

Pengaruh jumlah pass dengan tool offset terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro pada friction stir processing aluminium AA1100 dengan penambahan Zn

Nurul Muhayat^{a,1}, Febry Firmansyah^a, Bambang Kusharjanta^a, Triyono^a, Yemi Kuswardi^b

^aProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, 57126

^bProgram Studi Pendidikan Matematika, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, 57126

¹nurulmuhayat@staff.uns.ac.id

ABSTRACT

Penggunaan Paduan aluminium semakin meningkat pada berbagai industri manufaktur. Hal ini dikarenakan ketahanan korosi yang baik, densitas yang rendah, dan nilai kekuatan spesifik yang tinggi. Namun, aluminium memiliki kekurangan dalam hal kekuatan dan kekerasan bila dibandingkan dengan logam lain seperti besi dan baja. Kekuatan dan kekerasan pada aluminium dengan cara metode pengerasan permukaan yaitu Friction Stir Processing (FSP). FSP adalah salah satu proses solid-state yang digunakan untuk memodifikasi sifat permukaan paduan aluminium yang berbeda. Pada proses ini, Aluminium AA1100 dipadukan dengan bubuk Zn agar dapat meningkatkan kekuatan tarik. Bubuk Zn digunakan sebagai pemadu Paduan aluminium karena mudah menyisip pada atom Al dan bukan termasuk fase intermetalik. Parameter proses yaitu jumlah pass dengan tool offset menjadi salah satu faktor meningkatnya kekuatan tarik spesimen FSP. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh jumlah pass dengan tool offset terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro Aluminium AA1100 dengan pemadu Zn yang diproses dengan metode Friction Stir Processing. Variasi yang digunakan yaitu 1 pass, 2 pass, dan 3 pass. Pengamatan mikrostruktur menunjukkan adanya pengurangan ukuran butir dan Zn pada stir zone menyebar lebih merata. Pengamatan SEM menunjukkan adanya perbedaan bentuk dan ukuran dimple pada setiap variasi. Kekuatan tarik tertinggi sebesar 131 MPa diperoleh pada spesimen Friction Stir Processing variasi 2 pass dengan pemadu Zn.

Keywords: Friction Stir Processing, tool offset, pemadu Zn, kekuatan tarik

Received 2 September 2024; **Presented** 2 Oktober 2024; **Publication** 20 Januari 2025

DOI: 10.71452/590648

PENDAHULUAN

Pada dunia industri militer, transportasi, dan kedirgantaraan telah menjadikan paduan aluminium sebagai kandidat bahan struktural yang menjanjikan [1]. Hal tersebut karena paduan aluminium memiliki nilai modulus spesifik yang tinggi, tahan terhadap korosi, nilai kekuatan spesifik yang tinggi, kepadatan rendah, koefisien termal tinggi, dan konduktivitas listrik yang rendah [2], [3]. Namun, paduan aluminium masih memiliki kekurangan apabila dibandingkan dengan baja yaitu nilai kekuatan tarik dan kekerasan yang masih rendah. Oleh karena itu, sifat mekanis dan sifat fisis dari paduan aluminium perlu ditingkatkan dengan menggunakan modifikasi struktur permukaan material yaitu perlakuan pada permukaan (surface treatment) [4], [5]. Perlakuan pada permukaan (surface treatment) dilakukan dengan cara perlakuan mekanis (mechanical treatment), perlakuan panas (heat treatment), pengerasan permukaan (surface hardening) atau pelapisan material (coating) yang mana akan membuat material mengalami peningkatan kekuatan bahan, ketahanan korosi, ketahanan listrik, dan ketahanan aus [6], [7].

Salah satu metode modifikasi struktur permukaan dan pengerasan permukaan material adalah Friction Stir Processing (FSP) [8]. Friction Stir Processing (FSP) merupakan proses solid-state yang digunakan untuk memodifikasi sifat permukaan paduan aluminium yang berbeda [1]. Friction Stir Processing (FSP) memiliki prinsip kerja yang sama dengan Friction Stir Welding (FSW) yaitu alat berputar melakukan penetrasi ke dalam permukaan plat dan bergerak pada kecepatan yang telah ditentukan dengan membawa material di sekitar plat. Dari proses tersebut menyebabkan timbul panas lokal yang mempengaruhi struktur mikro dan terjadi deformasi plastis. Selain itu, adukan yang terjadi di daerah adukan material menyebabkan rekristalisasi dinamis yang mana mengubah ukuran butir menjadi halus (ultrafine) serta struktur mikro menjadi homogen [9].

Pada metode Friction Stir Processing (FSP) terdapat parameter-parameter yang dapat mempengaruhi sifat mekanik dan struktur mikro suatu benda kerja antara lain travel speed, kecepatan rotasi, dan jumlah pass [10]. Parameter proses dengan variasi kecepatan rotasi yang berbeda dan kecepatan

traverse konstan dapat memengaruhi ukuran butir. Ukuran butir juga dapat memengaruhi sifat mekanik benda kerja FSP. Semakin kasar ukuran butir maka sifat keuletannya semakin besar, sedangkan semakin halus ukuran butir maka sifat keuletannya semakin kecil. Sifat keuletan memengaruhi nilai ultimate strength yang mana semakin kecil sifat ulet maka nilai ultimate strength semakin besar [11].

Salah satu cara yang dapat digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik permukaan aluminium adalah dengan menambahkan partikel padu Zn (zinc). Zn (zinc) adalah logam paduan yang memiliki kelarutan padat tertinggi yang digunakan pada aluminium. Zn memiliki titik leleh 420°C lebih rendah daripada aluminium 660°C yang terjadi pada suhu FSP. Zn memiliki interaksi yang lemah dengan Al sehingga fase intermetalik tidak terbentuk. Pada suhu ruang, sifat keuletan yang tinggi ditunjukkan oleh paduan Al-Zn berbutir halus karena adanya peningkatan geser batas butir yang disebabkan oleh batas butir Al dibasahi Zn [12]. Komposisi Zn pada benda kerja FSP dapat memengaruhi perpanjangan tarik total yaitu memiliki nilai yang lebih besar daripada benda kerja FSP tanpa kandungan Zn. Hal tersebut dikarenakan pada struktur mikro benda kerja FSP dengan Zn ditemukan banyak pita slip di dalam butiran halus seiring dengan meningkatnya kandungan Zn. Meningkatnya pita slip dalam batas butir halus akan menyebabkan penundaan penciutan dan deformasi lokal karena adanya penekanan pembentukan pita geser utama sehingga keuletan meningkat [13].

Jumlah pass merupakan salah satu parameter penting dalam FSP dan dinilai sangat efektif untuk

METODOLOGI

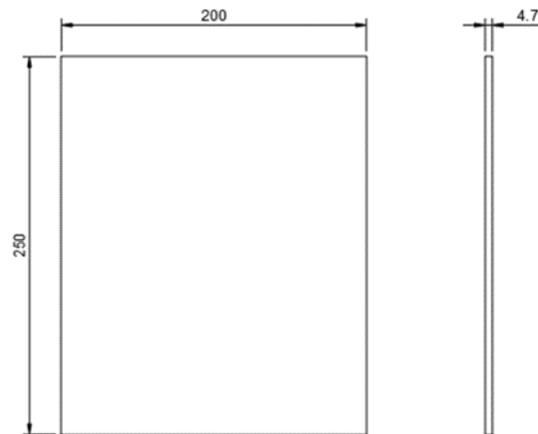
Bahan-bahan yang digunakan dalam melakukan penelitian antara lain: base metal, serbuk Zn, dan tool FSP. Base metal yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan plat aluminium murni (AA1100H14) berukuran 200 mm x 250 mm x 4,7

meningkatkan perilaku mekanik paduan aluminium. Pada proses FSP, peningkatan jumlah pass dapat memengaruhi deformasi plastis parah yang menghasilkan rekristalisasi dinamis sehingga mengubah ukuran butir kasar menjadi halus. Hal tersebut menyebabkan ultimate strength meningkat seiring dengan penyempurnaan ukuran butir pada benda kerja FSP [14].

Strategi pemaduan material lainnya dilakukan dengan cara variasi tool offset. Variasi tool offset yakni dengan mengubah panjang offset pada alat dari titik referensi awal. Tool offset juga berperan penting dalam meningkatkan aliran material dari Advancing Side (AS) ke Retreating Side (RS) yang mampu meningkatkan distribusi partikel padu secara homogen serta mengurangi cacat. Selain itu, tool offset mampu mengoptimalkan pengurangan ukuran butir akibat perubahan letak pin yang membatasi batas butir bergerak sehingga dapat meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan [15].

Berdasarkan uraian di atas, variabel penelitian tentang pengaruh jumlah pass dengan tool offset FSP aluminium dengan partikel padu Zn masih terbatas. Jumlah pass dengan tool offset akan memengaruhi kekuatan tarik dan struktur mikro aluminium AA1100. Sehingga penelitian tentang pengaruh jumlah pass dengan tool offset pada FSP dengan partikel padu Zn perlu dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengkaji tentang proses peningkatan perilaku mekanik berupa kekuatan tarik pada FSP aluminium AA110 dengan jumlah pass dan tool offset dengan penambahan partikel padu Zn dengan jumlah pass sebagai parameter.

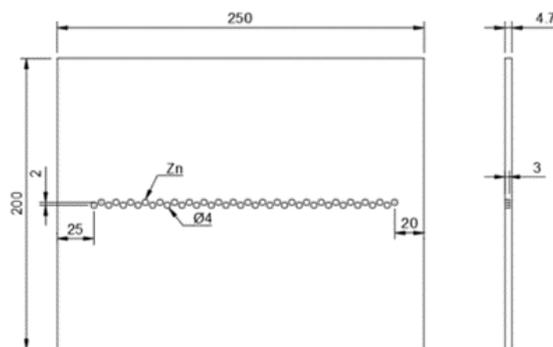
mm. Permukaan Base metal diberi alur berupa lubang zig-zag berada tepat di tengah dengan kedalaman 3 mm. Dimensi bahan penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Dimensi Bahan Penelitian

Plat aluminium AA1100 dipotong dengan menyesuaikan dimensi yang telah ditentukan sebesar 150 mm x 120 mm x 5 mm kemudian plat aluminium dilubangi secara zig-zag dengan endmill berdiameter 12 mm dan kedalaman 2 mm. Setelah

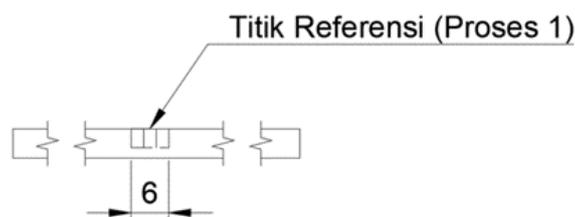
itu, permukaan spesimen dibersihkan dari sisa proses permesinan. Kemudian lubang diberi serbuk Zn sebanyak 37 mm³ seperti ilustrasi pada Gambar 2.



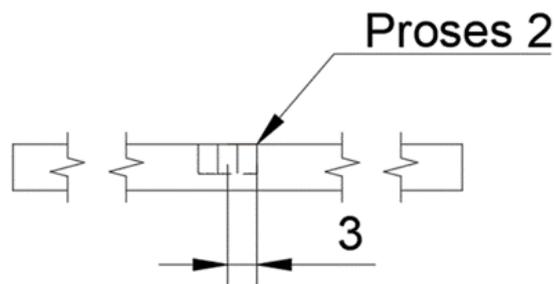
Gambar 2. Ilustrasi Spesimen FSP AA1100 + Zn

Tool melewati alur pada permukaan material dengan variasi 1, 2, dan 3 pass. Pada proses pertama yaitu 1 pass dilakukan pada tool offset 0 mm, sedangkan proses kedua dengan pass kedua dilakukan pada tool offset 3 mm ke arah retreating side (RS) dan proses

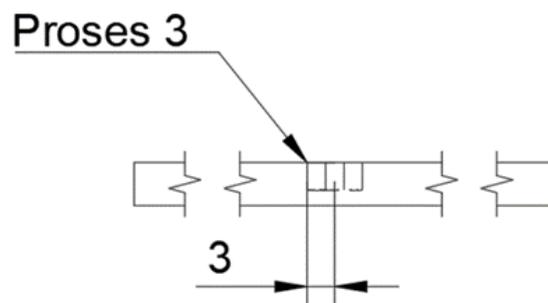
ketiga dengan pass ketiga dilakukan pada tool offset 3 mm ke arah advancing side (AS) yang masing-masing dapat dilihat pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5 serta variabel penelitian dapat dilihat pada Tabel 1



Gambar 3. Proses Pertama Pengerjaan FSP



Gambar 4. Proses Kedua Pengerjaan FSP



Gambar 5. Proses Ketiga Pengerjaan FSP

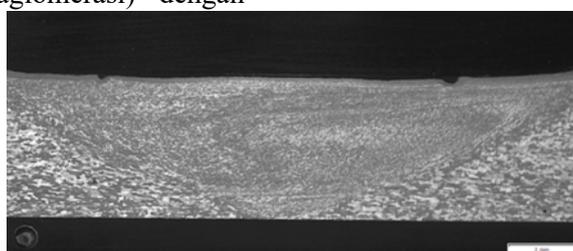
Tabel 1. Variabel Penelitian

No.	Variasi	Kecepatan Rotasi (rpm)	Kecepatan Traverse (mm/min)	Volume Unsur Zn ($V=\pi r^2 t$)	Jumlah Pass
1	BM1	-	-	-	-
2	BM2	3500	30	-	1
3	A1	3500	30	37 mm ³	1
4	A2	3500	30	37 mm ³	2
5	A3	3500	30	37 mm ³	3

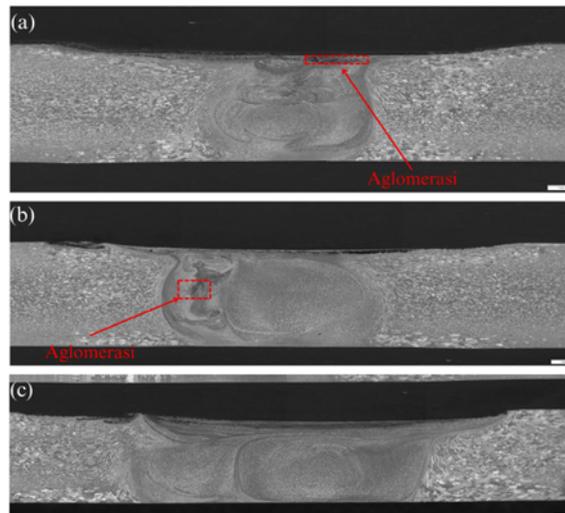
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan struktur makro ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Pengamatan struktur makro ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Dari pengamatan struktur makro di atas didapatkan zona pemrosesan yang terdiri dari stir zone (SZ), thermomechanically affected zone (TMAZ), dan heat affected zone (HAZ). Pada Gambar 6 menunjukkan spesimen FSP tanpa penambahan partikel Zn dan tidak terdapat cacat pemrosesan. Pada Gambar 7 (a), (b), dan (c) ditemukan pengumpulan partikel Zn (aglomerasi) dengan

intensitas yang berbeda-beda. Intensitas aglomerasi Zn dari yang terbanyak hingga terkecil dapat diurutkan dari pass pertama (A1), pass kedua (A2), dan pass ketiga (A3). Pada variasi A1 terdapat pengumpulan partikel Zn dominan di daerah SZ RS dan permukaan RS. Hal tersebut dikarenakan masukan panas saat pemrosesan kurang mencukupi sehingga aliran material dari AS ke RS yang kemudian terakumulasi di RS karena hambatan aliran yang tinggi [15], [16], [17].



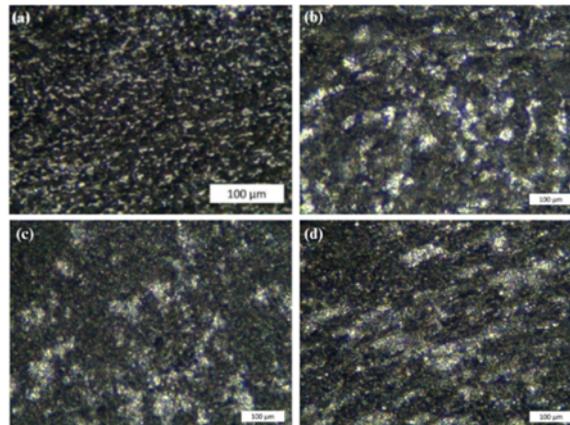
Gambar 6. Foto Uji Makro Spesimen FSP Tanpa Zn



Gambar 7. Foto Uji Makro Variasi Jumlah Pass Dengan Tool Offset (a) 1 Pass, (b) 2 Pass, dan (c) 3 Pass

Pada variasi A2 terdapat pengumpulan partikel Zn di daerah SZ AS. Hal tersebut dapat terjadi yang awalnya terbentuk dari pengumpulan partikel Zn di daerah SZ RS sebelum tool di geser ke arah RS sejauh 3 mm. Pada saat tool digeser ke arah RS

sejauh 3 mm, pengumpulan Zn tersebut tidak dapat dialirkan secara sempurna oleh tool maka material lebih banyak mengalir ke arah AS (aliran asimetris) [15]. Pada variasi A3, tool digeser ke arah RS dan AS masing-masing sejauh 3 mm dari titik awal. Hal



Gambar 8. Daerah SZ Variasi Jumlah Pass Dengan Tool Offset (a) Tanpa Zn, (b) 1 Pass, (c) 2 Pass, dan (d) 3 Pass

tersebut menyebabkan dispersi partikel Zn menjadi homogen karena pengumpulan partikel Zn di daerah RS dan AS dapat menyebar secara merata seiring dengan meningkatnya masukan panas. Namun dengan meningkatnya masukan panas secara berlebihan dapat menyebabkan pertumbuhan ukuran butir menjadi besar [18]. Pertumbuhan ukuran butir tersebut dikonfirmasi oleh pengamatan mikro pada Gambar 8 – Gambar 10 dan SEM pada Gambar 11 – Gambar 14.

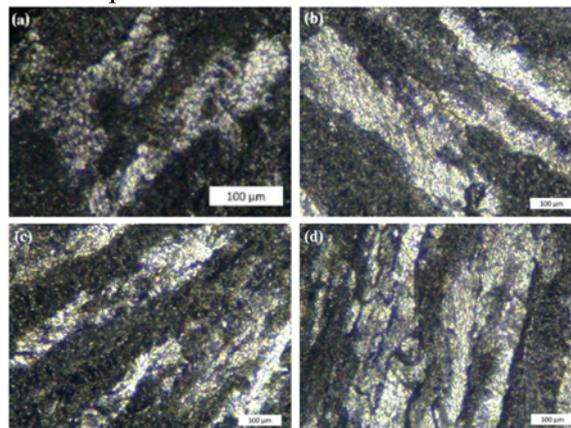
Gambar 8 menunjukkan struktur mikro daerah stir zone (SZ) yang memiliki ukuran butir lebih kecil daripada daerah lain. Pada saat shoulder melakukan penetrasi dengan berputar kemudian bergerak transversal, area yang dilewati oleh shoulder akan mengalami deformasi. Selain itu, gerakan shoulder

menimbulkan panas sehingga terjadi proses rekristalisasi dinamis sehingga butir-butir menjadi kecil [9]. Hal tersebut menyebabkan daerah SZ menerima perlakuan panas yang membuat butir equiaxed berorientasi kristal dengan memiliki panjang sumbu yang sama [19]. Penambahan Zn pada saat pemrosesan dapat mempengaruhi ikatan dengan aluminium seiring dengan meningkatnya deformasi plastis. Partikel Zn ketika berinteraksi langsung dengan aluminium akan membentuk solid solution. Pada SZ diduga partikel Zn yang tersebar pada aluminium digambarkan dengan titik-titik gelap [12]. Akan tetapi, ukuran butir pada SZ memiliki perbedaan di setiap variasi. Hal tersebut karena perlakuan yang diberikan pada setiap variasi mempengaruhi heat input. Heat input sangat

mempengaruhi ukuran butir pada bahan olahan [20]. Hal tersebut terjadi seperti pada variasi 1 pass, 2 pass, dan 3 pass.

Pada variasi 1 pass terjadi kekurangan heat input sehingga pengurangan ukuran butir belum maksimal. Pada variasi 2 pass, terjadi penambahan heat input sehingga ukuran butir mengecil yang ditandai dengan adanya peningkatan jumlah batas butir. Pada variasi 3 pass, terjadi heat input berlebihan yang ditunjukkan oleh adanya butiran yang kasar. Fenomena yang terjadi pada variasi 3 pass sesuai

dengan penelitian sebelumnya bahwa butiran yang lebih kasar terjadi karena heat input yang terlalu tinggi [21]. Heat input yang terlalu tinggi pada variasi 3 pass karena perlakuan arah pemrosesan searah dengan variasi 1 pass yang tumpang tindih dan tool digeser kearah AS (Advancing Side). Seperti yang diketahui, AS memiliki temperatur yang lebih tinggi daripada temperatur di RS (Retreating Side) sehingga pada variasi 3 pass terjadi penumpukkan panas yang menyebabkan heat input terlalu tinggi [22].



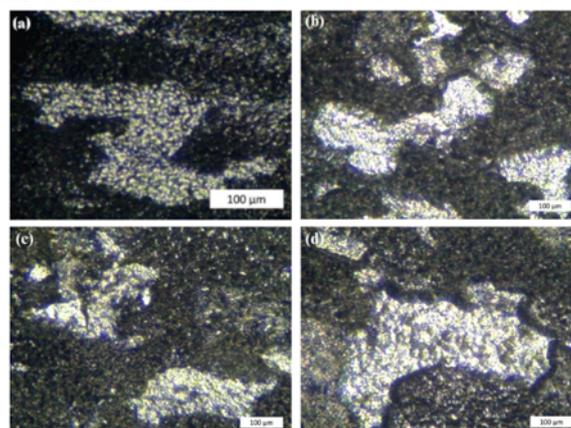
Gambar 9. Daerah TMAZ Variasi Jumlah Pass Dengan Tool Offset (a) Tanpa Zn, (b) 1 Pass, (c) 2 Pass, dan (d) 3 Pass

Gambar 9 menunjukkan daerah TMAZ pada setiap variasi penelitian. Daerah TMAZ adalah daerah yang memiliki ukuran butir yang lebih besar daripada SZ dan cenderung memanjang karena daerah TMAZ mengalami pemanasan akibat proses stirring. Gesekan tool pada benda kerja mengalami efek panas dan deformasi yang timbul tidak sebesar deformasi plastis pada SZ. TMAZ memiliki orientasi butiran yang memanjang didapatkan dari arah aliran material yang diaduk oleh tool [23], [24].

Pada Gambar 9 (b) sampai (d) menunjukkan TMAZ pada variasi pass yang mana tidak terlihat adanya perbedaan signifikan struktur. Hal tersebut

dikarenakan TMAZ yang terbentuk pada pass sebelumnya akan hilang terkena efek tool offset. Orientasi butir pada TMAZ membentuk sesuai arah aliran adukan material [15].

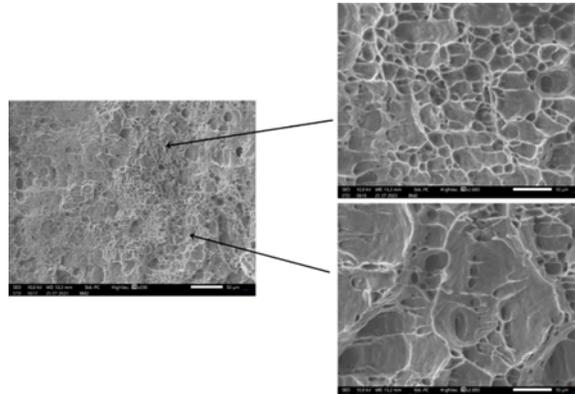
Gambar 10 menunjukkan HAZ pada setiap variasi. Daerah HAZ merupakan daerah yang paling besar menerima energi panas saat proses berlangsung namun tidak mengalami deformasi plastis [25]. Energi panas tersebut dihasilkan oleh proses stirring dari kecepatan putar tool yang menyebabkan ukuran butir tampak lebih besar daripada base metal, daerah SZ, dan daerah TMAZ.



Gambar 10. Daerah HAZ Variasi Jumlah Pass Dengan Tool Offset (a) Tanpa Zn, (b) 1 Pass, (c) 2 Pass, dan (d) 3 Pass

Pengaruh dari perbedaan jumlah pass menyebabkan ukuran butir pada setiap variasi berbeda [26]. Terlihat variasi BM2 dan A1 memiliki ukuran butir lebih kecil daripada A2 dan A3. Variasi A3 memiliki ukuran butir yang lebih besar daripada BM2, A1, dan A2. Pada daerah HAZ juga tidak ada difusi antara Aluminium dan Zn karena tidak terkena partikel Zn [27].

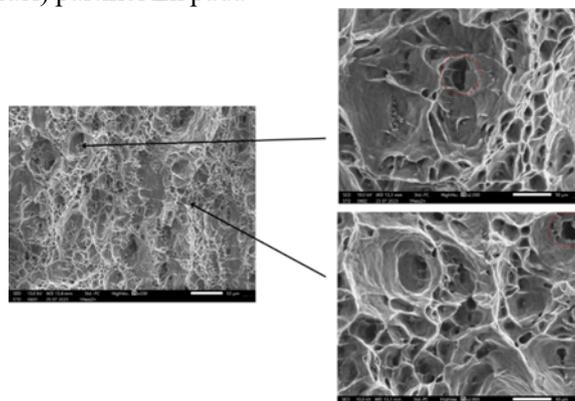
Pengamatan SEM pada permukaan patahan uji tarik variasi 1 pass tanpa partikel Zn dapat diamati pada Gambar 11. Hasil SEM tersebut menunjukkan adanya sedikit rongga. Rongga yang sedikit diakibatkan perlakuan yang diberikan berupa FSP 1 pass sehingga tidak mengalami perubahan yang signifikan pada struktur mikro [26].



Gambar 11. SEM Permukaan Patahan Uji Tarik Base Metal FSP Tanpa Zn

Hasil SEM permukaan patahan uji tarik pada variasi 1 pass dengan penambahan partikel Zn dapat diamati pada Gambar 12. Gambar 12 menunjukkan dimple yang besar dan dalam. Rongga yang besar dan dalam menunjukkan deformasi yang tinggi sebelum material mengalami patah [11]. Selain itu, terdapat pengumpulan (aglomerasi) partikel Zn pada

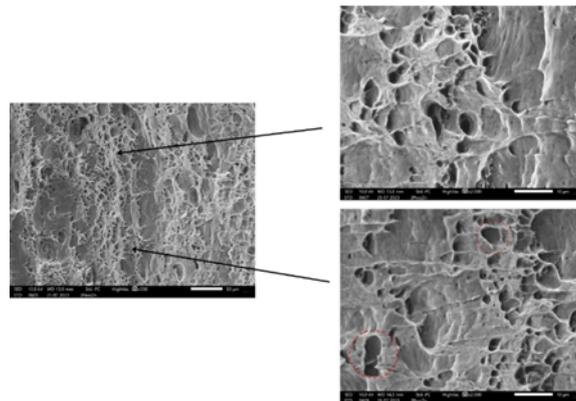
beberapa titik yang berpotensi menciptakan konsentrasi tegangan besar dan tidak dapat menahan beban menyebabkan material mudah patah. Permasalahan tersebut dapat menjadi faktor dari penurunan keuletan material dan kekuatan material FSP [28].



Gambar 12. SEM Permukaan Patahan Uji Tarik Variasi 1 Pass + Zn

Hasil SEM permukaan patahan uji tarik pada variasi 2 pass dengan penambahan partikel Zn dapat diamati pada Gambar 13. Gambar 13 menunjukkan adanya pengurangan ukuran dimple menjadi lebih kecil dan dangkal. Hal tersebut dikarenakan oleh proses pengadukan yang berulang. Selain itu, perlakuan tool offset dapat mengurangi terjadinya aglomerasi partikel Zn [29]. Pada saat material

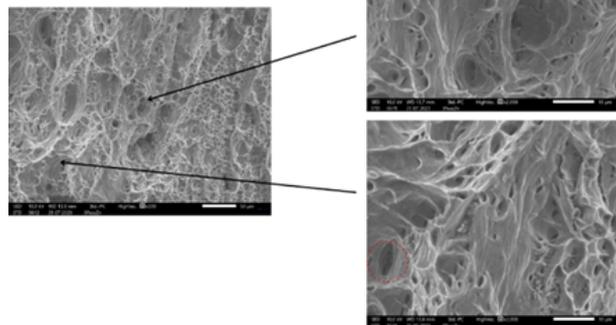
mengalami patah, butiran yang tertarik akan meninggalkan dimple yang nantinya dapat dianalisis bahwa dimple menjadi rapat seiring dengan pengurangan ukuran butir [29]. Seperti yang dijelaskan sebelumnya, pengurangan ukuran butir dipengaruhi oleh heat input yang dihasilkan oleh parameter yang digunakan.



Gambar 13. SEM Permukaan Patahan Uji Tarik Variasi 2 Pass + Zn pada FSP

Hasil SEM permukaan patahan uji tarik pada variasi 3 pass dengan penambahan partikel Zn dapat diamati pada Gambar 14. Gambar 14 menunjukkan adanya dimple yang merenggang dan sangat dalam. Hal tersebut dikarenakan adanya fenomena pertumbuhan ukuran butir menjadi lebih besar

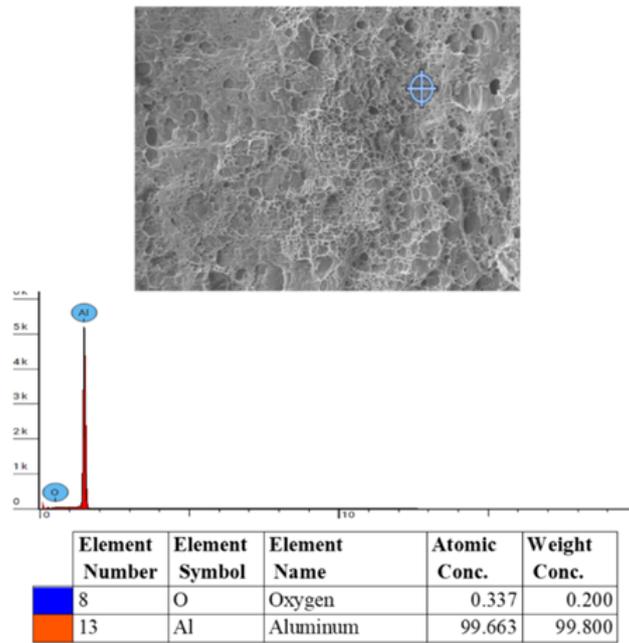
sehingga pada saat material mengalami patah, butiran besar yang tertarik akan meninggalkan bekas berupa dimple yang sesuai dengan ukuran butir. Meskipun pada variasi ini sangat sedikit aglomerasi namun perlakuan yang diberikan mampu mempengaruhi heat input yang dihasilkan [22].



Gambar 14. SEM Permukaan Patahan Uji Tarik Variasi 3 Pass + Zn pada FSP

Gambar 15 menunjukkan hasil pengamatan EDX material tanpa Zn. Pengamatan dilakukan pada patahan uji tarik. Hasil yang didapat yaitu tidak

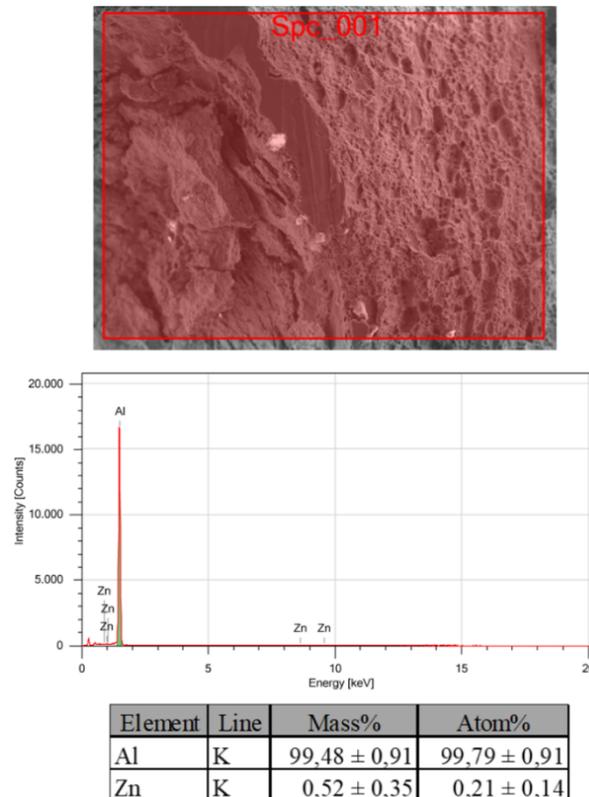
adanya kandungan Zn. Terbukti dengan adanya kandungan Al sebesar 99.663% dan O sebesar 0,337% [30].



Gambar 15. Hasil Uji EDX Patahan Uji Tarik Base Metal Tanpa Zn

Hasil pengamatan EDX variasi 1 pass dengan penambahan Zn dapat diamati pada Gambar 16. Pengamatan dilakukan pada patahan uji tarik, didapatkan presentase kandungan yaitu Al dan Zn yang masing-masing sebesar 99,79% dan 0,21%.

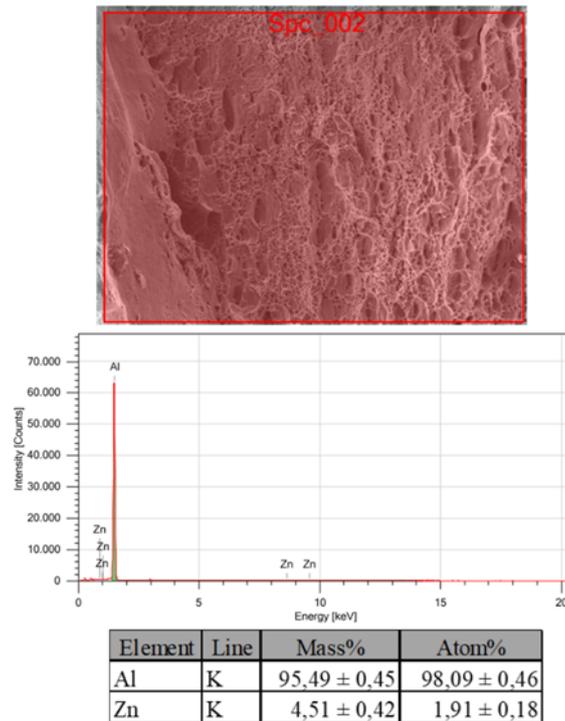
Kandungan Zn yang sedikit menyebabkan sedikitnya partikel Zn yang berikatan dengan aluminium sehingga didapatkan ukuran dimple yang besar dan dalam [28].



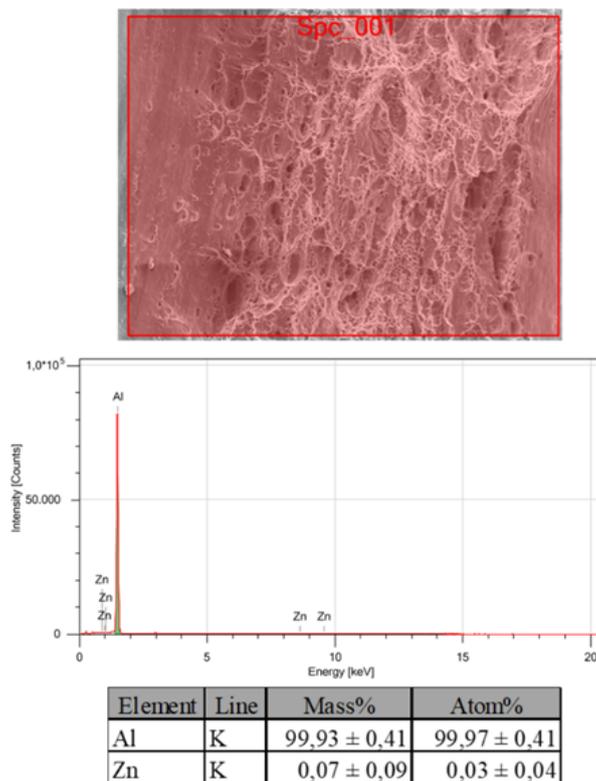
Gambar 16. Hasil Uji EDX Patahan Uji Tarik Variasi 1 Pass + Zn

Hasil pengamatan EDX variasi 2 pass dengan penambahan Zn dapat diamati pada Gambar 17. Pengamatan dilakukan pada patahan uji tarik, didapatkan presentase kandungan yaitu Al dan Zn yang masing-masing sebesar 98,09% dan 1,91%. Pada variasi ini memiliki kandungan Zn tertinggi

daripada variasi jumlah pass Zn lainnya. Hal ini berbanding lurus dengan hasil uji SEM morfologi variasi 2 pass yang menunjukkan adanya dimple berukuran lebih kecil dan dangkal [28]. Partikel Zn dan Al dapat berikatan lebih baik daripada variasi pass yang lainnya.



Gambar 17. Hasil Uji EDX Patahan Uji Tarik Variasi 2 Pass + Zn

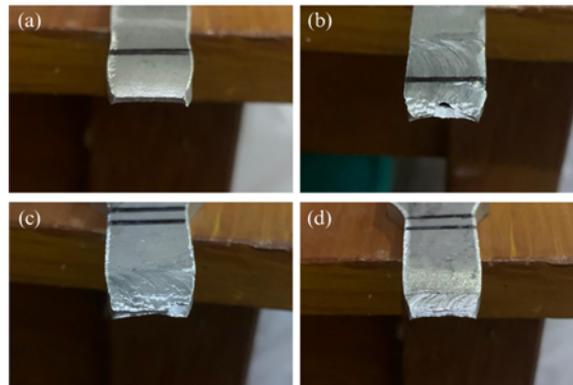


Gambar 18. Hasil Uji EDX Patahan Uji Tarik Variasi 3

Pass + Zn

Hasil pengamatan EDX variasi 3 pass dengan penambahan Zn dapat diamati pada Gambar 18. Pengamatan dilakukan pada patahan uji tarik, didapatkan presentase kandungan yaitu Al dan Zn yang masing-masing sebesar 99,97% dan 0,03%. Kandungan Zn yang sangat sedikit menyebabkan sedikitnya partikel Zn yang berikatan dengan aluminium sehingga didapatkan ukuran dimple yang lebih besar dan sangat dalam [28].

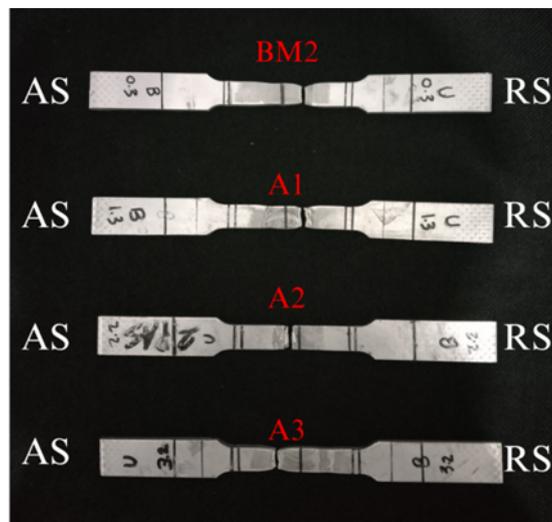
Pengujian tarik akan menghasilkan data kekuatan tarik dan elongasi. Material yang patah, akan memperlihatkan permukaan patah (surface crack) yang dapat dilihat dari foto struktur dengan kamera. Foto struktur kamera pada permukaan patah yaitu dengan meletakkan material di meja yang presisi. Permukaan patah pada setiap variasi ditunjukkan pada Gambar 19.



Gambar 19. Muka Patahan Uji Tarik (a) Tanpa Zn, (b) 1 Pass, (c) 2 Pass, dan (d) 3 Pass

Patahan yang terjadi pada keempat variasi yaitu cone (patahan ulet). Hal tersebut dikarenakan sebelum terjadi patah, material mengalami proses necking (pengecilan penampang) dari deformasi statik akibat beban tarik aksial sehingga patahan terjadi di ujung membentuk kontur yang tertarik dan

tajam [31]. Patah biasanya terjadi karena beberapa tahap, seperti necking, pembentukan rongga kecil, pembesaran rongga menjadi satu rongga, atau retak tegak lurus dengan gaya yang bekerja. Pada akhirnya, retak menjalar sampai terjadi patahan dan bentuk patah ulet yang umum pada spesimen [32].



Gambar 20. Spesimen Uji Tarik Setelah Patah

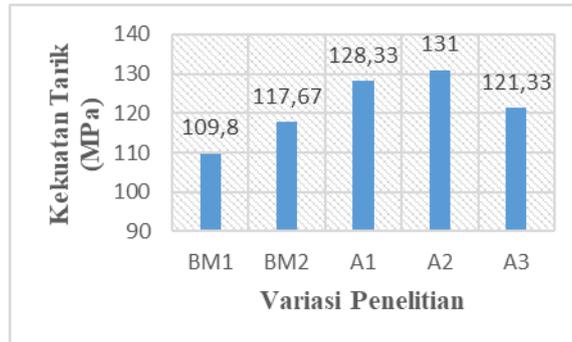
Gambar 20 menunjukkan hasil patahan di weld metal setelah dilakukan pengujian tarik pada keempat spesimen. Pada proses pengadukan pin yang berlangsung di weld metal akan timbul heat input yang mempengaruhi kekuatan tarik spesimen

[32]. Spesimen dengan heat input yang lebih besar akan mendinginkan lebih lambat daripada spesimen dengan heat input yang kecil. Kekuatan tarik yang besar memiliki patahan yang letaknya menjauhi pusat weld metal. Hal tersebut sesuai dengan yang

dialami oleh spesimen variasi A2 yang memiliki kekuatan paling baik daripada variasi yang lain [32].

Gambar 21 merupakan grafik kekuatan tarik yang menunjukkan perbandingan kekuatan tarik keempat variasi. Variasi yang digunakan antara lain: base metal tanpa FSP (BM1); base metal dengan FSP 1 pass tanpa pepadu Zn (BM2); dan pepadu Zn dengan variasi 1 pass (A1); 2 pass (A2), dan 3 pass (A3). Kekuatan tarik Aluminium AA1100 tanpa

FSP (BM1) sebesar 109,8 MPa sedangkan kekuatan tarik maksimal Aluminium AA1100 dengan FSP 1 pass tanpa pepadu Zn (BM2) sebesar 117,67 MPa. Dapat dilihat bahwa kekuatan tarik BM2 lebih besar daripada BM1 karena adanya proses pengadukan gesekan oleh tool saat proses FSP. Hal tersebut menyebabkan adanya proses penyempurnaan butir dari proses rekristalisasi dinamis. Penyempurnaan butir membuat ukuran butir berkurang sehingga mencegah terjadinya dislokasi [9], [33], [34].



Gambar 21. Grafik Kekuatan Tarik Spesimen FSP Jumlah Pass Dengan Tool Offset

masing-masing sebesar 117,67 MPa dan 128,33 MPa. Dapat dilihat perbedaan kekuatan tarik pada variasi BM2 dan A1. Hal tersebut karena pada variasi A1 terdapat kandungan partikel Zn. Partikel Zn memiliki pengaruh penting dalam meningkatkan kekuatan tarik material friction stir processing. Pada saat pemrosesan berlangsung, Zn berdifusi dengan Al membentuk wujud Al-Zn [29]. Hubungan Al-Zn bukan termasuk fase intermetalik melainkan solid solution [35]. Ketika Al dan Zn teraduk secara homogen, Zn akan menyisip pada celah-celah atom Al karena ukuran atom Zn lebih kecil sehingga terjadi pepaduan solid solution interstitial [12]. Atom Zn yang sudah menyisip ke celah-celah atom Al sudah tidak dapat bergerak lagi karena adanya proses pendinginan [36]. Selain itu pada hasil penelitian dari FSP Al-Zn, FSP Al-Zn memiliki kekuatan tarik lebih tinggi daripada logam dasar aluminium. Hal tersebut karena Zn mampu menunda penciutan akibat pembentukan pita geser utama sehingga kekuatan meningkat [13].

Pada variasi A1, A2, dan A3 didapatkan kekuatan tarik masing-masing sebesar 128,33 MPa, 131 MPa, dan 121,33 MPa. Kekuatan tarik aluminium AA1100 yang diberi pepadu Zn dengan FSP dapat diurutkan nilai tertinggi hingga terkecil yaitu A2, A1, dan A3. Kekuatan tarik pada variasi A2 dipengaruhi oleh pengurangan aglomerasi akibat jumlah pass dengan tool offset [37]. Kekuatan tarik pada variasi A1 dipengaruhi oleh adanya aglomerasi di beberapa titik yang telah di konfirmasi oleh hasil SEM. Hal tersebut dikarenakan kurangnya tool dalam

mendistribusikan partikel Zn secara merata sehingga kekuatan tarik belum maksimal [37].

Pada grafik kekuatan tarik A2 ke A3 terjadi penurunan. Penurunan kekuatan tarik disebabkan oleh adanya heat input yang berlebihan sehingga ukuran butir menjadi kasar [21]. Hasil SEM juga mengkonfirmasi bahwa ukuran dimple pada variasi A3 memiliki ukuran lebih besar dan sangat dalam. Fenomena yang terjadi pada variasi A3 ini bisa dikatakan dengan embrittlement atau hilangnya daktilitas tarik pada material dan berpotensi adanya transisi ulet ke rapuh sehingga mengurangi kekuatan tarik [21]. Fenomena kekuatan tarik yang terjadi pada setiap variasi penelitian ini tidak terlepas dari ukuran butir dan morfologi patahan yang dipengaruhi oleh heat input dan laju deformasi yang dihasilkan [38].

KESIMPULAN

didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemilihan jumlah pass dengan tool offset yang tepat dapat meningkatkan kekuatan tarik material aluminium AA1100 dengan pepadu Zn. Kekuatan tarik tertinggi pada variasi A2 sebesar 131 MPa dan terendah pada variasi A3 sebesar 121,33 MPa. Peningkatan kekuatan tarik disebabkan oleh berkurangnya cacat seiring dengan partikel Zn tersebar merata.
2. Pemilihan jumlah pass dengan tool offset sangat mempengaruhi produksi heat input yang diterima oleh material. Heat input dapat

mempengaruhi evolusi ukuran butir dan morfologi patahan pada FSP aluminium AA1100 dengan pepadu Zn.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Rektor Universitas Sebelas Maret atas Skema penelitian Hibah Kolaborasi Mitrasmart dana PNPB dengan kontrak No: 196.2/UN27.22/PT.01.03/2024

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Khodabakhshi, A. Simchi, and A. H. Kokabi, "Surface modifications of an aluminum-magnesium alloy through reactive stir friction processing with titanium oxide nanoparticles for enhanced sliding wear resistance," *Surf Coat Technol*, vol. 309, pp. 114–123, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.11.060.
- [2] X. Yang, Z. Yan, P. Dong, B. Cheng, J. Zhang, T. Zhang, H. Zhang, W. Wang, "Surface modification of aluminum alloy by incorporation of AlCoCrFeNi high entropy alloy particles via underwater friction stir processing," *Surf Coat Technol*, vol. 385, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125438.
- [3] N. M. Siddesh Kumar, M. Sadashiva, J. Monica, and S. Praveen Kumar, "Investigation on Corrosion Behaviour of Hybrid Aluminium Metal Matrix Composite Welded by Friction Stir Welding," in *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 52, pp. 2339–2344. doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.362.
- [4] R. S. Mishra, M. W. Mahoney, S. X. Mcfadden, N. A. Mara, and A. K. Mukherjee, "High Strain Rate Superplasticity In A Friction Stir Processed 7075 Al Alloy," 2000. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/scriptamat.
- [5] Z. Y. Ma, S. R. Sharma, and R. S. Mishra, "Microstructural modification of As-cast Al-Si-Mg alloy by friction stir processing," *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci*, vol. 37, no. 11, pp. 3323–3336, Nov. 2006, doi: 10.1007/BF02586167.
- [6] Sina. Ebnesajjad and C. F. Ebnesajjad, *Surface treatment of materials for adhesion bonding*, second edition. William Andrew, 2014.
- [7] I. Charit and R. S. Mishra, "Effect of friction stir processed microstructure on tensile properties of an Al-Zn-Mg-Sc alloy upon subsequent aging heat treatment," *J Mater Sci Technol*, vol. 34, no. 1, pp. 214–218, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jmst.2017.10.021.
- [8] U. Uknowledge and B. M. Darras, "Experimental And Analytical Study Of Friction Stir Experimental And Analytical Study Of Friction Stir Processing Processing," 2005. [Online]. Available: https://uknowledge.uky.edu/gradschool_the_ses/353.
- [9] P. Vijayavel, I. Rajkumar, and T. Sundararajan, "Surface characteristics modification of Im25 aluminum alloy – 5% sic particulate metal matrix composites by friction stir processing," *Metal Powder Report*, vol. 76, no. 3, pp. 140–151, May 2021, doi: 10.1016/j.mprp.2021.02.001.
- [10] M. K. A.R. Eivani, S. H. Seyedein, and H. R. Jafarian, "The effect of multi-pass friction stir processing on microstructure and mechanical properties of dual-phase brass alloy," *Journal of Materials Research and Technology*, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.09.069.
- [11] A. Suri, A. Sahai, K. H. Raj, and N. K. Gupta, "Impact and Tensile testing of Al2024 Alloy Processed by Friction Stir Processing," in *Procedia Engineering*, 2017, vol. 173, pp. 679–685. doi: 10.1016/j.proeng.2016.12.145.
- [12] D. Yadav, R. Bauri, and N. Chawake, "Fabrication of Al-Zn solid solution via friction stir processing," *Mater Charact*, vol. 136, pp. 221–228, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.matchar.2017.12.022.
- [13] C. M. Hu, C. M. Lai, P. W. Kao, N. J. Ho, and J. C. Huang, "Solute-enhanced tensile ductility of ultrafine-grained Al-Zn alloy fabricated by friction stir processing," *Scr Mater*, vol. 60, no. 8, pp. 639–642, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.scriptamat.2008.12.031.
- [14] A. Adetunla and E. T. Akinlabi, "Investigating the effects of process parameters on the mechanical integrity of friction stir processed aluminium alloy," in *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 44, pp. 1238–1242. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.247.
- [15] V. Bikkina, S. R. Talasila, and K. Adepu,

- “Investigating the effects of tool offset distance and SiC particles on microstructural and mechanical properties of AA6082/SiC composites via friction stir processing,” *Mater Today Proc*, vol. 59, pp. 233–239, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.102.
- [16] A. Sharma, V. M. Sharma, and J. Paul, “Fabrication of bulk aluminum-graphene nanocomposite through friction stir alloying,” *J Compos Mater*, vol. 54, no. 1, pp. 45–60, Jan. 2020, doi: 10.1177/0021998319859427.
- [17] Y. Morisada, H. Fujii, T. Nagaoka, K. Nogi, and M. Fukusumi, “Fullerene/A5083 composites fabricated by material flow during friction stir processing,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 38, no. 10, pp. 2097–2101, Oct. 2007, doi: 10.1016/j.compositesa.2007.07.004.
- [18] A. Sharma, V. K. Dwivedi, and Y. P. Singh, “Effect on ultimate tensile strength on varying rotational speed, plunge depth and welding speed during friction stir welding process of aluminium alloy AA7075,” in *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 26, pp. 2055–2057. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.444.
- [19] S. Benavides, Y. Li, L. E. Murr, D. Brown, and J. C. McClure, “Low-Temperature Friction-Stir Welding Of 2024 Aluminum,” 1999.
- [20] H. Mehdi and R. S. Mishra, “Effect of friction stir processing on mechanical properties and heat transfer of TIG welded joint of AA6061 and AA7075,” *Defence Technology*, vol. 17, no. 3, pp. 715–727, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.dt.2020.04.014.
- [21] M. H. Ku, F. Y. Hung, and T. S. Lui, “Embrittlement due to excess heat input into friction stir processed 7075 alloy,” *Materials*, vol. 12, no. 2, Jan. 2019, doi: 10.3390/ma12020227.
- [22] T. Wu, F. Zhao, H. Luo, H. Wang, and Y. Li, “Temperature monitoring and material flow characteristics of friction stir welded 2A14-t6 aerospace aluminum alloy,” *Materials*, vol. 12, no. 20, Oct. 2019, doi: 10.3390/ma12203387.
- [23] W. Hoziefafa and S. Toschi, “Influence of friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of a compocast AA2024-Al₂O₃ nanocomposite,” *Mater Des*, vol. 106, pp. 273–284, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.05.114.
- [24] W. Yang, H. Ding, Y. Mu, J. Li, and W. Zhang, “Achieving high strength and ductility in double-sided friction stir processing 7050-T7451 aluminum alloy,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 707, pp. 193–198, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.msea.2017.09.028.
- [25] A. K. Shettigar, G. Saliyan, M. Herbert, and S. Rao, “Microstructural characterization and hardness evaluation of friction stir welded composite AA6061-4.5Cu-5SiC (Wt.%),” *Def Sci J*, vol. 63, no. 4, pp. 429–434, 2013, doi: 10.14429/dsj.63.4869.
- [26] V. Sharma, U. Prakash, and B. V. M. Kumar, “Surface composites by friction stir processing: A review,” *J Mater Process Technol*, vol. 224, pp. 117–134, May 2015, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.04.019.
- [27] A. Boucherit, M. N. Avettand-Fènoël, and R. Taillard, “Effect of a Zn interlayer on dissimilar FSSW of Al and Cu,” *Mater Des*, vol. 124, pp. 87–99, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.03.063.
- [28] F. Jun Liu, Y. Ji, and Y. Xia Bai, “Influence of multipass high rotating speed friction stir processing on microstructure evolution, corrosion behavior and mechanical properties of stirred zone on AZ31 alloy,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 30, no. 12, pp. 3263–3273, Dec. 2020, doi: 10.1016/S1003-6326(20)65459-0.
- [29] S. Suman, D. Sethi, A. Meher, M. Bhargava, and B. Saha Roy, “Effect of tool rotational speed on microstructure and mechanical properties of AA6061/SiC surface composites using friction stir processing,” *Mater Today Proc*, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.11.247.
- [30] B. Li, X. Sun, H. Chen, Y. Yang, Q. Luo, X. Yang, Y. Chen, G. Wei, Q. Li, and F. Pan, “Enhancing Mg-Li alloy hydrogen storage kinetics by adding molecular sieve via friction stir processing,” *J Mater Sci Technol*, May 2023, doi: 10.1016/j.jmst.2023.04.051.
- [31] A. Setya Kurniawan and R. Poppy Puspitasari, “Analisis Kekuatan Tarik Dan Struktur Mikro Pada Baja St.41 Akibat Perbedaan Ayunan Elektroda Pengelasan

Smaw.”

- [32] R. D. Prayogo, “Analysis Pengaruh Arus Pengelasan Terhadap Kekuatan Tarik Dan Struktur Mikro Baja Ss 41 Pada Pengelasan Gtaw.”
- [33] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, “Friction stir welding and processing,” *Materials Science and Engineering R: Reports*, vol. 50, no. 1–2. Aug. 31, 2005. doi: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
- [34] H. Eskandari, R. Taheri, and F. Khodabakhshi, “Friction-stir processing of an AA8026-TiB₂-Al₂O₃ hybrid nanocomposite: Microstructural developments and mechanical properties,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 660, pp. 84–96, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.msea.2016.02.081.
- [35] Y. Zhu, K. Sun, and G. S. Frankel, “Intermetallic Phases in Aluminum Alloys and Their Roles in Localized Corrosion,” *J Electrochem Soc*, vol. 165, no. 11, pp. C807–C820, 2018, doi: 10.1149/2.0931811jes.
- [36] J. John, S. P. Shanmughanatan, and M. B. Kiran, “Effect of tool geometry on microstructure and mechanical Properties of friction stir processed AA2024-T351 aluminium alloy,” 2018. [Online]. Available: www.sciencedirect.com/www.materialstoday.com/proceedings.
- [37] M. Patel, B. Chaudhary, J. Murugesan, N. K. Jain, and V. Patel, “Enhancement of tensile and fatigue properties of hybrid aluminium matrix composite via multipass friction stir processing,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 21, pp. 4811–4823, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.11.073.
- [38] R. P. Mahto, M. Rout, and S. K. Pal, “Mechanism of microstructure evolution and grain growth in friction stir welding of AA6061-T6 and AISI304 in air and water media,” *Mater Chem Phys*, vol. 273, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.matchemphys.2021.125081.