Study of Tensile Strength and Joint Gaps in Aluminum Friction Stir Spot Welding with 3D Printed PLA
[Studi Kekuatan Tarik dan Sem Sambungan Friction Stir Spot Welding Alumunium dengan 3D Printing PLA]

Riki Tri Andriansyah[1)], Iswanto[*2)]

[1),*2)] Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia
*Email Penulis Korespondensi: iswanto@umsida.ac.id

Abstract. *This study aims to analyze the effect of Friction Stir Spot Welding (FSSW) process parameters on the tensile strength, morphology, and elemental composition of aluminum joints with 3D-printed filament. The parameters investigated include rotational speed, dwell time, and pin tool depth. The tests were conducted on 18 specimens using rotational speeds of 2000, 2500, and 3000 rpm, dwell times of 5, 10, and 15 seconds, and pin depths of 6 and 7 mm. The joint characteristics were analyzed through tensile testing and Scanning Electron Microscope (SEM) observations equipped. The tensile test results showed that the highest tensile stress of 3.431 kgf/mm² was obtained from specimen C1, with a combination of 3000 rpm rotational speed, 5-second dwell time, and 6 mm pin depth. The lowest tensile stress of 0.720 kgf/mm² was obtained from specimen A2, with a rotational speed of 2000 rpm, a dwell time of 10 seconds, and a pin depth of 7 mm. These results indicate that the strength of FSSW joints is influenced by the interaction between rotational speed, dwell time, and pin tool depth, which are associated with heat generation, plastic deformation, pin penetration, and joint bonding formation. SEM observations revealed differences in surface morphology among the aluminum material, 3D-printed filament, and welded region. The aluminum area exhibited a lined surface and irregular dark areas, with aluminum being the dominant element at 90.30 at.%. Meanwhile, the 3D-printed filament exhibited a non-homogeneous surface with longitudinal grooves and silicon as the dominant element at 66.30 at.%. The welded region exhibited a relatively rougher and non-homogeneous morphology, with the presence of O, Mg, Al, Si, Zr, Rh, and Hg elements. These changes in morphology and elemental composition indicate the influence of the manufacturing process and thermal cycle during welding on the characteristics of the joint.*

Keywords – *Friction Stir Spot Welding (FSSW), Aluminum 6061, Polymer, Tensile Test, SEM.*

Abstrak. *Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter proses Friction Stir Spot Welding (FSSW) terhadap kekuatan tarik dan karakteristik morfologi serta komposisi unsur pada sambungan aluminium dengan filamen hasil 3D printing. Parameter yang digunakan meliputi kecepatan putar, waktu penekanan, dan kedalaman pin tool. Pengujian dilakukan terhadap 18 spesimen menggunakan variasi kecepatan putar 2000, 2500, dan 3000 rpm, waktu penekanan 5, 10, dan 15 sekon, serta kedalaman pin 6 dan 7 mm. Karakteristik sambungan dianalisis melalui pengujian tarik dan pengamatan Scanning Electron Microscope (SEM). Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa nilai tegangan tarik tertinggi sebesar 3,431 Kgf/mm² diperoleh pada spesimen C1 dengan kombinasi kecepatan putar 3000 rpm, waktu penekanan 5 sekon, dan kedalaman pin 6 mm. Nilai tegangan tarik terendah sebesar 0,720 Kgf/mm² diperoleh pada spesimen A2 dengan kecepatan putar 2000 rpm, waktu penekanan 10 sekon, dan kedalaman pin 7 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kekuatan sambungan FSSW dipengaruhi oleh interaksi antara kecepatan putar, waktu penekanan, dan kedalaman pin tool yang berkaitan dengan pembentukan panas, deformasi plastis, penetrasi pin, dan pembentukan ikatan sambungan. Hasil pengamatan SEM menunjukkan adanya perbedaan morfologi permukaan antara material aluminium, filamen hasil 3D printing, dan daerah hasil pengelasan. Area aluminium menunjukkan permukaan bergaris dan area gelap tidak beraturan dengan dominasi aluminium sebesar 90,30 at.%, sedangkan filamen 3D printing menunjukkan permukaan tidak homogen dengan alur memanjang dan dominasi silikon sebesar 66,30 at.%. Daerah hasil pengelasan memiliki morfologi yang lebih kasar dan tidak homogen serta menunjukkan keberadaan unsur O, Mg, Al, Si, Zr, Rh, dan Hg. Perubahan morfologi dan komposisi unsur tersebut menunjukkan adanya pengaruh proses manufaktur dan siklus termal selama pengelasan terhadap karakteristik sambungan.*

Kata Kunci – *Friction Stir Spot Welding, Aluminium 6061, Polimer, Uji Tarik, SEM.*

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.
Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi material dewasa ini semakin mengarah pada pemanfaatan material ringan dengan kekuatan tinggi untuk mengurangi konsumsi energi sekaligus meningkatkan efisiensi pada sektor otomotif, kedirgantaraan, dan konstruksi [1]. Salah satu material logam yang banyak digunakan adalah Aluminium Alloy 6061. Paduan ini memiliki karakteristik unggul seperti densitas rendah, kekuatan tarik tinggi, ketahanan terhadap korosi, serta kemampuan *machinability* yang baik, sehingga menjadikannya pilihan utama pada aplikasi struktural [2].

Sementara itu, polimer juga semakin populer digunakan, terutama *Polylactic Acid* (PLA), karena memiliki sifat ramah lingkungan, *biodegradabel*, dan mudah diproses [3]. Kombinasi antara aluminium dan polimer berpotensi menghasilkan material hibrida dengan rasio kekuatan terhadap berat yang lebih tinggi dibanding penggunaan logam murni, serta dapat mengurangi bobot komponen secara signifikan [4]. Namun, salah satu tantangan utama dalam mengombinasikan aluminium dengan polimer adalah perbedaan sifat fisis dan kimia.

Aluminium memiliki konduktivitas termal tinggi dan titik leleh 660 °C, sedangkan PLA merupakan polimer termoplastik dengan titik leleh relatif rendah, sekitar 160–180 °C [5]. Hal ini menyebabkan metode pengelasan konvensional yang berbasis fusi sulit diaplikasikan, karena dapat merusak polimer dan menurunkan kualitas sambungan. Sebagai alternatif, metode *Friction Stir Spot Welding* (FSSW) dikembangkan [6].

FSSW adalah proses penyambungan solid-state yang bekerja dengan prinsip gesekan mekanis dari tool yang berputar dan menekan dua material yang akan disambungkan [7]. Keunggulan FSSW adalah prosesnya tidak melelehkan material sepenuhnya, melainkan menghasilkan ikatan melalui deformasi plastis dan difusi antarmuka, sehingga dapat digunakan pada kombinasi logam–polimer [8].

Proses penyambungan aluminium dengan filamen PLA menggunakan metode *Friction Stir Spot Welding* (FSSW) tidak menghasilkan penyatuan atomik sebagaimana yang terjadi pada proses pengelasan dua material logam sejenis. Hal ini disebabkan oleh perbedaan karakteristik material, yaitu aluminium yang memiliki ikatan metalik dan PLA yang merupakan material polimer dengan ikatan kovalen. Penyambungan kedua material lebih memungkinkan terjadi melalui mekanisme ikatan antarmuka (*interfacial bonding*), yang melibatkan penguncian mekanis (*mechanical interlocking*) dan interaksi fisik maupun kimia pada permukaan kontak [9]. Panas yang dihasilkan akibat gesekan tool menyebabkan PLA mengalami pelunakan sehingga dapat mengalir dan mengisi ketidakteraturan permukaan aluminium. Setelah proses penekanan dihentikan dan material mengalami pendinginan, PLA kembali mengeras sehingga terbentuk penguncian mekanis yang membantu mempertahankan sambungan antara kedua material [10].

Penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa parameter FSSW seperti kecepatan putar (*rotational speed*), waktu penahanan (*dwell time*), dan kedalaman penetrasi (*plunge depth*) sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik dan kualitas sambungan [11]. Variasi kecepatan putar memengaruhi jumlah panas gesek yang dihasilkan, sedangkan dwell time memengaruhi difusi dan kualitas ikatan antarmuka. Apabila parameter terlalu rendah, ikatan tidak terbentuk sempurna, sedangkan bila terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi termal pada polimer [12]. Untuk mengukur kualitas sambungan, digunakan pengujian tarik dengan standar ASTM D1002 (*lap shear tensile test*) yang umum dipakai dalam uji kekuatan sambungan logam-polimer [13]. Selain itu, pengamatan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan standar ASTM E1508 digunakan untuk menganalisis morfologi mikro pada antarmuka sambungan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman lebih lanjut tentang pengaruh parameter FSSW terhadap kualitas sambungan aluminium–polimer [14].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter FSSW terhadap kekuatan tarik dan kekuatan bending sambungan polimer agar diperoleh parameter optimum yang memberikan kualitas sambungan terbaik dan dapat diaplikasikan secara luas di industri [15].

II. METODE

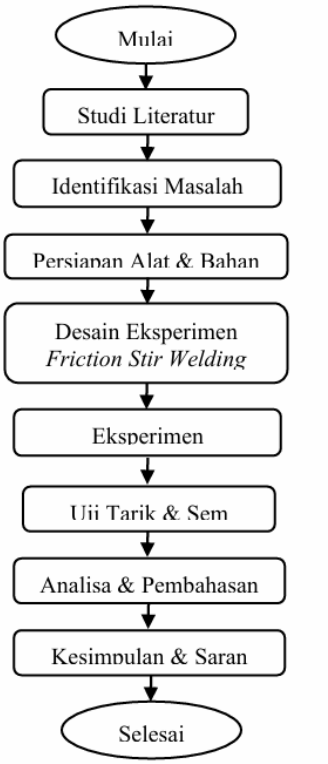
Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, pada bulan juni - agustus 2026. Penelitian ini akan dilakukan dengan tahapan eksperimen untuk mengetahui kekuatan dan kualitas sambungan pengelasan *Friction Stir Spot Welding (FSSW)*. Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dimulai dengan pembuatan *pin tool* dengan material baja ASTM A36, kemudian pemilihan material material aluminium 6061 tebal 4 mm dan *filament 3d printing* dengan material *Ad Polypropylene* (PP) tebal 5 mm. Parameter proses yang signifikan seperti kecepatan putar (*rotational speed*), waktu penahanan (*dwell time*) dan jenis *pin tool* dipelajari dengan seksama dalam variasi yang terkontrol. Setelah pengelasan selesai, dilakukan proses pengelasan *Friction Stir Spot Welding (FSSW)* dengan mesin *milling universal*. Kemudian dilakukan pengujian kekuatan pengujian tarik, dan pengujian SEM data yang dihasilkan kemudian dianalisis statistik untuk mengidentifikasi hubungan parameter proses pengelasan *Friction Stir Spot Welding (FSSW)* dengan karakteristik mekanis sambungan pengelasan aluminium 6061 dengan *filament 3d printing*.

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.
Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

Metode ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang mendalam tentang optimalisasi proses *Friction Stir Spot Welding (FSSW)* untuk meningkatkan kualitas sambungan aluminium dengan *filament 3d printing* dalam berbagai aplikasi industri. Langkah-langkah secara detail proses penelitiannya adalah sebagai berikut:

A. Diagram Alir Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam proses penyusunan penelitian ini digambarkan secara sistematis dalam diagram alir (*flowchart*). Berikut merupakan diagram alir penelitian yang dapat dilihat pada **Gambar 1.**



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

B. Studi Literatur

Studi literatur ini di lakukan sebagai tahap awal dan juga sebagai landasan materi dengan mempelajari beberapa refrensi dari jurnal, artikel, buku, tugas akhir yang berkaitan, pengamatan scara langsung di lapangan, juga dari media internet, dan diskusi dengan dosen pembimbing yang ada kaitannya dengan besar perencanaan tinjauan parameter pengelasan *Friction Stir Spot Welding (FSSW)* Terhadap hasil pengujian kekuatan Tarik dan pengujian SEM.

C. Alat dan Bahan Penelitian

Persiapan alat dan bahan yang perludilakukan untuk melakukan pengelasan *Friction Stir Spot Welding (FSSW)* juga pengujian kekuatan tarik dan SEM spesimen yaitu sebagai berikut.

1. Aluminium AA 6061

   Pada penelitian ini material yang digunakan yaitu Aluminium AA6061 dimana aluminium seri 6061 yang memiliki kekuatan dan ketahanan korosi yang cukup baik. Plat Aluminium 6061 berbentuk lembaran dengan dimensi 100 mm x 25 mm x 4 mm sebagai bahan utama pengelasan *Friction Stir Spot Welding (FSSW)*.

2. *Polylactic Acid* (PLA)

   PLA merupakan polimer termoplastik yang banyak digunakan pada proses 3D printing, terutama dengan metode FDM/FFF. PLA memiliki kekakuan yang relatif tinggi dan penyusutan yang rendah selama proses pencetakan sehingga lebih mudah menghasilkan bentuk yang stabil. Dalam proses 3D printing, PLA relatif mudah digunakan karena tidak membutuhkan temperatur ekstrusi yang sangat tinggi dan memiliki kecenderungan warping yang rendah. PLA ini dibentuk menjadi plat pada 3d printing dengan dimensi 100 mm x 25 mm x 4 mm.

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.
Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

3. Mesin *Milling Universal*

   Pada penelitian ini menggunakan mesin milling laboratorium teknik mesin universitas muhammadiyah sidoarjo sebagai alat pengelasan *Friction Stir Spot Welding (FSSW)*. Mesin milling universal adalah mesin perkakas yang dirancang untuk melakukan berbagai operasi pemotongan logam dengan menggunakan alat potong berputar yang disebut milling cutter. Mesin ini dinamakan "universal" karena memiliki kemampuan untuk memotong dalam berbagai orientasi, baik horizontal maupun vertikal, serta dapat melakukan berbagai operasi seperti pengefraisan, pengeboran, dan pemotongan alur.

4. Mesin 3D Printing

   3D Printing adalah salah satu teknik cetak yang digunakan untuk mencetak objek tiga dimensi menggunakan mesin digital yang dibuat di komputer. Selain 3D printing, proses ini dikenal juga dengan istilah *additive manufacturing* karena benda atau objek dibuat dengan cara menambahkan lapisan demi lapisan material hingga menjadi bentuk fisik yang diinginkan. Perbedaan jelas terlihat melalui objek yang dihasilkan. Mesin 3D printing pada penelitian ini digunakan sebagai pembentuk plat filament dengan bahan *Polypropylena*.

5. Tool FSSW berbentuk *pin silinder*

   Tool *Friction Stir Spot Welding (FSSW)* merupakan tool yang digunakan pada pengelasan *Friction Stir Spot Welding (FSSW)* dengan bentuk silinder dan ujungnya melancip yang berguna pada saat proses penekanan pembuatan spesiment pemanasannya merata.

6. Jangka Sorong

   Jangka sorong atau disebut dengan vernier caliper adalah suatu alat yang digunakan untuk mengukur jarak, kedalaman atau diameter dalam sebuah objek dengan tingkat keakurasian dan presisi yang sangat baik hingga seperseraturs mm dan digunakan untuk mengukur satuan panjang.

7. Mesin Uji Tarik

   mesin uji tarik atau Tensile Testing Machine merupakan perangkat yang memiliki peranan yang penting. Mesin ini berfungsi untuk mengetahui kemampuan material menahan gaya tarik sebelum mengalami deformasi atau patah. Data hasil pengujian tarik digunakan untuk memastikan kekuatan, keuletan, dan daya tahan suatu material, sehingga produk yang dihasilkan memiliki kualitas yang konsisten dan memenuhi standar keselamatan yang sudah ditentukan.

8. *Mikroskop Electron*

   Microskop electron adalah SEM atau *scanning electron microscopes* salah satu alat yang digunakan untuk melihat struktiur kecil dengan memindai terfokus balok halus elektron ke sampel, elektron berinteraksi dengan sampel komposisi molekul. Energi dari elektron menuju kesampel secara langsung yang menciptakan gambar tiga dimensi atau spektrum elemen yang unik dalam sampel yang dianalisis. Elektron yang berinteraksi dengan atom yang membentuk sampel menghasilkan sinyal yang berisi informasi tentang sampel dari permukaan topografi, komposisi dan sifat lainnya seperti daya konduksi listrik.

D. Rancangan Penelitian (Design of Experiment)

Variabel penelitian adalah segala sesuatu yang dapat diukur, dikontrol, atau dimanipulasi dalam suatu penelitian. Variabel berfungsi sebagai elemen utama dalam penelitian ilmiah karena menentukan hubungan yang diteliti dan hasil yang diperoleh. Variabel dapat berupa sifat, nilai, kategori, atau keadaan tertentu yang diamati dan diukur oleh peneliti. Keberadaan variabel memungkinkan peneliti untuk mengkaji hubungan sebab-akibat atau keterkaitan antar fenomena secara ilmiah.

1. Variabel Bebas
   - Kecepatan putar *(rotational speed): 2000, 2500, 3000 rpm*
   - Waktu penahanan *(dwell time): 5,10,15 detik*
   - Jenis *pin tool: Silinder* dengan kedalaman 6 mm dan 7 mm

2. Variabel Terikat
   - Kekuatan tarik *(tensile strength, MPa)*
   - Hasil gambar uji SEM

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.
Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

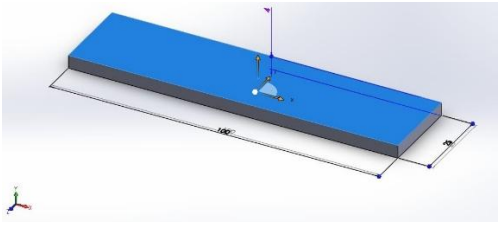
3. Variabel Terikat
    - Material: Aluminium Alloy 6061 dan *Polylactic Acid* (PLA) tebal 4 mm
    - Tekanan aksial: konstan
    - Kondisi lingkungan: suhu ruang

Penelitian ini menggunakan metode eksperiment dengan satu kali pengulangan dengan 2 tipe letak material yaitu 3D printing diatas dengan filament dibawah dan 3D printing dibawah dengan filament diatas, sehingga terdapat 18 kombinasi parameter yang diuji masing-masing satu spesimen untuk uji tarik dan satu spesimen untuk uji SEM.

E. Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini prosedur pengelasan *Friction Stir Spot Welding* (FSSW) dilukakukan dengan 4 tahapan yaitu proses pembuatan filament 3D printing, proses pengelasan FSSW, proses pengujian Tarik dan proses penguian SEM . Berikut adalah penjelasan langkah –langkah proses pengelasan *Friction Stir Spot Welding* (FSSW).

1. Proses Pembuatan Filament dengan Mesin 3D Printing
    - Persiapan mesin 3D printing
      Memastikan 3D printing diatas permukaan datar dan stabil, memeriksa kondisi nozzle, print bed, extruder, dan filament, memastikan kabel daya dan koneksi mesin dalam kondisi baik.
    - Persiapan filament
      Memastikan filament yang terpasang sesuai dengan material yang diinginkan dan pastikan filament dapat keluar dengan lancer dari nozzle.
    - Persiapan Desain 3D
      Membuat desain 3D bentuk spesiment filament yang akan dicetak dengan menngunakan sofeware solidworks kemudian simpan model dalam format yang dapat dibaca oleh software slicer, umumnya STL atau 3MF.



Gambar 2. Desain Dimensi Filament

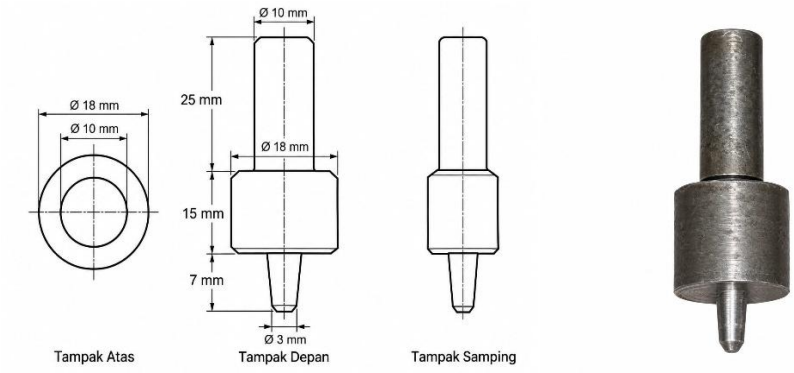
    - Proses slicing
      Memasukkan model 3D ke dalam software slicer, atur parameter pencetakan, antara lain: *Layer height, Infill density, Print speed, Nozzle temperature, Bed temperature, Wall thickness, Support, Build plate adhesion,* setelah parameter sesuai, lakukan proses slicing untuk mengubah model 3D menjadi instruksi G-code yang dapat dibaca oleh printer.
    - Memasukkan file ke mesin
      Simpan file G-code ke kartu SD, USB, atau kirim melalui koneksi yang tersedia pada printer. Masukkan media penyimpanan ke mesin. Pilih file desain yang akan dicetak.
    - Memulai Proses Printing
      Pastikan nozzle dan bed telah mencapai temperatur yang ditentukan. Jalankan file G-code. Amati proses pencetakan terutama pada lapisan pertama. Pastikan filament keluar secara kontinu dan menempel dengan baik pada print bed.
    - Memantau proses pencetakan
      Selama proses berlangsung, periksa: Adhesi lapisan pertama. Aliran filament. Pergerakan nozzle. Suhu nozzle dan bed. Kondisi hasil cetakan. Kemungkinan terjadinya warping, stringing, atau under-extrusion. Jika terjadi masalah yang berpotensi merusak mesin atau hasil cetakan, proses dapat dihentikan menggunakan tombol pause/stop sesuai prosedur mesin.
    - Pemeriksaan hasil cetakan
      Periksa hasil cetakan secara visual dan, jika diperlukan, lakukan pengukuran. Parameter yang dapat diperiksa antara lain: Dimensi produk. Berat produk. Kualitas permukaan. Ketepatan bentuk. Adanya cacat seperti retak, warping, void, atau layer separation.

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.
Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.



Gambar 3. Proses Pembuatan Filament dengan Mesin 3D Printing

2. Proses Pengelasan FSSW
   - Persiapan material
     Siapkan dua lembar material yang akan disambungkan. Potong material sesuai ukuran spesimen penelitian. Bersihkan permukaan material dari kotoran, minyak, oksida, dan kontaminan lainnya. Pastikan permukaan material rata dan tidak mengalami deformasi.
   - Penumpukan material
     Letakkan kedua material secara bertumpuk (*lap joint*). Pastikan bagian yang akan disambung berada pada posisi yang sesuai. Atur orientasi dan posisi material sesuai rancangan penelitian.
   - Pemasangan material pada fixture
     Tempatkan material pada meja atau *fixture* mesin FSSW. Jepit material menggunakan clamping agar tidak bergeser selama proses pengelasan. Pastikan daerah sambungan berada tepat di bawah posisi tool.



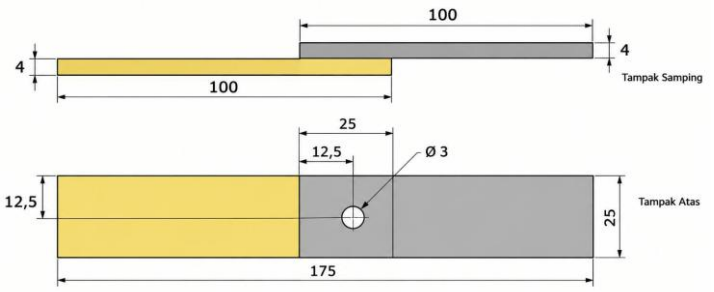
Gambar 4. Desain Tool FSSW

   - Persiapan dan pemasangan tool
     Pilih tool sesuai material dan parameter penelitian. Periksa kondisi shoulder dan pin sebelum digunakan. Pasang tool pada spindle mesin FSSW. Pastikan tool terpasang kuat dan berada pada posisi yang benar.
   - Pengaturan parameter pengelasan Atur parameter sesuai rancangan eksperimen, antara lain: Kecepatan putar tool (*rotational speed*), dalam rpm. Kedalaman penetrasi/*plunge depth*, dalam mm. Waktu tahan (*dwell time*), dalam detik. Kecepatan penekanan/*plunge rate*, jika mesin memungkinkan pengaturan tersebut. Diameter dan geometri tool.
   - Penempatan tool
     Posisikan tool tepat di atas titik sambungan. Pastikan sumbu tool tegak lurus terhadap permukaan material. Pastikan posisi tool sesuai dengan titik pengelasan yang telah ditentukan.
   - Tahap plunge

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.
Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

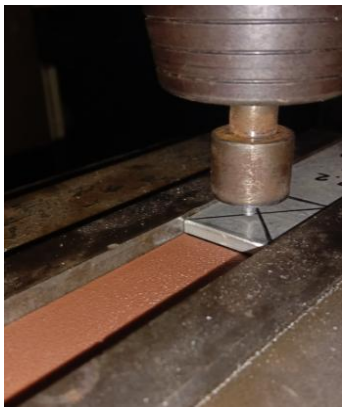
Putar tool pada kecepatan yang telah ditentukan. Turunkan tool secara perlahan menuju permukaan material. Shoulder mulai bersentuhan dengan material dan menghasilkan panas akibat gesekan. Pin masuk ke dalam material hingga mencapai kedalaman yang telah ditentukan.

- Tahap *dwell*
  Setelah mencapai kedalaman yang ditentukan, tahan posisi tool selama waktu tertentu. Selama tahap ini, panas dan deformasi plastis menyebabkan material di sekitar pin mengalami pelunakan. Rotasi tool menyebabkan material plastis mengalami pengadukan (*stirring*) sehingga terbentuk zona sambungan.
- Tahap *retraction*
  Setelah waktu tahan selesai, tarik tool keluar dari material secara vertikal. Hentikan atau kurangi putaran tool sesuai prosedur mesin. Tool yang telah ditarik akan meninggalkan lubang atau *keyhole* pada daerah sambungan apabila menggunakan konfigurasi FSSW konvensional.



Gambar 5. Desain Skema Pengelasan *Friction Stir Spot Welding* (FSSW)

- Pendinginan spesimen
  Biarkan spesimen mengalami pendinginan secara alami hingga mencapai temperatur yang aman untuk ditangani. Hindari memberikan pendinginan yang tidak sesuai dengan rancangan penelitian karena dapat memengaruhi karakteristik sambungan.
- Pemeriksaan hasil pengelasan
  Lepaskan spesimen dari *fixture*. Amati kondisi permukaan sambungan. Periksa adanya cacat seperti retak, *void, hooking, keyhole*, atau deformasi berlebihan. Dokumentasikan hasil pengelasan..



Gambar 6. Proses pengelasan *Friction Stir Spot Welding* (FSSW)

3. Proses Pengujian Tarik (*Tensile Test*)
   - Persiapan spesimen
     Siapkan spesimen uji tarik sesuai standar yang digunakan, misalnya ASTM atau ISO. Pastikan dimensi spesimen telah sesuai dengan standar. Bersihkan permukaan spesimen dari kotoran atau material yang dapat mengganggu pengujian. Beri tanda pada bagian *gauge length* apabila diperlukan.

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.
Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

- Pengukuran dimensi awal
  Ukur lebar dan ketebalan spesimen pada daerah penampang uji menggunakan jangka sorong atau mikrometer. Tentukan panjang awal daerah ukur (*initial gauge length*). Hitung luas penampang awal
- Persiapan *Universal Testing Machine*
  Nyalakan mesin UTM. Periksa kondisi grip atau penjepit spesimen. Pastikan mesin telah dikalibrasi atau berada dalam kondisi siap digunakan. Atur parameter pengujian sesuai standar yang digunakan.
- Pemasangan spesimen
  Pasang spesimen pada grip bagian bawah dan atas mesin. Pastikan spesimen berada dalam posisi lurus dan sejajar dengan arah pembebanan. Kencangkan penjepit sehingga spesimen tidak mengalami slip selama pengujian. Hindari pemasangan yang terlalu miring karena dapat menghasilkan pembebanan yang tidak merata.
- Pengaturan parameter pengujian
  Atur kecepatan pembebanan atau *crosshead speed* sesuai standar pengujian. Masukkan data dimensi spesimen jika perangkat lunak UTM memerlukannya. Pastikan sistem pencatatan beban dan perpindahan telah aktif.
- Memulai pengujian
  Jalankan mesin UTM. Mesin memberikan gaya tarik secara bertahap pada spesimen. Amati perubahan beban dan pertambahan panjang spesimen selama proses berlangsung. Data gaya dan perpindahan direkam oleh sistem UTM.

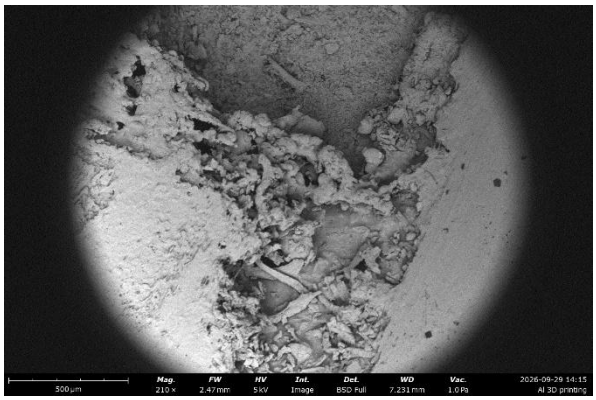


Gambar 7. Proses Pengujian Tarik (Tensile Test)

4. Proses Pengujian Visual SEM
   - Persiapan Spesimen
     Menentukan bagian spesimen yang akan diamati, Potong spesimen sesuai ukuran yang dapat ditempatkan pada specimen holder SEM. Bersihkan spesimen dari debu, minyak, dan kotoran menggunakan metode yang sesuai. Pastikan spesimen benar-benar bersih dan kering sebelum dimasukkan ke ruang SEM.
   - Pemasangan Spesimen
     Memasang spesimen pada specimen holder Melakukan coating jika diperlukan untuk material yang bersifat nonkonduktif, seperti polimer, keramik, atau material tertentu, permukaan spesimen dapat diberi lapisan tipis konduktif menggunakan *sputter coating*
   - Pengoperasian SEM
     Memasukkan specimen holder ke dalam SEM. Aktifkan sistem vakum SEM. Tunggu hingga tekanan ruang spesimen mencapai kondisi yang sesuai untuk pengamatan. Atur parameter pengamatan sesuai kebutuhan, antara lain: *Accelerating voltage* (kV). *Working distance. Magnification. Spot size/beam current. Mode detektor, misalnya Secondary Electron* (SE) atau *Backscattered Electron* (BSE). Atur posisi meja spesimen sehingga daerah yang ingin diamati berada di bawah berkas elektron. Lakukan pencarian area dengan perbesaran rendah terlebih dahulu. Setelah lokasi ditemukan, tingkatkan perbesaran secara bertahap. Atur fokus hingga gambar terlihat tajam. Lakukan pengaturan *brightness* dan *contrast* agar morfologi spesimen terlihat dengan jelas. Jika diperlukan, lakukan *astigmatism correction* untuk meningkatkan ketajaman gambar. Amati morfologi spesimen pada beberapa tingkat perbesaran. Pengamatan

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.
Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

dapat dilakukan pada area yang berbeda untuk memperoleh gambaran yang representatif. Catat parameter pengamatan pada setiap gambar yang diambil. Mengambil gambar SEM Simpan gambar pada area yang dianggap mewakili karakteristik spesimen. Sertakan skala/*microscale* pada setiap gambar. Dokumentasikan nilai perbesaran dan parameter SEM.



Gambar 8. Proses Pengujian Visual SEM

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Kekuatan Tarik (*Tensile Test*)

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik dan letak putusnya sambungan las . Uji tarik merupakan salah satu pengujian yang paling sering dilakukan untuk mengetahui sifat suatu material menggunakan standar ASTM E8.



Gambar 9. Pengujian Tarik

Prinsip kerja uji tarik adalah memberikan beban pada spesimen secara bertahap hingga terjadi kegagalan atau kerusakan. Pengujian tarik dilakukan di Labulatorium Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang. Berikut merupakan hasil pengujian kekuatann tarik. Nilai tegangan dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ ..... } (1)$$

Dimana :
σ : Tegangan (Kgf/mm^2)
F : Gaya (Kgf)
A : Luas Penampang (mm^2)

Berikut ini merupakan contoh perhitungan tegangan pengujian tarik pada spesimen FSSW A1 dengan letak material 3D printing diatas dengan filament dibawah. Nilai gaya dan luas penampang didapatkan berdasarkan mesin uji tarik yang telah dilakukan kalibrasi sebelumnya.

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.
Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

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

$$\sigma = \frac{100{,}8}{54{,}852}$$

$$\sigma = 1{,}838$$

Dimana :
σ : Tegangan (Kgf/mm^2)
F : Gaya (Kgf)
A : Luas Penampang (mm^2)

Pada **Gambar 9.** Menunjukkan proses pengujian tarik pada spesimen pengelasan *Friction Stir Spot Welding* (FSSW) dimana kedua sisi spesimen dicapit dan diberi beban tarik sampai patah yang seragam kearah vertikal. Dari hasil pengujian tarik yang didapat dilakukan pengolahan data untuk mengetahui tegangan yang dapat dilihat pada **Tabel 1.**

Tabel 1. Hasil Data Pengujian Tarik pada Spesimen Pengelasan *Friction Stir Spot Welding* (FSSW)

Spc	Kecepatan (rpm)	*Dwell Time* (s)	Tegangan (Kgf/mm^2) material 3D printing diatas	Tegangan (Kgf/mm^2) material 3D printing dibawah
A1	2000	5	1,838	1,464
A2	2000	10	0,720	1,133
A3	2000	15	1,234	1,140
B1	2500	5	1,071	1,637
B2	2500	10	1,213	1,784
B3	2500	15	1,268	1,520
C1	3000	5	0,976	3,471
C2	3000	10	1,155	1,408
C3	3000	15	1,309	1,371

Pada **Tabel 1.** Menunjukkan bahwa kecepatan putar, waktu penekanan (*dwell time*) dan kedalaman pin tool pada proses pengelasan sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik spesimen pengelasan *Friction Stir Spot Welding* (FSSW). Pada spesimen dengan material 3D printing diatas hasil nilai tegangan tarik tertinggi 1,838 Kgf/mm^2 dengan table warna merah pada spesimen A1 dengan kecepatan putar 2000 rpm, waktu penekanan 5 sekon dengan kedalaman pin toll 7 mm dan nilai tegangan tarik terendah 0,720 Kgf/mm^2 dengan table warna biru pada spesimen A2 dengan kecepatan putar 2000 rpm, waktu penekanan 10 sekon dengan kedalaman pin toll 7 mm.

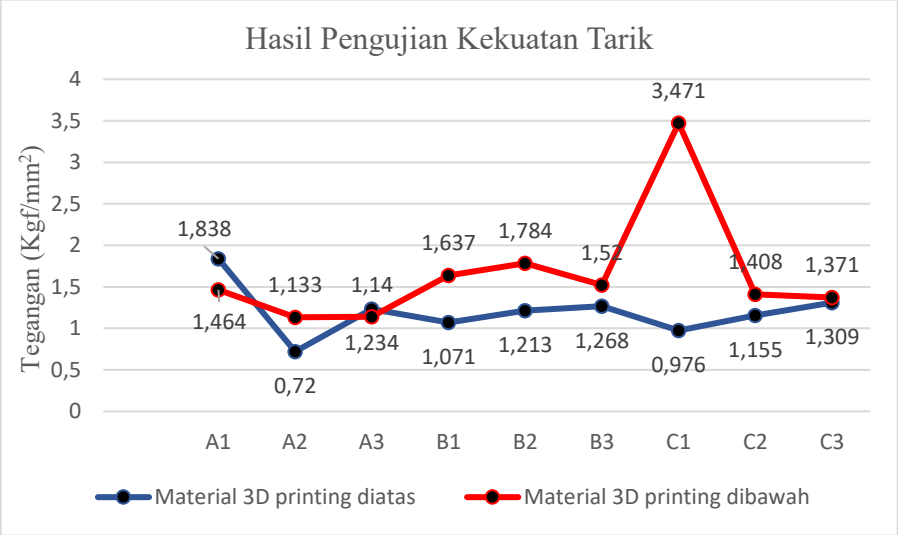
Pada spesimen dengan material 3D printing dibawah hasil nilai tegangan tarik tertinggi 3,471 Kgf/mm^2 dengan table warna merah pada spesimen C1 dengan kecepatan putar 3000 rpm, waktu penekanan 5 sekon dengan kedalaman pin toll 6 mm dan nilai tegangan tarik terendah 1,133 Kgf/mm^2 dengan table warna biru pada spesimen A2 dengan kecepatan putar 2000 rpm, waktu penekanan 10 sekon dengan kedalaman pin toll 6 mm.

Hasil pengujian tegangan tarik dari 18 spesimen antara material 3D printing diatas dan 3D printing dibawah didapatkan nilai tegangan tarik tertinggi 3,431 Kgf/mm^2 dengan table warna merah pada spesimen C1 dengan kecepatan putar 3000 rpm, waktu penekanan 5 sekon dengan kedalaman pin toll 6 mm dan nilai tegangan terendah 0,720 Kgf/mm^2 dengan table warna biru pada spesimen A2 dengan kecepatan putar 2000 rpm, waktu penekanan 10 sekon dengan kedalaman pin toll 7 mm.

Berdasarkan nilai tegangan tarik kecepatan putar tool pada spesimen C1 dengan kecepatan putar 3000 rpm, gesekan antara tool dan material berpotensi menghasilkan panas yang lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan putar 2000 rpm, Panas tersebut membantu melunakkan material di sekitar sambungan sehingga material dapat mengalami deformasi plastis dan membentuk ikatan yang lebih baik. Waktu penekanan tool juga berpengaruh terhadap proses pembentukan sambungan pada spesimen C1, waktu penekanan selama 5 sekon diduga cukup untuk menghasilkan panas dan deformasi plastis yang memadai pada kondisi parameter yang digunakan. Sebaliknya, pada spesimen A2, waktu penekanan selama 10 sekon menghasilkan kekuatan tarik yang rendah. Hal ini menunjukkan bahwa waktu penekanan yang lebih lama tidak selalu meningkatkan kekuatan sambungan. Penekanan yang terlalu lama dapat menyebabkan masukan panas berlebih. Kedalaman pin tool pada spesimen C1 dengan kedalaman pin 6 mm menghasilkan nilai tegangan tarik tertinggi. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa kedalaman pin yang digunakan berpotensi menghasilkan pembentukan sambungan yang lebih optimal pada kombinasi parameter tersebut.

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.
Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

Sebaliknya, kedalaman pin 7 mm pada spesimen A2 menghasilkan nilai tegangan tarik terendah. Kedalaman pin yang lebih besar dapat meningkatkan penetrasi dan pengadukan material, tetapi juga berpotensi menyebabkan penipisan material, pembentukan cacat, atau berkurangnya luas penampang efektif sambungan apabila penetrasi terlalu dalam.



Gambar 10. Grafik Nilai Tegangan Hasil Pengujian Kekuatan Tarik

Berdasarkan **Gambar 10.** Grafik nilai tegangan hasil pengujian kekuatan tarik didapatkan nilai tegangan tertinggi 3,431 Kgf/mm^2 pada spesimen C1 dengan kecepatan putar 3000 rpm, waktu penekanan 5 sekon dengan kedalaman pin toll 6 mm dan nilai tegangan terendah 0,720 Kgf/mm^2 pada spesimen A2 dengan kecepatan putar 2000 rpm, waktu penekanan 10 sekon dengan kedalaman pin toll 7 mm. Perbedaan hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi parameter proses Friction Stir Spot Welding (FSSW) berkaitan dengan kekuatan tarik sambungan yang dihasilkan.

Kecepatan putar tool merupakan salah satu parameter yang memengaruhi pembentukan panas selama proses FSSW. Pada spesimen C1 dengan kecepatan putar 3000 rpm, gesekan antara tool dan material berpotensi menghasilkan panas yang lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan putar 2000 rpm, apabila parameter lainnya dan kondisi proses relatif sama. Panas tersebut membantu melunakkan material di sekitar sambungan sehingga material dapat mengalami deformasi plastis dan membentuk ikatan yang lebih baik. Kondisi ini berpotensi meningkatkan kekuatan sambungan terhadap beban tarik. Namun, peningkatan kecepatan putar tidak selalu menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi karena panas berlebih juga dapat memengaruhi struktur mikro dan kualitas sambungan.

Waktu penekanan tool juga berpengaruh terhadap proses pembentukan sambungan. Pada spesimen C1, waktu penekanan selama 5 sekon diduga cukup untuk menghasilkan panas dan deformasi plastis yang memadai pada kondisi parameter yang digunakan. Sebaliknya, pada spesimen A2, waktu penekanan selama 10 sekon tidak menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa waktu penekanan yang lebih lama tidak selalu meningkatkan kekuatan sambungan. Penekanan yang terlalu lama dapat menyebabkan masukan panas berlebih, perubahan struktur mikro, atau pembentukan geometri sambungan yang kurang optimal, bergantung pada karakteristik material dan kondisi proses. Oleh karena itu, pengaruh waktu penekanan perlu dianalisis bersama kecepatan putar dan kedalaman pin tool.

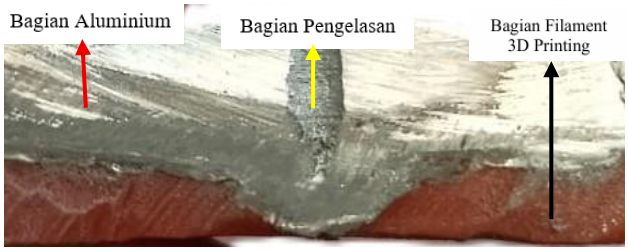
Kedalaman pin tool merupakan parameter yang memengaruhi penetrasi, deformasi plastis, serta pembentukan daerah ikatan pada sambungan. Pada spesimen C1, kedalaman pin 6 mm menghasilkan nilai tegangan tarik tertinggi. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa kedalaman pin yang digunakan berpotensi menghasilkan pembentukan sambungan yang lebih optimal pada kombinasi parameter tersebut. Sebaliknya, kedalaman pin 7 mm pada spesimen A2 menghasilkan nilai tegangan tarik terendah. Kedalaman pin yang lebih besar dapat meningkatkan penetrasi dan pengadukan material, tetapi juga berpotensi menyebabkan penipisan material, pembentukan cacat, atau berkurangnya luas penampang efektif sambungan apabila penetrasi terlalu dalam.

B. Pengujian SEM

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan salah satu metode karakterisasi material yang digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dan struktur mikro suatu material dengan resolusi tinggi. SEM bekerja dengan memindai permukaan spesimen menggunakan berkas elektron berenergi tinggi, kemudian menangkap sinyal elektron yang dipantulkan untuk menghasilkan citra dengan perbesaran hingga ribuan kali. Pada pengujian SEM ini dilakukan pada spesimen terbaik dengan hasil nilai tegangan tarik tertinggi yaitu spesimen C1 dengan kecepatan putar 3000 rpm,

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.
Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

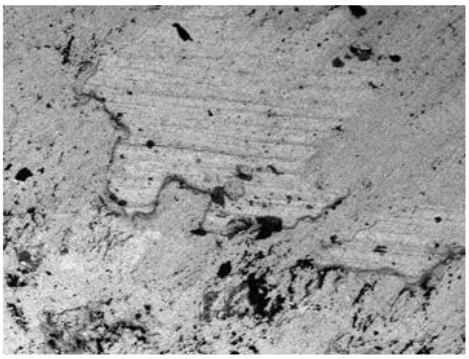
waktu penekanan 5 sekon dengan kedalaman pin toll 6 mm. pengujian SEM ini dilakukan pada 3 titik bagian spesimen yaitu bagian Aluminium, bagian sambungan pengelasan dan pada bagian filament 3D printing dapat dilihat pada **Gambar 11.**



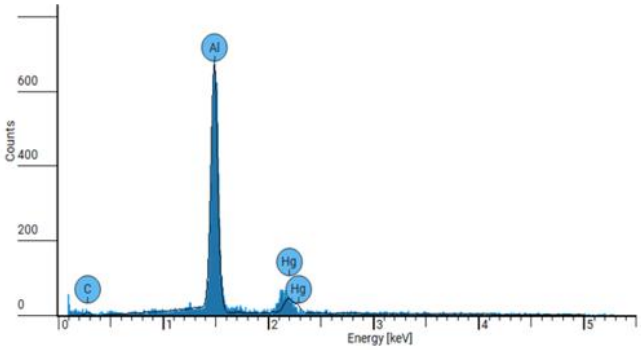
Gambar 11. Bagian Spesimen Pengujian SEM

Berdasarkan **Gambar 11.** Bagian aluminium ditunjukkan dengan panah merah, kemudian pada bagian pengelasan ditunjukkan dengan panah kuning dan bagian hitam ditunjukkan dengan panah hitam. Hasil pengujian SEM lebih jelasnya ditunjukkan pada **Gambar 12**, **Gambar 13** dan **Gambar 14.**

1. Bagian Aluminium



Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc. [%]	Weight Conc. [%]
6	C	Carbon	2.30	0.70
13	Al	Aluminum	90.30	61.70
80	Hg	Mercury	7.40	37.60

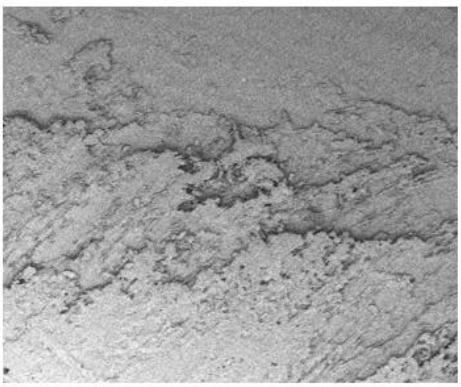


Gambar 12. Pengujian SEM Bagian Aluminium, EDX-1, Area 1

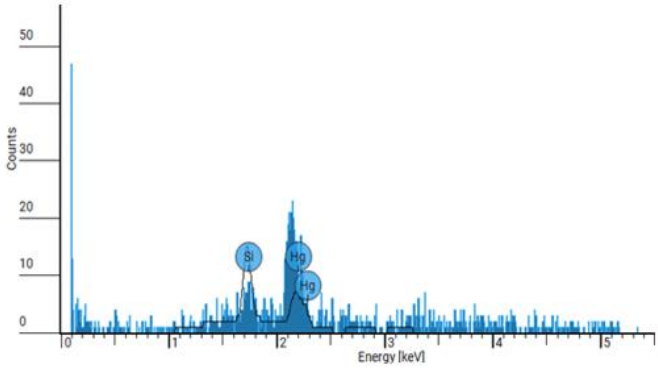
Berdasarkan **Gambar 12.** Berdasarkan hasil pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) EDX-1 area 1 menunjukkan adanya variasi morfologi permukaan spesimen yang ditandai dengan garis-garis permukaan serta area gelap yang tidak beraturan. Karakteristik tersebut dapat berkaitan dengan kondisi topografi, proses preparasi permukaan, atau keberadaan fitur lokal pada aluminium. Namun, identifikasi jenis cacat secara pasti memerlukan pengamatan lebih lanjut dengan mempertimbangkan pembesaran, skala gambar, dan lokasi pengambilan sampel. Hasil analisis EDX menunjukkan adanya tiga unsur yang terdeteksi, yaitu karbon (C), aluminium (Al), dan merkuri (Hg). Aluminium memiliki konsentrasi atom sebesar 90,30 at.% dan konsentrasi berat sebesar 61,70 wt.%, sedangkan karbon memiliki konsentrasi atom sebesar 2,30 at.% dan konsentrasi berat sebesar 0,70 wt.%. Sementara itu, merkuri memiliki konsentrasi atom sebesar 7,40 at.% dan konsentrasi berat sebesar 37,60 wt.%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa aluminium merupakan unsur dengan proporsi atom tertinggi pada area yang dianalisis.

2. Bagian Filament 3D Printing

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.
Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.



Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc. [%]	Weight Conc. [%]
14	Si	Silicon	66.30	21.60
80	Hg	Mercury	33.70	78.40



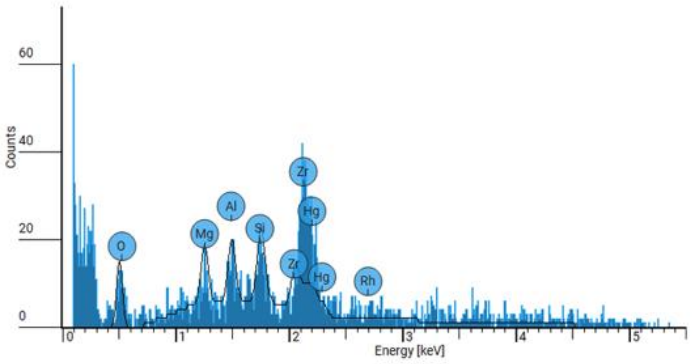
Gambar 13. Pengujian SEM Bagian Filament 3D Printing, EDX-2, Area 2

Berdasarkan **Gambar 13.** Berdasarkan hasil pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) EDX-2 area 2 menunjukkan permukaan filament 3D printing menunjukkan variasi morfologi yang ditandai dengan permukaan tidak homogen, alur memanjang, serta area gelap yang tidak beraturan. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh proses ekstrusi, gesekan selama produksi, pendinginan, maupun preparasi permukaan spesimen. Namun, identifikasi area gelap sebagai pori atau retakan memerlukan pengamatan tambahan dengan mempertimbangkan skala dan pembesaran citra. Hasil pengujian Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) menunjukkan adanya unsur silikon (Si) dengan konsentrasi atom sebesar 66,30 at.% dan konsentrasi berat sebesar 21,60 wt.%. Selain itu, terdeteksi unsur merkuri (Hg) dengan konsentrasi atom sebesar 33,70 at.% dan konsentrasi berat sebesar 78,40 wt.%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa silikon memiliki proporsi atom lebih besar, sedangkan merkuri memiliki proporsi berat lebih tinggi pada area yang dianalisis.

3. Bagian Pengelasan Aluminium dengan Filament 3D Printing



Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc. [%]	Weight Conc. [%]
8	O	Oxygen	22.94	7.49
12	Mg	Magnesium	11.07	5.49
13	Al	Aluminum	16.88	9.29
14	Si	Silicon	24.05	13.79
40	Zr	Zirconium	17.06	31.77
45	Rh	Rhodium	0.29	0.60
80	Hg	Mercury	7.71	31.57



Gambar 14. Pengujian SEM Bagian Pengelasan, EDX-3, Area 3

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.
Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

Berdasarkan **Gambar 14.** Berdasarkan hasil pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) EDX-3 area 3 menunjukkan bahwa permukaan daerah pengelasan aluminium dengan filamen hasil 3D printing memiliki morfologi yang relatif kasar dan tidak homogen. Pada permukaan terlihat adanya daerah dengan tekstur yang berbeda, berupa bagian yang relatif padat serta bagian yang lebih kasar dan tidak beraturan. Kondisi tersebut mengindikasikan adanya perubahan morfologi akibat siklus termal selama proses pengelasan, dimana material mengalami proses pemanasan, pelunakan atau pencairan, aliran, dan pembekuan kembali. Ketidakseragaman morfologi juga dapat dipengaruhi oleh karakteristik material hasil 3D printing yang memiliki struktur dan orientasi lapisan akibat proses deposisi sebelumnya. Hasil analisis EDX menunjukkan adanya unsur O, Mg, Al, Si, Zr, Rh, dan Hg. Unsur Al, Mg, dan Si merupakan unsur yang relevan untuk material berbasis aluminium dan dapat menunjukkan keberadaan unsur paduan pada daerah pengelasan. Kandungan oksigen sebesar 7,49 wt.% mengindikasikan kemungkinan terbentuknya oksida pada permukaan, yang dapat terjadi karena aluminium memiliki kecenderungan tinggi untuk membentuk lapisan oksida ketika terpapar lingkungan. Kandungan Si sebesar 13,79 wt.% juga menunjukkan adanya kontribusi unsur silikon pada daerah yang dianalisis.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa dari "Studi Kekuatan Tarik dan Sem Sambungan *Friction Stir Spot Welding* Alumunium dengan 3D Printing PLA" dapat disimpulkan :

1. Hasil pengujian tarik dari 18 spesimen menunjukkan bahwa kombinasi kecepatan putar 3000 rpm, waktu penekanan 5 sekon, dan kedalaman pin 6 mm pada spesimen C1 menghasilkan nilai tegangan tarik tertinggi yaitu 3,431 Kgf/mm^2 dalam variasi penelitian yang diuji. Sebaliknya, kombinasi kecepatan putar 2000 rpm, waktu penekanan 10 sekon, dan kedalaman pin 7 mm pada spesimen A2 menghasilkan nilai tegangan tarik terendah yaitu 0,720 Kgf/mm^2. Berdasarkan hasil ini mengindikasikan bahwa kekuatan sambungan FSSW dipengaruhi oleh interaksi antara kecepatan putar, waktu penekanan, dan kedalaman pin tool. Oleh karena itu, penentuan parameter optimal perlu mempertimbangkan keseimbangan antara pembentukan panas, deformasi plastis, kedalaman penetrasi, dan kualitas ikatan sambungan.
2. Hasil pengamatan SEM menunjukkan adanya perbedaan morfologi permukaan pada setiap area pengujian. Area 1 pada material aluminium menunjukkan permukaan dengan garis-garis dan area gelap yang tidak beraturan dengan unsur karbon (C), aluminium (Al), dan merkuri (Hg), dengan aluminium sebagai unsur yang memiliki konsentrasi atom tertinggi sebesar 90,30 at.%, sedangkan area 2 pada filamen hasil 3D printing menunjukkan permukaan yang tidak homogen dengan adanya alur memanjang dan area gelap dengan unsur silikon (Si) dan merkuri (Hg), dengan silikon memiliki konsentrasi atom sebesar 66,30 at.%, sedangkan merkuri memiliki konsentrasi berat terbesar sebesar 78,40 %. Pada area 3, yaitu daerah pengelasan aluminium dengan filamen hasil 3D printing, permukaan terlihat relatif lebih kasar dan tidak homogen dengan tekstur yang berbeda antara bagian yang lebih padat dan bagian yang lebih tidak beraturan dengan unsur oksigen (O), magnesium (Mg), aluminium (Al), silikon (Si), zirkonium (Zr), rhodium (Rh), dan merkuri (Hg), yang menunjukkan adanya perubahan dan keragaman komposisi unsur pada daerah hasil pengelasan. Perubahan morfologi tersebut menunjukkan adanya pengaruh proses manufaktur dan siklus termal selama pengelasan terhadap karakteristik permukaan material.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih saya ucapkan kepada Progam Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo yang telah memberikan ilmu dan wawasan yang bermanfaat serta rekan aslab, himpunan mahasiswa dan teman-teman yang telah membantu untuk menyelesaikan penelitian ini.

REFERENSI

[1] A. Sujatno and R. S., "Studi scanning electron microscopy (SEM) untuk karakterisasi proses oksidasi pada zirkonium," *Jurnal,* vol. 9, no. 2, 2022.
[2] A. Nuhafid and S. J., "Analisa pengaruh perbedaan feed rate terhadap kekuatan tarik dan impak aluminium 6061 metode pengelasan friction stir welding," *Jurnal,* vol. 5, no. 2, 2022.
[3] T. Aprianto, "SISTEMIK (Jurnal Ilmiah Nasional Bidang Ilmu Teknik)," 2022.
[4] I. Rani and M. R., "A study of process parameters of friction stir welded AA 6061 aluminum alloy in O and T6 conditions," *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences,* vol. 6, no. 2, pp. 61–66, 2023.
[5] M. Khusaini and F. Y., "Pengaruh kuat arus terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro pada pengelasan MIG (Metal Inert Gas) aluminium," *Jurnal Teknik Mesin,* vol. 1, no. 1, pp. 25–29, 2023.

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.
Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

[6] R. A. Y. Faruq and S. J., "Analisa pengaruh perbedaan diameter pin tool terhadap kekuatan tarik, impak, dan mikrografi pada aluminium 6061 dengan metode pengelasan friction stir welding (FSW)," *Jurnal,* vol. 7, no. 1, 2023.
[7] R. T. Wicaksono and S. A., "Pengaruh kuat arus pada pengelasan paduan aluminium 6061 dengan menggunakan metode las TIG terhadap kekerasan dan struktur mikro," *Jurnal,* vol. 1, no. 1, pp. 29–36, 2024.
[8] A. A. Santoso, "Proses penghubung pada velg/rim welding dengan metode pencekaman hidrolik," *Jurnal,* vol. 9, no. 14, pp. 143–159, 2024.
[9] D. Setyawan, "Seni etsa logam karya Rocka Radipa," Jurnal, vol. 2, no. 1, pp. 80–90, 2024.
[10] I. S. Sunardi, "Pengaruh reduksi canai terhadap sifat mekanis baja karbon rendah dengan sambungan flash butt welding," Jurnal, vol. 5, no. 2, 2025.
[11] Soleh, M. Z. A., & Mulyadi, M. Design and Build JIG Design on Friction Stir Welding Using Fillet Connection on AA6061-T6 Material. *Indonesian Journal of Innovation Studies,* 14, 10-21070. 2025.
[12] Wardana, A. I., & Mulyadi, M. Analysis of Underwater Friction Stir Welding (UFSW) Process Joint on AA6005-T6 Series Alumunium Alloy on Tensile Strength and Macro Structure: Analisa Sambungan Proses Underwater Friction Stir Welding (UFSW) pada Paduan Aluminium Seri AA6005-T6 terhadap Kuat Tarik dan Struktur Makro. 2025.
[13] Mulyadi, R. Firdaus, and R. S. Untari, "Optimization of Friction Stir Welding Parameters for AA6061-T651 Aluminum Alloy: Defect Analysis and Process Improvement," *Acad. Open,* vol. 8, no. 1, pp. 1–13, doi: 10.21070/acopen.8.2023.6665. 2025.
[14] R. Ramadan, Analisa kekuatan impak dan struktur mikro pengelasan logam berbeda ASTM A36 dan AISI 316 L setelah PWHT, *M.S. thesis*, Universitas Hasanuddin, 2025.
[15] Subkhan, M. F., & Mulyadi, M. Confirmation Experiment of Friction Stir Welding Process on Aluminum Alloy Aa-6061-T6561 on Tensile Strength and Weld Penetration: Eksperimen Konfirmasi Proses Friction Stir Welding pada Material Alumunium Alloy Aa-6061-T6561 Terhadap Kekuatan Tarik dan Penetrasi Las. 2025.

Conflict of Interest Statement:
The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.
Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.