

***Friction Stir Welding* pada Paduan Aluminium 6061 dan HDPE menggunakan Mesin Frais**

**Widodo Widjaja Basuki^{1*}, Eliata Dumar Ginting², Hoo Bram Natanael Hudaya³, Hadi Sutanto⁴,
Anthon De Fretes⁵, Sandra Octaviani B. Widiarto⁶**

^{1,4}Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

^{2,3,5}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

⁶Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

E-mail: widodo.basuki@atmajaya.ac.id

ABSTRAK

Friction stir welding (FSW) merupakan metode pengelasan fasa padat yang sangat sederhana, murah dan pada prinsipnya hanya memerlukan peralatan untuk memutar pahat dan menggerakkan benda kerja secara translasi. Pada penelitian ini didemonstrasikan bahwa proses FSW paduan aluminium 6061 dan juga polimer *high density polyethylene (HDPE)* dimungkinkan dengan menggunakan mesin frais vertikal, akan tetapi perlu dilakukan modifikasi pada mesin frais tersebut agar memungkinkan untuk mengatur tekanan yang diberikan mesin frais melalui bahu pahat kepada permukaan benda kerja. Disamping itu pada penelitian ini juga dipelajari bahwa untuk setiap material yang dilakukan proses FSW perlu ditentukan parameter set yang tepat yang merupakan kombinasi dari kecepatan putar dan kecepatan makan pahat agar dapat diperoleh hasil pengelasan yang optimal. Kecepatan putar pahat yang terlalu tinggi dapat menyebabkan gaya angkat yang tinggi yang menyebabkan porositas yang besar. Untuk proses FSW HDPE, kecepatan putar pahat yang terlalu tinggi yang tidak diimbangi dengan meningkatnya kecepatan makan akan menyebabkan meningkatnya panas yang berlebihan sehingga menyebabkan cekungan pada permukaan nugget zone.

Kata kunci :

Friction stir welding; Paduan aluminium; Parameter pengelasan; Pengelasan fasa padat; Polimer

ABSTRACT

Friction stir welding (FSW) is a solid-state welding method that is very simple, cheap, and in principle only requires equipment to rotate the tool and move the workpiece translationally. In this research, it was demonstrated that the FSW process of aluminum alloy 6061 and high-density polyethylene (HDPE) polymer is possible using a vertical milling machine, however, modifications need to be made to make it possible to regulate the pressure applied by the milling machine through the tool shoulder to the surface of the workpiece. Apart from that, it was also known that for each material undergoing the FSW process, it is necessary to determine the right parameter set which is a combination of rotational speed and tool feed speed to obtain optimal welding results. Too high a tool rotation speed can cause high lifting forces which can produce large porosity in the workpiece. For the HDPE FSW process, too high a tool rotation speed, which is not balanced with the increase in feed speed will provide excessive heat, causing depressions on the surface of the nugget zone.

Keywords :

Aluminum alloy; Friction stir welding; Polymer; Solid phase welding; Welding parameter

1. PENDAHULUAN

Friction stir welding (FSW) yang diperkenalkan pertama kalinya di Inggris pada tahun 1991 oleh *The Welding Institute (TWI)* adalah merupakan metode pengelasan fasa padat yang sangat sesuai untuk material yang sulit dilakukan pengelasan cair seperti aluminium dan paduannya.

Cara kerja FSW sangat sederhana dimana pahat berbentuk silinder bertingkat yang memiliki pin pemotong dan bahu (*shoulder*) diputar menggunakan mesin dengan kecepatan putar tertentu. Pin pemotong dimasukkan ke dalam antar muka kedua benda kerja yang akan disambungkan hingga bahu yang terus berputar menekan

permukaan benda kerja. Gesekan antar benda kerja dengan bahu akan memanaskan material secara lokal dan melunakkan benda kerja. Pin kemudian digerakkan sepanjang antar muka kedua bahan yang akan dilakukan pengelasan dimana bahu pahat tetap menekan permukaan benda kerja. Pergerakan pin disepanjang benda kerja akan menyebabkan material benda kerja yang berada di bagian depan pahat terpotong dan diaduk dan potongan-potongan material benda kerja tersebut akan terjadi penyambungan kembali saat berada di belakang pahat.

Proses FSW akan menyebabkan struktur mikro material yang berada di daerah dimana proses pemotongan, pengadukan dan penyambungan kembali tersebut terjadi (*nugget zone*) dan di daerah sekitar yang dipengaruhi oleh beban termomekanik (*thermo-mechanically affected zone*, TMAZ) berbeda jauh dengan material dasar (*base material*). Perubahan struktur mikro tersebut akan menyebabkan sifat mekanik di *nugget zone* dan TMAZ juga berbeda dengan material dasar. FSW dapat digunakan untuk melakukan pengelasan material paduan aluminium (misalnya paduan Al-Mg-Si) yang memiliki ukuran kristal yang sangat bervariasi, dari yang sangat kasar hingga pada yang sangat kecil (*ultrafine grains*) [1]. Beberapa studi proses FSW menyebutkan bahwa proses FSW dapat menyempurnakan ukuran kristal material

logam di daerah pengelasan hingga memiliki ukuran yang sangat kecil dengan besaran submikrometer [2-3].

Dikarenakan kesederhanaan proses dan murahannya investasi peralatan yang digunakan, proses FSW disamping untuk pengelasan paduan aluminium juga digunakan untuk penyambungan material lainnya seperti baja [4] dan polimer [5].

Pada penelitian ini dilakukan proses FSW pada paduan aluminium 6061 dan juga pada HDPE menggunakan mesin frais vertikal dengan memvariasikan parameter kecepatan putar dan kecepatan makan pahat. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui apakah mesin frais vertikal yang umum terdapat pada laboratorium proses manufaktur Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya dapat digunakan untuk melakukan proses FSW pada paduan aluminium dan *high density polyethylene* (HDPE) serta untuk mengetahui pengaruh dari kedua parameter tersebut terhadap hasil proses FSW.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Material

Material yang digunakan untuk proses FSW adalah plat paduan aluminium 6061 dan *polimer high density polyethylen* dengan ketebalan 5 mm. Komposisi kimia dari paduan aluminium 6061 dapat dilihat di Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia paduan aluminium 6061 dalam satuan wt.% [6].

	Al	Si	Fe	Cu.	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
min.	Balance	0,40	0,00	0,10	0,00	0,80	0,04	0,00	0,00
max.	Balance	0,80	0,70	0,40	0,15	1,20	0,35	0,25	0,15

2.2 Metode Pengelasan dan Jenis Pahat

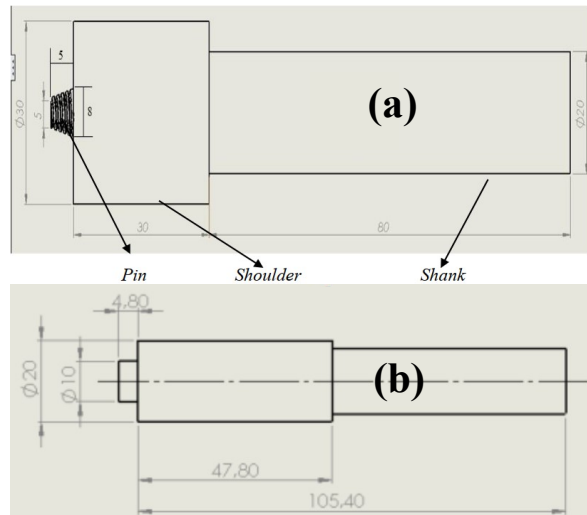
Proses FSW dilakukan dengan meletakkan 2 potongan benda kerja yang terdiri dari material yang sejenis sehingga membentuk antar muka berdampingan. Pengelasan dilakukan sepanjang antar muka yang berdampingan tersebut sejauh 10 cm dengan menggunakan pahat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, dimana pahat yang digunakan untuk proses FSW paduan aluminium 6061 memiliki ulir pemotong

sedangkan untuk HDPE tidak terdapat ulir pemotong.

Proses FSW dilakukan dengan memutar pahat dengan kecepatan putaran yang diinginkan, kemudian memasukkan mata pahat (pin) ke dalam material di posisi antar muka hingga permukaan bahu pahat menekan permukaan benda kerja. Setelah itu proses pengelasan dapat dimulai dengan menggerakkan pahat sepanjang antar muka benda kerja yang berdampingan dengan

kecepatan makan yang diinginkan sambil secara kontinu menekan bahu pahat ke permukaan benda kerja. Proses pengelasan akan berhenti setelah mencapai panjang pengelasan sebesar 10 cm.

Mesin yang digunakan untuk melakukan proses FSW ini adalah mesin frais vertikal yang terdapat di laboratorium proses manufaktur, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya.



Gambar 1. Pahat yang digunakan pada proses FSW untuk pengelasan (a) paduan aluminium 6061 dan (b) HDPE.

2.3 Parameter Proses FSW

Parameter proses FSW yang divariasikan pada penelitian ini adalah kecepatan rotasi pahat dan kecepatan makan pahat.

Tabel 2. Kecepatan rotasi dan kecepatan makan pahat pada proses FSW paduan aluminium 6061 dan HDPE.

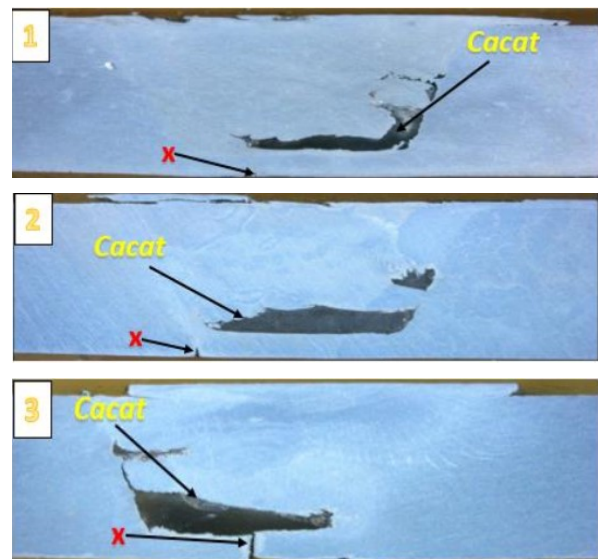
		Kecepatan rotasi pahat (rpm)		
		958	1541	2241
Kecepatan makan pahat (mm/min)	30	HDPE (S1)	HDPE (S4)	HDPE (S7)
	75	Aluminium 6061 / HDPE (S2)	Aluminium 6061 / HDPE (S5)	HDPE (S8)
			Aluminium 6061 / HDPE (S6)	HDPE (S9)
	113	HDPE (S3)		

Kombinasi kecepatan rotasi pahat dengan kecepatan makan pahat untuk paduan aluminium 6061 dan HDPE dapat dilihat di Tabel 2. Untuk proses FSW paduan aluminium 6061 terdapat 3 pasangan kombinasi parameter sehingga terdapat 3 sampel. Sedangkan untuk HDPE terdapat 9 pasangan kombinasi parameter sehingga terdapat 9 sampel yang dinamakan sampel S1 hingga S9 (Tabel 2).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Paduan aluminium 6061

Hasil proses FSW paduan aluminium 6061 dilakukan pemotongan dibagian tengah yakni 5 cm dari titik awal pengelasan. Mikrografi daerah pengelasan ditunjukkan pada Gambar 2, dimana terlihat pengelasan terjadi dengan baik di bagian atas dari daerah *nugget zone*.



Gambar 2. Mikrografi daerah *nugget zone* pada FSW paduan aluminium 6061 dengan parameter kecepatan putar dan kecepatan makan sebagai berikut 1) 958 rpm dan 75 mm/min, 2) 1541 rpm dan 75 mm/min, 3) 1541 rpm dan 113 mm/min.

Akan tetapi terlihat adanya cacat berupa porositas dibagian bawah daerah pengelasan yang dilalui ujung pin. Porositas tersebut terjadi dikarenakan material yang terpotong pada saat pin bergerak maju terangkat naik oleh gaya angkat dari ulir pin. Gaya angkat tersebut tidak dapat diimbangi oleh tekanan dari pundak tool. Semakin besar kecepatan

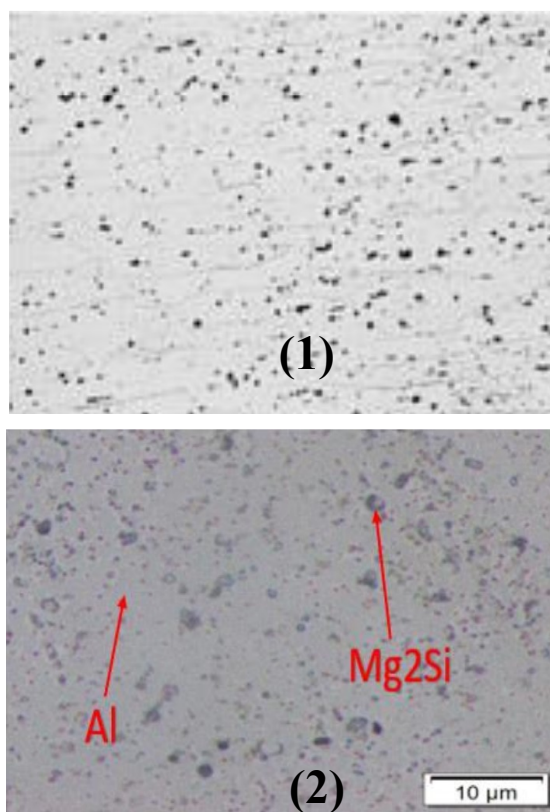
putar dan kecepatan makan maka semakin besar gaya angkat tersebut sehingga menyebabkan porositas yang semakin besar. Ini terlihat di Gambar 2 dimana dengan bertambahnya kecepatan putar dari 958 rpm (Gambar 2(1)) menjadi 1541 rpm (Gambar 2(2)) dan kecepatan makan dari 75 mm/min (Gambar 2(2)) menjadi 113 mm/min (Gambar 2(3)) maka porositas menjadi bertambah besar yang dibarengi dengan semakin banyak material yang terangkat di bagian atas pada *nugget zone*.

Struktur mikro paduan aluminium 6061 yang digunakan sebelum proses FSW terlihat pada Gambar 3 sedangkan struktur mikro material yang dihasilkan setelah proses FSW dengan kecepatan putar dan kecepatan makan yang berbeda-beda dapat dilihat pada Gambar 4-6. Pengujian struktur mikro sebelum proses FSW (material dasar) seperti yang terlihat pada Gambar 3(2) menunjukkan bahwa paduan aluminium 6061 yang digunakan tidak memiliki porositas yang besar dan sesuai dengan standar yang terdapat pada ASM Handbook [7] (Gambar 3(1)), dimana daerah yang berwarna gelap menunjukkan terdapatnya magnesium silisida (Mg_2Si) yang merupakan presipitat yang penting untuk meningkatkan sifat mekanik dari paduan aluminium 6061. Setelah dilakukan proses FSW terlihat bahwa dengan bertambahnya kecepatan putaran dan kecepatan makan pahat, ukuran presipitat Mg_2Si mengecil akan tetapi jumlahnya bertambah banyak di *nugget zone* maupun di TMAZ.

Disamping itu juga terlihat bahwa dengan bertambahnya kecepatan putar dari 958 rpm menjadi 1541 rpm, rongga atau porositas yang terbentuk terutama di TMAZ berkurang drastis, akan tetapi penambahan kecepatan makan dari 75 mm/min menjadi 113 mm/min tidak berpengaruh secara signifikan terhadap porositas.

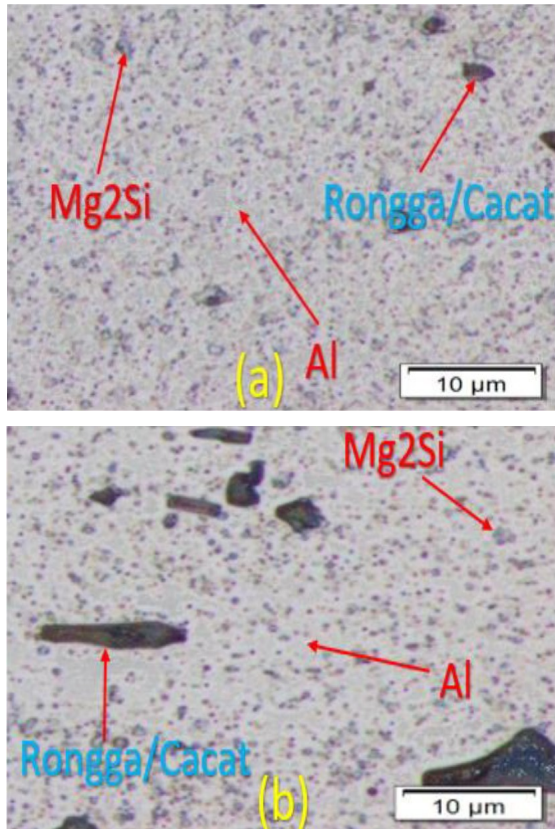
Sifat mekanik material di daerah sekitar proses FSW secara lokal ditentukan dengan uji kekerasan untuk tiga set parameter yang berbeda. Hasil uji kekerasan dari material dasar hingga ke *nugget zone* terlihat pada Gambar 7. Dari ketiga kurva hasil pengujian tersebut terlihat

berkurangnya kekerasan material sebesar 39% yakni dari material dasar yang sekitar 115 HV hingga ke *nugget zone* yang sekitar 70 HV. Penurunan kekerasan material ini bisa disebabkan karena terjadinya rekristalisasi dinamik di *nugget zone* dan TMAZ. Disamping itu porositas yang terbentuk di dalam *nugget zone* dan TMAZ serta di dasar *nugget zone* dapat berkontribusi dalam penurunan kekerasan dari material.

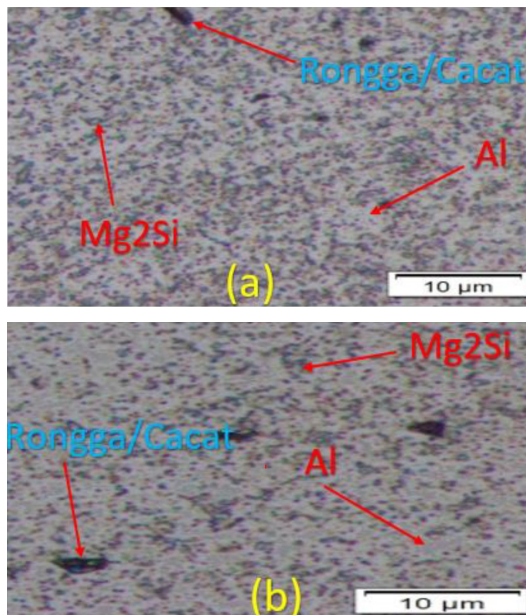


Gambar 3. Struktur mikro paduan aluminium 6061 (1) bersumber dari ASM Handbook [7], (2) material dasar sebelum dilakukan proses FSW.

Pengamatan penurunan kekerasan material dikarenakan proses FSW juga dilaporkan oleh Thomas et al. [8] dan Krasnowski et al. [9] yang menggunakan paduan aluminium 6082 dimana kekerasan berkurang sebesar 35% yakni dari 100 HV di material dasar menjadi 65 HV di daerah *nugget zone*. Penurunan kekerasan pada proses FSW juga diamati oleh Pavol et al. [10] yang melakukan pengujian dengan menggunakan paduan aluminium EN-AW 6005A.

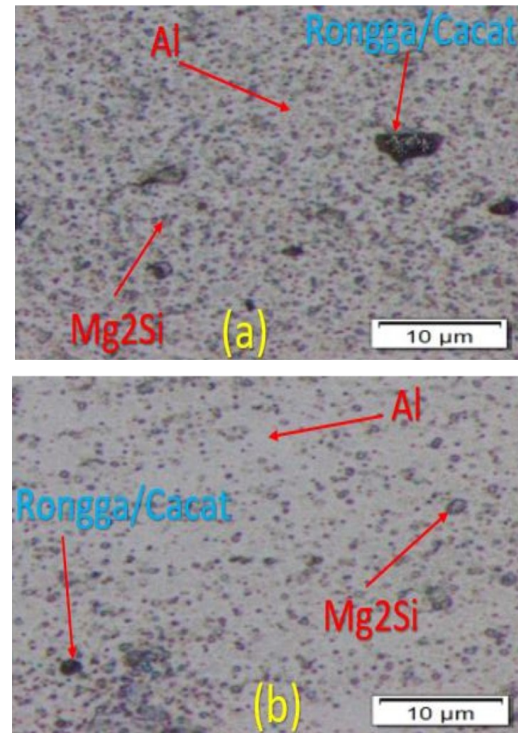


Gambar 4. Struktur mikro pengelasan FSW paduan aluminium 6061 dengan kecepatan putar 958 rpm dan kecepatan makan 75 mm/min, a) *nugget zone*, b) TMAZ.

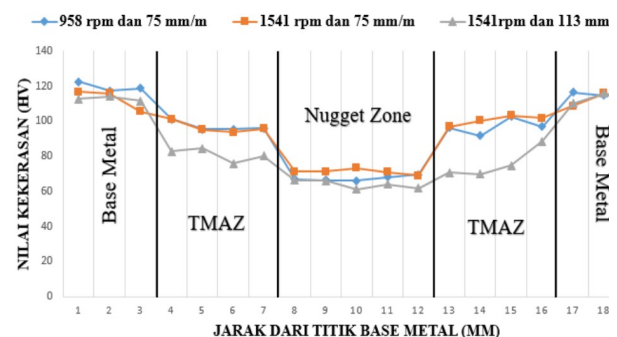


Gambar 5. Struktur mikro pengelasan FSW paduan aluminium 6061 dengan kecepatan putar 1541 rpm dan kecepatan makan 75 mm/min, a) *nugget zone*, b) TMAZ.

Pada percobaannya, Pavol et al. mengamati penurunan kekerasan sebesar 39% yakni dari 90 HV di daerah material dasar menjadi 55 HV di *nugget zone*. Di sini perlu disebutkan bahwa percobaan yang dilakukan oleh Thomas et al., Krasnowski et al. dan Pavol et al. tidak menghasilkan porositas, akan tetapi persentase penurunan kekerasan yang dilaporkan sangat sesuai dengan persentase penurunan kekerasan yang dilakukan pada percobaan ini.



Gambar 6. Struktur mikro pengelasan FSW paduan aluminium 6061 dengan kecepatan putar 1541 rpm dan kecepatan makan 113 mm/min, a) *nugget zone*, b) TMAZ.



Gambar 7. Distribusi kekerasan hasil proses FSW paduan aluminium 6061 dari daerah material dasar (*base metal*) hingga *nugget zone*.

3.2 High density polyethylene (HDPE)

Proses FSW pada polimer HDPE dilakukan dengan dengan memvariasikan 3 kecepatan putar dan 3 kecepatan makan sehingga menghasilkan 9 kombinasi sampel. Hasil pengamatan mikrofotografi pada setiap sampel (S1 hingga S9) di *nugget zone* dan daerah sekitarnya dapat diperhatikan di Gambar 8.

Sampel S1 dilakukan proses FSW dengan kecepatan putar sebesar 958 rpm dan kecepatan makan 30 mm/min. Terdapat cacat permukaan yang terjadi pada sampel ini akibat panas yang terlalu berlebihan ketika pengelasan terjadi. Panas yang berlebih membuat permukaan benda kerja menjadi terlalu lunak, sehingga lelehan material terlalu berlebih, tidak teraduk secara merata dan menumpuk. Solidifikasi yang tidak sempurna dan merata menyebabkan permukaan material menjadi bergelombang. Meskipun memiliki permukaan yang demikian, penyambungan pada sampel ini terjadi sampai pada dasar benda kerja dan tidak ada cacat yang terjadi pada batas pengelasan.

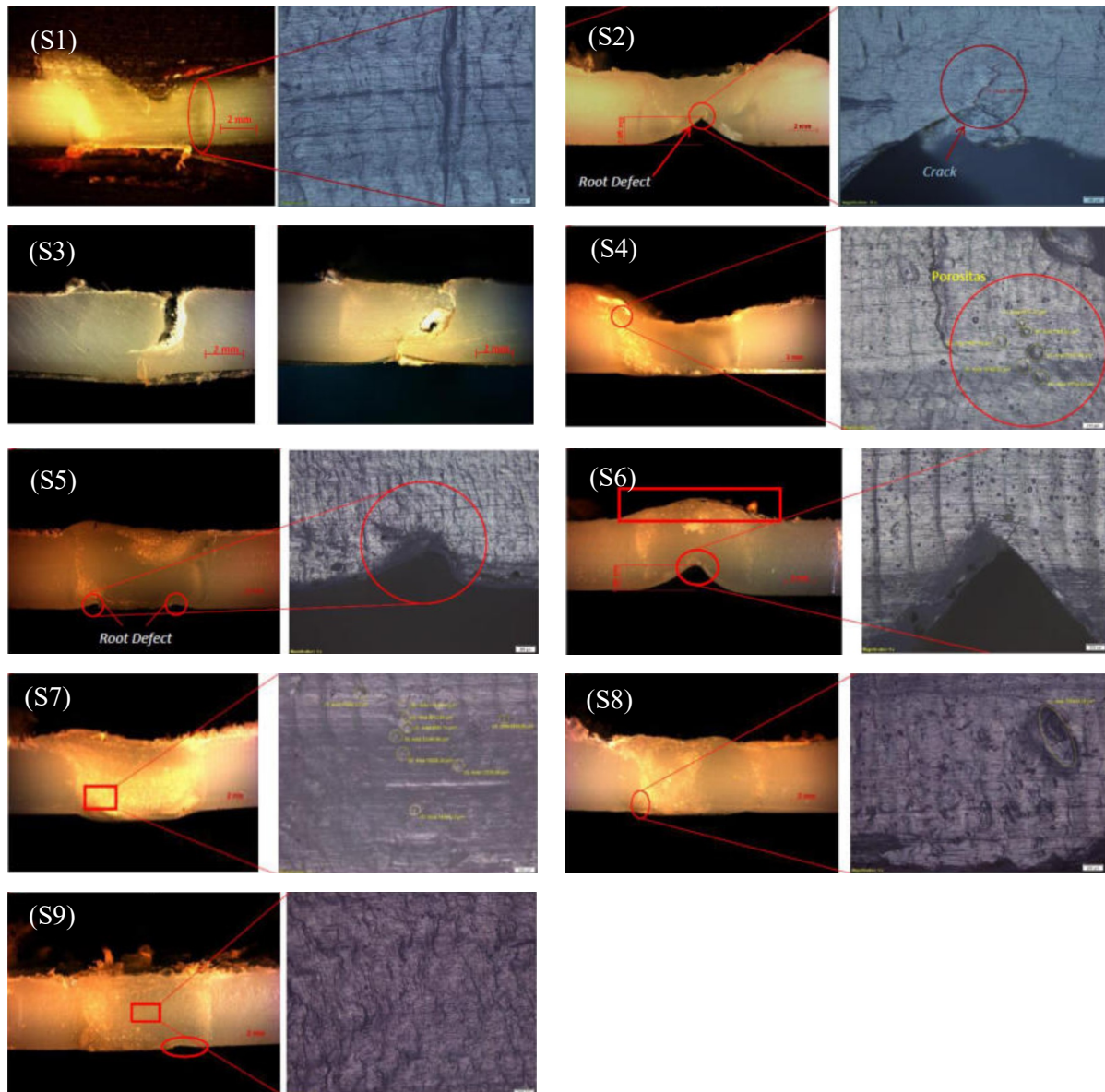
Sampel S2 dilakukan proses FSW dengan kecepatan putar sebesar 958 rpm dan kecepatan makan 75 mm/min. Permukaan yang dihasilkan pada sampel S2 lebih rata dan seragam dibanding sampel S1. Dengan kecepatan makan yang lebih tinggi dari sampel S1, panas yang dihasilkan dari putaran tool menjadi lebih kecil, proses pendinginan dan solidifikasi lebih cepat. Lelehan material yang ada tidak berlebihan dan dapat diratakan oleh tekanan dari bahu.

Meskipun memiliki permukaan yang bagus, kedalaman pengelasan pada sampel ini tidak mencapai dasar benda kerja sehingga menyebabkan adanya *root defect*. Hal ini disebabkan karena panas yang dihasilkan pin saat melakukan pengadukan tidak cukup untuk melunakkan sampai ke dasar benda kerja. *Root defect* ini menyebabkan timbulnya *crack* pada dasar benda kerja.

Sampel S3 dilakukan proses FSW dengan kecepatan putar sebesar 958 rpm dan kecepatan makan 113 mm/min. Sambungan yang dihasilkan pada sampel ini tidak terjadi dengan baik. Hal ini disebabkan karena pengelasan yang dilakukan dengan kecepatan makan terlalu cepat dengan kecepatan putar yang terlalu rendah, sehingga panas yang dihasilkan rendah, lelehan material terlalu sedikit dan solidifikasi yang terjadi terlalu cepat. Pada sampel S3 di Gambar 8 dapat dilihat pada sambungan benda kerja terdapat celah yang semakin membesar dengan bertambahnya jarak pengelasan dimana Gambar sebelah kiri menunjukkan posisi pengelasan yang telah melewati posisi pengelasan yang ditunjukkan pada Gambar sebelah kanan.

Sampel S4 dilakukan proses FSW dengan kecepatan putar sebesar 1541 rpm dan kecepatan makan 30 mm/min. Permukaan sambungan yang dihasilkan bergelombang, disebabkan panas yang dihasilkan terlalu berlebih, namun solidifikasi yang terjadi merata sepanjang jalur pengelasan. Panas yang berlebih membuat material terlalu lunak, sehingga bahu pahat meninggalkan jejak pada bagian jalur pengelasan. Bila dilihat dari potongan penampangnya, panas yang dihasilkan cukup untuk menyambung benda kerja sampai pada dasarnya sehingga tidak ada *root defect*. Terdapat juga lingkaran-lingkaran seperti gelembung seperti pada Gambar sebelah kanannya yang dicurigai sebagai porositas. Hal ini bisa disebabkan karena terlalu banyak lelehan material yang keluar pada material akibat panas yang dihasilkan, sehingga terdapat beberapa bagian yang tidak terisi oleh lelehan material.

Sampel S5 dilakukan proses FSW dengan kecepatan putar sebesar 1541 rpm dan kecepatan makan 75 mm/min. Dibandingkan dengan sampel S4, sampel S5 yang menggunakan kecepatan pengelasan yang lebih tinggi menghasilkan permukaan sambungan yang lebih rata. Meskipun demikian, terdapat *root defect* kecil pada bagian dasar benda kerja seperti ditunjukkan pada Gambar sebelah kanan.



Gambar 8. Hasil proses FSW HDPE dengan parameter S1 – S9.

Hal ini mengindikasikan bahwa panas yang dihasilkan belum dapat menyambung benda kerja secara sempurna pada bagian dasarnya. Pada sampel ini terdapat *root defect* kecil pada kedua sisinya. *Root defect* yang terjadi tidak sebesar pada sampel-sampel sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa panas hampir merata dari permukaan sampai bagian bawah material. Dengan bertambahnya jarak pengelasan, panas pada daerah pengelasan akan semakin merata sehingga pada bagian akhir pengelasan *root defect* tersebut menghilang.

Sampel S6 dilakukan proses FSW dengan kecepatan putar sebesar 1541 rpm dan kecepatan makan 113 mm/min. Permukaan sambungan yang dihasilkan hampir sama dengan permukaan sampel S5, namun memiliki ketinggian yang berbeda sehingga tampak cembung bila dilihat dari potongan penampangnya. Hal tersebut terjadi karena penggunaan kecepatan makan yang tinggi, sehingga lebih banyak material yang terbuang ke bagian belakang tool dan tidak sempat tertekan oleh bahu pahat. *Root defect* di bagian dasar benda kerja juga terlihat pada Gambar sebelah kanan yang

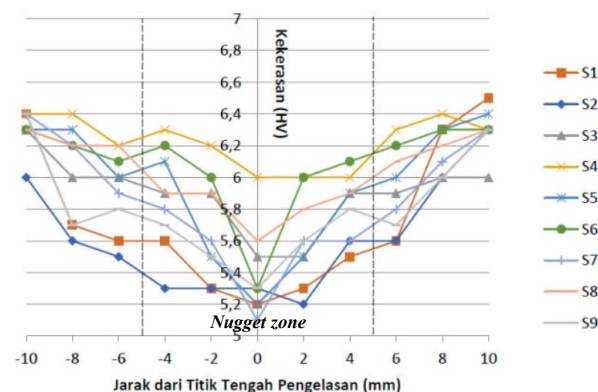
disebabkan kurangnya panas yang dihasilkan pada daerah tersebut. Akan tetapi *root defect* tersebut tidak sampai menimbulkan retakan pada sambungan.

Sampel S7 dilakukan proses FSW dengan kecepatan putar sebesar 2241 rpm dan kecepatan makan 30 mm/min. Permukaan sambungan yang dihasilkan sangat kasar dan bergelombang. Seperti pada sampel S4, terdapat jejak bahu pahat pada permukaan sambungan, namun pada sampel ini jejaknya terlihat lebih jelas dan rapat, mengindikasikan bahwa panas yang dihasilkan juga lebih besar dibanding dengan sampel S4 yang menggunakan kecepatan makan yang sama. Panas yang dihasilkan juga cukup untuk melunakkan dan menyambung benda kerja dari permukaan sampai dasarnya. Meskipun demikian, terdapat juga kemungkinan adanya porositas seperti ditunjukkan pada Gambar di sebelah kanan. Hal ini disebabkan pada kecepatan putar 2241 rpm energi panas yang dihasilkan menyebabkan material terlalu lunak dan banyak lelehan material yang terbuang ke luar.

Sampel S8 dilakukan proses FSW dengan kecepatan putar sebesar 2241 rpm dan kecepatan makan 75 mm/min. Permukaan sambungan yang dihasilkan pada sampel ini juga bergelombang dan kasar. Terdapat jejak bahu pahat pada jalur pengelasan, namun jejak ini tidak serapat dan sebanyak seperti pada sampel S7 karena panas yang dihasilkan berkurang seiring dengan naiknya kecepatan makan yang digunakan. Akan tetapi panas tersebut masih cukup tinggi untuk mencapai kedalaman pengelasan hingga dasar benda kerja seperti yang ditunjukkan pada Gambar sebelah kanan.

Sampel S9 dilakukan proses FSW dengan kecepatan putar sebesar 2241 rpm dan kecepatan makan 113 mm/min. Permukaan sambungan yang dihasilkan bergelombang sama seperti pada sampel S7 dan S8, namun pada sampel ini permukaannya lebih kasar. Masih terdapat sisa-sisa lelehan material pada permukaan disebabkan karena waktu pendinginan dan solidifikasi yang lebih cepat, sehingga

terdapat material yang tidak tersolidifikasi dengan sempurna. Terdapat juga sedikit *root defect* pada bagian dasar benda kerja seperti ditunjukkan pada Gambar sebelah kanan.



Gambar 9. Distribusi kekerasan hasil proses FSW HDPE dari daerah base material hingga *nugget zone*.

Untuk menginvestigasi sifat mekanik hasil proses FSW HDPE, uji keras menggunakan metode Vickers dengan pembebanan sebesar 10 gf dan waktu penekanan selama 15 detik dilakukan pada sampel S1 hingga S9 untuk mengetahui distribusi kekerasan dari material dasar hingga ke *nugget zone*. Distribusi kekerasan sambungan dapat dilihat pada Gambar 9. Dari distribusi kekerasan yang dihasilkan pada semua sampel dapat dilihat bahwa kekerasan berkurang dari material dasar dengan nilai kekerasan tertinggi 6 – 6,4 HV hingga ke *nugget zone* dengan nilai terendah 5,1 – 6 HV. Penurunan kekerasan terbesar adalah sekitar 20%. Hal ini bisa terjadi disebabkan proses FSW yang mengaduk material di *nugget zone* dapat memutuskan rantai polimer sehingga menurunkan berat molekul HDPE terutama di *nugget zone*. Turunnya berat molekul menyebabkan menurunnya kemampuan material di daerah tersebut menahan beban yang diberikan dari luar. Dari 9 sampel yang diuji, sampel S4 (kecepatan putar pahat 1541 rpm dan kecepatan makan 30 mm/min) memiliki kekerasan di *nugget zone* yang tertinggi. Penurunan kekerasan di *nugget zone* untuk sampel S4 adalah hanya sebesar 6,3%. Sedangkan sampel yang memiliki kekerasan kedua tertinggi di *nugget zone* adalah S8 (kecepatan putar pahat 2241 rpm dan

kecepatan makan 75 mm/min) dengan penurunan kekerasan di *nugget zone* sebesar 11,1%. Dari hasil ini dapat diartikan bahwa untuk meningkatkan kecepatan proses FSW dapat dilakukan dengan meningkatkan kecepatan makan pahat akan tetapi harus disesuaikan dengan kecepatan putar pahat agar panas yang dihasilkan cukup untuk menghasilkan pengelasan yang bebas dari *root defect* akan tetapi tidak terlalu tinggi sehingga menyebabkan material di *nugget zone* menjadi sangat lunak yang akan mengakibatkan jejak tekanan bahu pahat sepanjang jalur proses FSW.

Pada penelitian selanjutnya diharapkan dapat melakukan pengukuran terhadap tekanan yang diberikan oleh bahu pahat sehingga dapat mengetahui kehomogenan tekanan selama proses FSW dilakukan.

SIMPULAN

Penelitian proses FSW dengan menggunakan mesin frais yang terdapat pada laboratorium proses manufaktur Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya telah dilakukan untuk melakukan penyambungan paduan aluminium 6061 dan juga polimer HDPE. Hasil penelitian menunjukkan penggunaan mesin frais untuk proses FSW berpotensi untuk memberikan hasil pengelasan yang baik sehingga topik ini perlu dilakukan penelitian lebih lanjut.

Pada penelitian ini juga dipelajari proses pemotongan yang terjadi pada pin pahat dengan mata potong ulir pada proses FSW paduan aluminium 6061 dapat menyebabkan gaya angkat yang tinggi yang menekan pada bahu pahat. Beban tekan yang diberikan oleh mesin frais standar tidak dapat mengimbangi gaya angkat tersebut sehingga menyebabkan bahu pahat terangkat dan terjadinya porositas pada benda kerja di posisi dimana ujung pin pahat terdapat. Semakin besar kecepatan putar maka akan semakin besar juga gaya angkat yang dihasilkan sehingga menyebabkan porositas yang bertambah besar. Pada penelitian ini, parameter set yang terbaik untuk FSW aluminium 6061 adalah berupa kecepatan putar pahat sebesar 1541 rpm dengan kecepatan makan pahat sebesar 75 mm/min.

Untuk proses FSW HDPE, tekanan dari mesin frais standar yang tinggi dapat menyebabkan cekungan di permukaan *nugget zone* apabila kecepatan putar pin terlalu tinggi yang menyebabkan HDPE menjadi terlalu panas dan sangat lunak. Pada penelitian ini, hasil proses FSW HDPE yang terbaik diperoleh dari parameter set yang merupakan kombinasi antara kecepatan putar pahat yang sebesar 2241 rpm dengan kecepatan makan pahat 75 mm/min.

Disamping itu hasil penelitian ini menunjukkan perlunya mendapatkan suatu parameter set yang merupakan kombinasi dari kecepatan putar dan kecepatan makan pahat yang optimal untuk setiap jenis material yang akan dilakukan proses FSW. Hal ini sangat jelas terlihat pada proses FSW HDPE, dimana terlalu tinggi kecepatan makan yang tidak diimbangi dengan kecepatan potong akan menyebabkan kegagalan sambungan antar muka kedua benda kerja dan juga terbentuknya *root defect*. Sedangkan kecepatan putar pahat yang terlalu tinggi yang tidak diimbangi dengan meningkatnya kecepatan makan akan meningkatnya panas yang berlebihan sehingga menyebabkan cekungan pada permukaan *nugget zone* yang merupakan jejak yang ditinggalkan oleh bahu pahat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Lipińska, "Microstructure and mechanical properties of the joints from coarse- and ultrafine-grained Al-Mg-Si alloy obtained via friction stir welding," *Materials*, vol. 16, issue 18, no. 6287, 2023, pp. 1–13, doi: 10.3390/ma16186287.
- [2] M. Sarkari Khorrami, M. Kazeminezhad and A.H. Kokabi, "Microstructure evolutions after friction stir welding of severely deformed aluminum sheets," *Materials & Design*, vol. 40, 2012, pp. 364-372, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.016>.
- [3] Y.S. Sato, Y. Kurihara, S.H.C. Park, H. Kokawa and N. Tsuji, "Friction stir welding of ultrafine-grained Al alloy 1100 produced by accumulative roll-bonding,"

- Scripta Materialia, vol. 50, issue 1, 2004, pp. 57-60, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2003.09.037>.
- [4] D.G. Mohan and C. Wu, "A review on friction stir welding of steels," *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 34, no. 137, pp. 1–29, 2021, doi: <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00655-3>.
- [5] Y. Huang, X. Meng, Y. Xie, L. Wan, Z. Lv, J. Cao and J. Feng, "Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 105, pp. 235–257, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.12.005>.
- [6] Thyssenkrupp, Material data sheet: Aluminium Alloy EN AW-6061, 2018.
- [7] R.H. Stevens, *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures*, ASM International, 2004.
- [8] W.M. Thomas, I.M. Norris, D.G. Staines, P.J. Clarke and N.L. Horrex, "Friction stir welding – variants and process techniques," *The First International Conference 'Joining of Aluminium Structures'*, Moscow, Russian, pp. 1–15, December 3-5, 2007.
- [9] K. Krasnowski, P. Sedek, M. Łomozik and A. Pietras, "Impact of selected FSW process parameters on mechanical properties of 6082-T6 aluminium alloy butt joints," *Archives Of Metallurgy and Materials*, vol. 56, issue 4, pp. 965–973, 2011, doi: [10.2478/v10172-011-0106-9](https://doi.org/10.2478/v10172-011-0106-9).
- [10] S. Pavol, B. Martin and Z. Peter, "Properties of FSW and MIG welded joints of AlSiMg aluminium alloy," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 70, no. 2, pp. 141–152, 2020, doi: [10.2478/scjme-2020-0027](https://doi.org/10.2478/scjme-2020-0027).