1 = panjang akhir (mm). Pengukuran modulus elastisitas dilakukan pada daerah elastis pada grafik tegangan vs regangan.

3. HASIL dan PEMBAHASAN

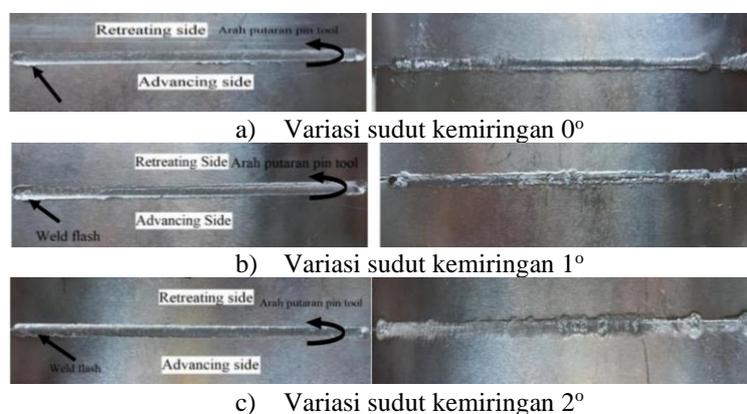
3.1 Pengamatan Permukaan Lasan

Pengaruh *feed rate* pengelasan μ FSW terlihat pada Gambar 3. Terdapat ripples/*weld flash* disetiap variasi yang merupakan kelemahan dari pengelasan μ FSW. Analisa permukaan hasil μ FSW, pengelasan dengan kecepatan putar *pin tool* 2280 rpm terdapat banyak cacat pengelasan disebabkan kurangnya penetrasi dan heat input yang masuk sehingga material yang dilas tidak tercampur sempurna, *feed rate* yang terlalu cepat menyebabkan panas yang dihasilkan tidak cukup untuk mencapai titik leleh material.



Gambar 3. Penampilan permukaan las dengan variasi kecepatan *feed rate*.
a) 66 mm/min, b) 85 mm/min, c) 120 mm/min.

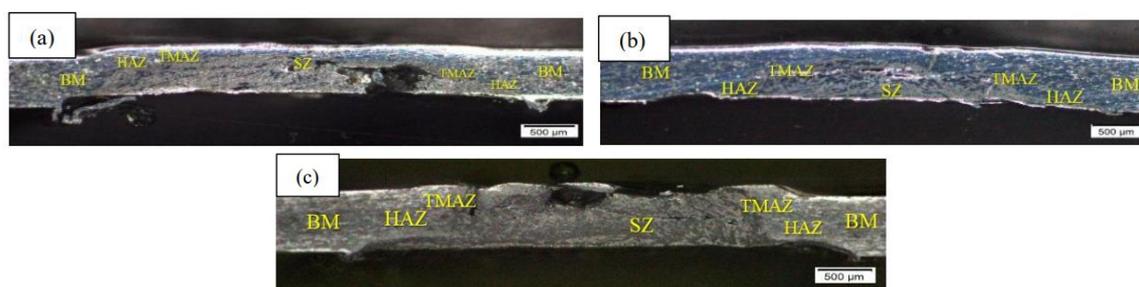
Hasil pengelasan μ FSW dengan variasi sudut kemiringan *tool* 0° , 1° dan 2° , terlihat pada Gambar 4. Pengelasan terbentuk karena adanya gesekan panas antara *pin tool* dan *shoulder welding tool* yang berputar searah jarum jam dengan *feed rate* 85 mm/menit terhadap dua plat aluminium yang memiliki ketebalan 0,8 mm. Permukaan atas hasil pengelasan terdapat *weld flash* di tepi sepanjang gerak *pin* dan terdapat lubang-lubang kecil pada permukaan bawah. Semakin besar sudut kemiringan, jumlah lubang yang terbentuk akan berkurang.



Gambar 4. Penampilan permukaan las bagian atas dan bawah dengan variasi sudut kemiringan

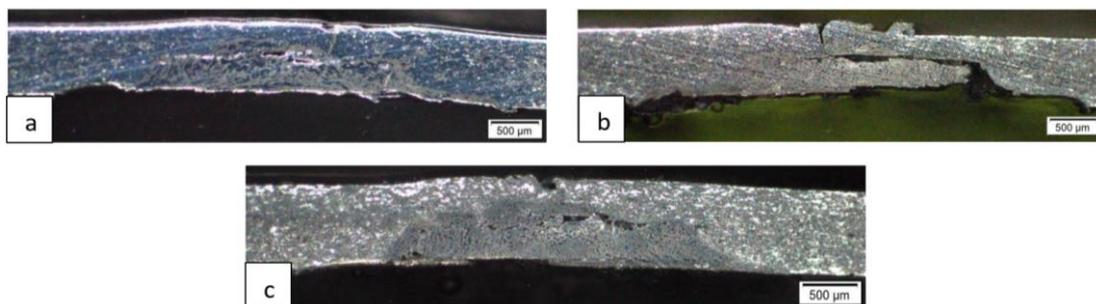
3.2 Pengamatan Struktur Makro

Pengujian makro dilakukan untuk mengetahui ikatan makroskopis hasil pengelasan dari setiap specimen. Hasil pengelasan dengan variasi *feed rate* terlihat pada Gambar 5 terlihat adanya cacat incomplete fusion karena heat input yang diterima material kurang sehingga ikatan antar partikel kurang kuat dan terlihat terdapat rongga/lubang. Selain itu *stirring*/pengadukan juga kurang sehingga material tidak tercampur dengan merata.



Gambar 5. Foto makro hasil pengelasan μ FSW dengan variasi *feed rate*.
a) *feed rate* 66 mm/min, b) *feed rate* 85 mm/min, c) *feed rate* 120 mm/min

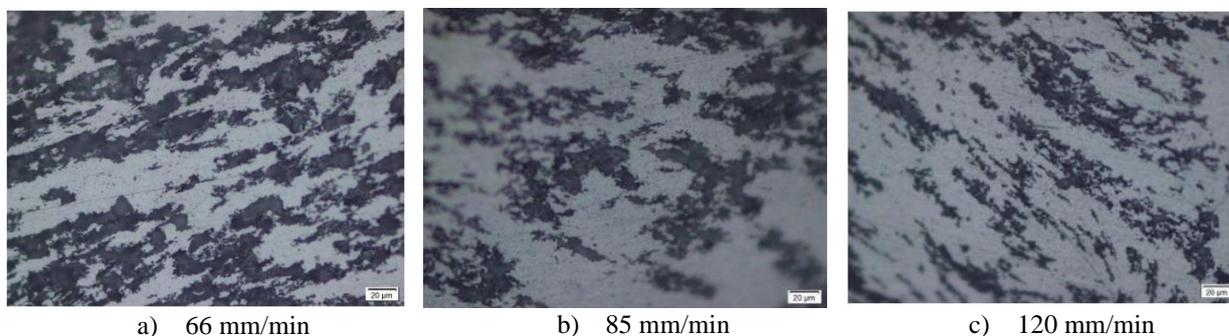
Gambar 6 menunjukkan foto makro hasil pengelasan dengan variasi sudut kemiringan *tool* yang menghasilkan tingkat panas gesek yang berbeda. Panas mempengaruhi pelunakan material benda kerja dan proses pengadukan material benda kerja. Proses pelunakan dan pengadukan benda kerja sangat penting dalam FSW. Cacat lasan berupa incomplete fusion yaitu adanya lubang/celah pada area pengelasan tidak menyatu secara sempurna. Cacat disebabkan karena kurangnya panas oleh gesekan benda kerja tidak mampu melunakkan material sehingga material tidak tercampur secara baik [6].



Gambar 6. Foto makro hasil pengelasan μ FSW dengan variasi sudut kemiringan *pin tool*.
a) Sudut 0°, b) Sudut 1°, c) Sudut 2°.

3.3 Pengamatan Struktur Mikro

Proses μ FSW aluminium alloy 1100 terjadi penghalusan partikel-pertikel pada daerah *stir zone* dan tidak terjadi perubahan fase karena pada pengelasan ini tidak menggunakan logam pengisi. Partikel hitam yang terdispersi merata pada matriks aluminium merupakan FeAl_3 , terlihat pada Gambar 7.



a) 66 mm/min b) 85 mm/min c) 120 mm/min
Gambar 7. Foto strukturmikro daerah *stir zone* oleh variasi kecepatan *feed rate*.

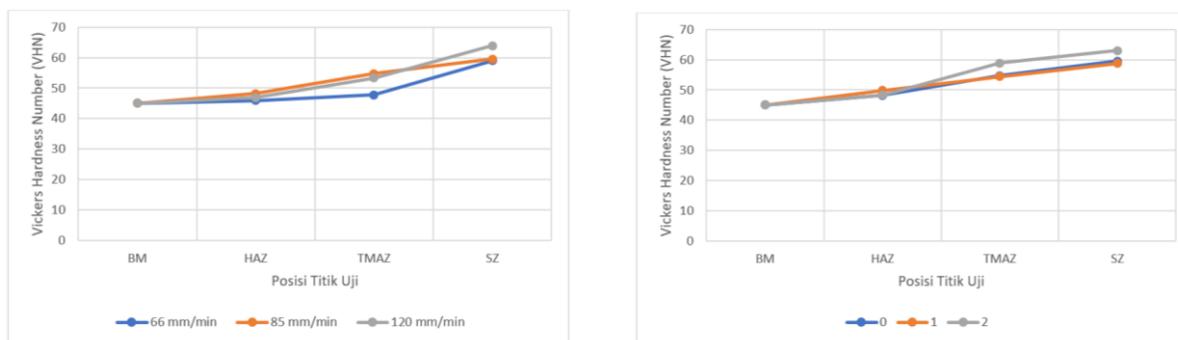
Daerah base metal (BM) tidak terpengaruh oleh panas yang terjadi saat proses pengelasan, terlihat bentuk butir memanjang dan menyebar secara merata serta memiliki ukuran yang sama. Strukturmikro daerah HAZ tidak jauh berbeda dari daerah BM, karena pengaruh panas yang terjadi saat pengelasan sangat rendah sehingga tidak menimbulkan perubahan struktur mikro yang signifikan. Daerah TMAZ terjadi deformasi struktur tetapi tidak terjadi rekristalisasi. Daerah SZ terlihat adanya perbedaan butiran disetiap variasi, hal ini dikarenakan perlakuan kecepatan *feed rate* pada daerah SZ berbeda-beda dan hal ini juga disebabkan karena adanya pengaruh temperature pada daerah SZ saat proses pengelasan berlangsung yang menyebabkan material mengalami rekristalisasi. Pada daerah SZ semakin banyak atau semakin halus batas butir maka akan menyebabkan gerakan dislokasi semakin sulit dan juga akan mengakibatkan meningkatnya sifat mekanik pada logam [5].

3.4 Pengujian Kekerasan

Gambar 8.a menunjukkan bahwa nilai kekerasan di daerah HAZ, TMAZ, dan SZ nilai kekerasannya meningkat jika dibandingkan dengan daerah BM pada variasi kecepatan *feed rate*. Struktur mikro yang terbentuk di daerah HAZ dan *stir zone* lebih kecil dibandingkan base metal. Ukuran butir yang semakin kecil menandakan jumlah butir semakin banyak. Jumlah butir yang semakin banyak strukturnya akan lebih rapat, sehingga ikatan antar atomnya semakin kuat. Penyebab lain yang membuat HAZ dan SZ nilai kekerasannya lebih tinggi dari BM yaitu didalam aluminium alloys 1100 terdapat FeAl_3 yang merupakan suatu senyawa yang terbentuk dari reaksi antara aluminium dengan Fe. Semakin banyak jumlah butiran FeAl_3 yang terbentuk maka pergerakan dislokasi yang terjadi semakin sulit dan mengakibatkan peningkatan kekuatan dan kekerasan sambungan. Semakin tinggi kecepatan *feed rate* maka akan nilai kekerasannya semakin meningkat. Nilai kekerasan tertinggi terdapat pada daerah SZ dengan variasi *feed rate* 120 mm/menit yaitu sebesar 63,83 VHN, sedangkan pada kecepatan 85 mm/menit dan 66 mm/menit adalah 59,57 VHN dan 58,97 VHN. Semakin tinggi *feed rate* maka heat input semakin rendah. Heat input rendah mengakibatkan pendinginan yang lebih cepat sehingga butiran strukturminkro menjadi lebih kecil, hal ini yang menyebabkan kenaikan nilai kekerasan [6].

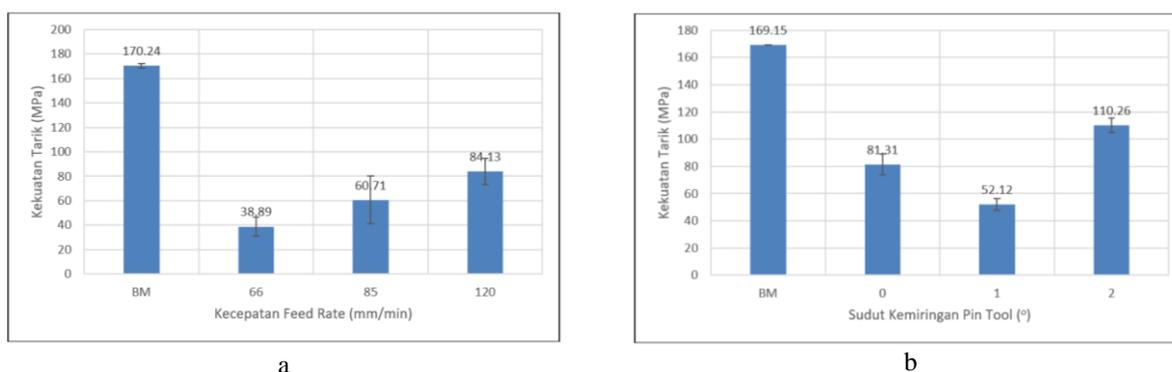
Hasil pengujian kekerasan pada variasi sudut kemiringan *tool* 0°, 1° dan 2° dapat dilihat pada Gambar 8.b. Nilai kekerasan daerah HAZ, TMAZ, dan SZ semakin meningkat pada variasi kemiringan sudut *pin tool* 0°, 1°, dan 2°. Naiknya nilai kekerasan disebabkan adanya pengaruh tegangan dan temperatur karena deformasi struktur pada materialnya mengalami rekristalisasi pada saat pengadukan. Proses rekristalisasi menghasilkan adanya bentuk butir yang seragam dan rapat pada daerah SZ sehingga nilai kekerasan meningkat [7]. Tegangan dan temperatur yang lebih rendah pada daerah HAZ menyebabkan deformasi struktur tidak banyak berubah sehingga nilai kekerasan SZ masih

lebih tinggi dibanding HAZ dan TMAZ. Jika daerah HAZ nilai kekerasan lebih rendah dibanding nilai BM hal ini karena pengaruh temperatur panas rendah namun deformasi yang terjadi pada daerah ini tidak terlalu signifikan [4]. Nilai kekerasan tertinggi pada kemiringan *pin tool* 2° pada daerah SZ sebesar 63,0 VHN, nilai kekerasan pada sudut kemiringan *tool* 1° dan 0° sebesar 58,8 VHN dan 59,6 VHN. Nilai kekerasan dipengaruhi oleh adanya perubahan dimensi dan bentuk butir pada daerah SZ dimana bentuk butirnya halus dan rapat sehingga nilai kekerasannya tinggi.

a. Pengaruh kecepatan *feed rate*b. Pengaruh sudut kemiringan *pin tool*Gambar 8. Nilai kekerasan hasil mikro *friction stir welding* aluminium 1100.

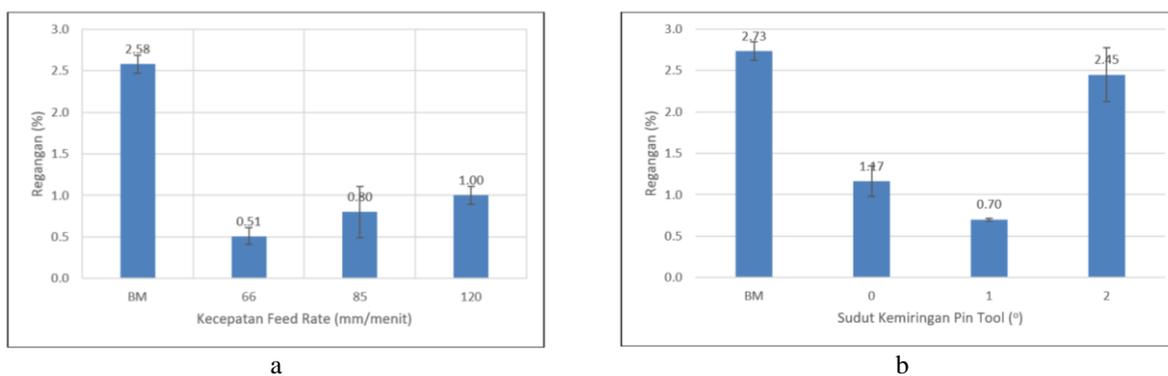
3.5 Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan sesuai standard ASTM E8/E8M-09 [12]. Kekuatan tarik hasil mikro *friction stir welding* (μ FSW) masih lebih rendah daripada sifat tarik base metal. Namun peningkatan kecepatan *feed rate* sampai 120 mm/menit menunjukkan peningkatan kekuatan tarik dan modulus elastisitasnya demikian juga dengan peningkatan sudut kemiringan sampai 2° seperti pada Gambar 9.

Gambar 9. Kekuatan tarik hasil mikro *friction stir welding* aluminium 1100.

Rendahnya kekuatan tarik disebabkan ikatan partikel logam yang rendah karena saat proses pengelasan material tidak lebur. Panas yang dihasilkan tidak mampu untuk meleburkan material, hanya terjadi pelunakan saja. Selain itu, material yang teraduk tidak mengisi secara rapat juga terdapat celah/ rongga sehingga terdapat adanya cacat incomplete fusion seperti Gambar 6. Perubahan struktur mikro pada daerah logam lasan akibat proses penempaan pada saat pengelasan juga mempengaruhi kekuatan tarik. Peningkatan kecepatan *feed rate* akan meningkatkan kekuatan tarik hasil lasan μ FSW. Kecepatan *feed rate* mempengaruhi heat input pada saat proses pengelasan, semakin cepat *feed rate* menyebabkan proses pendinginan akan semakin cepat sehingga batas butir atom menjadi kecil dan halus. Hal ini yang menyebabkan kenaikan nilai kekuatan tarik hasil pengelasan. Apabila heat input yang terlalu tinggi akan menyebabkan proses pendinginan menjadi lebih lambat, sehingga memungkinkan batas butir atom mencapai kondisi equilibrium yang menyebabkan kekuatan tarik rendah namun ulet.

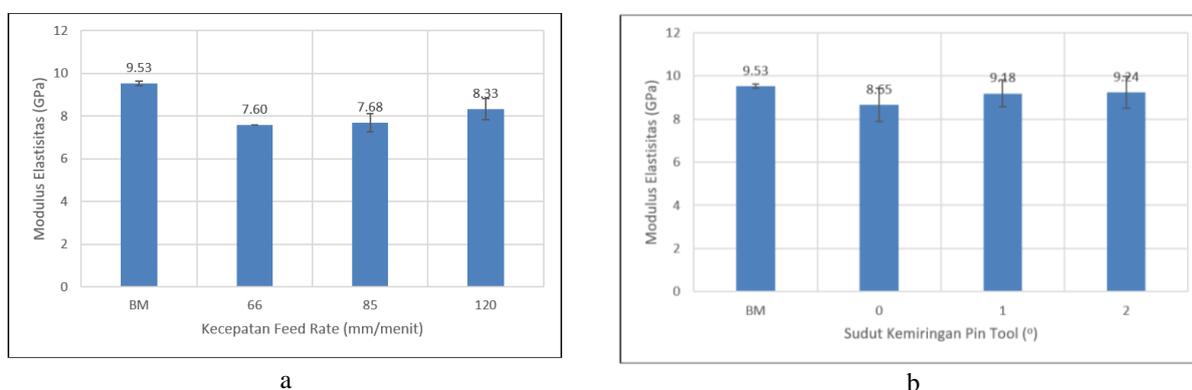
Kekuatan tarik pada specimen hasil lasan μ FSW dengan variasi sudut kemiringan *pin tool* juga menunjukkan nilai lebih rendah dari kekuatan tarik base metal. Perbedaan nilai kekuatan tarik yang cukup jauh antara BM dengan specimen hasil pengelasan dikarenakan adanya sifat softening pada aluminium ketika mengalami pemanasan. Sampai sudut kemiringan *pin tool* 2° , kekuatan tarik mengalami peningkatan. Panas yang dihasilkan dari gesekan dan tekanan antara *pin tool* dengan material akan melunakkannya, selanjutnya putaran *pin* akan mengaduknya dan mengisi ruang kosong yang terbentuk secara baik selama proses pengelasan [4]. Namun hasil pengujian pada sudut 1° lebih rendah daripada sudut 0° karena cacat incomplete fusion yang terbentuk lebih besar seperti terlihat pada Gambar 6.b.



Gambar 10. Regangan tarik hasil mikro *friction stir welding* aluminium 1100.

Nilai efisiensi kekuatan tarik hasil pengelasan pada kecepatan *feed rate* 120 mm/menit hanya mencapai 49,42 % dari kekuatan tarik BM, sedangkan pada variasi *feed rate* 66 mm/menit dan 85 mm/menit hanya memiliki efisiensi pengelasan sebesar 22,84 % dan 35,66 %. Hasil pengelasan μ FSW ini lebih baik dari penelitian sebelumnya dengan variasi *feed rate* 30, 50, dan 70 mm/menit, kecepatan putar 10.000 rpm dan sudut kemiringan *tool* 3° yang memiliki efisiensi pengelasan sebesar 33% [11], dan penelitian dengan variasi *feed rate* 30,50 dan 70 mm/menit, kecepatan putar 8.000 rpm dan sudut kemiringan *tool* 2° menghasilkan efisiensi pengelasan sebesar 41,48% [9].

Regangan tarik hasil pengelasan lebih rendah dari regangan tarik base metal seperti terlihat pada Gambar 10. Hal ini menunjukkan bahwa hasil lasan lebih getas daripada base metal aluminium yang bersifat ulet dengan regangan 2,58 %. Semakin besar *feed rate* akan menaikkan regangan hasil lasan (Gambar 11.a). Naiknya nilai regangan pada hasil pengujian berbanding lurus dengan nilai tegangan hasil uji tarik sesuai teori Hukum Hooke. Rendahnya regangan pada sudut kemiringan 1° disebabkan adanya cacat *incomplete fusion* pada sambungan. Cacat disebabkan karena panas pada daerah pengelasan tidak cukup melunakkan material, sehingga pada saat proses *stirring* material pada daerah sambungan mengalami tegangan yang terlalu besar dan menyebabkan terjadinya retakan [13].



Gambar 11. Modulus Elastisitas hasil mikro *friction stir welding* aluminium 1100.

Nilai modulus elastisitas hasil lasan lebih rendah daripada modulus elastisitas *base metal* (BM) namun hanya berselisih sedikit. Peningkatan *feed rate* dan sudut kemiringan *pin tool* akan meningkatkan nilai rata-rata modulus elastisitas. Kenaikan modulus elastisitas pada kenaikan *feed rate* karena rendahnya heat input. Kenaikan modulus elastisitas menunjukkan material semakin getas.

4. KESIMPULAN

Penelitian pengaruh variasi kecepatan *feed rate* dan sudut kemiringan *pin tool* pada proses *micro friction stir welding* (μ FSW) aluminium seri 1100 dapat disimpulkan bahwa :

1. Hasil proses *micro friction stir welding* (μ FSW) terdapat cacat lasan berupa *incomplete fusion*, karena kurangnya *heat input* dan *stirring* pada proses pengelasan sehingga material hanya melunak (tidak sampai lebur) dan tidak teraduk dengan merata serta tidak menempel dengan kuat.
2. Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan daerah *Stir Zone* (SZ) butir partikelnya halus karena struktur material di daerah pengadukan mengalami rekristalisasi akibat adanya panas karena gesekan dan tekanan selama proses pengelasan.
3. Nilai kekerasan pada daerah *stir zone* (SZ) semakin tinggi dengan pertambahannya kecepatan *feed rate* sampai 120 mm/menit dan bertambahnya sudut kemiringan *pin tool* sampai 2°. Kekerasan tertinggi daerah SZ pada *feed rate*

120 mm/menit sebesar 63,83 VHN sedangkan pada 66 mm/menit dan 85 mm/menit sebesar 58,97 VHN dan 59,57 VHN. Pada sudut kemiringan *tool* 2° nilai kekerasan tertinggi sebesar 63,0 VHN, sedangkan pada 0° dan 1° sebesar 58,8 VHN dan 59,6 VHN. Semakin besar sudut kemiringan mengakibatkan kekerasan meningkat karena batas butir atom semakin halus. Semakin besar *feed rate*, heat input semakin rendah maka pendinginannya semakin cepat yang menyebabkan butiran atom semakin kecil dan nilai kekerasannya menjadi tinggi.

4. Semakin besar *feed rate* dan sudut kemiringan *tool* menyebabkan kekuatan tarik hasil pengelasan μ FSW semakin tinggi, namun belum mampu melebihi kekuatan tarik raw material yang sebesar 169,15 MPa. Kekuatan tarik pada *feed rate* 120 mm/min dan sudut kemiringan *tool* 0° sebesar 92,95 MPa dan pada sudut kemiringan 2° sebesar 110,26 MPa, semakin cepat *feed rate* batas butir atom semakin kecil sehingga ikatan antar butiran semakin kuat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Laboratorium Material Teknik Prodi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dan Balai Latihan Kerja (BLK) Surakarta atas dukungan peralatan dan perangkat yang digunakan dalam penelitian ini sehingga dapat selesai dengan baik.

REFERENSI

- [1] Wirjosumarto, H., Okumura, T., Teknologi Pengelasan Logam, Cetakan ke-8, PT. Pradnya Paramita, Jakarta, 1991.
- [2] Helmi, I. dan Tarmizi, "Pengaruh Bentuk *Pin* Terhadap Sifat Mekanik Aluminium 5083 – H112 Hasil Proses *Friction Stir Welding*," Jurnal Riset Teknologi Industri. 2017; Vol. 11, No. 1, pp. 31 –42.
- [3] Zhang, C., Wang, W, Jin, X., Rong, C., and Qin, Z., A Study on *Microstructure* and Mechanical Properties of *Micro Friction Stir Welded* Ultra-Thin Al-1060 Sheets by the *Shoulderless Tool*. MDPI, Metals (2075-4701), 2019; Vol. 9 (5), 507. 1p.
- [4] Tarmizi, Wijaya, F.O., Irfan, Pengaruh Variasi Diameter *Tool Pin* pada *Friction Stir Welding* Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Sambungan Aluminium 6061-T6," Kapal Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan. 2019; Vol. 16, No. 3, pp. 91–99. doi: 10.14710/kapal.v16i3.23280.
- [5] Permana, M.I., Darsin, M., Sumarji, Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Aluminium AA 1100 Hasil Pengelasan *Friction Stir Welding* Dengan Variasi *Feed rate*. TEKNO, ISSN: 1693-8739. 2011; Vol: 16: No. 2, pp: 15-22
- [6] Rahman, M. B. N., Nugroho, A. W. and Wardhana, B.S., Pengaruh *Feed rate* dan Kecepatan Putar *Pin Tool Friction Stir Welding* (FSW) terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan Aluminium 5052, Jurnal Material dan Proses Manufaktur, 2018; Vol. 2, No. 2, pp. 83–95; doi: 10.18196/jmpm.2224.
- [7] Nadda, R., Babal, M., Jalan, N., and Nirala, C.K., *Microfriction stir welding* of AA 6061- T6 thin sheets using in-house developed fixture, Sage Journals (Journal of Micromanufacturing) 2020; Vol. 9, Issue 1; doi: 10.1177/2516598419895837.
- [8] Ahmed, S., Shubhrant, A., Deep, A., & Saha, P. (2015). Development and Analysis of *Butt* and *Lap welds* in *Micro Friction Stir Welding* (μ FSW). 5th International & 26th All India Manufacturing Technology Design and Research Conference (AIMTDR), Aimtdr, Advances in Material Forming and Joining, 1–5.
- [9] Harsanto, Y. dan Mahardika. M. Sifat Mekanik *Micro Friction Stir Welding* pada Plat Alumunium AA 1100 dengan Ketebalan 400 μ m. Prosiding Seminar Nasional Energi & Teknologi (SINERGI) 2017, pp. 292–296, 2019-03-19.
- [10] ASTM. 2010. "Standart Test Methods for Tension Testing of Metallic Material, ASTM E8/E8M-09"
- [11] Riyadi, M.R., Jokosisworo, S., dan Zakki, A.F., Pengaruh RPM dan Diameter *Pin Tool* Terhadap Kekuatan Tarik, Impak, dan Mikrografi Hasil Pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW) Single Side Pada Aluminium 5083, Jurnal Teknik Perkapalan, 2019; Vol. 7, No. 4, pp. 494–503.
- [12] Voort, G.F.V., 2004, ASM Handbook Metallography and *Microstructures*, Vol 9. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v09.9781627081771>
- [13] Joko, R., & Muslim, M., 2019. "Analisa Sifat Mekanis pada Sambungan *Micro Friction Stir Welding* Material Aluminium AA 1100 Dengan Menggunakan Putaran Tinggi". Prosiding Seminar Nasional Energi & Teknologi (SINERGI) Bekasi, 9 Mei 2017, 269- 277.