

Analisis pengaruh bentuk pin pahat pada FSW terhadap kekuatan tarik sambungan aluminium AA6061-T6 menggunakan metode ANOVA

Rahmat Hafiz¹, Sri Raharno²

Program Studi Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung, Bandung

¹rahmathafiz2010@gmail.com, ²harnos@itb.ac.id

ABSTRACT

Fusion welding on aluminum is prone to defects due to welding at high temperatures. It can reduce the performance and quality of the joints. A new method known as solid-state welding or friction stir welding (FSW) was introduced by TWI in 1991. The FSW welding method is still being developed to produce efficient welding techniques. One of the factors that can affect the quality of the FSW is the type of tool's pin. In this study, observations were made of the effect of using dissimilar pins on the ultimate tensile strength of joints using three different types of pins. The types of pins used are tapered cylinder, tapered with flats, and tapered thread cylinder. The joint is a butt joint and uses AA6061-T6 with a thickness is 8 mm. Welding was carried out at 1200 rpm and 21.5 mm/minute. The tensile test results of the joining were analyzed using the Analysis of Variance (ANOVA) method. Based on the analysis and calculation, dissimilar pins have a significant effect on the tensile strength of joints. It can be seen from the significance value between the sample groups is (sig) $0.00 < 0.05$. However, after the Post Hoc test (Tuckey's HSD) to see the level of difference between the sample groups, only the types of pins tapered with flats were significantly different. Meanwhile, there is no difference between the pin-tapered cylinder and the tapered thread cylinder because it has a significance value (sig) $0.30 > 0.05$.

Keywords: AA6061-T6, anova, FSW, pin, post hoc

Received 30 September 2023; **Presented** 5 October 2023; **Publication** 27 May 2024

PENDAHULUAN

Cadangan sumber daya energi bersumber dari bahan bakar fosil diperkirakan akan terus menurun dan berpotensi mengakibatkan krisis energi di masa yang akan datang. Oleh sebab itu, pemerintah mendorong masyarakat untuk menggunakan teknologi yang lebih ramah lingkungan dan efisien [1]. Industri kendaraan merupakan sektor dengan nilai konsumsi bahan bakar bersumber energi fosil terbesar di Indonesia [2], sehingga diperlukan inovasi untuk menghasilkan konstruksi kendaraan yang ringan menggunakan metode produksi yang lebih efisien. Aluminium merupakan material yang sering digunakan pada konstruksi kendaraan untuk menggantikan material baja karena memiliki keunggulan bobot yang ringan, mampu mesin, ketahanan terhadap korosi serta nilai konduktivitas termal dan elektrik yang cukup baik. Jenis aluminium yang cukup banyak digunakan pada konstruksi kendaraan adalah aluminium dengan seri AA6061-T6. Aluminium tersebut menggunakan unsur paduan utama berupa Magnesium (Mg) dan Silikon (Si) serta perlakuan panas T6 untuk meningkatkan sifat mekanik material aluminium.

Sebuah kendaraan terdiri dari banyak komponen dan membutuhkan proses penyambungan seperti pengelasan. Teknik pengelasan konvensional menggunakan metode fusi yang dilakukan dengan cara memanaskan logam induk (*base metal*) dan material pengisi (*filler*) hingga mencapai temperatur leleh pada aluminium dinilai masih memiliki kekurangan [3]. Cacat berupa porositas, *cold cracking* dan distorsi akibat temperatur tinggi mengakibatkan penurunan kinerja dan kualitas sambungan. Pada tahun 1991 *The Welding Institute* (TWI) mengenalkan metode pengelasan baru yaitu pengelasan *solid state* yang dikenal sebagai *Friction Stir Welding* (FSW). Metode pengelasan tersebut dikenal dengan istilah metode pengelasan dingin (*solid-state*) karena dilakukan pada rentang 0,6 s/d 0,9% dari temperatur leleh (T_m) material kerja [4]. Sehingga FSW dianggap mampu menghasilkan sambungan yang bebas cacat akibat temperatur tinggi

Penelitian terhadap metode FSW telah banyak dilakukan. Pengamatan dilakukan terhadap parameter-parameter proses dan pengaruh parameter tersebut terhadap kinerja dan kualitas sambungan. Mishra dkk. (2014) menyatakan

kecepatan putaran pahat (N), kecepatan pengelasan (v) dan besar torsi pahat (T) memiliki pengaruh yang signifikan dalam menghasilkan sambungan yang baik [5]. Sedangkan salah satu faktor yang memengaruhi nilai torsi adalah bentuk dan jenis pin (*probe*) yang digunakan pada pahat FSW [6]. Pada proses FSW material mengalami proses deformasi plastis di bagian depan pin dan proses rekristalisasi pada bagian belakang pin seiring pergerakan pahat sepanjang lintasan pengelasan [5]. Pada penelitian yang dilakukan Trimbel dkk. (2015) menggunakan material AA2024-T3 dengan bervariasi beberapa jenis dan bentuk pin pahat. Dari hasil pengamatan terhadap tiga jenis pin, kekuatan tarik tertinggi dicapai oleh sambungan menggunakan jenis pin *tapered trifluet* [7]. Shinde dkk. (2016) juga melakukan penelitian terhadap AA6061 menggunakan jenis pin *square* serta menyatakan bentuk dan geometri pin tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan [8].

Bentuk dan geometri pin pahat dipengaruhi oleh jenis material kerja yang digunakan untuk memaksimalkan fungsi dari pin saat proses pengelasan [5-8]. Penggunaan jenis pin yang tidak sesuai dapat menghasilkan cacat (*defect*) pengelasan seperti *void*. Void masih sering ditemukan akibat proses deformasi dan rekristalisasi yang tidak optimal [9]. Cacat tersebut dapat menjadi penyebab awal kegagalan (*crack initiation*) saat sambungan menerima beban sehingga menurunkan kinerja sambungan terutama nilai kekuatan tarik. Untuk itu, penelitian ini akan mencoba mengamati kekuatan tarik pada sambungan FSW aluminium AA6061-T6 menggunakan tiga jenis pin yang berbeda. Pengujian tarik (*tensile test*) dan analisis menggunakan metode *Analysis of Variance* (Anova) perlu dilakukan untuk melihat seberapa signifikan pengaruh masing-masing pin yang digunakan terhadap kekuatan tarik sambungan menggunakan metode FSW. Sehingga dapat ditentukan jenis pin yang dapat menghasilkan sambungan dengan kekuatan tarik (UTS) paling optimal.

METODE PENELITIAN

Proses penelitian diawali dengan melakukan studi literatur berupa pengumpulan informasi dan jurnal yang bersumber dari internet maupun media cetak. Data dan informasi yang dikumpulkan berkaitan dengan permasalahan dan tujuan yang menjadi fokus dalam penelitian ini. Setelah mendapatkan informasi yang dibutuhkan dan

dilanjutkan dengan pembuatan rancangan penelitian. Proses dilanjutkan dengan memastikan ketersediaan material dan peralatan yang akan digunakan dalam penelitian serta diikuti proses pengelasan, pengujian dan analisis hasil pengujian.

Pada penelitian ini dilakukan pengamatan terhadap penggunaan tiga jenis pin berbeda yaitu jenis *tapered cylinder*, *tapered with flats* dan *tapered thread cylinder* pada sambungan aluminium AA6061-T6 menggunakan metode FSW. Jenis material yang digunakan sebagai pahat adalah baja AISI-H13, material tersebut cukup umum digunakan dalam FSW pada aluminium karena cukup mudah dan murah dalam proses permesinan [10]. Proses pengelasan dilakukan menggunakan mesin *freis/milling* konvensional dan jenis sambungan yang digunakan adalah *butt join*. Setiap jenis pin dilakukan pengelasan sebanyak tiga kali, masing-masing spesimen tersebut akan dibuatkan sampel uji tarik sebanyak tiga buah menggunakan acuan standar ASTM E8. Data-data hasil pengujian tarik dilakukan analisis menggunakan metode Anova untuk melihat pengaruh bentuk pin pahat terhadap kekuatan tarik (UTS) sambungan.

Persiapan Alat dan Bahan

Material kerja yang digunakan pada penelitian ini adalah aluminium AA6061-T6 dan disambung menggunakan jenis sambungan *butt joint*. Sebelum dilakukan pengelasan benda kerja dilakukan pemotongan sesuai ukuran yang ditentukan terlebih dahulu. Hasil potongan tersebut dirapikan dan dibersihkan untuk menghindari kotoran yang dapat menjadi penyebab cacat pada sambungan [3]. Spesifikasi material kerja dapat dilihat pada Tabel 1.

Proses pengelasan dilakukan menggunakan mesin *freis* konvensional (*vertical milling machine*) sehingga dibutuhkan landasan (*anvil*) dan alat cekam (*clamp*) khusus untuk memastikan benda kerja tidak bergerak atau bergeser saat dilas. Landasan terdiri dari dua lapisan yang terbuat dari bahan jenis *mild steel* (ST37) yang kontak langsung dengan benda kerja serta lapisan novotex yang bersifat isolator pada bagian yang kontak langsung dengan *bed* mesin *freis*. Hal tersebut bertujuan agar panas yang dihasilkan gesekan antara pahat dan benda kerja tidak mengalir ke *bed* mesin. Alat cekam dibuat khusus menyesuaikan benda kerja dengan pengunci berupa mur dan baut ukuran M12 sebanyak 4 pasang. Skema pemasangan benda kerja pada landasan dan alat cekam serta mesin yang

digunakan dalam penelitian ini terlihat pada Gambar 1.

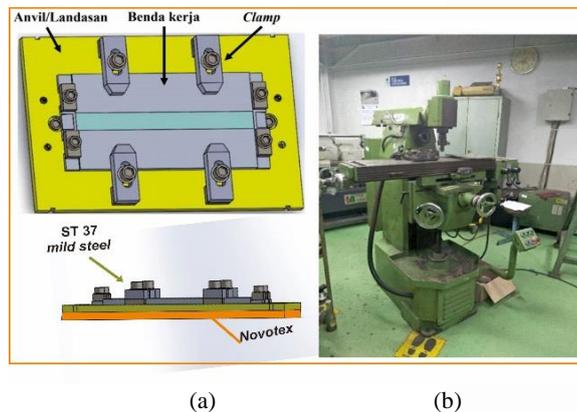
Pahat merupakan komponen utama dalam proses FSW. Jenis material, bentuk dan geometri pahat tergantung pada jenis dan ketebalan material yang akan dilas. Pahat yang digunakan dalam FSW untuk material aluminium dapat terbuat dari material baja AISI-H13 yang dibentuk melalui proses bubut dan *milling*. Konstruksi pahat pada penelitian ini terdiri dari dua bagian utama yaitu bagian *shoulder* dan pin yang dapat dipisah dan diganti sesuai dengan bentuk pin yang akan digunakan. Pin dikunci menggunakan baut M5 x 0,8 untuk menghindari kemungkinan terjadi *slip* antara bagian *shoulder* dan pin saat pengelasan.

Pin memiliki bagian yang cukup kritis yang dapat mengalami kegagalan saat melakukan proses pengelasan sehingga selain harus memperhatikan kekuatan material (*strenght*) dalam merancang pahat juga harus memperhatikan dimensi dari pin.

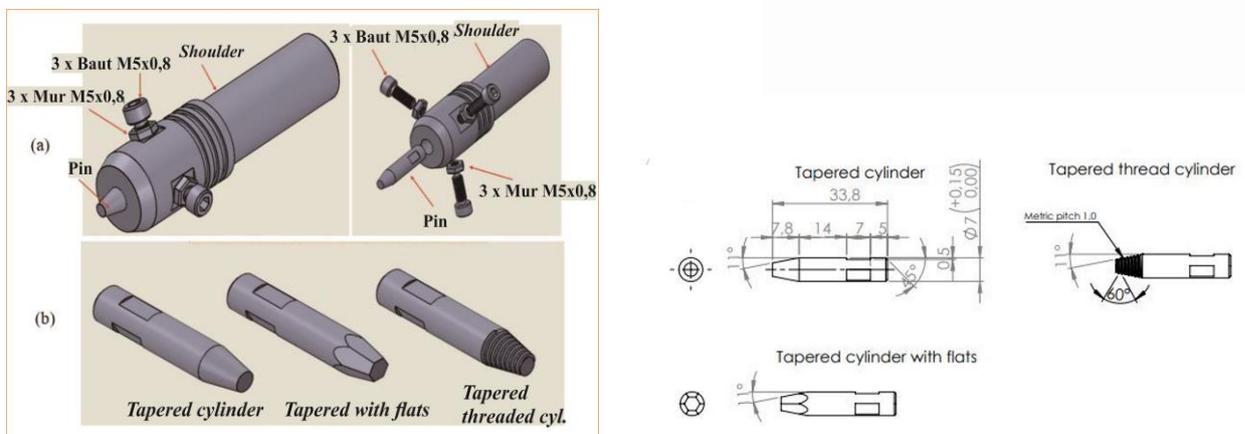
Pengelasan aluminium AA6061-T6 dengan ketebalan 8 mm dapat menggunakan diameter pin 7 mm (sudut ketirusan 11°). Setelah dilakukan studi literatur dan perhitungan secara analitik, dimensi pahat yang digunakan masih berada dalam batas aman terhadap kegagalan [11].

Tabel 1. Spesifikasi material kerja

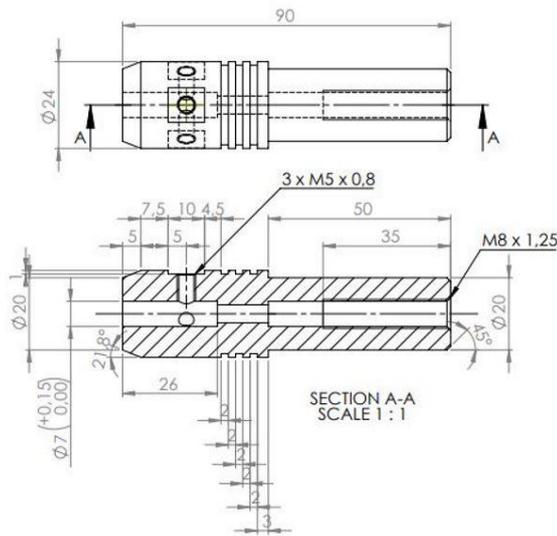
Material kerja	
Jenis material	AA6061-T6
Dimensi (p x l x t)	(150 x 55 x 8) mm
Kekuatan tarik (UTS)	345 MPa



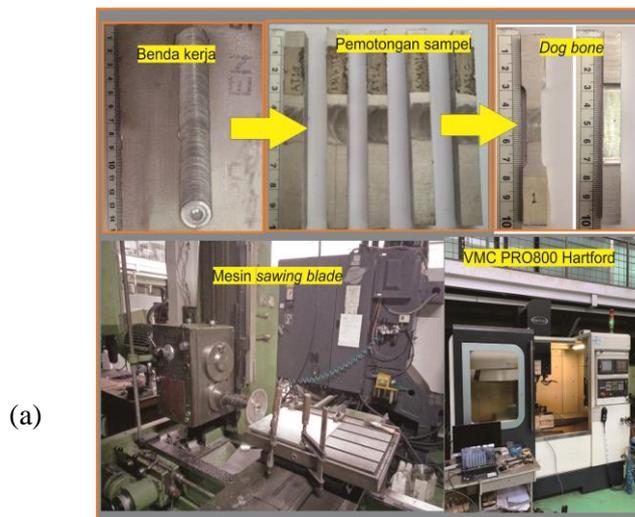
Gambar 1. (a) Skema landasan benda kerja (b) Mesin *milling* vertikal



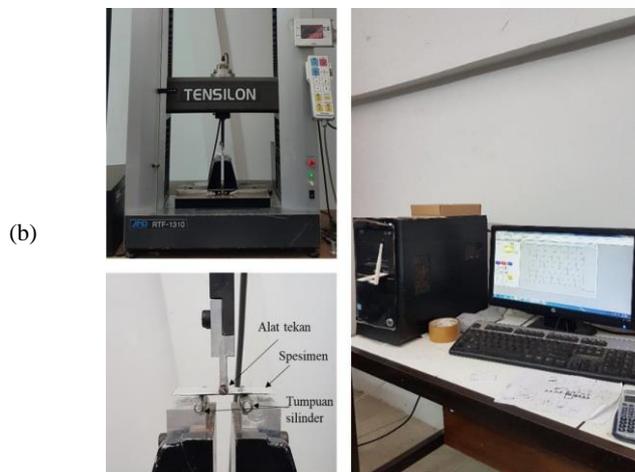
Gambar 2. (a) Konsep rancangan pahat FSW (b) Variasi bentuk pin



Gambar 3. Rancangan pahat FSW

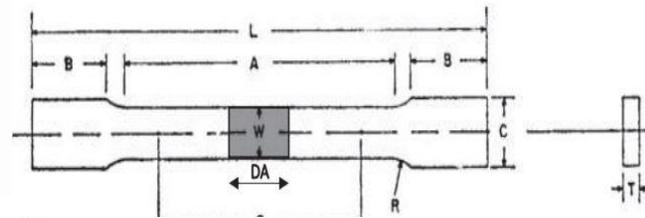


(a)



(b)

Gambar 4. (a) Pembuatan spesimen uji tarik (*dog bone*), (b) Alat uji tarik



Keterangan:

- | | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| - Panjang gauge length (G) = 25 mm | - Panjang grip section (B) = 30 mm |
| - Lebar gauge length (W) = 6 mm | - Lebar grip section (C) = 10 mm |
| - Tebal (T) = 8 mm | - Lebar daerah las (DA) = 20 mm |
| - Radius fillet (R) = 6 mm | - Panjang tereduksi (A) = 32 mm |
| - Panjang keseluruhan (L) = 100 mm | |

Gambar 5. Dimensi spesimen uji tarik ASTM E8

Skema dan ukuran dimensi pahat dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.

Setelah dilakukan proses pengelasan, permukaan sambungan dilakukan pemeriksaan cacat yang terdapat pada permukaan sambungan secara visual. Setelah itu proses dapat dilanjutkan dengan pengujian tarik. Pengujian tarik dapat dilakukan dengan mempersiapkan spesimen terlebih dahulu dengan cara memotong benda kerja menggunakan *sawing blade*.

Spesimen dibentuk sesuai dengan ketentuan pada standar ASTM E8 menggunakan mesin CNC *milling*. Untuk peralatan potong dan alat uji tarik yang digunakan pada pengujian tarik serta dimensi spesimen uji dapat terlihat pada Gambar 4 dan Gambar 5.

Proses pengelasan

Setelah mempersiapkan material dan peralatan yang diperlukan, proses pengelasan dapat dilakukan seperti langkah-langkah sebagai berikut:

1. Membersihkan terlebih dahulu permukaan benda kerja yang akan digunakan menggunakan kertas amplas (*sand paper*). Pengamplasan bertujuan untuk menghilangkan

material pengotor yang menempel pada permukaan terutama pada area yang akan dilas.

2. Memasang benda kerja pada alat cekam dan anvil yang telah dipersiapkan dan memastikan benda kerja terpasang datar dan terkunci dengan kuat menggunakan kunci pas. Celah antar kedua benda kerja yang akan dilas harus cukup rapat untuk menghindari benda kerja tidak bergeser pada saat proses pengelasan.

3. Memasang pahat pada *spindle* menggunakan *collet chuck* dengan ukuran yang sesuai dengan diameter pahat (20 mm) kemudian mengubah kemiringan sumbu pahat sesuai dengan nilai *tilt angle* yang digunakan (1,5°).

4. Mengatur kecepatan putar spindle di angka 1200 rpm dan *feed rate* atau kecepatan transversal di angka 21,5 mm/menit pada tuas pengaturan putaran mesin.

5. Memposisikan pahat pada titik awal pengelasan dalam kondisi *spindle* yang sudah berputar dan menyentuh permukaan benda kerja dengan ujung pin. Mencari titik referensi yang akan menjadi acuan dalam menghitung kedalaman penetrasi pahat. Pemasangan benda kerja dan pahat dapat dilihat pada Gambar 6

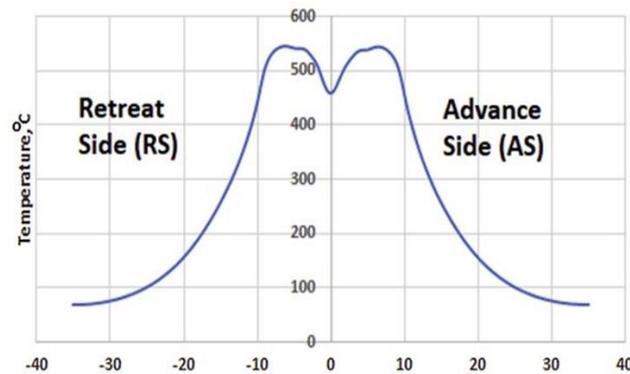


Gambar 6. Pemasangan benda kerja dan pahat

6. Melakukan penetrasi pahat ke dalam benda kerja dengan memutar tuas pengatur ketinggian meja kerja (*bed*) hingga mencapai *plunge depth* 0,2 mm. Kedalaman penetrasi dapat ditentukan menggunakan indikator pada tuas putar atau menggunakan *dial gauge*. Untuk ketebalan material 8 mm, kedalaman penetrasi yang digunakan sebesar 7,8 mm.

7. Setelah pin melakukan penetrasi, sebelum melakukan gerak sepanjang lintasan pengelasan benda kerja diberikan panas awal (*preheat*) dengan mempertahankan pahat tetap diam pada titik awal (*starting point*). Pahat ditahan hingga permukaan benda kerja pada titik dengan jarak tertentu dari pusat pengelasan (sekitar 20 mm) mencapai temperatur optimal. Durasi yang dibutuhkan pahat untuk pemanasan awal benda kerja

untuk mencapai temperatur optimal disebut dengan *dwelling time* (DT). Temperatur optimal yang harus dicapai benda kerja pada area pengelasan adalah sekitar 0,6–0,9 T_m (*melting point*) atau sekitar 450 °C untuk jenis material AA6061-T6 [4]. Penggunaan alat pengukur temperatur untuk mengukur langsung di daerah pusat pengelasan cukup sulit dilakukan sehingga pengukuran temperatur pada proses pengelasan digunakan acuan berupa data hasil eksperimen dan simulasi dari penelitian terdahulu yang menjelaskan gradasi temperatur per satuan jarak pengelasan. Temperatur optimal pada daerah pusat pengelasan sekitar 450 °C tercapai ketika temperatur pada jarak 20 mm memiliki nilai sekitar 150 °C [12]. Gradasi temperatur dari pusat area pengelasan pada proses FSW material AA6061-T6 dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Gradasi temperatur benda kerja pada material AA6061-T6 [13]

8. Saat benda kerja mencapai temperatur optimal, proses pengelasan dapat dilakukan di sepanjang lintasan pada jarak yang telah ditentukan.

9. Setelah pahat mencapai titik akhir pengelasan, pergerakan benda kerja dihentikan dan pahat ditarik dari benda kerja dengan menurunkan tuas pengatur ketinggian meja kerja. Proses pengelasan akan menghasilkan lubang yang disebut dengan *exit hole* yang termasuk kedalam kategori cacat pada proses FSW. Setelah melepas benda kerja dari alat cekam lakukan pengamatan dan pemeriksaan secara visual menggunakan lembaran pemeriksaan sesuai standar AWS D17.3.

10. Melakukan langkah 1 sampai 9 sebanyak tiga kali perulangan menggunakan jenis pin yang sama. Proses yang sama dilakukan pada setiap jenis pin sehingga didapatkan sebanyak sembilan benda kerja yang akan digunakan sebagai spesimen uji. Spesimen tersebut digunakan untuk mengamati sifat mekanik

terutama kekuatan tarik (UTS) sambungan hasil pengelasan FSW

Proses pengujian

Uji tarik dilakukan bertujuan untuk mengetahui kekuatan tarik (*ultimate tensile strength*) sambungan hasil pengelasan. Data-data yang diperoleh akan dibandingkan dengan kekuatan yang dimiliki oleh setiap sambungan masing-masing jenis pin pahat yang digunakan. Uji tarik dapat digolongkan ke dalam *destructive test* karena sebelum melakukan pengujian perlu dilakukan preparasi spesimen sesuai standar pengujian. Pada penelitian ini digunakan standar uji tarik ASTM E8 sehingga benda kerja harus dilakukan pemotongan sesuai ketentuan dimensi spesimen uji (*dog bone*) yang tertera pada standar tersebut. Adapun langkah-langkah uji tarik dijelaskan pada poin berikut:

Mempersiapkan spesimen yang akan diuji dengan melakukan pemotongan sesuai standar yang terlihat pada Gambar 5.

Memasang dan menjepit spesimen pada kedua *chuck* mesin uji tarik dan memastikan bahwa posisi sambungan las berada di tengah antara dua sisi *chuck*.

Menyalakan mesin uji tarik dan melakukan pengaturan kecepatan rata-rata penarikan spesimen sebesar 0,5 mm/detik dan besar pembebanan awal sebesar 0 newton pada komputer pengontrol.

Melakukan pengujian tarik dengan menekan tombol *Start* pada komputer pengontrol sehingga spesimen mulai mendapatkan beban tarik. Spesimen akan mengalami pembebanan dimulai dari 0 N hingga spesimen putus setelah melewati beban maksimum yang dapat ditahan oleh spesimen.

Hasil pengujian tarik berupa beban maksimum (N) dan jarak *displacement* atau regangan secara otomatis terekam oleh komputer pengontrol yang terhubung dengan mesin uji tarik.

Melakukan pemeriksaan bentuk patahan spesimen dan melakukan dokumentasi dalam bentuk foto.

Simpan file dan mencatat hasil pengujian dan lakukan langkah yang sama pada setiap spesimen uji.

Setelah didapatkan data-data hasil pengujian tarik dalam bentuk nilai beban (gaya) maksimum hingga spesimen uji mengalami kegagalan, nilai tersebut dirubah ke dalam bentuk nilai tegangan dengan membagi nilai beban maksimum (N) dengan luas penampang spesimen uji sehingga didapatkan nilai kekuatan tarik sambungan dalam satuan tegangan (MPa). Nilai kekuatan tarik (UTS) sambungan selanjutnya dilakukan analisis menggunakan metode *Analysis of Variance* (Anova) untuk melihat pengaruh perbedaan pin terhadap rerata nilai kekuatan tarik sambungan.

Jenis uji Anova yang digunakan dalam penelitian ini adalah Anova Satu-Faktor (*One-*

Way) dengan satu variabel bebas dan terikat. Variabel bebas yang diamati adalah jenis pin pahat dan kekuatan tarik sambungan sebagai variabel terikat. Teknik analisis Anova Satu-Faktor berfungsi untuk menguji sebuah hipotesis yang akan membuktikan nilai rata-rata masing-masing variabel tersebut sama atau berbeda secara signifikan. Aplikasi atau program komputer digunakan untuk mempermudah melakukan analisis dan mengolah data-data secara statistika. Adapun langkah-langkah uji Anova yang dilakukan meliputi perihal sebagai berikut:

- Menentukan hipotesis ($H_0 ; H_1$)
- Menentukan tingkat signifikansi (α)
- Melakukan uji normalitas (Shapiro wilk)
- Melakukan uji homogenitas varian
- Melakukan uji *One-Way* Anova
- Uji Anova dapat dilakukan jika data memenuhi ketentuan uji normalitas dan homogenitas.
- Melakukan uji Post Hoc (Tukey's HSD)

Uji Post Hoc dilakukan apabila nilai rerata data berdasarkan uji Anova memiliki perbedaan secara signifikan ($\text{sig.} < \alpha$). Salah satu metode yang digunakan adalah Tukey's HSD sehingga dapat dilihat kelompok data yang memiliki persamaan maupun perbedaan rata-rata.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan uji tarik maka didapatkan data-data berupa nilai kekuatan tarik (UTS) sambungan hasil pengelasan FSW menggunakan pin yang berbeda. Setiap pin dilakukan pengelasan sebanyak tiga kali dan masing-masing benda kerja dibuatkan sampel uji tarik sebanyak tiga buah. sehingga didapatkan sembilan sampel uji tarik untuk masing-masing jenis pin. Adapun data-data hasil uji tarik dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil uji tarik sambungan FSW

Jenis Pin	Kekuatan Tarik (MPa)		
<i>Tapered Cylinder</i>	115,69	123,32	125,65
	121,88	115,21	118,56
	129,83	128,33	124,31
<i>Tapered with Flats</i>	161,04	148,22	157,03
	145,44	144,86	150,63

Jenis Pin	Kekuatan Tarik (MPa)		
	140,28	145,76	142,18
	116,49	115,78	126,06
<i>Tapered Thread Cylinder</i>	124,52	119,11	118,29
	114,28	107,68	122,55

Untuk melihat pengaruh perbedaan pin pahat terhadap kekuatan tarik pada FSW menggunakan metode Anova, maka terlebih dahulu perlu ditentukan hipotesis awal yang akan diuji melalui analisis statistika. Adapun hipotesis yang digunakan sesuai dengan tujuan awal penelitian adalah sebagai berikut:

H₀; Nilai rata-rata UTS adalah sama, tidak ada pengaruh perbedaan pin pahat pada FSW.

H₁; Rata-rata UTS berbeda, perbedaan pin pahat pada FSW memiliki pengaruh yang signifikan terhadap UTS.

Tingkat signifikansi yang digunakan dalam penelitian ini adalah 5% ($\alpha = 0,05$), Nilai 5% diambil dari ketetapan yang umum digunakan dalam melakukan analisis statistika yang berarti data-data yang digunakan memiliki *confidence*

interval sebesar 95%. Setelah hipotesis dan nilai α ditentukan, sebelum melakukan uji Anova data-data hasil pengujian harus terlebih dahulu memenuhi ketentuan dalam uji normalitas dan homogenitas.

Uji Normalitas

Uji normalitas dilakukan untuk memastikan data yang diperoleh tidak mengalami penyimpangan dan terdistribusi secara normal, sehingga layak untuk dilakukan uji Anova. Adapun ketentuan yang harus terpenuhi dalam uji normalitas adalah nilai signifikansi tiap variabel uji lebih besar dari nilai tingkat signifikansi yang ditetapkan ($\text{sig.} > \alpha$). Setelah dilakukan perhitungan menggunakan aplikasi/ program komputer didapatkan data seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil uji normalitas

Jenis Pin	Shapiro-Wilk ^a
	Sig.
<i>Tapered Cylinder</i>	0,66
<i>Tapered with Flats</i>	0,34
<i>Tapered Thread Cylinder</i>	0,85

a. *Lilliefors Significance Correction*

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 3 diatas dapat dilihat bahwa nilai signifikansi setiap kelompok variabel data ($\text{Sig.} > 0,05$). Dengan demikian data-data hasil pengujian tarik dinyatakan terdistribusi secara normal.

Uji Homogenitas Varian

Uji homogenitas varian dilakukan untuk memastikan data yang diperoleh dari seluruh

kelompok sampel memiliki nilai variansi yang sama, sehingga layak untuk dilakukan uji Anova. Adapun ketentuan yang harus terpenuhi dalam uji homogenitas adalah nilai signifikansi seluruh kelompok sampel lebih besar dari nilai tingkat signifikansi yang ditetapkan ($\text{sig.} > \alpha$). Setelah dilakukan perhitungan menggunakan aplikasi/program komputer didapatkan data seperti terlihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil uji homogenitas varian

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
0,27	2	24	0,76

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4 diatas dapat dilihat bahwa nilai signifikansi seluruh kelompok sampel (Sig) $0,76 > 0,05$. Dengan demikian kelompok sampel data-data hasil pengujian tarik dapat dinyatakan memiliki variansi yang sama atau homogen.

Uji Anova Satu-Faktor (One-Way)

Setelah uji normalitas dan homogenitas varian terpenuhi, maka uji Anova dapat dilakukan untuk menguji pengaruh jenis pin pahat terhadap

kekuatan tarik sambungan FSW. Sesuai dengan hipotesis awal yang telah ditetapkan, maka ketentuan yang harus dipenuhi adalah sebagai berikut

$Sig > \alpha$; maka H_0 diterima

$Sig < \alpha$; maka H_0 ditolak

Setelah dilakukan perhitungan menggunakan aplikasi/program komputer didapatkan data seperti terlihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil uji Anova Satu-Faktor

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4771,99	2	2385,99	67,74	0,00
Within Groups	845,33	24	35,22		
Total	5617,33	26			

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 5 hasil uji Anova diatas dapat dilihat bahwa nilai signifikansi antar kelompok sampel memiliki nilai (Sig) $0,00 < 0,05$. Dengan demikian hipotesis awal yang dibuat (H_0) dapat ditolak atau rata-rata data kelompok sampel hasil pengujian tarik memiliki perbedaan. Sehingga

dapat disimpulkan bahwa pengelasan FSW pada aluminium AA6061-T6 menggunakan jenis pin yang berbeda memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik (UTS) sambungan. Adapun nilai kekuatan tarik rata-rata sambungan menggunakan tiga jenis pin yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Kekuatan tarik (UTS) sambungan FSW menggunakan tiga jenis pin berbeda Descriptive

Jenis Pin	N	Mean	Std. Dev.	Std. Error	Min.	Max
Tapered Cylinder	9	122,53	5,20	1,73	115,21	129,83
Tapered with Flats	9	148,38	6,82	2,27	140,28	161,04
Tapered Thread Cylinder	9	118,30	5,65	1,88	107,68	126,06
Total	27	129,74	14,69	2,82	107,68	161,04

Kekuatan tarik sambungan tertinggi diperoleh dari hasil pengelasan menggunakan jenis pin tapered with

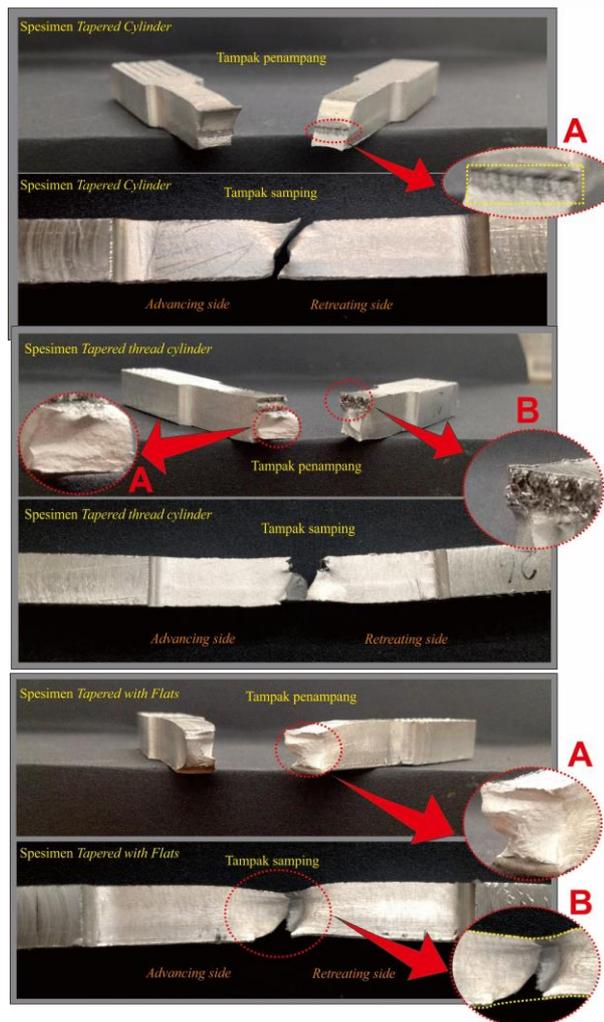
flats yaitu sebesar 148,38 MPa. Sedangkan untuk jenis pin tapered cylinder memiliki kekuatan tarik sebesar 122,53 MPa serta pin tapered thread cylinder sebesar 118,30 MPa.

Hasil uji Anova menyatakan bahwa hipotesis awal (H_0) ditolak sehingga pengujian lanjutan berupa uji *Post Hoc* (Tuckey's HSD) dapat dilakukan untuk melihat variabel atau jenis pin mana saja yang memiliki persamaan maupun perbedaan rerata. Setelah dilakukan perhitungan menggunakan aplikasi atau program komputer didapatkan data seperti terlihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil uji Post Hoc (Tuckey's HSD)

(I) Jenis Pin	(J) Jenis Pin	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.
Tapered Cylinder	Tapered with Flats	-25,85*	2,79	0,00
	Tapered Thread Cylinder	-4,22	2,79	0,30
Tapered with Flats	Tapered Cylinder	25,85*	2,79	0,00
	Tapered Thread Cylinder	30,07*	2,79	0,00
Tapered Thread Cylinder	Tapered Cylinder	-4,22	2,79	0,30
	Tapered with Flats	-30,07*	2,79	0,00

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.



Gambar 8. Bentuk morfologi patahan hasil uji tarik

Perbedaan hasil sambungan FSW menggunakan tiga jenis pin yang berbeda secara kualitatif juga dapat terlihat dari bentuk morfologi patahan hasil uji tarik. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 8.

Berdasarkan hasil perhitungan yang terlihat pada Tabel 7, Jenis pin yang memiliki perbedaan rata-rata secara signifikan dengan yang lain adalah jenis pin *tapered with flats*. Hal tersebut dapat dilihat dari nilai signifikansi jenis tersebut terhadap jenis pin lain sebesar (sig) $0,00 < 0,05$. Sedangkan untuk jenis pin *tapered cylinder* dan *tapered thread cylinder* tidak terdapat pengaruh atau perbedaan rerata yang signifikan. Hal tersebut dapat dilihat dari nilai signifikansi antara kedua jenis pin tersebut berdasarkan uji Post Hoc (Tuckey's HSD) adalah (sig) $0,30 > 0,05$.

Dari hasil pengamatan bentuk morfologi patahan uji tarik terlihat jenis pin *tapered with flats* memiliki kontur permukaan penampang yang seragam. Hal tersebut mengindikasikan proses pengadukan material terjadi secara optimal serta tidak ditemukan indikasi cacat bawah permukaan terutama *void*. Namun untuk penggunaan jenis pin *tapered cylinder* dan *tapered thread cylinder* terlihat permukaan penampang yang tidak seragam atau keropos. Hal tersebut mengindikasikan proses pengelasan terjadi secara tidak optimal dan menghasilkan cacat bawah permukaan berupa *void*. Cacat bawah permukaan tersebut dapat menurunkan kualitas dan kinerja pengelasan sehingga dapat menurunkan kekuatan tarik sambungan saat menerima pembebanan.

KESIMPULAN

Penggunaan jenis pin pahat yang berbeda pada FSW terhadap aluminium AA6061-T6 memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan. Hal tersebut dapat terlihat dari hasil uji Anova Satu-Faktor yang menunjukkan nilai signifikansi antar kelompok sampel (sig) $0,00 < 0,05$. Namun setelah dilakukan uji Post Hoc (Tuckey's HSD) untuk melihat tingkat perbedaan antar masing-masing kelompok sampel. Pengujian tersebut menunjukkan hanya jenis pin *tapered flats* yang memiliki perbedaan yang signifikan. Sedangkan antara jenis pin *tapered cylinder* dan *tapered thread cylinder* tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Hal tersebut dapat dilihat dari nilai signifikansi antara kedua jenis pin tersebut sebesar (sig) $0,30 > 0,05$.

Salah satu faktor yang memengaruhi kekuatan tarik sambungan pengelasan adalah bentuk dan

jenis cacat yang terdapat pada sambungan. Cacat yang terbentuk pada daerah sambungan dapat menurunkan kinerja sambungan karena dapat menjadi *crack initiation* saat menerima pembebanan. Setelah dilakukan pengamatan terhadap bentuk morfologi patahan hasil uji tarik, Jenis pin *tapered with flats* mampu menghasilkan sambungan yang bebas cacat. Sedangkan jenis pin *tapered cylinder* dan *tapered thread cylinder* ditemukan indikasi cacat bawah permukaan berupa *void*.

DAFTAR PUSTAKA

- Lestari, V. P. (2021). Permasalahan dan Tantangan Program Peningkatan Kontribusi Energi Baru dan Terbarukan dalam Bauran Energi Nasional. data diperoleh melalui situs internet: <https://berkas.dpr.go.id/puskajiakn/analisis-ringkas-cepat/public-file/analisis-ringkas-cepat-public-21.pdf>. Di unduh pada tanggal: 07 Juli 2022.
- BPPT. (2021). Outlook Energi Indonesia Tahun 2021. data diperoleh melalui situs internet: <https://www.slideshare.net/tamihakim/bppt-outlook-energiindonesia-2021pdf>. Diunduh pada tanggal: 07 Juli 2022
- Mishra, R., Roy, R. B., Dutta, S., Pal, S. K., Chakravarty, D. (2018). A review on sensor based monitoring and control of friction stir welding process and a roadmap to Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Processes*, 36, 373-397.
- Padhy, G., Wu, C., Gao, S. (2018). Friction stir based welding and processing technologies-processes, parameters, microstructures and applications: A review. *Journal of Materials Science Technology*, 34, 1-38.
- Mishra, R., De, P. S., Kumar, N. (2014). Fundamentals of the friction stir process. *Springer*. 13-58.
- Maji, P., Karmakar, R., Nath, R. K., Paul, P. (2022). An overview on friction stir welding/processing tools. *Materials Today: Proceedings*.
- Trimble, D., O'Donnell, G., Monaghan, J. (2015). Characterisation of tool shape and rotational speed for increased speed during friction stir welding of AA2024-T3. *Journal of Manufacturing Processes*, 17, 141-150
- Shinde, R. D., Rathi, M. G. (2016). Optimization of FSW process parameter to achieve maximum tensile strength of aluminum alloy AA6061.

International Research Journal of Engineering-Technology, **3**(2), 936-943

Wang, G., Zhao, Y., Hao, Y. (2018). Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing. *Journal of Materials Science Technology*, **34**, 73-91

Wirjolukito, S., Wijaya, J. P. (2020). Analisis Hasil Friction Stir Welding Aluminium 5083-H112 Menggunakan Taper Threaded Cylinder Pin dengan Variasi Kecepatan Rotasi dan Translasi. *Jurnal Metalurgi dan Material Indonesia*, **3**, 38-46.

Özel, T., Hsu, T.-K., Zeren, E. (2005). Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel. *The international journal of advanced manufacturing technology*, **25**, 262-269.

Salloomi, K. N. (2019). Fully coupled thermo-mechanical simulation of friction stir welding of aluminum 6061-T6 alloy T-joint. *Journal of Manufacturing Processes*, **45**, 746-754.